

**KARBON POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2015  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Mustafa Yunus AŞKIN**

**KARBON POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mustafa Yunus AŞKIN**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2015**

Mustafa Yunus AŞKIN tarafından hazırlanan “KARBON POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Güngör

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2015

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Sadettin ŞAHİN (KÜ)

Üye : Prof. Dr. Ali GÜNGÖR (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erkan KOÇ (KBÜ)



06./07/2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mustafa Yunus AŞKIN

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **KARBON POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mustafa Yunus AŞKIN**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Ali GÜNGÖR**

**Haziran 2015, 65 sayfa**

Bu çalışmada, CYTEC Engineered Materials firmasından temin edilmiş olan HMF 934 kodlu karbon prepregerler kullanılarak toplam 7 kattan oluşan yönsüz ve yönlü olarak adlandırılan kompozit malzemeler vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir. Kürleme işlemi 170° C sabit sıcaklıkta, üç farklı basınçta (16" = 0,53 atm, 20" = 0,67 atm ve 27" = 0,9 atm) ve iki farklı sürede (160 dk ve 200 dk) yapılmıştır. Yönsüz kompozitlerde karbon dokuma kumaşlar 0° açıda, yönlü kompozitlerde ise kumaşlar sırayla 0° ve 45° açıyla dizilmiştir. Kompozit malzemeleri incelemek için sehimi ölçümü, çekme testi, üç nokta eğme testi ve SEM analizleri yapılmıştır.

Yapılan sehimi ölçümlerinden artan kürleme basıncıyla yönsüz ve yönlü kompozitlerde sehimi miktarının arttığı fakat artan kürleme süresiyle düştüğü görülmüştür. Ayrıca, yönlü kompozitlere kıyasla yönsüz kompozitlerin daha düşük esneme gösterdiği belirlenmiştir.

Çekme ve eğme deney sonuçlarından artan kütleme süresi ve artan basınçla beraber epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının, elastiklik modülünün ve eğme dayanımının arttığı görülmüştür.

Kumaş yönlenmesinin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde yönsüz kompozit malzeme grubunun diğer gruba göre daha yüksek çekme dayanımına, elastiklik modülüne, eğme dayanımına ve daha düşük esneme özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Son olarak taramalı elektron mikroskop görüntülerinden demet içerisindeki karbon liflerin epoksi matrisle birbirine sıkı bağlandıkları ve kırılma esnasında gevrek davranış gösterdikleri görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Karbon prepreg, karbon fiber, polimer matrisli kompozitler.

**Bilim Kodu** : 915.1.092

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **PRODUCTION OF CARBON POLYMER MATRIX COMPOSITES AND INVESTIGATION OF PROPERTIES**

**Mustafa Yunus AŞKIN**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Ali GÜNGÖR**

**June 2015, 65 pages**

In this study, HMF 934 coded carbon prepreg fabrics obtained from CYTEC Engineered Materials company were used to manufacture directional and nondirectional composite materials composed of 7 layers by using vacuum bagging method. Curing process was done at three different pressures (16" = 0,53 atm, 20" = 0,67 atm and 27" = 0,9 atm) and two different curing times (160 and 200 min) at 170° C constant temperature. Fabric orientation was 0° in nondirectional composites and 0° and 45° alternating layers in directional composites. Deflection measurement, tensile test, 3-point bend test and SEM analyzes were performed to analyse the composite materials.

From deflection measurements, it was seen that deflection in directional and nondirectional composites increased with increasing pressure but decreased with

increasing curing time. In addition, it was observed that nondirectional composites exhibit lower deflection as compared to directional composites.

From the results of tension and bending tests, it was observed that tensile strength, elastic modulus and bending strength of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites increased with increasing curing time and pressure.

When the effect of carbon fabric orientation on mechanical properties was investigated, it was seen that nondirectional composites had higher tensile strength, elastic modulus and bending strength and lower deflection than directional composites.

Finally, it was seen from scanning electron microscope images that carbon filaments in individual tows were tightly bonded with epoxy matrix and they show brittle behavior during fracture.

**Keywords** : Carbon prepreg, carbon fiber, polymer matrix composites.

**Science Code** :915.1.092



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Ali GÜNGÖR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında yardımcı olan THY Teknik çalışanı Remzi YILDIZ'a, deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde çalışan öğretim üyesi hocalarım ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma, Demir Çelik Enstitüsü'nde çalışan Araştırma görevlileri Yüksel AKINAY, Muhammet Emre TURAN, Alper İNCESU, Fazıl HÜSEM'e ve KBÜ-BAP-14/2-YL-035 numaralı bilimsel araştırma projemize verdikleri destekten ötürü Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için sevgili aileme ve eşim Rümeyza AŞKIN'atüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	8
2.1.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.....	9
2.1.2. Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler .....	11
2.1.3. Tabakalı kompozitler .....	14
2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER .....	18
2.3. EPOKSİ REÇİNELER .....	22
2.4. KARBON ELYAFLAR .....	27
2.5. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	31
2.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI.....	35
BÖLÜM 3 .....	38
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	38
3.1. SEHİM ÖLÇÜMÜ .....	41

3.2. ÇEKME TESTİ ÇALIŞMASI.....	41
3.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ ÇALIŞMASI.....	42
3.4. SEM ÇALIŞMASI .....	44
BÖLÜM 4 .....	45
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	45
4.1. SEHİM ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI .....	45
4.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI .....	46
4.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARI .....	53
4.4. SEM ANALİZİ SONUÇLARI.....	58
BÖLÜM 5 .....	61
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	61
KAYNAKLAR .....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	65

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Çekme-uzama eğrisi.....	7
Şekil 2.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitlerin yapısı .....	10
Şekil 2.3. Elyaf ve dokuma takviyeli kompozitlerde elyafların kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler.....	13
Şekil 2.4. Tabakalandırmada kullanılan tabakaların genel görünüşü.....	14
Şekil 2.5. Dokuma ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi .	15
Şekil 2.6. Tabakalarda yönlendirme şekilleri .....	15
Şekil 2.7. Tabakalı bir kompozit yapısı.....	16
Şekil 2.8. Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması .....	22
Şekil 2.9. DGEBA'nın oluşumu .....	23
Şekil 2.10. Çapraz bağlanmış epoksi polimeri .....	24
Şekil 2.11. Epoksi reçinelerin üretimi .....	25
Şekil 2.12. Epoksi reçinelerin amin çapraz bağlanması .....	26
Şekil 2.13. Karbon elyafların temel yapısal özellikleri .....	30
Şekil 2.14. Çekme dayanımı ve elastik modülü üzerine sıcaklığın etkisi .....	31
Şekil 2.15. Tek yönlü ve dokuma şeklindeki prepreg görünüşü .....	32
Şekil 2.16. Prepreg üretim şeması .....	32
Şekil 2.17. Basit bir serme konfigürasyonu.....	34
Şekil 2.18. Torba kalıplama yöntemi şematik görünüşü .....	35
Şekil 3.1. Numune üretiminde kullanılan prepreg dokuma stili.....	39
Şekil 3.2. Prepreglerin tabakalandırılması ve yönlendirmelerinin gösterimi .....	39
Şekil 3.3. Yönsüz (0°) numune grubu .....	40
Şekil 3.4. Yönlü (0°-45°) numune grubu .....	40
Şekil 3.5. Sehim ölçme deney düzeneği.....	41
Şekil 3.6. MTS Marka 100 kN Dinamik Test Cihazı .....	42
Şekil 3.7. Çekme testinin uygulanışı .....	42
Şekil 3.8. Zwick marka 600 kN Elektromekanik Test Cihazı.....	43

## **Sayfa**

Şekil 3.9. Çekme testinin uygulanışı .....	43
Şekil 3.10. Carl Zeiss Ultra Plus SEM cihazı.....	44
Şekil 4.1. 160 dakika kürleme süresi ve 20,3 N yükü için yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme basıncına göre sehîm grafiği. ....	45
Şekil 4.2. 20,3 N yük ve 16" basınçta kürlenmiş yönlü ve yönsüz kompozitlerin artan kürleme süresine göre sehîm grafiği. ....	46
Şekil 4.3. 200 dk 27" basınçta kürlenmiş yönsüz numunenin çekme mukavemeti grafiği .....	47
Şekil 4.4. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme basıncına göre çekme mukavemeti grafiği .....	49
Şekil 4.5. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme süresine göre çekme mukavemeti grafiği .....	50
Şekil 4.6. Yönsüz numune grubu çekme mukavemetleri karşılaştırma grafiği.....	50
Şekil 4.7. 200 dk 27" basınçta kürlenmiş yönlü numunenin çekme mukavemeti grafiği .....	51
Şekil 4.8. Yönlü numune grubu çekme mukavemetleri karşılaştırma grafiği.....	53
Şekil 4.9. 200 dk ve 27" basınçta kürlenmiş yönsüz numunenin eğme kuvveti-uzama grafiği.....	54
Şekil 4.10. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme basıncına göre eğme mukavemeti grafiği. ....	55
Şekil 4.11. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme süresine göre eğme mukavemeti grafiği. ....	56
Şekil 4.12. Yönsüz numune grubu eğme mukavemeti değerleri karşılaştırması .....	57
Şekil 4.13. Yönlü numune grubu eğme mukavemeti değerleri karşılaştırması.....	57
Şekil 4.14. Kompozit malzemenin 59X büyütmedeki yüzey görüntüsü .....	58
Şekil 4.15. Kompozit malzemenin 250X büyütmedeki yüzey görüntüsü .....	58
Şekil 4.16. Kompozit kırık yüzeyinin 72X büyütmedeki görüntüsü.....	59
Şekil 4.17. Kompozit kırık yüzeyinin 1500X büyütmedeki görüntüsü ve karbon elyafların görünüşü.....	59
Şekil 4.18. Karbon elyaf lifin 10000X büyütmedeki görüntüsü ve boyutu.....	60

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin çekme dayanımı ve çekme modülleri.....	7
Çizelge 2.2. Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri .....	21
Çizelge 3.1. Numunelerin üretim planlaması.....	38
Çizelge 4.1. Yönsüz kompozitlerin çekme deney sonuçları .....	48
Çizelge 4.2. Yönlü kompozitlerin çekme deney sonuçları .....	52
Çizelge 4.3. Yönlü ve yönsüz numune gruplarının eğme mukavemeti, kuvvet ve uzama değerleri.....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Atm : Atmosfer basıncı

Nm/g: Numara metrik uzunluk sistemi

$\sigma$  : Eğme Dayanımı

kN : Kilonewton

MPa : Megapascal

" : İnçHg

### KISALTMALAR

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Testleri Birliği)

DGBEA: Diglisidil eter bisfenol-A

PAN : Poliakrilonitril

NASA : Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırmaları Merkezi

ABS : Acetal, Acrylonitrile- Butadiene-Streyn Selüloz

PTFE : Politetra-floretilene

PA : Poliamid

PC : Polikarbonat

PE : Polietilen

PET : Polyester

PVC: Polivinil klorür

PS : Polisitren

PP : Polipropilen

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Kompozit malzemeler günümüzde gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişmeleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır[1].

Malzeme bilimi ışığında gelişen teknolojiyle de paralel olarak daha dayanıklı, hafif, servis şartlarında üstün özellikler sergileyen malzemelerin ve beraberinde kompozit malzemelerin üretiminin, geliştirilmesinin ve kullanımının önemi giderek artmaktadır.

Metalik malzemelerle karşılaştırıldığında kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım ve yüksek özgül elastiklik modülü nedeniyle bugün birçok endüstride tercih edilmektedir. Kompozit malzemedan üretilmiş olan basınçlı kaplar, roket gövdeleri, hava aracı harici yükleri, anten koruma radomları, uçak gövdeleri, köprüler gibi yapısal sistemler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Metal malzemelere göre yüksek özgül dayanım ve yüksek özgül elastiklik modülü dışında korozyon problemi de olmayan kompozit malzemeler, bu yönleri ile de yapısal sistemlerde ana yapı ya da ikincil yapıların üretilmelerinde tercih edilmektedir [2].

Kompozit malzemelerin ticari hava araçlarında kullanılmaları 1960'lı yıllarda başlamıştır. Kompozit malzemelerin hava araçlarındaki uygulamaları genellikle ikincil yapı elemanlarının üretimlerinde kendilerini göstermektedir. 1984 tarihinde NASA destekli bir program neticesinde üretilen 737 uçaklarının kuyrukları, ticari bir uçakta ilk sertifikaya olmuş kompozit ana yapı elemanı olarak tarihe geçmiştir. Kompozit malzemelerin hava araçlarında kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Ağırlık avantajlarının dışında yorulma mukavemeti açısından da metalik



malzemelere oranla çok daha elverişli olan kompozit malzemeler, özellikle ticari hava araçlarının bakım periyotlarının daha uzun aralıklarla yapılmasını sağlayacağından çok önemli bir maddi tasarrufun da yapılmasını mümkün kılacaklardır. Bunun dışında çok değişik hava ve uzay aracı uygulamaları olan kompozit malzemeler, günümüzde yoğun olarak insansız hava araçlarının üretilmelerinde kullanılmaktadır [2].

Kompozit malzemeler farklı kullanım alanları ve amaçlarına bağlı olarak çok farklı yapılarda ve çeşitli üretim teknikleriyle elde edilmektedir. Ayrıca üretim tekniği iyileştirmeleri, üretim prosesindeki tekniklere yapılan eklemeler ve ana malzemelerdeki yapılan bazı değişikliklerle nihai malzemenin özelliklerini iyileştirme doğrultusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Karbon fiberle güçlendirilmiş termoset polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı başta havacılık yapıları, yüksek performanslı spor malzemeleri, denizcilik ve rüzgâr enerjisi ekipmanlarında oldukça yaygın hale gelmiştir. Fakat kullanılan bu kompozit parçaların sayısı, boyutu ve şekil olarak kompleksliği arttıkça geleneksel üretim yöntemlerinin beraberinde getirdiği kısıtlamaların ortadan kalkması için daha hızlı daha az maliyetli ve çok yönlü üretim prosesleri geliştirmek gerekmektedir. Havacılık uygulamaları için kullanılan en yüksek performanslı yapısal kompozitler, kurlenmemiş reçine ile önceden emprenye edilmiş prepreg tabakaları veya karbon fiber yataklar ile oluşturulmaktadır. Geleneksel olarak prepreg tabakaları lamine edilmek üzere bir araç üzerine istiflenir, vakum torbası içine alınır ve bir otoklava yerleştirilir. Daha sonra otoklav sıcaklığı artırılır, bir miktar veya tamamen vakum uygulanır ve kaba basınç uygulanır. Sağlamlaştırma basıncı diferansiyel olarak fiber yatakları sıkıştırır ve üzerine yerleştirildiği aparatın şekline göre laminat formunu verir [3].

Prepreg üretimi başlı başına bir süreç olmakla beraber üretilen prepreglerin belirli kat sayısına göre bir araya getirilip lamine bir yapı elde edilmesi bahsedilen açıklamalara örnek teşkil etmektedir.

Son yıllarda lamine kompozit malzemelerin uygulaması taşıma araçlarında, havacılık, uzay ve denizcilik sektörlerinde bu malzemelerin düşük termal genleşme özellikleri, yüksek korozyon dirençleri, yüksek mukavemetleri, sertlikleri ve hafif olmaları sebebiyle önemli derecede artışgöstermektedir. Mühendislik kompozitlerinin büyük çoğunluğu sürekli grafit, karbon veya cam fiberlerle güçlendirilmiş termoset epoksi polimer matrislerden oluşmaktadır [4].

Bu çalışmada kompozit malzemelerin kullanımının gitgide arttığı özellikle havacılık sanayinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretilmesi ve karakterizasyonunun yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, CYTEC Engineered Materials firmasının üretmiş olduğu HMF 934 kodlu tek yönlü önceden reçine emdirilmiş (prepreg) karbon elyaf kullanılmıştır. Vakum torbalama yöntemiyle 7 kat prepreg kullanılarak kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu aşamasında; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, üç nokta eğme testleri ve sehim ölçümü, kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi uygulanmıştır.

## BÖLÜM 2

### KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, birbirinden biçimleri ve kimyasal bileşimleriyle ayrılmış ve esas olarak birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha çok mikro ve makro bileşenin karışımı veya bileşimiyle oluşan malzemedir [5]. Fakat uygulamada kompozitler, bileşenlerin makro düzeyde bir araya geldiği malzemeler olarak anılmaktadır [6].

Kompozit malzemeler aslında prensip olarak uzun yıllar önce kullanılmaya başlanmıştır. Kerpiğin bileşimindeki kil, dayanıklılığının artması için saman ve bitkisel liflerle harmanlanmıştır. Günümüzde ise en çok kullanılan kompozitlerden biri betondur. Çimento ve kumdan meydana gelen matris çelik çubuklar ile güçlendirilir[1].

İlk modern sentetik plastiklerin 1900'lerin başında geliştirilmesinin ardından, 1930'ların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile rekabet edecek düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay biçim verilebilir olmaları, çoğu polimer matrislerin (termoset polimerler) oda sıcaklığında sıvı halde bulunmaları, metallere oranla düşük yoğunlukta olmaları, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı yüksek dayanım gibi önemli özellikler polimerlerin matris malzemesi olarak yaygın kullanılmasının en önemli nedenleridir. Polimerlerin en önemli dezavantajları ise düşük erime sıcaklığına, düşük mekanik özelliklere ve yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Düşük erime sıcaklığı ve yüksek ısıl genleşme katsayısı gibi dezavantajlar özellikle polimerlerin yüksek sıcaklıklarda kullanımını kısıtlar. Polimerlerin düşük mekanik özellikleri ise partükül, visker, kısa veya sürekli elyaf formundaki seramik ve metal takviyeler ile iyileştirilebilmektedir. Bu doğrultuda polimerlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir [1]. Bir malzemedeki servis şartlarında birçok üstün özelliği tek başına sergilemesi istenebilir. Fakat malzemeler

kendilerinden beklenen üstün özelliklerin tek başına tümünü gösteremeyebilir. Örneğin, kullanım koşullarında yüksek dayanıma sahip olması istenen bir malzemenin aynı zamanda çok hafif (düşük yoğunluklu) olması istenebilir. Böyle bir durumda her biri belli bir yönüyle üstün olan farklı malzemeler, örneğin yüksek dayanıma sahip bir malzeme ve düşük yoğunluklu farklı bir malzeme belirli oranlarda bir araya getirilerek istenen özelliklere sahip yeni bir malzeme üretilebilir. Günümüzde kompozit olarak adlandırılan bu tür malzemelere hemen her alanda (spor aletleri, ev eşyaları, kara, deniz ve hava araçları gibi) ihtiyaç duyulmaktadır.

Makro ölçüde heterojen karakterli bir yapıya sahip olan kompozit malzemelerin içyapıları incelendiğinde yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzemenin yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşeninde görmek mümkün değildir [7].

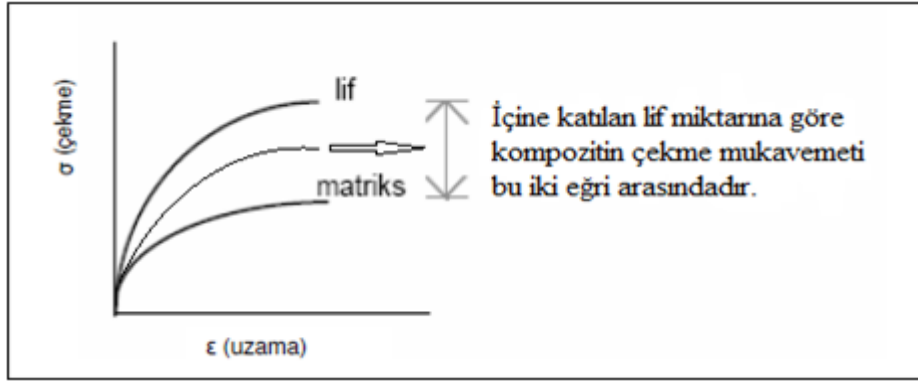
Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sağlar. Ayrıca kompozit malzemeler neredeyse metaller kadar dayanıklı ve sert olmalarının yanında çok da hafiftirler[1].

Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin sahip olduğu özellikleri sunmasının yanı sıra; yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, boyutsal stabilite, yüksek dielektrik direnimi, korozyon dayanımı, kalıplama kolaylığı, yüzey uygulamaları, yüksek ısı dayanım, şeffaflık özelliği, yüksek kimyasal direnç, titreşim sönümlendirme, akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu gibi avantajları sağlar. Aynı ağırlıktaki mukavemetleri metallere oranla çok yüksektir. Aynı yönlü aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 4-6 kat daha yüksek spesifik (özgül) çekme dayanımına sahiptir. Aynı yönlü grafit takviyeli epoksi, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 3,5-5 kat daha yüksek spesifik çekme dayanımına sahiptir. Kullanım yerine ve özelliklerine bağlı olarak gereksinim duyulan özellikler artırılır, kontrol edilir. Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısının azalmasını sağlarlar. Böylece ara birleştirme detay parçalarının azalmasıyla üretim süresi

kısalmaktadır. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur[8-9]. Bu tür avantajlar karşılıklı kompozitlerin belirgin bazı dezavantajları; hammaddenin pahalı olması, üretim yöntemlerinin maliyetli olması, geri dönüşüm özelliklerinin düşük olması, tamir ve bakımlarının zor olması şeklinde sıralanabilir. Örneğin uçaklarda kullanılacak kalitede karbon elyafının bir metre karelik kumaşının maliyeti yaklaşık 50 dolardır. Ancak bağlantı elemanları sayısında ve ağırlıkta azalma olması dikkate alındığında, toplam maliyette bir düşme söz konusu olur. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanıklılık özelliği bulunmaktadır. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.

Kompozit malzemelerin yapılarında genel olarak üç ana eleman bulunmaktadır. Bunlardan matris malzemesi, takviye elemanını sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan sürekli fazı oluşturmaktadır. Matris malzemesi, bu işlevlerin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. Ancak, yük taşımaya ikinci malzeme olarak katılma durumu basınç halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük ölçüde matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır. Bir kompozitin kullanım sıcaklığı matrisin kullanım sıcaklığı ile sınırlıdır. Matrislerin çoğu sıvı halde kullanıldığı için viskozite önemlidir. Erime noktası, kür zamanı, sıcaklık gibi fiziksel özellikler de matrislerin diğer önemli noktalarıdır [8,11,12].

Kompozitlerin yapısında takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, viskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin dayanımını artırmaktır. Takviye fazı, kompozitin mekanik dayanıklılığından sorumludur ve dayanıklılığı artırıcı etkisi çoğu kez kompozit içerisindeki hacmi %10'unu geçtiğinde gözlenmeye başlar. Bu nedenle takviye amacıyla kullanılan lifin mekanik dayanımı matristen belirgin şekilde yüksek olmalıdır [9,11]. Şekil 2.1'de kompozit malzemenin çekme uzama eğrisinin hangi aralıkta olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çekme-uzama eğrisi [12].

Cam, karbon, aramit, bor, polietilen, poliamit, poliester, doğal lifler veya dokumalar kompozit hazırlamada kullanılan liflere örneklerdir. Çizelge 2.1'de takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin çekme dayanımı ve çekme modülü değerleri verilmiştir. Bu lifler içerisinde genel amaçlı ticari kompozitlerde en fazla cam lifler, ileri kompozitlerde ise aramit ve karbon lifler kullanılmaktadır [11].

Çizelge 2.1. Takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin çekme dayanımı ve çekme modülleri [11].

Malzeme	Özgül ağırlık gr / cm <sup>3</sup>	Çekme mukavemeti N / mm <sup>2</sup>	Elastisite modülü N / mm <sup>2</sup>
Cam lifi	2,54	2410	70000
Karbon lifi	1,75	3100	220000
Kevlar lifi	1,46	3600	124000

Elyafaların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, elyafaların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır:

1. Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.
2. Boy/çap oranı arttıkça matris malzemesi tarafından elyafalara iletilen yük miktarının artması.
3. Elastisite modülünün çok yüksek olması.

Dolgular, kimyasallar ve diğer katkıları matrise niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilirler. Katkı maddelerinin; yanma geciktirici, yağlayıcı ve oksit giderici gibi amaçları vardır [11].

## **2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI**

Kompozit malzemelerin yapıları gereği değişik şekillerde sınıflandırılması mümkündür. Matris malzemesine göre metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir gibi takviye malzemesine göre de sınıflandırma yapmak mümkündür. Metal matrisli kompozitler; alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi hafif metal ve alaşımların matris işleviyle; karbon, bor ve diğer bazı metallerin elyaf, parçacık, plakacık, visker yapısında takviye fazını oluşturmasından meydana gelir. Bu karma malzemeler daha üstün mukavemet, aşınma, korozyon, sertlik özellikleriyle nükleer güç ekipmanlarında, gaz türbinlerinde, uzay-havacılık, otomotiv sektöründe kullanılırlar. Seramik matrisli kompozitler seramik matris malzemelerin ( $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiC$  gibi) seramik veya metal parçacık, plakacık, visker veya elyaf olarak takviyesiyle oluşturulan üstün ısı dayanım ve mukavemete sahip malzemeler grubudur. Seramikler düşük yoğunluklu, çok dayanıklı ve sert olmalarına rağmen aşırı derecede gevrekler. Bunlar genellikle termal ve kimyasal etkilere karşı dirençlidirler. Ancak yüksek ergime derecesine sahip olmaları ve sertlikleri işlenmelerini zorlaştırır ve yalıtıkcıdır. Kırılgan oluşları bunları potansiyel olarak güvensiz yapar. Polimer matrisli kompozitler ileri plastik polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri veya pekiştirilmeleri sonucu oluşturulur [9,13].

Kompozit malzemeleri takviye elemanlarına göre şöyle sınıflandırabiliriz:

- 1) Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
- 2) Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler,
- 3) Tabakalı kompozit malzemeler,

Bu üç tip takviye elemanlı kompozit yine plastik, metal veya seramik matrisiçinde olabilir. İkinci faz veya takviye elemanı her zaman net özellik sağlanması için matristen daha serttir. Burada elyaf takviyeli kompozitler de;

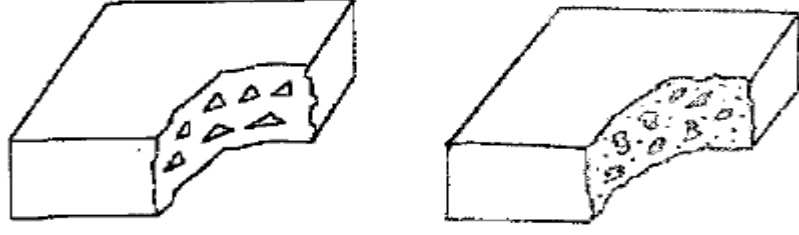
- a) Sürekli elyaf takviyeli kompozitler,
- b) Kesikli elyaf takviyeli kompozitler,
- c) Rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler olarak alt sınıflara ayrılabilir.

Parçacık takviyeli kompozitler de iki alt grupta incelenebilir. Bunlar; (a) büyük parçacıklarla dayanımı artırılmış kompozitler, (b) dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitler olarak alt gruba ayrılabilir. Şimdi sırası ile bu karma malzemelerin bazı özelliklerini açıklayalım [9].

### **2.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve ısıya karşı dayanımları yüksektir. Bu tip kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise  $Al_2O_3$  ve SiC'den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler izotropiktir. Bu kompozitler dayanımı iyileştirmekten ziyade beklenilmeyen alışılmışın dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, bunlar büyük parçacık içerdiklerinden kaymayı etkili olarak yapamazlar. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler [9].





Şekil 2.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitlerin yapısı [9].

Döküm yoluyla üretilen bu tür kompozitlerde pratikte karşılaşılan bir problemde; parçacık ilave edildiğinde tozların karıştırılma zorluğu, eriyik viskozitesinin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatamamasıdır.

Dağınımla(dispersiyon) mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler, yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matris içinde homojen olarak dağılmasıyla elde edilir (Şekil 2.2). Bu parçacıkların çapı 0.01 ile 0.1  $\mu\text{m}$  arasında, uzunluğu 50-200  $\mu\text{m}$  arasında ve hacim oranı %1-15 arasında değişir. Bunlar izotropik özellik gösterirler [9].

Tanecik takviyeli kompozitlerde, takviye amacıyla kullanılan malzemenin üç yöndeki boyutları arasında önemli ve belirgin bir fark yoktur. Bunlar arasında karbonatlar, kil, mika, silikatlar, mikroküreler, tarımsal atıklar, metal tozları veya parçaları, pudra, pul, pelet, granül, küre, disk vb. geometrilerdeki veya şekilsiz küçük kırıntılar bu grupta yer alır. Tanecikli takviye edicilerin kompozitlerinin mekanik özellikleri zayıftır. Bu nedenle, daha çok mekanik dayanımın önemli olmadığı süs ve dekoratif eşyaların, genel amaçlı ürünlerin ve yük etkisinde kalmayacak diğer tür malzemelerin üretiminde kullanılırlar [11].

### 2.1.2.Elyaf (Lif) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılğan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığın giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla bu özellikleri iyileştirecek nitelikte elyaflarla donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir. Elyafın tanımı, makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı olan esnek malzemeler şeklinde yapılır ve değişik elyaflar kompozitlerde takviye amacıyla kullanılır. Elyaf takviyeli kompozitlerde dışarıdan yapılan yüklemeleri karşılayan ana bileşen elyaftır, polimer matris ise elyafları istenilen geometride bir arada tutan çevreyi oluşturur [8,11].

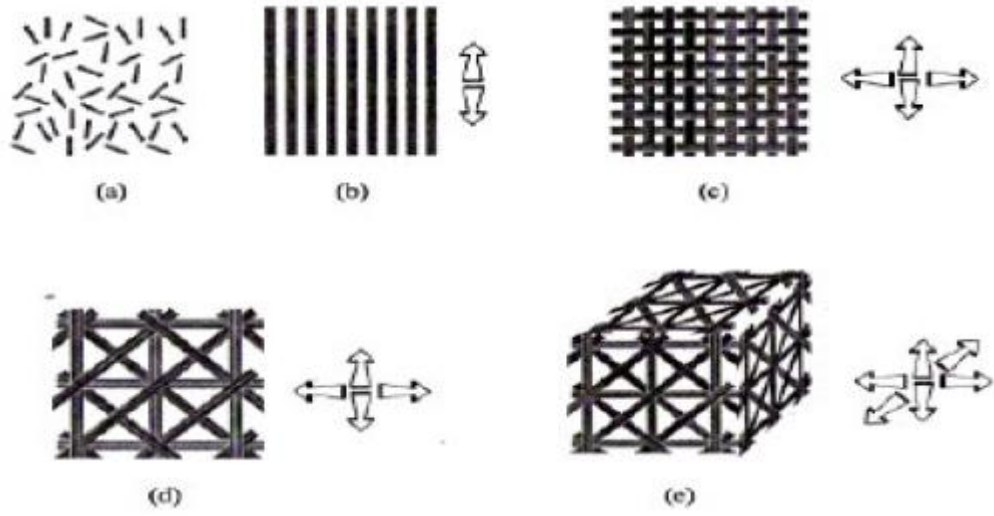
Elyaf takviyeli polimerik kompozitler hazırlanırken elyaflar açısından bazı temel noktalara dikkat edilmesi gerekir. Bu noktalar; elyafın mekanik özellikleri, elyaf miktarı, elyaf kalınlığı ve elyafın yönlenme biçimidir[11].

Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Genel bir kural olarak kompozitlerin mekanik dayanımı içlerindeki elyaf miktarı arttıkça yükselir, elyaf oranı çok fazla artarsa kompozit elyafın karakteristik özelliklerini göstermeye başlar. Böyle bir durumda (polimerin kompozit içerisindeki oranının çok düşük olması halinde) matris işlevini kaybeder ve lifleri bir arada tutamaz[11].

Elyaf kalınlığı kompozit özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. İnce liflerle hazırlanan kompozitlerde polimerin lifi ıslattığı alan büyüktür. Elyaf polimer temas yüzeyinin artması, ara yüzeyde kuvvetli bağ oluşumuna katkı sağlar ve kompozit içerisinde yük (enerji) dağılımını kolaylaştırır. Bu nedenle, aynı matris kullanılarak ince ve kalın elyaflarla takviye edilen kompozitlerden, ince elyaflarla takviye edileni daha yüksek dayanıma sahip olur [11].

Elyaf lar demet haline getirildiklerinde her zaman yapımlarında kullanılan polimerin yığın haline göre daha dayanıklıdır lar. Elyaf demeti üzerine dışarıdan bir etki yapıldığında, demette bulunan elyaflardan bazıları kopabilir veya yüzeylerinde çatlama, çizilme gibi kusurlar oluşabilir. Demetin dış kuvvetler karşısında aldığı bu tür zararlar, yalnız etkilenen elyaflarla sınırlı kalır ve demet içerisindeki diğer elyaflara aktarılmaz. Yığın halindeki bir maddenin (cam parçası, polimer parçası vb.) herhangi bir bölgesinde oluşan kusur malzeme içerisinde ilerler ve sonuçta malzemeyi kullanılamaz hale getirebilir. Bu özellik elyaf takviyeli kompozitlerin üstünlüklerinden birisidir [11].

Elyaf ların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleriyle elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit veya farklı mukavemet sağlanabilir. Matris yapısında homojen (rastgele) dağılmış kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler genellikle izotropik davranış gösterirler. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla düşük maliyetli ve daha kolay üretildiklerinden, takviyesiz matrislere göre daha yüksek dayanım ve aşınma direncine sahip olduklarından, kısa elyaf takviyeli kompozitler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Elyaf lar kompozit içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, kompozitin çekme gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır (anizotropi) [11]. Elyaf ların ve dokumaların kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Elyaf ve dokuma takviyeli kompozitlerde elyafların kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler a) kesikli rastgele, b) sürekli tek yönlü, c) sürekli düzlemsel iki yönlü, d) sürekli düzlemsel üç yönlü, e) üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğu yönleri gösterir) [11].

Kesikli elyaf, polimer matris içerisine genellikle rastgele dağıtılırlar ve böyle bir kompozit mekanik özellik açısından izotropik davranır. Sürekli elyaf, genelde yükün yönüne paralel olacak şekilde reçine içerisine yatırılırlar. Birkaç yönden yüklemeye karşılasacak kompozitler, elyafın farklı yönlerde yerleştirilmesi veya dokumalar kullanılarak hazırlanabilir. Dokumalar, kompozite her zaman en az iki yönde dayanıklılık kazandıran takviye edicilerdir. Üç boyutlu dokumalarla kompozitin mekanik dayanımı her üç yönde arttırılır [11].

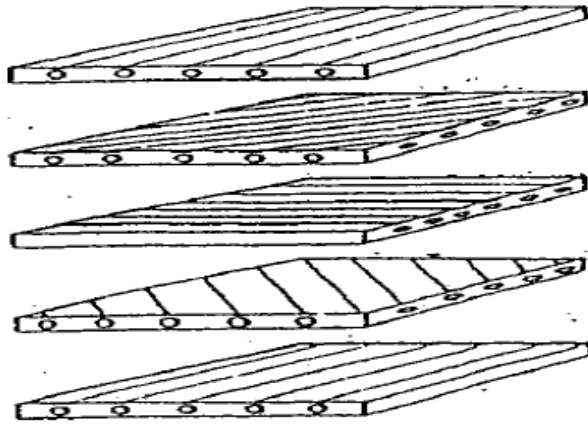
Elyaf takviyeli kompozitler, özellikle uzay ve havacılık alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş malzemelerdir. Uzay ve havacılık alanlarında ilk kullanılan kompozitler alüminyum alaşımlarından hazırlanmış ve uçakların bazı parçaları yüksek mekanik dayanımları ve hafifliklerinden dolayı alüminyum kompozitlerden yapılmıştır. Ancak alüminyum alaşımları korozyona ve metal yorulmasına uğrayabilen maddelerdir ve bu zayıf özelliklerin iyileştirilmesi pahalı işlemler gerektirir. Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde korozyon söz konusu değildir ve malzeme yorulması metallerdeki kadar hızlı gelişmez [11].

### 2.1.3. Tabakalı Kompozitler

Tabaka; bir matristeki örülmüş lifler veya tek yönlü lif düzlemidir. Tek yönlü lif haline aynı zamanda tek yönlü lamine de denir. Tipik tabakalandırma aşağıdaki şekillerdeki gibi lif yönlerine dikey ve paralel olan ana malzeme eksenleri boyunca gösterilmiştir [14].

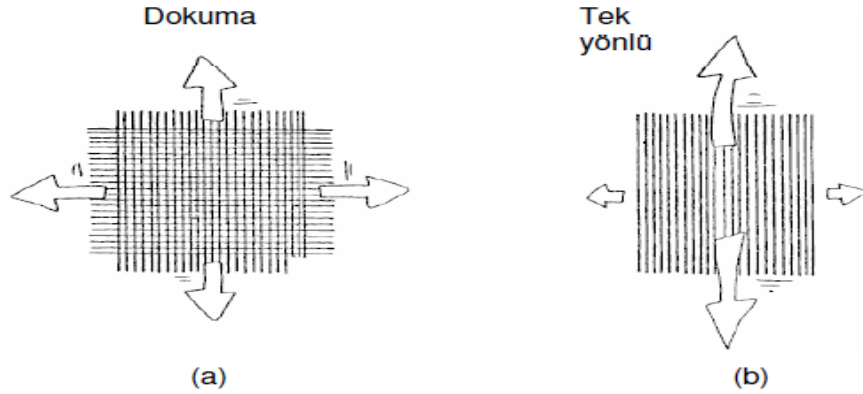
Tabakalı kompozitler, yapısal yönden taneli ve liflerle donatılı kompozit malzemeden farklılık göstermektedir. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlümesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [8,15].

Tabakalandırma: Bir tabakalandırma, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, tabakalardaki ana malzeme yönlerinin açık yönlendirmesi şeklinde tabakalar yığındır. Bir tabakalandırmanın katmanları, genellikle tabakalarda kullanılan matris malzemesi aynıdır [16]. Tabakalandırma; farklı malzemelerin tabakaları veya elyaf takviyeli katmanların tabakaları olabilir,

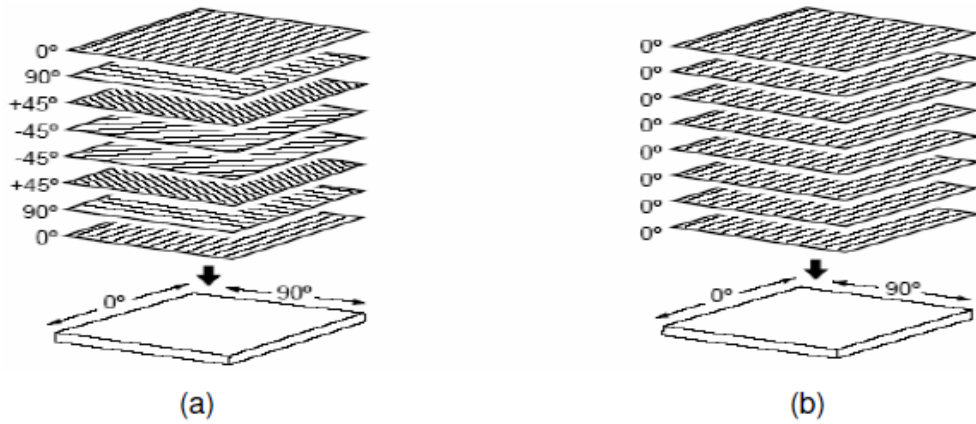


Şekil 2.4. Tabakalandırmada kullanılan tabakaların genel görünüşü [16].

Tek yönlü kompozit malzemeler tek yönde daha üstün mekanik özelliklere sahiptir ve anizotropik (farklı yönlerde farklı özelliklerin sergilenmesi) özellik gösterir [17]. Şekil 2.5’de tek yönlü ve çift yönlü elyaf dokumalar sunulmuştur. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi elyaflar çeşitli açılarda dizilerek izotropik özellikler elde edilebilir.



Şekil 2.5. Dokuma ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi a) Eşit özellikler, b) Eşit olmayan özellikler [17].

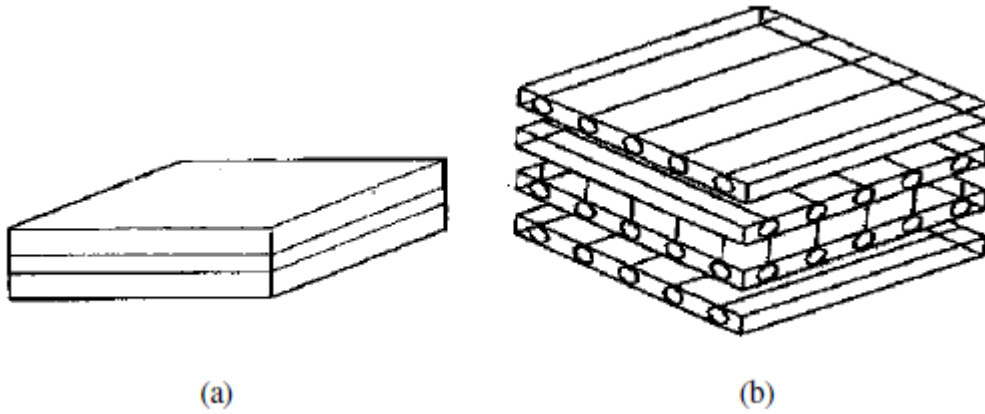


Şekil 2.6. Tabakalarda yönlendirme şekilleri a) Yarı-izotropik yönlendirme b) Tek yönlü yönlendirme[17].

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdır. Her tabaka tasarım amaçlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultuları ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Genellikle her katman çok ince olup yaklaşık 0.1 mm kalınlığında olduğundan dolayı bu şekilde kullanılmaz. Her kattaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise bunlar "izotropik" basitçe "laminat" olarak adlandırılır (Şekil 2.7.). Birçok katlı kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar

"ortotropik" veya "karma ve melez laminatlar" olarak adlandırılır. Buna örnek olarak da bir karma laminat kompozitin bir katı cam elyaf takviyeli epoksi iken diğer tabaka ise grafit elyaf takviyeli epoksi kompozit olabilmektedir. Ortotropik aynı zamanda birbirine dik doğrultuda iki eksende simetrik malzeme özelliği göstermesi demektir [9].

Laminatlar, matris içerisine rastgele yönlendirilmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilir. Örneğin, 10 tabakadan 6 tanesi 1 doğrultuda ve diğer 4 tanesi bu yöne dik 90°'lik doğrultuda yönlenebilir. Bu yönlenebilirliğe bağlı olarak kompozitin aksenal yöndeki ve eksene dik yöndeki dayanımı ve şekil değişimi farklı olur [9].



Şekil 2.7. Tabakalı bir kompozit yapısı a) İzotropik, b) Ortotropik yapı [9].

Orta yüzeydeki laminat simetrik düzenlenmemişse eğilme ve uzama arasında birleşmeden kaynaklanan rijitlik bileşenleri mevcut olabilmektedir. Her bir tabakanın bitişiğindeki tabakadan bağımsız olarak deforme olma eğilimi olduğu için laminatlarda kayma gerilmeleri oluşabilir. Bu bütün tabakalarda temel malzeme doğrultularındaki farklı yönlendirmeler kadar farklı özelliklerden de ileri gelebilir. Bu kayma gerilmeleri laminat kenarları yakınında en büyük olur ve orada delaminasyon başlama sebebi olabilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler geniş özelliklerine bağlı olarak tek veya çok katlı tabakalı malzemeler olarak da sınıflandırılabilir. Tek katlı kompozitler bir kaç farklı lamineden yapılabilir, her tabaka aynı yönelme ve özelliklere sahipse, sonuçta tüm laminat tek katlı tabakalı kompozit olarak düşünülebilir [9].

Kompozit bir yapının yüksek hızlardaki çarpmalara gösterdiği direnç lifin elastiklik modülü, kopma uzaması gibi lif özellikleri ile lifin bu kompozit yapı içerisindeki kullanım şekline ve kompozitin alansal yoğunluğuna bağlıdır [18]. Katlı yapıların ciddi hasar tipleri için geliştirildiği ve bu yapıların temelde lif tipi, reçine tipi, doku konstrüksiyonu, kat sayısı, iplik yönü ile kesişmeleri ve iplik setleri ile yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Darbenin katlı yapılara etkisi, katı ve esnek tiplere bağlı olarak değişmekte, katlı yapılar için katlar arası açılmanın bozulma modu olduğu ve bunun enerjinin dağıtılması açısından olumlu ancak yapının dayanımı açısından negatif etki yaptığı iddia edilmiştir [19].

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit malzeme tipidir. Farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakaların birleşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallerle göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Tabakalandırılmış fiber takviyeli kompozitlerin kullanım yerleri; Polaris füze kasaları, cam elyaf gemi kaplaması, raylı taşıt gövdeleri, tenis racketleri, v.b.dir. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler [7,14]. Sandviç kompozitler anizotropik özellik gösterirler ve artan kalınlık ile basma veya yük taşıma kapasiteleri, eğilme dayanımları artar.

Elyaf takviyeli bir kompozitin üretimi esnasında, istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için çok katlı, düz veya değişik yönlü ve doğrultulu elyafların düzenlenmesi gerekir. Örneğin; aksel yüklerle karşı direnç için  $0^\circ$ , yan yüklerle karşı direnç için  $90^\circ$  veya izotropik özellik istendiğinde  $0^\circ, -45^\circ, +45^\circ$  ve  $90^\circ$  sıralamasında olduğu gibi yönlendirme yapılabilir. Bu nedenle, kompozit tabakanın özellikleri, lamine malzemedeki tek bir kompozit tabakasının elemanlarının özelliklerine, elyafların düzenlenmesine ve kompozitin üretim tekniğine bağlı olur.



## 2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Kompozit malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. İleri plastik-polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri bu gruptaki kompozit malzemeleri oluşturur. En tipik örnek, cam elyaf takviyeli epoksi veya poliester matrisli kompozit malzemelerdir. Ancak ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastik modül ve yüksek tokluğa sahiptirler [8,13].

Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür (elastiklik modülü/özgül ağırlık). Bu özellikler polimer matrisli kompozit malzemelerin diğer malzemelere üstünlük sağlamasına neden olur. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 Nm/g olmasına karşın cam lifi–poliesterlerde 620 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 Nm/g ve kevlar epoksida 886 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışabilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Kompozit malzemelerde polimer matris olarak kullanılan genelde üç tip plastikler mevcut olup bunlar; termosetler, termoplastikler ve elastomerlerdir. Termoset grubunda ağırlıklı olarak poliester ve epoksi reçine kullanılır. Bunun yanı sıra vinil ester/bisfenol ve fenolik reçinelerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Termosetler oda sıcaklığında sıvı halde bulduklarından kullanımı ve kalıplanması kolaydır. Bu özellikler termosetlerin kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmasını sağlar. En önemli dezavantajları ise geri dönüşüm özelliklerinin olmaması ve tokluklarının düşük olmasıdır. Termoplastik grubunda yaygın olarak poliamid ve polipropilen kullanımı görülür (yaklaşık %68.3). Bunların

yanı sıra hibrid formda polietilen ve polibutilen tereftalat, polietereterketon ve polietersulfon kullanımı da dikkat çekmektedir. Naylonlar ve polikarbonatlar, ticari kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan az sayıdaki termoplastikten ikisidir [9,11,20]. Termosetlere kıyasla termoplastiklerin en önemli üstünlükleri tokluklarının yüksek ve tekrar kullanılabilir olmasıdır.

**Termoplastikler:** Termoplastikler, oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar. Bu malzemeler tekrar soğutulduğunda yeniden sertleşir. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosetlere göre daha güçlüdür. Ancak şekillendirme kapasitesi iyi olduğundan bu malzemelerin kullanımı yaygındır. Bu polimerler kısmen kristalin veya amorf halde olabilir. Kristalin yapıda olanlarda moleküller büyük uzaklıklarda oldukça düzenli şekil oluştururlar. Amorf polimerler de ise uzun zincirler birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Kısa elyafla küçük hacim ortamında hamur veya levha kalıplama yöntemi ile kullanılmaktadır [9].

Termoplastikler, üretilen bütün sentetik polimerlerin yaklaşık %70'ini meydana getirir ve üç tipten ticari olarak en önemlisidir. Termosetler ve elastomerler ise yaklaşık %30'unu oluşturur. Tipik olarak kullanılan termoplastikler Acetal, Acrylonitrile- Butadiene-Styren (ABS), Selüloz, Politetra-floretilene (PTFE), Poli amid ( PA), Polikarbonat (PC), Polietilen (PE), Polyester (PET), Polivinil klorür (PVC), Naylon 6.6, Polistiren (PS) ve Polipropilen (PP)'dir. Ancak bu üç tür olan polimerler bazen birbiri içerisine girebilir. Termoplastik olan belli polimerlerden termosetler de yapılabilir [9].

**Elastomerler:** Elastomerler, termoset polimerler gibi çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşur. Bunlar, çok düşük gerilmelere maruz kaldığı zaman büyük elastik deformasyon yapma yeteneği olan polimerlerdir. Bazı polimerler %500 ve daha fazla uzama yaparlar ve tekrar orijinal şekline dönerler. En çok bilinen elastomer örneği kauçuktur [9]. Elastomerler, termoset ve termoplastikler gibi kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmazlar.

Termosetler: Kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoplastik polimerlerden farklı olarak termoset polimerlerin polimerizasyon süreci geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar [9]. Çizelge 2.2’ de en yoğun kullanılan termosetler ve genel özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Bazı termoset matrislerin mekanik ve fiziksel özellikleri [9].

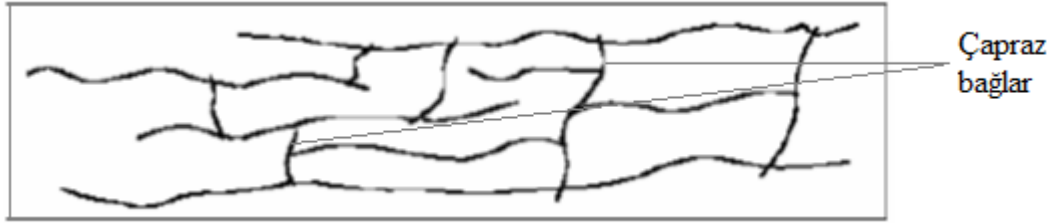
Malzeme	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik Modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4,2	1,5-2,0
Isıl iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genişleme katsayısı (1/C <sup>o</sup> )	45-65	55-100	68

Termoset matrisler, küçük monomer moleküllerini, uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Termosetler, polimerizasyonla iki kademedede elde edilir. Birincisi malzemeyi ihtiva eden monomerler lineer zincirlerin bir araya getirdiği reaktörde başlarken ikinci polimerizasyon işleminde kalıplama işlemi esnasında sıcaklık ve basınçla reaksiyona girmeyen kısımlar sıvılaşarak molekül zincirleri üç boyutlu yapıya sahip olurlar. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için genellikle katılaştırıcı kullanılır. Katılaştırıcı ilavesi ile önce jel haline gelir ve sonra da katılırlar. Bunlar tekrar ısıtılarak yumuşatılamaz. Termoset reçineler izotropiktirler. Termal stabilite, kimyasal direnç, düşük yoğunluk termoset reçinelerin avantajlarıdır. Oda sıcaklığındaki sınırlı çalışma zamanı, katılma için geçen uzun fabrikasyon zamanı, kopma esnasındaki düşük uzama dezavantajlarıdır [8,9].

Epoksi ve poliesterler elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerdir. Bunların fiziksel ve mekanik özellikleri, moleküllerin büyüklüğüne, yoğunluğuna ve çapraz bağın uzunluğuna bağlıdır. Ancak poliesterler

cam elyafı iyi ıslatır ve dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Bunların sakıncası ise sertleşme sırasında %10 kadar kendini çekme (büzülme) göstermesidir. Bu büzülme ise liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olur [8,9].

Termoset malzemeler kür edildikten sonra tekrar eritilemez ve şekil verilemezler. Kür işlemi sırasında molekül zincirleri, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi çapraz bağlanma yaparlar. Bu nedenle moleküller tekrar eritilip şekil verilemez. Çapraz bağlanma yoğunluğu ne kadar fazla ise malzeme o kadar rijit ve ısıl stabilitesi yüksek olur. Poliamidler, plastikler arasında kalıpta şekil verilebilen, ısıl direnci en yüksek polimerlerdir [8].



Şekil 2.8. Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması [8].

Yaygın termoset reçineler; epoksi, poliester ve vinilesterdir. Bu malzemeler, tek parça veya iki parça sistemi olabilmektedir ve genelde oda sıcaklığında sıvı formdadır. Bu reçine sistemleri, yüksek sıcaklıklara çıkarılır veya oda sıcaklığında son şekli verilir.

Termoset kompozitleri işlemedeki avantajlar;

1. Başlangıçtaki reçine sistemi sıvı formda olduğundan, termoset kompozitleri işlenmesi kolaydır.
2. Lifler, termosetlerle kolay ıslatılabildiğinden, boşluk ve gözenek daha azdır.
3. Termoset kompozitlerin işlenmesinde, termoplastik kompozitlere göre, ısı ve basınç gereksinimi daha azdır. Bu da enerji kazanımı sağlar.
4. Termoset kompozitlerin işlenmesinde, basit ve düşük maliyetli teçhizat kullanılabilir [8].

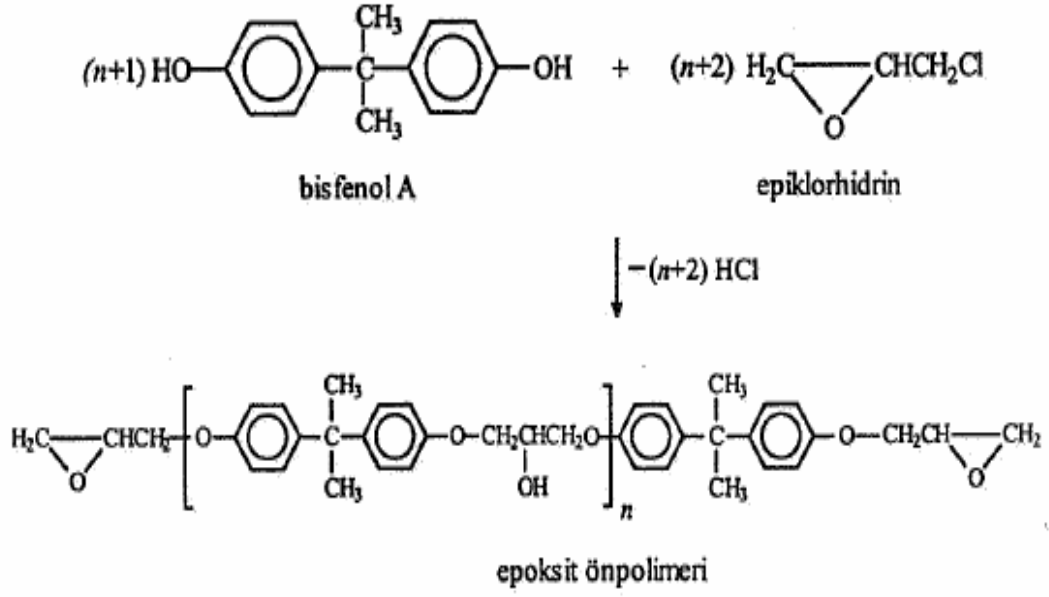
Termoset kompozit işlemenin dezavantajları;

1. Termoset kompozit işleme, uzun kür zamanları gerektirir ve sonuç olarak termoplastiklere göre düşük üretim oranları elde edilir.
2. Süneklik ve toklukları termoplastiklere göre düşüktür.
3. Termoset kompozit parçalar, bir kez kür edilir ve katılaştırıldığında, tekrar şekil verilemez.
4. Termoset kompozitlerin geri dönüşümü bir sorundur [8].

### **2.3. EPOKSİ REÇİNELER**

Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi reçineler, reçine türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Epoksi grubunun polimerizasyonu ile elde edilirler. Bu reçineler çeşitli ajanlar varlığında, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek termoset son ürün haline dönüştürülürler. Epoksi reçineleri gerçekte polieter yapısındadırlar ve polieterlerin önemli bir grubunu oluştururlar. Epoksit reçinesi adı, monomerde ve kür edilmeden önceki önpolimerde, yapısındaki epoksitgruplarının bulunması nedeniyle verilir [8,11].

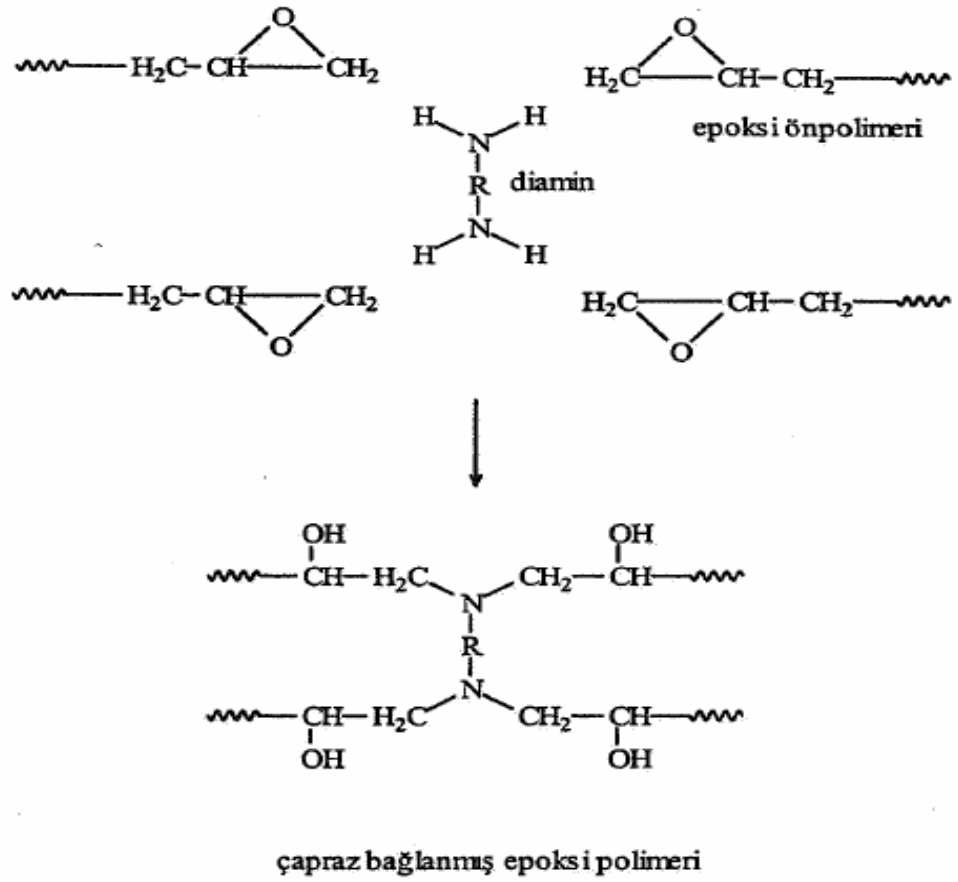
Epiklorhidrin ve bisfenol-A'nın bazik ortamdaki reaksiyonundan, ilk ticari epoksi reçinelerinden olan ve epoksit reçinelerin %95'ini oluşturan Diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) ve yüksek molekül ağırlıklı türler elde edilir. Epiklorhidrin, propilenden sentezlenir ve sentetik gliserin prosesinin ara ürünüdür. Bisfenol-A ise fenollü aseton ile oluşturulan bir petrol türevidir. DGEBA, epiklorhidrinin bisfenol-A ile sodyum hidroksit varlığında reaksiyonuyla elde edilir. Termoset polimer yapısına iki aşamada geçilir. İlk aşamada fazla epiklorhidrin kullanılarak zincir sonlarında epoksit grupları bulunan düşük mol kütleli bir önpolimer hazırlanır [11].



Şekil 2.9. DGEBA'nın oluşumu [11].

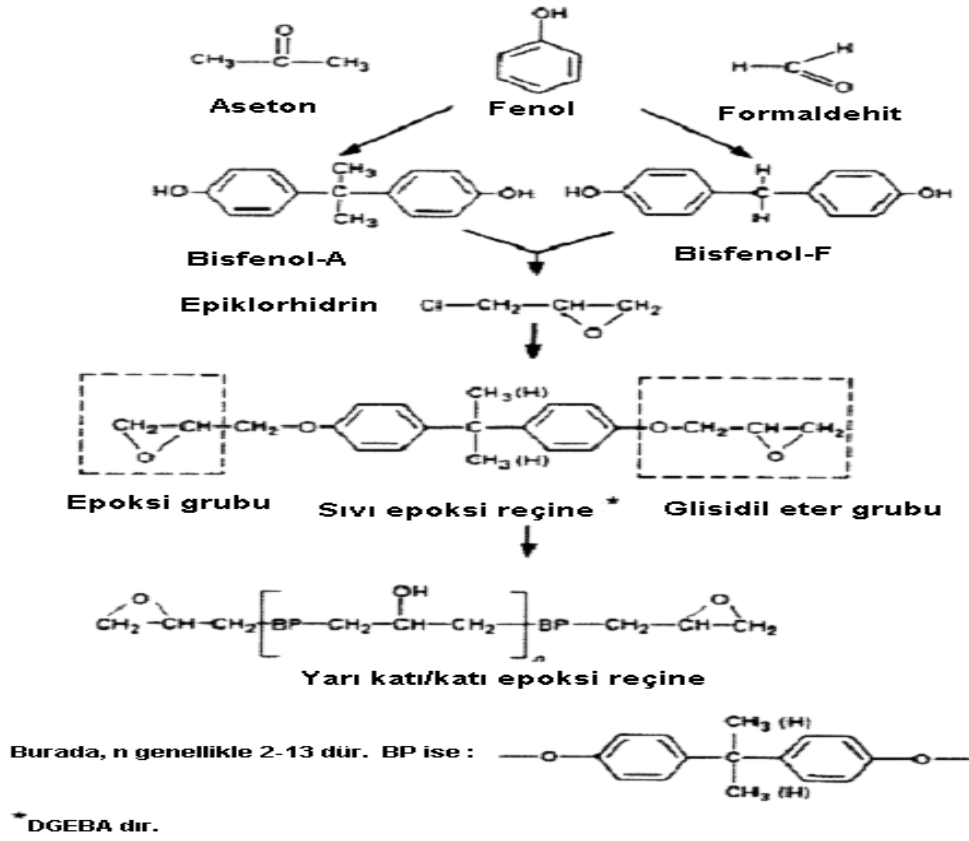
Önpolimerdeki yinelenen birimin (n) büyüklüğü, elde edilecek epoksi polimerinin özelliklerini belirler. Küçük n değerlerinde polimer viskoz bir sıvı iken yinelenen birim sayısı 25 dolayına ulaştığında oda sıcaklığında katı ve serttir. Küçük n sayılı epoksitler üstün yapışma ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle koruyucu kaplama ve yapıştırıcı olarak kullanılırlar. Örneğin, düşük çapraz bağ yoğunluğu esneklik için gereklidir. Yüksek çapraz bağyoğunluğu mekanik dayanım ve kimyasal direnç sağlar. Ayrıca, artan sıcaklıklarda yüksek sertliksağlar [11].

Termoset epoksi eldesinin ikinci aşamasında önpolimer, uygun bir çapraz bağlayıcı ile sertleştirilir. Örneğin, iki ayrı tüpte satılan epoksit yapıştırıcılarının birisinde önpolimer, diğerinde bir diamin vardır. İki madde karıştırıldığında Şekil 2.10.'daki tepkimeye uygun olarak epoksit grupları üzerinden çapraz bağlanma gerçekleşir ve polimer termoset yapıya geçer. Dietilen triamin, trietilen tetraamin, heksametilen tetraamin, m-fenilen diamin çapraz bağlanmada kullanabilecek diğer aminlerdir [11].



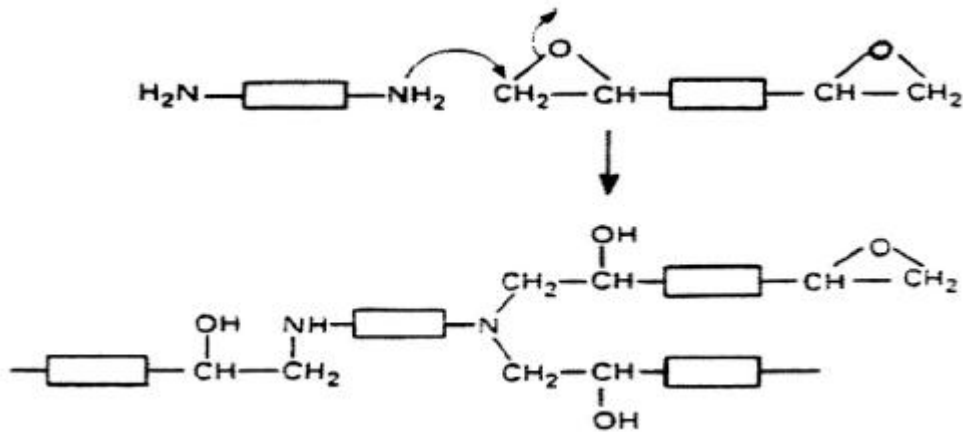
Şekil 2.10. Çapraz bağlanmış epoksi polimeri [11].

Epoksilerin çapraz bağlanma sırasında uçucu madde oluşmaz, çapraz bağlanma sonrası büzülme oranları da (%1-5) düşüktür. Ancak, fiyatları yüksektir ve pişirme zamanları uzundur. Pişirme zamanını azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanma tepkimeleri hızlandırılır. Kullanım sıcaklıkları polimer özelliklerine bağlı olarak 150°C'ye kadar çıkar [11]. Şekil 2.11'de de epoksi reçinelerin üretimi ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Epoksi reçinelerin üretimi [21].

Epoksi reçinelerde kullanılan başlıca sertleştiriciler; lewis bazları, inorganik bazlar, birincil ve ikincil aminler ve amidlerdir. Ayrıca, karboksilik asit anhidritler, dibazik organik asitler, fenoller ve lewis asitleri de asit sertleştiriciler olarak epoksi sistemlerde kullanılmaktadır [22].



Şekil 2.12. Epoksi reçinelerin amin çapraz bağlanması [21].



Proses gereklerini yerine getirmek için uygun sertleştirici ve/veya sertleştirici sistemi seçilerek sertleşme hızları kontrol altında tutulabilir. Genellikle epoksi reçineler, bir anhidrit veya bir amin sertleştirici eklendiğinde sertleşme reaksiyonuna girer. Her sertleştirici farklı bir sertleşme profili gösterir ve son ürüne farklı özellikler katar. Modifiye edilmemiş bisfenol-A reçineleri (diglisidiler bisfenol A-DGEBA) genellikle ıslak yatırma sistemlerinde ısıyla sertleştirmek için kullanılır. Bunlar aminle sertleştirildiklerinde, diamin difenilmetan gibi, 150°C'nin üstünde ısı defleksiyonu ısıyla mükemmel mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olurlar [23,24].

Girdilerin oranı ve özellikleri ayarlanarak, farklı alanlarda kullanılacak ürünler hazırlanır. Epoksitler, kimyasallara karşı dirençleri, dayanıklılıkları, esnek oluşları ve iyi yapışma özellikleri nedeniyle yüzey kaplamaları için eşsiz bir polimerdir. Kimyasal korozyona ve aşınmaya karşı yüzeylerin kaplanmasında; yüksek kuvvetler etkisinde kalan yerlerin kaplanmasında; tüp, boru ve endüstriyel tankların astarlanmasında kullanılır. Epoksitler kompozitler için de iyi bir matristir. Epoksilerin %80'ini kaplama, laminat hazırlama ve kompozit yapımında tüketilir [11].

Isıl işlem görmüş epoksilerin dayanımı yüksek, ısıl ve kimyasal dirençleri iyidir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Bu özelliklerin yanı sıra sahip olabilecekleri formülasyonların çeşitliliği ve çok yönlü işlenebilirlik özellikleri nedeniyle epoksi termosetler, birçok uygulama alanı bulmuştur. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. Yüzey kaplamaları, endüstriyel döşemeler, cam takviyeli kompozitler ve yapıştırıcılar uygulama alanı olarak sayılabilir. Epoksinin yalıtım özellikleri değişik elektronik uygulamalarda; örneğin transistör ve baskı devre plakalarında kullanılmalarını sağlar [8,9].

## 2.4. KARBON ELYAFLAR

Cam elyafın günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbonun elyafı kullanılmaktadır. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır [10].

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Karbon elyaflara çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafıda grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon elyaf üreticilerinin devamlı bir gelişim içerisindeki çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır [10]. Karbon elyaflar piyasada ikibitimde bulunmaktadır:

1. Sürekli Elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve önceden reçine emdirilmiş elyaflarda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

2. Kırpılmış Elyaf: Genellikle enjeksiyonla kalıplamada, basınçlı kaplarda, makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorulma dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler [10].

Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemedен elde edilir; zift ve PAN (Poliakrilonitril). Karbon, yoğunluğu  $2.268 \text{ g/cm}^3$  olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Karbon ve grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik

fiber olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak PAN, Selüloz (Rayon) veya Zift (Pitch) kullanılır. Dolayısı ile de üretildikleri maddelere göre isim alırlar. Günümüzde rayon sadece çok düşük modüllü elyaflar için kullanılır. Bu hammadde inert bir atmosferde 1000- 3000°C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler. Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ile 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür [9].

Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. Karbon elyafın gerçek özellikleri üretim metoduna bağlıdır. Endüstriyel olarak karbon elyaf üretim metodları termal oksidasyon ve organik precursor kullanılarak grafitleme işlemleridir [9]. PAN tabanlı karbon elyaflar, kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif yapabilmek için sürekli geliştirilmektedir. PAN, karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir;

1. Oksidasyon: Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300°C’de ısıtılır. Bu işlem, elyaftan hidrojenin ayrılmasını daha uçucu olan oksijenin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyaha dönüşür.

2. Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000°C’ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen karbon elyafın sınıfını belirler;

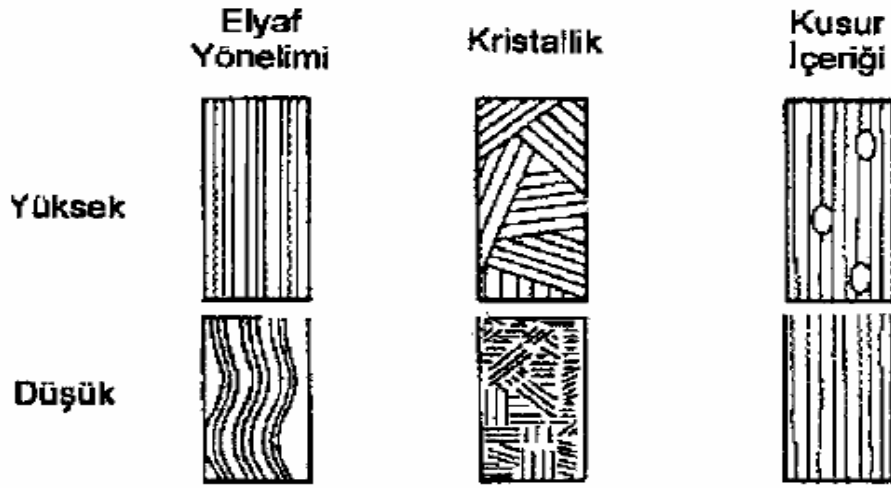
3. Yüzey iyileştirmesi: Karbon elyaf, yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

4. Kaplama: Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötür bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Kaplama işlemi için genellikle epoksi kullanılır [10].

Karbon elyafın tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek elastiklik modülüne sahip olmasıdır. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir [10].

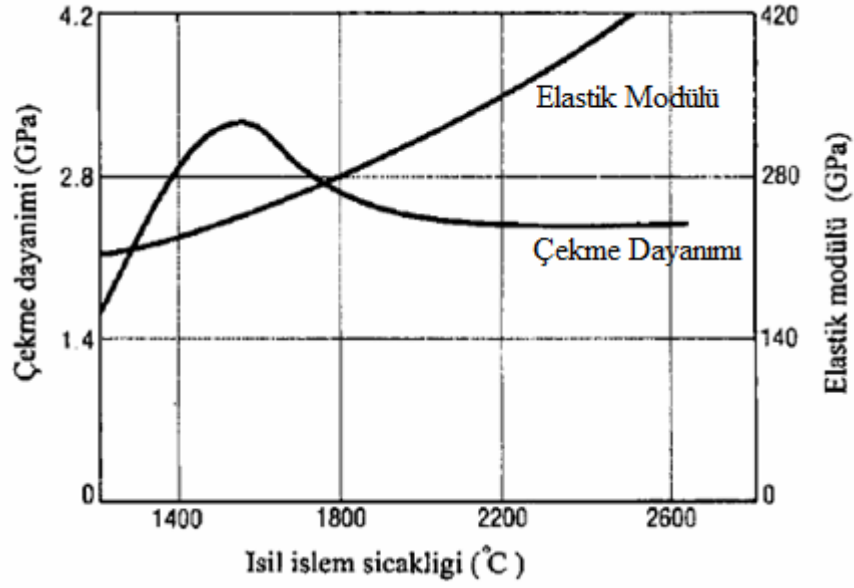
Karbon lifleri, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir lif türüdür. 1960'lı yılların ikinci yarısından itibaren kullanılmaya başlanmış olan bu liflerin, düşük yoğunluğuna karşın çekme dayanımı ve elastisite modülü yüksektir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen karbon liflerinin özellikleri, üretimindeki son işlemin sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uygulamada 6 ile 10 µm arasında değişen çaptaki liflerin 1000-1500 adetlik demetlerinden oluşan fitil ve dokumalar kullanılmaktadır. Üstün özelliklerinin yanı sıra son derece pahalı olan karbon lifleri, özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde yararlanılan bir malzeme niteliğindedir. Yüksek maliyeti nedeniyle yapı alanında kullanılmamaktadır [25].

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğunun yanında yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar. Şekil 2.13'te karbon elyafların bazı temel yapısal özellikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.



Şekil 2.13. Karbon elyafların temel yapısal özellikleri [9].

Kompozit malzemelerde karbon ve grafit elyaflar, çeşitli şekillerde, örneğin, sürekli lifler ve demetler, kırılmış elyaflar, örgü ve dokunmuş elyaflar, öğütülmüş elyaflar olarak kullanılmaktadır. Sürekli elyafların çapları genellikle 8-10  $\mu\text{m}$  ve iplik demeti şeklinde yaklaşık 12-120 000 sayıdan oluşabilmektedir. Örgü şeklindeki elyaflar kompleks şekilli parçaların kalıplanarak üretilmesine daha uygundur. Şekil 2.14’de tipik bir grafitleme çevirimi ve sıcaklığın çekme dayanımı ve modülü üzerine etkisi gösterilmiştir. Ticari olarak PAN karbon elyafların iki tipi mevcut olup bunlar yüksek elastik modüllü (Tip 1), yüksek dayanımlı (Tip 2) olanıdır. En yüksek modül 2500-3000°C de üretilir. Ancak, dayanım ince yapı ve çatlakların dağılımı ile ilgilidir. Yüksek sıcaklık matrislerinde kullanmak için elyaflar, metal veya seramik koruyucu filmleri ile de kaplanabilir. Azot atmosferinde kararlı olmasına rağmen 400°C üzerinde havada artan oranda oksitlenir. Ancak uçak frenlerinde olduğu gibi 1000°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda karbon elyaflı kompozitler dayanıklı olduklarından karbon elyafların kullanımı hızla artmaktadır [9].



Şekil 2.14. Çekme dayanımı ve elastiklik modülü üzerine sıcaklığın etkisi [9].

Karbon elyaflar pahalıdır, bu nedenle ileri kompozitleri hazırlanarak fiyatın önemli olmadığı uzay araçları, uçaklar, ileri teknoloji vb. alanlarda kullanılırlar. Otomobil endüstrisi açısından karbon takviyeli kompozitlerin fiyatları henüz çelik rekabet edecek düzeyde değildir. Karbon lifler de, cam lifler gibi yüzeyleri uygun bir polimerle (genelde epoksi ile) kaplanarak kompozit yapımına kadar korunurlar [11].

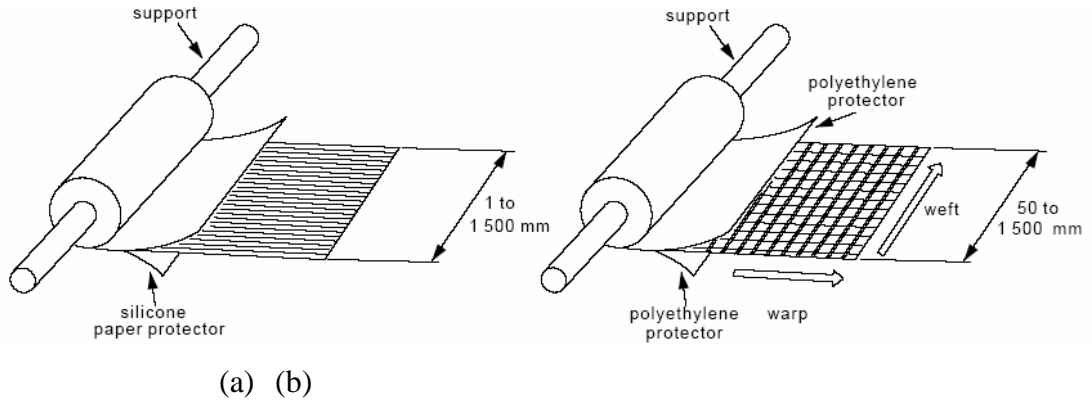
## 2.5. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir olan otoklav metodu aşağıda açıklanmıştır.

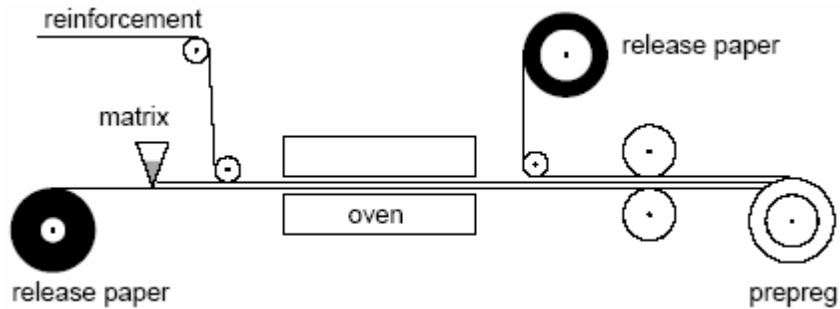
Pre-empregne (Prepreg): Kuvvetlendirici lifler, yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirme işlemine maruz kalmadan önce reçine ile ıslatılarak bu işlemlere hazır hale getirilir. Bu olaya prepreg denir. Önceden reçine emdirilmiş fiberlerdir. Tek yönlü (takviye elemanı tek doğrultuda) olarak ve dokuma formunda (takviye elemanı birçok doğrultuda) elde edilebilir. Prepreglerde genelde epoksi reçineler kullanılır. Reçine/elyaf oranının çok iyi bir şekilde kontrol edilebildiği bu yöntem uçak sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Prepregler vakum hatta basınç (7 bar)

altında piştiklerinden katlar arası yapışma çok başarılıdır ve boşluk oranı asgariye indirilmiştir [17,18].

Prepreg metodu el ile yayma metoduna göre çok daha hassas bir metottur. Vakum torbası hazırlanması ve otoklavda (yapısal olmayan elemanlar için fırında) sertleştirme zorunluluğu yüzünden imalat maliyeti daha fazladır. Şekil 2.15 ve şekil 2.16'da prepreglerin üretim süreçleriyle ilgili görseller sunulmuştur. Prepregler, belirli bir raf ömrüne sahip olduklarından kullanım öncesinde dondurularak (-18 derece ve daha düşük sıcaklıklarda genelde 6 ay-1 yıl ömürlüdür) depolanması zorunludur. Ayrıca prepreglerin otoklavda, fırında sertleştirilmeleri öncesi oda sıcaklığında kalış süreleride yaklaşık 24 saatle sınırlıdır. Bu prepregler, bilgisayar kontrollü lazer veya su jeti ile kesilerek yaprak seklinde levhalar oluşturulur ve bunlar kalıp içerisine belirli yönde yerleştirilerek istif edilir. Örneğin,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$ ,  $0^\circ/45^\circ$ ,  $45^\circ/45^\circ$  vb.



Şekil 2.15. Tek yönlü ve dokuma şeklindeki prepreg görünüşü Tek yönlü prepreg, b) Dokuma prepreg [17].



Şekil 2.16. Prepreg üretim şeması [17].

Prepreg, havacılık endüstrisi, tren, enerji, denizcilik endüstrisi, spor araçları gibi birçok yerde kullanım alanına sahiptir. Bir otoklav sisteminde, farklı malzemelerin kür işlemi için, belirlenmiş bir programa göre basınçlı bir tank içerisinde kompleks kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bir otoklav kür sisteminin ana elemanları; basınçlı bir tank, tank içerisinde gaz akımını sağlayan bir ısı kaynağı, iç basınç sistemi ve operasyon kontrol sistemleridir. Ayrıca kalıpları otoklava yüklemek için, raylı bir araç sistemi gereklidir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.

Otoklav kür işleminden önce, malzemeler kompozit serme katlarına reçine miktarını ve basıncı kontrol altında tutabilmek için uygun olarak yerleştirilir. Kür işlemi süresince sıcaklık, basınç ve malzemeler kontrol edilmelidir. İnce katman, ayırıcı, emici, bariyer, havalandırıcı, baraj ve vakum çantası otoklav kür işleminde malzeme hazırlamada kullanılan malzemelerdir. Malzemeler kirlenmelerden korunmuş olmalı ve kür sıcaklığı ile uyumlu olmalıdır. Şekil 2.17’de basit bir serme konfigürasyonu görülmektedir.

İnce katman: İsteğe bağlı olarak, kompozit laminatların üstünde veya altında kullanılırlar. Genellikle dokunmuş naylon, poliester veya camyünü kumaş olurlar [16].

Ayırıcı: Kompozit laminatın ve “ince katman”ın altına veya üstüne yerleştirilir. Florokarbon polimerleri içeren naylonumsu bir malzemedir. Amacı, kür işlemi sırasında uçucu gazların ve fazla reçinenin prepreg’in yüzeyinden uzaklaştırılıp “emici” ye geçmesini sağlamaktır [16].

Emici: Kür işlemi sırasında laminatlardan (prepreg) fazla reçineyi emmek üzere cam yünü veya emici başka bir kumaştan yapılmış malzemedir [16].

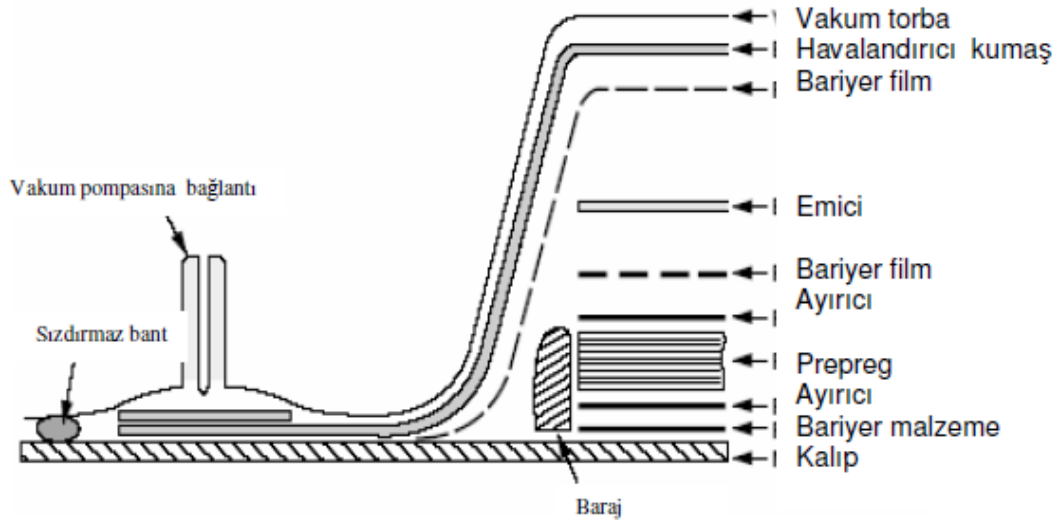
Bariyer: Emici ve havalandırıcı katları arasında kullanılan, emicinin emdiği malzemenin daha yukarı çıkarak, vakum hattını tıkamaması için konulan, genellikle gözeneksiz veya az gözenekli, yapışmayan türde bir film malzemedir [16].



Havalandırıcı: Bariyer film üzerine yerleştirilen, uygulanan vakumun tüm parça yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağılabilmesi için konulan, camyünü, poliester veya pamuktan elde edilmiş, oldukça gözenekli bir yapıya sahip olan malzemedir [16].

Baraj: Laminatın kenarlarında fazla reçine kaplanmasını engellemek ve vakum çantasının işlem sırasında kenarlarda toparlanmasını önlemek için yerleştirilir [16].

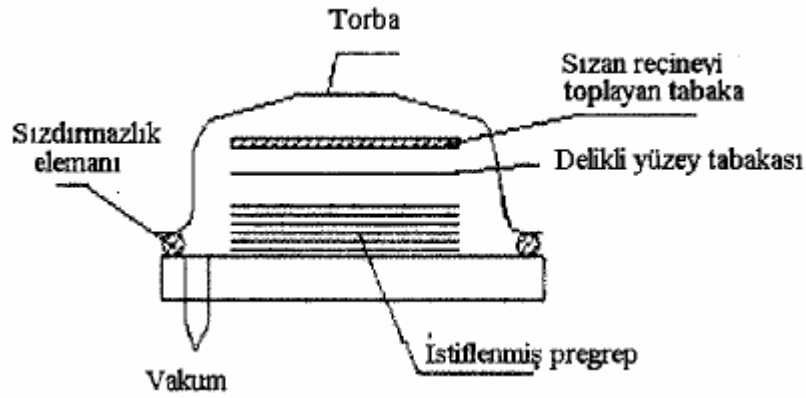
Vakum çantası: Hazırlanan parça üzerine kür işleminden önce ve kür işlemi sırasında basınç uygulamakta kullanılan naylon malzemedir [16].



Şekil 2.17. Basit bir serme konfigürasyonu [17].

Kalıp içerisine levha şeklinde istif edilen elyaf ve matris çiftleri sistemdeki tüm havayı dışarı atmak için vakum torbasına konulur. Bunun içinde delikli yüzey tabakası ve sızan reçineyi toplayan tabakalarda bulunur. Bunların üzerine naylon örtülür ve kenarlardan sızdırmazlık sağlanır, otoklav yavaşça ısıtılır. Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulamak gerekmektedir. Düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metod, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba

verilmesidir. Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Otoklavın ısıtılmasıyla önce reçine erimeye başlar sonra basınç altında ve sıcaklıkta bir gaz altında sertleşmesi sağlanır. Atmosfer basıncı kalıp içindeki havayı ve sızan reçineyi ve laminattaki boşlukları elimine eder ve yapının bütünlüğünü sağlar. Parçanın son bitirme yüzeyini iyileştirir. Sıcak gazın sirkülasyonu düzenli bir sıcaklık sağlar [9]. Bu teknik ekonomik olup vakum altında uygulama sadece basınçlı gaz aracılığıyla torba kalıbı üzerine yapılmaktadır. Böyle bir torba kalıplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Torba kalıplama yöntemi şematik görünüşü [9].

Diğer kompozit malzeme üretim yöntemleri; Elle yatırma (hand lay-up), Püskürtme (spray-up), Elyaf sarma (filament winding), Reçine transfer kalıplama RTM/reçine enjeksiyonu, Profil çekme/pultrüzyon (pultrusion), Hazır kalıplama/compression molding (SMC,BMC), Hazır kalıplama pestili/SMC (sheet moulding composites), Hazır kalıplama hamuru/BMC (bulk moulding composites), Preslenebilir takviyeli termoplastik/glass mat reinforced thermoplastics (GMT) vb birçok üretim yöntemi vardır [10].

## 2.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için

kullanılmaktadır. ay tepsisi, masa, sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri ve araç Őarjı, atlama sırtları, tenis raketi, yarış kanoları değişik kompozit malzemelerden yapılan ürünlerdir [10]. Kompozit malzemelerin başlıca uygulama alanları:

1. Uzak ve havacılık sanayisi: Kompozit malzemelerin uzak ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlıklı nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaŐmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düŐünmeyip stratejik performanslarda dikkate alınmıŐtır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzak ve havacılık sanayinde kompozit malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Kompozit malzemeler, değerli niteliklerinden dolayı uzak ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında kompozit malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaŐmıŐ bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve keklar elyafı değişik reçinelerle değişik kompozit malzemelerin yapımında kullanılmaktadır [10,26].

2. Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisi: Kompozit malzemelerin silah üretiminde kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuŐtur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaŐ performansını artırıcı niteliktedir. Roket retiminde kompozit malzemelerin rolü oldukça büyüktür. rnek olarak M72’de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen keklar ve epoksiden, M77 MLRS’de lle (nozzle) karbon kompozit malzemesinden yapılmaktadır. Miğfer konusunda keklar ve değişik reçineler kullanılmaktadır. KurŐun geçirmez yeleklerde günümüzde bitiŐli keklardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçinelerden imal edilmektedir ve tasarım alternatiflerinin bulunmasıyla gitgide artacak ve birçok avantajlarıyla insanlığın hizmetine verilmiŐ olacaktır [9,10,26].

3. Őehircilik: Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, evre güzelleŐtirme çalıŐmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin

çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkânları, kullanıcıya da yüksek yalıtım kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkânları sağlamaktadır [26].

4. Ev aletleri: Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır [26].

5. Elektrik ve elektronik sanayi: Kompozitler, başta elektriksel yalıtım olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

6. Otomotiv sanayi: Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.

7. İş makineleri: İş makinelerinin kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik yalıtım malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.

8. İnşaat sektörü: Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır [26].

9. Tarım sektörü: Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır [26].

## BÖLÜM3

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

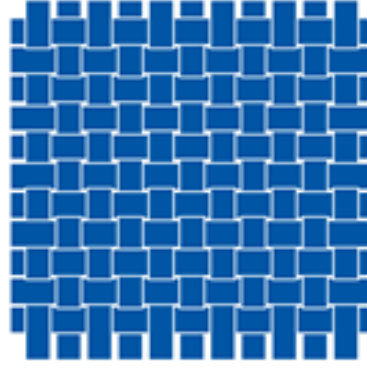
Deneysel çalışmalarda, CYTEC Engineered Materials firmasından temin edilmiş olan HMF 934 kodlu karbon prepregler, karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretiminde kullanılmıştır. Yedi katdan oluşan karbon prepreg kumaşlar vakum ortamında, ısı ve basınç altında kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Karbon kumaş dokumalar  $0^\circ$  ve  $0^\circ$ - $45^\circ$  olacak şekilde iki farklı şekilde dizilmiştir. Birinci şekilde dizilenler yönsüz,  $0^\circ$ - $45^\circ$  açılarla dizilerek üretilen kompozitler yönlü olarak adlandırılmıştır. Her iki grup kompozit üretiminde uygulanan basınç ve kürlenme süresi değiştirilerek basınç ve zamanın üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Kürlenme sıcaklığı ise bu malzemelerin üretiminde sıkça kullanılan  $170^\circ$  C seçilmiş ve sabit tutulmuştur. Uygulanan basınç değerleri; 16" = 0,53 atm, 20" = 0,67 atm, 27" = 0,9 atm ve kürlenme zamanı; 160 dk ve 200 dk olarak seçilmiştir. Üretim planı şematik olarak Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Üretilen numunelere sehim ölçümü, çekme testi, 3 nokta eğme testi ve SEM analizleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Numunelerin üretim planlaması.

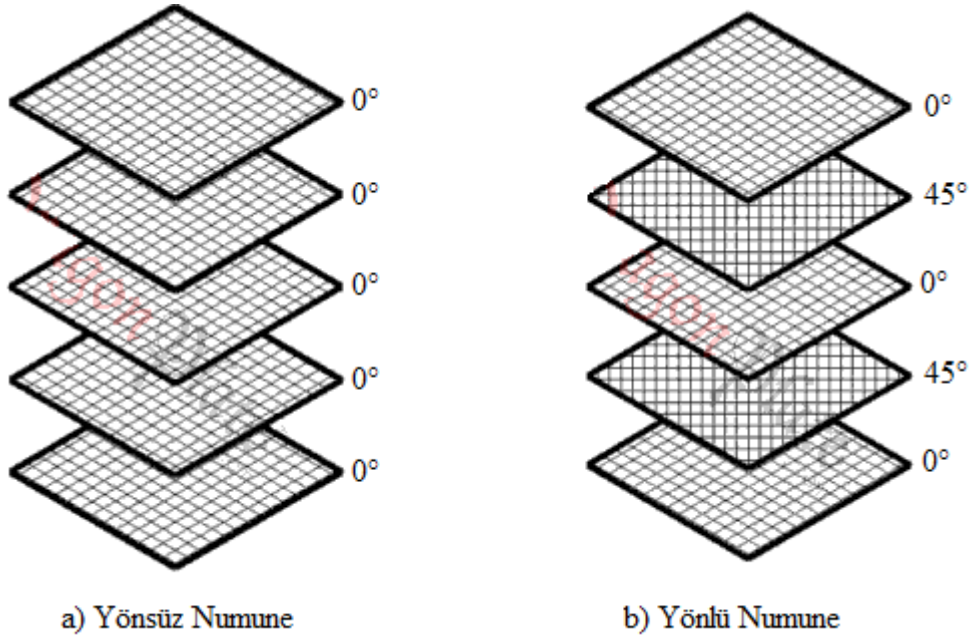
	Yönlü			Yönsüz		
160 dk kürlenme süresi	16" basınç	20" basınç	27" basınç	16" basınç	20" basınç	27" basınç
200dk kürlenme süresi	16" basınç	20" basınç	27" basınç	16" basınç	20" basınç	27" basınç

Bu tez çalışmasında Şekil 3.1.'de ki dokuma stiline sahip kumaşlar kullanılmıştır. Bu kumaşlar 7 kat halinde aynı yönde serilerek ( $0^\circ$ ) yönsüz olarak adlandırılan birinci grup kompozit malzemeler vakum torbalama tekniğiyle üretilmiştir. Yönlü olarak

adlandırılan ikinci kompozit grubunda ise karbon kumaşlar sırayla  $0^\circ$  ve  $45^\circ$ 'lik açıyla serilerek yine toplamda 7 kat olacak şekilde vakum torbalama tekniğiyle üretilmiştir. Tabakalandırma işlemi temsili olarak Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Numune üretiminde kullanılan prepreg dokuma stili.



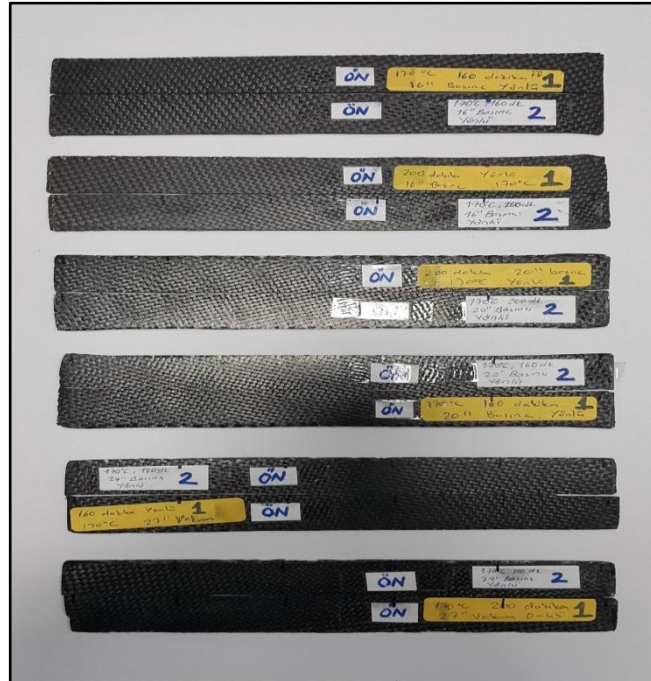
Şekil 3.2. Prepreglerin tabakalandırılması ve yönlenmelerinin gösterimi a) Yönsüz numunenin tabakalandırılma şekli, b) Yönlü numunenin tabakalandırılma şekli.

Yönlü ve yönsüz karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin kürlenme işlemi  $170^\circ\text{C}$ 'de yapılmıştır. Basınç ve kürlenme zamanının kompozitin mekanik özelliklerini incelemek için üç farklı basınç; 16", 20" ve 27" değerleri kullanılmıştır. Her bir basınç değeri için iki farklı kürlenme süresi; 160 dakika ve 200 dakika

seçilmiştir. Bu koşullarda üretilen yönsüz ve yönlü olarak adlandırılan karbon elyaf takviyeli kompozitler Şekil 3.3 ve 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yönsüz ( $0^\circ$ ) numune grubu.



Şekil 3.4. Yönlü ( $0^\circ$ - $45^\circ$ ) numune grubu.

### 3.1. SEHİM ÖLÇÜMÜ

Üretilen numunelerin sehimini ölçmek için iki adet benzen mesnedi, bağlama aparatları, 20 N'luk yük, komparatör saati ve yük asma aparatından oluşan ve şekil 3.5'de sunulan bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Başlangıçta her bir numunenin boyutları (en, boy, kalınlık değerleri) kumpas yardımıyla birden fazla noktadan ölçülerek ortalama değerler bulunmuştur. Her numuneye 20 N'luk yük asılarak oluşan sehim miktarı komparatör saatinden okunarak kaydedilmiştir. Komparatör saati üzerindeki iki çizgi arası 0.01 mm'ye denk gelmektedir.



Şekil 3.5. Sehim ölçme deney düzeneği.

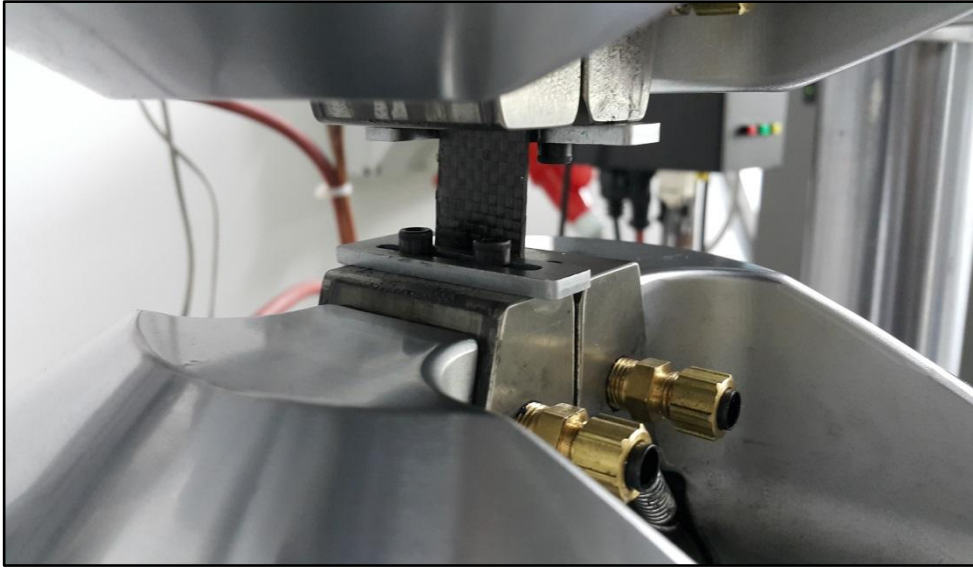
### 3.2. ÇEKME TESTİ ÇALIŞMASI

Çekme testleri Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM)'ndeki Dinamik Test Laboratuvarı'nda bulunan MTS marka 100 kN'lık dinamik test cihazında ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı 0,1 mm/dk olarak uygulanmıştır.





Şekil 3.6. MTS Marka 100 kN Dinamik Test Cihazı.



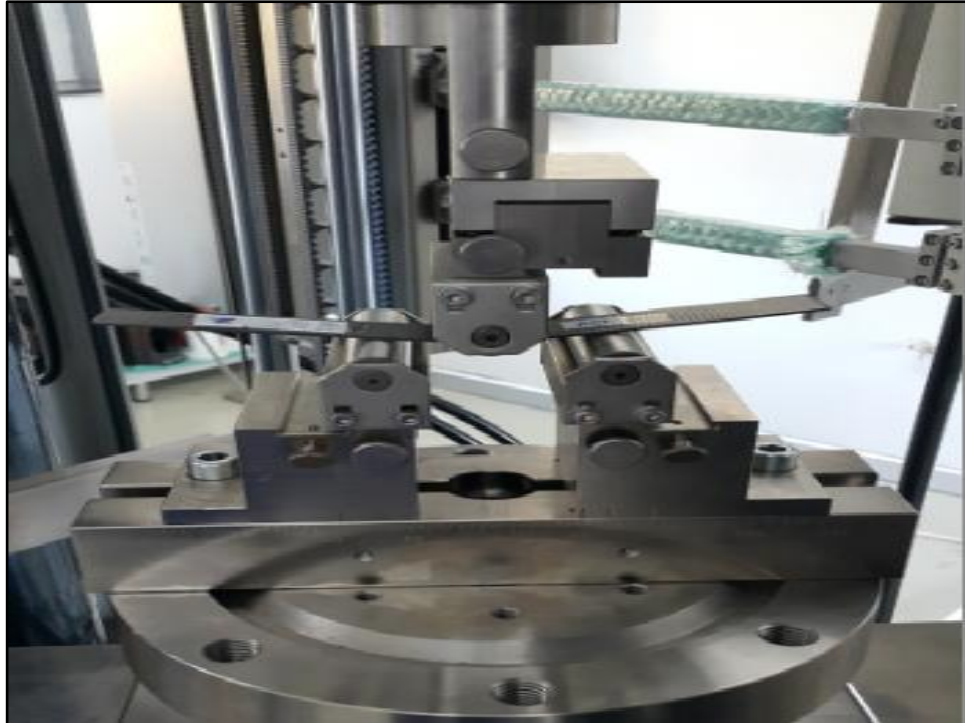
Şekil 3.7. Çekme testinin uygulanışı.

### 3.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ ÇALIŞMASI

Üç nokta eğme testleri Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM)'ndeki statik Test Laboratuvarı'nda bulunan Zwick marka 600 kN'lik elektromekanik test cihazında ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test hızı 2 mm/dk, mesnetler arası mesafe 50 mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.8. Zwick marka 600 kN Elektromekanik Test Cihazı.



Şekil 3.9. Üç nokta eğme testinin uygulanışı.

### 3.4. SEM ÇALIŞMASI

SEM çalışması Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM)'ndeki SEM Laboratuvarı'nda bulunan Carl-Zeiss Ultra Plus cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Carl Zeiss Ultra Plus SEM cihazı.

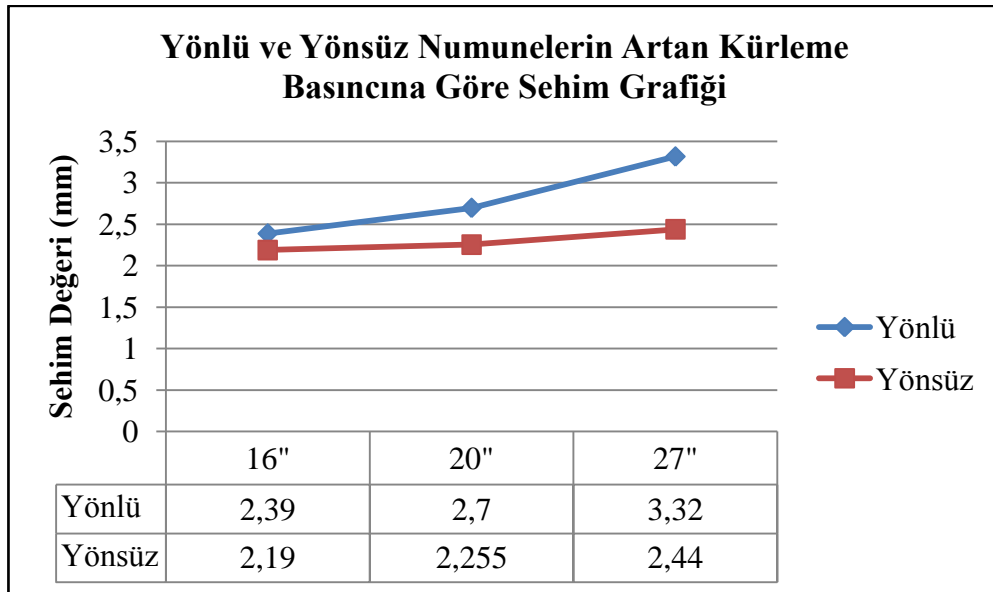
## BÖLÜM4

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. SEHİM ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

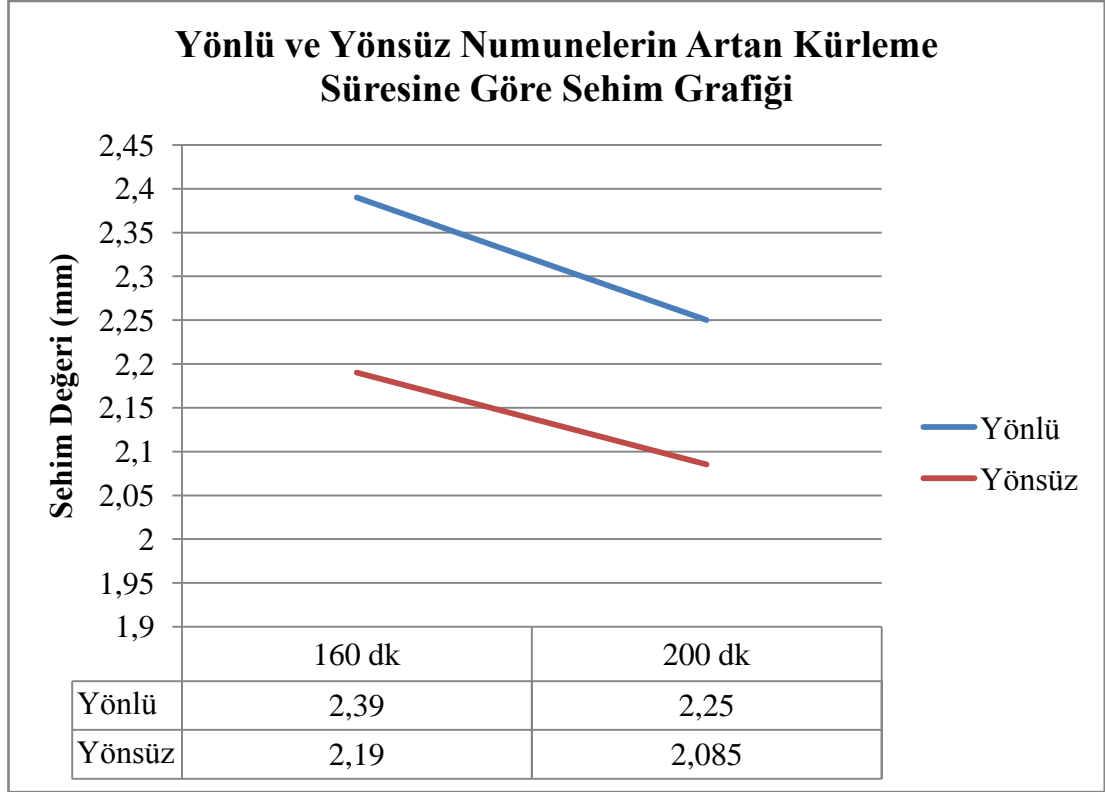
Şekil 3.5.'de sunulan deney düzeneği kullanılarak kompozitlere 20 N'luk yük bir yük asma aparatı yardımıyla uygulanmış ve meydana gelen sehim miktarı ölçülmüştür. Yük asma aparatının ağırlığı 33,56 gr olarak ölçülmüş ve newton'a çevrilerek (0,3 N) malzemelere uygulanan yük değerine ilave edilmiştir.

Yönlü ve yönsüz numunelerin 160 dakika kürleme süresi ve 20,3 N yük koşullarında elde edilen sehim ölçümü sonuçları Şekil 4.1.'de sunulmuştur. Artan kürleme basıncına bağlı olarak malzemelerin vermiş oldukları sehim miktarı artış göstermektedir. Yönsüz olan kompozitin diğerine göre daha düşük esneme gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.1.160 dakika kürleme süresi ve 20,3 N yükü için yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme basıncına göre sehim grafiği.

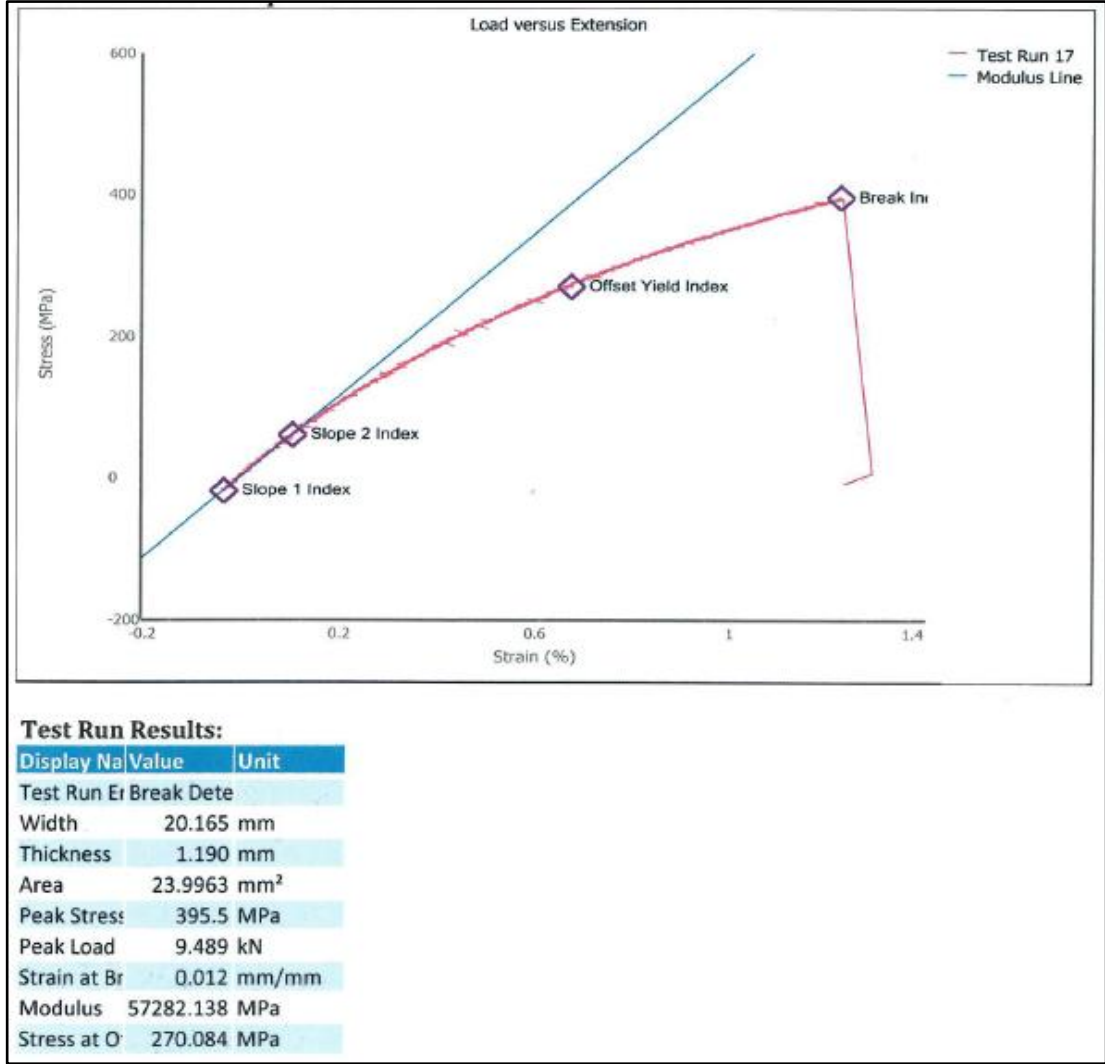
20,3 N yük ve 16" basınç koşullarında kürlenmiş kompozitlerin sehım ölçüm sonuçları Şekil 4.2.'de verilmiştir. Artan kürlenme süresine bağlı olarak malzemelerin vermiş oldukları sehım miktarı azalmagöstermektedir. Bu da artan kürlenme zamanı ile malzemenin dayanımının arttığını ve esnekliğinin azaldığını ifade etmektedir.



Şekil 4.2. 20,3 N yük ve 16" basınçta kürlenmiş yönlü ve yönsüz kompozitlerin artan kürlenme süresine göre sehım grafiği.

#### 4.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Çekme testleri Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Dinamik Test Laboratuvarı'nda bulunan MTS marka 100 kN dinamik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi ASTM D3039 standardına göre ve 0.1 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Testler üçer tekrar olarak aynı özellikteki her numune için yapılmış ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'de 200 dk ve 27" basınçta kürlenmiş yönsüz bir kompozitin çekme (gerilme-uzama) grafiği örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.3. 200 dk ve 27" basınçta kurlenmiş yönsüz numunenin çekme mukavemeti grafiği.

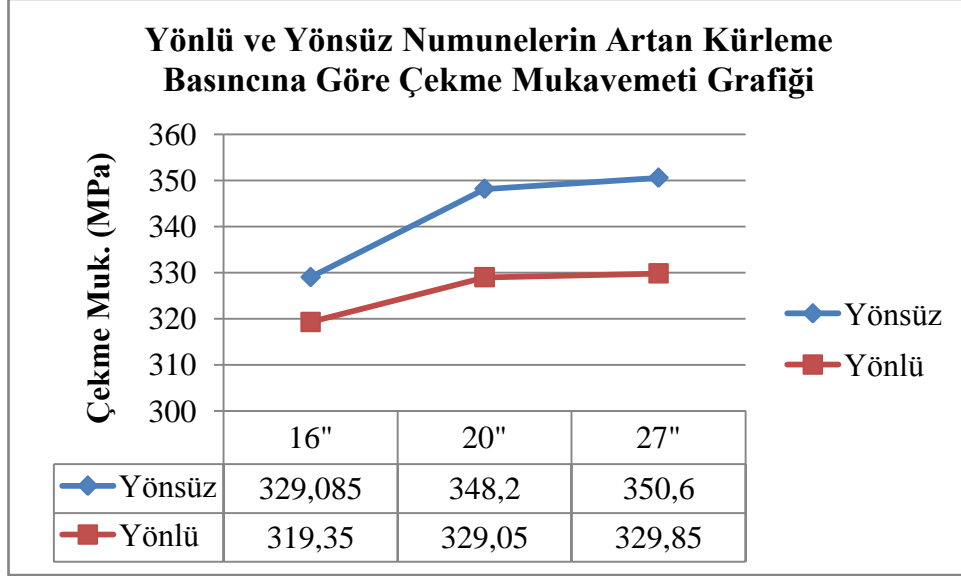
Bu grafikte görüleceği gibi kompozit malzemede kırılma öncesi bir miktar plastik deformasyon oluşmuştur. Toplam şekil değişimine bakıldığında kompozitin bir refrakter özellik sergilediği belirlenmiştir. Diğer yönsüz kompozitlerin çekme grafikleri de benzer olduğundan burada sunulmamıştır. Yönsüz kompozit malzemelerin çekme deneylerinden elde edilen elastiklik modülü, maksimum gerilme ve kopmadaki şekil değişimi kurlenme koşullarına göre Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Yönsüz kompozitlerin çekme deney sonuçları.

<b>Numune Adı</b>	<b>Çekme Dayanımı (Mpa)</b>	<b>Elastiklik Modülü (Gpa)</b>	<b>Birim Şekil Değişimi (mm/mm)</b>
160 dk 16" yönsüz	329,085	40,98	0,008
200 dk 16" yönsüz	331,3	41,32	0,0085
160 dk 20" yönsüz	348,2	45,05	0,0077
200 dk 20" yönsüz	262,65	32,83	0,0086
160 dk 27" yönsüz	350,6	46,64	0,007
200 dk 27" yönsüz	391,35	55,05	0,007

Yukarıdaki tabloda 200dk ve 20" basınçta kürlenmiş kompozitin düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak artan basınçla mekanik değerler artığından buradaki düşmenin malzeme içerisindeki kusurlardan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

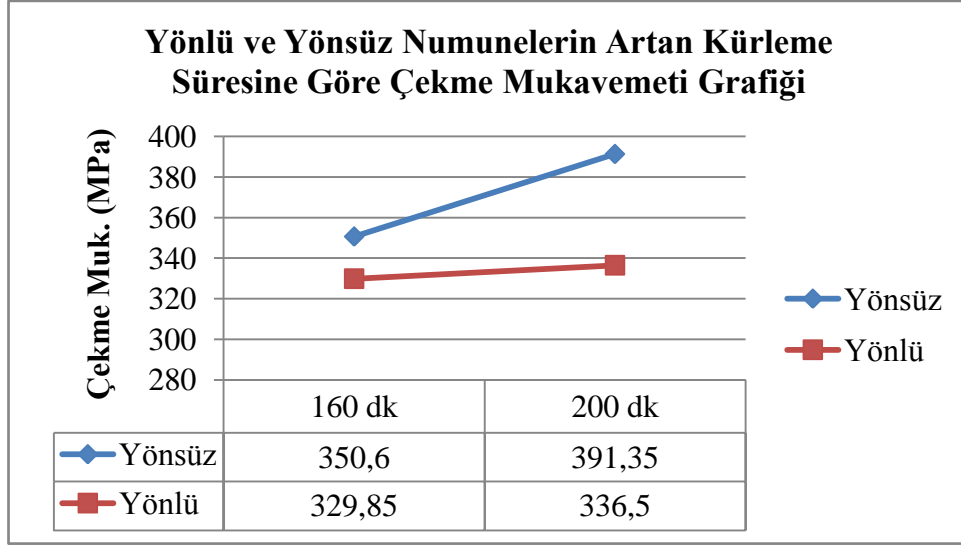
Yönlü ve yönsüz numunelere uygulanan çekme testlerinden elde edilen veriler önce kürlenme süresi sabit tutularak artan kürlenme basıncına göre değerlendirilmiştir. Örnek olarak 160 dakikada kürlenmiş yönlü ve yönsüz kompozitlerin çekme deneyinden elde edilen maksimum çekme dayanımlarına basıncın etkisi Şekil 4.4'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre kürlenme basıncı arttıkça çekme mukavemeti değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Benzer sonuç 200 dakikada kürlenmiş kompozitlerde de görülmüştür. Yönlü ve yönsüz kompozitlerin çekme dayanımları karşılaştırıldığında yönsüz kompozitlerin çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme basıncına göre çekme mukavemeti grafiği.

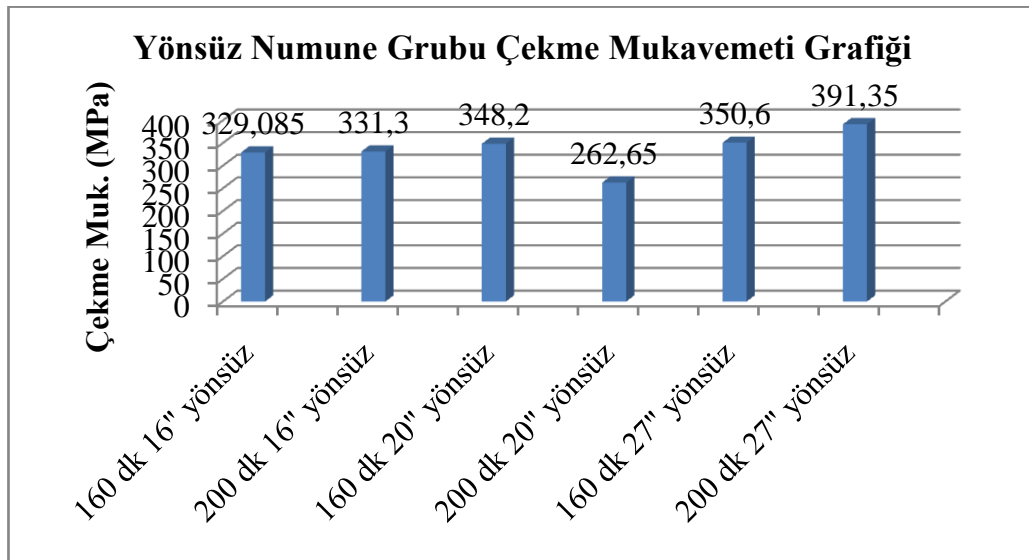
Kürleme zamanının kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için ikinci aşamada basınç sabit tutularak kompozitlerin çekme dayanımlarının kürleme zamanı ile değişimini gösteren grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerden bir tanesi (27" sabit basınç değeri için) Şekil 4.5'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre kürleme süresi arttıkça çekme mukavemeti değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Bu artışın yönlü kompozitlere kıyasla yönsüz kompozitlerde çok daha fazla olduğu görülmüştür. Basıncın çekme dayanımına etkisinde olduğu gibi, burada da yönsüz kompozitin daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar 16" ve 20" basınçlarında üretilmiş kompozitlerde de görüldüğü için burada ayrıca sunulmamıştır.





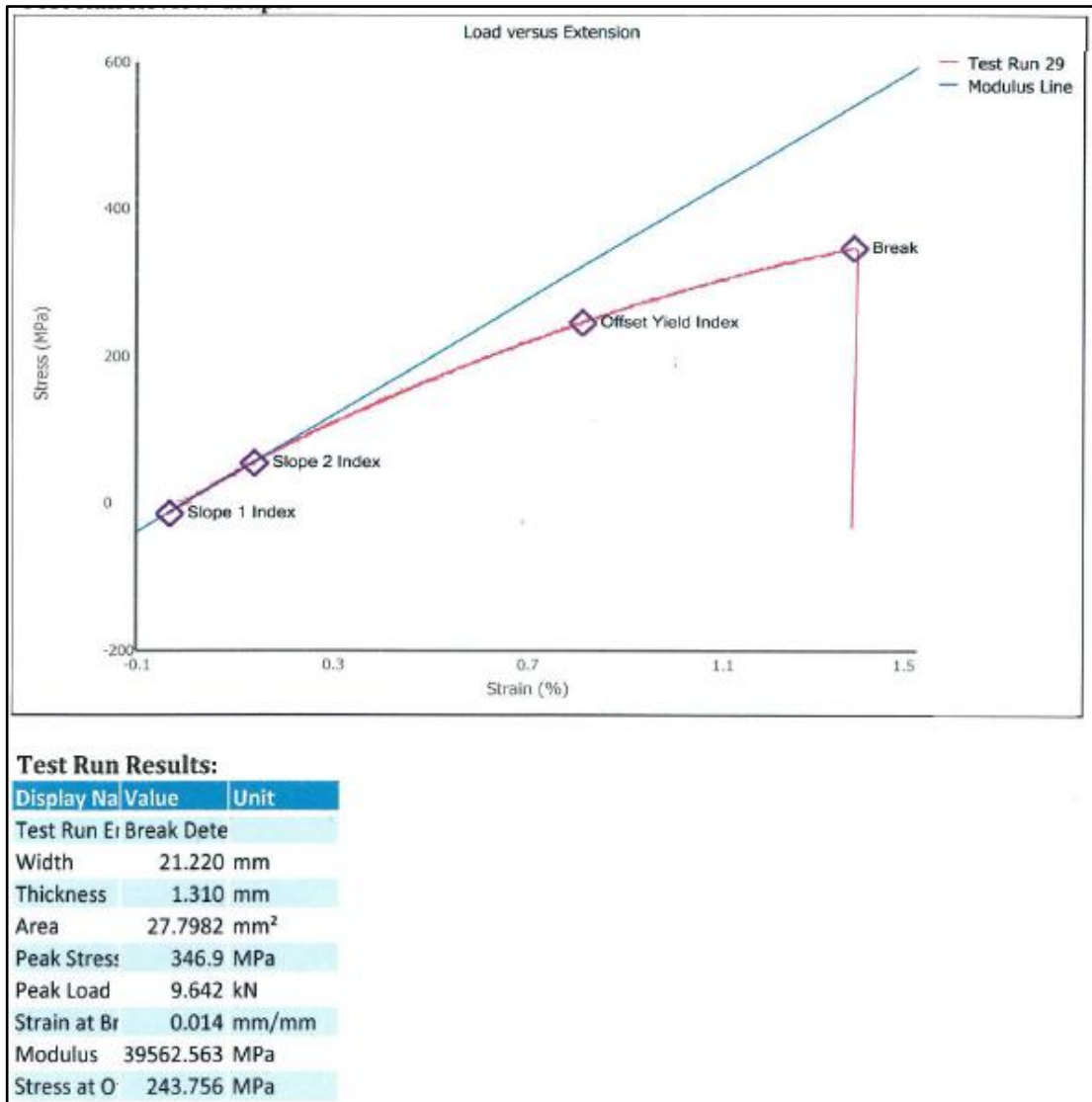
Şekil 4.5. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürlenme süresine göre çekme mukavemeti grafiği.

Yönsüz kompozitlerin ortalama çekme dayanımları Şekil 4.6.'da sunulmuştur. Yukarıdaki açıklamalarda belirtildiği üzere artan kürlenme süresi ve kürlenme basıncıyla beraber çekme dayanımının artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat yukarıda da belirtildiği gibi 200 dk süreyle 20" basınçta kürlenmiş yönsüz kompozitin çekme dayanımı diğer kompozitlerden düşük çıkmıştır. Bu durumun sebebinin üretim esnasında meydana gelmiş olan üretimsel bir hata (laminatlar arası tam yapışmama, porozite vb.) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Yönsüz numune grubu çekme mukavemetleri karşılaştırma grafiği.

Şekil 4.7.'de 200 dk 27" basınçta kürlenmiş yönlü bir kompozitin çekme (gerilme-gerinim) grafiği örnek olarak verilmiştir. Bu grafikten de görüleceği gibi yönlü kompozit malzemede de kırılma öncesi bir miktar plastik deformasyon oluşmuştur. Toplam şekil değişiminin düşük olduğu ve kompozitin kısmen bir refrakter özellik sergilediği belirlenmiştir. Diğer yönlü kompozitlerin çekme grafikleri de benzer olduğundan burada sunulmamıştır. Yönlü kompozit malzemelerin çekme deneylerinden elde edilen elastiklik modülü, maksimum gerilme ve kopmadaki şekil değişimi kürlenme koşullarına göre Çizelge 4.2.'de sunulmuştur.



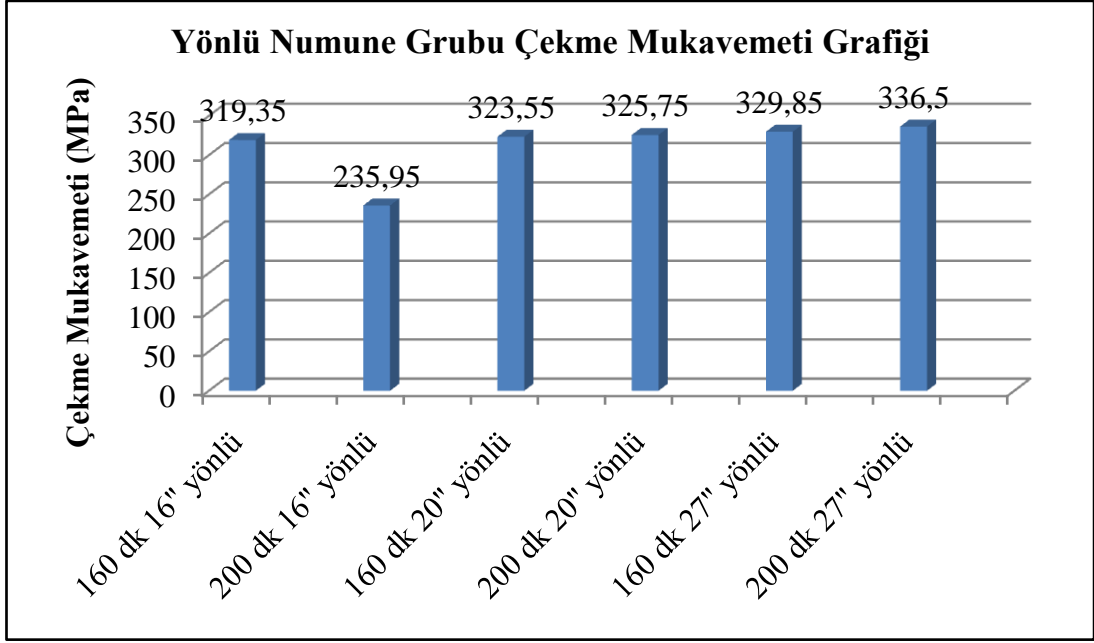
Şekil 4.7. 200 dk ve 27" basınçta kürlenmiş yönlü numunenin çekme mukavemeti grafiği.

Çizelge 4.2. Yönlü kompozitlerin çekme deney sonuçları.

<b>Numune Adı</b>	<b>Çekme Dayanımı (Mpa)</b>	<b>Elastiklik Modülü (Gpa)</b>	<b>Birim Şekil Değişimi (mm/mm)</b>
160 dk 16" yönlü	319,35	36,78	0,009
200 dk 16" yönlü	235,95	28,14	0,0095
160 dk 20" yönlü	323,55	37,75	0,0092
200 dk 20" yönlü	325,75	38,97	0,0088
160 dk 27" yönlü	329,85	39,98	0,0091
200 dk 27" yönlü	336,5	40,34	0,009

Yukarıdaki çizelgede artan basınç ve kürleme zamanı ile yönlü kompozitlerin çekme dayanımlarının ve elastiklik modülünün genel olarak arttığı, birim şekil değişiminin hafif düştüğü görülmektedir. Fakat 200 dk ve 16" basınçta kürlenmiş kompozit diğerlerine göre zıt bir davranış sergilemiştir. Bu kompozitin düşük çekme dayanımına ve elastiklik modülüne, daha yüksek birim şekil değişimine sahip olması kompozit içerisindeki kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yönlü kompozitlerin ortalama çekme dayanımları Şekil 4.8.'de sunulmuştur. Yukarıdaki açıklamalarda belirtildiği üzere artan kürleme süresi ve kürleme basıncıyla beraber çekme dayanımının artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat 200 dk süreyle 16" basınçta kürlenmiş yönlü kompozitin çekme dayanımının diğer kompozitlerden düşük çıkmış olmasının üretim esnasında meydana gelmiş olan üretimsel hatalardan (laminatlar arası tam yapışmama, porozite vb.) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Yönlü numune grubu çekme mukavemetleri karşılaştırma grafiği.

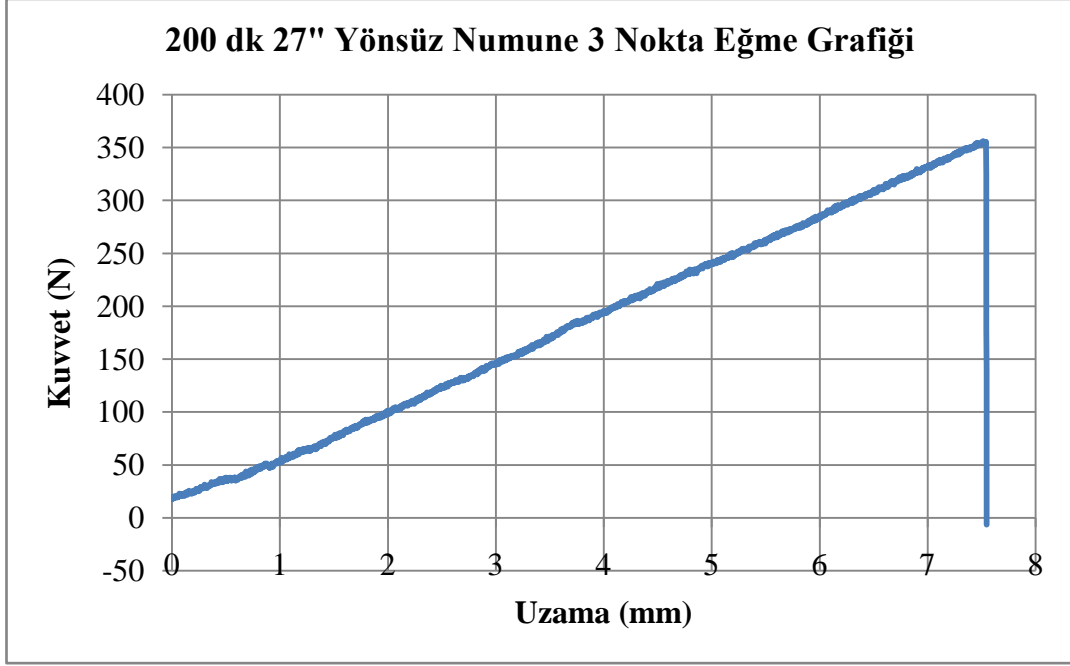
### 4.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARI

Çekme testleri Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Statik Test Laboratuvarı'nda bulunan Zwick marka 600 kN elektromekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi ASTM D790 standardına göre ve 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 50 mm olarak ayarlanmıştır. Testler üçer tekrar olarak aynı özellikteki her numune için yapılmış ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

Yönsüz numune grubunun eğme dayanımı;

$$\sigma = 3FL/2bd^2 \dots\dots\dots(1)$$

1 numaralı eşitliğe göre hesaplanmıştır. Eğme test sonuçlarına örnek olarak 200 dk 27'' basınçta kurlenmiş yönsüz numunenin eğme kuvveti-uzama grafiği Şekil 4.9'da ve numunelerin eğme dayanımları Çizelge 4.3.'te sunulmuştur.

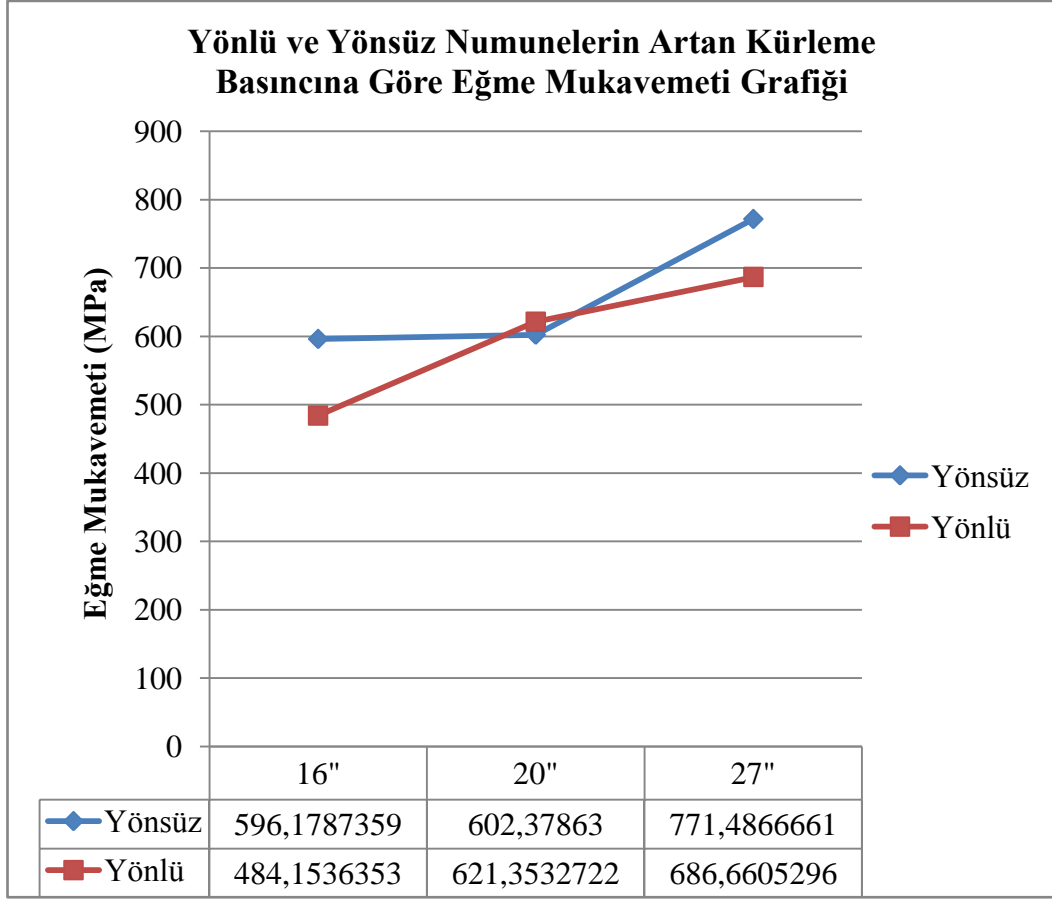


Şekil 4.9. 200 dk ve 27" basınçta kürlenmiş yönsüz numunenin eğme kuvveti-uzama grafiği.

Çizelge 4.3. Yönlü ve yönsüz numune gruplarının eğme mukavemeti, kuvvet ve uzama değerleri.

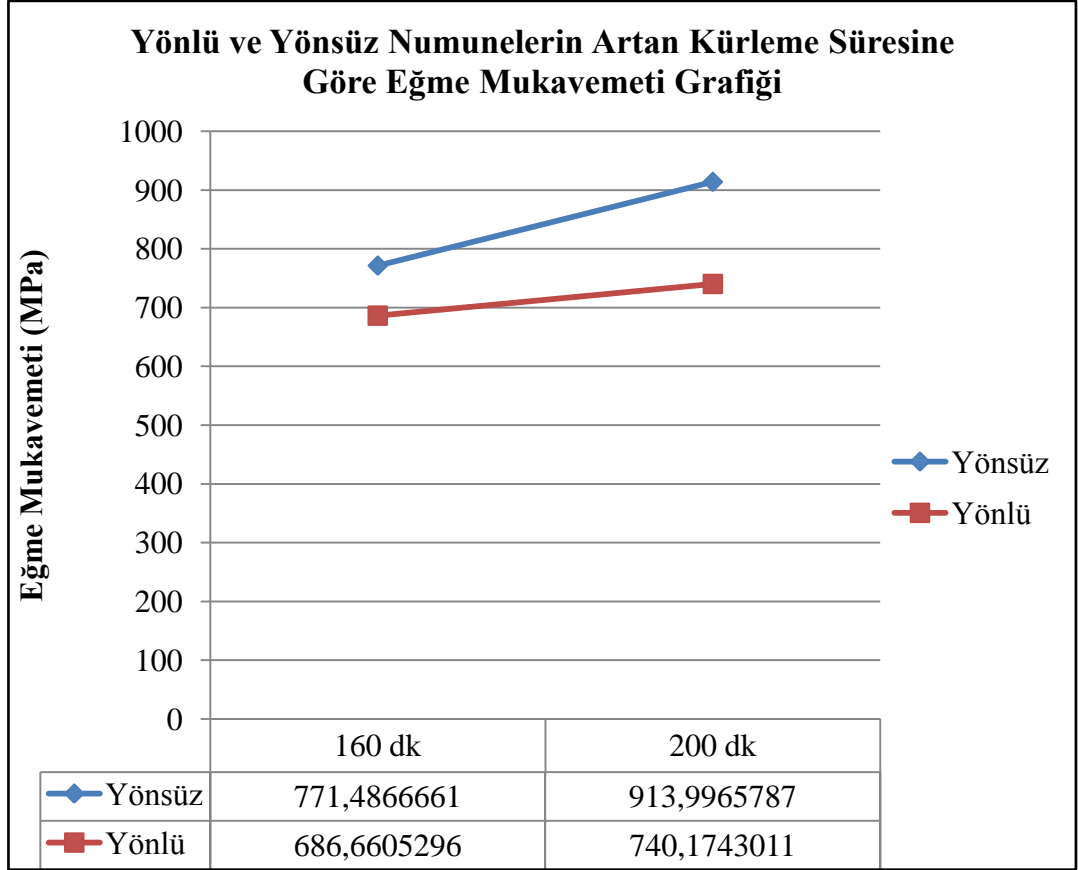
Numune Adı	Eğme Mukavemeti (Mpa)	Kuvvet (N)	Uzama (mm)
160 dk 16" Yönsüz	596,18	325,96	5,52
200 dk 16" Yönsüz	553,37	330,20	5,64
160 dk 20" Yönsüz	602,38	332,68	5,97
200 dk 20" Yönsüz	736,06	324,08	5,52
160 dk 27" Yönsüz	771,49	348,08	6,69
200 dk 27" Yönsüz	913,99	364,03	6,89
160 dk 16" Yönlü	484,15	277,03	5,89
200 dk 16" Yönlü	499,37	234,89	4,89
160 dk 20" Yönlü	621,35	279,27	5,96
200 dk 20" Yönlü	585,20	266,99	5,16
160 dk 27" Yönlü	686,66	294,34	6,06
200 dk 27" Yönlü	740,17	298,44	6,15

160 dk süreyle kürlenmiş yönlü ve yönsüz numunelere uygulanan üç nokta eğme testlerinden elde edilen veriler önce kürlenme süresi sabit tutularak artan kürlenme basıncına göre değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu sonuçlara göre kürlenme basıncı arttıkça üç nokta eğme mukavemeti değerlerinde artış gözlemlenmektedir.



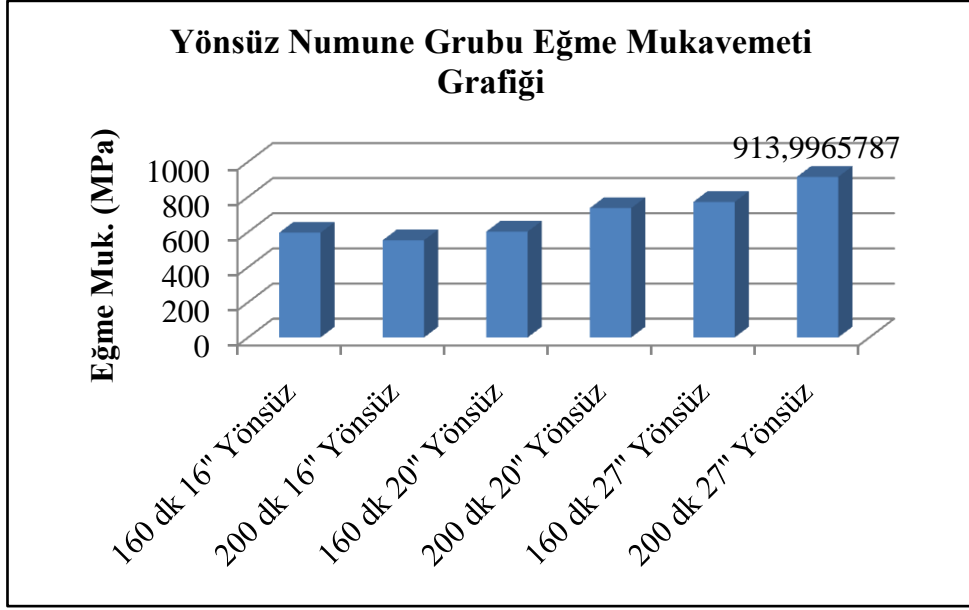
Şekil 4.10. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kütleme basıncına göre eğme mukavemeti grafiği.

27" basınç değerinde kürlenmiş yönlü ve yönsüz kompozitlerin üç nokta eğme testlerinden elde edilen veriler kütleme basıncı sabit tutularak artan kütleme süresine göre değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.11'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre kütleme süresi arttıkça üç nokta eğme mukavemeti değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Yönlü ve yönsüz kompozitlerin eğme mukavemet değerleri karşılaştırıldığında yönsüz kompozitlerin eğme dayanımlarının yönlü kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



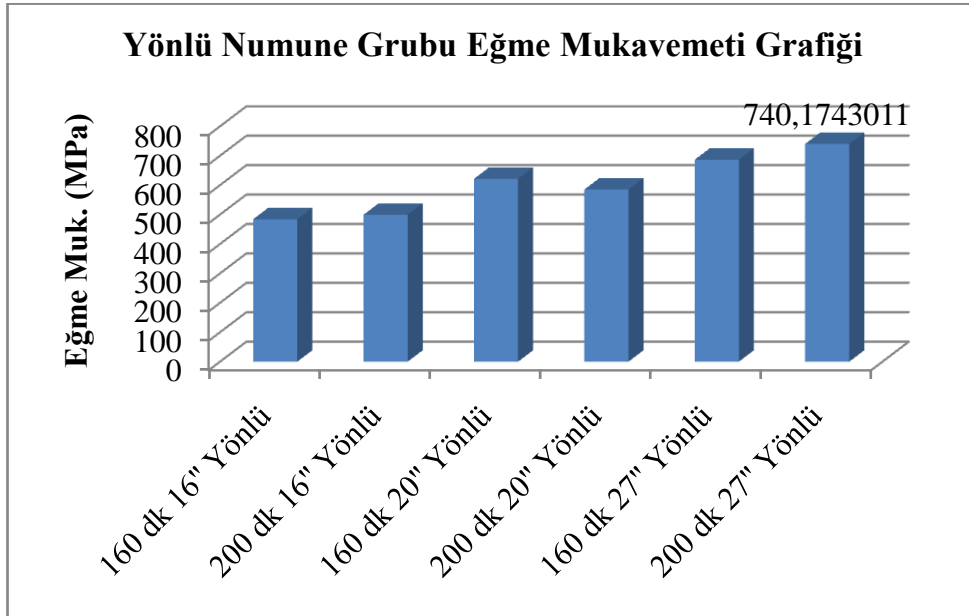
Şekil 4.11. Yönlü ve yönsüz numunelerin artan kürleme süresine göre eğme mukavemeti grafiği.

Yönsüz numune grubunun eğme mukavemetlerinin ortalama değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.12.'de verilmiştir. Elde edilen verilere ve grafiğe bakılarak değerlendirme yapılacak olursa kürleme süresi ve basıncı arttıkça eğme mukavemeti değerlerinde artış olduğu gözlemlenebilmektedir. Eğme dayanımı olarak 200 dk 27" basınçta kürlenmiş numune en iyi eğme dayanımına (913,99 MPa) sahip numune olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Yönsüz numune grubu eğme mukavemeti değerleri karşılaştırması.

Yönlü numune grubunun eğme mukavemetlerinin ortalama değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.13.'te görülebilmektedir. Elde edilen verilere ve grafiğe bakılarak değerlendirme yapılacak olursa kürlenme süresi ve basıncı arttıkça eğme mukavemeti değerlerinde artış olduğu gözlemlenebilmektedir. Eğme dayanımı olarak 200 dk 27" basınçta kürlenmiş numune en iyi eğme dayanımına (740,17 MPa) sahip numune olarak belirlenmiştir.

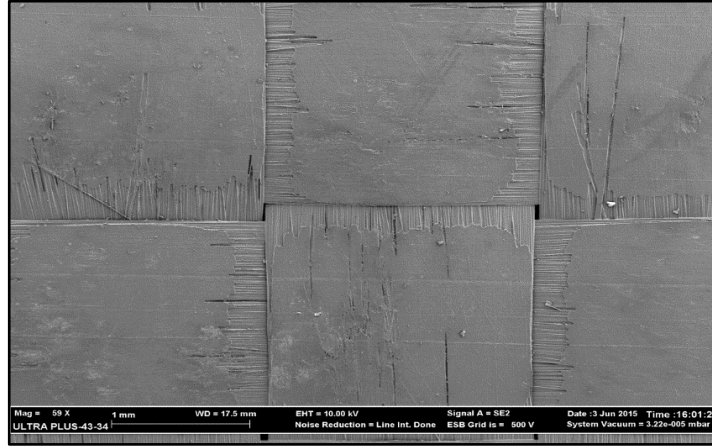


Şekil 4.13. Yönlü numune grubu eğme mukavemeti değerleri karşılaştırması.

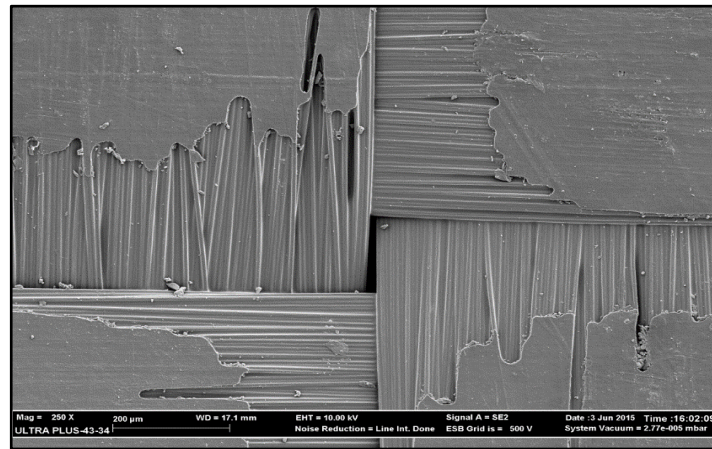


#### 4.4. SEM ANALİZİ SONUÇLARI

Bu tezde deneysel çalışmalar için hazırlanan numunelere uygulanan SEM analizi MARGEM SEM Laboratuvarı'nda bulunan Carl Zeiss marka Ultra Plus FESEM cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzeysel görüntüleri ve kırık yüzeyleri alınan görüntülerle incelenmiştir. Şekil 4.14 ve 4.15'de kompozitin yüzeyinden alınan taramalı elektron mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Birinci görüntüden kompozitlerin üretiminde kullanılan karbon fabrik dokumanın şekli açık olarak görülmektedir. Birinci ve ikinci görüntülerde dokuma esnasında örgü köşelerinde boşluklar kaldığı, epoksi matrisin bu köşelere ve karbon elyaf demetleri arasına tam olarak sızmadığı belirlenmiştir.

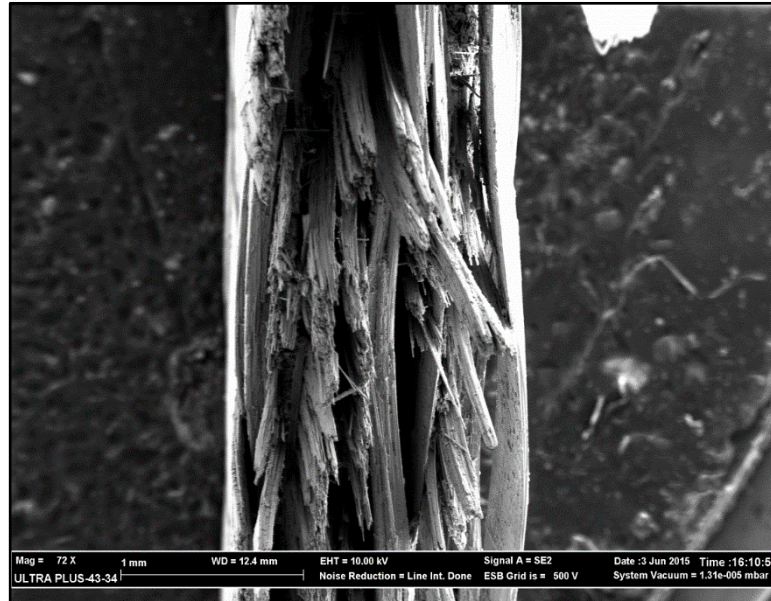


Şekil 4.14. Kompozit malzemenin 59X büyütmedeki yüzey görüntüsü.

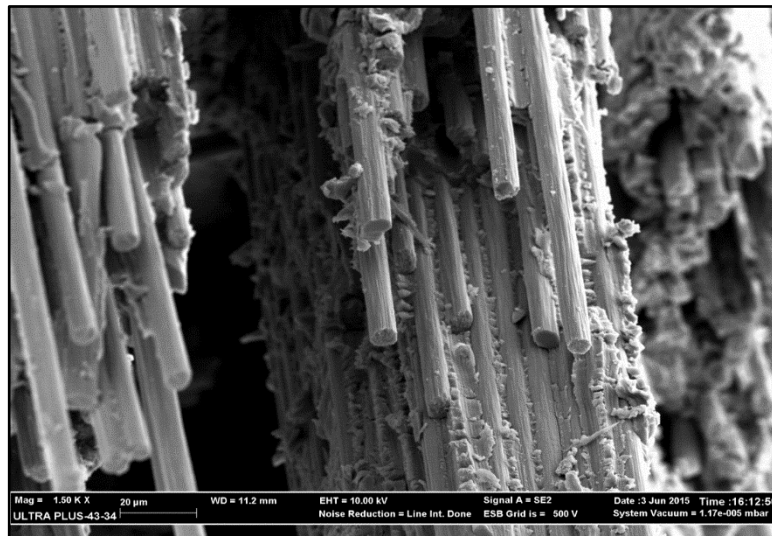


Şekil 4.15. Kompozit malzemenin 250X büyütmedeki yüzey görüntüsü.

Şekil 4.16 ve 4.18'de kompozitin kırık yüzeyinden alınan taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.16'da verilen görüntüde elyaf-matris ara yüzeyinde debonding olarak adlandırılan ayrışmanın olduğu görülmektedir. Şekil 4.17'de ise karbon demetler içerisindeki karbon elyafların gevrek kırılma gösterdiği ve demet içerisindeki karbon elyafların matrisle iyi bağlandığı ara yüzeyden anlaşılmaktadır. Son olarak, Şekil 4.18'de verilen görüntüden karbon elyafların 6 µm çapında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Kompozit kırık yüzeyinin 72X büyütmedeki görüntüsü.



Şekil 4.17. Kompozit kırık yüzeyinin 1500X büyütmedeki görüntüsü ve karbon elyafların görünüşü.



Şekil 4.18. Karbon elyaf lifin 10000X büyütmedeki görüntüsü ve boyutu.

## BÖLÜM5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde, kompozit malzemeyi oluşturan fiberlerin ve matrisin mekanik özellikleri, fiber-matris oranı, fiberlerin yönlenmesi ve uygulanan kuvvetin yönü, üretim yönteminin nihai kompozit malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin polimer matrisli kompozitlerde, uygulanan kürlenme süresi, basıncı ve sıcaklığı nihai ürünün mekanik özelliklerini önemli şekilde etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında önceden epoksi reçine emdirilmiş karbon prepreg dokumalar iki farklı açıda ( $0^\circ$  ve  $0^\circ$ - $45^\circ$ ) toplam 7 kat dizilerek epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler vakum torbalama tekniğiyle üretilmiştir. Yönlenmiş ( $0^\circ$ - $45^\circ$  dizilimine sahip) ve yönsüz ( $0^\circ$  dizilimine sahip) kompozitlerin mekanik özelliklerine kürlenme zamanı ve basıncının sabit sıcaklıkta etkileri araştırılmıştır. Kürlenme sıcaklığı olarak bu kompozitlerin üretiminde sıkça kullanılan  $170^\circ\text{C}$  seçilmiştir.

Üretilen kompozitlerin sehım değerleri 20,3N'luk yük altında ölçülmüştür. Mekanik özellikleri oda sıcaklığında yapılan çekme ve üç nokta eğme testleri ile belirlenmiştir. Son olarak kompozitlerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Yapılan sehım ölçümlerinden artan kürlenme basıncıyla yönsüz ve yönlü kompozitlerde sehım miktarının arttığı fakat artan kürlenme süresi ile düştüğü görülmüştür. Ayrıca, yönlü kompozitlere kıyasla yönsüz kompozitlerin daha düşük esneme gösterdiği belirlenmiştir.

Çekme deney sonuçlarından artan kürlenme süresi ve artan basınçla beraber epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının ve elastiklik modülünün arttığı görülmüştür. Yönlü ve yönsüz kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında yönsüz kompozitlerin daha yüksek çekme dayanımına ve elastiklik modülüne sahip olduğu belirlenmiştir.

Eğme deney sonuçları incelendiğinde de artan basınç ile yönsüz ve yönlü kompozitlerin eğme dayanımlarının arttığı, yönsüz kompozitlerin eğme dayanımlarının diğerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu da sehim ölçümünde elde edilen sonucu desteklemekte, artan eğme dayanımı ile esneme özelliğinin düştüğünü göstermektedir.

Kumaş yönlenmesinin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde yönsüz kompozit malzeme grubunun diğer gruba göre daha yüksek çekme dayanımına, elastiklik modülüne ve daha düşük esneme özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Son olarak taramalı elektron mikroskop görüntülerinden demet içerisindeki karbon liflerin epoksi matrisle birbirine sıkı bağlandıkları ve kırılma esnasında gevrek davranış gösterdikleri görülmüştür.

Bu çalışmada da görüldüğü gibi epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kürlenme koşulları (sıcaklık, basınç ve zaman gibi) ve elyafların yönlenmesi kontrol edilerek bu tür kompozit malzemelerin servis koşullarında daha iyi performans göstermeleri ve bakım-onarım giderlerinin düşürülmesi sağlanabilir.

Ayrıca bu tez çalışmasında kompozit malzeme üretiminde seçilen kürlenme basıncı ve kürlenme süresi parametreleri için daha geniş aralıklar seçilip, daha fazla basınç ve süre değerlerinde numuneler üretilip, deneyler yapıldığı takdirde kompozitlerin mekanik özelliklerinin hangi kürlenme basıncı ve süresinden sonra optimum seviyelere ulaştığı tespit edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Arıcasoy, O., “Kompozit Sektör Raporu”, *İstanbul Ticaret Odası*, 82-882006.
2. Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., Ceylan, M., “Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemedeki Yapı Üretimi”, *Mühendis ve Makine*, Cilt:48, Sayı:566.
3. Centea, T., Grunenfelder, L.K., Nutt, S.R., “A review of out-of-autoclave prepregs Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations”, *Composites Part A*, 70: 133 2015.
4. Babukıran, B.V., Harish, G. , “Influence of Resin and thickness of Laminate on Flexural Properties of Laminated Composites”, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 3 (1): 280 (2014).
5. Smith, William F., “Material Science and Engineering”, *çev. Kınıkoğlu, Nihat G., McGraw-Hill*, 232-234 1995.
6. Onaran, K., “Malzeme Bilimi”, *Bilim Teknik Yayınevi*, Ankara 178-183 (2003).
7. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 99-102 (2000).
8. Ersoy, H.Y., “Kompozit Malzeme”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 11-15, 95-105, 110-116 (2001).
9. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 1-16, 37- 41, 65-68, 79-88 (2000).
10. İnternet: “Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler”, [http://www.hho.edu.tr/huten/2003\\_2004%20SEMINE R%20INTERNET/UGUR%20ER/UGUR%20ER%5BWORD%5D.pdf](http://www.hho.edu.tr/huten/2003_2004%20SEMINE%20R%20INTERNET/UGUR%20ER/UGUR%20ER%5BWORD%5D.pdf) (2006 ).
11. Saçak, M., “Polimer Kimyası”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397 (2002).

12. Olcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., “Polimer esaslı lif takviyeli kompozitmalzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Bursa, 7(1):94-96 (2002).
13. İnternet: “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı”,<http://ekutup.dpt.gov.tr/-imalatsa/kimya/oik602.pdf> (2006).
14. Jones, M. J., “Mechanics of Composite Materials”, *Mc Graw-Hill Book Company*, New York, 125-136 (2003).
15. İnternet: “T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi MakineMühendisliği Bölümü”,<http://web.deu.edu.tr/ansys/tezler/3.pdf> (2006).
16. Özyayın, M. B., “Kompozit malzemelerin balistik özelliklerininincelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-18 (1999).
17. İnternet: “Prepreg Technology”,[http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Broc-Data-Sheets/Prepreg\\_Technology.pdf](http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Broc-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf) (2015).
18. Temiz, S., “Balistik kumaşlar ve test yöntemleri üzerine bir araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1-34 (2005).
19. Bilişik, A.K., “Balistik kumaşlarda yapı özellik ilişkileri”, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4:220-222 (1997).
20. İnternet: Arş. Gör. M. Emin DENİZ, “Kompozit Malzemeler”, [http://eng.-harran.edu.tr/~emin/kompozit\\_malzemeler.html](http://eng.-harran.edu.tr/~emin/kompozit_malzemeler.html) (2006).
21. Hurley, S. A., “The Use of Epoxy, Polyester and Similar Reactive Polymers in Construction Volume 3 Materials Technology”, *CIRIA Project Report 79*, London, 29-36 (2002).
22. Arıkan, A., “Flexibility Improvement of Short Glass Fiber ReinforcedEpoxy” , Yüksek Lisans Tezi, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-6, 9-10 (2001).
23. Lubin, G., “Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites”,*Van Nostrand Reinhold Company*, New York, 143-181, 46-84 (1969).
24. Goodman, S. H., “Hanbook of Thermoset Plastics 2nd ed.”, *Noyes Publications*, New Jersey, 193-268 (1998).
25. Aran, A., “Elyaf takviyeli karma malzemeler”, *T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi*, 1420:95 (1990).
26. İnternet: “Bölüm Bir, Kompozit Malzemeler”. [http://www.obitet.gazi.edu.tr/-obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/-obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf) (2006).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Mustafa Yunus AŞKIN, 1986 yılında Malatya’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Malatya Fen Lisesi’nden 2004 yılında mezun oldu. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılının Şubat ayında Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü’nde Mühendis olarak göreve başladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Demir Çelik Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / 78050 KARABÜK

Tel : (507) 4036226

E-posta : myunusaskin@karabuk.edu.tr