

**TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**1X1 RİB ÖRGÜ YAPISINDAKİ KARBON
ELYAFINDAN ELDE EDİLEN
KOMPOZİT YAPILARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

BU TEZ BAP BİRİMİ TARAFINDAN DESTEKLENMİŞTİR.

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELİF TURHAN
UŞAK 2011**

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**1X1 RİB ÖRGÜ YAPISINDAKİ KARBON ELYAFINDAN ELDE EDİLEN
KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF TURHAN

UŞAK 2011

Elif TURHAN tarafından hazırlanan 1X1 Rib Örgü Yapısındaki Karbon Elyafından Elde Edilen Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi adlı bu tezin Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin YÜKSEKKAYA

Tez Danışmanı, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

(Ünvanı, Adı ve Soyadı).....

(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin YÜKSEKKAYA

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)

(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)

Tarih: 03/06/2011

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans / Doktora derecesini onamıştır.

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Yalçın

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

ELİF TURHAN

**1X1 RİB ÖRGÜ YAPISINDAKİ KARBON ELYAFINDAN ELDE EDİLEN
KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

ELİF TURHAN

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAYIS 2011**

ÖZET

Kompozitlerin hayatımızın her alanına yerleşmiş malzemeler olmasının yanı sıra karbon lifleriyle elde edilen kompozit malzemeler mükemmel özelliklerine rağmen yüksek maliyetlerinden dolayı sınırlı alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle karbon lifleri ve kompozit malzemelerle ilgili tanımlamalar ve genel bilgilere yer verilmiş, kullanım alanları ve üretim yöntemlerinden bahsedilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla da çağımızın ihtiyaçlarına pek çok açıdan cevap verebilecek özelliklere sahip karbon liflerinden elde edilmiş kompozitler incelenmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmı için iki farklı sıklıkta örme karbon kumaş elde edilmiş ve bunlar kompozit plaka haline getirilmiştir. Bu plakaların çekme ve kayma mukavemeti ölçülmüş ve çekme ve kayma mukavemeti, çekme ve kayma uzaması ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Bu Yüksek Lisans Tezi Uşak Üniversitesi BAP Birimi tarafından proje olarak desteklenmiştir.

Bilim Kodu: 621.01.00

Anahtar Kelimeler: Kompozit, karbon lifleri, örme, mukavemet, mekanik özellik

Sayfa Adedi: 78

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin YÜKSEKKAYA

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE
MATERIALS MADE OF CARBON FIBERS WITH 1X1 RIB KNITTED
STRUCTURES
(M. Sc. Thesis)**

ELİF TURHAN

**UŞAK UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
May 2011**

ABSTRACT

Composite materials are being used in every area of our lives. Besides having excellent properties of carbon fibers, currently they have limited usage due to the high cost of the carbon materials.. In this study, the definition of carbon fibers and composite materials given with their usage and production methods. In the experimental studies, composite materials made from carbon fibers that satisfy the needs of modern era.

In the experimental part of this study, two different types of knitted carbon fabrics were manufactured. Then, knitted fabrics were converted into a composite plate. Tensile and shear strength of the plates were measured in order to obtain the mechanical properties such as the tensile strength and elongation and shear strength and elongation, and young modulus. The data obtained from the experimental results were evaluated and compared statistically.

This Master of Science thesis has been supported by BAP unit of Uşak University.

Science Code : 621.01.00

Key Words : Composite, carbon fiber, knitting, strength, mechanical property

Page Number :78

Adviser : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin YÜKSEKKAYA

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında ilgi ve emeğini eksik etmeyen, kıymetli bilgileriyle yolumu aydınlatan çok değerli danıőman hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin YÜKSEKKAYA'ya, bilgilerinden istifade ettiğim hocalarım Doç. Dr. Mevlüt TERCAN, Doç. Dr. Alaattin AKTAŐ ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKTAŐ' a, numunelerin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Ersen BALCIOĐLU ve Arő. Gör. Önder YEŐİL' e ve bugünlere gelmemde emekleri tartışılmaz olan, maddi manevi destekleriyle her an yanımda olan aileme teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ (devam)	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM 1.....	1
1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.....	2
2. KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1. Kompozit Malzeme Kısımları.....	2
2.1.1. Matris Olarak Kullanılan Malzemeler.....	3
2.1.2. Takviye Olarak Kullanılan Elyaflar	10
2.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	11
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
2.3.1. Kompozit Malzemelerin Matrislerine Göre Sınıflandırılması.....	13
2.3.2. Kompozit Malzemelerin Takviyelerine Göre Sınıflandırılması	14

2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	17
2.4.1. Elle Yatırma (Hand Lay-Up)	18
2.4.2. Püskürtme (Spray-Up).....	19
2.4.3. Profil çekme / Pultrüzyon (Pultrusion).....	19
2.4.4. Elyaf sarma (Filament Winding).....	20
2.4.5. Santrifüj Kalıplama	20
2.4.6. Vakum Bonding / Vakum Bagging.....	21
2.4.7. Otoklav / Autoclave Bonding	21
2.4.8. Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC,BMC)	21
2.4.9. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) / Reçine Enjeksiyonu	22
2.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	23
2.5.1. Hava ve Uzay Sanayisi.....	23
2.5.2. Otomotiv Sanayi	24
2.5.3. Denizcilik Endüstrisi	24
2.5.4. Spor Araçları.....	24
2.5.5. Yapı-İnşaat Sektörü ve Şehircilik	25
2.5.6. Tarım Sektörü	25
2.5.7. Diğer Alanlar	26
BÖLÜM 3.....	27
3. KARBON LİFLERİ.....	27
3.1. Karbon Liflerinin Yapısı.....	27

3.2. Karbon Liflerinin Özellikleri	28
3.3. Karbon Liflerinin Sınıflandırılması	30
3.4. Karbon Liflerinin Üretimi	30
3.4.1. Poliakrilonitril Liflerinden Karbon Elyaf Üretimi	31
3.4.2. Ziftten Karbon Lifi Üretimi	37
3.4.3. Bitkisel Esaslı Hammaddelerden Karbon Lifi Üretimi	39
3.5. Karbon Liflerinin Kullanım Alanları	39
3.5.1. Hava-Uzay Endüstrisi	39
3.5.2. Spor Malzemeler	40
3.5.3. Rüzgar Enerjisi	40
3.5.4. Otomotiv Sanayi	41
3.5.5. Elektronik	42
3.5.6. İnşaat Ve Yapı Endüstrisi	42
3.5.7. Denizcilik	42
3.5.8. Sağlık Alanı	43
3.5.9. Diğer Alanlar	43
BÖLÜM 4	46
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	46
4.1. Karbon/Epoksi Kompozitleri	46
4.1.1. Mekanik Özellikler	46
4.1.2. Üretim Tekniği	50

4.2. Grafit/Epoksi Kompozitleri.....	52
4.2.1. Mekanik Özellikler.....	52
4.3. Diğer Karbon Kompozitleri	53
4.3.1. Mekanik Özellikler.....	53
BÖLÜM 5.....	56
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
5.1. Materyal	56
5.2. Testler	60
5.2.1. Çekme Testleri	61
5.2.2. Kayma Testleri.....	61
BÖLÜM 6.....	63
6. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA	63
6.1. Kopma Testi.....	63
6.2. Kayma Testi	65
6.3. İstatistiksel Hesaplamalar	67
BÖLÜM 7.....	71
7. SONUÇLAR / ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Epoksit grubunun kimyasal yapısı.....	6
Şekil 2.2. Epoksi reçinenin genel kimyasal yapısı.....	6
Şekil 2.3. Epoksit gruplarının etilen diaminle çapraz bağ oluşturması.....	7
Şekil 2.4. Karbon lifleri için kullanılan tipik termoplastiklerin tekrarlanan üniteleri.....	8
Şekil 2.5. Karbon lifleri için kullanılan tipik termoplastiklerin özellikleri.....	8
Şekil 2.6. Bazı polimer matris kompozitlerin özellikleri.....	13
Şekil 2.7. Kompozit malzeme üretim yöntemleri.....	17
Şekil 3.1. Karbon lifinin birim hücresi.....	27
Şekil 3.2. Karbon liflerinin genel özellikleri.....	29
Şekil 3.3. Karbon liflerinin sıkışma özellikleri.....	29
Şekil 3.4. Karbon liflerinin elektrik direnci.....	29
Şekil 3.5. Karbon liflerinin termal iletkenliği.....	30
Şekil 3.6. PAN' dan karbon lifi üretimi.....	32
Şekil 3.7. PAN esaslı lifin kimyası: zincir reaksiyon ve oksidasyon.....	33
Şekil 3.8. PAN esaslı lifin kimyası: karbonizasyon.....	34
Şekil 3.9. Pan esaslı karbon lif üretim prosesi.....	35
Şekil 3.10. Ziftten karbon lifi üretimi.....	38
Şekil 5.1. Çekme testi için kullanılan numune boyutları.....	60
Şekil 5.2. Kayma testi için kullanılan numune boyutları.....	62
Şekil 6.1. Numunelerin kopma mukavemeti değerleri.....	63
Şekil 6.2. Numunelerin kopma uzaması değerleri.....	63
Şekil 6.3. Numunelerin elastisite modülü değerleri.....	64
Şekil 6.4. Kopma mukavemeti.....	64
Şekil 6.5. Çekme uzaması.....	65
Şekil 6.6. Elastisite modülü.....	65
Şekil 6.7. Numunelerin kayma mukavemeti değerleri.....	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ (devam)

Şekil	Sayfa
Şekil 6.8. Numunelerin kayma uzaması değerleri.....	66
Şekil 6.9. Kayma mukavemeti.....	66
Şekil 6.10. Kayma uzaması.....	67
Şekil 6.11. Kopma mukavemeti için ANOVA tablosu.....	68
Şekil 6.12. Kopma uzama değeri için ANOVA tablosu.....	68
Şekil 6.13. Young modülü için ANOVA tablosu.....	69
Şekil 6.14. Kayma mukavemeti için ANOVA tablosu.....	69
Şekil 6.15. Kayma uzaması için ANOVA tablosu.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tabakalı kompozitler.....	15
Resim 3.1. Pan liflerinin oksidasyonu.....	33
Resim 3.2. Pan liflerinin karbonizasyonu.....	34
Resim 3.3. Karbon lifinin yapısı.....	36
Resim 3.4. Karbon lifinin yüzey görüntüsü.....	37
Resim 3.5. Karbon lifinde yüzey çatlaklarının yayılması.....	37
Resim 5.1. Karbon kumaşların örülerek elde edilmesi.....	56
Resim 5.2. 1X1 Rib örgü yapısındaki karbon kumaş.....	57
Resim 5.3. Kompozit malzeme üretim masası.....	57
Resim 5.4. Kompozit malzeme üretimi (Reçinenin sürülmesi).....	58
Resim 5.5. Kompozit malzemenin prese konulmadan önceki hali.....	58
Resim 5.6. Elle yatırma yöntemine göre elde edilmiş kompozit plaka.....	59
Resim 5.7. Kompozit plakaların çekme testi için belirlenen boyutlarda kesilmiş hali....	59
Resim 5.8. Mukavemet test cihazı.....	60
Resim 5.9. Numuneye ekstansiyometrenin takılması.....	61
Resim 5.10. Numunenin çekme testinden önce ve sonraki durumu.....	61
Resim 5.11. Kompozit plakaların kayma testi için belirlenen boyutlarda kesilmiş hal...	62
Resim 5.12. Numunenin kayma testinden sonraki durumu.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

C

Açıklama

Karbon

cm

Santimetre, uzunluk birimi

g/cm³

Yoğunluk birimi

KW

Kilowatt, güç birimi

mm

Milimetre, uzunluk birimi

MPa

Mega paskal, gerilme birimi

MW

Megawatt, güç birimi

N

Newton, kuvvet birimi

N/mm²

Elastisite modül birimi

rpm

Revolution per minute, dakikadaki devir sayısı

Tex

İplik numara birimi

°C

Sıcaklık birimi

Kısaltmalar

Açıklama

ASTM

American Standarts For Testing Materials

CFRP

Carbon Fiber Reinforced Plastic

CNT

Carbon nano tube

PAN

Poliakrilonitril

PVA

Polivinilalkol

SEM

Scanning Electron Microscope

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Sürekli gelişen teknolojiyle beraber mevcut malzemelerin insanların artan ihtiyaçlarına cevap vermekte yetersiz kalmasıyla insanlığın gereksinimlerini hem eksiksiz hem de ekonomik olarak karşılayabilmek için kompozit malzemeler giderek artan miktarlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Çamur ve samanın karıştırılması gibi ilkel örneklerinden kompozit kullanımının çok eskilere dayandığı anlaşılabilir. Günümüzde ise otomotivden denizciliğe, inşaat sektöründen hava ve uzay sanayisine kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme bir veya daha fazla malzemenin yeni ve daha iyi özelliklere sahip malzeme eldesi için bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Onu meydana getiren malzemelerin kendi özelliklerinin yanı sıra hafiflik, yüksek mukavemet ve kolay uygulanma gibi tercih sebebi olabilecek diğer özellikleri de taşımaktadır.

Karbon lifleri de artan ve değişen ihtiyaçlar için yeni ve kullanışlı materyal arayışıyla ortaya çıkmış olan bir lif türüdür. Yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranları ile de kompozit dünyasında önemli bir yere sahip olmuştur. Mükemmel özelliklere sahip olması nedeniyle yüksek maliyetine karşın kompozitin hemen her alanında özellikle de hava-uzay endüstrisinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Karbon liflerinin takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozitlerde mekanik özelliklerde iyileşme, özellikle ağırlıklarına oranla mükemmel bir mukavemet görülmektedir. Mekanik özellikler aslında dıştan gelen kuvvetlere karşı gösterilen tepki olarak kabul edilebilir. Kompozitlerin mekanik özellikleri de uygulanacağı ortamlara uyum sağlayıp sağlamayacağı belirlenmesi ve farklı malzemelerle bu özellikler açısından karşılaştırılabilmesi için test edilmektedir.

Bu çalışmada da karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kompozitin çekme ve kayma testleri yapılmış ve elde edilen veriler istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, birbirlerinin zayıf yönlerini gidererek istenilen özellikleri elde etmek amacıyla şekil veya kimyasal bileşimleri farklı ve birbiri içersinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla sayıda malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemeler olarak tanımlanabilir [1, 2].

Bir malzemenin kompozit malzeme sayılabilmesi için 4 temel şartı sağlaması gerekir:

1. İnsan yapısı olmalıdır.
2. Kimyasal yapıları birbirinden farklı ve belirli arayüzler ile birbirinden ayrılmış en az 2 malzeme bir araya getirilmiş olmalıdır.
3. Farklı malzemeler 3 boyutlu olarak bir araya getirilmiş olmalıdır.
4. Bileşenlerin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşımalı ve mikroskobik açıdan heterojen, makroskobik açıdan homojen özellik göstermelidir.

Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin sahip olduğu özelliklerin yanı sıra; yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, boyutsal stabilite, mekanik basınç, çarpma dayanımı, kırılma tokluğu, yüksek dielektrik direnimi, korozyon dayanımı, kalıplama kolaylığı, yüzey uygulamaları, yüksek ısı dayanım, yüksek kimyasal direnç, titreşim söndürme gibi avantajları da sağlar [3].

Kompozit malzemelerin ilk uygulamaları çok eskilere dayanmaktadır. Çamur ve samandan yapılan kerpiç buna bir örnektir. 1900 lü yıllarda sentetik plastiklerin geliştirilmesinden sonra 1950 li yıllarda polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir [1, 3].

2.1. Kompozit Malzeme Kısımları

Kompozit malzemeler matris, donatı (takviye) ve katkı maddesi olmak üzere üç ana elemandan oluşmaktadır [1, 4].

Matris: Malzemenin içinde sürekli faz şeklinde yer alıp takviye veya donatı fazını içine alan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan ve malzemeye genel şeklini veren fazdır.

Matris malzemesi ayrıca kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır.

Takviye Elemanı (Donatı): Matris fazının içinde yer alıp onu takviye eden ve özellikleri istenen amaç doğrultusunda iyileştirmeye yarayan fazdır. Başlıca görevi gelen yükü taşımak ve matrisin dayanımını artırmaktır. Kompozitin mekanik dayanıklılığında sorumludur. Bu nedenle takviye amacıyla kullanılan malzemenin mekanik dayanımı matrisin mekanik dayanımından yüksek olmalıdır. Takviye elemanı olarak kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır.

Katkı Maddeleri: Dolgular, kimyasallar ve diğer katkıları niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla matrise ilave edilirler.

Genel olarak kompozit malzemelerde matris sünek, hafif ve düşük dayanımlı, donatı ise rijit, yüksek dayanım ve sertliğe sahip olmaktadır. Kompozit üzerindeki yükün takviye elemanına iletilebilmesi için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanı ve matris arasında herhangi bir kimyasal bağ olmadığından kompozit üzerindeki mekanik etki kayma kuvvetiyle iletilmektedir. Dolayısıyla iki faz arasında meydana gelebilecek kayma gerilmelerine dayanabilecek düzeyde bir aderansın bulunması gerekmektedir. Ayrıca takviye elemanının fazı taşımaya tam olarak katılabilmesi ve dolayısıyla kompozitin amaçlanan özelliklere uygun olması takviye malzemesinin E-modülünün matrisin E-modülünden çok daha yüksek olmasına bağlıdır [2, 5].

2.1.1. Matris Olarak Kullanılan Malzemeler

Polimerler (termosetler ve termoplastikler), metaller ve alaşımları ve seramikler matris malzemesi olarak kullanılabilirler.

2.1.1.1. Metal Matris Malzemeleri

Metallerin matris malzemesi olarak kullanımı çok ince lifler olan whisker üretimi ile başlamıştır. Günümüzde düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özellikler gösteren hafif metaller ve alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyum ve alaşımları, bakır, titan, nikel, gümüş gibi metaller matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu metaller ergimiş halde, moleküler yapıda veya ince tabaka halinde olabilir [2, 5].

Metal matrisler kompozitin tokluğunu ve sıcaklık dayanımını artırır. Korozyona karşı dayanımları iyidir. Polimer matris malzemelerine göre de elastik modül ve dayanımları oldukça yüksektir. Bunun yanı sıra üretimleri zor ve maliyetlidir. Ayrıca üretim esnasında fazlar arasında elektro-kimyasal etkileşim ya da fazlardan birinin korozyona uğraması gibi sorunların ortaya çıkmaması gereklidir. Örneğin alüminyum alaşımı matris ile karbon elyaf kullanımı iki faz arasında galvanik korozyona neden olmaktadır. Bu nedenle karbon elyaf yüzeyi nikel ya da gümüşle kaplanmaktadır [2, 5].

2.1.1.2. Polimer Matris Malzemeleri

Plastikler olarak da bilinen polimerler monomer adı verilen kimyasal ünitelerden meydana gelen zincir şeklinde yapısı olan sentetik malzemelerdir. Kolay işlenebilme ve hafiflik özelliklerinden dolayı oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Karmaşık geometrik parçaların fazladan işleme ihtiyaç duyulmadan kalıplanabilmesi,
2. Metal ve seramik matris malzemelerine göre dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması,
3. Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
4. Çalışma sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı üretimde daha az enerji harcanması,
5. Bazı plastiklerin ışığı yansıtması ve saydam olması,
6. Maliyetlerinin düşük olması

Dezavantajları ise:

1. Dayanımlarının metal ve seramik matris malzemelerine oranla düşük olması,
2. Elastik modüllerinin düşük olması,
3. Servis sıcaklığının düşük olması,
4. Visko-elastik özellikler göstermesi sebebiyle sınırlı yükleme şartlarının olması olarak sıralanabilir [2].

Polimerler içyapılarına göre 3 gruba ayrılırlar:

1. Termoplastikler
2. Termosetler
3. Elastomerler

2.1.1.2.1.Termoplastikler

Termoplastikler sentetik polimerlerin yaklaşık %70 ini oluşturmaktadırlar. Termoplastiklerde zincirler birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ile bağlıdır. Dolayısıyla rijit bir yapıları yoktur. Termoplastikler düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sahiptirler, ergime sıcaklıkları üzerinde viskoziteleri yüksek oranda düşerek akışkan hale gelirler. Sıcaklık etkisiyle yumuşayıp soğutulunca eski hallerine dönebilirler. Bu özellikleri nedeniyle şekillenmeleri daha kolay ve ekonomik olur. Termoplastikler kristalin veya amorf yapıda olabilirler. Özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Yoğunlukları düşüktür. (Tipik özgül ağırlıkları $1,2 \text{ g/cm}^3$)
2. Rijitliği, çekme dayanımı ve sertliği düşüktür.
3. Sünekliliği yüksektir.
4. Termal uzama katsayıları metallere göre yaklaşık 5, seramiklerden ise yaklaşık 10 kat fazladır.
5. Termal iletkenlikleri düşüktür.
6. Ergime sıcaklığı düşüktür.
7. Kimyasal etkilere karşı direnci düşüktür.

Tipik olarak kullanılan termoplastikler Asetal, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Selüloz, Politetrafloroetilene (PTFE), Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polietilen (PE), Polyester (PET), Polivinil klorür (PVC), Naylon 6.6, Polistiren (PS) ve Polipropilen (PP)'dir [2, 5, 6].

Asetal

Formaldehitten hazırlanır. Yüksek rijitlik, dayanım, tokluk ve aşınma direncine sahiptir. Bazı otomotiv parçaları, kapı kolları gibi ürünlerin imalinde kullanılır [2].

Akrilik (Polimetilmetaakrilat PMMA)

Şekilsizdir. Otomobil kuyruk ışığı lensleri ve uçak camlarında kullanılır [2].

Politetrafluorethylene (PTFE)

Teflon olarak da bilinen PTFE çevresel ve kimyasal etkilere karşı dirençlidir. Elektrik ve ısı direnci iyidir. Yağlanamayan parçaların üretiminde ve gıda sanayinde kullanılır [2].

Poliamid (PA)

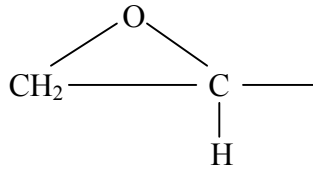
Sert ve dayanıklı olan poliamidlerin birçok çeşidi vardır. Naylon 6 ve naylon 6.6 olarak da bilinen poliamidlerin elastik modülleri yüksektir ve bu poliamidler dayanıklıdır. Dişli, yatak gibi parçaların üretiminde metallerin yerine kullanılabilirler [2].

2.1.1.2.2. Termosetler

Monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlar sonucu yanal bağlarla bağlanmasıyla oluşan termosetler kovalent bağlara sahip oldukları için üç boyutlu ve rijit bir yapıya sahiptirler. Termoplastikler gibi tekrar ısıtılıp yumuşatılmaları ve şekillendirilmeleri mümkün değildir. Ama dayanımları termoplastiklere göre daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda direncinin düşmesi, düşük mekanik özellikler göstermesi, düşük ısıl genleşme ve elektrik iletkenliği özelliği ve kısa ömürlü olması dezavantajları sayılabilir [2, 5]. Epoksi reçine, fenolik reçine, silikon, polyester bu gruba girmektedir.

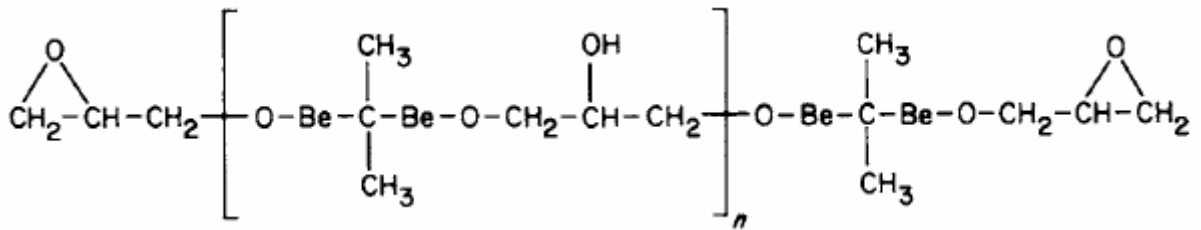
Epoksi Reçine

1930 ların sonunda bifenol A ve epiklorhidrinin reaksiyonu ile ilk reçineli ürünler sentezlenmiştir. 1947 de ticarileştirilmiş ve 1950-1970 yılları arasında da yeni tipleri üretilmiştir. Genel terim olarak epoksi hem baz reçineleri (termoplastik, sertleşmemiş) hem de çapraz bağlı plastikleri (termoset, sertleşmiş) kapsar [7]. Epoksi epon, epi-rez ve araldite gibi ticari isimlere sahiptir. Epoksi reçine her molekülde iki ya da daha fazla epoksit grupları tarafından karakterize edilmiştir. Bir epoksit grubunun kimyasal yapısı aşağıdaki gibidir [8]:



Şekil 2.1 Epoksit grubunun kimyasal yapısı

Çoğu ticari epoksi reçinenin genel kimyasal yapısı şu şekildedir [8]:

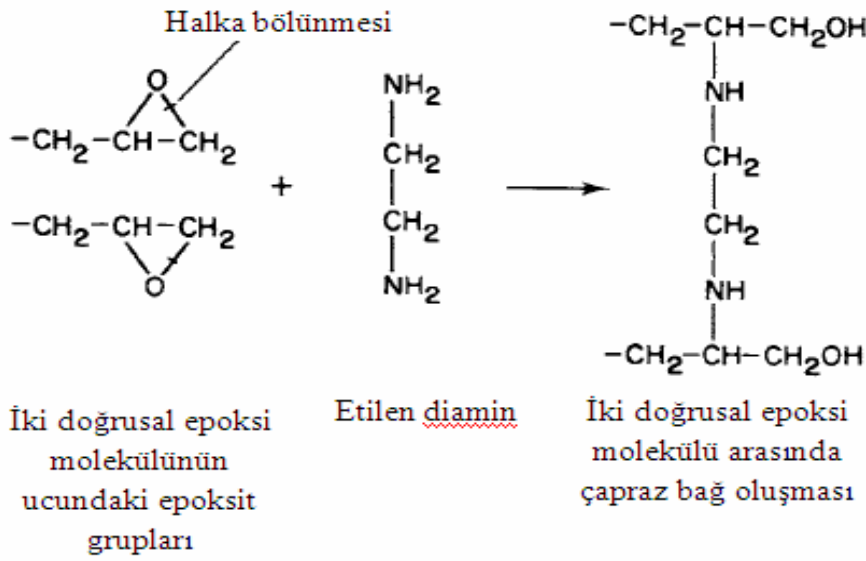


Şekil 2.2. Epoksi reçinenin genel kimyasal yapısı [8]

Be: Benzen halkası. Sıvı reçineler için n genellikle 1 den az, katı reçineler için 2 ya da daha fazladır.

Epoksi reçineler, sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Mükemmel mekanik dayanıklılığa, yüksek dielektrik direncine, iyi boyutsal kararlılığa, kimyasal ve ısıl dirence sahiptirler.

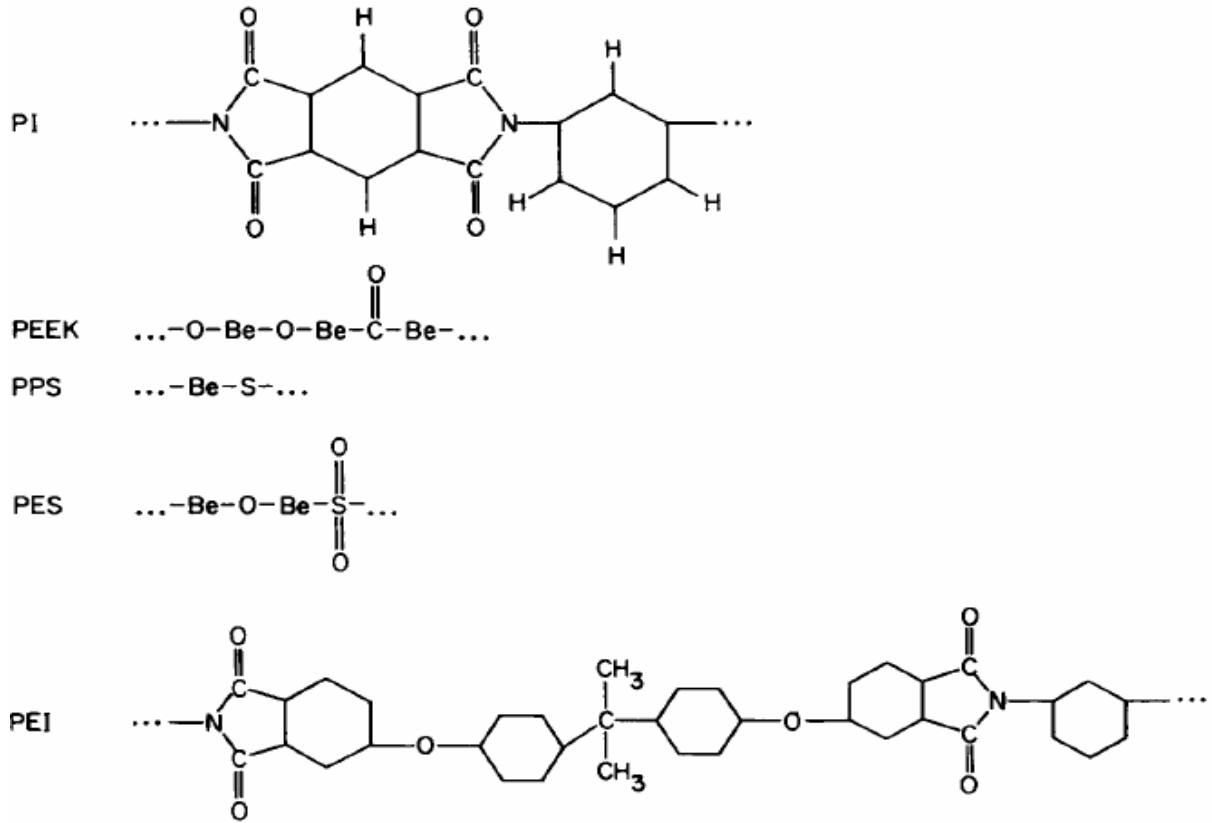
Bir epoksi reçinenin küründe bir çapraz bağlı ajan ve/veya bir katalist gerekir. Oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek son ürün haline dönüştürülür. Epoksi ve hidroksil grupları (-OH) çapraz bağlar için reaksiyon merkezidir. Çapraz bağ ajanları amin, anhidrid ve aldehid kondansasyon ürünleri içerir. Kür reaksiyonunda epoksi halkaları açılır (halka bölünmesi olarak adlandırılır) ve bir verici hidrojenden bir amin ya da hidroksil grup epoksit grubunun oksijen atomlarıyla bağlanır [8].



Şekil 2.3. Epoksit gruplarının etilen diaminle çapraz bağ oluşturması [8]

Etilen diamin bir çapraz bağ ajanı olarak çalışan bir amindir. İşlem süresince yan ürün oluşmaz, fire düşüktür.

Karbon lifleri için kullanılan tipik termoplastik reçinelerin tekrarlanan üniteleri aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 2.4. Karbon lifleri için kullanılan tipik termoplastiklerin tekrarlanan üniteleri [8]

Yukarıdaki termoplastiklerin özellikleri Şekil 2.5.' te listelenmiştir.

	PES	PEEK	PEI	PPS	PI
Tg (Camlaşma Sıcaklığı °C)	230	170	225	86	256
Bozulma Sıcaklığı (°C)	550	590	555	527	550
İşlem Sıcaklığı (°C)	350	380	350	316	304
Çekme Mukavemeti (MPa)	84	70	105	66	138
Elastisite Modülü (GPa)	2,4	3,8	3	3,3	3,4
Esneklik (% Uzama)	30-80	50-150	50-65	2	5
Izod Darbe (ft lb/in.)	1,6	1,6	1	<0,5	1,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,37	1,31	1,27	1,3	1,37

Şekil 2.5. Karbon lifleri için kullanılan tipik termoplastiklerin özellikleri [8]

Epoksiler 30-100 MPa gerilme direncine, 2,8-3,4 elastisite modülüne, %0-6 süneklik ve 1,25 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle epoksiler PES, PEEK ve PEI dan daha kırılığandır. Genelde yarıkristal termoplastiklerin sünekliği artan kristallilikle azaltılır.

Örneğin PPS nin süneklığı kristalliliğine bağı olarak %2-20 aralığında değişebilir. Termoplastikler ve epoksiler arasındaki diğer büyük fark termoplastiklerin yüksek işlem sıcaklıklarıdır (300-400 °C) [8].

Isıl işlem görmemiş epoksiler düşük polimerizasyon derecesine sahiptir. Isıl işlem görmüş epoksilerin ise dayanımı, ısıl ve kimyasal dirençleri yüksektir. Yapışma özelliğı iyidir. Sertleşme sonunda hiçbir yan ürün meydana getirmeden mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri çok iyi olan kompozit üretimine olanak sağlarlar. Sertleşme esnasında %1-2 oranında çekme gösterir ki bu da uygulamada sıfır düzeyine çekilebilir. Epoksi reçineler birçok fiber çeşidi ile çok iyi bağ oluştururlar. Elektronik uygulamalarda, laminat ve döküm uygulamalarında kullanılır [2, 4, 5].

Fenolik Reçine

Isı stabilitesi, elektriksel özellikleri iyidir. Kimyasal ve boyutsal kararlılığı iyidir. Viskozitesi yüksektir ve gözenek oluşturma tehlikesi vardır. Baskı devre plakalarında, fren balatalarında kullanılır [2, 5, 9].

Silikon

Termoset silikon çapraz bağıdır. Mekanik özellikleri düşük olmasına rağmen 250 °C ye kadar dayanıklıdır. Maliyetinin yüksek olmasından dolayı kullanımları kısıtlıdır. Boyama, parlatma, kaplama ve laminatlarda kullanılır [2, 5, 9].

Furan Reçineleri

Kimyasal dayanımları iyidir. Laminat yapı malzemelerinde ve havalandırma kanallarında kullanılabilir [5].

Polyester Reçineler

Polyesterler bağ durumuna göre termoset ya da termoplastik olabilirler. Elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir. Doymuş ve doymamış polyester olarak 2 gruba ayrılabilirler. Doymuş polyesterler termoplastik özellik gösterirler. Doymamış polyesterler ise uygun bir katalizör vasıtasıyla yapı oluşturan termoset özellikli reçinelerdir.

Polyesterlerin mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri iyidir. Tasarım kolaylığı sağlamaları ve ekonomik olmaları nedeniyle geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Tekstil, elektrik, fotoğraf film, manyetik bant ve otomotiv ve uçak endüstrisinde kullanılırlar [2, 4, 5].

2.1.1.2.3. Elastomerler

Elastomerler çapraz bağlı uzun zincir moleküllerinden oluşurlar. Çok düşük gerilmelerde bile büyük elastik deformasyona uğrayabilirler. En yaygın kullanılanı kauçuktur [2].

2.1.1.3. Seramik Matris Malzemeleri

Seramikler metal ve metal olmayan malzemelerden meydana gelen inorganik bileşiklerdir. Doğada kayaların parçalanması sonucu oluşan kil, kaolen gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilirler. Gevrek olduklarından çekme dayanımları düşük, basma dayanımları yüksektir. Silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si₃N₄), alüminyum oksit (Al₂O₃) sıkça kullanılan seramik malzemelerdir. Endüstriyel fırınlar, tuğla, beton, elektronik ve optik araçlarda kullanılır [2].

2.1.2. Takviye Olarak Kullanılan Elyaf

1. Doğal elyaf (Artık yerlerini sentetik elyafı bırakmışlardır.)
2. Sentetik, organik elyaf; Naylon, aramid (Düşük yoğunluklu ve güçlü elyafıdır.)
3. Sentetik inorganik, elyaf; Cam, karbon, boron vb.

Cam, karbon, aramid, bor, polietilen, poliamid, poliester, polipropilen takviye malzemesi olarak en çok kullanılan liflerdir.

En çok kullanılan kompozit malzeme kombinasyonları; Cam elyafı+polyester, karbon elyafı+epoksi ve aramid elyafı+epoksi birleşimleridir [2, 5].

Cam Lifleri

Cam lifleri başta silis kum (SiO₂) olmak üzere sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlenmesiyle elde edilirler. Kompozitlerde en sık kullanılan takviye elemanlarındırlar. Kimyasal bileşimlerinin farklı olmasından dolayı çeşitli tipleri vardır. Kompozit uygulamalarında en çok kullanılan tipi üstün mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olan E-camıdır.

Kompozitlerde kullanılan cam lifleri devamlı fitil, kırılmış demet, keçe ya da dokuma formunda olabilir [2, 5].

Karbon Lifleri

Bölüm 3' de anlatılacaktır.

Aramid Lifleri

Yapay organik lifler arasında aramid lifleri (ticari ismi kevlar) pek çok olumlu özelliğe sahip olmalarından dolayı takviye malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Kevlar 29 ve kevlar 49 uygulamada en çok kullanılan tiplerdir. Kevlar 29 örme, dokuma veya

çaprazlanmış şekilde olabilir. Kurşungeçirmez yelek, otomobil lastikleri ve kablolarda kullanılır. Kevlar 49 ise yüksek modüllü ve kimyasal etkilere karşı dirençlidir. Askeri alanda ve uzay sanayisinde kullanılır. Hafif ve rijit bir yapıya sahip olan kevlar liflerinin korozyon dayanımları iyi olmasına rağmen suya ve güneş ışınlarına karşı duyarlıdırlar [2, 5].

Bor Lifleri

Yüksek dayanımlı ve pahalı bir lif olan bor lifleri metal matris elemanlarıyla birlikte kullanılmaktadır [5].

Polietilen Lifleri

Tabaka ve film halinde kullanılan PE lifleri kimyasal olarak kararlıdırlar. Eriticilerden etkilenmezler. Ancak yüksek sıcaklıklarda bu direncin düşmesi ve düşük sıcaklıklarda yumuşaması dezavantajları sayılabilir [5].

Polipropilen Lifleri

Elyaf tabaka halinde kullanılan PP lifleri yüksek dayanımları ve düşük fiyatları ile takviye malzemesi olarak kullanım için elverişlidirler. Alkalilerden, güneş ışınlarından, oksijenden etkilenmezler. Beton ve harçlarda takviye malzemesi olarak kullanılırlar [5].

2.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Yüksek Mukavemet: Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilmektedir. Böylece malzemenin tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilmektedir.

Kolay Şekillendirebilme: Büyük ve kompleks parçaların bir işlemle tek parça halinde üretilmesinden dolayı parça sayısının azalması sağlanmaktadır. Böylece ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla üretim süresi kısalmaktadır. Böylece malzeme ve işçilikten kazanç sağlanmaktadır.

Elektriksel Özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilmektedir. Gerektiğinde iyi bir iletken ya da iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmemektedirler. Bu özellikleri sayesinde endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadırlar.

Kalıcı Renklendirme: Kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde ek masraf ve işçilik gerektirmeden kompozite istenen renk verilebilmektedir.

Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır.

Bunların yanı sıra ısıya ve ateşe dayanıklılık, yüksek dayanıklılık/ yoğunluk oranı, yüksek modül/ağırlık oranı, düşük ağırlık, yüksek yorulma dayanımı, yüksek aşınma direnci, istenen yönde ısıl ve termal özellikler, estetik görünüm özellikleri de avantajları arasında sayılmaktadır [1, 4, 10, 11, 12].

Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

1. Hammaddenin pahalı olması ekonomik olmasını engellemektedir.
2. Kompozit malzemelerin değişik doğrultulardaki mekanik özellikleri farklılık göstermektedir. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık göstermektedir.
3. Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
4. Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterebilmektedir.
5. Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilememektedir.
6. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite bulunmamaktadır.
7. Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olduklarından dolayı kolaylıkla zarar görüp, onarımları yeni problemler yaratabilmektedir.
8. Geri dönüşümleri genellikle mümkün olmamaktadır.

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler matris malzemelerine göre metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozitler olarak sınıflandırılabilirler [2].

Takviye bileşenin türüne ve düzenleme biçimine göre fiber takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve çok bileşenli kompozit olarak sınıflandırılabilirler [12, 13].

2.3.1. Kompozit Malzemelerin Matrislerine Göre Sınıflandırılması

2.3.1.1. Metal Matris Kompozitler

Alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi metal ve alaşımlarının matris; karbon, bor ve diğer bazı metallerin elyaf, parçacık, plakacık, kıl-kristal (whisker) yapısında takviye fazını oluşturmasıyla eritme, vakum emdirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak üretilirler. Üstün mukavemet, aşınma, korozyon, sertlik özelliklerine sahiptirler. Uzay ve havacılık alanlarında ve otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılan kompozitlerdir [3, 9, 10].

2.3.1.2. Seramik Matris Kompozitler

Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC, B_4C gibi yapısal ve fonksiyonel niteliği yüksek seramik matris malzemelerin genellikle silikonkarbid ve boronitrid gibi kısa fiberlerle takviyelendirilmesi ile elde edilirler. Üstün ısıl dayanım, mukavemet ve kimyasal etkilere karşı dirence sahiptirler. Ancak aşırı derecede gevrektiler. Ayrıca yalıtıkcıdır ve yüksek ergime sıcaklık dereceleri ve sertlikleri işlenmelerini zorlaştırır. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları imalinde kullanılmaktadırlar [3, 9, 10].

2.3.1.3. Polimer Matris Kompozitler

Matris olarak çeşitli reçineler, takviye malzemesi olarak da çeşitli elyaflar kullanılarak üretilirler. Takviye malzemesi olarak cam, karbon, kevlar ve boron lifleri sıklıkla kullanılır. En önemli bağlayıcı malzeme ise polyester ve epoksidir. Takviye liflerinin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli avantajları yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüne sahip olmalarıdır. Üstün özelliklerinden dolayı uçak ve uzay endüstrisinde oldukça geniş kullanım alanı bulmuşlardır [3, 9, 10]. Şekil 2.6.' da bazı polimer matris kompozitlerin özellikleri verilmiştir.

Malzeme	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Elastik Mukavemet (N/mm ²)
Cam Lifi - Polyester	1,5 - 2,1	200 - 340	55000 - 130000
Karbon Lifi - Epoksi	1,5 - 1,8	1860	145000
Kevlar - Epoksi	2,36	2240	76000
Boron Lifi - Epoksi	1,4	1240	176000

Şekil 2.6. Bazı polimer matris kompozitlerin özellikleri [9]

2.3.2. Kompozit Malzemelerin Takviyelerine Göre Sınıflandırılması

2.3.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Metal ve metal olmayan parçacıkların yine metal ve metal olmayan matrislerle kombinasyonu şeklinde çeşitleri vardır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır.

Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. Ayrıca parçacıklar sert ve kararlı bir yapıya sahip olarak dislokasyonların hareketine engel olmalıdır. Parçacık takviyeli kompozitlere örnek olarak beton verilebilir. Genel olarak bu tür kompozitlerin mekanik özellikleri zayıftır. Bu nedenle, daha çok mekanik dayanım gerektirmeyen süs ve dekoratif eşyalarda, genel amaçlı ürünlerde ve yük etkisinde kalmayacak türden malzemelerin yapımında kullanılırlar [3, 9, 13, 14].

Parçacık takviyeli kompozitleri büyük parçacıklarla dayanımı artırılmış kompozitler ve dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitler olarak 2 gruba ayırmak mümkündür.

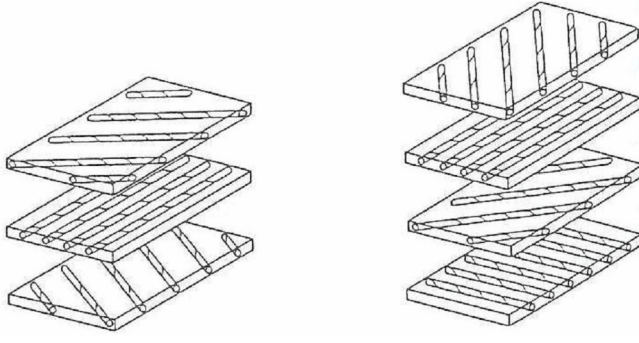
2.3.2.2. Tabakalı Kompozitler

Yüksek mukavemet ve modüle sahip tabakaların bunlardan daha sünek ve şekil alma özelliği yüksek bir matris ile birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Tabaka bir matristeki örülmüş lifler veya tek yönlü lif düzlemi şeklindedir. Tek yönlü lif haline aynı zamanda tek yönlü lamina da denir. Tabakalı kompozitler en az iki farklı tabakanın bir araya getirilmesi ile oluşur. Farklı özelliklerdeki tabakalar bir araya getirilerek en iyi özellik elde edilmeye çalışılır. Tabakalar arası mesafe mikroskobik ölçülerdedir.

Tabakalı kompozitler en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit çeşitidir. Çok değişik kombinasyonlarla üretimleri mümkündür. Tabakalı kompozitler, yapısal yönden taneli ve liflerle donatılı kompozitlerden farklılık göstermektedirler.

Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir.

Tabakalı kompozitler uzay ve havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [3, 13].



Resim 2.1. Tabakalı kompozitler [9]

2.3.2.3. Fiber Takviyeli Kompozitler

Takviye elemanı olarak fiber kullanılan kompozitlerdir. Lif takviyeli kompozitlerde dışarıdan yapılan yüklemeleri karşılayan ana bileşen liftir, matris ise elyafları istenilen geometride bir arada tutan çevreyi oluşturur.

Fiberler, basit olarak bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan malzeme olarak tanımlanabilir. ASTM' ye göre bir malzemenin fiber olarak kabul edilebilmesi için boy/ortalama çap oranının en az 10 olması, en büyük kesit alanının $0,05 \text{ mm}^2$ den daha küçük olması ve en büyük genişliğinin $0,25 \text{ mm}$ den küçük olması gerekmektedir [5].

Malzemenin liflerle donatılmasından amaç öncelikle mekanik dayanımlarının iyileştirilmesidir. Malzemeler özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının artırılması, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla lifler, çubuklar veya değişik yapıda örgü malzemelerle donatılmaktadır. Lif takviyeli kompozitlerde özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımlarında önemli artışlar görülmektedir.

Kompozitte belirli boyda lifler kullanılabildiği gibi, gereksinime ve koşullara göre sürekli liflerle de kullanılmaktadır. Dolayısıyla lif boyu çok farklı olabilmektedir.

Takviye malzemesinin hacim içindeki konumu lif takviyeli kompozitlere has bir özellik olan lif yönü ile ilgili bir kriteri oluşturmaktadır. Lifler yönlenmiş veya rastgele dağılmış olabilir. Lif yönü, kompozitin dayanımı ve liflerin taşımaya katkısı açısından önemli bir faktördür. Dolayısıyla lif takviyeli kompozitler değişik yönlerden farklı özellikler gösterirler. Yönlenmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak yanal doğrultudan çok daha büyük olur. Örneğin kompozitin kopma dayanımı, elyafların yönlendirildiği eksene 90° lik açıdan yapılan yüklemelerde en büyük olacaktır. Benzer şekilde ısıl iletkenlik, ısıl genleşme gibi davranışlar da elyafların yönlenme eksenine açısal olarak bağlıdır. Elyaflarla

yapılan takviye, elyaf yönlenmesi ayarlanarak sözü edilen özelliklerin yöne bağlı kontrolüne olanak sağlar. Liflerin matris içinde rastgele dağılması halinde malzeme izotrop olacağından kompozitin özellikleri yöne bağlı olarak değişmez.

Matris ile elyaflar arasında kimyasal bağdan ziyade zayıf fiziksel bağlar vardır. Ancak boyları çaplarına oranla daha uzun olan elyafların toplam yüzeyleri büyüktür. Birbirlerine dolanarak kenetlenirler ve böylece oldukça büyük yük aktarabilirler. Sünek bir matris içinde bulunan yüksek mukavemetli elyaflar çatlasa veya kırılrsa bile mikroskopik düzeyde kalır, yayılmadan sünek ve tok matris tarafından önlenir. Bu özellik elyaf takviyeli kompozitlerin üstünlüklerinden biridir.

Takviye malzemesi olarak kullanılan liflerin çoğu kuvvetli kovalent bağa sahiptir. Takviye liflerin miktarı artıkça kompozitin mukavemeti de yükselir. Yönlenmiş liflerde bu oran hacmen %80 e kadar çıkarken rastgele yönlenmişlerde %40-50 arasında kalır. Ancak elyaf oranı belli bir değere ulaştıktan sonra kompozitin mukavemeti azalmaya baslar. Bunun nedeni, elyaf miktarındaki artışa bağlı olarak kompozit içerisindeki polimer miktarının azalmasıdır. Kompozit içerisindeki oranı belli bir değer altına düştüğünde matris işlevini kaybeder ve lifleri bir arada tutamaz.

Lif takviyeli kompozitler matris ve lifin özelliklerine göre;

Sünek matrisli ve kırılğan lifli,

Kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitler olarak 2 ye ayrılabilir.

Sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlerde matris fazını epoksi, polyester, fenolik reçine gibi organik maddeler; lif fazını matrise oranla daha kırılğan özellik gösteren cam ve seramik esaslı lifler oluşturur. Donatıda kullanılan lif oranı matristen yüksek olup kompozitin %20-80 ini oluşturmaktadır. Bu tip kompozite örnek olarak yaygın olarak kullanılan cam lifi takviyeli polyester reçine (CTP) verilebilir.

Kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitlerde çimento, alçı gibi bağlayıcılar kullanılır. Organik veya inorganik lifler kullanılabilceği gibi metal ve cam lifleri de kullanılabilir. Bu tip kompozitlerde takviye fazının hacim oranı sünek matrisli kompozitlerdeki lif oranının çok altındadır. Cam, metal ve bitkisel lifler için bu oran %0,5-5 arasındadır.

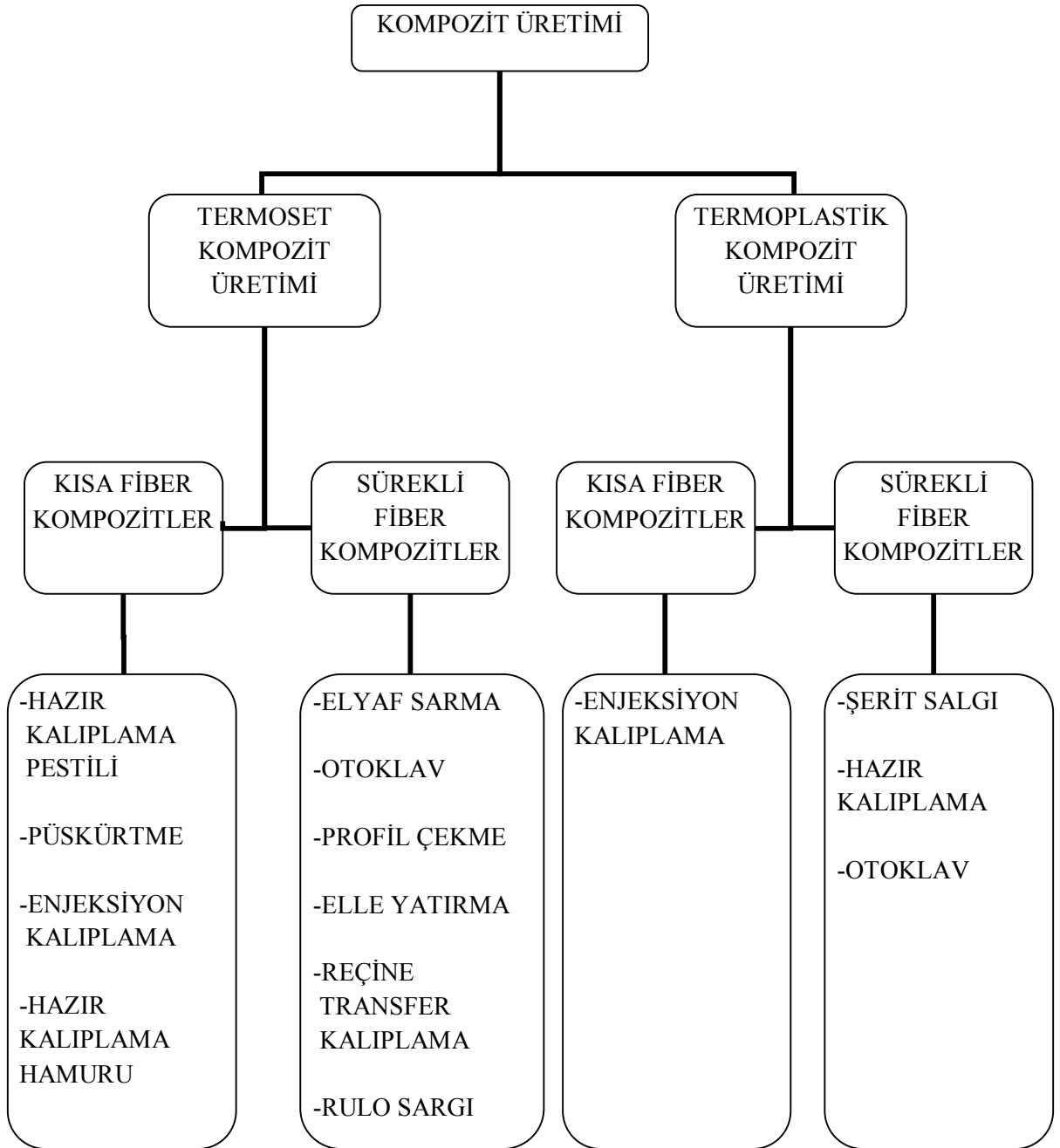
Fiber takviyeli kompozitler uzay ve havacılık alanlarında, otomotiv sektöründe, deniz tekneleri, spor malzemeleri ve yapı elemanları üretiminde çok yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 3, 5, 9, 13, 14].

2.3.2.4. Çok Bileşenli Kompozitler

Daha önce bahsedilen kompozit tiplerinden ortak özellikler taşıyan, bunların kombinasyonu olan gruptur [9].

2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

İstenilen biçim ve özellikleri taşıyan kompozit malzeme üretimi için birçok farklı yöntem bulunmaktadır.



Şekil 2.7. Kompozit malzeme üretim yöntemleri

Bu yöntemlerden başlıcaları şunlardır:

2.4.1. Elle Yatırma (Hand Lay-Up)

Bu kompoziti hazırlamak için kalıp gereklidir. Üretim 3 ana kısımdan oluşur:

1. Kalıbın hazırlanması: Üretilen malzemeye uygun kalıp seçilmelidir. Kalıp yüzeyi düzgün olmalı, yüzeyinde hava kabarcığı, çatlak, delik olmamalıdır. Kalıbın iç yüzeyi silindikten sonra üzerine plastik ve kalıbın birbirinden kolay ayrılmasını sağlayan ayırıcı malzeme (vaks) sürülür. Daha sonra ikinci ayırıcı olarak PVA sürülür. Elyafın yüzeyde görünmesi istenmiyorsa fırça ile viskozitesi yüksek reçine (jelkot) sürülür.
2. Kalıba keçe, kumaş ya da elyaf halindeki takviye malzemesinin yerleştirilmesi: Jelkot üzerine kalıba uygun kesilmiş takviye malzemesi serilir. Genellikle keçe, dokuma biçimindeki elyaflar takviye elemanı olarak seçilir. Fakat ek dayanım ve elastik modülü kazandırmak için belirli konumlarda dokuma şeklindeki elyaflar yanında sürekli cam ve karbon elyaflar da yerleştirilir [12].
3. Reçine tatbiki: Serilen takviye malzemesinin üzerine reçine uygulanır ve fırça darbeleriyle reçine iyice emdirilir. Rulo kullanılarak hava kabarcıklarının kalmaması sağlanır. İstenilen kalınlığa ulaşana kadar bu işleme devam edilir.

Bu yöntemde en çok polyester ve epoksi reçine kullanılmasına rağmen vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Ürünün kalıptan çıkarılıp kullanılabilmesi için belli bir sertliğe ulaşması gerekir. Sertleşme polimerizasyon derecesine bağlı olarak 3 aşamada gerçekleşir:

1. Jelleşme: Katalizör ve hızlandırıcı katılan reçinenin pıhtılaşmasıdır. 5-10 dakika sürebilir.
2. Sertleşme: Reçinenin pıhtılaştıktan sonra kalıptan çıkarılabilecek sertliğe ulaşması için gerekli süredir. 3-4 saat sürebilir.
3. Olgunlaşma: Ürünün ulaşabileceği max. sertlik için geçen süredir. Kullanılan katkı maddeleri, katalizör ve hızlandırıcıya bağlı olarak birkaç saat ile birkaç hafta arasında değişir.

Bu yöntem malzemelerin şekil ve mukavemet kontrolüne imkan tanır. Ekonomiktir. Ancak yoğun işçilik gerektirdiğinden az sayıda parça üretimi için uygundur. Kayık teknesi, tanklar, bina panelleri ve büyük boyutlu yapısal parçalar için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [1, 4, 9, 12, 15].

2.4.2. Püskürtme (Spray-Up)

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin makineleşmiş şekli olarak kabul edilebilir. Kalıp hazırlanır, üzerine vaks ve polivinilalkol (PVA) sürülür. Üretilen ürüne göre hazırlanan reçine, hızlandırıcı ve sertleştirici karışımı özel tabancalarla kalıba püskürtülür. Tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde elyaf da istenen boylarda kesilerek reçine ile birlikte kalıp yüzeyine püskürtülür. Püskürtme işlemi yüzeye dik yapılmalı ve kalınlığın homojen olmasına dikkat edilmelidir. Hava kabarcıklarının kalmaması için yüzey bir rulo yardımı ile düzeltilir. Gerekli kalınlık elde edilinceye kadar işleme devam edilir. Katılma genellikle oda sıcaklığında yapılır veya ısı kullanılarak hızlandırılabilir [1, 4]. Reçine olarak yine polyesterler kullanılır [12].

Bu yöntem parça karmaşıklığı fazla ise faydalıdır. Düşük ve orta hacimdeki tekneler ve kayıklar, tanklar, duş ünitesi imalatında kullanılır [12, 15].

Bu tekniğin avantajı basit, düşük maliyetli olması, taşınabilir aygıt ve parça boyutu sınırlamasının olmamasıdır [12].

2.4.3. Profil çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

Bu yöntemde fiberler makaralara sarılı halde bulunur. Güçlendirici fiberler reçineyle kaplanmak üzere reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C ye ısıtılmış şekillendirme kalıbına sarılır. Daha sonra sıcaklık ve basınç altında preslenir. İstenen şekil ve boyutta sertleşen parça herhangi başka bir işleme gerek duyulmadan kalıptan çıkarılır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır [4, 6].

Bu yöntemde reçine malzemesi olarak genellikle polyester, vinil ester ve epoksi kullanılır. Takviye malzemesi olarak da sürekli fiber malzemesi kullanılır [10]. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir [4].

Sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilmesine olanak sağlayan profil çekme yöntemi düşük maliyetlidir ve seri üretime uygundur. Ayrıca oluşan atıkların oranı oldukça düşüktür [4, 6, 9].

Sürekli uzunluklara ve sabit kesitlere sahip olan parçaların (profil, boru, çubuk vs.) üretilmesinde, yapı endüstrisinde kapı ve pencere profilleri üretiminde kullanılır [16].

Bu yöntem basit görünmesine rağmen, çekme hızı, kalıp sıcaklığı, fiber/reçine ıslatma kalitesi ve fiber hacmi gibi faktörler kompozitin kalitesini etkileyebilir [6].

2.4.4. Elyaf sarma (Filament Winding)

Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek iki punta arasında dönmekte olan üzerine ayırıcı sürülmüş bir kalıp üzerine oldukça hassas bir biçimde sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasının ardından, reçine ısıtmanın da yardımı ile polimerize olarak katlaşır. Katılma sonrası parça kalıptan ayrılır [1, 4, 6, 15].

Kullanım yerine göre polyester, epoksi, silikon veya fenolik reçine kullanılabilir.

2 çeşit imalat tipi vardır:

1. Yaş Sarma: Elyaf önce reçine banyosuna daldırılır sonra sarılır.
2. Kuru Sarma: Elyaf önce sarılır sonra reçine banyosuna daldırılır.

Elyaf üzerindeki kuvvet, reçine ıslatma etkinliği ve sarma geometrisi kompozitin özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Elyaf üzerindeki kuvvet, fiberin sarma sırasındaki pozisyonunu belirlemesi yanında, kompozit üzerinde stres oluşturarak parçanın kompaktlanmasına yardımcı olur. Eğer bu kuvvet çok düşük seviyelerde kalırsa, elyaf katmanları arasında reçinece zengin tabakaların oluşumuna neden olur. Elyaf üzerindeki kuvvetin gerekenden çok olması ise kompozitin yük taşıma bakımından zayıflamasına neden olabilir [6].

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin, iç yüzeyi pürüzsüz parçaların seri üretimine uygundur. Bu yöntemle hacim oranı çok yüksek kompozit ve fiber oryantasyonunun kontrol edilebildiği parçalar üretilebilir. Genellikle içi boş silindirik veya 3-boyutlu ürünler, borular, araba şaftları, yat direkleri, uçak su tankları, roket gövdeleri, basınçlı tanklar gibi ekipmanların imalinde kullanılır. Filament sarma tekniği için oldukça yüksek otomasyona sahip makineler geliştirilmiştir [1, 4, 6, 9, 12].

2.4.5. Santrifüj Kalıplama

Kalıp içerisine hızlandırıcı ve sertleştirici reçine emdirilmiş kırılmış fiberler koyulur. Kalıp kendi ekseninde yüksek hızda yaklaşık 900 ile 2400 rpm arasında döner. Dönme ve dökme hızı dökümün boyutuna ve şekline bağlı olarak değişebilir. Merkezkaç kuvveti etkisi ile malzeme dışa doğru savrulur ve böylece kalıbın iç yüzeyini homojen bir şekilde tamamen kaplayabilir. Kalıp içerisine sıcak hava üflenerek daha hızlı sertleşme sağlanabilir. Silindirik parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir [9, 6].

2.4.6. Vakum Bonding / Vakum Bagging

Kompozit malzeme önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası ile üzeri kapatılır. Vakum tatbik edilecek kanalların giriş yerlerine havayı geçirecek ve vakumu engellemeyecek parçalar konur. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine yapışır ve basınç uygular. Vakum torbası olarak naylon veya selefon kullanılır.

Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak kompozit malzemenin kalitesini artırmak amacıyla uygulanır [1, 4].

2.4.7. Otoklav / Autoclave Bonding

Vakum bagging yöntemi ile benzerdir. Malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulanarak kalitesi artırılır. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Böylece yüksek kaliteli kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır [4].

Vakum bagging yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanır. Otoklav yavaşça ısıtılır. İlk önce reçine erimeye başlar sonra basınç ve sıcaklıkla bir gaz (genelde azot gazı) altında sertleşmesi sağlanır. Atmosfer basıncı kalıp içindeki havayı, sızan reçineyi ve laminattaki boşlukları yok eder [3, 12].

2.4.8. Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC,BMC)

Hazır kalıplama elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesi işlemidir.

Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları; diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi komplike şekiller elde edilebilme, çok geniş tasarım esnekliği, ürünün iki yüzünün de kalıp ile şekillenmesi, düzgün yüzey eldesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları, kolayca laklanabilme, boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi, geri dönüştürülebilme ve hazırlığında geri dönüşümlü malzeme kullanabilme, metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı, yüksek alev dayanımı, sıcaklık dayanımı, soğukta kırılma olmama, düşük ıskarta oranının olmasıdır. Bu yöntemin dezavantajları ise kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha

maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç duyulmasıdır.

Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır [4].

Hazır Kalıplama Pestili / SMC (Sheet Moulding Composites); SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm kalınlığında üretilir.

Hazır Kalıplama Hamuru / BMC (Bulk Moulding Composites); BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir.

Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar birçok ürün bu yöntemle üretilmektedir [4, 12].

2.4.9. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) / Reçine Enjeksiyonu

Bu kompozit üretim yönteminde iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. RTM yöntemi çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır.

Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır.

Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğunu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyafların kalıp içerisinde sürüklenmesinin önlenmesi için matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanır. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 °C ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir.

Kalıp kapalı olduğu için zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir.

Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilir [4, 12].

Yukarıda bahsedilen yöntemler dışında preslenebilir takviyeli termoplastik/glass mat reinforced thermoplastics (GMT), enjeksiyon kalıplama, kapalı döküm, metal matrisli kompozitlerin üretimi için; sıcak presleme, toz metalürjisi, sıvı metal emdirme, elektrolitik yöntem, buhar çöktürme, birlikte ekstrüzyon gibi yöntemler bulunmaktadır [3, 4, 9].

2.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı oldukça geniş alana yayılmıştır. Kompozit malzemelerin kullanıldığı başlıca sektörler şu şekilde sıralanabilir:

2.5.1. Hava ve Uzay Sanayisi

Kompozit malzemelerin özellikle hafif olmaları ve yüksek mukavemet göstermeleri hava ve uzay sanayisinde oldukça yaygın olarak kullanılmalarını sağlamaktadır. Havacılık endüstrisinde, tasarımlar; emniyet, hız ve ekonomi kriterlerinin optimizasyonu ile gerçekleşir. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Kompozitler bu amaçlar için oldukça uygundur.

Özgül mukavemet ve özgül rijitlik değerleri esas alındığında; düşük yoğunluklarından dolayı kompozit malzemeler diğer malzemelere nazaran daha iyi avantajlar sağlamaktadır. Titreşim sönümlenme, atmosfer şartlarına dayanım, yorulma ve ısı dayanımı gibi özellikleri de bu alanda kullanım uygunluğunu artıran avantajlarıdır. Bu özellik ve üstünlüklerinden dolayı kompozit malzemelerin, hava ve uzay sanayisinde kullanımı oldukça hızlı yaygınlaşmaktadır [3, 4, 16].

Uçakların gövde panelleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, iniş takımları, burun kısımları, silindirik motor kılıfları gibi yapısal parçalarda ve iç mekânlarda da kompozit malzemeler kullanılmaktadır [9].

Aşağıda bazı hava taşıtı parçalarında kullanılan kompozitler verilmiştir:

B2 bombardıman uçağı gövde panelleri; karbon fiber+epoksi

A380 yolcu uçağı kanat panelleri ve flapler; karbon fiber+epoksi

A380 yolcu uçağı burun bölümü (radome); CTP

A380 yolcu uçağı dikey stabilizer; Aramid fiber+epoksi

Uçak EAPS kapağı; karbon Elyafı+PEEK

F-14 uçaklarında, yatay dengeleyiciler, F-15 lerde ise yatay ve dikey dengeleyiciler; bor+epoksi,

F-16 larda, yatay ve dikey dengeleyicilerin ve kontrol yüzeyleri; karbon+epoksi

F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, hız frenleri ve kontrol yüzeyleri, AV-8B uçaklarında; kanatlar, yatay dengeleyiciler, ön gövde ve kontrol yüzeyleri; karbon+epoksi

Boing 757 ve 767 lerde kontrol yüzeyleri; karbon+epoksi, motor kaportaları; karbon/aramid+epoksi

2.5.2. Otomotiv Sanayi

Kompozitler otomobillerde ilk olarak aksesuar amaçlı kullanılmaktayken günümüzde yapısal parçalarda da kullanılmasıyla bu endüstride oldukça geniş kullanım alanına sahip olmuşlardır.

Kompozit malzemelerin otomotiv sanayisinde kullanımını iki temelde toplanabilir:

1. Metal parçaların birebir kompozitlerle değiştirilmesi,
2. Kompozit malzemeden yeni tasarımlar yapılarak parça sayısının azaltılması.

Kompozit malzemeler spor arabalarda, yolcu otobüslerinde, kamyonlarda, kaporta parçaları, tampon, motor parçası, ön ızgara, spoiler, gösterge paneli, dikiz aynası, far gövdesi, pedal, koltuk iskeleti, oto lastikleri gibi pek çok parçada kullanılmaktadır [4, 16]. Ağırlığın ve mukavemetin çok önemli olduğu Formula 1 araçlarında birçok parça için karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin hafifliğinden dolayı daha çabuk hızlanabilen ve durabilen daha küçük bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan taşıtların imali mümkün olmaktadır.

2.5.3. Denizcilik Endüstrisi

Kompozit malzemeler, korozyon direncinin iyi olması, hafifliği, yakıt tasarrufu sağlaması, daha hızlı hareket olanağı sağlaması ve daha konforlu olmasından dolayı deniz endüstrisinde çeşitli uygulama alanlarında yer bulmuştur. Gemi, yat, yolcu feribotları, deniz botları, can simidi vb. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu alanda genellikle cam takviyeli plastik kompozitler kullanılmaktadır [12].

Yelkenli Gövdesi; CTP, Balsa ve polimer köpük üstüne cam, aramid karbon dokumaları ile kaplama

Yat, Tekne Arkası Platform, Basamaklar; CTP

Yelken Direği; Kevlar+Epoksi [1].

2.5.4. Spor Araçları

Spor alanında kompozit malzemeler giderek artan bir kullanım yelpazesine sahip olmaktadır. Diğer malzemelere oranla hafiflik, mukavemet, titreşim özelliklerinin daha iyi olmasından dolayı pek çok spor ürününde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ağırlığın azalmasından dolayı hareket kabiliyetinin artması kompozit malzemelerin getirdiği avantajdır [1, 4].

Golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerinde hem hafiflik hem de darbe dayanımı önemli olduğu için karbon fiber takviyeli kompozitler öne çıkmışlardır. Darbe dayanımı, şok

emme, hafiflik gibi özelliklerinden dolayı yarış bisikletleri, sörf, kano, su kayağı, kar kayağı gibi spor araçlarında kompozitler tercih edilmektedirler. Ayrıca kompozit malzemeler golf sopaları, yarış botları, balık oltaları, yat, bisiklet vb. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar [12].

Su kayağı; Termoplastik prepreg

Kar kayağı; Ahşap üzerine sarılmış karbon, aramid, cam elyafı karışımı+epoksi

Kano küreği; %33 Cam+Poliftalamid

Su kaydırakları, Sörf Tahtaları: CTP

Bisiklet; Karbon+Poliamid 6

Spor Ayakkabı; Termoplastik poliüretan

Golf Sopası; Karbon Fiber+Epoksi

Tenis Raketleri; Aramid (Kevlar)+Epoksi

Zıpkın Gövdeleri; Karbon Fiber+Epoksi

Palet; Karbon Fiber+Epoksi

2.5.5. Yapı-İnşaat Sektörü ve Şehircilik

Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, cephe korumalarında, büfelerde, otobüs duraklarında, soğuk hava depolarında, inşaat kalıplarında, seyyar tuvaletler gibi kabinlerin yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca çevre güzelleştirme çalışmalarında, heykeller, banklar, elektrik direkleri, çocuk parkı gereçleri, çöp bidonları gibi araçların üretiminde de kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Hafiflik, yüksek mekanik dayanım, tasarım esnekliği ve kolaylığının yanında nakliye ve montajda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. İzolasyon sorunlarını ve bakım giderlerini azaltmaktadır [3, 16].

Ayrıca köprülerde, yürüme yollarında, kapılarda, yüzme havuzlarında, yer karolarında, sokak lambalarında, küvetlerde ve lavabolarda kompozit malzemelere rastlamak mümkündür [1, 13].

2.5.6. Tarım Sektörü

Kompozitler bu alanda ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlarından dolayı seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır [1].

2.5.7. Diğer Alanlar

Kompozit malzemeler üstün performans özellikleri nedeniyle yukarıda sayılan alanlar dışında sağlık ürünlerinde, ev aletlerinde, müzik aletlerinde, iş makinelerinde, elektronik malzemelerde, teleferiklerde, rüzgar türbinlerinde, silahlarda, dişli çarklarda kısacası hayatımızın her alanında kullanılan vazgeçilmez bir malzeme haline gelmişlerdir [3, 4, 12, 16].

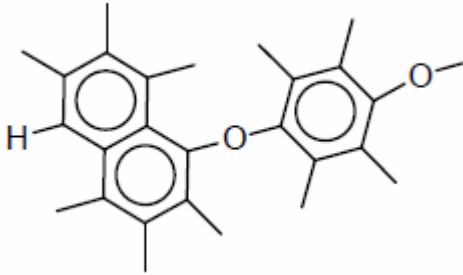
BÖLÜM 3

3. KARBON LİFLERİ

Karbon lifleri insanların tekstilden beklentilerinin değişmesiyle yeni ve kullanışlı materyal arayışıyla ortaya çıkmış olan sentetik inorganik bir lifdir. Karbon lifinin en eski kullanımı Edison'un bambu, pamuk ve keten gibi doğal lifleri karbonlaştırıp akkor halinde ampulde kullanmasıyla bilinir [17]. 1963' te üretim metotları geliştirilmiş ve 1968' den itibaren ticarileştirilmiştir [18, 19, 20]. Günümüzde başta poliakrilonitril olmak üzere polivinil alkol, poliimit, poliamit gibi lifler, çeşitli zift ve ziftli lifler ile işlem görmüş yünlü liflerden üretilmektedir. Karbon liflerinin çoğunluğu Japonya'da üretilmekte Amerika'da tüketilmektedir [18].

3.1. Karbon Liflerinin Yapısı

Element olarak karbon, fiziksel ve mekanik özellikleri farklı olan şekilsiz (amorfl) ya da billur yapıda olabilir. Bu nedenle karbon liflerinin nitelikleri, lif mikroyapısına ve atom yapısına bağlıdır. Bu etmenler, kullanılan başlangıç hammaddesi, üretim ortam ve şartları, ısıtılmanın sıcaklığı tarafından belirlenir. Yüksek mekanik dayanıklılık için, billur grafit biçimi yeğlenir. Bu biçim, altı köşeli, sık tabakalı billur yapıdadır. Karbon lifinin birim hücresi Şekil 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Karbon lifinin birim hücresi [21]

Tabakalar arasında 3,35 angströmlük (1 angström milimetrenin on milyonda biridir.) aralıklar vardır ve anizotropi (billur tanelerinin her doğrultuda farklı fiziksel özellikler taşıması) özelliği gösterir. Bugüne kadar bulunan en sağlam malzeme, ipliksi grafit billurlarıdır. Isıl işlem sırasında grafit yapısı yönlendirilirse, rijit ve sağlam karbon lifleri elde edilir.

Düzgün molekül yapısı, organik başlangıç lifi kullanılarak, billur tabakaların lif eksenine paralel olarak dizilmesi ile sağlanabilir. Grafitleştirmeden sonra, küçük grafit lifçiklerinden oluşan (fibril) ağ yapılar elde edilir. Ağ yapıların her biri, 15 billur tabakası kalınlığında, 150 angström genişliğinde, 10 000 - 100 000 angström uzunluğundadır. Lifçikler kusurlu biçimde bir araya geldiklerinden, genellikle, boylamasına uzanan boşluklar ortaya çıkar. Zift gibi, daha ucuz ve düzensiz başlangıç lifleriyle de, uzama grafitleştirmesi yoluyla, benzer bir etki ortaya çıkarılabilir. Bu süreçte lifler, 2200 - 2900 °C deki grafitleştirme sırasında gerdirilir.

Lifin enine kesiti, yuvarlak, düzensiz hatta kemik biçiminde olabilir. Yüzey görünüşü, başlangıç lifine bağlı olarak değişir. Örneğin; poliakrilonitrilli lifte pürüzsüz; rayonlarda boydan boya oluklu olur. Reçinelere yapışma özelliklerini artırma amacıyla, lif yüzeyleri genellikle işlenir. Bu amaçla ya gaz ve sıvı yükseltgeme (çukur oluşturma) ya da iplikleştirme (yüzeyde silikon nitrür billurlarının oluşması) yöntemlerinden yararlanılır [17, 22].

3.2. Karbon Liflerinin Özellikleri

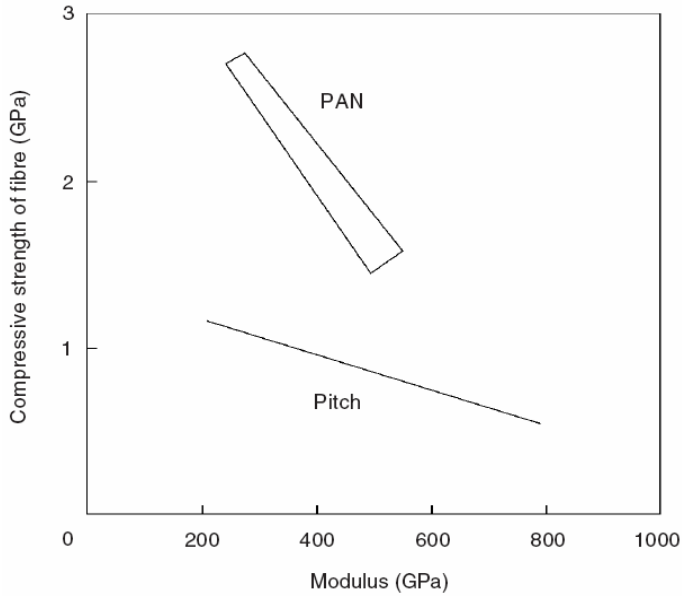
Karbon lifleri;

- yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranları,
- ısıya karşı boyutsal stabilitesi,
- yüksek yorulma mukavemeti,
- yüksek modül,
- yüksek erime noktası,
- yüksek katlıkları,
- düşük elyaf yoğunluğu,
- hafiflik ve rijitlik

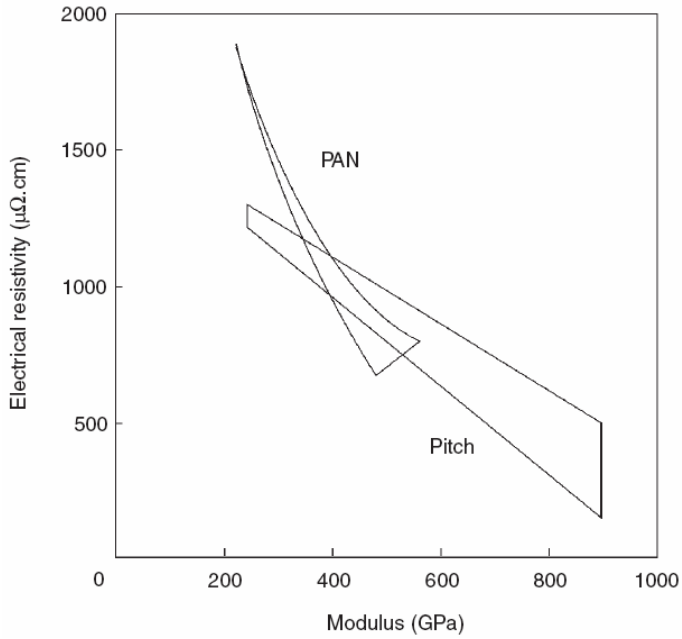
gibi özellikleri ile diğer materyallere göre pek çok uygulama alanında avantajlı olmaktadır. Normal sıcaklıklarda elastik olduğundan sürtünme direnci yüksektir ve çabuk yorulmazlar. Karbon lifleri güçlü oksidasyon ortamları ya da erimiş metallerle etkileşim haricinde kimyasal olarak ilgisizdirler. Karbon liflerinin olağanüstü termofiziksel özellikleri ve mükemmel sönümleme karakteristikleri vardır. Ancak sınırlı uzama özellikleri bazı darbe sorunlarına neden olmaktadır ve elektrik iletkenliği de kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Gevrek olması ve genleşme katsayısının çok küçük olması da dezavantajları arasındadır [19, 22, 23]. Karbon liflerinin genel özellikleri Şekil 3.2.' de verilmiştir.

Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	1,75 - 2,20
Gerilme Dayanımı (MPa)	2500 - 3500
Gerilme Modülü (GPa)	200 - 900
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	3000 - 3500
Elastisite Modülü (N/mm ²)	220000

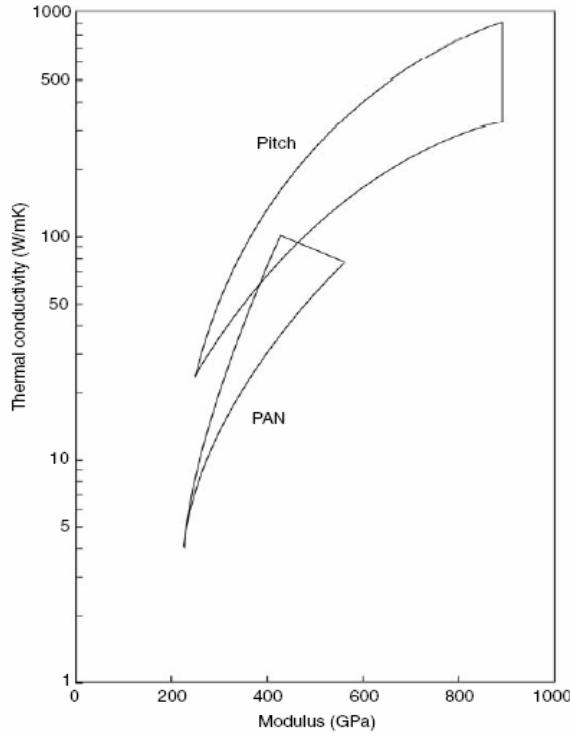
Şekil 3.2. Karbon liflerinin genel özellikleri



Şekil 3.3. Karbon liflerinin sıkışma özellikleri [24]



Şekil 3.4. Karbon liflerinin elektrik direnci [24]



Şekil 3.5. Karbon liflerinin termal iletkenliği [24]

3.3. Karbon Liflerinin Sınıflandırılması

Karbon lifleri filament sayısına göre küçük tow (3K, 6K, 12K) ve geniş tow (24K, 48K, 57K, 80K) olarak sınıflandırılabilir. 12K; 12000 filament kapsamaktadır. Küçük towlar genellikle üstün mekanik özellik gerektiren uzay alanındaki uygulamalarda kullanılmaktadır. Geniş towlar ise mekanik özelliklerin daha makul düzeyde istendiği endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [18].

Karbon lifleri kullanım yerlerine göre de uzay, endüstriyel ve spor ürünleri vb. alanında kullanılanlar olarak sınıflandırılabilir [18].

Karbon lifleri, lif yapısı ve kristalit oryantasyonuna göre izotrop ve anizotrop olarak sınıflandırılabilir [19].

3.4. Karbon Liflerinin Üretimi

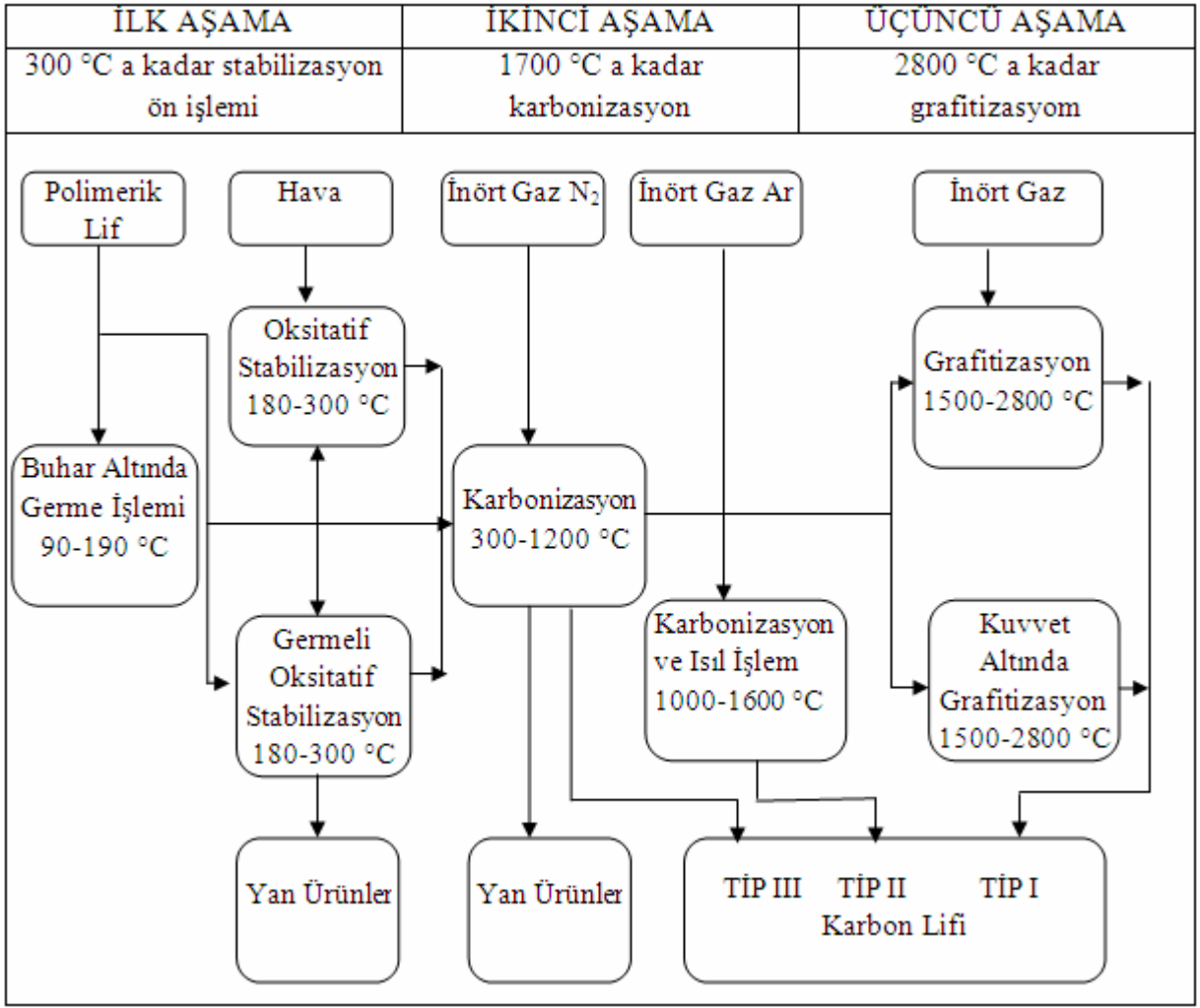
Karbon lifi üretimi için çeşitli yöntemler vardır fakat temel yöntem şu şekildedir: Kömürleştirici ısı işlemi boyunca lifli biçimini koruyan ve yüksek karbonlu artık ürün veren karbonlu hammadde, denetim altında pirolize (ısıyla ayrışma) uğratılır. Başlangıç lifi olarak çeşitli doğal ve yapay karbonlu maddeler kullanılabilir. Pamuk, keten ve kenevir gibi doğal selüloz lifleri, düşük karbonlu ve düşük nitelikli ürün verirler. Viskoz rayon (yenilenmiş selüloz), önemli gelişmeler sağlayan ilk yapay başlangıç liflerinden biridir. En

büyük ilerlemeler, ticari akrilik ürünlerde kullanılan liflerin benzeri olan poliakrilonitril liflerinde sağlanmıştır. Öteki yapay polimer başlangıç lifleri polivinil alkol; poliimit; poliamitlerdir. Çeşitli zift ve ziftli lifler ile işlem görmüş yünlü lifler de kullanılabilir. Piyasadaki karbon liflerinin çoğunluğu PAN' dan üretilmektedir [17].

Başlangıç liflerinin yüksek nitelikli karbon lifine dönüşmesi için, zaman, ısı, atmosfer ve gerilim gibi koşulların denetim altında tutulduğu, uzatılmış ısı işlemi gereklidir. Yaklaşık 10000 iplikçik içeren lif demetleri, ya fırınlarda gruplar halinde ya da fırınlar sistemi içindeki sürekli geçitte işleme uğratılır. Polimer başlangıç lifinin dönüşümü için gerçekleştirilen işlemler, buharda germeyle başlar. Lifler daha sonra 200-300 °C arasında ısıtılır. Bu ısıtma işlemi, molekül zincirleri arasında çapraz bağlanmaya neden olarak lifleri kararlı hale getirir. Karbonlaştırma işlemi, argon gibi bir asal gaz ortamında, 1000 °C kadar sıcaklıkta gerçekleştirilir. Piroliz sırasında, gazlı ayrışma ürünleri dışarı verilir ve lif büzülür. Son aşama, liflerin grafitleştirilmesidir. Lifler, içlerinde düzgün grafit billurlarının oluşmasını sağlamak için, 2000-3000 °C arasında bir ısıtma işlemine uğratılır [17].

3.4.1. Poliakrilonitril Liflerinden Karbon Elyaf Üretimi

PAN lifleri çeşitli metotlarla üretilirler. Islak eğirme prosesinde hazırlanmış kimyasal çözelti koyulaşmış bir sıvı içinde bir düzeye sıkıştırılır ve gerilir. Kuru eğirme prosesinde koyu hamurumsu preparat sıcak bir gaz odasında eğrilir ve gerilir. Yüksek dayanımlı karbon lifleri için bu adımda liflerin içinde boşlukların oluşmasından kaçınmak önemlidir. Yüksek dayanımlı lifler için bugün ıslak eğrilmiş lifler tercih edilmektedir. Karbon liflerinin üretiminde PAN lifleriyle önemli bir gelişme elde edilmiştir [24]. PAN liflerinden karbon lifi üretilirken lifler stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon gibi bir seri işlemde geçerler.



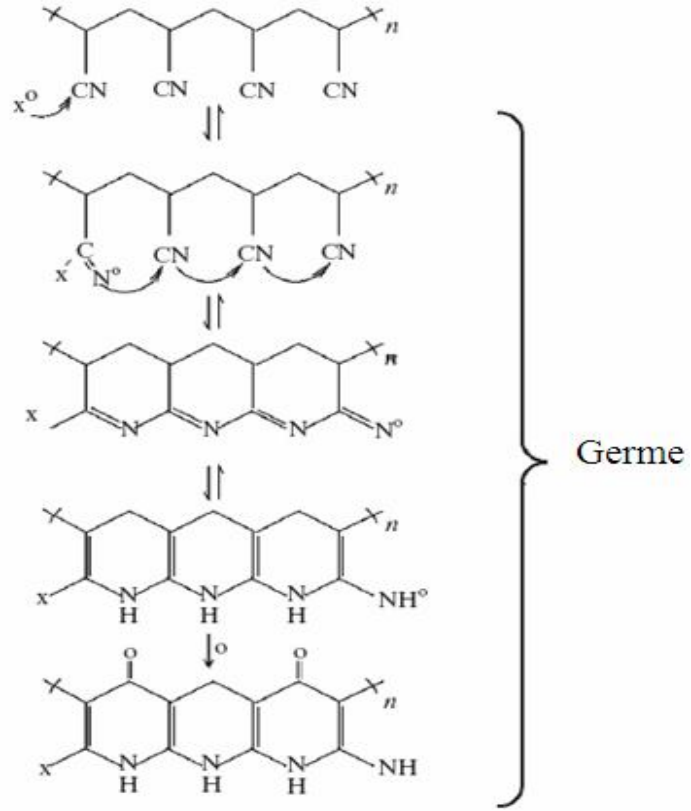
Şekil 3.6. PAN' dan karbon lifi üretimi

PAN dan karbon lifi üretilirken ilk adım kimyasal reaksiyon için asılı nitril gruplarına neden olur. Bu süreç termal olarak aktive edilmiştir ve son derece ekzotermiktir. Aktivasyon sıcaklığı kullanılan ko-monomer miktarı ve tipinden etkilenir. Bu ayrıca tüm dönüştürme süreci boyunca lif gerilim altında tutmak için önemlidir [24]. Şekil 3.7.'de lifin gerilim altındaki reaksiyonu görülmektedir.

Poliakrilonitril

Zincir
Reaksiyon

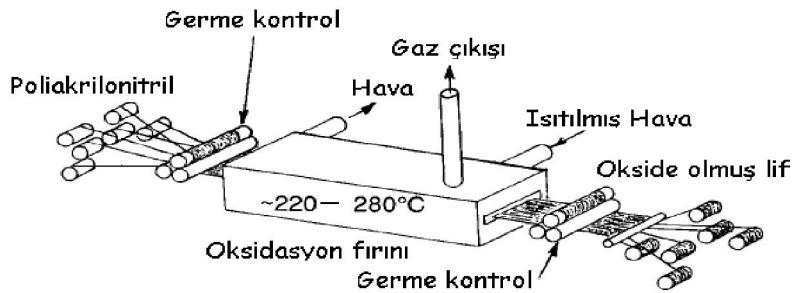
Oksitleme



Şekil 3.7. PAN esaslı lifin kimyası: zincir reaksiyon ve oksidasyon [24]

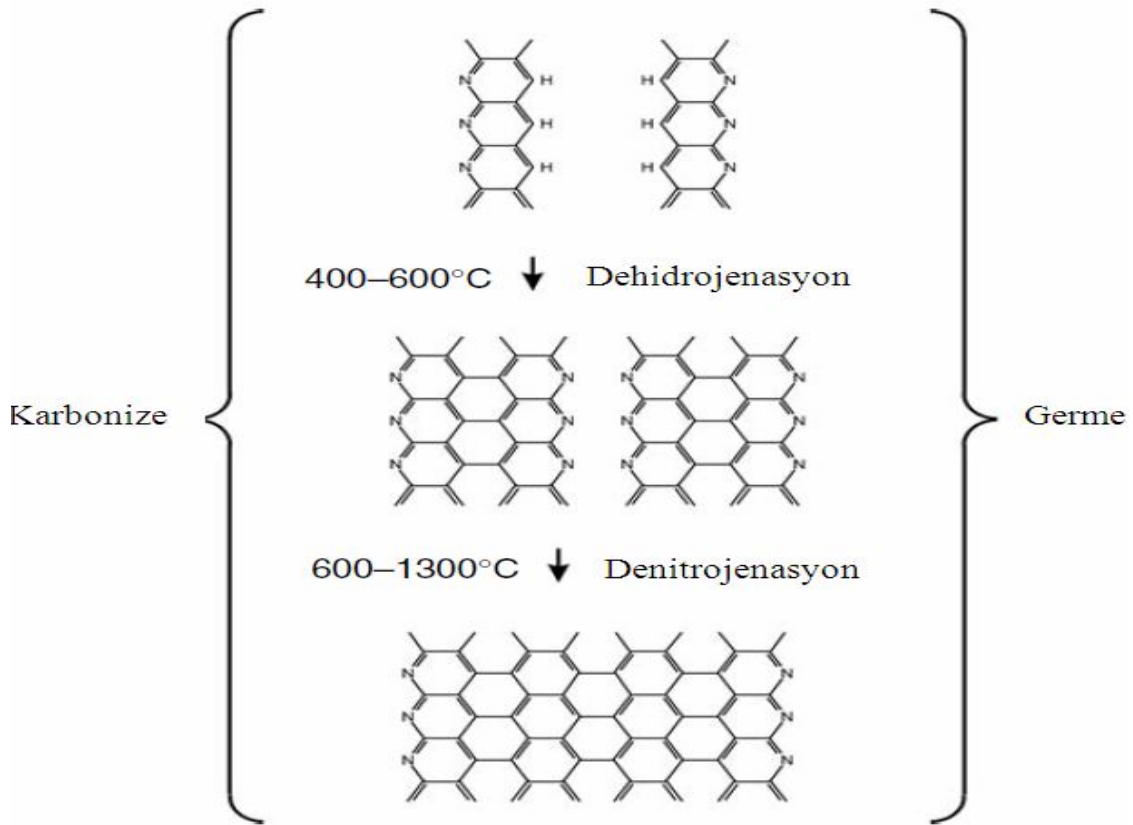
Bir sonraki adım erimez lif yapmak içindir. Bu, havada yeniden ısıtılarak polimere oksijen atomlarının eklenmesiyle yapılır. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye döner ardından siyah olur. PAN molekülleri sertleşir ve bir arada durmaları sağlanır. Reaksiyon sınırlı difüzyondur ve onlarca dakika maruz bırakmak gerekir. Ağırlığının %8'i kadar oksijen eklendiğinde lif 600 °C nin üzerinde erimeden ısıtılabilir.

Bu sıcaklıkta yakma işlemi sonucunda nitril grupları yanarak uzaklaşır ve dehidrojenasyon (hidrojenin uzaklaştırılması) süreci meydana gelir ve 1000 °C nin üzerinde geniş aromatik halkalar oluşmaya başlar.

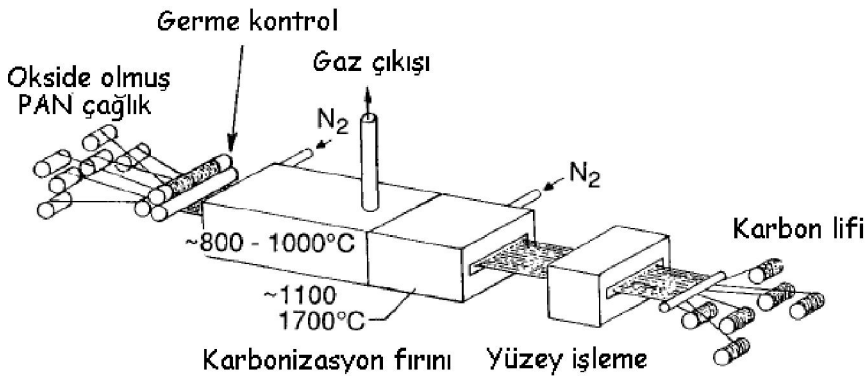


Resim 3.1. Pan liflerinin oksidasyonu [8]

Karbon lif üretimini ikinci aşaması karbonizasyon işlemi; inert gaz, CO, H₂ veya azot ortamında yapılmaktadır. Karbonizasyon 1100 °C de ön karbonizasyon ve 1600-1800 °C de karbonizasyon olmak üzere iki aşamada gerçekleşmektedir. Karbon olmayan elementlerin uzaklaştırılarak liflerin %100 karbonlaşması sağlanır. 400 °C sıcaklıkta lif yapısında %60-72 karbon, %20-24 azot, %5-10 oksijen ve %2-4 hidrojen varken, karbonizasyon işlemi sonunda %98 karbon, %1-2 azot ve %0,5 hidrojen bulunmaktadır [4, 24, 25].

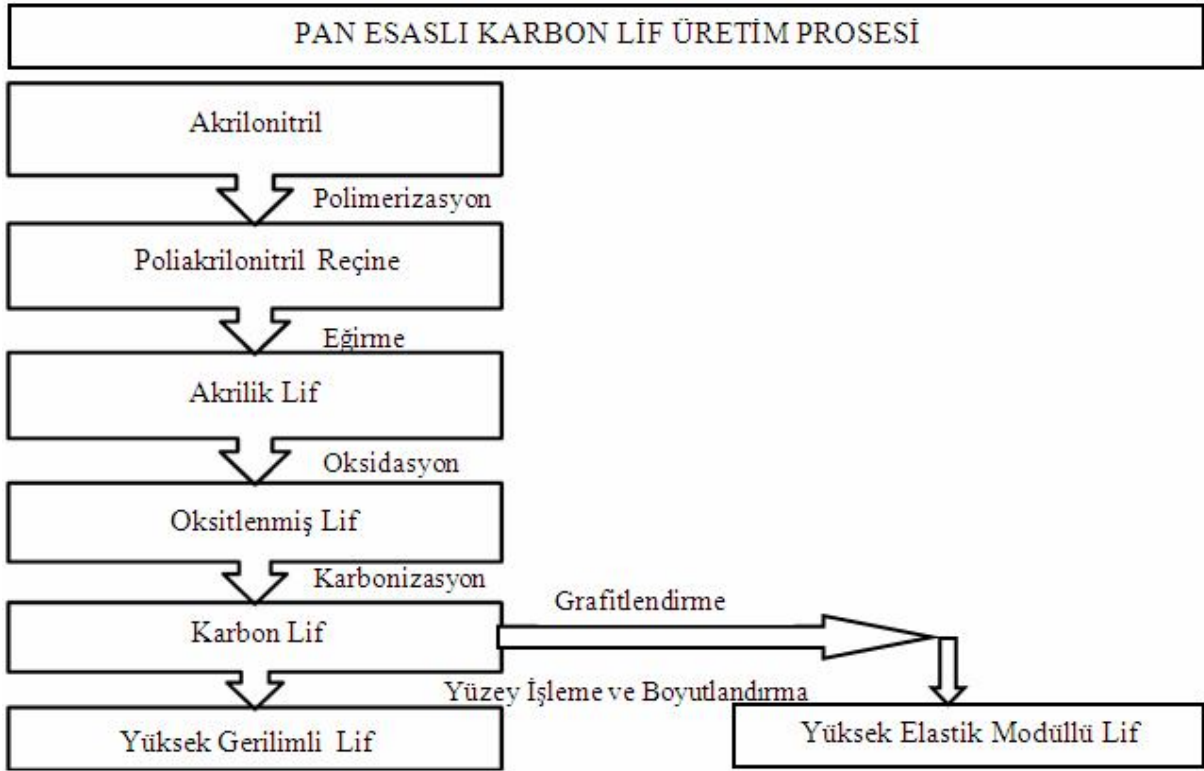


Şekil 3.8. PAN esaslı lifin kimyası: karbonizasyon [24]



Resim 3.2. Pan liflerinin karbonizasyonu [8]

Bir sonraki adım olarak soy gaz olan bir ortamda, boyuna gerilim altında, 2000-3000 °C de grafitizasyon işlemi yapılır [23, 25]. Grafitizasyon işlemi sırasında lif yapısında yeniden kristalizasyon meydana gelmektedir. Liflerin anizotropi derecesi artmaktadır.



Şekil 3.9. Pan esaslı karbon lif üretim prosesi

Şekil 3.9.'daki üretim prosesi aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

Polimerizasyon: Az miktarda uygun bir komonomerle akrilonitrilin kopolimerleşme işlemi

Eğirme: PAN başlangıç lifi

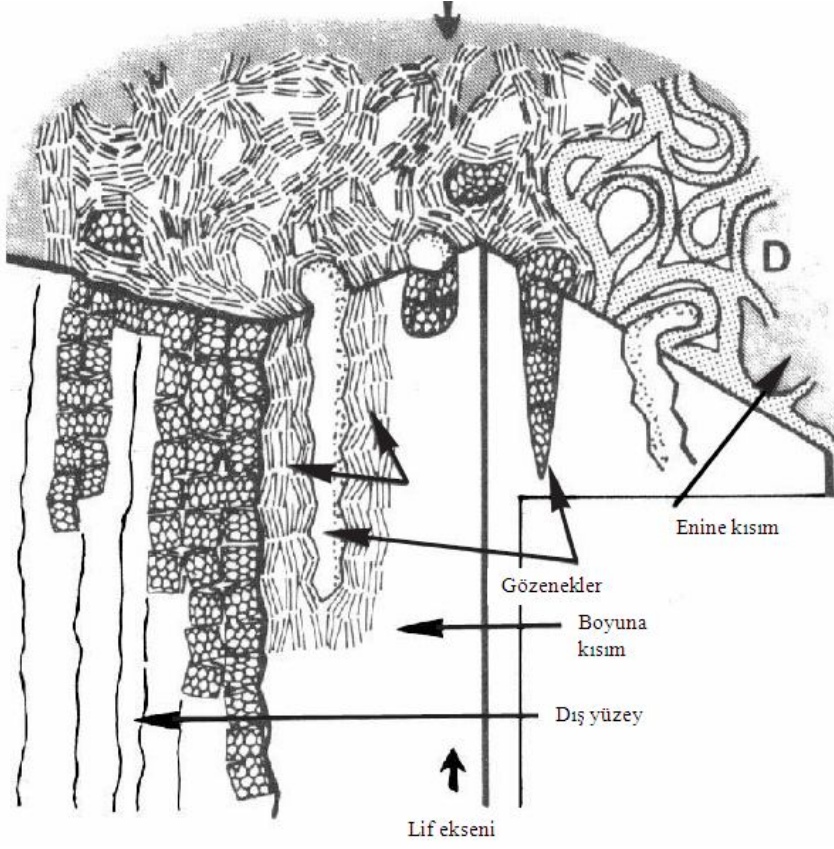
Oksidasyon: 200-300 °C lik hava atmosferi altında, yüksek sıcaklığa sahip ocak (oksidasyon ocağı) içinden sürekli olarak geçen Pan başlangıç lifinin bir bobine sarılma prosesi

Karbonizasyon: Soygaz olan ortamda ve boyuna gerilim altında 1000-1500 °C de karbonizasyon fırınında oksitlenmiş life ısı işlem uygulanması

Grafitlendirme: Soygaz olan ortamda ve boyuna gerilim altında 2000-3000 °C de grafitlendirme fırınında karbonlanmış life ısı işlem uygulanması

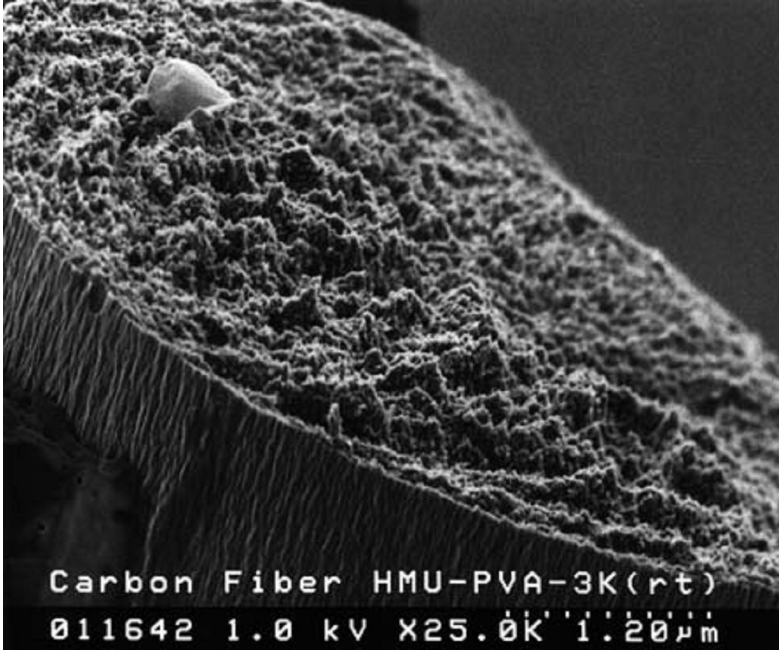
PAN liflerinden karbon lifi üretiminde tecrübe edilmiş ağırlık kaybı yaklaşık %50' dir. Uzunlamasına birçok boşluklar içeren bir yapı oluşur [24]. Grafitin yoğunluğu 2,28 gr/cm³

iken zift esaslı karbon lifi $2,1 \text{ gr/cm}^3$, PAN esaslı karbon lifi $1,8 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğuna sahip olmaktadır [24, 25].



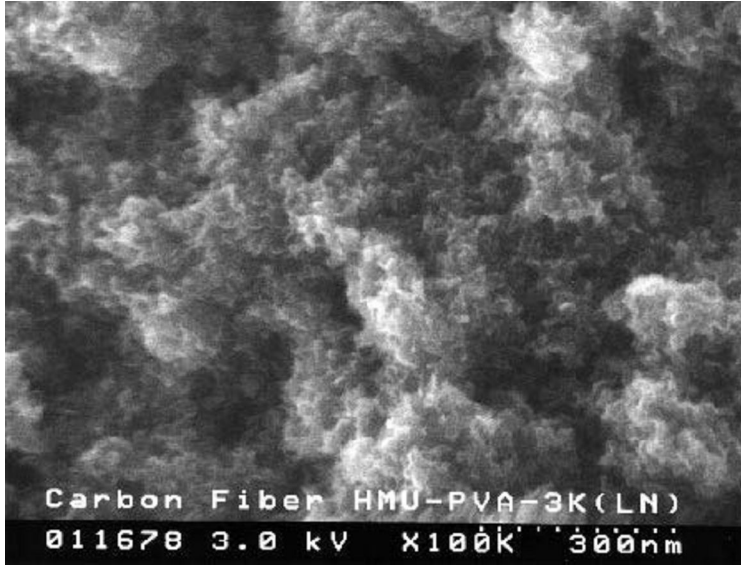
Resim 3.3. Karbon lifinin yapısı [24]

Lifin polimerik doğası yüzey çatlaklarından bellidir [24].



Resim 3.4. Karbon lifinin yüzey görüntüsü [24]

Fibriller lifin duvarında bellidir. Yüzey çatlaklarının yayılması Resim 3.5.' te gösterilmiştir [24].



Resim 3.5. Karbon lifinde yüzey çatlaklarının yayılması [24]

Karbon lifleri için üretim süreçlerinin çoğu detayı üreticilerin tescilli bilgileridir [24].

3.4.2. Ziftten Karbon Lifi Üretimi

Zift/yağ ilk maddesinden karbonizasyon ile üretilir. İki çeşit zift hammaddesi vardır; izotropik ve izotropik olmayan. Bu iki tip zift değişik yollardan işleme konmaktadır [23].

Bu zift, sıvı kristal “mesophase” zift haline dönüştürülmekte ve sıvı haldeki kristal zift,

piroliz işlemine tabi tutulmakta, yüksek modüllü takviye özelliği ve yüksek mukavemet değerlerine sahip ürün elde edilmesi amacıyla ısı uygulanmakta ve elyafa dönüştürülmektedir [26]. Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahip olmaktadır [4].

İşlem sırası şu şekilde açıklanabilir:

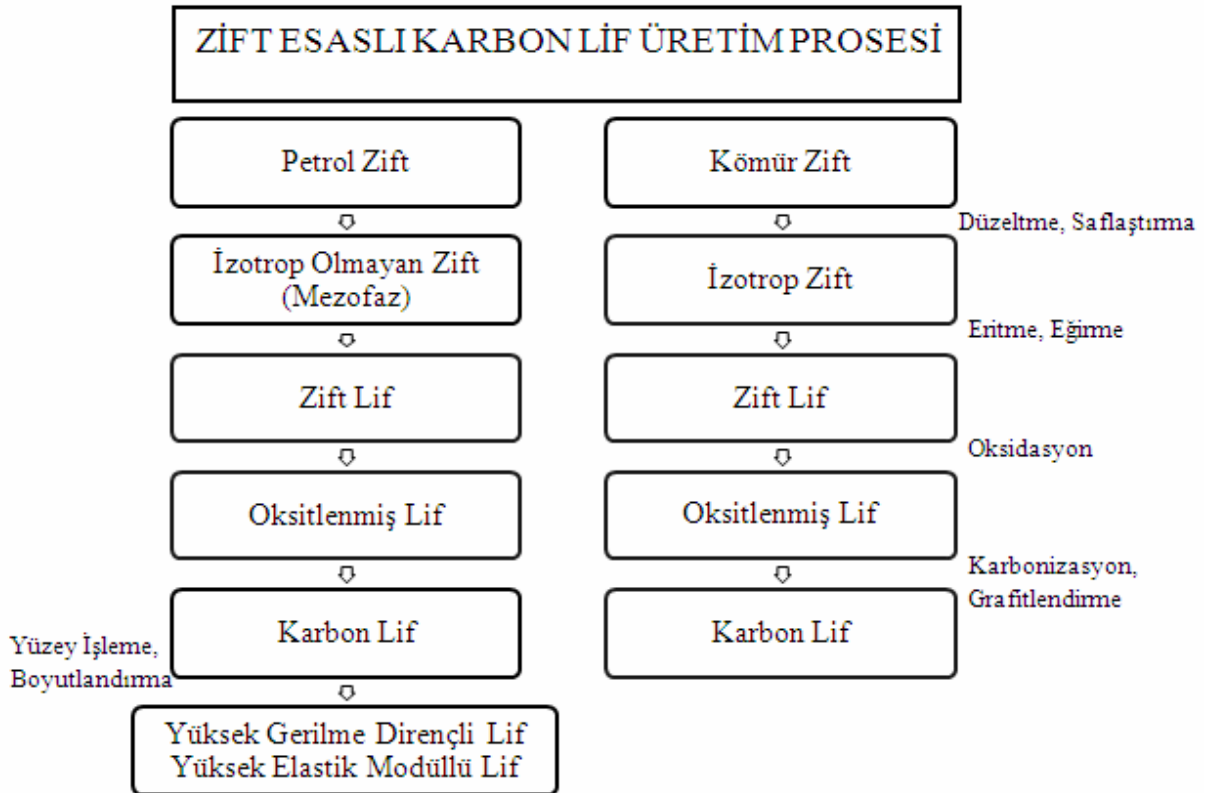
Düzeltilme, Saflaştırma: Ağır petrol yağlı kömür katranının düzeltilmesi ve saflaştırılması işlemidir.

Oksidasyon: Zift lif tellerinin 200-350 °C deki havadan (oksidasyon gazı) geçirilmesi işlemidir.

Karbonizasyon: Soygaz olan ortamda ve boyuna gerilim altında 1000-1500 °C de karbonizasyon fırınında oksitlenmiş life ısı işlem uygulanmasıdır.

Grafitlendirme: Soygaz olan ortamda ve boyuna gerilim altında 2000-3000 °C de grafitlendirme fırınında karbonlanmış life ısı işlem uygulanmasıdır.

Zift ile çok farklı modüllerde karbon lifi üretilebilmektedir [23].



Şekil 3.10. Ziftten karbon lifi üretimi

3.4.3. Bitkisel Esaslı Hammaddelerden Karbon Lifi Üretimi

3.4.3.1. Ligninden Karbon Lifi

Lignin organik bir polimer maddedir. Karbon lifi üretiminde kullanılan ligninin saf olması gerekir. Bunun için ekstraksiyon yapılır. Lignin ekstraksiyonu 180-210 °C de azot ortamında 1-12 saat ısıtılma veya β ya da X ışınlarıyla ışılandırma işlemine tabi tutularak yapılır. Viskozite istenen seviyeye geldiğinde lif çekimi yapılır. Daha sonra lifler azot ortamında 1500-1800 °C de 10 dk ila 2 saat arasında karbonizasyona tabi tutulur. Bu işlem sırasında aynı zamanda gerdirme de yapılır [25].

3.4.3.2. Rejenere Selüloz Liflerinden Karbon Lifi Üretimi

Selülozik liflerden karbon lifi üretme yöntemleri 25-150 °C de suyu fiziksel olarak geri bırakma; 150-240 °C de glukoz birimlerden su giderme; 240-400 °C de glukozit köprülerinin koparılması; 400 °C de aromatikleştirme gibi dönüştürme mekanizmalarını gerektirir [20].

Rejenere selüloz lifleri azot veya argon ortamında önce 400 °C ye kadar ısıtılır daha sonra 1000 °C ye kadar ısıtılarak karbonize edilir. 3000 °C de ısıtılma işlemi birlikte germe de uygulanarak grafitleştirme yapılırsa daha yüksek mekanik özelliklere sahip lifler elde edilebilmektedir.

3.5. Karbon Liflerinin Kullanım Alanları

Karbon lifi pahalı olmasına karşın günümüzde endüstriden uzay alanına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Karbon lifi tüketimini %21 hava-uzay endüstrisi; %15 endüstriyel uygulamalar; %14 spor malzemeleri; %11 rüzgar enerjisi; %10 otomotiv sanayi; %9 elektronik; %8 yağ ve gaz; %8 inşaat ve yapı; %4 denizcilik alanı oluşturmaktadır [27].

3.5.1. Hava-Uzay Endüstrisi

Fiziksel dayanım, düşük ağırlık, yüksek boyutsal stabilite, korozyon dayanımı gibi mükemmel özellikleri sayesinde bu alanda oldukça geniş bir kullanıma sahiptir.

Epoksi ve poliimid reçineleri ile alüminyum gibi hafif metallerin takviyesiyle elde edilen karbon kompozitleri hava ve uzay endüstrisinde kullanılmaktadır [19].

Uzay roket motorlarında, uydularda ve füzelerde de karbon lifi kullanılmaktadır [23].

AV-8B uçaklarında; kanatlar, yatay dengeleyiciler, ön gövde ve kontrol yüzeyleri, F-29 uçağının kanat yüzeyleri, A380 yolcu uçağının kanat panelleri ve flaplar, Boeing 757 ve 767' lerde kontrol yüzeyleri karbon-epoksi kullanılarak yapılmaktadır [28].

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit yapıya sahip F-16, F-22 vb. Avcı Uçakları alüminyum alaşımlarına oranla % 25-40 oranında daha hafiftirler. Bu hafiflik uçaklara hız, daha uzun menzil ve daha fazla malzeme taşıma imkanı vermektedir [28].

Airbus A320 uçaklarında, spoylerlerde, eleronlarda, kuyruk takımlarında, silindirik motor kılıflarında, karbon takviyeli kompozitler kullanılmaktadır [28].

3.5.2. Spor Malzemeler

Özellikle ağırlığın azalması, dolayısıyla hareket kabiliyetinin ve dayanıklılığın artmasını sağlayan karbon elyaf takviyeli kompozitler spor malzemelerinde oldukça sık kullanılmaktadırlar. Örneğin, 210 gram ağırlığındaki karbon raketler, titandan yapılmış raketlere kıyasla, dört kat daha sert ve çok daha hafiftir. Bu raketler darbe emici özelliğe sahip kinetik raketler olarak tanımlanmaktadır [23].

Bisikletlerde titreşimleri sönmüleme amacıyla pedalda ve gövdede; hafif, ince, düzgün ve rijit bir yapı kazanması amacıyla beyzbol ve golf sopalarında kullanılmaktadır. Ayrıca kızak, kano, olta, kayak malzemeleri gibi birçok spor ürününde kullanılmaktadır.

Bu sektördeki yıllık büyüme yaklaşık %6 dır [18].

3.5.3. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar gücü, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Rüzgar türbinleri, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgar türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervane kısımlarından oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Pervane milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır [29].

90 lı yıllarda geniş türbinler 800 KW güç üretebilirken bugün bir türbin ortalama 1,5-2 MW güç üretebilmektedir. Karbon lif kullanımıyla bu 2,5-3,5 MW ye kadar çıkabilir. En az 3 büyük firma bunu test etmiş ve ticarileştirmiştir [27]. Günümüzde rüzgâr enerjisinden üretilen toplam güç 159 213 MW civarındadır [29].

Rüzgardan sağlanan güç pervane çevresiyle doğrudan orantılı ve pervane kanatlarının çapının karesine bağlıdır.

Spesifik dayanım ve sertlik rüzgar türbinlerinde çok önemlidir. Bu yüzden karbon lifi kullanımı avantajlı olmaktadır. (Cam lifinin spesifik dayanımı 1,3-1,5 GPa iken karbon lifinin spesifik dayanımı 2 GPa dır.)

Karbon lifinin hafif ağırlığı ve ileri aerodinamik profili kule ve motorda yükü minimize etmeye yardımcı olmaktadır.

Pervane kanatlarının büyüklüğü arttıkça rotorun süpüreceği çevre artacağından 45-50 m den büyük kanatlarda ağırlık önemli bir kriter olmaktadır. Dolayısıyla karbon lifi kullanımı avantajlı olmaktadır. Karbon lifi takviyeli polimerler yorulma dayanımında da cam lifi takviyeli polimerlere göre mükemmellik göstermektedir.

Her MW için pervanenin dizayn ve konstrüksiyonuna bağlı olarak 800-1200 kg karbon lifi gerekmektedir. 2006 da bu sektör için 2950 ton karbon lifi kullanılmıştır. Bu global talebin %6 sına denktir ve 2005 yılından sonra %50 artmıştır. 2010 itibariyle de %10-11 olacağı tahmin edilmektedir. 2012 itibariyle bu sektörde karbon lifi tüketiminin 7500 ton, 2014 itibariyle ise 14500 ton olması beklenmektedir [27].

Karbon lifi yüksek sertliği, hafif ağırlığı ve hem statikte hem de yorulmadaki mükemmelliğinden dolayı bu alanda tercih edilmektedir.

3.5.4. Otomotiv Sanayi

Karbon lifi takviyeli polimerler ağırlık azaltmada cam lifi takviyeli polimerlere göre çok avantajlıdır. Karbon lif ve kompozitlerin yarış arabalarında kullanım amacı da ağırlığı düşürüp yakıt masrafını azaltmak ve maksimum dayanım sağlamaktır. Karbon kullanımı, aracın ağırlık merkezini alçaltıp yol tutuş performansını daha da artırmaktadır [27].

Ticari araçlar için de karbon lifi takviyeli polimerler daha iyi enerji absorpsiyonu, gelişmiş titreşim sönümleme ve çalışma performansından dolayı tercih edilmektedirler. Bazı araba firmaları karbon lifi takviyeli polimer bileşenlerini çoktan beri kullanmaktadır [27]. İnorganik lif ve karbon liflerinin bir organik latex ile bağlanması sonucu elde edilen kompozit materyaller otomobil hava yastıklarında hava ile şişirme ünitesinde filtre materyali olarak kullanılmaktadır [22].

Yakıt hücrelerinde de karbon lifi kullanılmaktadır. Karbon lifi zorunlu elektriksel özellikleri ve tanımlanan kütle özellikleriyle yarı geçirgen bir membran olarak kolayca yapılandırılabilirdiği için polimer elektrolit yakıt hücrelerinde elektrot olarak tercih edilen bir materyal olmaktadır [27].

Yakıt filtrelerinde de ısıya ve basınca dayanımı yüksek olduğu için tercih edilmektedir.

Karbon elyaf takviyeli seramikten yapılmış fren diskleri aynı yapıdaki çelik diske göre 4 kat daha uzun ömürlü ve %50 daha hafiftir.

Karbon lifinin fiyatı otomotiv sektörü için kritik bir yön olmaktadır.

3.5.5. Elektronik

Dijital kamera ve laptop iskeleti olarak kullanılan karbon lifi termoplastik bir reçine ile oluşturduğu kompozit malzemelerle notebook parçalarında ve elektronik parçalarda da kullanılmaktadır [22, 27].

Karbon lifi ile takviyelendirilmiş polimerler sensör olarak kullanılmaktadır [22].

3.5.6. İnşaat Ve Yapı Endüstrisi

İnşaat alanında yapısal güçlendirme amacıyla uygulanmaktadırlar. Burada sargı, eğilme, darbe dayanımı, sehim amaçlı kontrol gibi nedenlerle karbon lifleri ya da kompozitleri tercih edilmektedir [30].

Karbon fiber ve kompozit malzemeler bir ofis binası prototipi inşa edilirken geleneksel tekniklerden farklı olarak binanın temel yapısıyla birlikte dokunmuştur. Ayrıca çift yüzlü transparan ve yarısaydam membranlardan oluşturulmuştur. Binanın yapısı, silindirik hacminin çevresinde her iki yönde de sarılmış, karbon liflerinden yapılmış yüzlerce fit uzunluğundaki 40 tane sarmal banttandır oluşmaktadır. Bükülmez dahili bir çekirdeğe ve sağlamlık için kullanılan kolon serilerine ihtiyaç duyulmadan, bu 30 cm genişliğinde ve 1 inç kalınlığındaki ince bantlar, binanın tabanından çatısına kadar aralıksız devam etmektedir. Böylece oluşacak dikey basınç ortadan kaldırılmaktadır [31].

Karbon yünü ve keçeleri ısı izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadırlar [25].

Karbon lifleri köprü iskelelerinde, kirişlerde, sütunlarda ve döşemelerde antisismik takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mil, ızgara ve inşaat demirlerinde de takviye elemanı olarak kullanılmaktadırlar [27].

Japonya'da depreme dayanıklı binalarda takviye malzemesi olarak kullanılması düşünülmektedir [23].

3.5.7. Denizcilik

Gemi yapım malzemesi olarak çelik yerine karbon kompozit malzemelerin kullanımı, gemilerin radara yakalanma ihtimalini azaltmaktadır. Geminin toplam ağırlığı düştüğünden dolayı yakıt harcaması azalmakta ve daha rahat hareket imkanı bulabilmektedir. Ayrıca, gemi çelikten yapılan gemilere oranla %50 daha hafif olduğundan daha fazla malzeme taşıyabilmektedir.

Çok yönlü kumaş formundaki karbon lifleri başlıca takviye elemanı olarak yalnızca gövde kenarı ve diplerde değil aynı zamanda üst kademelerde de kullanılmaktadır.

Yelkenli gemilerde karbon lifinin sertlik ve dayanımı zincir plakalarda, dümen, rulman, direk ve salda yüksek yoğunluklu yüklemelerle başa çıkabilmek için kullanılmaktadır [27].

Deniz botları ve ticari sallarda sandviç yapıdaki karbon lifi takviyeli plastiklerin kullanımı oldukça başarılı olmuştur. Deniz botları alüminyuma karşılık %30 daha hafiflemiş ve %20 yakıt tasarrufu sağlamıştır [27].

Modern yarış yelkenlerinde karbon lifleri düşük ağırlıkta yüksek mukavemet istenilen yerlerde kullanılabilir. Uçurtma yelkenlerindeki kontrol bölmesinde karbon kompozit elyaf malzemesinden yapılmış bir şasi, kaplama, elektronik komponentler, dişli kutusu ve motor bulunmaktadır [32].

3.5.8. Sağlık Alanı

Karbon lifinin, bilinen bütün malzemeler içinde en iyi biyouyumluluğa sahip olduğu ve kemik, yumuşak doku ve kanla uyumlu olduğu bilinmektedir.

Karbon lifi ile kuvvetlendirilmiş polibütilentereftalat implantasyon sırasında kemik kayıplarını azaltmak için çeşitli kemik yapılarında kemik içerisine yerleştirilerek kullanılmaktadır [22].

Suni eklem, suni tendon, suni karaciğer yapımında, X-ray cihazları ve tekerlekli sandalyede de karbon lifleri kullanılmaktadır [23, 27].

3.5.9. Diğer Alanlar

Hidrojen Tankı

Günümüzde önemi giderek artan hidrojen depolamanın çeşitli yöntemlerinden biri de basınçlı kaplarda gaz formunda sıkıştırarak depolamadır. Yüksek basınca dayanıklı hidrojen tanklarının genel olarak yapıları iç bir metal malzemedir ve üzerinde düz veya helisel tipte sarılmış çoğunlukla karbon fiber takviye tabakalarından oluşmaktadır. Yüksek basınçlı tanklar sınıflandırıldığında 2 sınıfını karbon lifinden oluşan tanklar oluşturmaktadır (Karbon lifinden oluşan kompozit malzemeli metalsel bir iç kısma sahip tanklar, Temel olarak karbon lifli kompozit tanklar (iç kısmı çoğunlukla termoplastik polimerlerden oluşmaktadır.)) [33].

Sıkıştırılmış Doğal Gaz (CNG) İçin Basınç Kanalları

Dünya çapında doğalgaz alternatif ulaşım yakıtı olarak yaygınca kullanılmaktadır. Bunun nedeni sadece temiz değil aynı zamanda geniş çapta mevcut olmasıdır. Dünyada 9 milyondan fazla CNG aracı bulunmaktadır [27].

120 lt kapasiteli ve 200 bar basınç destekleyen tank için 20-22 kg karbon lifi kullanılmaktadır. Tank ağırlığı kapasite ve basınca bağlı olarak çeliğin 1/5 i ya da 1/3 ü kadar olmaktadır [27].

Karbon lifinin bu alandaki diğer avantajları korozyon direnci, gaz uyumluluğu ve dairesel yorgunluğudur [27].

Offshore Oil

Derin su kaynakları offshore oil üretiminin %9 unu karşılamaktadır. 2015 itibariyle bunun %25 e ulaşması beklenmektedir [27].

Yağ kalıntıları okyanusta birkaç bin metre derinlikte gömülüdür. Çelik 1000 m de bile burkulma ve eğilme sonucu kendi ağırlığını uzun süre destekleyemez. Buna ek olarak çelikte korozyon faktörünü de dezavantaj olmaktadır. Karbon lifi çeliğin ele alınmadığı derinliklerdeki uygulamalar için ideal tekno-ticari alternatif olarak bulunmuştur [27].

3000 m oluk için yaklaşık 60 ton karbon lifi tüketilmektedir [27].

Geniş platformlarda okyanus dibine demir atmak için karbon lifi takviyeli plastik miller kullanılmaktadır. Dalga hareketinden dolayı oluşan platformun doğal frekansını hafif ağırlık ve yüksek sertlik özellikleriyle karbon lifi takviyeli plastikler minimize etmektedirler [27].

Genel ve Endüstriyel Mekanizmalar

Yazıcı ve kağıt makinelerinde kullanılan karbon lifi takviyeli plastikler çeliklerle karşılaştırıldığında hızlı dönme ve düşük sapma gibi avantajlar sunmaktadırlar [27].

Dokuma makineleri için karbon lifi takviyeli plastik pultruded iğneler hız ve hassasiyet açısından avantaja sahip olmaktadır [27]. (Pultruded: pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş.

Pultrüzyon: sürekli sabit kesikli kompozit profil ürünlerin çekme yöntemiyle üretildiği seri üretim yöntemi)

Karbon lifi takviyeli plastikler eksantrik kam mili ve bağlantıları için burulma momenti iletimi uygulamalarında çeliğe göre birkaç kat daha hafif ağırlık, yüksek sertlik, titreşim yumuşatma ve korozyon direnci gibi özellikleriyle çeliğin yerini almaktadır [27].

Enerji depolama bataryalarında karbon lifi kullanılmaktadır [22].

Diğer Uygulamalar

Karbon kumaşlar elektrik izolasyonunda, elektrik ile ısınan fırınlarda kullanılmaktadır [25].

Karbon liflerinin kullanıldığı, şarj edilebilen piller yardımıyla çalışan bir ısıtma sistemi ısıtmalı yelekte kullanılmaktadır. -25 °C nin altındaki sıcaklıklarda dahi çalışma kapasitesine sahip olan yelek 6–8 saat çalışabilmektedir.

İtfaiyeci başlıklarında kullanılan karbon örgü kumaşlar uzun süreli temaslarda 900 °C ye, kısa süreli temaslarda ise 1200 °C ye kadar dayanabilmektedir [34].

Karbon lifi iplik kılavuz çubuğunun yapımında da kullanılmaktadır. Bu kılavuz çubuğu rotor iplik makinesinde performans artışı sağlamaktadır. Hareket halinde bulunan kütle miktarını azaltmak ve yüksek performanslı malzemenin avantajlarından mümkün olduğu kadar fazla yararlanmak için bu çubuk bir boru şeklindedir ve kütlelerini artıran herhangi bir kaplaması yoktur. Karbon liflerinin çevresel ve eksenel oryantasyonu çubuğun gerilme ve sıkışma dayanımının yanı sıra eğilme dayanımını da optimize etmektedir. Bu özellikler yüksek bir dinamik zorlanmaya maruz komponentler için bir avantaj oluşturmaktadır [35].

Keman, gitar, çello gibi müzik aletlerinde de karbon lifi kullanılmaktadır.

BÖLÜM 4

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Yapılan literatür araştırması sonucu karbon liflerinin ve grafitlerin epoksi ve diğer matris malzemeleriyle oluşturmuş oldukları kompozit yapıların mekanik özellikleri incelenmiş özellikle karbon/epoksi kompozitlerinin çekme ve kayma özellikleri üzerinde yaygın çalışmaların yapıldığı görülmüştür.

4.1. Karbon/Epoksi Kompozitleri

Karbon/epoksi kompozitleri için yapılan literatür araştırmasında kompozitler mekanik özellikleri ve üretim tekniklerine göre araştırılmış ve özetle aşağıda verilen çalışmalara ulaşılmıştır.

4.1.1. Mekanik Özellikler

4.1.1.1. Çekme ve Kayma Özellikleri

Elarabı ve Weidong yaptıkları çalışmada karbon/epoksi kompozitlerinde enine dizilmiş liflerin aksenal çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma için biri tek yönlü sıralanmış filamentlerden diğeri çift yönlü çözü örne kumaşlardan epoksi reçineyle yapılmış kompozitlerin aksenal çekme testleri yapılmıştır. Çekme yük değerleri ve çift yönlü çözü örne kumaşlardan yapılan kompozitlerin uzama yüzdeleri artmıştır. Epoksinin eklenmesiyle kompozitlerin modüllerinde de artış görülmüştür. UD (Unidirectional) kompozitler için çekme yükü ve uzama azalırken BWK (Biaxially Warp Knitted) için artmıştır [36].

Taniguchi ve arkadaşları matris baskın yönde yüklenmiş karbon lif kompozitlerin dinamik çekme özelliklerini incelemişlerdir. Matris olarak termoplastik epoksi reçine kullanılmıştır. Numunelerin 10°, 30° ve 45° için çekme mukavemeti ve zorlanma oranı arasında doğrusal ilişki bulunamamıştır [37].

Baral ve arkadaşları yarış yatı konstrüksiyonunda kullanılan tek yönlü karbon epoksi kompozitlerin enine gerilim test sonuçlarını incelemişlerdir. Lif modülleri 380-640 GPa arasında değişmektedir. Poliakrilonitril (PAN) lif takviyeli kompozitlerde lif modülü arttıkça delaminasyon direnci (Glc ve Glp) ve enine hata zorlanmasının düştüğü

gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek modüllü zift lifi esaslı kompozitler, yüksek modüllü PAN lifi esaslı kompozitlere göre daha yüksek enine hata zorlanması göstermektedirler [38].

Agrawal ve Prasad karbon/epoksi kompozitlerin uygulandıkları ortamlarda maruz kaldıkları katodik reaksiyonlar sebebiyle mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Katodik reaksiyona maruz kalan numunelerde interlaminar kayma mukavemetinde önemli bir düşüş olduğu buna karşın interlaminar kırılma tokluğunda artış olduğu görülmüştür [39].

Gliesche ve arkadaşları karbon/epoksi kompozitlerin düzlem içi kayma özelliklerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. $0^{\circ}/90^{\circ}$ tekstil takviye yapıları ve farklı tabaka kalınlıkları ile karbon/epoksi kompozitlerinin kayma özellikleri $\pm 45^{\circ}$ gerilim yükü altında belirlenmiştir. Yükleme boyunca numune yüzeyindeki deformasyon işlemi bir optik tüm alan (whole-field) ölçüm metodu kullanılarak yapılmıştır. Sonuçta kayma davranışlarının, tabaka kalınlığı ve/veya takviyenin her ünite alanı ağırlığından etkilendiği bulunmuştur. Numunelerin yüzeylerinin optik deformasyon analizi, beklendiği gibi, eşit zorlanma dağılımı göstermez. Dahası, hesaplanan ortalama zorlanma değerinden geniş sapmalar elde edilmiştir. Sonuç olarak, yapı ünitelerinin boyutlarının bu gerçekten etkilenmiş olabileceği düşünülmüştür [40].

Zhang ve Mason yaptıkları çalışmada hem üretim sürecinde hem de kompozitlerin kullanımı boyunca kontrol edilmesi gereken çevresel kirliliğin karbon lif takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Su, deniz suyu, asit, alkali ve organik çözücü kirletici olarak kullanılmış ve numuneler hem kür öncesi hem de sonrasında kirletilmiştir. Tabakalar arası kayma mukavemeti ve çekme mukavemeti ölçülmüştür. Sonuçta kirliliğin epoksi matrisi bozduğu ortaya çıkarılmıştır. Su ve deniz suyunun çekme mukavemeti ve elastisite modülünü düşürdüğü gözlemlenmiştir [41].

Ogasawara ve arkadaşları karbon lif takviyeli epoksi matris kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerinde fullerene dağılımının etkilerini incelemiştir. Çekme, basma, açık delik sıkıştırma, darbe sonrası basma (CAI), bağlama, kısa kiriş kayma ve interlaminar kırılma tokluğu gibi mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Matris reçine içine fullerenenin dağılımıyla çekme ve basma mukavemetlerinde artış görülmüştür. Ayrıca kompozitin interlaminar kırılma tokluğu yaklaşık %60 geliştirilmiştir [42].

Sadeghian ve arkadaşları karbon lif takviyeli plastiklerin (CFRP) mekanik özellikleri hakkında deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 8 katlı konfigürasyon eksenel

yönlerden 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° de lif oryantasyonlarıyla 1, 2, 3 ve 4 katlarda hazırlanmıştır. Gerilme-şekil değiştirme davranışının lif oryantasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur [43].

Cérny ve arkadaşları CFRP kompozitlerin çekme ve kayma elastisite modülleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Dinamik gerilme ve düzlem içi kayma modülü bir kirişin serbest uçlarıyla titreşim sıklıklarından tespit edilmiştir [44].

Bilisik PAN esaslı karbon lifleriyle takviye edilmiş çok yönlü 3D dokuma kompozit preformlarla 3D ortogonal dokuma karbon/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışmasında çok yönlü 3D kumaş preformları +çapraz, -çapraz, çözü, atkı, Z-iplikleri olmak üzere 5 iplik setiyle üretilmiştir. 5 eksen üzerindeki ipliklerin oryantasyonu preformun mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Preformun iplikleri epoksi reçinenin PAN esaslı karbon lifleriyle takviyesiyle elde edilmiştir. Bu preformlar test edilmiş ve 3D ortogonal dokuma karbon kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Çok yönlü 3D dokuma kompozitin düzlem içi kayma mukavemeti ve modülü, 3D ortogonal dokuma kompozitin kayma mukavemeti ve modülünden daha yüksek bulunmuştur. Buna rağmen çok yönlü 3D dokuma kompozitin eğilme mukavemeti ve modülü, interlaminar kayma mukavemeti, çok yönlü 3D dokuma yapısının her iki yüzeyinde +/- çapraz ipliklerin oryantasyonu nedeniyle 3D ortogonal dokuma kompozitin interlaminar kayma mukavemetinden çok az daha düşüktür. Her dokuma numunesinin hataları onların mekanik davranışlarının değerlendirilmesi için analiz edilmiştir. Çok yönlü 3D dokuma preformun birim hücresi tanımlanmıştır. Birim hücre geometrisine bağlı olarak, bazı ilişkiler preformdaki her iplik setinin hacim fraksiyonunun tahmin edilmesi için geliştirilmiş ve bu tahmin edilen sonuçlar ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır [45].

4.1.1.2. Diğer Mekanik Özellikler

Reis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon/epoksi tabakaların mekanik davranışlarında interlaminar delaminasyonun etkisini araştırmışlardır. Kompozit 12 tane dengelenmiş çift yönlü karbon lif tabakaları ve epoksi reçine kullanılarak vakum molding metodu ile üretilmiştir. Farklı uzunlukta delaminasyonlar yapay olarak başlatılmıştır. Numuneler 3mm kalınlık ve 0,66 lif ağırlık oranına sahip orjinal plakalardan köpek kemiği şeklinde kesilmiştir. Statik testler tabaka sertliği ve mukavemeti üzerinde delaminasyon boyutlarının etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Yorulma testleri oda sıcaklığında, 10 Hz yükleme sıklığıyla 0,05 ve -1 stres oranları (R) için yük kontrolünde yapılmıştır. Yapay interlaminar delaminasyonları, çekme döngüsü yüklemeleri için yorulma mukavemeti

üzerinde göz ardı edilebilir bir etkisi vardır fakat $R=-1$ yorulma yüklemeleri için mukavemette önemli düşüşler kaydedilmiştir [46].

Wang ve arkadaşları karbon lif takviyeli epoksi kompozitler üzerinde biriken Zn-Al kaplamaların mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerinde ark püskürtme gücünün etkisini araştırmışlardır. Zn-Al kaplama ve yüzey arasındaki yapışma mukavemeti bir RGD-5 çekme test makinesinde test edilmiştir. Püskürtme kaplamaların faz kombinasyonu ve mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile incelenmiştir. Sonuçta püskürtme gücünün artmasıyla hem Zn-Al parçacıkların erime derecesi hem de kaplamanın yapışma gücünde artış görülmüştür. Kırık yüzeylerin gözlemi sonucunda da Zn-Al kaplamaların 40 kW püskürtme gücü kullanılarak karbon lif demetleriyle iyi bağ yapabileceği kanısına varılmıştır [47].

Toygar ve arkadaşları karbon/epoksi kompozitlerinin kırılma tokluğunu araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada yaklaşık %60 lif hacim oranına sahip sekiz tabakalı dokuma karbon/epoksi kompozit materyalin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kırılma tokluğu değeri deneysel CMOD (crack mouth opening displacement) yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel araştırmalar SENT (single edge notch tension) numuneler kullanılarak oda sıcaklığında kompozitin kırılma tokluğu üzerine yapılmıştır. Sonlu elemanlar yazılım paketi ABAQUS ile dokuma karbon/epoksi kompozitin kırılma tokluğu değerinin elde edilmesi için bir 2-D modeli kullanılarak sonlu elemanlar çalışması yapılmıştır. CMOD yöntemi ile elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (FEM) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma iyi uyum göstermiştir [48].

Suresha ve arkadaşı karbon lif takviyeli epoksi kompozitlerin sürtünmede normal yükleme ve kayma hızının etkilerini ve aşınma davranışlarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. $[0^\circ/90^\circ]$ ve tek yönlü karbon/epoksi kompozitlerin sürtünme ve kuru kayma aşınma davranışları blok-silindir testi (block-on-roller) kullanılarak incelenmiştir. Kuru kayma aşınma deneyleri $0^\circ/90^\circ$, paralel ve anti-paralel yüzeylerde yapılmıştır. İki farklı yük ve çeşitli kayma hızları için kompozitlerin aşınma ve sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Kayma hız/yükteki artışla aşınma kaybının doğrusal arttığı görülmüştür. Ayrıca geleneksel tartım, sürtünme katsayısının belirlenmesi ve SEM elektron mikroskobuyla taranan aşınmış yüzey özelliklerinin incelenmesi tribolojik davranışlarını incelemek için yapılmıştır. Liflerin dezoryantasyonu, lif çatlağı, matris deformasyonu ve aşınma atık hasar

mekanizması SEM altında gözlemlenmiştir. Kompozit aşınması karşı yüzey üzerinde materyal transferi ile birlikte olmuştur [49].

4.1.2. Üretim Tekniği

Papargyris ve arkadaşları tarafından mikrodalga ısıtma ve reçine transfer kalıplama tekniği birleştirilerek üretilen karbon lif/epoksi kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri geleneksel reçine transfer kalıplama tekniği ile üretilenlerle karşılaştırılmıştır. Mikrodalga işleme, mevcut kompozit üretim tekniklerinin geliştirilmesi, enerji gereksinimleri ve işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılması için büyük potansiyele sahiptir. Mikrodalga ısıtmanın kullanımı sayesinde kür çevrim süresi %50 azalmıştır. Eğilme mukavemeti ve modülü her iki kompozitte de benzer değerler gösterirken interlaminar kayma mukavemetinde (ILSS) artış görülmüştür. ILSS deki bu iyileştirme kür sürecinin ilk aşamasındaki reçine viskozitesinin düşürülmesine atfedilmiştir [50].

Davis ve arkadaşları nanotüp bilim ve teknolojisi kullanılarak karbon elyaf epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerindeki gelişmeleri inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Karbon elyaf takviyeli epoksi tabakalar iki ıslak kür devri tarafından izlenen ısıtılmış vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. %0,2, %0,3 ve %0,5 ağırlık yüzdelerinde fonksiyonel karbon nanotüpler (f-CNTs) ve florinin birleştirilmesiyle karbon elyaf takviyeli epoksi tabakalar hem gerilim-gerilim ($R=+0,1$) hem de gerilim-sıkıştırma ($R=-0,1$) devir yüklemesine maruz bırakılmıştır. Daha sonra çekme mukavemeti, sertlik ve mukavemetindeki gelişmeler incelenmiş ve düzenli (0,0 wt % CNTs) kompozit tabaka materyallerle karşılaştırılmıştır. Nanokompozit tabakaların gelişimi için 12 kat tabaka yatırmak için her saten dokuma karbon elyaf kumaş parçasının her bir kenarına yerleştirilmiş nanotüplere bir püskürtme teknolojisi uygulanmıştır. f-CNTs ler hem statik hem de döngüsel yükleme altında lif/kumaş-matris arayüz çatlaklarının değişimini ve delaminasyonu hafifletmek için epoksi reçine-lif arayüzünü sertleştirmiştir. Sonuç olarak karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit tabakalar için döngüsel yüklemeler nedeniyle hasar için direnç, sertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerde önemli gelişmeler bulunmuştur [51].

Djordjevic ve arkadaşları farklı sıcaklık ve basınçta üretilen tek yönlü karbon lif/ epoksi matris kompozitlerinin makromekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karbon lifleriyle tek yönlü epoksi matris kompozitler bir kalıpta ticari prepreg Hexcel M39 sıcak presleme ile işlenmiştir. Farklı lif içerik ve yoğunluklarıyla test edilen numunelerin makromekanik

özellikleri standart gerilim, bükülme, interlaminar kayma mukavemeti ve düzlem içi kayma mukavemeti testleri ile saptanmıştır. Testlerden elde edilen veriler literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır [52].

Tsotra ve arkadaşları yaptıkları çalışmada işlevsel olarak kademelendirilmiş epoksi reçine/karbon elyaf kompozitlerinin elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada bir epoksi reçine içine karbon liflerinin kademeli dağılımını oluşturmak için santrifüj tekniği kullanılmıştır. Oluşturulan kademeli yapı değişken dönme hızı ve lif içeriği ve lif boy oranı gibi materyal bileşenlerinin belirli özellikleri tarafından kontrol edilebilir. Elektrik iletimi iki-nokta araştırma (two-point probe) metodu ile belirlenmiştir. Merkezkaç kuvveti yönünde hacim içeriği ve elektrik iletim değeri karşılaştırılmış ve materyalin bu iki özelliği yakından ilişkili bulunmuştur [53].

Suresha ve arkadaşları yaptıkları çalışmada grafit dolgulu ya da dolgusuz karbon/epoksi kompozitlerin mekanik ve üç-cisim aşınma davranışlarını (three-body abrasive wear) incelemiştir. Mekanik özellikler Universal test makinesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Üç-cisim aşınma testlerinde kuru ve gevşek aşındırıcı olarak 150-200 nm boyutlu kuvars parçacıkları kullanılmıştır. Üç-cisim aşınma testleri farklı yük/aşınma mesafeleri altında lastik tekerlek aşınma test cihazı (rubber wheel) kullanılarak yapılmıştır. Sonuçta aşınma mesafesi arttıkça aşınma hacminin arttığı tespit edilmiştir. Spesifik aşınma oranı ise aşınma mesafesi/yük ve dolgu yüklemesine bağlı olarak azalmıştır. Buna rağmen silanla işlenmiş grafit dolgunun varlığı karbon lif takviyeli epoksi kompozitlerde ümit verici bir eğilim göstermiştir. Ayrıca kompozitin aşınma hacmi sağlamlık, çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi gibi mekanik özelliklerle ilişkilendirilmiştir. Aşınmış yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskopuyla incelendiği zaman grafit dolgulu karbon/epoksi kompozitleriyle karşılaştırılan karbon/epoksi kompozitlerde kırılan karbon lifleri sayısının daha fazla olduğu belirlenmiştir [54].

Bal karbon nanolif/epoksi kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin incelendiği bir çalışma yapmıştır. %1 ağırlığa kadar karbon nanoliflerin farklı içerikleri ile epoksi nano kompozitler oda sıcaklığında ve soğutulmuş kür şartlarında üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Eğilme modülü ve sertliği için kür şartları boyunca nanoliflerin agregatlarının önlenmesinden dolayı soğutulmuş numunelerde artış görülmüştür [55].

4.2. Grafit/Epoksi Kompozitleri

4.2.1. Mekanik Özellikler

Mosallam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dokuma grafit/epoksi kompozitlerin artık çekme mukavemeti üzerinde darbe yüklemelerinin etkisini incelemişlerdir. Bunun için hem çapraz-kat ($0^\circ/90^\circ$) hem de açı-kat ($\pm 45^\circ$) tabakalar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Test numuneleri çeşitli düzeylerde darbe yüklemesine maruz bırakılmıştır. Sonuçlar darbe hasarının dokuma çapraz-kat tabakaların çekme mukavemeti özelliklerinde önemli bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Örneğin çapraz-kat tabakalı kompozit numuneler en düşük darbe düzeyine maruz bırakıldığında son çekme mukavemetinde %25 düşüş göstermiştir. Açı-kat dokuma tabakalar ancak 6,8 J darbeye maruz tutulduktan sonra son çekme mukavemetinde %18 artış göstermiştir [56].

Deng ve Ye grafit/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde lif-matris yapışmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada lif yüzey işleme ve apresiyle lif-matris yapışmasının geliştirilmesiyle interlaminar (tabakalararası) kayma mukavemeti ve düzlem içi kayma mukavemetinin belirgin olarak arttığı görülmüştür. Ancak grafit/epoksi kompozitlerinin lif hacim fraksiyonu arttığında interlaminar kayma mukavemetinde yalnızca çok az bir artış bulunmuştur [57].

Deng ve Ye başka bir çalışmalarında gene grafit/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde lif-matris yapışmasının etkisini araştırmışlardır. Kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde lif-matris yapışmasının etkilerini tanımlamak için çekme, bükülme ve yorulma testleri iki farklı lif yüzeyine sahip grafit/epoksi kompozitleri kullanılarak yapılmıştır. Uzunlamasına çekme ve bükülme mukavemetlerinde çok az bir artış görülürken uzunlamasına çekme ve bükülme modüllerinde pek fark bulunamamıştır. Enine çekme ve bükülme modüllerinde ise lif-matris yapışma varyasyonlarından bağımsız olduğu halde lif-matris yapışmasının geliştirilmesiyle önemli bir artış görülmüştür [58].

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada grafit/epoksi kompozitlerin düşük sıcaklıklarda çekme özelliklerini incelemişlerdir. Bunun için numuneler çevresel bir test odasında termo-mekanik yüklemelere maruz bırakılmıştır. T700/epoksi tek yönlü tabakalara sırasıyla oda sıcaklığından (RT) -50°C ye, RT' den -100°C ye ve RT' den -150°C ye (CT) termo-mekanik çekme yüklemeleri uygulanmıştır. Sonuç olarak termo-mekanik döngü çok az etkili olduğu zaman sıcaklık düştükçe çekme sertliği önemli ölçüde artmıştır. Çekme mukavemeti ise CT döngüden sonra sıcaklık azaldıkça düşmüştür. Test

sonuçlarının analizi için hem RT hem de CT için termal genleşme katsayıları (CTE) ölçülmüş ve lif-matris arasındaki arayüz SEM görüntüleri kullanılarak gözlemlenmiştir [59].

Kaushik ve arkadaşları epoksi/grafit kompozitlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bunun için epoksi/grafit partikül kompozitleri farklı partikül hacimleriyle hazırlanmış ve mekanik, elektriksel, biçimsel özellikleri belirlenmiştir. Kompozit tabakalar grafit dolgu içeriği toplam matrisin %5-25 i olacak şekilde epoksi reçine (araldite (GY-257)) ile basınçlı kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Grafit/epoksi kompozitlerde dolgu içeriği arttıkça eğilme özellikleri, çekme modülü ve young modülünde iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca artan dolgu içeriği ile farklı frekanslarda elektrik iletkenliğinde artış görülmüştür [60].

4.3. Diğer Karbon Kompozitleri

4.3.1. Mekanik Özellikler

Selzer ve arkadaşı polietereterketon, modifiye edilmemiş ve tokluk-modifiye edilmiş epoksi olmak üzere üç matris kullanılarak kesiksiz karbon lifleriyle takviye edilmiş kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde nemin etkisini araştırmışlardır. Sonuçta nemin epoksi matris kullanılan kompozitlerin özelliklerini düşürdüğü belirlenmiştir. Bu lif ve matris arasındaki bağın zayıflamasına ve matris materyalin yumuşamasına atfedilmiştir [61].

Wonderly ve arkadaşları yaptıkları çalışmada cam elyaf/vinil ester ve karbon elyaf/vinil ester kompozitlerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Cam ve karbon elyaf kompozit tabakalar çift yönlü örme cam ve karbon kumaşlar içine vinil ester reçinenin vakum infüzyonuyla yapılmıştır. Çekme, sıkıştırma, açık delik çekme, açık delik sıkıştırma, enine çekme, çentik ve balistik çarpma deneyleri ile cam ve karbon elyaf numunelerin mukavemeti karşılaştırılmıştır. Elyafın ağırlıklı olduğu yerde çekme yüklemesi ve çentik dayanım yüklemesi altında karbon elyaf plakaların mekanik üstünlüğü kanıtlanmıştır. Eşit kalınlıktaki plakalar için karbon elyaf dayanımı cam elyaf dayanımına benzer oranda bulunmuştur. Cam elyaf plakalar reçine ağırlıklı yerlerde sıkıştırma yüklemesi ve balistik çarpma yüklemesi altında eşit güçlü ya da daha güçlü bulunmuştur. Karbon elyaf numunelerde hasar genel olarak belirli bir bölgede yerleşmiş ve mukavemet cam elyaf numunelerden daha fazla dağılmıştır [62].

Sudarisman ve arkadaşları karbon ve silikon karbid elyafları birlikte içeren tek yönlü epoksi matris kompozitlerin sıkıştırma hasarını incelemişlerdir. Test edilen numunelerin hasar modu sıkıştırma kesiği ve sıkıştırma ezilmesi olmak üzere 2 ana sınıfa ayrılmıştır. C ve SiC lif karışımı içeren kompozitin sıkıştırma mukavemeti, elastik modülü ve kırılma çalışmalarında önemli bir artış görülmemiştir. Bu liflerin yüksek yoğunluğu yüzünden SiC lif içeriğinin artmasıyla belirli özgül basınç dayanımı ve özgül elastik modülü genellikle azalmıştır [63].

Yang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon elyaf örgü kumaş takviyeli bakır kompozitleri incelemişlerdir. Bu kompozitler (C/C-Cu) basınçsız infiltrasyon tekniği ile üretilmiştir. Kompozitlerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı ve enerji dağılım spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. C/C-Cu kompozitin mekanik, elektriksel ve tribolojik özellikleri bir karbon/bakır iletim şeridinkilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar C/C-Cu kompozitin birbirine işleyen ağ yapısıyla oluştuğunu göstermiştir. Kompozit 186 MPa yüksek eğilme mukavemeti, 4,7 J/cm² mükemmel darbe mukavemeti ve 0,58 $\mu\Omega$ m düşük elektriksel direnç göstermiştir. Sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda C/C-Cu kompozitin C/Cu şeritten daha büyük aşınma direnci gösterdiği bulunmuştur [64].

Xu yaptığı çalışmada karbon elyaf/polylatide/kitosan kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. C/PLA/CS biyomateryal kompozitleri çözücü harmanı kullanılarak üretilmiş ve kalıplama sürecinde tutkala daldırılmıştır. Kompozitin mekanik özellikleri bozunmadan önce ve sonra bükülme ve kayma modunda araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; C/PLA/CS kompozit CF' nin hacim fraksiyonu ve CS' nin kütle fraksiyonu arttıkça mükemmel mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Kayma mukavemeti ve modülü 330 MPa ve 16 GPa, eğilme mukavemeti ve modülü 446 MPa ve 23 GPa olarak en üst değerler bulunmuştur. Bozunma süresince kayma mukavemeti ve modülünün sırasıyla %30 ve %31, deney ortamında bozunmadan 20 hafta sonra eğilme mukavemeti ve modülünün sırasıyla %24 ve %39 düştüğü belirlenmiştir [65].

Tercan ve arkadaşları 1X1 rib örgü yapısındaki cam örgü kumaş kompozitin çekme özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitler tabakalar birbirine paralel ve sandviç yapısında olacak şekilde konumlandırılarak iki farklı şekilde üretilmiştir. Kompozitler için 200 tex cam lifi ve epoksi reçine kullanılmıştır. Numunelerin çekme özellikleri 0°, 45° ve 90°

olmak üzere 3 yönde belirlenmiştir. Sonuçta tabakaların oryantasyonunun ve yönünün kompozitin çekme özelliklerini etkilediği görülmüştür [66].

Asi ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada sıklığın 1X1 rib atkılı örgü yapısındaki cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bunun için farklı sıklık düzeyinde 3 farklı kompozit malzeme üretilmiş ve bunların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuçta sıklık arttıkça çekme mukavemeti, kayma mukavemeti ve basma dayanımında artış olduğu görülmüştür [67].

BÖLÜM 5

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

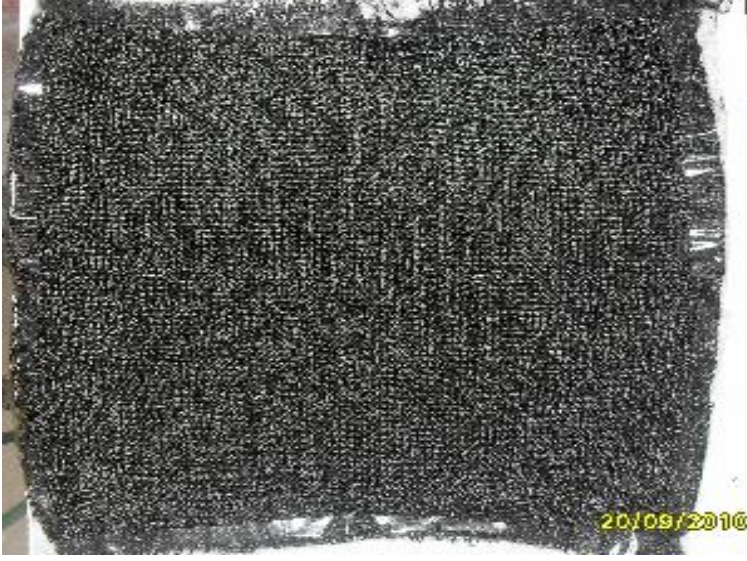
Kompozit malzemeler Bölüm 2’ de de belirtildiği gibi günümüz şartlarında vazgeçilmesi imkansız ürünler haline gelmişlerdir. Kompozit malzemeleri vazgeçilmez kılan özelliklerinin başında ise mukavemet gelmektedir. Bu nedenle mukavemet kompozit malzemelerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi gereken özelliklerinin en önemlilerinden biri olmaktadır. Kompozitin lif yapısı, matris yapısı, kumaş sıklığı, tabaka kalınlığı gibi unsurları mukavemeti etkilemektedir. Bu çalışmada ise örgü yapısındaki kumaşın sıklığı ve sıra-çubuk yönü etmenlerinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

5.1. Materyal

Çalışmada Akso Akrilik Kimya A.Ş.’den temin edilen PAN esaslı 200 tex karbon lifi kullanılmıştır. Uşak Üniversitesi örme laboratuvarında bulunan E5 incelik değerinde, V yataklı düz örme makinesinde bu karbon lifleri kullanılarak 1X1 rib örgü yapısında, iki farklı sıklıkta karbon kumaşlar elde edilmiştir.



Resim 5.1. Karbon kumaşların örülerek elde edilmesi



Resim 5.2. 1X1 Rib örgü yapısındaki karbon kumaş

Örme kumaşlar Uşak Üniversitesi'nde sıcak pres makinesinde kompozit haline getirilmiştir. Kompozit numunelerin hazırlanmasında elle yatırma metodu kullanılmıştır. Kompozitlerin üretiminde öncelikle kalıplar temizlenmiştir. Temizlenen kalıp üzerine kompozitin kalıptan kolay çıkarılabilmesi için folyo serilmiştir. Folyo üzerine karbon kumaş serilmiş üzerine CY 225 epoksi reçine ve HY 225 sertleştirici karışımı bir rulo fırça yardımı ile sürülmüştür. Bu şekilde üç kat kumaş serilmiştir. Epoksi reçine ve sertleştirici miktarı her kompozit için 300 gr dır. Daha sonra kumaşların üzeri önce folyoyla sonra da kalıpla kapatılmış sıcak pres makinesine yerleştirilmiştir. 100 °C sıcaklık ve 80 bar basınç altında 4 saat bekletilmiştir. Soğuyana kadar preste bekletildikten sonra çıkarılarak kompozit numune kalıptan ayrılmıştır. Kenarlarındaki çıkıntılar kesilerek ayrılmıştır.



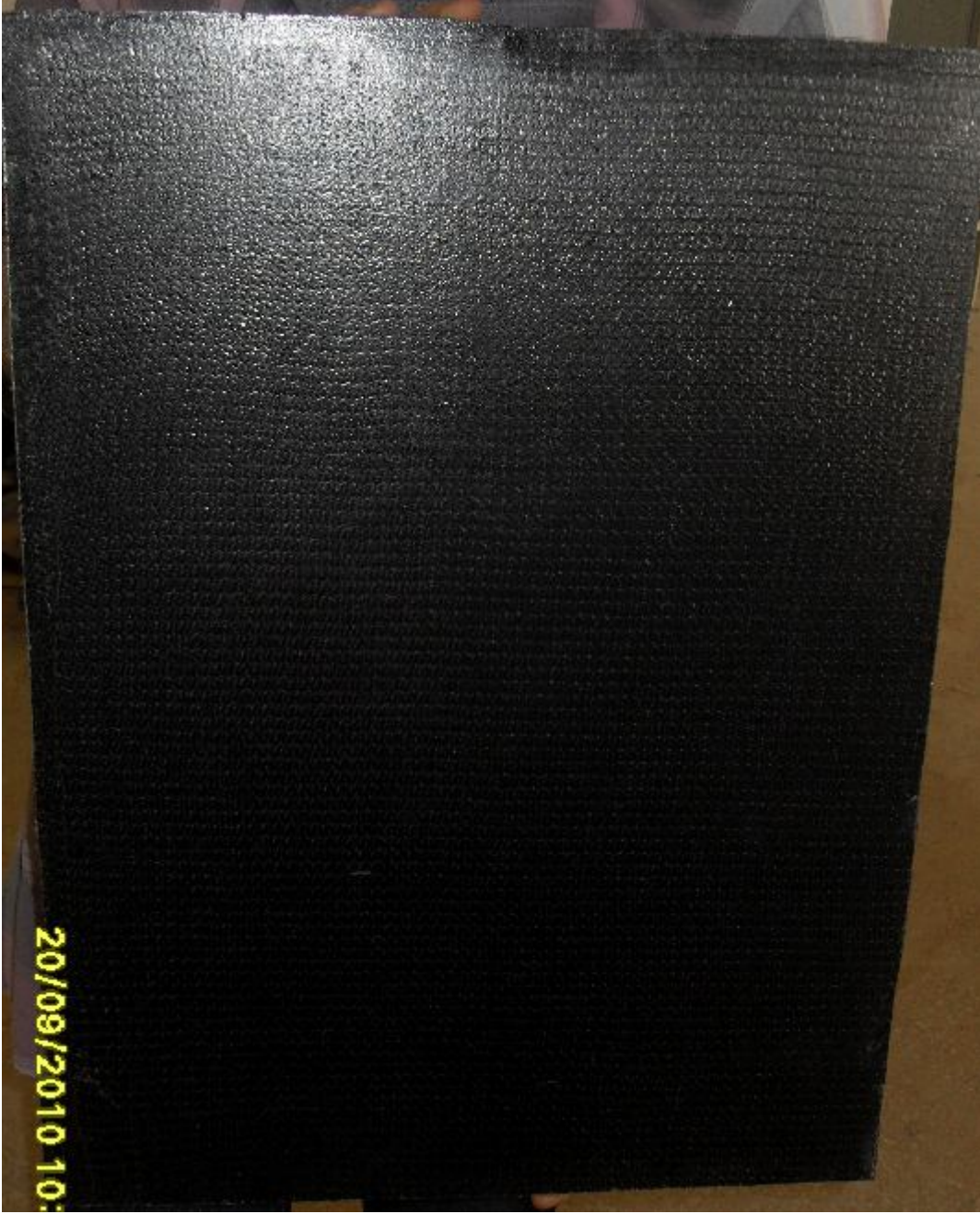
Resim 5.3. Kompozit malzeme üretim masası



Resim 5.4. Kompozit malzeme üretimi (Reçinenin sürülmesi)



Resim 5.5. Kompozit malzemenin prese konulmadan önceki hali

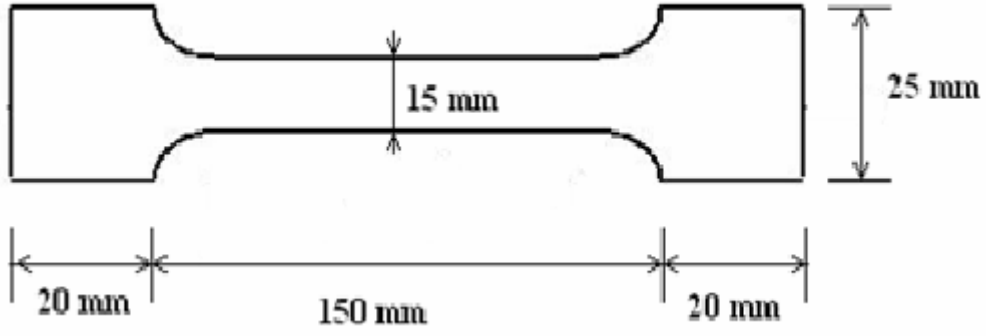


Resim 5.6. Elle yatırma yöntemine göre elde edilmiş kompozit plaka

Elde edilen plakalar su jeti ile belirlenen boyutlara uygun olarak kesilmiştir.



Resim 5.7. Kompozit plakaların çekme testi için belirlenen boyutlarda kesilmiş hali



Şekil 5.1. Çekme testi için kullanılan numune boyutları

5.2. Testler

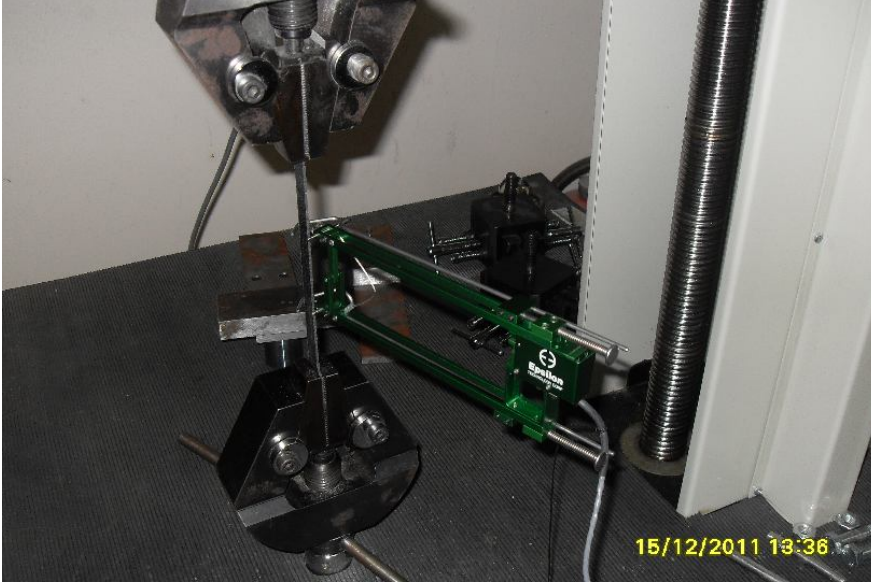
Tüm mekanik testler Uşak Üniversitesi mukavemet test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Her numune için en az 6 test yapılmıştır.



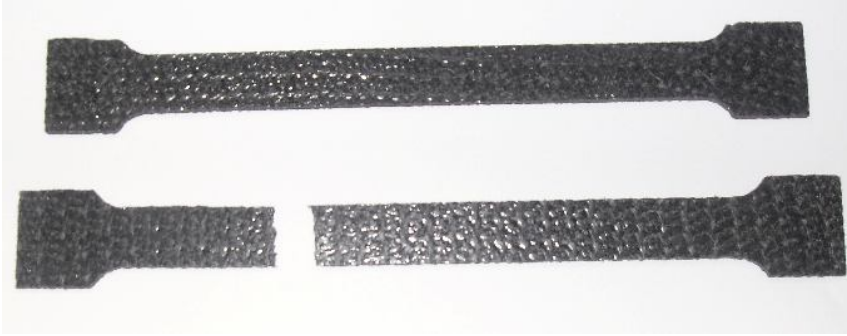
Resim 5.8. Mukavemet test cihazı

5.2.1. Çekme Testleri

Çekme testleri ASTM D3039-76 standartlarına göre yapılmıştır [68]. Numunelerin gevrek olmalarından dolayı testin hassas olabilmesi için numuneler 1 mm/dk hızla çekilmiştir. Çekme testleri yapılırken elastisite modülünü hesaplayabilmek için ekstansiyometre kullanılmıştır.



Resim 5.9. Numuneye ekstansiyometrenin takılması



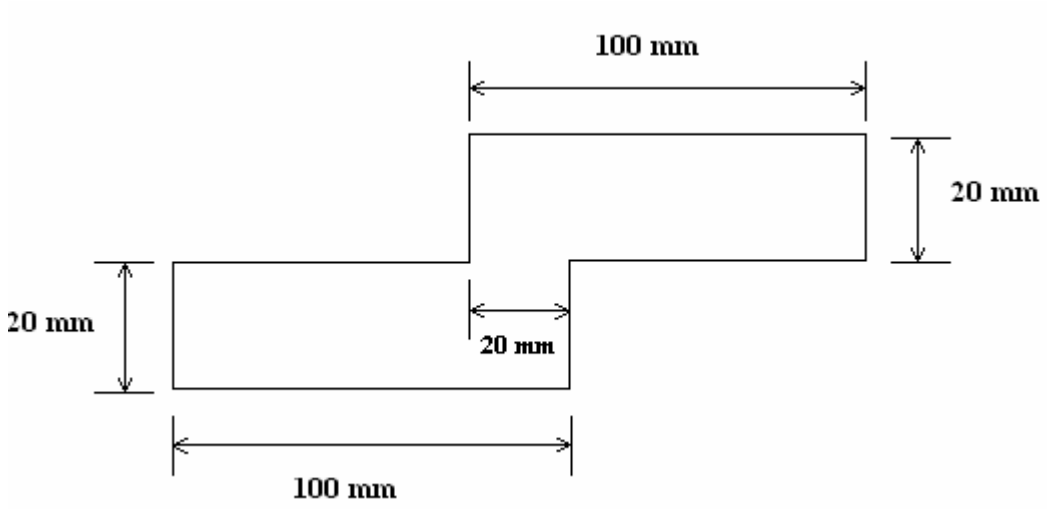
Resim 5.10. Numunenin çekme testinden önce ve sonraki durumu

5.2.2. Kayma Testleri

Kayma testleri ASTM D3846-79 standartlarına göre yapılmıştır [69]. Numuneler 2 mm/dk hızla çekilmiştir.



Resim 5.11. Kompozit plakaların kayma testi için belirlenen boyutlarda kesilmiş hali



Şekil 5.2. Kayma testi için kullanılan numune boyutları



Resim 5.12. Numunenin kayma testinden sonraki durumu

BÖLÜM 6

6. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

Numuneler sıklık ve yön etmenlerinin mukavemete etkisini araştırmak amacıyla teste tabi tutulduktan sonra elde edilen değerler toplanmış, kopma ve kayma mukavemeti, kopma ve kayma uzaması ve elastisite modülü için veriler hazırlanarak değerlendirilmiş ve verilerin istatistiksel karşılaştırmaları yapılmıştır.

6.1. Kopma Testi

Kopma testi uygulanan numunelerin ortalama kopma mukavemetleri, kopma uzama değerleri ve elastisite modülleri sırasıyla Şekil 6.1., Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.' de verilmiştir.

	DÜŞÜK SIKLIK		YÜKSEK SIKLIK	
SIRA YÖNÜ	92,24 N/mm ²	2098,26 N	90,72 N/mm ²	1388,45 N
ÇUBUK YÖNÜ	104,36 N/mm ²	2519,87 N	57,79 N/mm ²	1756,18 N

Şekil 6.1. Numunelerin kopma mukavemeti değerleri

Ortalama değerlere bakıldığında en yüksek kopma mukavemeti değerinin 2519,87 N olarak düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde olduğu görülmektedir. En düşük kopma mukavemeti değerinin ise 1388,45 N olarak yüksek sıklıktaki kompozitin sıra yönünde olduğu görülmektedir. Şekilden çubuk yönündeki mukavemet değerlerinin her iki sıklık için de sıra yönündeki mukavemet değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi lif yönü, liflerin kompozitin maruz kaldığı yükleri taşımaya katkısı açısından önemli bir faktördür. Bu durumda sadece ortalamalara bakılarak çubuk yönündeki yüksek mukavemetin ilmek yapısından ve lif yönlenmesinden kaynaklandığı düşünülebilir.

	DÜŞÜK SIKLIK	YÜKSEK SIKLIK
SIRA YÖNÜ	2,15 mm	1,67 mm
ÇUBUK YÖNÜ	2,27 mm	1,78 mm

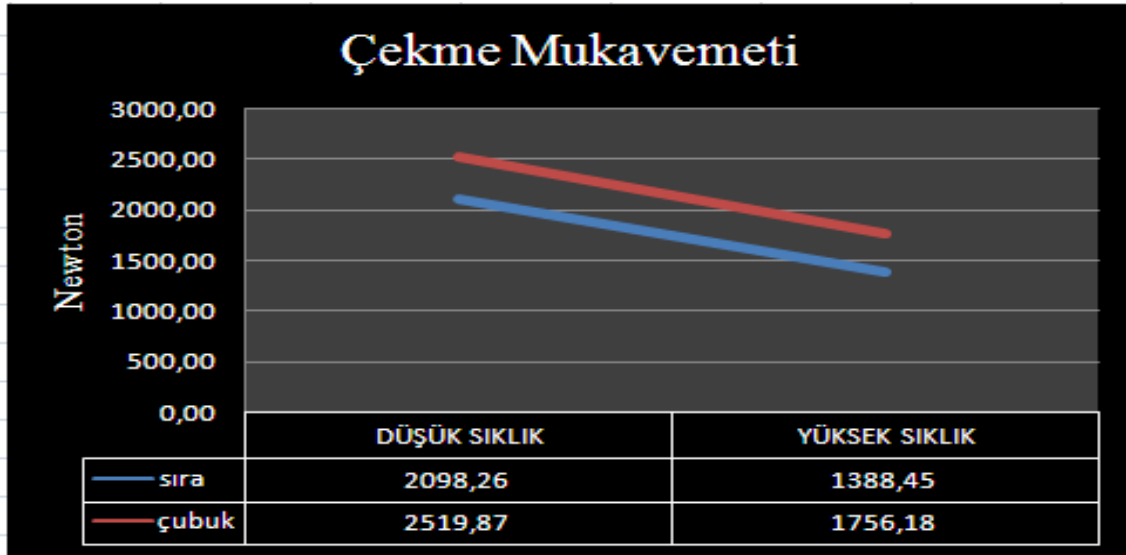
Şekil 6.2. Numunelerin kopma uzama değerleri

En yüksek kopma uzama değeri 2,27 mm olarak düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde gözlenmiştir. En düşük uzama değeri 1,67 mm olarak yüksek sıklıktaki kompozitin sıra yönünde gözlenmiştir. Kopma uzama değerlerinin kopma mukavemeti değerlerine paralel değiştiği belirtilebilir. Şekil 6.1.' e benzer şekilde uzamaların çubuk yönünde sıra yönünden daha fazla olduğu görülmektedir. Yani kopma mukavemeti yüksek olan numunelerin daha geç kopmalarından dolayı daha yüksek uzama gösterdikleri söylenebilir.

	DÜŞÜK SIKLIK	YÜKSEK SIKLIK
SIRA YÖNÜ	312037,70 N/mm ²	359770,97 N/mm ²
ÇUBUK YÖNÜ	378841,59 N/mm ²	348265,99 N/mm ²

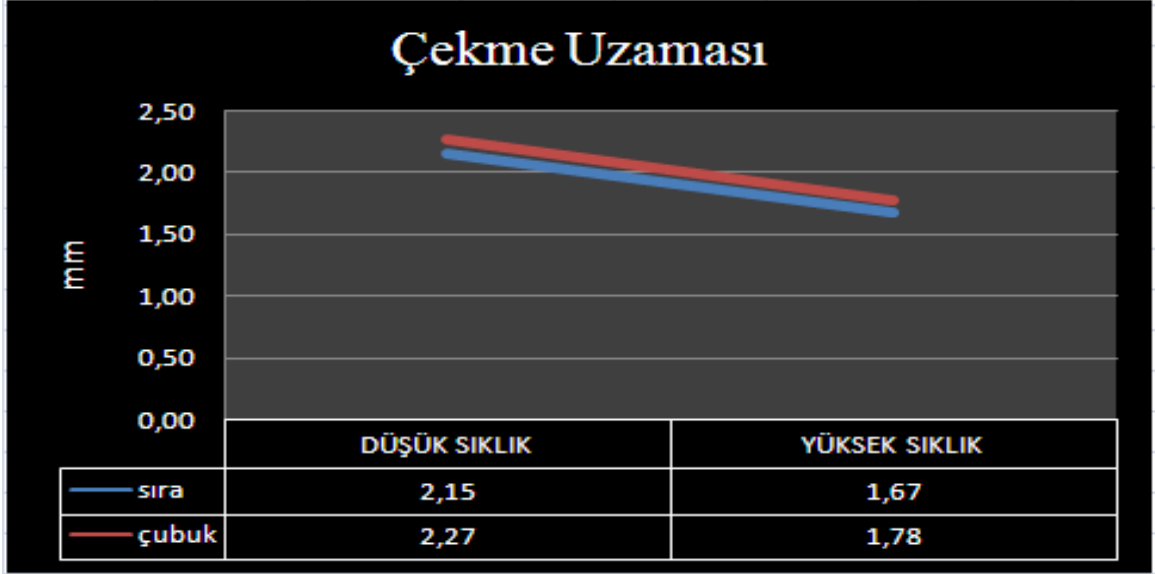
Şekil 6.3. Numunelerin elastisite modülü değerleri

En yüksek elastisite modülü değeri, 378841,59 N/mm² değeri ile düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünden elde edilmiştir. En düşük elastisite modülü değeri ise 312037,70 N/mm² değeri ile düşük sıklıktaki kompozitin sıra yönünden elde edilmiştir. Farklı sıklık ve yön faktörleri için çekme mukavemeti grafiği Şekil 6.4.' de verilmiştir. Grafikte sıra ve çubuk yönlerinin birbirine paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir.



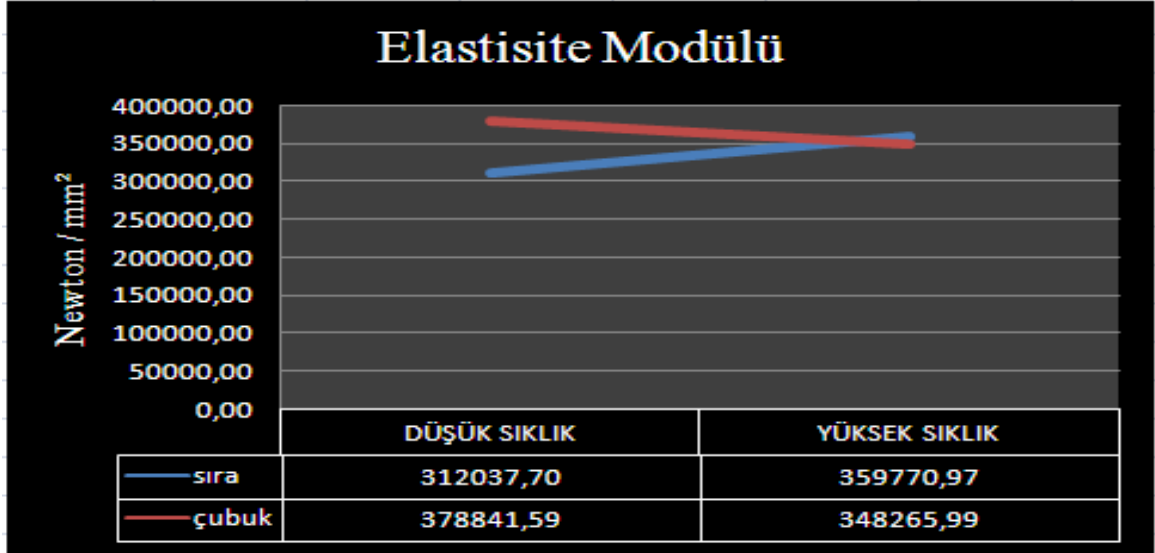
Şekil 6.4. Kopma mukavemeti

Farklı sıklık ve yön faktörleri için çekme uzaması grafiği Şekil 6.5.' te verilmiştir. Burada da Şekil 6.4.' de olduğu gibi bir paralellik gözlemlenmektedir.



Şekil 6.5. Çekme uzaması

Farklı sıklık ve yön faktörleri için elastisite modülü grafiği Şekil 6.6 da verilmiştir. Burada yüksek sıklıktaki numunelerin sıra ve çubuk yönü için hesaplanan elastisite modülü değerleri arasındaki farkın düşük sıklıktaki numunelerin sıra ve çubuk yönü için hesaplanan elastisite modülü değerleri arasındaki farktan daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6. Elastisite modülü

6.2. Kayma Testi

Kayma testine tabi tutulan numunelerin ortalama kayma mukavemeti ve kayma uzaması değerleri Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.' de gösterilmiştir.

	DÜŞÜK SIKLIK		YÜKSEK SIKLIK	
SIRA YÖNÜ	18,01 N/mm ²	1091,47 N	11,65 N/mm ²	874,99 N
ÇUBUK YÖNÜ	18,55 N/mm ²	1094,25 N	13,04 N/mm ²	1012,05 N

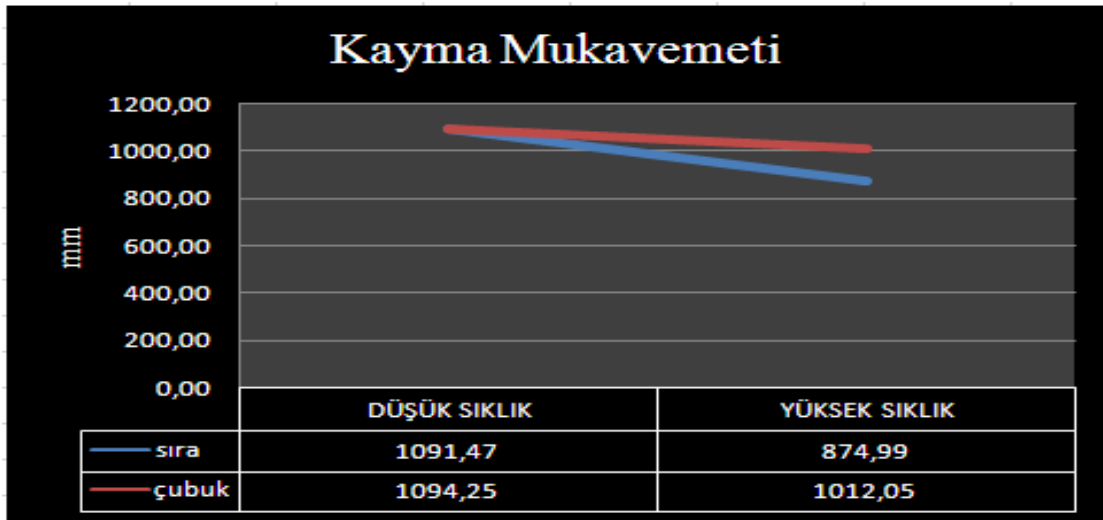
Şekil 6.7. Numunelerin kayma mukavemeti değerleri

Yapılan kayma testi sonucunda elde edilen ortalama verilere bakıldığında en yüksek kayma mukavemeti değerinin 1094,25 N olarak düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde, en düşük kayma mukavemeti değerinin ise 874,99 N olarak yüksek sıklıktaki kompozitin sıra yönünde olduğu görülmektedir.

	DÜŞÜK SIKLIK	YÜKSEK SIKLIK
SIRA YÖNÜ	2,28 mm	2,11 mm
ÇUBUK YÖNÜ	2,69 mm	1,65 mm

Şekil 6.8. Numunelerin kayma uzaması değerleri

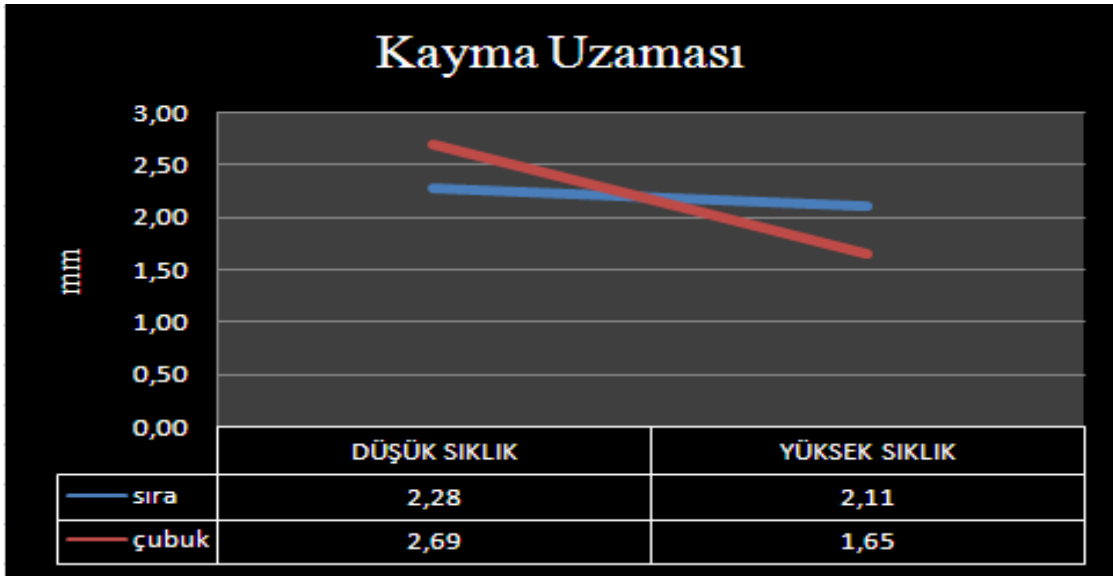
En yüksek kayma uzama değeri 2,69 mm olarak düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde gözlemlenmiştir. En düşük uzama değeri 1,65 mm olarak yüksek sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde gözlemlenmiştir. Kayma uzama değerleri de çekme uzamalarına benzer şekilde kayma mukavemet değerlerine paralel değişim göstermektedir. Farklı sıklık ve yön faktörleri için kayma mukavemeti grafiği Şekil 6.9.' da verilmiştir.



Şekil 6.9. Kayma mukavemeti

Grafikte düşük sıklıktaki numunelerin sıra ve çubuk yönlerindeki kayma mukavemeti değerlerinin birbirine çok yakın olduğu buna karşılık yüksek sıklıktaki numunelerin sıra ve çubuk yönlerindeki kayma mukavemeti değerlerinde böyle bir yakınlık olmadığı görülmektedir.

Farklı sıklık ve yön faktörleri için kayma uzaması grafiği Şekil 6.10.' da verilmiştir. Grafikte farklı sıklıklar için sıra yönü kayma uzamasındaki eğimin çok az iken, çubuk yönü kayma uzamasındaki eğimin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6.10. Kayma uzaması

6.3. İstatistiksel Hesaplamalar

Yapılan mekanik testler sonucunda elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Sıklık ve sıra-çubuk yönünün numunelerin kopma mukavemeti, kopma uzaması, young modülü, kayma mukavemeti ve kayma uzaması değerleri üzerinde etkisi olup olmadığı yapılan ANOVA testiyle araştırılmıştır.

Kopma mukavemeti için yapılan ANOVA tablosu Şekil 6.11.' de gösterilmiştir.

ANOVA (Kopma Mukavemeti)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	F _{kritik}
Sıklık	5195119,36	1	5195119,36	22,98	4,125
Yön	1490781,139	1	1490781,139	6,594	4,125
Sıklık X Yön	6946,074	1	6946,074	0,031	4,125
Hata	7912360,067	35	226067,43		
Toplam	1,682E8	39			

Şekil 6.11. Kopma mukavemeti için ANOVA tablosu

Şekil 6.11.' de F değerlerine bakıldığında sıklık için F değerinin 22,98 olduğu, bu değerinde F_{kritik} değeri olan 4,125 ten büyük olduğu dolayısıyla %5 seviyesinde anlamlı olduğu bulunmuştur. Yön faktörü için de aynı şekilde 6,594 olarak bulunan F değerinin F_{kritik} değeri 4,125 ten büyük olduğu dolayısıyla %5 seviyesinde anlamlı olduğu bulunmuştur. SıklıkXyön etkileşim faktörü için F değeri 0,031 olup F_{kritik} değeri 4,125 ten küçük olduğu için anlamsız bulunmuştur. Yani kompozitin kopma mukavemeti sıklık ve yön faktörlerinden etkilenmektedir ancak sıklıkXyön etkileşim faktöründen etkilenmemektedir. Kopma uzama değeri için yapılan ANOVA tablosu Şekil 6.12.' de gösterilmiştir.

ANOVA (Kopma Uzama)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	F _{kritik}
Sıklık	2,272	1	2,272	5,896	4,125
Yön	0,120	1	0,120	0,311	4,125
Sıklık X Yön	0,000	1	0,000	0,000	4,125
Hata	13,487	35	0,385		
Toplam	171,229	39			

Şekil 6.12 Kopma uzama değeri için ANOVA tablosu

Şekil 6.12.' de F değerlerine bakıldığında sıklık için 5,896, yön için 0,311 ve sıklıkXyön etkileşimi için de 0,000 olduğu görülmektedir. F_{kritik} değeri olan 4,125 ten büyük olanlar anlamlı olacağı için yön ve sıklıkXyön etkileşim faktörlerinin tek başına ele alındığında anlamsız olduğu yani çekme uzamasını etkilemeyeceği görülmektedir. Bunun yanında sıklık faktörünün F değeri F_{kritik} değerinden büyük olduğu için sıklık faktörü anlamlıdır. Young modülü için yapılan ANOVA tablosu Şekil 6.13.' de gösterilmiştir.

ANOVA (Young Modülü)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	F _{Kritik}
Sıklık	4586455388,00	1	4586455388,00	1,45	4,35
Yön	441424226,00	1	441424226,00	0,14	4,35
Sıklık X Yön	14227160496,00	1	14227160496,00	4,50	4,35
Hata	63203580002,20	20	3160179000,00		
Toplam	82458620111,95	23			

Şekil 6.13. Young modülü için ANOVA tablosu

Young modülü için elde edilen F değerleri, ilgili gelen F_{kritik} değeriyle (4,35) karşılaştırıldığında yön ve sıklık değerlerinin anlamsız sadece sıklıkXyön etkileşiminin anlamlı olduğu görülmektedir. Bu durumda kompozitin Young modülünü sıklıkXyön etkileşimi etkilemektedir denilebilir.

Kayma mukavemeti için yapılan ANOVA tablosu Şekil 6.14.' de gösterilmiştir.

ANOVA (Kayma Mukavemeti)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	F _{Kritik}
Sıklık	213465,748	1	213465,748	7,109	4,125
Yön	46785,996	1	46785,996	1,558	4,125
Sıklık X Yön	43147,440	1	43147,440	1,437	4,125
Hata	1051028,038	35	30029,373		
Toplam	42410952,908	39			

Şekil 6.14. Kayma mukavemeti için ANOVA tablosu

Kayma mukavemeti için yapılan ANOVA tablosuna Şekil 6.14' ten bakıldığında F değerlerinin sıklık, yön ve sıklıkXyön faktörleri için sırası ile 7,109, 1,558 ve 1,437 olduğu dolayısıyla da yön ve sıklıkXyön etkileşim faktörlerinin F_{kritik} değeri olan 4,125 ten küçük olduğu görülmektedir. Bu durumda kompozitin kayma mukavemeti için sıklık faktörünün anlamlı, yön ve sıklıkXyön etkileşim faktörlerinin anlamsız olduğu söylenebilir.

Kayma uzaması için yapılan ANOVA tablosu Şekil 6.15.' te gösterilmiştir.

ANOVA (Kayma Uzama)

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	F _{Kritik}
Sıklık	3,546	1	3,546	5,137	4,125
Yön	0,007	1	0,007	0,010	4,125
Sıklık X Yön	1,788	1	1,788	2,590	4,125
Hata	24,157	35	0,690		
Toplam	222,941	39			

Şekil 6.15. Kayma uzaması için ANOVA tablosu

Çizelge 6.15.' teki Anova tablosunda F değerleri değerlendirildiğinde sıklık için 5,137 değerinin F_{kritik} değeri olan 4,125 ten büyük dolayısıyla anlamlı, yön ve sıklıkXyön etkileşimi için sırasıyla 0,010 ve 2,590 değerlerinin F_{kritik} değeri olan 4,125 ten küçük dolayısıyla anlamsız olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıklık tek başına kayma uzamasını etkilemektedir ancak yön faktörüyle etkileşim durumunda anlamsız olmaktadır. Yön faktörü ise tek başına kayma uzamasını etkilememektedir.

BÖLÜM 7

7. SONUÇLAR / ÖNERİLER

Kompozit malzemeler temel olarak birbirini içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin biraraya gelmesiyle oluşturulan yeni malzemedir. Kullanımlarının çok eski zamanlara dayandığı bilinen kompozit malzemeler insanların değişen ihtiyaçları ve gelişen teknolojik şartlar karşısında günlük yaşamın vazgeçilmez parçaları haline gelmişlerdir. Yüksek mukavemet, aşınma dayanımı, korozyon direnci, hafiflik, kolay uygulanabilme gibi olanaklar sağlaması nedeniyle otomotivden endüstriye, denizcilikten yapı ve inşaat alanına, uzay ve havacılık alanına kadar pek çok alanda uygulama sahası bulmuşlardır. Karbon lifleri de başta yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranları ile son dönemlerde kompozit malzeme üretiminde aranan malzeme haline gelmişlerdir. Yüksek maliyetlerine rağmen takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozite üstün özellikler katması nedeniyle tercih sebebi olmaktadır.

Bu çalışmada da karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler hakkında mevcut kaynaklar gözden geçirilmiş ve kompozit malzemelerle ilgili bilgilere yer verilmiştir. Deneysel çalışmalar için 200 tex karbon lifleri kullanılarak iki farklı sıklıkta 1X1 rib örgü yapısında kumaşlar üretilmiştir. Üretilen kumaşlar elle yatırma yöntemine göre kompozit plaka haline getirilmiştir. Daha sonra mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme ve kayma mukavemet testleri yapılan numunelerden elde edilen veriler değerlendirilmiş ve istatistiksel olarak yorumlanmıştır.

Sonuç olarak kopma mukavemeti için en yüksek değer düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde, en düşük değer ise yüksek sıklıktaki kompozitin sıra yönünde olduğu görülmüştür. İstatistiksel değerlendirmelerde de sıklık ve yönün kompozitin kopma mukavemetini etkilediği bulunmuştur. İlmek yapısıyla yönlendirilmiş lifler doğrultusunda mukavemet yanal doğrultudan daha yüksek olmaktadır. Burada lif takviyeli kompozitlerin değişik yönlerden farklı özellikler gösterdiği ve lif yönünün, kompozitin dayanımı ve liflerin taşımaya katkısı açısından önemi kanıtlanmış olmaktadır. İleride bu konuda çalışacak araştırmacılara lif/ilmek yönlendirilmesine ısıl iletkenlik gibi başka özelliklerin etkilerinin araştırılması tavsiye edilir.

Kopma uzaması için düşük sıklıktaki numunelerin çubuk yönünde en yüksek, yüksek sıklıktaki numunelerin sıra yönünde en düşük değer elde edilmiştir. Kopma uzaması için sıklık faktörünün etkili olduğu yapılan istatistiksel test ile bulunmuştur. Sonuçta kopma uzamasının kopma mukavemetine paralel değiştiği yani daha geç sürede kopan numunelerin doğal olarak daha fazla uzadığı söylenebilir.

Young modülü için en yüksek değer düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde, en düşük değer ise düşük sıklıktaki kompozitin sıra yönünde olduğu görülmüştür. Yapılan istatistiksel test ile de sıklık ya da yönün tek başına young modülünü etkilemediği ancak etkileşim durumunda etkilediği görülmüştür.

Kayma mukavemeti için en yüksek değer düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde, en düşük değer ise yüksek sıklıktaki kompozitin sıra yönünde olduğu görülmüştür. Sıklığın kayma mukavemetini etkilediği yapılan istatistiksel analizle kanıtlanmıştır. Bu sonuçtan yola çıkılarak düşük sıklıktaki yapılarda ilmeklerin birbirine daha yakın olmasından dolayı yükleri aktarmalarının daha kolay olacağı düşünülmüştür.

Kayma uzaması için düşük sıklıktaki numunelerin çubuk yönünde en yüksek, yüksek sıklıktaki numunelerin çubuk yönünde en düşük değer elde edilmiştir. İstatistiksel analizle de yönün kayma uzamasını etkilemediği görülmüştür. Yalnızca sıklık faktörü kayma uzamasını etkilemektedir. Buradan kayma mukavemetine benzer şekilde düşük sıklıktaki numunelerde ilmeklerin birbirine daha yakın olmasından dolayı elyafların birbirine tutunmasının kaymayı zorlaştırmış olabileceği kanısına varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: <http://www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index.html> (27.09.10)
2. Şahin, Y., 2006, “Kompozit Malzemelere Giriş”, Ankara, 61-107
3. Demirel, A., 2007, “Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara
4. Arıcasoy, O., 2006, “Kompozit Sektör Raporu”, *İstanbul Ticaret Odası*, Aralık
5. Ersoy, H., Y., 2001, “Kompozit Malzeme”, İstanbul, 95-170
6. Tanoğlu, M., Toğulga, M., “Kompozit Malzemeler Ve Jeotermal Uygulamaları”, Jeotermal Enerji Semineri, http://geocen.iyte.edu.tr/teskon/2003/teskon2003_18.pdf
7. Goodman, S., H., 1998, “Handbook of Thermoset Plastics” içinde; Goodman, S., H., “Epoxy Resins”, USA, 193-194
8. Chung, D., D., L., 1994, “Carbon Fibers Composites”, USA, 13-53, 85-88
9. Kılıç, E., 2006, “Kompozit Malzemelerden Yapılan Yaprak Yayların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
10. İnternet: http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/1_Giri%C5%9F.pdf
11. İnternet: http://eng.harran.edu.tr/~emin/kompozit_malzemeler.htm
12. Yıldızhan, H., 2008, “Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta
13. Karadeniz, E., 1989, “Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Mukavemeti”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
14. Ünal, O., “Kompozit Malzemeler”, Yapı Malzemesi Ders Notları
15. Tolga, A., Ç., “Malzeme Bilimi”, [http://bs.gsu.edu.tr/akademik/ctolga/Bilesik%20\(kompozit\)%20malzemeler.pdf](http://bs.gsu.edu.tr/akademik/ctolga/Bilesik%20(kompozit)%20malzemeler.pdf)
16. İnternet: http://www.kimyamuhendisi.com/dokumanlar/doc_download/220-kompozit-malzemeler.html
17. Bilim, Teknoloji ve İcatlar Ansiklopedisi, Gelişim Yayınları
18. Sundaram, S. “Industrial Grade Carbon Fibers- Performance Reinforcement of The Future”, *International Fiber Journal*, 2010, February, 10-18.
19. Seventekin, N., Öktem, T., Yaman, N., 2006, “Karbon Liflerinin Üretimi”, *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 3, 164-173

20. Fourné, F., 1998, "Synthetic Fibers", Hanser Publishers, Munich, 571-579.
21. Worasuvannarak N., Hatori S., Nakagawa H. ve Miura K., Effect of Oxidation Pre-treatment at 220-270 0C on The Carbonization And Activation Behavior of Phenolic Resin Fiber, *Carbon*, 2003, 41, 933-944.
22. Seventekin, N., Öktem, T., Yaman, N., 2007, "Karbon Liflerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları", *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 2, 90-95.
23. Balcı, H., 2006, "Akıllı (Fonksiyonel) Tekstiller, Seçilmiş Kumaşlarda Antibakteriyel Apre Ve Performans Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana
24. Hearle, J., W., S., 2001, "High Performance Fibres" içinde; Lavin, J., G., "Carbon Fibres", Cambridge, Woodhead Publishing: 156-190
25. Seventekin, N., 2001, "Kimyasal Lifler", İzmir, 112-126
26. Armağan, O., A., "Karbon Lifi", *Nonwoven Technical Textiles Tecnology*, 64-70
27. Wilson, A., "Carbon Fiber- From Aero to Auto?", *International Fiber Journal*, 209, October, 18-22
28. Er, U., "Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler" [http://www.hho.edu.tr/huten/2003-2004%20SEMINER%20INTERNET/UGUR%20ER/UGUR%20ER\[WORD\].pdf](http://www.hho.edu.tr/huten/2003-2004%20SEMINER%20INTERNET/UGUR%20ER/UGUR%20ER[WORD].pdf)
29. İnternet: http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_enerjisi
30. Can, Ö., 2008, "Endüstride Kullanılan Teknik Tekstiller Üzerine Bir Araştırma", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 31-43
31. Yılmaz, A., D., Seyhan E., C., 2005, "Onarım Ve Güçlendirme Uygulama Örnekleri", Kocaeli Deprem Sempozyumu
32. Sivri, Ç., 2008, "Uçurtma Yelken Teknolojisi ile Denizcilik ve Uzay Uygulamalarında Fonksiyonel Yaklaşımlar", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 31-43
33. Alnıak, M., O., Oğur, A., Karakaya, Ç., Ertürk, M., Güneş, İ., "Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tankı İmalatının İncelenmesi", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul 17-19 Aralık 2008
34. İnternet: <http://www.ilerisavunma.com/tr/yangin/baslik>
35. İnternet: <http://www.suessen.com>
36. Elarabı, S. M., Weidong Y., 2005, "The Effect of Transversely Aligned Fibers on the Axial Tensile Strength of Carbon Epoxy Composites", *Journal of Industrial Textiles*, 35: 39-45
37. Taniguchi, N., Nishiwaki, T., Hirayama, N., Nishida, H., Kawada, H., 2009, "Dynamic Tensile Properties of Carbon Fiber Composite Based on Thermoplastic

- Epoxy Resin Loaded in Matrix-Dominant Directions”, *Composites Science and Technology*, 69: 207–213
38. Baral, N., Guezenoc, H., Davies, P., Baley, C., 2008, “High Modulus Carbon Fibre Composites: Correlation Between Transverse Tensile and Mode I Interlaminar Fracture Properties”, *Materials Letters*, 62: 1096–1099
 39. Agrawal, S., Prasad, R. C., 2005, “Influence of Environment on the Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite”, *Corrosion*
 40. Gliesche, K., Hußner, T., Orawetz, H., 2005, “Investigations Of In-Plane Shear Properties Of $\pm 45^\circ$ -Carbon/Epoxy Composites Using Tensile Testing And Optical Deformation Analysis”, *Composites Science and Technology*, 65: 163–171
 41. Zhang, M., Mason, S. E., 1999, “The Effects of Contamination on the Mechanical Properties of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Composite Materials”, *Journal of Composite Materials*, 33: 1363-1374
 42. Ogasawara, T., Ishida, Y., Kasai, T., 2009, “Mechanical Properties of Carbon Fiber/Fullerene-Dispersed Epoxy Composites”, *Composites Science and Technology*, 69: 2002–2007
 43. Sadeghian, P., Rahai, A. R., Ehsani M. R., 2009, “Effect of Fiber Orientation on Nonlinear Behavior of CFRP Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28: 2261-2272
 44. Cérny, M., Glogar, P., Manocha, L. M., 2000, “Resonant Frequency Study of Tensile and Shear Elasticity Moduli of Carbon Fibre Reinforced Composites (CFRC)”, *Carbon*, 38: 2139–2149
 45. Bilisik, K., 2010, “Multiaxis 3D Woven Preform and Properties of Multiaxis 3D Woven and 3D Orthogonal Woven Carbon/Epoxy Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29: 1173-1186
 46. Reis, P. N. M., Ferreira, J. A. M., Antunes, F. V., Richardson, M. O. W., 2009, “Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates”, *Journal of Composite Materials*, 43: 2609-2621
 47. Wang, R., Song, D., Liu, W., He, X., 2010, “Effect of Arc Spraying Power on The Microstructure and Mechanical Properties of Zn–Al Coating Deposited onto Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites”, *Applied Surface Science*, 257: 203-209
 48. Toygar, M. E., Toparlı M., Uyulgan B., 2006, “An Investigation of Fracture Toughness of Carbon/Epoxy Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 1887-1895
 49. Suresha, B., Chandramohan, G., 2007, “Effect of Normal Load and Sliding Velocity on Friction and Wear Behavior of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26: 1695-1703

50. Papargyris, D.A.; Day, R.J.; Nesbitt, A.; Bakavos, D., 2008, "Comparison of the Mechanical and Physical Properties of a Carbon Fibre Epoxy Composite Manufactured by Resin Transfer Moulding Using Conventional and Microwave Heating", *Composites Science and Technology*, 68: 1854–1861
51. Davis, D. C., Wilkerson, J. W., Zhu, J., Ayewah, D. O. O., 2010, "Improvements in Mechanical Properties of a Carbon Fiber Epoxy Composite Using Nanotube Science and Technology", *Composite Structures*, 92: 2653-2662
52. Djordjevic, I., Sekulic, D. P., Stevanovic, M., 2007, "Carbon Fiber Composites, Main Engineering Elastic Constants and Macromechanical Characterization", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26: 1193-1199
53. Tsotra, P., Friedrich, K., 2003, "Electrical and Mechanical Properties of Functionally Graded Epoxy-Resin/Carbon Fibre Composites", *Composites*, 34: 75–82
54. Suresha, B., Ramesh, B.N., Subbaya, K. M., Chandramohan, G., 2010, "Mechanical and Three-body Abrasive Wear Behavior of Carbon-Epoxy Composite With and Without Graphite Filler", *Journal of Composite Materials*, 44: 2509-2519
55. Bal, S., 2010, "Experimental Study of Mechanical And Electrical Properties of Carbon Nanofiber/Epoxy Composites", *Materials and Design*, 31: 2406-2413
56. Mosallam, A., Slenk, J., Kreiner, J., 2008, "Assessment of Residual Tensile Strength of Carbon/Epoxy Composites Subjected to Low-Energy Impact", *Journal of Aerospace Engineering*, 21: 249-258
57. Deng, S., Ye, L., 1999, "Influence of Fiber-Matrix Adhesion on Mechanical Properties of Graphite/Epoxy Composites: II. Interlaminar Fracture and Inplane Shear Behavior", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18: 1041-1057
58. Deng, S., Ye, L., 1999, "Influence of Fiber-Matrix Adhesion on Mechanical Properties of Graphite/Epoxy Composites: I. Tensile, Flexure, and Fatigue Properties", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18: 1021-1040
59. Kim, M.G., Kang, S.G., Kim, C.G., Kong, C.W., 2007, "Tensile Response of Graphite/Epoxy Composites at Low Temperatures", *Composite Structures*, 79: 84-89
60. Kaushik, A., Singh P., Jyoti, 2010, "Mechanical and Electrical Conductivity Study on Epoxy/Graphite Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29: 1038-1044
61. Selzer, R., Friedrich, K., 1997, "Mechanical Properties and Failure Behaviour of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composites Under The Influence of Moisture", *Composites, Part A*, 28A: 595-604

62. Wonderly, C., Grenestedt, J., Fernlund, G., Ceřpus, E., 2005, “Comparison of Mechanical Properties of Glass Fiber/Vinyl Ester and Carbon Fiber/Vinyl Ester Composites”, *Composites*, 36: 417-426
63. Sudarisman, Davies, I.J., Hamada, H., 2007, “Compressive Failure of Unidirectional Hybrid Fibre-Reinforced Epoxy Composites Containing Carbon and Silicon Carbide Fibres “, *Composites*, 38: 1070-1074
64. Yang, L., Ran, L., Yi, M., 2011, “Carbon Fiber Knitted Fabric Reinforced Copper Composite for Sliding Contact Material”, *Materials and Design*, 32: 2365–2369
65. Xu, W., 2010, “The Mechanical Properties of Carbon Fiber/Polylatide/Chitosan Composites”, *IEEE*
66. Tercan, M., Asi, O., Yüksekaya, M., E., Aktař, A., 2006, “Comparison of Tensile Properties of Weft-Knit 1 X 1 Rib Glass/Epoxy Composites With a Different Location of Layers”, *Materials and Design*, 28: 2172-2176
67. Asi, O., Aktař, A., Tercan, M., Yüksekaya, M., E., 2008, “Effect of Knitting Tightness on Mechanical Properties of Weft-knit Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites” , *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 00: 1-8
68. ASTM. ASTM standards and literature references for composite materials, Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites D 3039-76, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1990).
69. ASTM standards and literature references for composite materials, Standard test method for in-plane shear strength of reinforced plastics D 3846-79, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1990).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TURHAN, Elif
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.11.1987 Konya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (506) 792 58 02
e-mail : elifturhan87@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Uşak Üniversitesi /Tekstil Mühendisliği Bölümü	-
Lisans	Uşak Üniversitesi/ Tekstil Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Akşehir Selçuklu Lisesi	2004

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik dinlemek, kitap okumak

