



**KIRPILMIŞ KARBON ELYAF TAKVİYELİ
POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Metin Efe YALÇIN

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL**

**KIRPILMIŞ KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Metin Efe YALÇIN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Metin Efe YALÇIN tarafından hazırlanan “KIRPILMIŞ KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 26/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Özkan EKŞİ (KÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hamza ŞİMŞİR (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Metin Efe YALÇIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KIRPILMIŞ KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Metin Efe YALÇIN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL

Ocak 2022, 77 sayfa

Bu çalışmada, kısa karbon elyaf (SCF) içeriğinin polyester (PES) matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. El yatırması yöntemiyle ağırlıkça farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %2) SCF'ler içeren kompozitler üretilmiştir. Numunelerin eğilme mukavemeti 3-nokta eğme testleri ile, darbe sönümlenme performansları ise İzod darbe testi yapılarak incelenmiştir. Ayrıca, numunelerin aşınma direnci özellikleri 20 N yük uygulanarak ölçülmüştür. Numunelerin kırık ve aşınmış yüzeylerinin morfolojisini incelemek için taramalı elektron mikroskopu kullanılmıştır. Test sonuçları, lif içeriğinin artmasıyla SCF takviyeli polyester kompozitin eğilme mukavemetinin azaldığını göstermektedir. Ancak, darbe dayanımı analizinde aynı eğilim gözlemlenmemiştir. Böylece, %2 SCF takviyesi ile PES2CF'nin darbe dayanımını, saf polyestere göre yaklaşık %67 oranında artmıştır. Bu çalışma aynı zamanda SCF takviyeli polyester kompozitlerin aşınma

direnci özelliklerinin SCF içeriği ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, en yüksek aşınma direnci ($1,51 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$) PES0,5CF numunesi için görölmüştür. Bu nedenle, saf polyestere düşük oranlarda SCF içeriğinin eklenmesi, mekanik özelliklere kıyasla tribolojik davranışlarda da önemli etkiler göstermiştir.

Anahtar Sözcükler : Kırpılmış Karbon Elyafılar, Polyester, Eğme Dayanımı, Aşınma Direnci

Bilim Kodu : 91512

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SHORT CARBON FIBER REINFORCED POLYESTER MATRIX COMPOSITES

Metin Efe YALÇIN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL

January 2022, 77 pages

In this study, the effect of the amount of short carbon fibers (SCFs) on the mechanical and tribological properties of polyester (PES) composite were investigated. Composites were produced with different weight fractions (0.5%, 1%, and 2%) of SCFs by the hand lay-up method. The flexural strength of samples was studied by conducting 3-point bending tests, whereas the energy-absorbing performance was examined by performing the Izod impact test. Moreover, the wear resistance properties of samples were measured by applying a 20 N load. The scanning electron microscope was used to examine the morphology of broken and worn surfaces of specimens. Test results exhibit the flexural strength of SCFs reinforced polyester composite was decreased with the increment of fiber contents. However, the same trend was not observed for the impact strength analysis. Thus, the addition of 2 wt. % SCFs onto pure polyester improves the impact strength of pure polyester nearly by 67%. The

present study also reveals the wear resistance properties of SCFs reinforced polyester composites are indirectly related with of SCFs content. Hence, the highest wear resistance capacity was observed for PES0.5CF of about $1.51 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$. Therefore, the addition of small amounts of SCFs into pure polyester attributes significant effects in tribological behaviors compared to mechanical properties.

Key Words : Short Carbon Fibers, Polyester, Flexural Strength, Impact Strength,
Wear Resistance

Science Code : 91512

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL'e ve karakterizasyon çalışmalarında bana destek olan Andinet Kumella ETICHA'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
KONVEKSİYONEL MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE KOMPOZİTLER.....	3
2.1. KONVEKSİYONEL MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ.....	3
2.1.1. Metaller.....	4
2.1.2. Plastikler	5
2.1.3. Seramikler.....	6
2.2. KOMPOZİTLER.....	6
2.2.1. Fiber ve Matrislerin Fonksiyonları	9
2.2.2. Kompozitlerin Özellikleri.....	10
2.2.3. Kompozitlerin Dezavantajları.....	14
2.2.4. Kompozitlerin Üretimi.....	15
2.2.5. Kompozitlerin Endüstriyel Uygulamaları.....	16
2.2.5.1. Havacılık Uygulamaları	17
2.2.5.2. Otomotiv Sektörü Uygulamaları.....	21
2.2.5.3. Spor Malzemeleri Uygulamaları.....	22
2.2.5.4. Denizcilik Uygulamaları.....	23
2.2.5.5. Endüstriyel Uygulamalar için Problemleri	23

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	24
KOMPOZİTLER İÇİN ELYAF TAKVİYE TİPLERİ.....	24
3.1. CAM ELYAFLAR	24
3.2. ARAMİD LİFLER	29
3.3. ULTRAYÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLİ POLİETİLEN LİFLER	30
3.4. KARBON ELYAFLAR	31
3.5. KIRPILMIŞ ELYAFLAR	35
3.6. FARKLI ELYAFLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	37
BÖLÜM 4	40
TERMOSET REÇİNELER.....	40
4.1. POLYESTER REÇİNELER	40
4.2. EPOKSİ REÇİNELER.....	45
4.3. POLİMİD REÇİNELER.....	48
BÖLÜM 5	50
TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİ ÜRETİMİ	50
5.1. EL YATIRMASI.....	50
5.2. BASINÇLI KALIPLAMA	56
5.3. PULTRÜZYON	57
BÖLÜM 6	60
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
BÖLÜM 7	64
BULGULAR VE TARTIŞMA	64
7.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER	64
7.2. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	65
7.3. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER	67
BÖLÜM 8	70

	<u>Sayfa</u>
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit bir malzeme oluşturulması	8
Şekil 2.2. Sürekli fiber ve kısa fiber kompozitler	8
Şekil 2.3. Çeşitli mühendislik malzemelerinin darbe özellikleri	12
Şekil 2.4. Uzun cam ve kısa cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin etki özellikleri	13
Şekil 2.5. 1999 yılında çeşitli endüstrilerde ve 2000 yılı için kompozit tüketimleri .	17
Şekil 2.6. Ticari uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar	19
Şekil 2.7. Askeri uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar	19
Şekil 2.8. Motor uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler	20
Şekil 2.9. Uydu uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler	20
Şekil 3.1. Fiberglas elyaf üretim süreçleri	26
Şekil 3.2. Cam fitil	27
Şekil 3.3. Karbon ve grafit elyafların üretim süreçleri	32
Şekil 3.4. Kırpılmış elyaf	36
Şekil 4.1. Polyester mekanizması	42
Şekil 5.1. Tipik ıslak yerleştirme işlemi	51
Şekil 5.2. Termosetlerin basınçlı kalıplanması	52
Şekil 5.3. Pultrüzyon işlemi	58
Şekil 6.1. (a) Eğilme deney numuneleri (b) İzod darbe deney numuneleri için kalıp	61
Şekil 6.2 İçerisinde saf su bulunan kaplarda bekletilen numuneler	61
Şekil 6.3. Su emme ve gözeneklilik testinde ağırlık hesaplamak için kullanılan hassas terazi	61
Şekil 6.4. (a) Eğilme eğilme testi, (b) İzod darbe testi ve (c) Aşınma testi	63
Şekil 7.1. Numunelerin eğilme dayanımı ve darbe dayanımı	65
Şekil 7.2. Kırık yüzeylerin SEM görüntüleri	67
Şekil 7.3. Aşınma oranı örnekleri	69
Şekil 7.4. 20 N altında kompozitin enine kesitinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüleri	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin bazı özellikleri	4
Çizelge 2.2. Çeşitli termosetler ve termoplastikler için maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları	16
Çizelge 2.3. Uçak uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler	18
Çizelge 2.4. Otomobillerde yıllık ortalama kompozit kullanımı, 1988–1993	21
Çizelge 3.1. Yüksek mukavemetli liflerin karşılaştırmalı özellikleri	25
Çizelge 6.1. Numunelerin bileşimleri	60
Çizelge 7.1. Numunelerin su emme oranları.....	64
Çizelge 7.2. Numunelerin gözenelilik miktarları	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

MPa	: megapaskal
s	: saat
N	: newton
gr	: gram
°C	: santigrat derece
L	: litre
cm	: santimetre
mm	: milimetre
nm	: nanometre
µm	: mikrometre
g/cc	: gram/santimetreküp

KISALTMALAR

GRP	: Cam Takviyeli Polyester
T _g	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
CF	: Carbon Fiber (Karbon Lif)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDX	: Energy Dispersive X-ray (Enerji Dağılımlı X-ışını)
CNF	: Karbon Nano Elyaf
RTM	: Reçine Transfer ile Kalıplama
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
GIC	: Kritik Enerji Salınımı
CTE	: Termal Genleşme Katsayısı
DFM	: İmalat Tasarımı
DFA	: Montaj Tasarımı

SRIM	: Yapısal Reaksiyon Enjeksiyonlu Kalıplama
SMC	: Levha Kalıpsal Bileşigi
GRP	: Cam Takviyeli Plastik
PAN	: Poliakrilonitril
SCF	: Kırpılmış Karbon Elyaf
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
BPO	: Benzoil Pereoksit
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polyester
PES	: Polyester

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Polimer matrisli kompozit malzemeler otomobil, uçak, lastik takviyesi, spor malzemeleri ve inşaat endüstrileri gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu, hafiflik, korozyon ve aşınma direnci ve çeşitli mekanik ve tribolojik özelliklerinden kaynaklanmaktadır [1–4]. Polyester matrisler, karbon fiber takviyeli polyester bazlı kompozitler (CFRP) üretmek için karbon fiberlerle güçlendirilmişlerdir. Karbon fiber takviyeli polyester kompozitler, roket motoru kasalarındaki, tekne gövdelerindeki ve kimyasal reaksiyon gemilerindeki yapısal bileşenler gibi birçok uygulama alanına sahiptirler [3]. Öte yandan, polyester matris, CFRP malzemeler için tokluk ve süneklik sağlarlar. Bununla birlikte, polyester polimer matrisinin özelliklerinden dolayı, polyester bazlı kompozitlerin bazı dezavantajları vardır. Kürlenme sürecinde suyu çok kolay emmeleri nedeniyle nispeten düşük darbe mukavemetine sahiptirler [3]. Bu nedenle, polyester matrisler, mekanik ve tribolojik yüke dayanma kapasitelerini geliştirmek için genellikle karbon fiberlerle takviye edilmektedir [4]. Literatür taraması, karbon takviyeli polyester kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için şimdiye kadar farklı araştırmaların yapıldığını göstermiştir.

Nancharaiah vd. [5], %0,4-2'lik farklı ağırlık yüzdelerinde karbon fiber takviyeli polyester kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Test sonuçlarına göre, karbon elyaf takviyeli polyester kompozitin darbe dayanımı elyaf yüklemesi ile artmaktadır. Böylece kompozitin en yüksek darbe mukavemeti ağırlıkça %2 olduğunda gözlenmiştir. Duriraj vd. [6], karbon ve cam elyafların polyester matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Test sonuçları, ağırlıkça %10 oranında takviye edilmiş karbon fiber kompozitin %5 oranında takviye edilmiş karbon fiber kompozite kıyasla darbe mukavemetinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, karbon elyaf takviyeli kompozitin darbe

mukavemeti, elyaf yükleme içeriği ile doğrudan artmaktadır. Benzer bir başka çalışmada [7], kompozitin darbe dayanımının fiber içeriği ile arttığı bildirilmiştir.

Xian ve Zhang [8] çalışmalarında, kırılmış karbon liflerin yağlayıcı etkisinden dolayı polieterimidin (PEI) aşınma oranında büyük bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Akgl vd. [9] tarafından, düşük kırılmış karbon lif (SCF) içeriğinin yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) aşınma direncini arttırdığını raporlanmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %10 içeren kompozitler ağırlıkça %20 ierenden daha iyi aşınma performansı göstermiştir. UHMWPE bazlı kompozitlerde karbon fiberlerin yüzey modifikasyonunun fiber-matris arayüzündeki etkileşim üzerindeki etkisi Chukov ve arkadaşlarının çalışmalarında incelenmiştir [10]. Sonuçlar, karbon fiber takviyesindeki artışın aşınma direnci özelliklerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi, SCF içeriğinin PES'in tribolojik davranışı üzerindeki etkisi önceki çalışmalarda incelenmemiştir [5–7]. Ayrıca, yukarıda belirtilen geçmiş araştırmalar, esas olarak PES kompozitlerinin mekanik özelliklerine odaklanmış ve kompozitlerin kırık ve aşınmış yüzeylerinin morfolojisini dikkate almamıştır. Bu nedenle, bu çalışma ağırlıkça farklı oranlarda SCF'nin mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca hem kompozitlerin hem de saf polyester numunelerinin kırık ve aşınmış yüzeylerinin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiştir.

BÖLÜM 2

KONVEKSİYONEL MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ VE KOMPOZİTLER

2.1. KONVEKSİYONEL MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ

Çeşitli uygulamalara yönelik ürünlerin tasarımı ve üretimi için mühendislere sunulan 50.000'den fazla malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler, birkaç yüz yıldır piyasada bulunan malzemelerden (Örn. bakır, dökme demir, pirinç) gelişmiş malzemelere (örn. kompozitler, seramikler ve yüksek performanslı çelikler) kadar çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilik sebebiyle, günümüzde mühendislerin, uygulamalar için doğru malzeme seçimi ve doğru üretim süreci seçimi konusunda uzmanlaşmaları gerekmektedir. Tüm bu bahsedilen malzemeleri tek tek incelemek zordur; bu nedenle, sadeleştirme ve karakterizasyon için geniş bir sınıflandırma gereklidir [11].

Bu malzemeler temel özelliklerine (örneğin, sertlik, mukavemet, yoğunluk ve erime sıcaklığı) bağlı olarak dört ana kategoriye ayrılabilir: (1) metaller, (2) plastikler, (3) seramikler ve (4) kompozitler. Her sınıf, bir dereceye kadar diğer sınıflarla özelliklerin örtüşmesine neden olan bir dizi özelliğe sahip çok sayıda malzeme içermektedir. Örneğin, silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) gibi en yaygın seramik malzemelerin yoğunlukları sırası ile 3,2 ila 3,5 g/cc aralığındadır. Demir (7,8 g/cc), bakır (7,8 g/cc) gibi yaygın metallerin yoğunlukları da birbirine benzer şekildedir. Tablo 2.1, yoğunluk (özgül ağırlık), sertlik, mukavemet ve maksimum sürekli kullanım sıcaklığı açısından her sınıftaki bazı seçilmiş malzemelerin özelliklerini göstermektedir. Metaller genellikle yüksek sıcaklıklarda tavlama ve yaşlanma eğilimi gösterirler, bu da metallerin mikro yapısını değiştirmektedir. Bu tür mikroyapısal değişikliklerden dolayı modül ve dayanım değerleri genellikle düşmektedir. Çizelge 2.1'de belirtilen maksimum sıcaklık, malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerini orijinal değerlerin en az %90'ına kadar koruduğu sıcaklıktır [11].

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin bazı özellikleri [11].

Malzeme	Yoğunluk (ρ) (g/cc)	Gerilme Modülleri (E) (GPa)	Gerilme Dirençleri (σ) (GPa)	Max. Hizmet Sıcaklığı (°C)
Metaller				
Dökme Demir, seviye20	7,0	100	0,14	230–300
Çelik AISI 1045 sıcak hadde	7,8	205	0,57	500–650
Alüminyum 2024-T4	2,7	73	0,45	150–250
Alüminyum 6061-T6	2,7	69	0,27	150–250
Plastikler				
Naylon6/6	1,15	2,9	0,082	75–100
Polipropilen	0,9	1,4	0,033	50–80
Epoksi	1,25	3,5	0,069	80–215
Fenolik	1,35	3,0	0,006	70–120
Seramikler				
Alümina	3,8	350	0,17	1425–1540
MgO	3,6	205	0,06	900–1000
Kısa Elyaf Kompozitler				
Cam Dolgulu Epoksi (35%)	1,90	25	0,30	80–200
Cam Dolgulu Polyester (35%)	2,00	15,7	0,13	80–125
Cam Dolgulu Naylon (35%)	1,62	14,5	0,20	75–110
Cam Dolgulu Naylon (60%)	1,95	21,8	0,29	75–110
Tek Yönlü Kompozitler				
S-cam/epoksi (45%)	1,81	39,5	0,87	80–215
Karbon/epoksi (61%)	1,59	142	1,73	80–215
Kevlar/epoksi (53%)	1,35	63,6	1,1	80–215

2.1.1. Metaller

Metaller geçmişte yapısal uygulamalar için en yaygın malzemeler olmuştur. En geniş tasarım ve işleme olanağına sahiplerdir. Yaygın metaller demir, alüminyum, bakır, magnezyum, çinko, kurşun, nikel ve titanyumdur. Yapısal uygulamalarda alaşımlar, saf metallere göre daha sık kullanılmaktadır. Alaşımlar, bazen metalik olmayan elementler de dahil olmak üzere farklı malzemelerin karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Alaşımlar, saf metallere göre daha iyi özellikler sunabilmektedir. Örneğin, dökme demir kırılığandır ve korozyona uğraması kolaydır, ancak demire %1'den daha az karbon eklenmesi onu daha sert hale getirir ve krom eklenmesi onu korozyona dayanıklı hale getirir. Alaşımlama ilkesi sayesinde binlerce yeni metal meydana getirilebilir [11].

Metaller, genel olarak, plastikler ve kompozitlerle karşılaştırıldığında ağırdır. Yalnızca alüminyum, magnezyum ve berilyum, plastiğe yakın yoğunluklar sahiplerdir. Çelik, plastik malzemelerden 4 ila 7 kat daha ağırdır; alüminyum plastikten 1,2 ila 2 kat daha ağırdır. Metallerin genellikle nihai ürünü elde etmek için işlenmesi gerekmektedir [11].

Metaller yüksek sertliğe, mukavemete, termal stabiliteye ve termal ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Plastiklerden daha yüksek sıcaklık dirençleri nedeniyle, daha yüksek sıcaklıklara sahip uygulamalarda kullanılabilirler [11].

2.1.2. Plastikler

Plastikler, son on yılda en yaygın mühendislik malzemeleri haline gelmiştir. Son 5 yılda hacim bazında plastik üretimi çelik üretimini geçmiştir. Hafifliği, kolay işlenebilirliği ve korozyon direnci nedeniyle plastikler otomobil parçaları, havacılık bileşenleri ve tüketim malları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastik hammaddeler, levhalar, çubuklar, çubuklar, tozlar, topaklar ve granüller şeklinde bulunabilmektedir. Bir üretim sürecinin yardımıyla, plastikler net şekle yakın veya net şekilli parçalara haline getirilebilmektedir. Yüksek yüzey kalitesi sağlayabildikleri için çeşitli işleme operasyonlarını ortadan kaldırırlar. Bu özellik, düşük maliyetli parça üretimini sağlamaktadır [11].

Plastikler, zayıf termal kararlılıkları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmazlar. Genel olarak, plastikler için çalışma sıcaklığı 100°C'nin altındadır. Bazı plastikler, performansta önemli bir düşüş olmaksızın 100°C ila 200°C aralığında çalışma sıcaklığına sahiplerdir. Plastikler metallere göre daha düşük erime sıcaklıklarına sahiptir ve bu nedenle işlenmeleri daha kolay olmaktadır [11].

2.1.3. Seramikler

Seramikler güçlü kovalent bağlara sahiptir ve bu nedenle büyük termal kararlılık ve yüksek sertliğe sahiptirler. Seramikler tüm malzemeler arasında en sert olanıdır. Seramiklerin metallere karşılaştırıldığında en önemli ayırt edici özelliği, neredeyse hiç sünekliğe sahip olmamalarıdır. Kırılgan bir yapıya sahiptirler. Seramikler, mühendislik malzemelerinin en yüksek erime noktalarına sahiptir. Genellikle yüksek sıcaklık ve yüksek aşınma uygulamaları için kullanılırlar ve çoğu kimyasala karşı dirençlidirler. Seramikler, yaygın metalurjik tekniklerle işlenemez ve üretim için yüksek sıcaklıkta ekipman gerektirir. Yüksek sertliklerinden dolayı seramiklerin işlenmesi zordur ve bu nedenle nihai şekle net şekil verilmesi gerekmektedir. Seramiklerin işlenmesi, karbür ve elmas aletler gibi pahalı kesici aletler gerekmektedir [11].

2.2. KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler, 1960'lerde polimerik esaslı kompozitlerin yaygınlaşmasıyla endüstriyel uygulamalar içerisine girmiştir. O zamandan beri kompozit malzemeler yaygın mühendislik malzemeleri haline gelmiş ve otomotiv bileşenleri, spor malzemeleri, havacılık parçaları, tüketim malları, denizcilik ve petrol endüstrileri dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için tasarlanıp üretilmiştir. Kompozit kullanımındaki büyüme, ürün performansından beklenen performans ve hafif bileşenler için küresel pazarda artan rekabet nedeniyle de gerçekleşmiştir. Tüm malzemeler arasında, kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyumun yerini alma ve çoğu zaman daha iyi performans gösterme potansiyeline sahiptir. Çelik bileşenlerin kompozit bileşenlerle değiştirilmesi, bileşen ağırlığından %60 ila %80 tasarruf sağlayabilmekte iken alüminyum parçalar için ise bu oran %20 ila %50 arasındadır. Bugün, kompozitlerin birçok mühendislik uygulaması için tercih edilen malzemeler olduğu görülmektedir [11].

Yeni bir özellik kombinasyonu elde etmek için iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle bir kompozit malzeme meydana getirilmektedir. Yukarıdaki tanım daha geneldir ve metal alaşımları, plastik kopolimerler, mineraller ve ahşabı

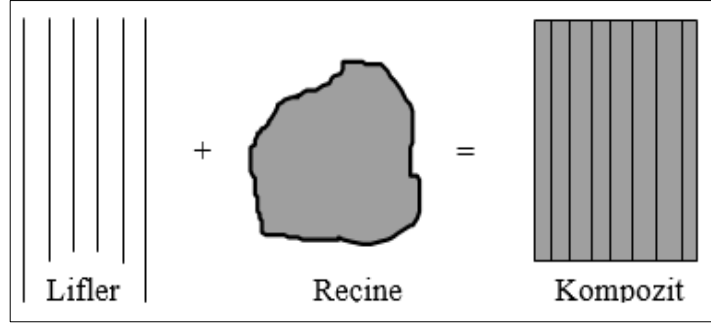
içerebilmektedir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, kendisini oluşturan malzemelerin moleküler düzeyde farklı olması ve mekanik olarak ayrılabilir olması bakımından yukarıdaki malzemelerden farklıdır. Kompoziti oluşturan malzemeler birbirlerine karışırlar ancak orijinal formlarında kalırlar. Kompozit malzemelerin nihai özellikleri, kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerinden daha iyi olmasıdır [11].

Kompozit kavramı ilk olarak mühendisler tarafından icat edilmemiştir; doğanın içinde de birçok yerinde kompozitler bulunmaktadır. Örneğin, lignin adı verilen doğal bir yapıştırıcı matris ile selüloz liflerinin bir bileşimi olan ahşap doğal kompozit örneği olarak verilebilir. Salyangoz ve istiridye gibi omurgasızların kabuğu, bir bileşik örneğidir. Bu tür kabuklar, insan yapımı gelişmiş kompozitlerden daha güçlü ve daha sağlamdır. Bilim adamları, örümcek ağından alınan liflerin sentetik liflerden daha güçlü olduğunu bulmuşlardır. Hindistan, Yunanistan ve diğer ülkelerde, birkaç yüz yıldır ev inşa etmek için kil ile karıştırılmış kabuklar veya samanlar kullanılmaktadır. Kabuk veya talaşın bir kil içinde karıştırılması, parçacıklı bir bileşik örneğidir ve bir kil içinde kamışların karıştırılması, kısa elyaflı bir bileşik örneğidir. Bu takviyeler performansı artırmak için yapılmaktadır [11].

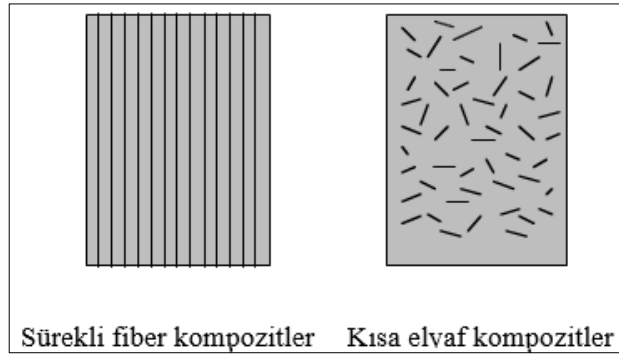
Kompozitin ana konsepti, matris malzemeleri içermesidir. Tipik olarak, kompozit malzeme bir matris reçinesi içinde liflerin güçlendirilmesiyle oluşturulmaktadır. Takviye lifler, parçacıklar veya bıyığa benzer parçacıklar olabilir ve matris malzemeleri metaller, plastikler veya seramikler olabilir [11].

Takviye polimerler, seramikler ve metallerden yapılabilmektedir. Lifler sürekli, uzun veya kısa olabilir. Polimer matris ile yapılan kompozitler daha yaygın hale gelmiştir ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer matris malzemeleri termoset veya termoplastik reçineler olabilirler [11].

Takviye edici elyaf veya kumaş, kompozite güç ve sertlik sağlarken, matris, sertlik ve çevresel direnç sağlamaktadır. Takviye edici lifler, uzun sürekli liflerden dokuma kumaşa, kısa kesilmiş liflere ve keçeye kadar farklı formlarda bulunmaktadır [11].



Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit bir malzeme oluşturulması [11].



Şekil 2.2. Sürekli fiber ve kısa fiber kompozitler [11].

Her farklı takviye tipi farklı özelliklerle sonuçlanmaktadır. Özellikler büyük ölçüde liflerin kompozitlere yerleştirilme şekline bağlıdır. Kompozitler hakkında unutulmaması gereken en önemli şey yükü lifin taşıması ve mukavemetinin lif eksenine boyunca en fazla olmasıdır. Yük yönünde uzun sürekli lifler, matris reçinesinin kendisini çok aşan özelliklere sahip bir kompozit haline gelmesi ile sonuçlanır. Aynı malzeme, Şekil 2.2' de gösterildiği gibi, kısa uzunluklara bölündüğünde sürekli liflerden daha düşük mukavemet gösterir. Uygulama tipine (yapısal veya yapısal olmayan) ve üretim yöntemine bağlı olarak elyaf formu seçilmektedir. Yapısal uygulamalar için sürekli lifler veya uzun lifler önerilir; yapısal olmayan uygulamalar için ise kısa lifler önerilmektedir. Enjeksiyon ve sıkıştırma kalıplamada kısa lifler kullanılırken, filament sarma, pultrüzyon ve rulo sarma sürekli lifler kullanılmaktadır [11].

Literatürde yapılan bir çalışma, polyester/cam elyaf kompozitlerin katmanlar arası kırılma özelliklerini geliştirmek için karbon nano elyafların (CNF) kullanımına

yönelik veriler sunmaktadır [12]. Yapılan çalışmada normal cam/elyaf kompozit, ağırlıkça %1 CNF konsantrasyonlarına sahip kompozit numune ile karşılaştırılmıştır. Polyester reçinesini sertleştirmek için ağırlıkça %1 CNF eklendiğinden, kırılma dayanımında önemli bir gelişme tutarlı bir şekilde gözlemlenmiştir. Mikroskopi görüntüleri, ağırlıkça %1 CNF ile sertleştirilmiş polyester/cam elyaf kompozit numunelerin kırılma yüzeylerinin, normal polyester/cam elyaf kompozitlerin kırılma yüzeylerinden daha karmaşık olduğunu göstermiştir [12].

2.2.1. Fiber ve Matrislerin Fonksiyonları

Plastiklerin liflerle takviye edilmesiyle kompozit bir malzeme oluşturulmaktadır. Kompozit davranışını iyi anlamak için, bir kompozitte liflerin ve matris malzemelerinin rolleri hakkında iyi bir bilgiye sahip olmayı gerektirmektedir. Fiberlerin ve matris malzemelerinin önemli işlevleri aşağıda anlatılmıştır [11]. Bir kompozitte liflerin ana işlevleri şunlardır:

- Yapısal bir kompozitte yükün %70 ila %90'ı lifler tarafından taşındığından, yükü taşımak.
- Kompozitlerde sertlik, mukavemet, termal kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlamak.
- Kullanılan elyafın cinsine göre elektriksel iletkenlik veya izolasyon sağlamak.

Bir matris malzemesi, bir kompozit yapıda, çoğu yapının tatmin edici performansı için hayati önem taşıyan çeşitli işlevleri yerine getirmektedir. Bir matris malzemesi veya bağlayıcının mevcudiyeti olmadan lifler kendi içlerinde çok kullanışlı değildir. Bir matris malzemesinin önemli işlevleri aşağıdakileri içermektedir:

- Matris malzemesi lifleri birbirine bağlar ve yükü liflere aktarır. Yapıya rijitlik ve şekil kazandırır.
- Matris, lifleri izole eder, böylece tek tek lifler ayrı ayrı hareket edebilir. Bu, bir çatlağın yayılmasını durdurur veya yavaşlatır.
- Matris, iyi bir yüzey kalitesi sağlar ve net şekilli veya net şekle yakın parçaların üretimine yardımcı olur.

- Matris, takviye liflerine kimyasal saldırılara ve mekanik hasara (aşınma) karşı koruma sağlar.
- Seçilen matris malzemesine bağlı olarak süneklik, darbe dayanımı vb. performans özellikleri de etkilenir. Sünek bir matris yapının tokluğunu artıracaktır. Daha yüksek tokluk gereksinimleri için termoplastik bazlı kompozitler seçilir.
- Arıza modu, kompozitte kullanılan matris malzemesinin türünden ve fiber ile uyumluluğundan güçlü bir şekilde etkilenir [11].

Moraes vd. [13] ebeğümeci kumaş takviyeli polyester matris kompozitlerin mekanik davranışı üzerine yapmış oldukları çalışmada, giysilerde uzun zamandır kullanılan doğal bir lignoselülozik ebeğümeci lifinden yapılan dokuma kumaşların mühendislik kompozitleri için takviye olarak kabul edildiğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada, polyester/ebeğümeci kompozitinin temel mekanik davranışları araştırılmaktadır. Hacimce %40'a kadar ebeğümeci kumaşla güçlendirilmiş kompozitler oda sıcaklığında çekme testleri, nihai dayanım, elastik modül, esneklik ve toplam gerinim gibi özelliklerin değerlendirildiği testlere tabii tutulmuştur. Kompozitte ebeğümeci kumaş miktarının artmasıyla bu özelliklerde artış gözlemlenmiştir. Gerçekten de, kumaş takviyesinin hacimce %40'ına kadar mukavemet, modül ve esneklikte önemli bir artış meydana gelmiştir. Toplam gerilmeye de hafif bir artış gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan kırılma analizi, güçlendirilmiş kompozitlerin bu geliştirilmiş performansının, kumaştaki ebeğümeci lifleri tarafından kırılma polimer matrisindeki çatlak yayılmasının durdurulması ile doğrudan ilişkili olabileceğini ortaya çıkarmıştır [13].

2.2.2. Kompozitlerin Özellikleri

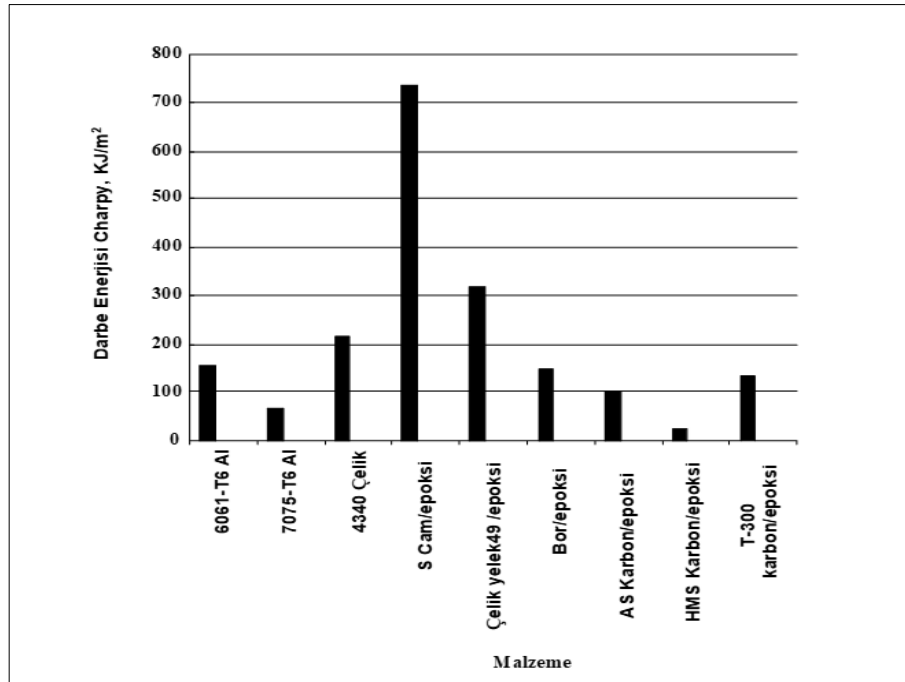
Kompozitler, yüksek performans ve hafifliğin gerekli olduğu uygulamalar için rutin olarak tasarlanıp üretilmektedir. Aşağıda tartışıldığı gibi kompozitler geleneksel mühendislik malzemelerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır [11].

- Kompozit malzemeler, parça entegrasyonu için olanak sağlar. Birkaç metalik bileşen, tek bir kompozit bileşenle değiştirilebilir [11].

- Kompozit yapılar, gömülü sensörler yardımıyla hizmet içi izleme veya çevrimiçi süreç izlemeyi sağlamaktadır. Bu özellik, uçak yapılarında yorulma hasarını izlemek için kullanılır veya bir RTM (reçine transfer kalıplama) işleminde reçine akışını izlemek için kullanılabilir. Gömülü sensörlere sahip malzemeler “akıllı” malzemeler olarak bilinmektedir [11].
- Kompozit malzemeler, Tablo 2.1'de gösterildiği gibi yüksek bir özgül sertliğe (sertlik-yoğunluk oranı) sahiptir. Kompozitler, çeliğin sertliğini ağırlığın beşte biri oranında sunar ve ağırlığın yarısında alüminyumun sertliğine eşittir [11].
- Bir kompozit malzemenin özgül mukavemeti (kuvvet-yoğunluk oranı) çok yüksektir. Bu nedenle, yapımında kompozit kullanılan uçaklar ve otomobiller daha hızlı ve daha az yakıt ile hareket etmektedir. Spesifik mukavemet tipik olarak çelik ve alüminyum alaşımlarının 3 ila 5 katı aralığındadır. Bu daha yüksek özgül sertlik ve mukavemet nedeniyle, kompozit parçalar muadillerine göre daha hafif olmalarını sağlar [11].
- Yorulma mukavemeti (dayanıklılık sınırı) kompozit malzemeler için çok daha yüksektir. Çelik ve alüminyum alaşımları, statik mukavemetlerinin yaklaşık %50' sine kadar iyi bir yorulma mukavemeti sergilemektedir. Tek yönlü karbon/epoksi kompozitler, statik mukavemetlerinin neredeyse %90' ına kadar iyi bir yorulma mukavemetine sahiptir [11].
- Kompozit malzemeler yüksek korozyon direncine sahiptir. Demir ve alüminyum, su ve havanın varlığında korozyona uğrar ve özel kaplamalar ve alaşımlama gerektirmektedir. Kompozitlerin dış yüzeyi plastikten oluştuğu için korozyon ve kimyasal dirençleri çok iyidir [11].
- Kompozit malzemeler, artan miktarda tasarım esnekliği sunmaktadır. Örneğin, kompozit yapıların termal genleşme katsayısı (CTE) uygun malzeme ve yerleştirme sırası seçilerek sıfır yapılabilir. Kompozitler için CTE metallere göre çok daha düşük olduğundan, kompozit yapılar iyi boyutsal stabilite sağlamaktadır [11].
- Net şekilli veya net şekle yakın parçalar kompozit malzemelerle üretilmektedir. Bu özellik, birkaç işleme gereksinimini ortadan kaldırır ve böylece işlem çevrim süresini ve maliyetini azaltmaktadır [11].
- Metallerle bazen mümkün olmayan karmaşık parçalar, görünüm ve özel konturlar, ayrı parçalar kaynaklanmadan veya perçinlenmeden kompozit malzemeler

kullanılarak üretilebilir. Bu, güvenilirliği arttırıp ve üretim sürelerini azaltmaktadır. Böylece daha fazla üretim fizibilitesi sağlanır [11].

- Kompozit malzemeler, imalat için tasarım (DFM) ve montaj için tasarım (DFA) tekniklerini kullanmak için daha fazla fizibilite sunmaktadır. Bu teknikler, bir ürünlerdeki parça sayısını en aza indirmeye yardımcı olup ve montaj ve birleştirme süresini azaltmaktadır. Eklemleri ortadan kaldırarak, yüksek mukavemetli yapısal parçalar daha düşük maliyetle üretilebilmektedir [11].



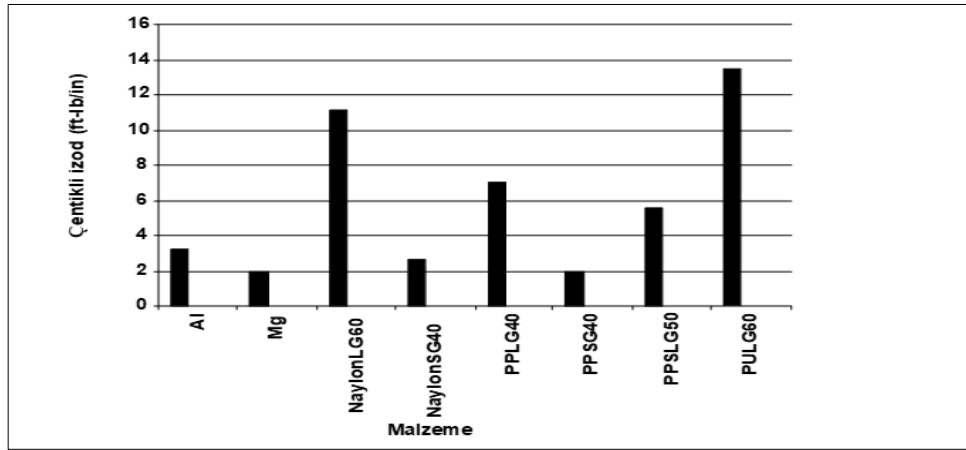
Şekil 2.3. Çeşitli mühendislik malzemelerinin darbe özellikleri.

Yaklaşık %60 fiber hacim oranına sahip tek yönlü kompozit malzemeler kullanılır. Çeşitli mühendislik malzemelerinin darbe özellikleri. Yaklaşık %60 fiber hacim oranına sahip tek yönlü kompozit malzemeler kullanılır [11].

- Kompozitler, Şekil 2.3 ve 2.4'te gösterildiği gibi iyi darbe özellikleri sunmaktadır. Şekil 2.3 alüminyum, çelik, cam/epoksi, kevlar/epoksi ve karbon/epoksi sürekli elyaf kompozitlerinin darbe özelliklerini göstermektedir. Cam ve Kevlar kompozitler, çelik ve alüminyumdan daha yüksek darbe dayanımı sağlamaktadır. Şekil 2.4, alüminyum ve magnezyum ile kısa ve uzun cam elyafli termoplastik kompozitlerin darbe özelliklerini karşılaştırılmaktadır. Termoplastik kompozitler

arasında, %60 elyaf içerikli uzun cam elyaf naylon 66 kompozit (NylonLG60), %40 elyaf içerikli kısa cam elyaf naylon 66 kompozit (NylonSG40), uzun cam elyaf polipropilen kompozit (PPLG40) darbe özellikleri; %40 elyaf içerikli, %40 elyaf içerikli kısa cam elyaf polipropilen kompozit (PPSG40), %50 elyaf içerikli uzun cam elyaf PPS kompozit (PPSLG50) ve %60 elyaf içerikli uzun cam elyaf poliüretan kompozit (PULG60) anlatılmaktadır. Uzun cam elyaf, kısa cam elyaf kompozitlere göre üç ila dört kat daha iyi darbe dayanımına sahiptir [11].

- Kompozit malzemeler için gürültü, titreşim ve sertlik özellikleri metallere göre daha iyidir. Kompozit malzemeler, titreşimleri metallere göre çok daha iyi bir şekilde sönmektedir. Bu özellikler, bir uçağın ön kenarından golf sopalarına kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [11].



Şekil 2.4 Uzun cam ve kısa cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin etki özellikleri. Elyaf ağırlık yüzdesi iki hane sonunda yazılır [11].

- Uygun tasarım ve imalat teknikleri kullanılarak uygun maliyetli kompozit parçalar üretilmektedir. Bu, elyaf oryantasyonu, elyaf tipi ve/veya reçine sistemleri değiştirilerek elde edilmektedir [11].
- Cam takviyeli ve aramid takviyeli fenolik kompozitler, düşük duman ve toksisite için gerekli havacılık ihtiyaçlarını karşılar. Bu özellik, uçak iç panelleri, saklama kutuları ve mutfak duvarları için gereklidir [11].
- Daha düşük basınç ve sıcaklık gereksinimleri nedeniyle, kompozit işleme için gerekli takım maliyeti, metal işleme için gerekenden çok daha düşüktür. Bu durum, ürün ömrünün sürekli olarak azaldığı bu rekabetçi pazarda, değişik tasarımlar ile fazlaca çeşitlilik sağlamaktadır [11].

K. Ganesan vd. yumurta kabuğu tozu/nanokil/ jüt elyaf keçe takviyeli polyester matrisli kompozitlerin ile mekanik özellikleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, doğal fiber polimer matrisli kompozitlerin, çevre dostu ve düşük maliyetli olması nedeniyle uygulamalarda çok fazla tercih edildiğine değinmişlerdir. Bu çalışmada, NaOH ile muamele edilmiş kumaş hasır ve işlenmemiş kumaş hasır ile takviye edilmiş bir polyester matris nanokompozitin mekanik özelliklerini araştırmaktadırlar. Ayrıca yumurta kabuğu tozunun ve nanokilin yukarıdakilere etkileri de incelemişlerdir. Matrisler, her ikisinin de varlığı ve yokluğunun farklı kombinasyonları ve ayrıca sıkıştırma kalıplama işlemi kullanılarak farklı ağırlık yüzdeleri ile hazırlanmıştır. Kompozitlerin mekanik ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Ağırlıkça %1,5 Nanokil ve %1,5 yumurta kabuğu tozu takviye edilmiş kompozit kumaş hasırın çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe mukavemeti sırasıyla 29 Mpa, 28 MPa, 39,51 MPa ve darbe mukavemeti 3,03 J olarak bulunmuştur. Bu kompozisyon oranı diğer kompozisyonlardan üstündür. Bu sonuca göre belirli orana kadar takviye edilmiş kompozitlerin malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde iyileştirici bir etkisi olduğunu göstermektedir [14].

2.2.3. Kompozitlerin Dezavantajları

Kompozit malzemeler birçok alanda fayda sağlasa da aşağıdaki gibi dezavantajları da bulunmaktadır:

- Kompozit malzemelerin malzeme maliyeti çelik ve alüminyuma göre çok yüksektir. Ağırlık bazında alüminyum ve çelikten neredeyse 5 ila 20 kat daha pahalıdır [11].
- Geçmişte, düşük hacimli (günde bir ila üç parça) büyük yapıların imalatı için kompozit malzemeler kullanılmıştır. Yüksek hacimli üretim yöntemlerinin olmaması, kompozit malzemelerin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır. Son zamanlarda, pultrüzyon, reçine transfer kalıplama (RTM), yapısal reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama (SRIM), levha kalıplama bileşiğinin (SMC) sıkıştırma kalıplama ve filament sarım, daha yüksek üretim adetleri elde edebilmek için otomatikleştirilmiştir. Otomotiv parçaları, günde 100 ila 20.000

parça arasında üretilmektedir. Örneğin Corvette üretim hacmi günde 100 araç, Ford-Taurus üretim hacmi ise günde 2000 araçtır. Delphi Saginaw Direksiyon Sistemleri ve TRW gibi direksiyon sistemi şirketleri, çeşitli modeller için günde 20.000'den fazla direksiyon sistemi üretmektedir [11].

- Metal alaşımlı ürünler tasarlanmanın klasik yolları, makine ve metal el kitaplarının ve tasarım ve veri el kitaplarının kullanımına bağlı olmaktadır. Metallerin üretimi için oldukça geniş tasarım örnekleri mevcuttur. Kompozitlerle parça tasarlamak, bir geçmişi olmaması nedeniyle bu kaynaklardan yoksundur [11].
- Kompozit parçaların sıcaklık direnci, matris malzemelerinin sıcaklık direncine bağlı olmaktadır. Kompozitlerin büyük bir kısmı polimer bazlı matrisler kullandığından, sıcaklık direnci plastiğin özellikleri ile sınırlıdır. Ortalama kompozitler -40 ila $+100^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kullanılmaktadır. Epoksiler, bismaleimidler ve PEEK gibi yüksek sıcaklıklı plastikler için üst sıcaklık sınırı $+150$ ile $+200^{\circ}\text{C}$ arasında değişebilir. Çizelge 2.2, çeşitli polimerler için maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları gösterilmektedir [11].
- Kompozitlerin solvent direnci, kimyasal direnç ve çevresel stres çatlaması polimerlerin özelliklerine bağlıdır. Bazı polimerler solventlere ve çevresel stres çatlamasına karşı düşük dirence sahiptir [11].
- Kompozitler, özelliklerini ve boyutsal kararlılığını etkileyen nemi emmektedir [11].

2.2.4. Kompozitlerin Üretimi

İşleme, malzemeleri bir şekilden diğerine dönüştürme bilimidir. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla farklı malzeme içerdiğinden, kompozitlerle kullanılan işleme teknikleri metal işleme için kullanılanlardan oldukça farklıdır [11].

Çizelge 2.2. Çeşitli termosetler ve termoplastikler için maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları [11].

	Maksimum
	Sürekli Kullanım
Malzeme	Sıcaklığı (°C)
Termoset	
Vinilister	60-150
Polyester	60-150
Fenolik	70-150
Epoksi	80-215
Siayenat	150-250
Esterleri	
Bismaleimid	230-320
Termoplastik	
Polietilen	50-80
Polipropilen	50-75
Asetal	70-95
Naylon	75-120
Polyester	70-120
PPS	120-120
PEEK	120-250
Teflon	200-260

Çeşitli tiplerde takviyeleri ve reçine sistemlerini işlemek için çeşitli tiplerde kompozit işleme teknikleri mevcuttur. Bir uygulamanın performans, üretim hızı ve maliyet gereksinimlerini karşılamak için doğru işleme tekniğini ve işleme koşullarını seçmek gereklidir [11].

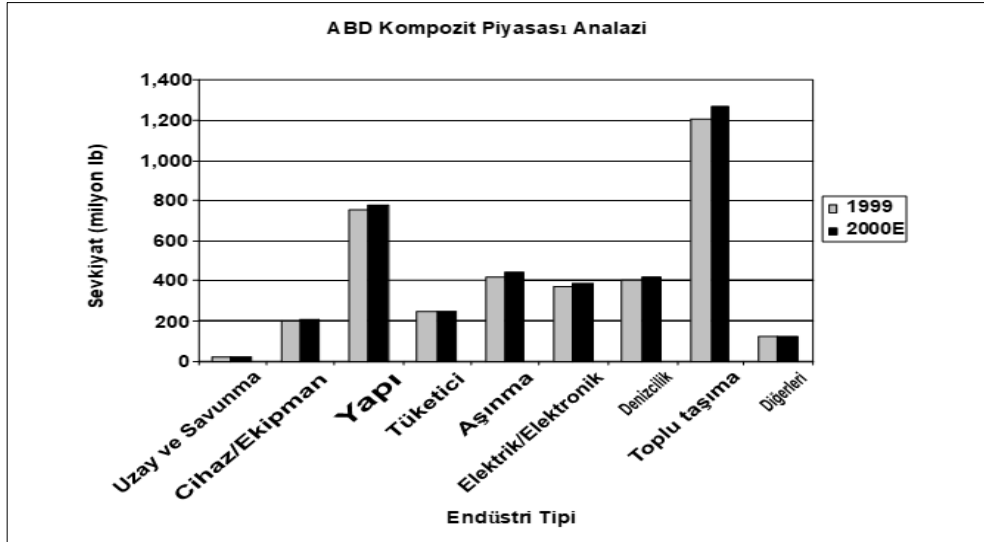
2.2.5. Kompozitlerin Endüstriyel Uygulamaları

Kompozit uygulamalardaki artışın birçok nedeni vardır, ancak birincil itici güç, kompozitlerden üretilen ürünlerin daha güçlü ve daha hafif olmasıdır. Günümüzde kompozit malzemelerin faydalarından yararlanmayan herhangi bir sektör bulmak çok zordur. Günümüzde kompozit malzemelerin en büyük kullanıcısı, 2000 yılında 1,3 milyar pound kompozit tüketen ulaşım sektörüdür. Kompozit malzemeler, endüstrinin her alanında çokça tercih edilen malzemeler haline gelmiştir [11].

Son üç ila dört yılda, teknolojiye ve gereksinimlerinde önemli değişiklikler olmuştur. Bu değişen ortam, ancak yeni malzemelerdeki ve bunlarla ilişkili üretim teknolojisindeki gelişmelerle mümkün olan birçok yeni ihtiyaç ve fırsat yaratmıştır.

Geçtiğimiz on yılda, çeşitli pazar segmentlerinin gereksinimlerini karşılamak için birkaç ileri üretim teknolojisi ve malzeme sistemi geliştirilmiştir. Birçok endüstri, kompozit malzemelerin faydalarından yararlanmışır. Kompozit kullanımının büyük ölçüde genişlemesi, elyaf maliyetindeki azalmanın yanı sıra otomasyon tekniklerinin ve yüksek hacimli üretim yöntemlerinin geliştirilmesine bağlanabilmektedir. Örneğin, karbon elyafın fiyatı 1970' de 150,00 \$/lb'den 2000'de yaklaşık 8,00 \$/lb'ye düşmüştür. Maliyetteki bu düşüş, düşük maliyetli üretim yöntemlerinin geliştirilmesinden ve artan endüstriyel kullanımdan kaynaklanmıştır [11].

Genel olarak, kompozit pazarı aşağıdaki endüstri kategorilerine ayrılabilir: havacılık, otomotiv, inşaat, denizcilik, korozyona dayanıklı ekipman, tüketici ürünleri, cihaz/iş ekipmanı ve diğerleri. Yukarıdaki pazarlardaki ABD kompozit tüketimleri, 1999 ve 2000 yılları için Şekil 2.5 'de gösterilmektedir [11].



Şekil 2.5. 1999 yılında çeşitli endüstrilerde ve 2000 yılı için kompozit tüketimleri [11].

2.2.5.1. Havacılık Uygulamaları

Havacılık ve uzay endüstrisi, kompozit malzemelerin faydalarını ilk fark edenlerden biridir. Uçaklar, roketler ve füzeler, kompozitlerin yardımıyla daha yüksek, daha hızlı ve daha uzağa uçmaktadır. Cam, karbon ve Kevlar fiber kompozitler rutin olarak havacılık ve uzay parçaları için tasarlanmış ve üretilmiştir. Havacılık ve uzay endüstrisi, yüksek performans özelliklerinden dolayı öncelikle karbon fiber

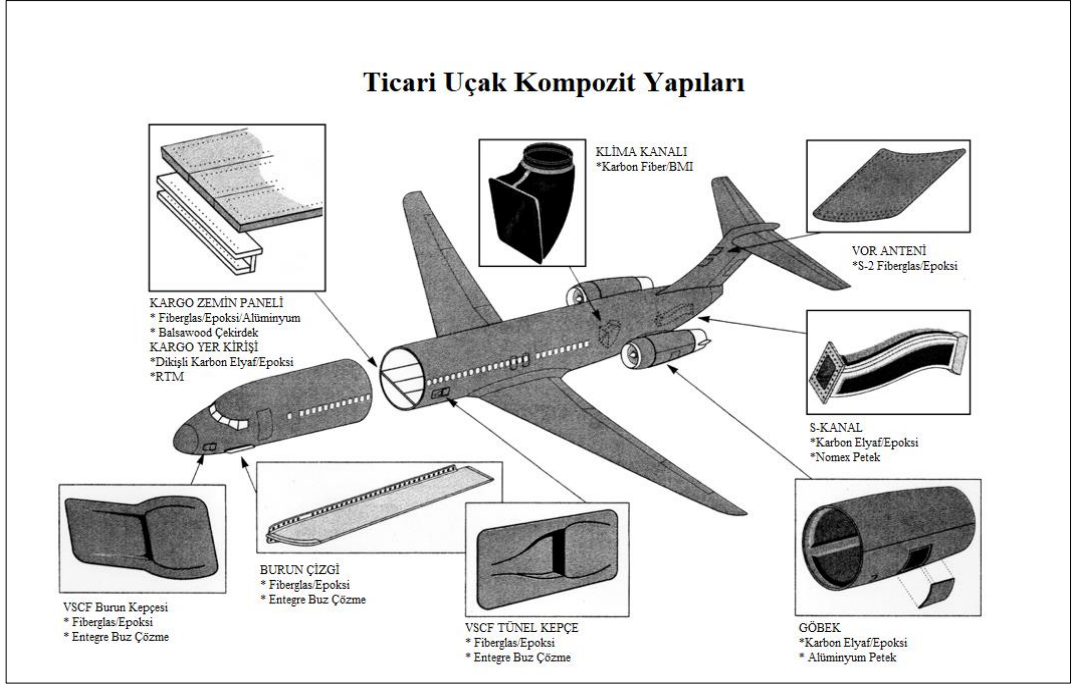
kompozitleri kullanmaktadır. El yatırma tekniği, havacılık parçalarının imalatı için yaygın bir imalat yöntemidir; RTM (Reçine Transfer Kalıplama) ve filaman sargısı yönteminde nadir olsada havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır [11].

1999'da havacılık endüstrisi, 23 milyon pound değerinde kompozit tüketmiştir. F-11, F-14, F-15 ve F-16 gibi askeri uçaklarda, yapının ağırlığını azaltmak için kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen savaş uçaklarında kullanılan kompozit bileşenler, Çizelge 2.3'te gösterildiği gibi yatay ve dikey stabilizatörler, kanat kaplamaları, kanat kutuları, kanatlar ve diğer çeşitli yapısal bileşenlerde bulunabilmektedir. Yukarıdaki bileşenler için elde edilen tipik kütle azalmaları, %20 ila %35 aralığındadır. Savaş uçaklarında yapılan kütle tasarrufu, füze menziline yanı sıra faydalı yük kapasitesini de artırmaktadır [11].

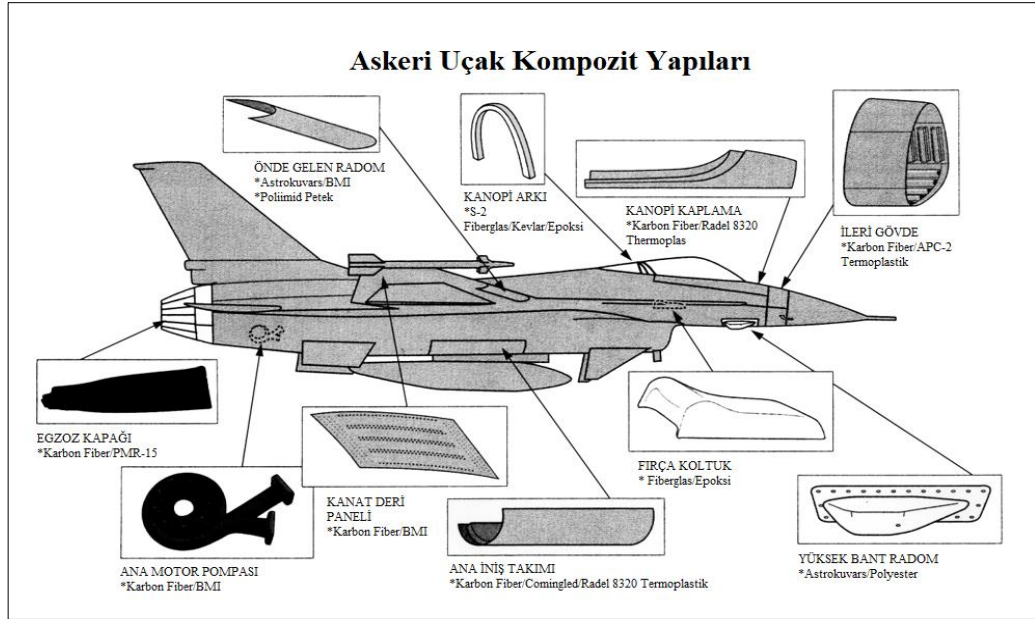
Şekil 2.6, ticari uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapıları göstermektedir ve Şekil 2.7, askeri uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapıları göstermektedir. Motor ve uydu uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler sırasıyla Şekil 2.8 ve 2.9'da gösterilmiştir [11].

Çizelge 2.3. Uçak uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler [11].

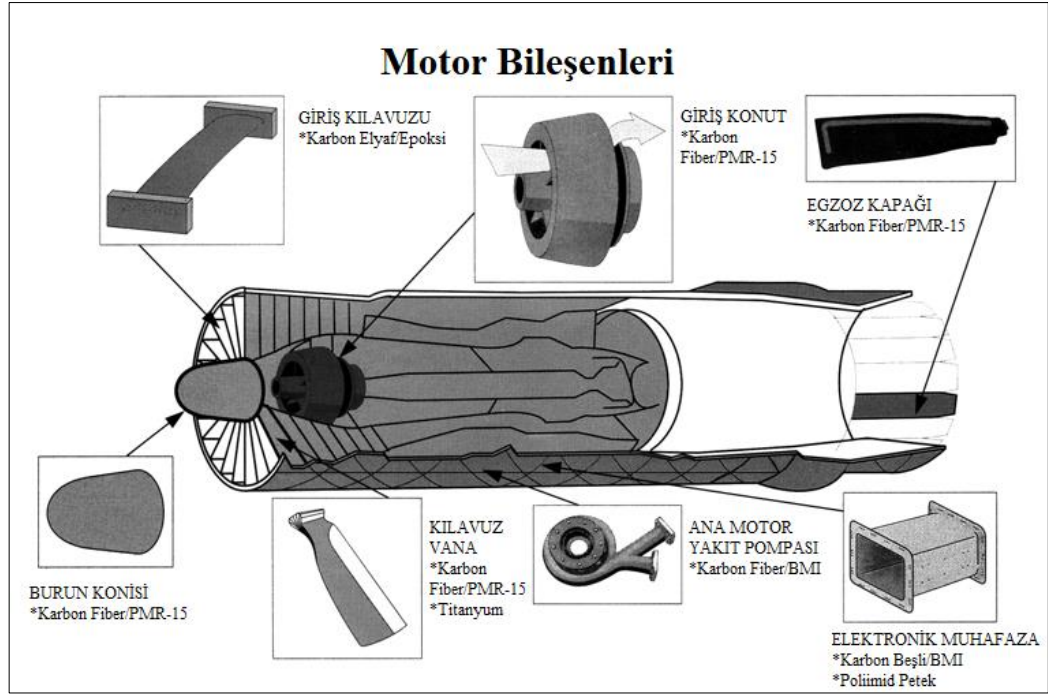
Uçak	Kullanım Yeri
F-14	Kapılar, yatay kuyruklar, kaporta, sabiyleyici kaplamalar.
F-15	Kanatlar, dümenler, dikey ve yatay kuyruklar, hız frenleri, dengeleyici kaplamalar.
F-16	Dikey ve yatay kuruklar, yüzgeç ön kenarı, dikey kanatçık kutusundaki kaplamalar.
B-1	Kapılar, dikey ve yatay kuruklar, kanatlar, çıtalar, girişler.
AV-8B	Kapılar, dümenler, dikey ve yatay kuyruklar, kanatçıklar, kanatlar, kanat kutusu, kaporta.
Boeing 737	Spoiler, yatay stabilizatör, kanatlar.
Boeing 757	Kapılar, dümenler, asansör, kanatçıklar, rüzgarlıklar, kanatlar, kaporta.
Boeing 767	Spoiler, kaporta.



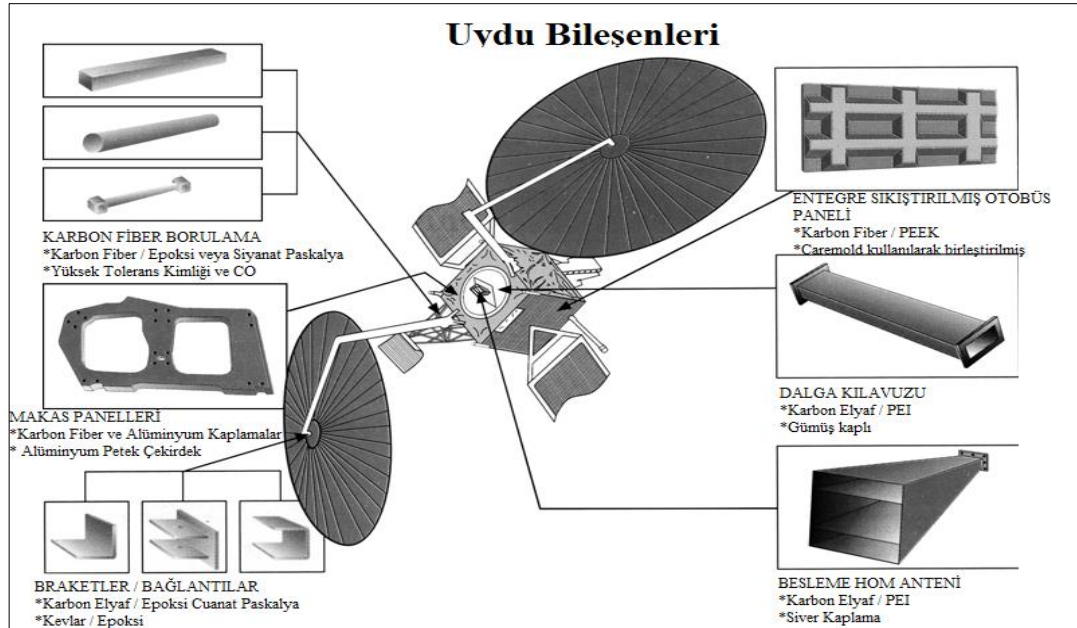
Şekil 2.6. Ticari uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar [11].



Şekil 2.7. Askeri uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar [11].



Şekil 2.8. Motor uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler [11].



Şekil 2.9. Uydu uygulamalarında kullanılan kompozit bileşenler [11].

Boeing 747 ve 767 gibi yolcu uçaklarında, ağırlığı azaltmak, taşıma kapasitesini artırmak ve yakıt verimliliğini artırmak için kompozit parçalar kullanılmaktadır. Bu tür uçaklar için kompozitlerden yapılan bileşenler Tablo 2.3'te gösterilmektedir [11].

2.2.5.2. Otomotiv Sektörü Uygulamaları

Kompozit malzemeler, yüksek yüzey kalitesi, stil ayrıntıları ve işleme seçenekleri sunarak otomotiv endüstrisinin bazı uygulamalarında “tercih edilen malzeme” olarak kabul edilmiştir. Üreticiler, kompozitleri kullanarak otomotivin maliyet, görünüm ve performans gereksinimlerinde iyileştirmeler meydana getirmiştir. Bugün kompozit gövde panelleri, egzotik spor otomobillerden binek otomobillere ve küçük, orta ve ağır kamyon uygulamalarına kadar tüm kategorilerde başarılı bir geçmişe sahiptir. 2000 yılında otomotiv endüstrisinde 318 milyon pound kompozit kullanılmıştır [11].

Otomotiv pazarının maliyet açısından çok hassas olması nedeniyle, malzeme maliyeti yüksek olan karbon fiber kompozitler henüz sektörde kabul görmemektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan kompozitler, ana takviye olarak cam elyafları kullanmaktadır. Çizelge 2.4, uygulamalara, matris malzemelerine ve üretim yöntemlerine göre otomotiv kompozit kullanımını göstermektedir [11].

Çizelge 2.4. Otomobillerde yıllık ortalama kompozit kullanımı, 1988–1993 [11].

Uygulamalar	Adet (kg 10 ⁶)	Matris Malzemesi	Adet (kg 10 ⁶)	Üretim Süreci	Adet (kg 10 ⁶)
Tampon kirişi	42	Polyester	42	14.3	40
Koltuk/yük zemini	14	Polipropilen	22	26.3	20
Başlık	13	Polikarbonat	10	27.0	13
Radyatör desteği	4	Polietilen	4	25.5	5
Çatı paneli	4	Epoksi	4		3
Diğer	11	Diğer	7	2.52	8
Total	89	Total	89	1.55	89

Raja vd. [15] otomobil uygulamaları için karbon elyaf takviyeli polyester kompozitlerin statik ve yorulma özelliklerinin belirlenmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Otomobillerde süspansiyon elamanları arasında bulunan yaprak yaylar %20 kısa karbon elyaf takviyeli polyester, %20 boy karbon elyaf takviyeli polyester ve takviyesiz polyester kullanılarak kalıplanmış olup, bağlantı mukavemeti

açısından değerlendirilmiştir. Kalıplanmış yaprak yayların enerji depolamasını, kapasitesini ve gerinim hızı duyarlılığını belirlemek için statik genel performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Kontrol mafsalları, sabit frekanslı yorulmada, kesinlikle tersine çevrilmiş yorulma yüklerine tabi tutulmuştur; yaprak yay performansı, 2×10^7 döngüye kadar çeşitli yüklerle değerlendirilmiştir. Çatlakların çekme yüzeyi kırılma morfolojisi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile ortaya konmuştur. Sonuçlar, %20 kısa karbon elyaf takviyeli karbon fiber takviyeli polyester fiberin, dikkate alınan diğer malzemelere göre yük kullanımı için daha uygun olduğunu doğrulamıştır [15].

2.2.5.3. Spor Malzemeleri Uygulamaları

Spor ve eğlence ekipmanı tedarikçileri, kompozit malzemelerin başlıca kullanıcıları haline gelmektedir. Yapısal kompozit kullanımındaki büyüme, yüksek performanslı spor malzemeleri ve yarış teknelerinde birinci sıradadır. Bir spor malzemeleri mağazasını ziyaret eden herkes, kompozit malzemelerden yapılmış golf sopası, tenis raketi, kar kayağı, olta vb. ürünleri görebilir. Bu ürünler hafif ve yüksek performanslıdır. Bu da kullanıcıya kolay kullanım ve artan konfor konusunda yardımcı olmaktadır [11].

Spor Gereçleri Üreticileri Birliği (North Palm Beach, Florida) tarafından bildirildiği üzere, toplam 1999 ABD spor ekipmanı sevkiyat maliyetinin (golf, hokey, basketbol, beyzbol, tenis vb. dahil) 17,33 milyar dolar olduğu tahmin etmektedir. Rekreatif ulaşım (bisikletler, motosikletler, eğlence tekneleri, karavanlar, kar motosikletleri ve su scooterları) pazarının, 1998'deki 15,39 milyar dolarlık satıştan 17,37 milyar dolar olduğu tahmin edilmektedir. Golf için toplam sevkiyat 1999 için toplar, sopalar ve diğerleri dahil olmak üzere 2,66 milyar dolar civarındadır ve bu miktarın üçte biri golf kulüplerine aittir. 1999'da buz patenleri ve hokeyin 225 milyon \$, snowboard'un 183 milyon \$ ve kar kayağının yaklaşık 303 milyon \$ toptan satış değeri olduğu tahmin edilmektedir. Yukarıdaki spor segmentlerinde kompozit kullanım miktarını açıklayan herhangi bir istatistik bulunmamaktadır. Kuzey Amerika'da her yıl 6 milyon hokey sopası üretilmektedir ve kompozitler bu pazarın %1 ila %3'ünü kapsamaktadır [11].

2.2.5.4. Denizcilik Uygulamaları

Kompozit malzemeler, yakıt verimliliğine, daha yüksek seyir hızına, korozyon direnci ve hafifliği nedeniyle yolcu vapurları, sürat tekneleri, şamandıralar vb. gibi çeşitli deniz uygulamalarında kullanılmaktadır. Bileşenlerin çoğu, çekirdek malzeme olarak köpük ve petek ile cam takviyeli plastikten (GRP) yani cam takviyeli polysterden yapılmaktadır. Denizcilik endüstrisi hakkında yazılan 361 sayfalık bir pazar raporuna göre, tüm eğlence amaçlı teknelerin yaklaşık %70'i kompozit malzemelerden yapılmaktadır [11].

Kompozitler ayrıca petrol ve gaz çıkarımı için açık deniz boru hatlarında da kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için GRP malzemelerinin kullanılması, azaltılmış taşıma ve kurulum maliyetlerinin yanı sıra daha iyi korozyon direnci ve mekanik performansı içermektedir [11].

2.2.5.5. Endüstriyel Uygulamalar için Problemleri

Kompozit malzemelerin kullanımının önündeki en büyük engel, bazı durumlarda geleneksel malzemelere kıyasla yüksek başlangıç maliyetine sahip olmalarıdır. Malzemenin yaşam döngüsü boyunca ne kadar etkili olacağına bakılmaksızın, endüstri, özellikle yaşam döngüsü maliyeti nispeten belirsiz olduğunda, yüksek ön maliyetleri dikkate almaktadır. Bu maliyet engeli, yeni materyallere yönelik araştırmaları engellemektedir [11].

Genel olarak, özellikle elle yatırma işleminde, kompozitlerin işlenmesinin maliyeti yüksek olmaktadır. Burada hammadde maliyetleri, bitmiş bir ürünün toplam maliyetinin küçük bir kısmını temsil etmektedir. İşçilik maliyetlerinin toplam ürün maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturduğu durumlarda, işin Asya, Meksika ve Kore'ye taşındığına dair halihazırda kanıtlar mevcuttur.

Kompozit malzemelerin geri dönüşümü, hacimli üretimin yılda milyonlarca parça olduğu otomotiv endüstrisi gibi yüksek hacimli bir pazara girerken bir sorun teşkil etmektedir [11].

BÖLÜM 3

KOMPOZİTLER İÇİN ELYAF TAKVİYE TİPLERİ

Kompozit malzemeler için takviyeler parçacıklar, bıyığa benzer parçacıklar veya lifler olabilmektedir. Parçacıkların tercih edilen bir yönü yoktur ve mekanik özelliklerde minimum iyileştirme sağlamaktadır. Parçacıklar malzeme maliyetini azaltmak için sıklıkla dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Bıyığa benzeyen parçacıklar, son derece güçlü olan ancak matris içinde homojen olarak dağılması zor olan tek kristallerdir. Liflerle karşılaştırıldığında hem uzunluk hem de çap olarak küçüktürler. Lifler, parçacıklara ve bıyığa benzeyen parçacıklara kıyasla çok uzun bir eksene sahiptir. Genellikle dairesel veya neredeyse daireseldirler ve daha uzun yönde önemli ölçüde daha güçlüdürler, çünkü normalde ya çekme ya da çekme yoluyla yapmaktadırlar, bu da molekülleri yönlendirir, böylece lifler üzerindeki gerilim yükleri moleküler zincirlerin kendilerine karşı daha fazla çekmektedir. Liflerin mukavemeti ve sertliği nedeniyle, elyaf takviyeler gelişmiş kompozitler için ağırlıklı olarak kullanılan takviyelerdir. Elyaf, uygulamaya ve üretim sürecine bağlı olarak sürekli veya süreksiz olabilmektedir [16].

3.1. CAM ELYAFLAR

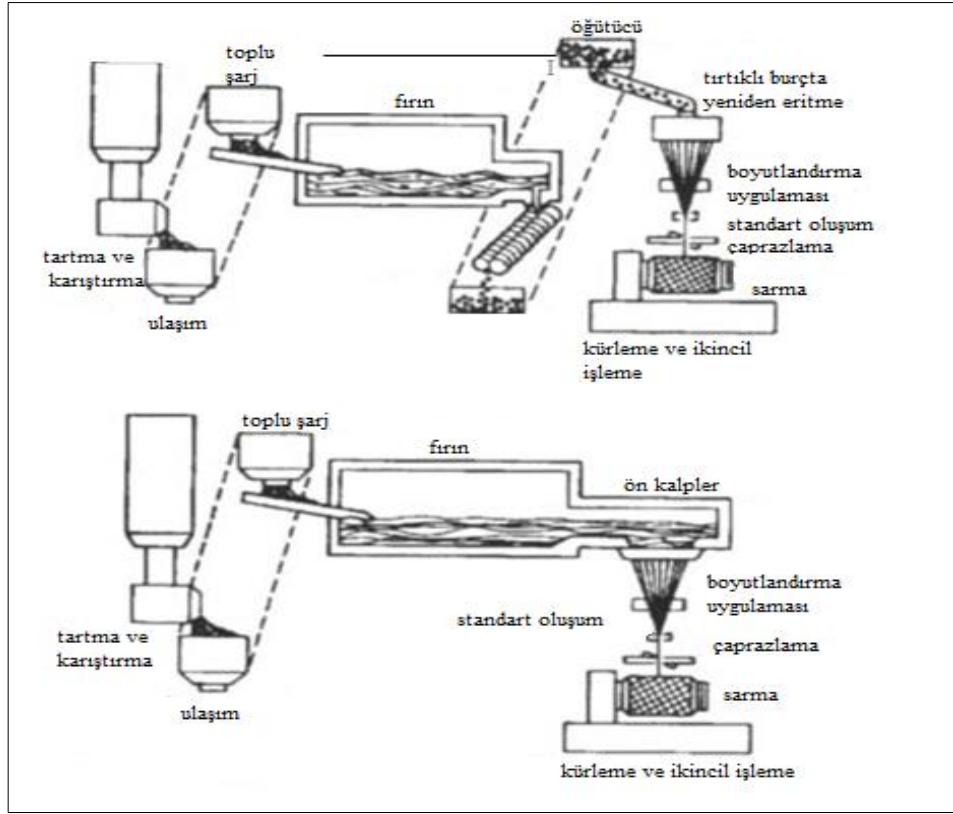
Düşük maliyeti, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek darbe direnci ve iyi kimyasal direnci nedeniyle, cam elyaflar ticari kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikleri, yüksek performanslı kompozit uygulamalar için karbon fiberlerinkilerle karşılaştırılamaz. Nispeten düşük bir modüle sahiptirler ve karbon fiberlere kıyasla daha düşük yorulma özelliklerine sahiptirler. Kompozitlerde kullanılan en yaygın üç cam elyaf şunlardır: E-cam, S-2 cam ve kuvars. E-cam en yaygın ve en ucuz olanıdır, iyi bir çekme mukavemeti (500 ksi) ve modül (11,0 msi) kombinasyonu sağlamaktadır. 650 ksi gerilme mukavemetine ve 12,6 msi modülüne sahip S-2 camı daha pahalıdır, ancak E-camdan %40 daha güçlüdür ve

yüksek sıcaklıklarda mukavemetinin daha büyük bir yüzdesini korumaktadır. Kuvars fiber, düşük dielektrik fibere sahip oldukça pahalı, ultra saf bir silika camdır ve öncelikle zorlu elektrik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ticari olarak önemli bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir [16].

Cam, belirli bileşimler ve özellikler vermek için çeşitli oksit bileşenlerine sahip bir silika (SiO₂) omurgasından oluşan amorf bir malzemedir. Cam elyaflar silika kumu, kireçtaşı, borik asit ve kil, kömür ve fluorspar gibi az miktarda diğer bileşenlerden yapılmaktadır. Cam üretim sürecinde, bileşenler kuru karıştırılır ve yüksek sıcaklıkta, refrakter bir fırında eritilmektedir [16].

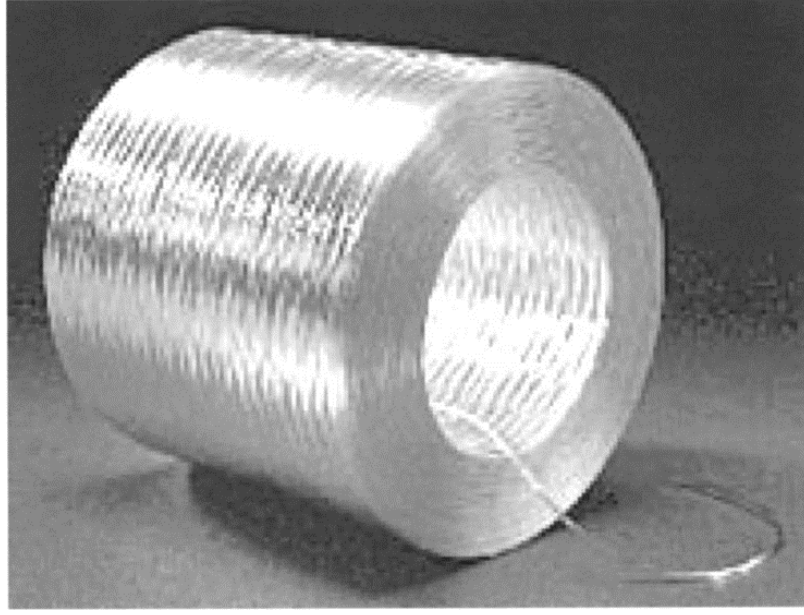
Çizelge 3.1. Yüksek mukavemetli liflerin karşılaştırmalı özellikleri [16].

Fiber Tipi	Çekme Kuvveti	Çekme Kuvveti	Hatalı Uzama (%)	Yoğunluk (gm/cm ³)	Termal Genleşme Katsayısı (J 60 C)	Lif Çapı (µm)
Cam						
E-Cam	500	11.0	4.7	2.58	4.9-6.0	5-20
S-2 Cam	650	12.6	5.6	2.48	2.9	5-10
Kuvars	490	10.0	5.0	2.15	0.5	9
Organik						
Kelvar29	525	12.0	4.0	1.44	-2.0	12
Kevlar49	550	19.0	2.8	1.44	-2.0	12
Kevlar 149	500	27.0	2.0	1.47	-2.0	12
Spetkrum 1000	450	25.0	0.7	0.97		27
PAN Bazlı Karbon						
Standart Modül	500-700	32-35	1.5-2.2	1.80	-0.4	6-8
Orta Modül	600-900	40-43	1.3-2.0	1.80	-0.6	5-6
Yüksek Modül	600-800	50-65	0.7-1.0	1.90	-0.75	5-8
Zift Bazlı Karbon						
Düşük Modül	200-450	25-35	0.9	1.9		11
Yüksek Modül	275-400	55-90	0.5	2.0	-0.9	11
Ultra Yüksek Modül	350	100-140	0.3	2.2	-1.6	1



Şekil 3.1. Fibreglas elyaf üretim süreçleri [16].

Alternatif olarak, erimiş cam elyaf şeritleri oluşturmak için doğrudan eklenmektedir. Yaklaşık 2.300°F' ye ısıtıldıktan sonra, erimiş cam, amorf bir yapı verecek şekilde su veya hava spreyi ile hemen söndürülen filamentler oluşturmak üzere 55m/sn'ye yaklaşan hızlarda küçük burç deliklerinden akar. Çap, delik boyutu, çekme hızı, sıcaklık, erime viskozitesi ve soğutma hızı ile kontrol edilmektedir. Tipik cam elyaf terminolojisinde, sonraki işlemler için uygun bir form sağlamak üzere genellikle bir fitil içine bir dizi ayrı iplik (veya uç) dahil edilir. Çoğu takviye için fitiller tercih edilmektedir çünkü bükülmüş ipliklerden daha yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Fitiller, 20-50 libre lif içeren ayrı makaralara sarılır (Şekil 3.2) Malzeme dokuma için kullanılacaksa, dokuma işlemleri sırasında ekstra güç sağlamak için genellikle bir iplik halinde bükülmektedir. Teller, verimleri (pound başına yard) veya "denye" (9.000 metre elyaf başına kütle (gram olarak) ile belirlenir). Sıklıkla karşılaşılan bir başka tekstil terminolojisi, 1000 m elyaf başına kütle (gram olarak) olan "tex" terimidir [16].



Şekil 3.2. Cam fitil görüntüsü [16].

İşlenmemiş cam filamentler, mukavemeti azaltan mekanik aşınmaya karşı hassas olmaktadır; bu nedenle, bobinleme sırasında yüzeyde çiziklerin oluşmasını ve dokuma, örgü ve diğer tekstil işlemlerinden kaynaklanan mekanik hasarları önlemek için imalattan hemen sonra bir boyutlandırma uygulanmaktadır. Boyutlandırmalar, ağırlıkça sadece yaklaşık %1-2'yi oluşturan son derece ince kaplamalardır. Genellikle bir nişasta ve bir yağlayıcı olan haşılama, tüm mekanik işlemler tamamlandıktan sonra ya solventlerle ya da ısıyla ovma yoluyla çıkarılmaktadır. Boyutlandırma kaldırıldıktan sonra, fiber-matris bağına büyük ölçüde iyileştiren bir yüzey cilası ile değiştirilir. Örneğin, organosilan birleştirme ajanları, camın silan yapısı ile uyumlu bir uç gruba ve organik matris ile uyumlu başka bir uç gruba sahiptir. Birleştirme ajanları, cam takviyeli kompozitlerin performansı için kritik öneme sahiptir. Kompozit çekme, eğilme ve basma mukavemetinde %100'ün üzerinde iyileştirmeler kanıtlanmıştır. Bağlayıcı madde ayrıca cam elyafın su saldırısına karşı korunmasına da yardımcı olmaktadır. Bazı boyutlandırmalar aynı zamanda birleştirme ajanı olarak da işlev görür ve bu nedenle üretim süreci boyunca elyaf üzerinde kalır. Pek çok farklı boyutlandırma/kaplama türü mevcuttur ve bir uygulama için seçilen boyutlandırma/bitişin hem elyaf hem de matris ile uyumlu olması önemlidir. Sertlik veya yumuşaklık gibi işleme ve işleme özelliklerini geliştirmek için antistatik maddeler ve yağlayıcılar da kullanılabilir. Fiber püskürtme için cam elyafı kısa boylarda parçalanacaksa, kesme kabiliyetini geliştirdiği için sertlik istenen bir

özelliğdir. Öte yandan, lif, dökümlülük ve şekillendirmenin önemli olduğu bir yerleştirme işleminde kullanılacaksa, yumuşaklık istenen bir özelliğdir. Cam elyaflar için kullanılan maksimum kullanım sıcaklığı, E-cam için 930°F ile 1.920°F aralığında değişmektedir [16].

Cam elyaflar polyester matrisli reçinelerin takviyesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sapuan vd., bazalt/dokuma-cam-elyaf takviyeli polyester reçine matrisli hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre, Bazalt fiber ilaveli kompozitlerinin yoğunluğu, hibrit kompozitlerden %1,8 oranında biraz daha yüksektir. Çekme ve eğilme özelliklerinde ise bazalt liflerinin oranının artmasıyla beraber, çekme mukavemeti bazalt takviyeli kompozitler için cam elyaf takviyeli kompozitlere göre %69 artmıştır [17]. Takviye olarak kullanılan cam elyafların boyutları da kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Nitekim Minaru Miwa vd., epoksi/cam elyaf ve polyester/cam elyaf kompozitlerinin çekme mukavemeti üzerinde elyaf uzunluğunun etkileri üzerine yapmış oldukları çalışmada süresiz elyaf takviyeli kompozitlerde, elyaf-matris ara yüzeyindeki kesme mukavemeti, takviye etkisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmektedir. Cam elyafların mukavemet dağılımını dikkate alarak bu kesme mukavemetini doğru bir şekilde belirlemek için bir yöntem geliştirilmiştir. Kompozitlerin çekme mukavemeti, takviye edici liflerin en-boy oranı arttıkça artmaktadır. Bu eğilim, matrisin türü, arayüzey işleminin doğası ve ortam sıcaklığından bağımsız olarak benzerdir. Kompozitler, ortalama kritik fiber uzunluğunun 1,5 katı olan kısa cam fiberlerin rastgele düzlemsel oryantasyonu ile güçlendirildiğinde, kompozitin çekme dayanımı, sürekli cam fiber ile güçlendirilmiş kompozitlerin teorik dayanımının yaklaşık %90'ına ulaşmaktadır. Kritik uzunluğun 5 katı cam elyaflarla takviye edildiğinde, çekme mukavemeti teorik olarak yaklaşık %97'ye ulaşmaktadır. Ancak pratik açıdan, ortalama kritik lif uzunluğunun 1,5-2,0 katı kadar kısa liflerle takviye yapılması yeterli olmaktadır. [18].

Bir başka çalışmada ise cam elyaf ile polyester arayüzey etkileşiminin de mekanik özellikleri etkileyen bir diğer faktör olduğu ortaya konulmuştur [19]. Khanna vd., cam elyaf takviyeli polyester matris kompozitlerin nano-mekanik karakterizasyonu için numune hazırlama teknikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Mühendislik

uygulamasında yaygın olarak kullanılan cam elyaf takviyeli plastiklerin bileşenlerin bulunduğu sınırın etrafındaki bölgenin 'interfaz' olarak adlandırıldığını ve ara fazın boyutunun tipik olarak birkaç mikron mertebesinde olduğundan ve bu mikroskopik bölgenin mekanik özelliklerini anlamının, kompozitin mekanik davranışını anlamak için çok önemli olduğundan bahsetmektedir. Bu araştırma ile, GFRP kompozitlerinde ve mololitik polyester numunelerinde 10s nanometre mertebesinde bir yüzey pürüzlülüğü elde etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu yüzey pürüzlülüğü seviyesi, fiber takviyeli kompozit malzemelerin veya monolitik polimer malzemelerin nanomekanik araştırması için uygundur. Düşük rms yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için mikron altı boyutlu sert partiküller tarafından aşındırma ve kimyasal aşındırma kombinasyonu kullanılmalıdır [19].

3.2. ARAMİD LİFLER

Aramid lifler, cam ve karbon arasında sertlik ve mukavemete sahip gerçek organik liflerdendir. Dupont'un Kevlar elyafı en sık kullanılan elyafların başında gelmektedir. Bu aromatik poliamidler, naylon ailesinin bir parçasıdır. Kevlar, poliparafenilen tereftalamit (aramid) oluşturmak için parafenilen diaminin organik bir çözücü içinde tereftaloil klorür ile reaksiyona girmesiyle yapılmaktadır. Bu, ekstrüzyon, germe ve çekme tarafından takip edilen bir yoğunlaşma reaksiyonudur. Polimer yıkanır ve daha sonra sülfürik asit içinde çözülür. Bu noktada polimer, kısmen yönlendirilmiş bir sıvı kristali şeklindedir. Polimer çözeltisi daha sonra küçük deliklerden (spinneretler) ekstrüde edilir. Lifler çözelti içinde ve eğirme sırasında ve yine düzeden geçirilerek yönlendirilir. Lifler daha sonra yıkanır, kurutulup ve sarılır [16].

Aramid lifleri aslında bozunma sıcaklıklarından daha yüksek bir cam geçiş sıcaklığına (Tg) sahip olan termoplastiklerdir. Yüksek uzunlamasına gerilme mukavemeti ile sonuçlanan güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulan lif yönünde yüksek oranda yönlendirilmiş moleküler zincirlere sahiptirler. Bununla birlikte, enine doğrultudaki zincirler, daha zayıf hidrojen bağları ile bir arada tutulur ve bu da düşük enine mukavemete neden olmaktadır. Cam ve karbon veya grafit elyafların aksine, Kevlar elyafları yüzey işlemine tabi tutulmaz çünkü bugüne kadar aramid elyaflar için kabul edilebilir bir yüzey işlemi geliştirilmemiştir. Ebatlar, elyafların dokunacağı, ip haline

getirileceği veya balistik uygulamalar için kullanılmaktadır. Aramid lifleri, iyi bir gerilme mukavemeti ve modülü kombinasyonuna sahiptir; hafiftirler ve mükemmel tokluğa ve olağanüstü balistik ve darbe direncine sahiptirler Karbon ve grafit gibi, aramid lifleri de negatif bir termal genleşme katsayısı sergilemektedir [16].

En yaygın üç aramid lifi Kevlar 29 (düşük modül), Kevlar 49 (orta modül) ve Kevlar 149'dur (yüksek modül). Kevlar'ın çeşitli dereceleri arasındaki bu farklılıklar, yüksek ve ultra yüksek modüllü fiberlerde kristalliği artıran proses koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Kevlar 29 yüksek tokluğa sahiptir; Kevlar 49 ise daha yüksek bir tokluğa sahiptir ve Kevlar 149 ultra yüksek bir tokluğa sahiptir. Normal demet boyutu, demet başına 134 ila 10.000 filament arasında değişmektedir. Organik yapısı nedeniyle, aramid için kullanılan maksimum sıcaklık yaklaşık 350°F ile sınırlıdır. Karbon durumunda olduğu gibi, dokuma kumaş veya kıyılmış elyaf hasırına dönüştürülebilen çeşitli ağırlıklarda ipliklerde bulunurlar. Bununla birlikte, son derece sert bir elyaf olduklarından, kesilmeleri daha zordur ve bu da bazı kullanım sorunlarına neden olmaktadır. Aşırı dayanıklılıkları nedeniyle genellikle balistik koruma için kullanılırlar. Aramid lifleri, güçlü asitler ve bazlar dışında alevlere ve çoğu çözücüye karşı dayanıklıdır; ancak aramid lifleri higroskopiktir ve nemi emmektedirler [16].

3.3. ULTRAYÜKSEK MOLEKÜLER AğIRLIKLI POLİETİLEN LİFLER

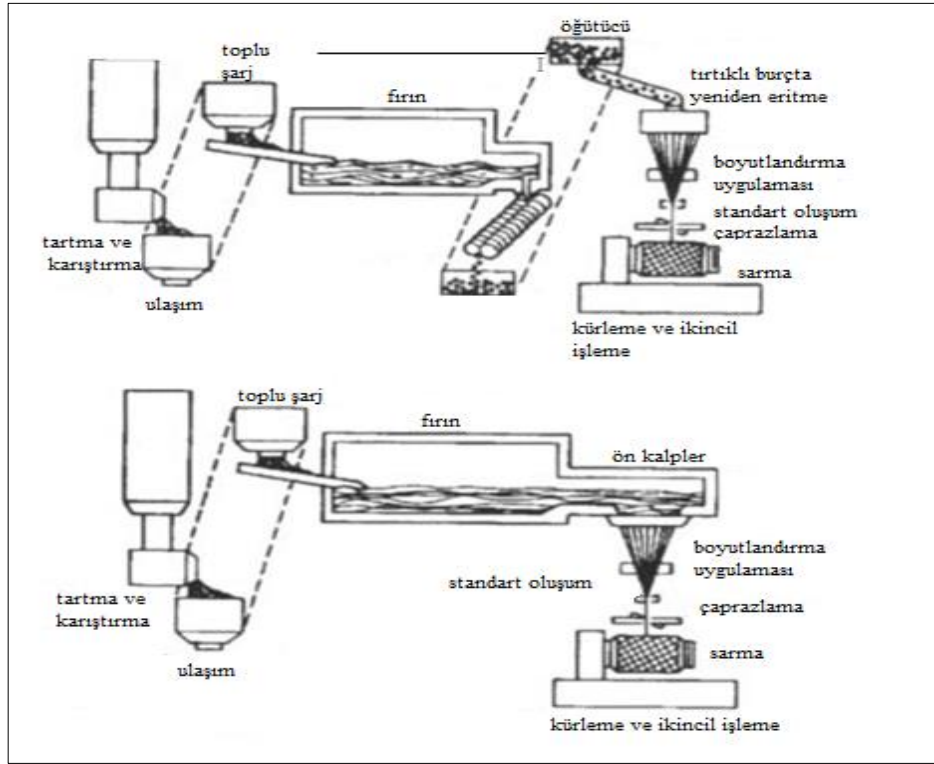
Yüksek modüllü polietilen lifleri, yüksek yoğunluklu polietilenin katı hal çizimi ile yapılabilmektedir. Bu lifler 290°F veya daha düşük sıcaklıklarla sınırlıdır. İyi nem direncine, yüksek darbe direncine ve çekici elektriksel özelliklere sahiptirler. 0,97 g/cm³ yoğunluğunda, aramid liflerinden bile daha hafiftirler. Matrise güçlü bir bağ oluşturmazlar, bu da zayıf enine gerilim ve sıkıştırma mukavemetleri ile sonuçlanır. Termoplastik bir elyaf olduğundan sürekli yükleme altında sürünmeye maruz kalmaktadırlar [16].

3.4. KARBON ELYAFLAR

Karbon ve grafit fiberler, yüksek performanslı kompozit yapılarda en yaygın fiber formudur. Karbon ve grafit lifleri çok çeşitli özelliklerde üretilmektedir; bununla birlikte, genellikle üstün çekme ve basınç dayanımına sahiplerdir, yüksek modüllere sahiptirler, mükemmel yorulma özelliklerine sahiptirler ve korozyona uğramazlar. Terimler sıklıkla birbirinin yerine kullanılsa da grafit lifler (1) 3,000°F'nin üzerinde ısı işlemlere tabi tutulur, (2) atomlarının 3 boyutlu sıralamasına sahiptir, (3) %99'dan fazla karbon içeriğine sahiptir ve (4) elastik modüllere sahiptir. Karbon lifleri daha düşük karbon içeriğine (%93-95) sahiptir ve daha düşük sıcaklıklarda ısı işleme tabi tutulmaktadır [16].

Karbon ve grafit lifleri suni ipek, zift veya poliakrilonitril (PAN) öncülerinden yapılabilmektedir. PAN lifleri suni ipek liflerinden daha pahalı olmasına rağmen, karbon verimleri suni ipek liflerinin neredeyse iki katı olduğu için yapısal karbon lifleri için yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

PAN'dan yapılan elyaflar (Şekil 3.3) gerilir, ısıtılır, karbonlaştırılır, grafitleştirilir ve daha sonra yüzey işleme tabi tutulur. Germe işlemi, moleküllerin yönlendirilmesine yardımcı olur ve tüm işlem boyunca bir miktar gerilim korunur. 390-570°F'de ısıyla sabitleme veya oksidasyon, PAN'ı çapraz bağlar ve karbonizasyon işlemi sırasında erimeyi önleyen yapıyı stabilize etmektedir. Isı ile sertleştirme işlemi bir hava atmosferinde gerçekleştirilir [16].



Şekil 3.3. Karbon ve grafit elyafların üretim süreçleri [16].

Karbonizasyon, PAN'ı karbona dönüştürür ve 1.800-2.700°F de bir nitrojen atmosferinde gerçekleştirilir. Karbonizasyon sırasında liflerin çapı küçüp ve ağırlıklarının yaklaşık %50'sini kaybetmektedir. Gerçek bir grafit elyaf isteniyorsa, bu durumda elyaf, daha kristal bir yapı ve daha yüksek bir elastik modül üreten 3.600°F ile 5.500°F arasındaki sıcaklıklarda grafitleştirilir. Son adım olan yüzey işlemi, elyaf-matriks bağımlı geliştirmek için gerçekleştirilir ve genellikle bir elektrolitik alkali banyoda yapılır. Yüzey işlemi, polimerik matris ile bağlanabilen lif yüzeyine karboksil, karbonil ve hidroksil gruplarını bağlar. Elyaf dokunacaksa, elyaf yüzeyini mekanik aşınmadan korumak için elyafa epoksi uygulanır [16].

Zift bazlı karbon ve grafit lifler, kömür katranı ziftini 800°F'de 40 saate kadar ısıtarak, mezofaz olarak bilinen yüksek derecede moleküler düzene sahip yüksek viskoziteli bir sıvı oluşturarak meydana getirir. Oryantasyon, ziftin karbona konsolidasyonunun kolaylığından sorumludur. Mezofaz daha sonra molekülleri fiber eksenine boyunca hizalayarak küçük bir delikten döndürülür. Zift bazlı fiberler daha sonra PAN bazlı fiber üretiminde kullanılanla aynı temel adımlar izlenerek işlenir, yani gerdirme,

karbonizasyon, grafitleştirme ve yüzey işleme aşaması. Zift bazlı grafit fiberler, PAN prosesi ile üretilen karbon fiberlerden daha yüksek modüle ve daha düşük mukavemete sahip olmaları ile karakterize edilmektedir. Modülü 50 ile 145 msi arasında olan zift bazlı yüksek modüllü grafit lifler genellikle yüksek sertlik gerektiren uzay yapılarında kullanılmaktadır. Grafit lifler için grafitleştirme işleminde kullanılan daha yüksek sıcaklıklar, grafit sistallitlerin lif eksenine daha yakın oryantasyonu ile sonuçlanır. Kristalitlerin hizalanması ne kadar iyi olursa, fiberin modülü o kadar yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek kristallik aynı zamanda lifi zayıflatır ve bu da daha düşük basınç mukavemeti ile sonuçlanır. Bu nedenle, yüksek kristalli grafit lifler dengeli çekme ve basınç mekanik özellikleri sergilemezler. Yüksek modüllerine ve düşük termal genişlemelerine ek olarak, zift bazlı grafit lifleri yüksek termal iletkenlik değerlerine sahiptir [16].

Karbon ve grafit liflerin mukavemeti, kullanılan öncünün tipine, imalat sırasındaki lif gerilimine, sıcaklığa, işleme koşullarına ve meydana gelen kusurların varlığına bağlıdır. Karbon fiber mikro yapısındaki kusurlar, iç çukurlar, kapanımlar, dış oyuklar, çizikler, sıkışmış filament kalıntıları, çizgiler ve oluklar gibi istenmeyen özellikleri içermektedir. Bu kusurların elyafın gerilme mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi vardır, ancak modül, iletkenlik veya termal genişleme üzerinde çok az etkisi vardır. Hem karbon hem de grafit elyaflar genellikle modül olarak daha negatif hale gelen hafif negatif bir termal genişleme katsayısına sahiptir [16].

Çok çeşitli mukavemet ve modüllere sahip karbon fiberler, birçok üreticiden temin edilebilir. 500 ila 1.000 ksi arasında değişen mukavemetlere ve 30 ila 45 msi arasında değişen modüllere ve %2'ye kadar uzamalara sahip PAN bazlı karbon fiberler ticari olarak temin edilebilir. Standart modüllü PAN lifleri iyi özelliklere ve daha düşük maliyete sahipken, yüksek modüllü PAN lifleri, yüksek işleme sıcaklıkları gerektiğinden daha maliyetlidir. Lifleri 1.800°F'ye ısıtmak, %94 karbon ve %6 nitrojen içeren PAN lifleri verirken, 2.300°F'ye ısıtmak nitrojeni uzaklaştırır ve karbon içeriğini yaklaşık %99,7'ye yükseltir. Daha yüksek işleme sıcaklıkları, kristal yapıyı ve yapının 3 boyutlu yapısını inceltirerek çekme modülünü artırır. Karbon liflerinin çapı genellikle 0,3 ila 0,4 mil arasında değişir. Karbon lifleri, "kıtık" adı verilen bükülmemiş lif demetlerinde sağlanır. İp boyutları, kıtık başına 1.000 fiber kadar

küçükten, kıtık başına > 200.000 fibere kadar değişebilir. Tipik bir "12k kıtık" tanımı, kıtığın 12.000 lif içerdiğini göstermektedir. Normalde, çekme boyutu küçüldükçe mukavemet ve maliyet artmaktadır. Havacılık ve uzay yapıları için, normal çekme boyutları 3k, 6k ve 12k'dir, dokuma kumaş için en yaygın olanı 3k ve 6k ve tek yönlü bant için 12k'dir. Maliyetler, büyük kıtıklı ticari lifler için pound başına 10 doların altından, küçük kıtıklı ultra yüksek modüllü zift bazlı lifler için libre başına birkaç yüz dolara kadar değişebilir. Oksitleyici bir atmosferde karbon ve grafit lifler için maksimum kullanım sıcaklığı 930°F'dir [16].

İdeal mühendislik malzemesi yüksek mukavemete, yüksek sertliğe, yüksek tokluğa ve düşük ağırlığa sahip olmalıdır. Polimer matrislerle birleştirilen karbon fiberler, bu kriterleri diğer malzemelerden daha yakından karşılamaktadır. Karbon fiberler normal sıcaklıklarda kırılmaya karşı elastiktir, sürünmeye karşı dirençlidir ve bozulmaya karşı hassas değildir, güçlü oksitleyici ortamlar veya belirli erimiş metallere temas dışında kimyasal olarak inerttir ve mükemmel sönümlenme özelliklerine sahiptir. Karbon fiberlerin bazı dezavantajları şunlardır: kırılabilirler ve düşük darbe direncine sahiptirler; baskılara karşı düşük gerilimleri vardır, basınç dayanımları, çekme dayanımlarından daha azdır ve cam elyaflara kıyasla nispeten pahalıdır [16].

Fathi vd. fiber asit işleminin doymamış polyester/karbon fiber tek yönlü kompozitlerin dinamik mekanik özellikleri üzerindeki etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, karbon fiberin sülfürik asit ile yüzey modifikasyonu incelemiştir. Karbon fiberin yüzey pürüzlülüğünde karşılık gelen değişiklikleri yakalamak için Atomik Kuvvet Mikroskopu ile gözlem yapmışlardır. Ayrıca, işlem görmüş ve işlem görmemiş lifler kullanılarak doymamış polyester tek yönlü kompozit çubuklar hazırlanmış ve üç nokta eğilme ve dinamik mekanik termal analiz ile eğilme özelliklerini belirlemiştir. Sonuçlar, tüm numunelerde karbon fiber yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir. Ayrıca fiberin işlenmesinin kayıp modülünün büyüklüğünü azalttığı da bulunmuştur. Ayrıca, işlenmiş karbon fiberden yapılan kompozitlerin eğilme mukavemeti önemli ölçüde artmıştır [20].

Edoziuno vd. parçacıklı odun kömürü ve deniz salyangozu kabuğu ile güçlendirilmiş polyester matris hibrit kompozitin tribolojik (kuru kayma aşınması) davranışı üzerine

yapmış oldukları çalışmada polyester esaslı hibrit kompozitleri, 75 mm boyutunda odun kömürü ve deniz salyangozu kabuğu kullanılarak çeşitli oranlarda karışımlarda partikül takviyesi meydana getirmişlerdir. Hibrit kompozit numuneler üzerinde sırasıyla Brinell sertlik test cihazı, pin on-disk tribometre ve SEM teknikleri kullanılarak sertlik, kuru kayma aşınması ve morfolojik incelemeler yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, tüm hibrit kompozitlerin, takviye edilmemiş polyester reçine ve ağırlıkça %5 takviye konsantrasyonunda sadece odun kömürü ile takviye edilmiş polyester numuneye göre daha iyi özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Sertlik ve aşınma özelliklerinin optimum kombinasyonu, eşit oranda odun kömürü ve deniz salyangozu kabuğu parçacıkları ile takviye edilmiş hibrit kompozit numune ile elde edilmiştir. 1/3 oranında odun kömürü tozu içeriği üzerine deniz salyangozu kabuğu parçacıklarının ilaveleri, hibrit kompozitlerin sertlik ve aşınma özelliklerinde, takviyesiz polyester reçineninkinin altında keskin bir düşüşe neden olmuştur. SEM-EDX analizi, ana elementler olarak değişen oranlarda karbon, kalsiyum, silikon, potasyum, demir ve alüminyumun varlığını ortaya çıkarmış, bu da hibrit kompozitlerin gözlenen sertlik ve aşınma özellikleriyle sonuçlanmıştır [21].

3.5. KIRPILMIŞ ELYAFLAR

Kırpılmış elyaflar (Şekil 3.4), sıkıştırma ve enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçalarda daha yüksek mukavemet sağlamaktadır. Daha kısa öğütülmüş elyaflar ve daha uzun elyaf mevcut olmasına rağmen, kıyılmış elyaflar genellikle 0,125 ila 2 inç arasında çeşitli uzunluklarda mevcuttur. Sıkıştırma veya enjeksiyon kalıplama, kapsülleme ve diğer işlemler için kalıplama bileşikleri hazırlamak için reçineler ve diğer katkı maddeleri ile karıştırılırlar. Çoğu ısıyla sertleşen ve termoplastik reçine sistemiyle optimum uyumluluk sağlamak için birçok yüzey işlemiyle birlikte kıyılmış cam takviye çimentosu mevcuttur. Daha kısa kıyılmış takviyeler, enjeksiyon kalıplama için termoplastik reçine sistemleriyle karıştırmak için en uygun olanıdır. Daha uzun doğranmış takviyeler, sıkıştırma ve transfer kalıplama için ısıyla sertleşen reçinelerle karıştırılır. Öğütülmüş elyaflar, takviye özelliklerini kapsülleme veya enjeksiyon kalıplamada işleme kolaylığı ile birleştirir. Kırpılmış elyaflar, 1/32 ila 1/8 inç uzunluğunda lifli cam elyaflarıdır. Mukavemet gereksinimlerinin düşük ila orta

düzeyde olduğu termoplastik parçaların güçlendirilmesi ve dolgu ve yapıştırıcıların güçlendirilmesi için kullanılmaktadırlar [16].



Şekil 3.4. Kırpılmış elyaf [16].

Kiran vd., nikel kaplı kısa karbon elyaf takviyeli polyester kompozitin çekme ve darbe mukavemeti üzerine yapmış oldukları çalışmada nikel kaplı kısa karbon elyaf takviyeli polyester kompozit açık kalıplama tekniği kullanılarak üretmişlerdir. Karıştırarak döküm tekniği kullanılarak, ağırlıkça %0, ağırlıkça %0,05, ağırlıkça %0,1 ve ağırlıkça %0,2 gibi farklı ağırlık yüzdelerinde nikel kaplı kısa karbon fiber (NCF), polyester, sertleştirici ve hızlandırıcı ile karıştırılarak kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin çekme ve darbe dayanımı ASTM Standartlarına göre yapılmıştır. Nikel kaplı kısa karbon takviyeli kompozitlerin daha yüksek ağırlık yüzdesi, daha iyi darbe ve çekme mukavemetine sahip olduğu SEM ile analiz edilmiştir [22].

Benzer bir çalışmada ise Bahadır vd., kısa cam elyafları ile güçlendirmiş polyesterin mekanik ve tribolojik davranışı üzerine yapmış olduğu çalışmada termoset polyesterin kısa cam elyaflarla güçlendirilmesinin etkisi, ortaya çıkan mekanik özellikler ve tribolojik davranış açısından araştırılmıştır. Yapılan araştırma kısa cam elyafları takviyesi ile polyesterin mekanik özelliklerinde artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Cam elyafların ağırlıkça oranı, %0 ila %50 arasında değişmiştir. Aşınma yüzeylerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır [23].

3.6. FARKLI ELYAFLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Düşük maliyeti, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek darbe direnci ve iyi kimyasal direnci nedeniyle, cam elyaflar ticari kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikleri, yüksek performanslı kompozit uygulamalar için karbon fiberlerinkilerle karşılaştırılmaz. Nispeten düşük bir modüle sahiptirler ve karbon fiberlere kıyasla daha düşük yorulma özelliklerine sahiptirler. Kompozitlerde kullanılan en yaygın üç cam elyafı E-cam, S-2 cam ve kuvarstır [16].

Aramid elyaflar, iyi bir gerilme mukavemeti ve modülü, hafiflik, mükemmel tokluk ile olağanüstü balistik ve darbe direncinin bir kombinasyonuna sahiptir. Bununla birlikte, matrise yapışma eksikliği nedeniyle, nispeten zayıf enine gerilim, boyuna sıkıştırma mukavemetleri sergilerler [16].

Karbon ve grafit fiberler, yüksek performanslı kompozit yapılarda en yaygın olarak kullanılan fiber yapılardır. Karbon ve grafit lifleri çok çeşitli özelliklerde üretilebilir; bununla birlikte, genellikle üstün çekme ve basınç dayanımı sergilerler, yüksek modüllere sahiptirler, mükemmel yorulma özelliklerine sahiptirler ve korozyona dayanımları çok yüksektir. Düşük verimi ve yüksek maliyeti nedeniyle rayon (ipek kumaş) çok sık tercih edilmese, karbon lifler, grafit lifler, suni ipek, zift bazlı lifler veya PAN sık tercih edilmektedir. 500 ila 1.000 ksi arasında değişen mukavemetlere ve 30 ila 45 msi arasında değişen modüllere ve %2'ye kadar uzamalara sahip PAN bazlı karbon fiberlerin ticari kullanımı çok fazladır [16].

Modülü 50 ile 145 msi arasında olan zift bazlı yüksek modüllü grafit lifler genellikle yüksek sertlik gerektiren uzay yapılarında kullanılmaktadır [16].

İki boyutlu dokuma ürünler genellikle 0°, 90° konstrüksiyon olarak üretilmektedir. Dokumalar, iki ortogonal (karşılıklı olarak dik) iplik setinin (çözgü ve dolgu) birbirine geçmesiyle bir tezgâhta üretilir. Çözgü yönü rulonun uzunluğuna paralelken, dolgu, atkı veya atkı yönü rulonun uzunluğuna dik şekildedir. Örgüler, düz örgüler, sepet örgüler, saten örgüler, dimi örgüler, leno ve sahte leno örgüler dahil olmak üzere geçme desenine göre sınıflandırılabilir. Daha düşük mekanik özellikler gerektiren

parçalar için güçlendirilmiş paspaslar (doğranmış lifler veya kıvrılmış lifler) ve doğranmış lifler de mevcuttur [16].

Prabhu vd., hibrit nanokil cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik ve işleme parametrelerinin deneysel olarak incelediği çalışmada, cam elyaf takviyeli polyester kompozitlere nanokil ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Saf cam elyaf takviyeli polyester kompozitler değişen ağırlık fraksiyonunda (%0, 1, 2, 3, 4 ve 5 ağırlık) hibrit nanokil ve cam elyafı takviyeli polyester kompozit, vakum destekli reçine infüzyon tekniği ile üretilmiştir. Kritik stres yoğunluğu faktörünü ve kritik gerinim enerjisi salınım oranını analiz etmek için kırılma tokluğu çalışmaları yapılmıştır. Optimum mekanik özellikler, ağırlıkça %3 kil içeriğine sahip hibrit nanokil cam elyaf takviyeli polyester kompozitler için elde edilmiştir. Makalede ayrıca, delme işlemi sırasında hibrit nanokil cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerde maksimum mekanik özellikler elde etmek için kesme parametrelerinin (kesme hızı ve ilerleme hızı) optimize edilmesi çalışmasından da bahsedilmektedir. Kesme hızındaki artıştan torkun etkilenmediği bulunmuştur. Delinmiş numuneler ayrıca mekanik testlere tabi tutulmuştur. Çekme çalışmaları, ağırlıkça %3 nanokil ve cam elyaf takviyeli polyester nanokompozitler için optimum işleme parametresi (0,045 mm/dev, 210 Rpm) için daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiğini doğrulamaktadır. Hibrit kil ve cam elyaf takviyeli nanokompozitlerin, genellikle saf cam elyaf takviyeli polyester kompozitlere kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [24].

Ravikumar vd., çift yönlü jüt/karbon elyaf takviyeli polyester hibrit kompozitlerin tribolojik özelliklerinin İncelenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, çift yönlü jüt/karbon fiber takviyeli polyester kompozitlerin tribolojik performansını tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak araştırmıştır. Fiber ağırlık oranı, yük ve kayma hızı olmak üzere üç faktörün aşınma ve sürtünme değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kompozitler, sıkıştırma kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiş ve kuru kayma testi, disk üzerinde pim makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, polyester matris ve dönen disk arasındaki temasın azalması nedeniyle kayma hızı ve yükündeki artışla aşınma kaybının arttığını ve ağırlık hacim fraksiyonundaki artışla azaldığını ortaya çıkarmıştır. Ancak, süreç değişkenlerinin artmasıyla sürtünme

katsayısı azalmıştır. Ayrıca, aşınmış örneklerin morfolojisi, aşınma mekanizmalarını anlamak için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir [25].

Ayrıca, EL-Wazery'in yapmış olduğu cam-bazalt karbon/polyester hibrit kompozitlerin mekanik karakterizasyonu üzerine yapmış olduğu çalışmada, hibrit kompozitlerin istifleme dizilerinin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, tabakalar arası kesme mukavemeti ve darbe enerjisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hibrit cam, bazalt, karbon/polyester kompozit laminatları, oda sıcaklığında el yatırması tekniği ile üretilmiştir. Çekme ve eğilme testinden sonra kompozit laminatların kırılma yüzeyi, taramalı elektron mikrografi (SEM) ile incelenmiştir. Sonuçlar, istifleme dizilerinde [C/B/C/B/C] kompozit laminatlar S5 laminantları için en iyi mekanik özelliklerin elde edildiğini göstermektedir; burada çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve ILSS sırasıyla 148 MPa, 448 MPa ve 25 MPa dır. Mekanik özelliklerdeki bu düşüş, lifler ve matris arasındaki iyi ara yüzey bağından kaynaklanmaktadır [26].

Feller vd., iletken polimer kompozitler: poli(ester)-kısa karbon fiberler ve poli(epoksi)-kısa karbon fiberlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin karşılaştırmalı çalışması sonucunda poli(ester) ve poli(epoksi) matrisli iletken polimer kompozitlerin (CPC) mekanik ve elektriksel özellikleri üzerine kısa karbon fiberlerin ek kapatma elyafı (SCF) eklenmesinin etkisi incelemiştirlerdir. Elektriksel ölçümler, 90 ve 160 jC arasında küçük bir genlikli bir etki göstermektedir. Yaklaşık %1 v/v SCF için perkolasyon eşiğine ulaşılmaktadır ve poli(ester) matrisi ile daha yüksek iletkenlik elde edilmektedir [27].

BÖLÜM 4

TERMOSET REÇİNELER

Termoset kompozit matrisler, polyesterleri, vinil esterleri, epoksileri, bismaleimidleri, siyanat esterleri, poliimidleri ve fenolikleri içermektedir. Epoksiler düşük ve orta sıcaklıklarda (275 °F'ye kadar) kullanılan baskın reçinelerdir. Bismaleimidler esas olarak 275-350 °F sıcaklık aralığında kullanılmaktadır. Çok yüksek sıcaklık uygulamaları için (550-600 °F'ye kadar), poliimidler genellikle tercih edilen malzemedir. Epoksilerle yaklaşık olarak aynı sıcaklıklarda kullanılabilen polyesterler ve vinil esterler, ticari uygulamalar için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak düşük mekanik özelliklerinden dolayı yüksek performanslı kompozit matrisler için nadiren kullanılmaktadır. Siyanat esterleri hem epoksiler hem de bismaleimidlerle rekabet etmek üzere tasarlanmış nispeten yeni bir reçine türüdür ve daha düşük nem emme ve çekici elektriksel özelliklerde bazı avantajları bulunmaktadır, ancak önemli ölçüde fiyat farkı vardır. Fenolikler, olağanüstü duman ve yangın direnci sunan ve sıklıkla uçak iç bileşenleri için kullanılan reçinelerdir. Yüksek kömür verimleri nedeniyle, karbon-karbon (C-C) bileşenleri için ablatör ve öncü olarak da kullanılabilirler [16].

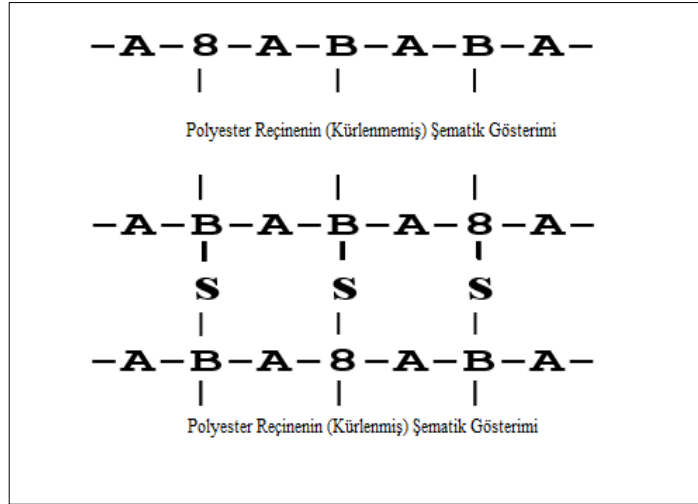
4.1. POLYESTER REÇİNELER

Polyesterler ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ancak yüksek performanslı kompozitler için kullanımları sınırlıdır. Epoksilerden daha düşük maliyetlidir. Genellikle daha düşük ergime sıcaklığına, düşük mekanik özelliklere ve hava şartlarına karşı düşük dayanıklılığa sahiptirler. Bu sebeple epoksilere kıyasla göstermiş oldukları performans daha düşüktür [16].

Polyesterler, doymamış karbon-karbon çift bağlarının (C=C) olduğu ekleme reaksiyonları ile oluşur. Tipik bir polyester en az üç bileşenden oluşur: bir polyester,

iki stiren gibi çapraz bağlama maddesi ve üç başlatıcı. Genellikle metil etil keton peroksit (MEKP) veya benzoil peroksit (BPO) gibi bir peroksit başlatıcı olarak kullanılmaktadır. Stiren, çapraz bağlama maddesi görevi görür ve ayrıca işlenebilirliği iyileştirmek için viskoziteyi düşürmektedir. Stiren tek sertleştirici (çapraz bağlayıcı) değildir. Diğerleri arasında vinil toluen, klorostiren (alev geciktirici), metil metakrilat (iyileştirilmiş hava koşullarına dayanıklılık) ve düşük viskoziteye sahip olan ve genellikle prepregler için kullanılan dialil ftalat bulunmaktadır. Elde edilen polyesterin özellikleri, kullanılan çapraz bağlama veya sertleştiriciye büyük ölçüde bağlıdır. Polyesterlerin ana avantajlarından biri, işlenmelerinde çok yönlülük sağlayarak, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda kürlenecek şekilde formüle edilebilmeleridir [16].

Tipik bir polyesterin temel kimyasal yapısı, ester grupları ve doymamış çift bağlı reaktif gruplardır ($C=C$). Polyesterler genellikle bir monomer, stiren içindeki bir polyester çözeltilisinden oluşan viskoz sıvılardır. %50'ye kadar olan stiren, çözeltinin viskozitesini azaltır, böylece işlenebilirliği artırır ve ayrıca sert bir çapraz bağlı yapı oluşturmak için polyester zincirle reaksiyona girmektedir. Stiren ile çapraz bağlı polyester ağının oluşumu şematik olarak Şekil 5.1'te gösterilmiştir. Tek başına bir polyester ve stiren çözeltisi, pratik amaçlar için çok yavaş polimerize olmaktadır; bu nedenle, reaksiyonu hızlandırmak için her zaman az miktarda hızlandırıcı veya katalizör eklenmelidir. Polimerizasyon reaksiyonunu başlatmak için kullanımdan hemen önce reçineye katalizörler eklenir. Katalizör aslında kimyasal reaksiyonda yer almaz, sadece süreci aktive etmektedir. Reaksiyonu hızlandırmak için kobalt naftenat, dietil anilin ve dimetil anilin gibi hızlandırıcılar da eklenebilir. Çok çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler sağlayan çok çeşitli monomerler ve sertleştirme maddeleri mevcuttur. Örneğin, benzen halkası rijitliği ve termal kararlılığı arttırmaktadır [16].



Şekil 4.1. Polyester mekanizması [16].

Vinil esterler polyesterlere çok benzer, ancak moleküler zincirin sonunda sadece reaktif gruplara sahiptir. Bu, daha düşük çapraz bağlantı yoğunluklarıyla sonuçlandığından, vinil esterler normalde daha yüksek çapraz bağlı polyesterlerden daha toktur. Ayrıca ester grubu su ile hidrolize duyarlı olduğundan ve vinil esterler polyesterlerden daha az ester grubuna sahip olduğundan su ve neme karşı bozulmaya daha dirençlidirler [16].

Polyester reçineler ile kompozit üretimi üzerine birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Doğal çalışmalarda, doğal elyaf takviyelerin yanı sıra sentetik elyaf takviyeli polyester reçineler de sıklıkla kullanılmaktadır [16].

Daramola vd., işlenmiş ananas yaprağı takviyeli polyester matris kompozitlerin mekanik özellikleri ve su emme davranışı üzerine yapmış oldukları çalışmada, işlenmiş ananas yaprağı lifinin takviye edildiği polyester kompozitlerin mekanik özellikleri ve su emme davranışı üzerindeki etkisini incelemek için araştırmalar yapmışlardır. İşlenmiş ananas yaprağı lifinin, ananas bitkisinden suda bekletme yöntemi kullanılarak ekstrakte edilmiştir. Matris ile takviye elemanı olan elyaf, oda sıcaklığında elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numunelere çekme testi, eğilme testi, sertlik testi ve su emme testi uygulanmıştır. Matris içindeki lif içeriği arttıkça, kopma uzamasında azalma olurken, nihai çekme mukavemetinde ve elastisite modülünde karşılık gelen bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen kompozitlerin

eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve sertlik özellikleri ağırlıkça %10'dan ağırlıkça %30'a kadar lineer olarak artmıştır. Su emme testinin sonuçları, kompozit tarafından emilen su miktarının elyaf takviyesindeki artışla beraber arttığını göstermiştir [28].

Pereira vd., pike kumaş takviyeli polyester matris kompozitin charpy tokluk davranışı üzerine yapmış oldukları çalışmada Kolombiya'da çuval üretimi için kullanılan Fique lifi ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Fique lifi mekanik özellikler bakımından diğer bazı lignoselülozik liflere göre birçok yönden üstün olduğu için tercih edilmiştir. %30'a kadar takviye edilmiş polyester matris kompozitlerinin tokluk davranışları incelenmiştir. Fique kumaş ilavesinin, kompozitler tarafından emilen enerjide belirgin bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Darbe sonrası numunelerin makroskopik gözlemi ve SEM kırılma analizi, polyester matrisi ile fique kumaş arayüzü boyunca enine kopmanın bu kompozitlerin olağanüstü tokluğunun ana mekanizması olduğunu göstermiştir [29].

Gokdai vd., Suya dayanıklı yeşil kompozit malzemeler üretmek için Makrana mermer atıklarını kullanmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Doğal liflerin sentetik liflere göre düşük yoğunluk, düşük maliyet ve kabul edilebilir spesifiklik gibi birçok avantajının olabileceğine değinmişlerdir. Bu çalışmada, dökme yöntemi ile çam kozalağı ve mermer atığı ve dolgu olarak ATH tozu ve matris malzemesi olarak polyester kullanılarak polimer matrisli kompozitler üretilmiştir. Polyester matris kompozitleri üretmek için çapraz bağlantı ağ yapısı için sertleştirici olarak metil etil keton peroksit ve hızlandırıcı olarak kobalt naftenat kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmış ve nihai ürün testlere tabii tutulmuştur. Araştırmacıların çevresel açıdan sürdürülebilir ürünlere duyulan ihtiyacın artması üzerine yapmış oldukları testlerde mekanik ve fiziksel analizin deneysel sonuçları, seçilen dolgu malzemelerinin beklenen özellikleri desteklemediğini göstermiştir. Kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti ve sertlik değerlerinin takviye oranındaki artış ile azaldığını tespit etmişlerdir [30].

Indran vd., doymamış polyester matrisli kompozitlerde cissus quadrangularis bitkisinin kök lif takviyesinde selüloz tozu uygulaması çalışmasında, biyolojik olarak yenilenebilir kaynaklardan elde edilen doğal liflerin, tehlikeli sentetik lifler için

alternatif bir takviye olarak kullanılma potansiyeline sahip olabileceği tespit etmişlerdir. İncelenen *Cissus quadrangularis* gövde lifi (CQSF) gibi doğal lifler, polimer kompozit takviyesi için kanıtlanmış termomekanik özelliklere sahiptir. İşlenmiş fiber kompozitlerin mekanik özellikleri, mekanik özelliklerin değerlendirilmesiyle daha da doğrulanmış taramalı elektron mikroskobu analizi yoluyla iyi bağlanma özellikleri ortaya koymaktadır. Özellikle, ağırlıkça %5 selüloz tozu ile işlenmiş CQSF/polyester kompozitlerinde, mekanik ve su emme özelliklerinde belirgin bir artış olduğunu göstermiştir [31].

Candido vd., Charpy darbe testleri ile değerlendirilen şeker kamışı kütse lifleri ile güçlendirilmiş polyester matrisli kompozitlerin tokluğu üzerine yapmış oldukları çalışmada, şeker kamışı küspesinden ekstrakte edilen liflerin, polimer matrisli kompozitler için olası takviye malzemesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu çalışmada, darbe enerjisini değerlendirmek için hacimce %10, 20 ve 30 oranında sürekli ve hizalanmış şeker kamışı kütse lifleri ile güçlendirilmiş polyester matrisli kompozitlerin ASTM standart numunelerinde Charpy testleri yapılmıştır. Standart sapma içinde, kompozitte emilen darbe enerjisi, şeker kamışı kütse lifinin hacim oranı ile artmıştır. Bu dayanıklılık performansı, fiber/matris delaminasyonu ile ilişkili taramalı elektron mikroskobu ile de doğrulanmıştır [32].

Başka bir çalışmada ise El-Tayeb vd., pürüzsüz paslanmaz çelik karşı yüzeye karşı kayan csm 450-r-cam elyafı ile güçlendirilmiş polyesterin tribolojik performansını incelemek için kıyılmış şerit hasır (CSM) 450-R-cam elyaf takviyeli polyester (CGRP) kompozit üzerinde deneysel araştırma yapmışlardır. Sürtünme ve aşınma testleri, kuru kayan temas koşulları altında disk üzerinde pim konfigürasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada, CGRP kompozitinin tribolojik özellikleri, kompozitlerdeki doğranmış cam mat oryantasyonuna göre üç ana kayma yönünde ölçülmüştür. Bunlar paralel yön (P), paralel yön (AP) ve normal yöndür (N). Aşınma mekanizmalarını sınıflandırmak için aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sürtünme ve aşınma sonuçları, genel olarak, tüm test parametrelerinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir. En yüksek aşınma oranı, test edilen tüm hızlarda da (1,7, 2,8 ve 3,9 m/s) N yönündeki kaymada meydana gelmiştir [33].

El-Tayeb vd., ekibinin yaptığı bir başka çalışmada ise çok geçişli aşındırıcı aşınma uygulamaları için cam elyaf takviyeli polyester kompozitleri incelemiştir. Çok geçişli iki gövdeli aşındırıcı (m-2BA) kıyılmış şeritli keçe (CSM) 450-R-cam elyaf takviyeli polyester (CGRP) kompozit malzemenin aşınma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, kuru temas koşulu altında SiC aşındırıcı kâğıt ile halka üzerinde pim konfigürasyonu kullanılmıştır. Üç farklı (1500, 1000 ve 400) zımpara kademesi ile yapılan çalışmada tane boyutu küçük olan zımparanın meydana getirdiği aşınmanın tane boyutu büyük olan zımpraya kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir [34].

Yılmaz vd., CaCO₃/cam elyaf takviyeli polyester kompozitin mukavemeti ve aşındırıcı davranışının incelenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, CaCO₃ dolgululu doymamış polyester/cam elyaf (UPR/GFR) kompozitinin mukavemet ve aşındırıcı özellikleri değerlendirmişlerdir. Ağırlıkça %40, 50 ve 60 oranında CaCO₃ içeren ve farklı CaCO₃ partikül boyutları 1, 2, 3, 5 ve 10 mikron olan UPR numuneleri test edilmiştir. Doymamış polyester/cam elyafı (UPR kompozit) /CaCO₃ kompozitlerinin çekme mukavemeti, sertliği ve erozyon aşınma oranı elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kompozitteki CaCO₃ yüzdesi ne kadar yüksekse ve CaCO₃ partikül boyutu ne kadar küçükse, cam elyaf takviyeli/doymamış dereceli polyester kompozitin (UPR-GFR) mukavemeti ve aşındırıcı direnci o kadar yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, en yüksek erozyon aşınma oranı 90° çarpma açısında elde edilmiştir. Son olarak sonuçlar, CaCO₃ içerikli UPR/GFR kompozitinin eroziv aşınmasının gevrek bir şekilde olduğunu göstermektedir [35].

4.2. EPOKSİ REÇİENELER

Epoksiler, yüksek performanslı kompozitler ve yapıştırıcılar için en yaygın matris malzemesidir. Yüksek mukavemet, iyi yapışma, düşük büzülme ve iyi işlenebilme gibi özelliklere sahiptirler. Ticari epoksi matrisleri ve yapıştırıcılar, epoksi ve sertleştiriciden oluşmaktadır; bununla birlikte, çoğu ana epoksi, bir ila üç küçük epoksi ve bir veya iki sertleştirme maddesi içermektedir. Küçük epoksiler, viskozite kontrolü sağlamak, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmek, nem emilimini azaltmak veya tokluğu geliştirmek için eklenmektedir. Bir epoksi reçine sisteminin kürlenmesi, düşük moleküler ağırlıklı reçineler ve kürleme elamanlarından oluşur, bunlar ısı altında oda

sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek yüksek çapraz bağlı yapılar oluşturur. Hatırlanması gereken önemli noktalar şunlardır:

- Ticari matris reçineleri ve yapıştırıcılar genellikle iki veya daha fazla epoksinin bir veya iki kürlenme maddesiyle birleştirilmesinden oluşan bir karışımdır. Epoksi matris sistemlerinin ve yüksek sıcaklık yapıştırıcılarının çoğunda bulunan ana epoksi, TGMDA'dır. Sıklıkla, viskoziteyi kontrol etmek veya modül veya tokluk gibi nihai kürlenmiş özellikleri etkilemek için iki veya bazen üç minör epoksi eklenir. Matris reçinelerinde ve birçok yapıştırıcıda kullanılan başlıca sertleştirici DDS'dir. Akışı azaltmak ve kürlenme sürecini hızlandırmak için başta BF₃ olmak üzere katalitik kürlenme maddeleri eklenebilir. Hem kompozit matrisler hem de yapıştırıcılar için epoksi reçineler, işlenebilirlik ve nihai özelliklerin en iyi kombinasyonunu sağlamak için gerçek anlamda tasarlanmış sistemlerdir [16].
- Daha yüksek kürlenme sıcaklıkları ve uzun kürlenme süreleri en yüksek Tg'leri verir. Yüksek işlevsellik (örneğin, dört reaktif uç grubu) ile birleştirildiğinde, güçlü ve sert ancak biraz kırılabilir yapılar veren mümkün olan en yüksek çapraz bağlantı yoğunlukları elde edilir. Reçine sıklıkla çeşitli yollarla sertleştirilir, ancak bu sıklıkla daha düşük kullanım sıcaklıkları ile sonuçlanır. Plastikleştirici birimlerin (epoksi veya sertleştirici ürün) kullanımı, Tg, çekme ve sıkıştırma mukavemeti ve modülü pahasına yüksek bir uzama ve darbe mukavemeti sağlar. Bununla birlikte, epoksi kimyası ve formülasyonundaki son gelişmeler, kabul edilebilir yüksek sıcaklık performansına sahip çok daha sert reçine sistemlerine izin vermiştir [16].
- Epoksi matrisler ve yapıştırıcılar, aslında neredeyse tüm termoset reçineler, atmosferdeki nemi emer ve bu da yüksek sıcaklık matrisine bağlı özelliklerini bozmaktadır [16].

Oliveira vd., okalıptüs lifleri ile takviye edilmiş epoksi ve polyester matrisli kompozitlerin çekme davranışının karşılaştırılması çalışmasında, doğal liflerle güçlendirilmiş kompozitlerin ekonomik, teknik, toplumsal ve çevresel avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir. Mevcut çalışma, doğal okalıptüs lifleri ile güçlendirilmiş polimerik kompozitlerin çekme ve mekanik davranışını karşılaştırmaktadır. Matris

malzemesi olarak epoksi ve polyester kullanmışlardır. Sonuçlar, her iki durumda da okalıptüs liflerinin eklenmesinin matris takviyesi ile mekanik özelliklerin artışı üzerinde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [36].

Fındık vd., cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerin yapısal özellikleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, mukavemet ve sünekliğin en iyi kombinasyonunun, ana malzemeye gömülü fiberlerden oluşan katılarda gerçekleştirilebileceğinden bahsetmişlerdir. Reçine olarak polyester, takviye olarak cam elyaf kullanmışlardır. Çalışmada, cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerin yapısal özellikleri incelenmiştir. Cam elyaf içeriği ağırlıkça %9 ila %33 arasında değişmektedir. Yapısal özellikleri araştırmak için Charpy darbe, çekme, eğilme ve sertlik testleri kullanılmıştır. Sonuç olarak kompozit malzemede cam elyaf oranının artması ile çekme ve eğilme mukavemeti artmıştır. Ancak kompozitler malzemelerde genel olarak gözlemlendiği üzere belirli bir oranın üzerinde eklenen cam elyaf % uzama miktarını azaltmaktadır [37].

Wazerya vd., cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine yapmış oldukları çalışmada cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin, farklı elyaf yüzdeleri (%15, %30, %45 ve ağırlıkça %60) ile rastgele yönlendirilmiş takviyeli polimer kompozitli E-cam elyafları incelemiştir. Elle yatırma tekniği kullanılmıştır. Cam elyaf yüzdesinin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Kompozitlerin sertlikleri Brinell sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, cam elyaf içeriğindeki artışla birlikte üretilen kompozitin mekanik özelliklerinde dikkate değer bir artış olduğunu göstermiştir [38].

Springer vd., çevresel faktörlerin cam elyaf takviyeli polyester ve vinylester kompozitler üzerindeki etkileri üzerine yapmış oldukları çalışmada sıvılara ve nemli havaya daldırılan cam elyaf takviyeli polyester ve vinylester kompozitler üzerinde ortamın etkileri araştırmışlardır. Testler 23°C ve 93°C sıcaklıklarında, malzemeler yüzde 50 ve yüzde 100 bağıl nemde nemli havaya ve beş farklı sıvıya maruz bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlık, nihai çekme mukavemeti, çekme modülü, kısa kiriş kesme mukavemeti ve kesme modülündeki değişiklikler altı aylık bir süre

boyunca ölçülmüş ve ortamın bu parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak takviye oranının belirli bir doyum miktarına ulaşınca kadar mekanik özellikleri arttırdığı sonucuna varılmıştır [39].

4.3. POLİMİD REÇİENELER

Poliimidler, 500-600 °F kadar yüksek kullanım sıcaklıkları için tasarlanmış yüksek sıcaklık dayanımlı matris malzemeleridir. Yoğuşma ya da ilave kürlenme sistemleri ile üretilebilirler. Yoğuşma yöntemi, kür sırasında ciddi bir uçucu sorununa neden olan su veya su ve alkol açığa çıkartmaktadır. Uçucu maddeler reçine jelleşmeden önce uzaklaştırılmazlarsa, boşluklar ve gözenekler olarak tutulurlar ve bu da matrise bağlı mekanik özellikleri düşürmektedir. Ek olarak, poliimidler genellikle DMF (dimetilformamid), DMAC (dimetilaktamit), NMP (N-metilpirolidon) veya DMSO (dimetilsüfoksit) gibi yüksek sıcaklıkta çözücüler ile formüle edilir, bunların da sertleştirme döngüsü öncesinde veya sırasında çıkarılması gerekmektedir [16].

Poliimidler termoplastik veya termoset olabilir. Örneğin, 430-480 °F aralığında Tg'ye sahip olan Avmid K polimerleri, lineer termoplastik poliimidlerdir. Birkaç kez Tg'lerinin üzerinde basit şekiller halinde ısıyla şekillendirilebilirler ve daha sonra bunun için daha yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gereklidir [16].

Torlons poliamidimidleri, normal poliimidlerden daha düşük Tg'lere (470-525 °F) sahiptir, ancak çok daha yüksek bir tokluğa sahiplerdir. Amit grupları esneklik, uzama ve iyi bir gerilme mukavemeti sağlar. Bir polieterimid olan Ultem, iyi termal dirence, mekanik özelliklere ve iyi işlenebilirliğe sahip ancak daha düşük Tg'ye (420 °F) ve solventlere karşı zayıf dirence sahip başka bir termoplastik poliimididir. Poliimidler ayrıca termoset yapılar üretebilir, örnek olarak Skybond, yoğuşma ile sertleşen termoset malzemeye bir örnektir [16].

Poliimidlerin işlenmesi epoksilerden veya bismaleimidlerden çok daha zordur. Yüksek işleme sıcaklıkları (Örn. 600-700 °F), uzun döngüler ve daha yüksek basınçlar gerektirirler. Uçucu maddeler ve boşluklar, poliimidleri işlerken her zaman potansiyel problemlerdir. Düşük moleküler ağırlıklı monomerler genellikle imalat sırasında

Çözücüler içinde çözüldüğünden, ilave kütleme sistemleri bile uçucu yapılarından dolayı problemler yaratabilir [16].

BÖLÜM 5

TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİ ÜRETİMİ

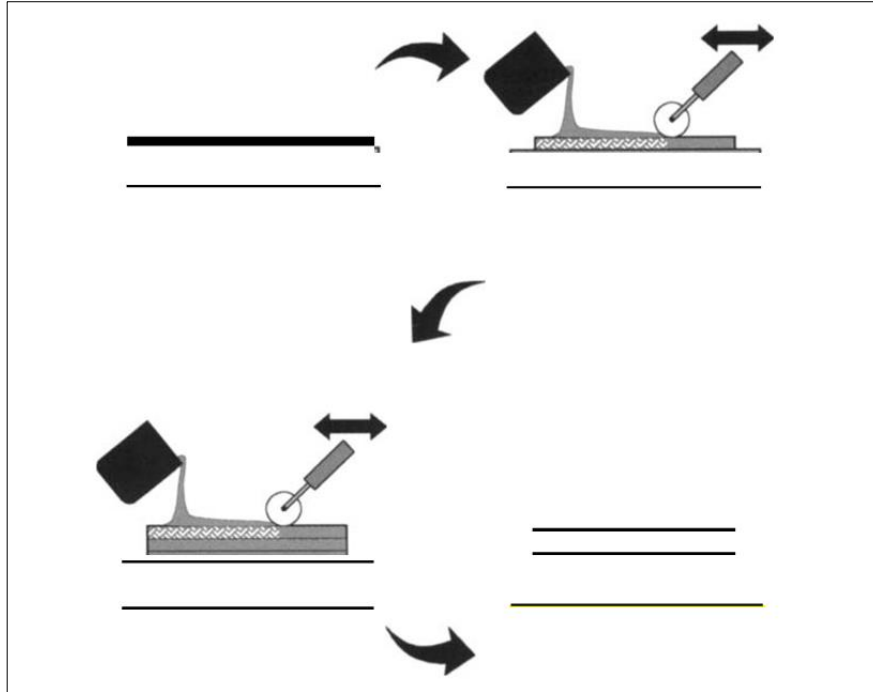
Kompozit malzemelerin kırılma tokluğu, basma dayanımı, kopma uzaması, yorulma direnci ve darbe dayanımı gibi birçok önemli mekanik özelliği matris-lif (takviye) arasındaki arayüzey etkileşimine bağlıdır. Bu arayüzey etkileşimi karbon lif üzerinde yüzey işlemi yapılarak veya matrise uyumlaştırıcı ilave edilerek geliştirilebilmektedir [16].

5.1. EL YATIRMASI

Yerleştirme işlemleri, düşük hacimli orta ila büyük parçaların üretimi için idealdir. Bu işlemler, özel yapım yat gövdeleri gibi minimum alet maliyeti ile çok büyük parçalar üretebilmektedir. Bununla birlikte, Harmanlama ile ilgili manuel yerleştirme süreçleri çok emek gerektirir ve parça kalitesi işçiliğe bağlıdır. Üç yerleştirme süreci bulunmaktadır: (1) ıslak yerleştirme, (2) püskürtme ve (3) düşük sıcaklıkta kütleme/vakum torbası (LTVB) ön hazırlık yerleştirme süreci [16].

Şekil 5.1’de şematik olarak gösterilen ıslak yerleştirme işleminde, genellikle bir dokuma cam fitil veya kumaş olmak üzere kuru bir takviye kalıba manuel olarak yerleştirilir. Daha sonra, dökme, fırçalama veya püskürtme yoluyla donatıya düşük viskoziteli bir sıvı reçine uygulanır. Döşemeyi yoğunlaştırmak, takviyeyi reçineyle iyice ıslatmak ve fazla reçineyi ve sıkışan havayı çıkarmak için silecekler veya silindirler kullanılır. Laminat, gerekli kalınlık elde edilene kadar katman katman oluşturulur. E-cam en sık kullanılan malzemedir, daha yüksek maliyetli ancak üstün özelliklerin gerekli olduğu durumlarda S-2 cam, karbon ve aramid kullanılabilir. Ağır cam dokuma fitiller (500 g m⁻²) kalınlığı hızlı bir şekilde oluşturmak ve işçilik maliyetlerini azaltmak için kullanılır ve yaklaşık %40 cam içeriğine sahip bir parça elde edilir. Ağır dokuma fitiller serme sürelerini azaltsa da ağır dokumaların empenye

edilmesi daha hafif cam giysilere göre daha zordur. Yüksek mukavemetli dokuma fitil veya cam kumaşın gerekli olmadığı durumlarda, maliyetten tasarruf etmek için cam paspaslar kullanılabilir. Cam keçeler, ya sürekli cam şeritlerinin hareketli bir taşıyıcı üzerine döndürüldüğü ve daha sonra bir bağlayıcı ile tutturulduğu sürekli şeritli keçeler ya da doğranmış liflerin (~1-2 inç) hareketli bir taşıyıcı üzerine püskürtüldüğü doğranmış şeritli keçeler olabilir. Bir sıvı, sprey veya toz bağlayıcı ile ısıyla yapıştırılır. Sıklıkla, ağırlıktan ve işçilik maliyetlerinden tasarruf etmek için, petek, balsa veya köpük gibi çekirdek malzemeler, bir tekne gövdesi durumunda yüzdürme sağlamaya da yardımcı olabilecek bir sandviç yapı oluşturmak için eklenir [16].



Şekil 5.1. Tipik ıslak yerleştirme işlemi [16].

Genel olarak, aşırı reçine absorpsiyonunu azaltmak için, köpük çekirdekler sermeden önce kapatılmalıdır. Emprenye elle yapıldığından, boşluklar, reçine bakımından zengin ve reçineden yoksun alanlar sorun olabilir. Donatı alete yerleştirilmeden önce ön emprenye edilerek emprenye kıvamında bir iyileşme elde edilebilir. Bu, düz bir bankın üzerine bir Mylar tabakası (şeffaf plastik levha) yerleştirilerek gerçekleştirilebilir. Mylar tabakaları daha sonra, önceden emprenye edilmiş katları hareket ettirirken desteklemek için kullanılabilir. Bazı üreticiler kaliteyi ve üretkenliği artırmak için kendi emprenye makinelerini üretmişlerdir. Takım tarafında pürüzsüz bir

yüzey finiši sağlamak için, döşemeye başlamadan önce kalıptan çıkarılmış takıma genellikle bir jel kaplama uygulanmaktadır. Kürlenmiş laminat üzerinde reçine açısından zengin bir yüzey sağlayan özel formüle edilmiş reçineler olan jelkotlar, fırçalama veya püskürtme yoluyla uygulanabilir. Jel kaplama için normal kalınlık 0,020-0,040 inç olmalıdır. Jel kaplama çok kalınsa, kullanım sırasında reçine çatlaması gelişebilir. Genellikle, jel kaplama sertleşerek yapışkan bir duruma geldikten sonra döşemeye başlanabilir. Jel kaplamalar esnekliği, kabarma direncini, leke direncini, hava koşullarına dayanıklılığı ve tokluğu geliştirmek için formüle edilebilir. Sert ve esnek jel kaplamalar, laminat yüzeyine darbe ve aşınma direnci sağlayabilir. Jel kaplamalar ayrıca kürlenmiş parçaya çeşitli renkler sağlamak için pigmentlenebilir. Bazı üreticiler ayrıca yüzey kalitesini daha da artırmak için ilk kat olarak ince bir mat veya dokuma kumaş (peçe) kullanmaktadır. Öncelikle yüzey katları için kullanılan tüller, yüzey kalitesini arttırmak için çok ince liflere sahip ince dokumalardan oluşmaktadır [16].

Parça oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda kürlenirse, ahşap, alçı, sac veya cam laminatlardan son derece ucuz maliyet ile üretilebilmektedir. Bu takım yaklaşımları, otoklavla kürlemenin boyutunun ve maliyetinin pratik olmayacağı büyük parçalar için bu işlemi çekici hale getirmektedir. Ayrıca, üretimden önce tasarımın değişebileceği prototip parçaları yapmak için de iyi bir süreçtir. Tipik olarak, ıslak yerleştirme kalıplama, açık tek taraflı bir alet üzerinde yapılmaktadır. Takım konfigürasyonu, iç şekli ve yüzey kaplamasını (erkek takım) veya dış şekli ve yüzey kaplamasını (dişi takım) kontrol etmek için tasarlanabilir. Kürlenmiş parçalar, esasen aletin kendisi kadar pürüzsüz olan bir bitmiş yüzeye (yani alet yüzeyi) sahip olurken, aletsiz yüzey biraz daha pürüzlü yapıda olmaktadır [16].

Islak serilmiş parçalar genellikle oda sıcaklığında vakum torbası olmadan kürlenmektedir. Vakum poşeti maliyetleri artırsa da daha iyi konsolidasyon ve daha homojen laminatlar sağlamaktadır. Bir vakum poşeti kürü ayrıca daha yüksek takviye içeriğine, daha homojen kalınlıklara ve daha iyi yüzey finisajlarına sahip laminatlar üretilmesini olanak verir. Vakum torbaları, yerleştirme işlemi sırasında ara hava kütleleri için de kullanılabilir. Parça biraz yüksek sıcaklıkta (yani, <200 °F) kürlenirse, genellikle ısı lambaları kullanılır veya parçanın etrafına basit bir hava konveksiyonlu

fırın inşa edilebilir. Fırınlara genellikle köpük yalıtımlı kontrplaktan yapılır ve sıcak hava üfleyleicilerle ısıtılır. Bu işlem kullanılıyorsa, herhangi bir sıcak veya soğuk alanı belirlemek için parça imalatından önce alet üzerinde bir deneme ısı döngüsü gerçekleştirmek iyi bir fikirdir. Sertleşme döngüsünü izlemek için alete termokupullar takılabilir [16].

Polyesterler ve vinil esterler, ıslak serilmiş cam elyaf takviyeli parçalar için kullanılan baskın reçinelerdir. Aslında polyesterler, tüm ticari kompozit parçalar için en yaygın olarak kullanılan termoset reçinedir. Bu reçineler, iyi mekanik, kimyasal, elektriksel özellikler, boyutsal kararlılık, kullanım kolaylığı ve düşük maliyet dengesi sağlar. Düşük veya yüksek sıcaklıkta kullanım, oda veya yüksek sıcaklıkta kürlenme ve esnek veya sert ürünler için formüle edilebilirler. Alev geciktirici özellikler, üstün yüzey finisajları, pigmentasyon, düşük büzülme, hava koşullarına dayanıklılık ve diğer özellikleri sağlamak için katkı maddeleri eklenebilir. Vinil esterler, normal polyesterlerden biraz daha maliyetli olmalarına rağmen, tokluk ve hava koşullarına dayanıklılık (yani, daha düşük nem emilimi) açısından bazı avantajlar sunarlar. Vinil esterler ayrıca daha yüksek sıcaklık direnci için formüle edilebilmektedir [16].

Polyester reçineler genellikle reçine ve sıvı halde bulunur. Monomer miktarı reçine viskozitesinin ana belirleyicisidir. Bir katalizörün eklenmesi ve ardından aktivasyonu (genellikle ısı ile) çapraz bağlanma reaksiyonuna neden olur. Reaksiyonun tamamlanması, seçilen formülasyon için hem formülasyona hem de kür döngüsüne bağlıdır. Oda sıcaklığında kürlenme sistemlerinde, bir katalitik reaksiyonu teşvik etmek için bir hızlandırıcı kullanılabilir. Daha yavaş kürlenme ve daha uzun çalışma ömrü (yani kap ömrü) sağlamak için inhibitörler de eklenebilir; bu, büyük parçaların döşenmesi sırasında önemli bir husustur [16].

Polyester reçineler, aşağıdaki gibi özel işleme özellikleri sağlamak üzere formüle edilebilir:

- Sıcak mukavemet, sıcak parçaların boyutsal kararlılıklarını veya şekillerini kaybetmeden aletten veya kalıptan çıkarılmasına izin verir.

- Kürlenme sırasında yayılan ısıyı en aza indirmek için kalın laminatlar için düşük ekzotermik ısı kullanılır; bu, aşıırı kalın kesitlere sahip parçalar için önemli bir husustur.
- Döşeme ve sertleştirme işlemi sırasında bir süre reçine akışının gerekli olduğu büyük, karmaşık parçalar için uzatılmış kap ömrü gereklidir.
- Havayla kurutma, oda sıcaklığında yapışkansız bir k rleme sağlar, yine tekne gövdeleri ve havuz kaplamaları gibi çok büyük parçaların imalatında kullanışlıdır.
- Reçinenin dikey bir yüzeyde akmaya veya sarkmaya karşı direnç göstermesine neden olan bir özelliği olan tiksotropi, tekne gövdeleri veya havuz kaplamaları döşenirken önemlidir.
- Özel son kullanım gereksinimleri için katkı maddeleri, son kullanım gereksinimleri tarafından dikte edilen özel özelliklerle tamamlanmış parçayı sağlamak için reçine formülasyonuna eklenebilir. Bunlar aşağıdaki katkı maddelerini içerir:
 - i. Bitmiş parçaya hemen hemen her rengi ve tonu sağlayabilen pigmentler mevcuttur. Jel kaplamalara pigmentler de eklenebilir.
 - ii. Dolgular genellikle yüzey görünümünü, işlenebilirliği, bazı mekanik özellikleri iyileştirebilen ve maliyeti azaltabilen inorganik veya inert malzemelerdir.
 - iii. Alev geciktiriciler genellikle i parçalar üretilirken ve bir yangından kaynaklanan zehirli dumanlar söz konusu olduğunda kullanılır.
 - iv. Uzun süreli güneş işığına maruz kalmaya karşı direnci artırmak için reçineye ultraviyole emiciler eklenebilir.
 - v. Kalıp ayırıcı maddeler, parçanın çıkarılmasını kolaylaştırmak için doğrudan kalıba uygulanabilir veya reçine ile karıştırılabilir.
 - vi. K rlenmiş parçaya minimum yüzey dalgalanması ve düşük parça çekmesi veren, genellikle termoplastik katkılar olan, düşük büzülme ve düşük profil katkı maddeleri eklenebilir [16].

Gull vd., çinko oksit (ZnO) dolgulu cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yapmış olduğu çalışmada, değişen konsantrasyonlarda dolgu maddesi içeren çinko oksit (ZnO) dolgulu cam elyaf takviyeli polyester (GFRP) kompozitlerin üretilmesini ve bunların mekanik ve termal

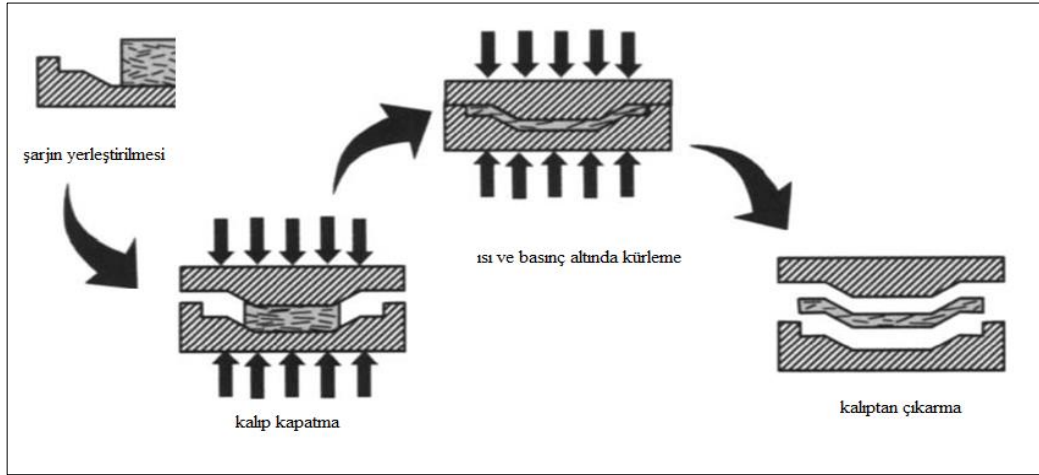
davranışlarını araştırmışlardır. Bu çalışmada, ZnO polyester içinde dağıtılmış ve laminatlar elle yatırma tekniği ve ardından sıkıştırma kalıplama ile üretilmiştir. Mekanik özellikler eğilme mukavemeti analizi, darbe mukavemeti ve sertlik testi ile belirlenirken, termal stabilite termogravimetrik analiz (TGA) ile belirlenmiştir. Ağırlıkça %3 ZnO dolgulu GFRP kompozitinin eğilme mukavemeti, dolgusuz kompozitle karşılaştırıldığında önemli ölçüde (%62,12'ye kadar) iyileştirilmiştir. Sertlik, darbe mukavemeti ve termal stabilite de ZnO yüklemesindeki artışla birlikte kademeli olarak artmıştır [40].

Mohammed vd., karbon liflerle Al₂O₃ tozu ile takviye edilmiş doymuş polyester reçine kompozit malzemelerde erozyon aşınma davranışlarını Taguchi yöntemiyle incelendiği araştırmada, hacim oranı %4 karbon fiber ve (%2, %4, %6 ve %8) hacim oranı Al₂O₃ tozu ile güçlendirilmiş polyester reçine kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışını araştırmaktadır. Bu numuneler elle yatırma tekniği ile üretilmiştir. Erozyon aşınma davranışı farklı değişkenlerde incelenmiştir; çarpma açısı (30°, 60°, 90°), 10 saatte kuru silis kumu partikül boyutu (350.425.600 µm), durma mesafesi (17 cm) ve akış hızı (35 L /min)'dir. Bu araştırmada, ASTM G76'ya göre erozyon testi yapılmıştır ve Taguchi ortogonal dizileri L9 kullanılarak parametrelerin erozyon aşınma hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, numunenin (UP+4%C. F+%8 Al₂O₃) diğer numunelere göre daha yüksek gerçek yoğunluk değerine sahip olduğunu ve daha iyi erozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir.[41].

Patel vd., hibrit bazalt/cam polyester kompozitlerin mekanik dayanımı üzerine yapmış oldukları çalışmada, elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilen düz dokuma bazalt, düz dokuma cam ve bazalt-cam polyester hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe özelliklerini incelemişlerdir. Hibrit kompozitlerin düz bazalt ve düz cam polyester kompozitler arasında orta düzeyde çekme ve eğilme özellikleri gösterdiği, darbe özelliklerinde ise hibrit kompozit için düz bazalt ve düz cam polyester kompozite göre daha yüksek değer gösterdiği gözlenmiştir. Ek olarak, istifleme dizisinin kontrol edilmesiyle mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir [42].

5.2. BASINÇLI KALIPLAMA

Üretim yöntemlerinden bir tanesinde sıkıştırma kalıplama, termoset veya termoplastik reçineler kullanarak karmaşık yüksek mukavemetli cam elyaf takviyeli parçaların kalıplanması için uygun, yüksek hacimli, yüksek basınçlı bir işlem olan basınçlı kalıplama tekniğidir [16].



Şekil 5.2. Termosetlerin basınçlı kalıplanması [16].

Basınçlı kalıplama mükemmel genel yüzey kalitesi, iyi boyut kontrolü ve yüksek derecede karmaşıklık ile oldukça büyük parçalar üretebilen bir kalıp işlemidir. Yüksek hacim, ekipman ve kalıplara yapılan yatırımı karşılması için yılda en az 1.000 parçanın, ancak daha tipik olarak yılda 100.000 parça aralığında üretim yapılması gerekmektedir. Basınçlı kalıplamada, önceden birleştirilmiş cam elyafı kıyılmış şeritler ve reçine, basınçlı kalıplama bileşiği olarak, bir levha formu (levha kalıplama bileşiği (SMC)) veya bir yığın form (yığın kalıplama bileşiği (BMC)) olarak mevcuttur. Bu bileşiklerin bir "yükü", uyumlu metal kalıplara yerleştirilir ve ısı ve basınç altında kürlenir. Kür sırasında malzeme akararak kalıbı doldurur. Daha karmaşık parçalar için, cam elyafın ön kalıpları önceden üretilebilir ve daha sonra sertleştirme için kalıba yerleştirilebilir. Genel olarak, fiber takviye içeriği genellikle düşük (%20-30), fiberler kısa (<2 inç) ve oryantasyon rastgele olduğundan, basınçla kalıplanmış parçaların mekanik özellikleri, güçlendirilmiş parçalardan çok daha düşüktür [16].

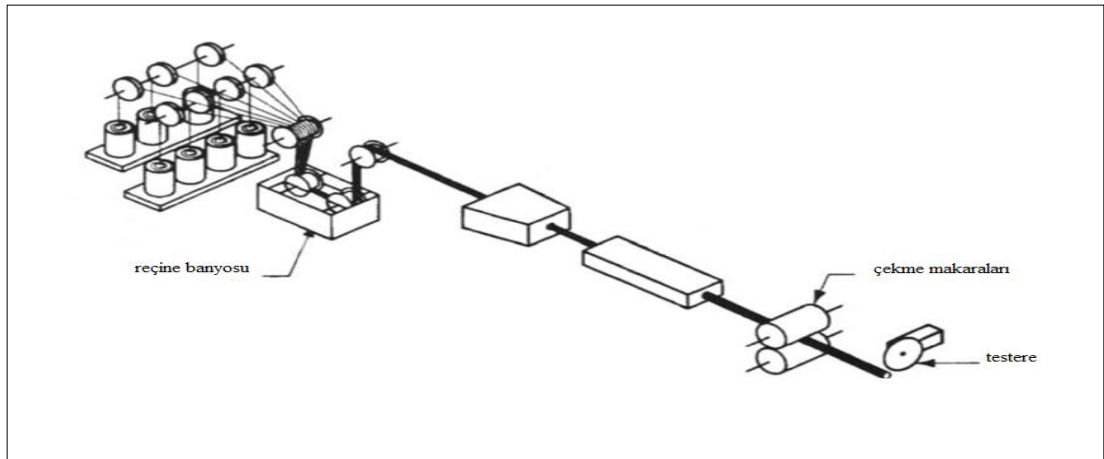
Geeth vd., taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz kullanılarak karbon fiber takviyeli polyester kompozitlerde kuru kayma aşınma parametrelerinin optimizasyonu üzerine yapmış oldukları çalışmada şu sonuçları elde etmişlerdir; (Varyans Analizi) sonucuna kompozitlerin aşınma performansını etkileyen göre en önemli proses parametreleri sırasıyla %60 ve %28 oranında kompozitlerin aşınma performansını etkileyen yük, takviye yüzdesi, ardından kayma mesafesi ve kayma hızı olduğu bulunmuştur. Karbon fiber takviyeli polyester (CFRP) kompozitlerin kalıp döküm tekniği kullanılarak yüzde 0, 4, 8 ve 12 Wt değişen konsantrasyonlarda üretilmiş, karbon fiber içeriğinin artmasıyla kayma aşınmasının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir [43].

Sakin vd., cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemeler için eğilme yorulma yavranişının incelenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzeme için eğilme yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Yapılan araştırmada; Numuneler RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi ile üretilmiş ve 0/90, ±45 yönlerinde kesilmiştir. Örneklerden elde edilen kombinasyonlar sonucunda dokuz farklı yapı elde edilmiştir. Ayrıca RTM yöntemi için yeni bir kalıp tasarlanmıştır. Liflerin tam olarak sızmasını (ıslatma) sağlamak için bu yeni kalıp sisteminde basit bir yöntem uygulanmıştır. Rüzgâr tribünlerinde aksnel fan kanatlarının yük ve stres davranışını simüle etmek için yeni bir bilgisayar destekli ve çok numuneli test cihazı tasarlanmış ve yapılmıştır. Bu çoklu numune aparatı, test süresini kısaltmak ve aynı anda 16 numuneyi test etmek için büyük bir avantaja sahiptir. İlk olarak, üç nokta eğme testine kompozit numuneler uygulanmıştır. Daha sonra yorulma testleri yapılmıştır. Eğilme yorulma testi için “sabit stres” yorulma tipi kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrü, 0/90 (grup E) ile 800 g/m² oranında takviye edilmiş cam elyaf dokuma numunelerinde elde edilmiştir [44].

5.3. PULTRÜZYON

Pultrüzyon, 1950’lerden beri ticari uygulamalarda kullanılan oldukça yaygın bir yöntemdir. Pultrüzyon işleminde, sürekli lifli takviye bir matris ile emprenye edilir ve daha sonra katı bir kompozit halinde sürekli olarak konsolide edilir. Pultrüzyon işleminin birkaç farklı varyasyonu olsa da termoset kompozitler için temel işlem Şekil 5.3’te gösterilmektedir. Takviye, genellikle cam fitiller standdaki paketlerden çekilir

ve yavaş yavaş bir araya getirilir ve açık reçine banyosuna çekilir. Takviyenin sıvı reçine ile emprenye edildiği yer reçine banyosundan çıktıktan sonra, takviye önce fitilleri parça şekline göre hizalayan bir ön kalıp kalıbı aracılığıyla yönlendirilir ve daha sonra kalıp içinde ilerledikçe sertleştiği ısıtılmış sabit kesitli bir kalıba yönlendirilir. Kürleme, parçanın dışından içeriye doğru gerçekleşir. Kalıp başlangıçta reçineyi ısıtsa da kürleme reçinesinden kaynaklanan ekzoterm ayrıca kürleme için gereken ısının önemli bir miktarını sağlayabilir. Ekzoterm neden olduğu sıcaklık zirvesi, kalıbın sınırları içinde meydana gelmeli ve kompozitin çıkışta kalıptan büzülmesine izin vermelidir. Kompozit parça, çekirme mekanizması tarafından çekilirken soğuyan tam kürlenmiş bir parça olarak kalıptan çıkarılır. Son olarak, parça bir kesme testeresi ile gerekli uzunlukta kesilir. Pultrüzyon, uzun sabit kesitli kompozit parçalar yapmak için son derece uygun maliyetli bir süreç olma avantajına sahip olsa da bir üretim çalışması için kurulum maliyetli yüksek olabileceğinden kesinlikle yüksek kapasiteli adetlerde üretim için tercih edilecek bir sistemdir. Ek olarak, parçanın sabit enine kesite sahip olması gerektiği konusunda sınırlamalar vardır. Cam elyaf/polyester malzemeler çok sık kullanılsa da daha yüksek performanslı karbon/epoksi malzemelerle havacılık endüstrisi için süreci geliştirmek için önemli miktarda çalışma yapılmıştır. Ticari uçaklardaki zemin kirişleri potansiyel bir uygulamadır. Pultrüzyon, bir mandrel kullanıldığında içi boş bölümler de dahil olmak üzere, Şekil 5.3'te gösterildiği gibi çok çeşitli yapısal şekiller üretilebilir [16].



Şekil 5.3. Pultrüzyon işlemi [16].

Pultrüzyon işleminin başlıca avantajları, işlemin sürekli olması nedeniyle düşük üretim maliyetine sahip olmasıdır. Düşük hammadde maliyetleri, minimum fire miktarı ve karmaşık olmayan makine sistemi yöntemin avantajları arasında yer almaktadır. Dezavantajları ise şunlardır: süreç sabit enine kesit şekilleriyle sınırlıdır, kurulum süreleri uzun ve ilk maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Parçalar, bazı yapısal uygulamalar için izin verilenden daha yüksek boşluk içeriğine sahip olabilir. Kritik işlem değişkenleri, kalıp tasarımı, reçine formülasyonu, emprenye öncesi ve sonrası malzeme kılavuzu ve kalıpta sıcaklık kontrolü olarak sıralanabilir [16].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ortalama uzunluğu 3-6 mm olan kısa karbon elyaflar (SCF'ler) (Dost Kimya), Türkiye'den tedarik edilmiştir. Polyester reçinesi, kobalt katalizörü, metil etil keton peroksit (MEKP), Omnis Kompozit (Türkiye'den) tedarik edilmiştir.

Çalışmada numuneler kodlanmış ve numunelerin her birinin bileşimi Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Polyester kompozitleri üretmek için polyestere %1 Kobalt katalizörü ve katalizör olarak MEKP eklenmiştir.

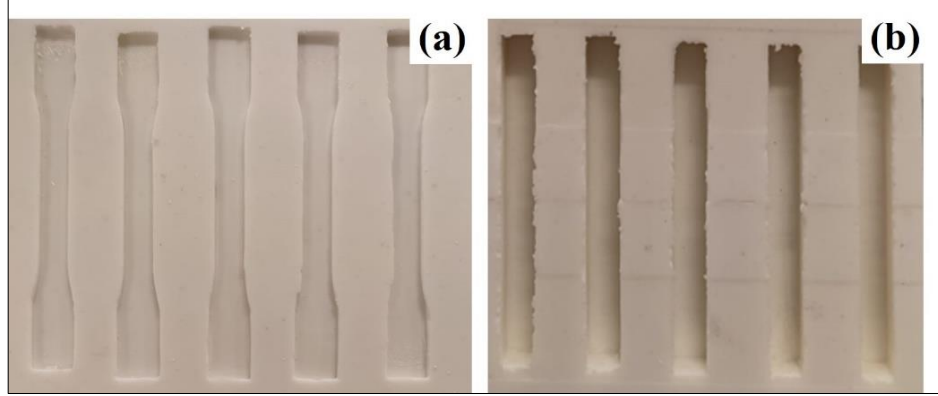
Çizelge 6.1. Numunelerin bileşimleri.

Örneklerin Kodları	Kısa Karbon Fiberler (SCF)	Polyester (PES)
	(%)	(%)
PES	0	100
PES0,5CF	0,5	99,5
PES1CF	1	99
PES2CF	2	98

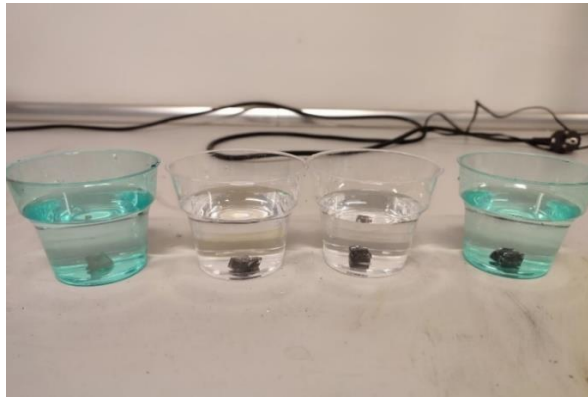
Kompozitler el yatırması yöntemiyle Şekil 6.1'de gösterilen kalıplar kullanılarak üretilmiştir. Eğilme eğilme testleri için kullanılan numuneler (158 × 13 × 5) mm boyutlarında üretilmiştir. Ayrıca İzod darbe testleri için (80 × 10 × 10) mm ölçülerinde numuneler de üretilmiştir.

Su emme testi için numuneler, Şekil 6.2' de gösterildiği içerisinde saf su bulunan kaplarda oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Ardından sudan çıkarılarak, 48 saat oda sıcaklığında kuru ortamda bekletilmiştir. Numunelerin ağırlıkları, deney öncesinde ve sonrasında Kern marka hassas terazi cihazı (Şekil 6.3) ile ölçülmüştür.

Su emme testi sonuçları, malzemenin deney sonrasında elde edilen nihai ağırlığından ilk ağırlığı çıkarılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.1. (a) Eğilme deney numuneleri (b) İzod darbe deney numuneleri için kalıp.



Şekil 6.2. İçerisinde saf su bulunan kaplarda bekletilen numuneler.



Şekil 6.3. Su emme ve gözeneklilik testinde ağırlık hesaplamak için kullanılan hassas terazi.

Gözeneklilik testi için ise numunelerin ilk önce deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Burada: sırasıyla 'm' ağırlığı (gr), 'v' ise hacmi (cm³) ifade etmektedir.

$$\text{Deneysel Yoğunluk} = \frac{m}{v} \quad (6.1)$$

Daha sonra malzemeleri teorik yoğunlukları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır. Burada: sırasıyla '%P' polyester oranını, 'Pd' polyester yoğunluğunu (gr/cm³), '%C' karbon oranını ve 'Cd' ise karbon yoğunluğunu (gr/cm³) temsil etmektedir.

$$\text{Teorik Yoğunluk} = \frac{(\%PPd) + (\%CCd)}{100} \quad (6.2)$$

Son olarak ise gözenek miktarı teorik yoğunluktan deneysel yoğunluğun çıkarılması ile hesaplanmıştır. Burada: sırasıyla 'T.Y.' teorik yoğunluğu, 'D.Y.' ise deneysel yoğunluğu temsil etmektedir.

$$\text{Gözenek Miktarı} = T. Y. - D. Y. \quad (6.3)$$

600 KN kapasiteli ve 2 mm/dk yükleme hızına sahip Zwick Roell test cihazı ile 3 nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM D790 standardına göre her bir kompozit ve saf polyester numunesi için üç kez gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eğilme mukavemeti "σ" Denklem 6.4 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3FL}{2ba^2} \quad (6.4)$$

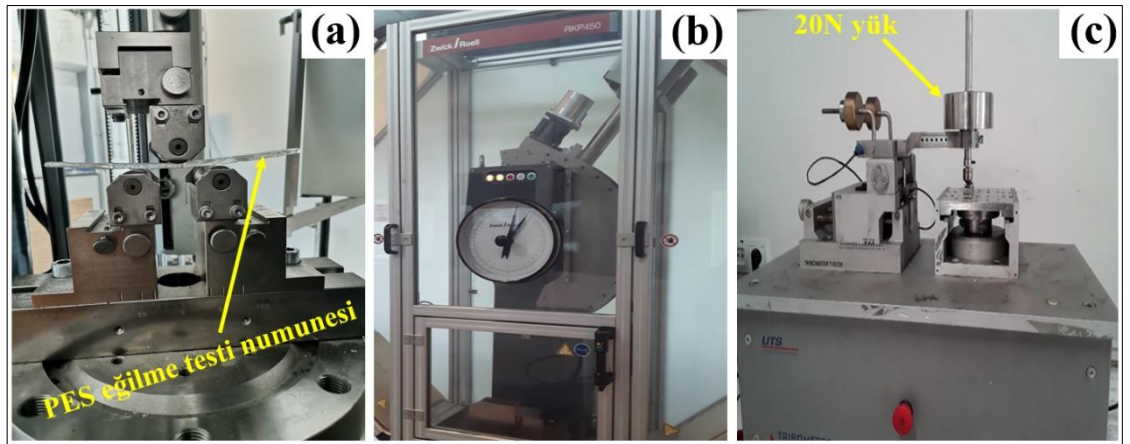
Burada: 'F', 'L', 'b' ve 'a' eğilme yükünü (N), destek açıklığı uzunluğunu (mm), numunenin genişliğini (mm) ve numunelerin kalınlığını (mm) sırasıyla temsil etmektedir [45]. İzod darbe testlerini gerçekleştirmek için 450J yükleme kapasiteli Zwick Roell RKP 450 test cihazı kullanılmıştır. Burada testler ASTM D256

standardına göre her numune için üç kez yapılmış ve sonucun ortalama değeri dikkate alınmıştır.

Öte yandan, kuru kaydırma koşullarında kompozit ve saf polyester numunelerin aşınma direnci özelliklerini araştırmak için UTS Tribometer T10/20 cihazı kullanılmıştır. Parametreler; aşınma analizi sırasında 20 N uygulanan yük, 6 mm paslanmaz çelik bilye çapı, 150 m kayma mesafesi, 40 mm/sn kayma hızı ve 10 mm strok olarak ayarlanmıştır. Aşınma oranı, Archard yaklaşımlarına göre hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma Oranı} = \frac{Wv}{l} \quad (6.5)$$

Burada: 'Wv' hacimsel aşınma kaybıdır ve 'l' kayma mesafesidir [46]. ISO 4287-1997 standardına göre numunelerin hacimsel aşınma kaybını hesaplamak için Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılmıştır. Ayrıca numuneler, püskürtmeli kaplayıcı (Quorum, Q150R ES Plus) ile altın ile kaplandıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak numunelerin kırık ve aşınmış yüzeyleri incelenmiştir. Numunelerin mekanik ve tribolojik davranışları, Şekil 6.4'de gösterilen test cihazları ile karakterize edilmiştir. PES numunesinin eğilme eğilme mukavemeti testi, Şekil 6.4 (a)'da gösterilmiştir. Ek olarak, İzod darbe ve aşınma direnci özellikleri sırasıyla Şekil 6.4 (b) ve (c)'de gösterildiği üzere analiz edilmiştir.



Şekil 6.4. (a) Eğilme eğilme testi, (b) İzod darbe testi ve (c) Aşınma testi.

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Polyester yapısı gereği su emme davranışı göstermektedir. Bu tez çalışmasında takviye edilen kırılmış karbon fiberin, polyesterin su emme davranışına ne ölçüde etki ettiğini araştırılmıştır. Numuneler içerisinde saf su bulunan kaplara konularak oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler sudan çıkarılarak 48 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra başlangıçtaki ağırlıkları ile kurutulduktan sonraki ağırlıkları ölçülmüştür. Ve bu ağırlık farkından da yola çıkılarak su emmeleri (%) hesaplanmıştır. Çizelge 7.1’de görüldüğü üzere karbon elyaf takviyesi ile kompozitlerin su emme davranışlarında kayda değer bir değişiklik görülmemiştir.

Çizelge 7.1. Numunelerin su emme oranları.

Numune	Su Emme (%)
PES	0,06
PES0,5CF	0,05
PES1CF	0,06
PES2CF	0,05

Özellikle üretim metodundan kaynaklanan gözenekleri incelemek için gözeneklilik testi yapılmıştır. SCF takviyeli polyester, el yatırması metodu ile üretildiği için üretim metodundan kaynaklı malzemede gözenekli yapılar meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalar kısmında belirtilmiş olan formüller kullanılarak malzemelerin gözeneklilik oranları hesaplanmış ve Çizelge 7.2’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan SFC takviyesi ile malzemede meydana gelen gözenek oranının arttığı görülmektedir. Özellikle saf polyester ile karbon takviyeli kompozitlerin gözeneklilik miktarları

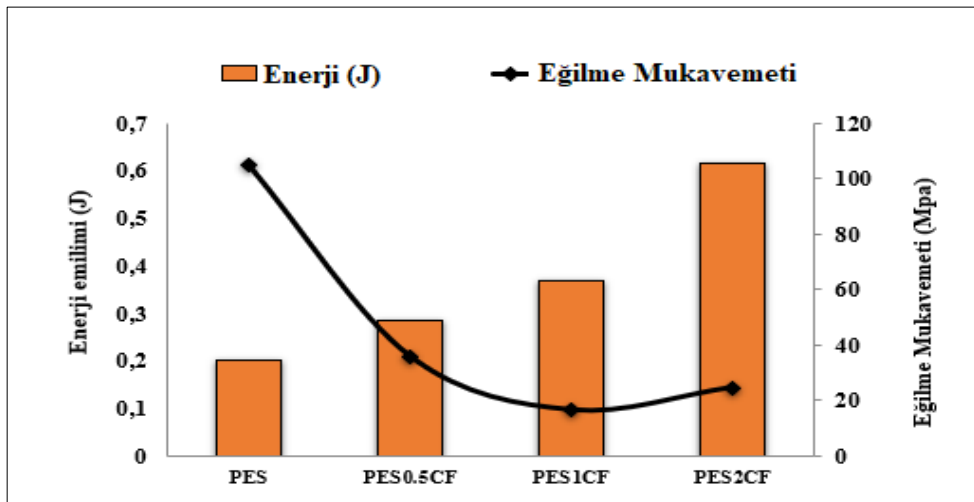
arasından ciddi bir fark görülmektedir. Üretim aşamasında, polyester ile karbon liflerin karıştırılması esnasında hava kabarcıklarının oluşmasının bu farkın nedeni olduğu söylenebilmektedir.

Çizelge 7.2. Numunelerin gözeneklilik miktarları.

Numune	Deneysel Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Gözeneklilik Miktarı (%)
PES	1,161	1,173	1,02
PES0.5CF	1,103	1,177	6,28
PES1CF	1,104	1,182	6,60
PES2CF	1,105	1,191	7,22

7.2. MEKANİK ÖZELLİKLER

Şekil 7.1 ağırlıkça farklı oranlarda (%0,5, 1 ve 2) kırılmış karbon elyaf içeren kompozitlerin ve saf polyester numunelerinin eğilme mukavemeti ve darbe direnci özelliklerini göstermektedir. Ayrıca numunelerin morfolojisi, Şekil 7.2’de gösterildiği gibi taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Bu SEM çalışması, hem polyester matrisindeki SCF'lerin dağılımını hem de lifler (SCF'ler) ile PES matrisi arasındaki etkileşimi gözlemlemeye yardımcı olmaktadır.

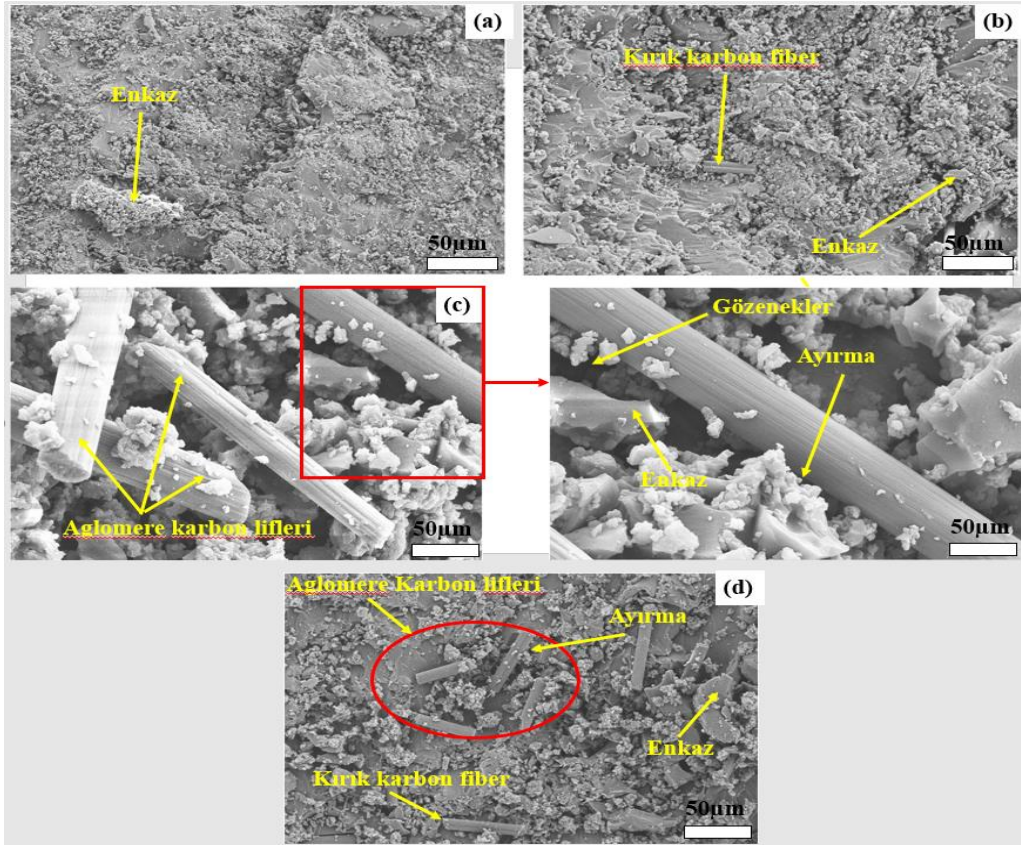


Şekil 7.1. Numunelerin eğilme dayanımı ve darbe dayanımı.

Grafik (Şekil 7.1), SCF'lerin saf PES'e eklenmesiyle beraber eğilme mukavemetinde azalma olduğunu göstermektedir. Yüksek SCF içeriğinde eğilme mukavemetinin azalmasının nedeni, daha düşük lif-lif etkileşimi, gözeneklerin varlığı ve polyester matrisinde SCF'lerin homojen dağılmamasından kaynaklanmaktadır [5]. Çizelge 7.2'de gösterildiği üzere, kompozit üretim sürecinde, kürlenme aşamalarında mikro gözenekler oluşmuştur. SCF içeriğinin artmasıyla oluşan numunedeki viskozite nedeniyle kompozitte daha fazla gözenek ortaya çıkmıştır [47]. Bu olay özellikle Şekil 7.2(c) ve (d)'de ağırlıkça %1 ve %2 oranında takviye olduğunda daha net gözlemlenmiştir. Bu nedenle, eğilme mukavemeti testleri sırasında, gözeneklilik (boşluklar) etrafındaki önemli stres konsantrasyonu oluşmuştur. Bu yük, SCF'ler ve polyester matris arasındaki etkileşim kayıplarına (debonding) neden olmaktadır. Bu nedenle, Şekil 7.4(c) ve (d)'de zayıf bir arayüzey bağı görülmektedir. Böylece matristen fibere aktarılan kuvvet önemli ölçüde azalmaktadır. Gözeneklerin ve bağların ayrılması, saf polyester numuneye kıyasla kompozitin eğilme yükü taşıma kapasitesini azaltmaktadır [48]. Test sonuçlarına göre en yüksek eğilme mukavemeti 105,14 Mpa ile saf PES malzemesine aittir. En düşük eğilme mukavemeti ise 24,67 Mpa ile, %2 SCF içeren kompozitte gözlemlenmiştir. Ayrıca, %0,5 SCF katkılı kompozitin eğilme mukavemetinin, %1 SCF ve %2 SCF katkılı kompozitlere kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %54 ve %31,4 oranında daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Geçmiş çalışmalardan Durairaj vd. çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir [6]. Ağırlıkça %5'lik düşük karbon fiber içeriğindeki eğilme mukavemetin, ağırlıkça %10'luk karbon fiber takviyeli polyester kompozitten daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Öte yandan, Izod darbe testinin analizi, saf PES matrisi üzerine SCF'lerin eklenmesinin darbe mukavemetini doğru orantılı olarak iyileştirdiğini göstermektedir. Bunun nedeni, matris ile temas halindeki toplam lif yüzeyindeki artış nedeniyle takviye tarafından etkin bir şekilde desteklenecek yükü nispeten artıran SCF miktarındaki artıştan kaynaklanabilmektedir [7]. Wong vd. benzer sonuçlar elde etmiştir, burada lif miktarındaki artışlar kompozitlerin daha yüksek darbe mukavemetine yol açmaktadır.

Böylece, ağırlıkça. %2 SCF katkılı kompozitler (PES2CF), yaklaşık 0,62 J'lik daha yüksek enerji emme karakteristik değerine sahiptir. Kompozitin (PES2CF) darbe dayanımı, PES0,5CF ve PES1CF numunelerine kıyasla sırasıyla yaklaşık %53,63 ve %40,24 daha yüksektir. Oysa, ağırlıkça 0,5 ile takviye edilmiş bir kompozit (PES0,5CF) için yaklaşık 0,28 J'lik enerji soğurma performansı gözlemlenmiştir. Ayrıca en düşük darbe dayanımı 0,20 J ile saf PES malzemesine aittir.



Şekil 7.2. Kırık yüzeylerin SEM görüntüleri: (a) PES, (b) PES0,5CF, (c) PES1CF ve (d) PES2CF.

7.3. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER

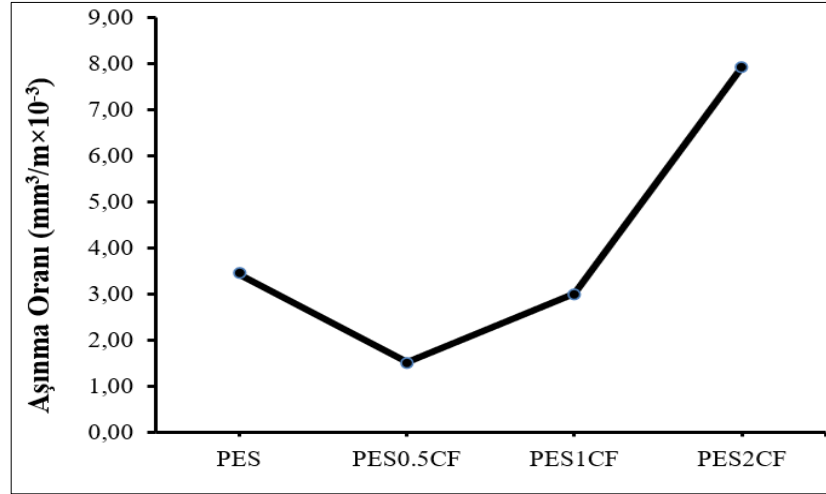
Numunelerin (PES, PES0,5CF, PES1CF ve PES2CF) aşınma direnci sonuçları Şekil 7.3'te belirtilmiştir. En yüksek aşınma direnci performansı, ağırlıkça % 0,5 SCF katkılı kompozitte olduğunda gözlenmiştir. Bununla birlikte, SCF içeriğinin ağırlıkça % 2'ye kadar artması, kompozitin aşınma direnci davranışlarını azaltmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 7.4 (c) ve (d)'de gösterilen SEM görüntüleriyle gösterilen zayıf SCF-PES matris

bağ gücü olabilmektedir. Bu zayıf etkileşim, elyaf çatlaması ve SCF' lerin aşınmış yüzeyden veya çekmeden kısmen ufalanması kolaylığı nedeniyle yüksek aşınmaya yol açmaktadır [8].

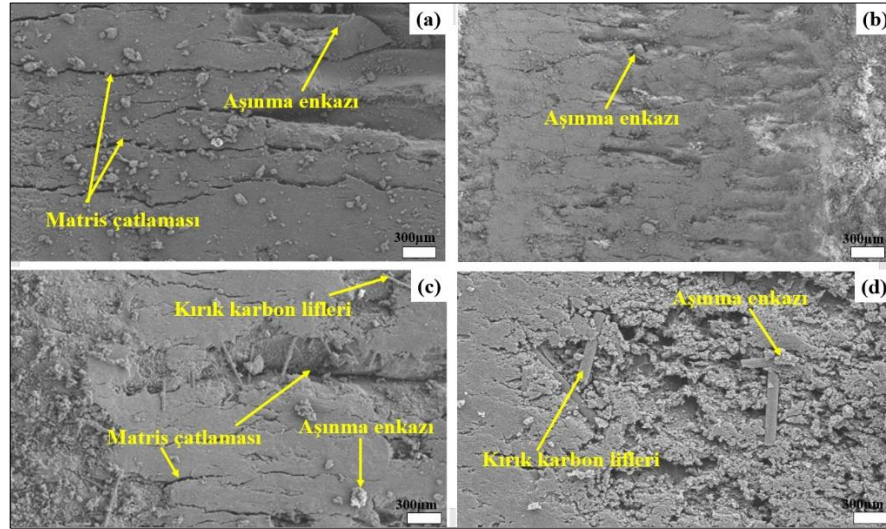
Ayrıca, SCF içeriğindeki artış, karbon liflerinin topaklanma eğilimi göstermesine neden olmaktadır. Bu, aglomerasyonların tribolojik davranış üzerinde mekanik özelliklere göre daha fazla etkisi vardır [9, 10]. Böylece, aşınma analizinden, PES0,5CF numunesinin 1.5×10^{-3} mm³/m aşınma oranı değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, PES0,5CF'nin aşınma direnci, PES1CF ve PES2CF'den sırasıyla yaklaşık %50 ve %81 kadar daha yüksektir. Bununla birlikte, en düşük aşınma direnci saf polyester matris (PESCF) kompozitine %2 oranda SCF eklenmesiyle gözlemlenmiştir. Öte yandan paslanmaz çelik bilyeler ile polyester yüzeyler arasındaki etkileşim, temas yüzeyindeki sıcaklığı arttırmaktadır. Sıcaklıktaki artış, polyesterlerin daha kırılgan hale gelmesine neden olur ve sürtünme yükü polyester bileşeni yüzeyden ayırır ve dolayısıyla PES malzemesinin aşınma direnci önemli ölçüde azalmaktadır [50].

Ayrıca, hem saf PES hem de kompozit malzemelerin aşınmış yüzeylerini analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. PES matrisine %0,5 oranında SCF eklendiğinde, SCF' lerin homojen olarak gömüldüğü görülmektedir (Şekil 7.4 (b)). Dolayısıyla bu, saf PES numunesine kıyasla aşınma direnci özelliğinde yaklaşık %55,93'lük bir iyileşme sağlamaktadır. Ayrıca, PES0,5CF kompozitinin aşınmış yüzeyi, tüm numunelerle karşılaştırıldığında nispeten pürüzsüzdür. Bu, numunenin daha yüksek aşınma direnci özelliklerine sahip olduğunu kanıtlayabilir. Bununla birlikte, saf polyester matrisine % 1 ve % 2 oranında SCF eklenmesi, sırasıyla Şekil 7.4 (c) ve (d)'de belirtildiği gibi aglomerasyona neden olur. Şekil 7.6 (a) göz önüne alındığında, saf PES polimer malzemeler için aşınma kalıntıları ve çatlamış aşınmış yüzeyler gözlemlenmiştir. Oysa Şekil 7.4 (c)'de çatlamış aşınmış yüzeyler, aşınma kalıntıları ve kırık SCF'ler fark edilmiştir. Şekil 7.4 (c)'te görülebileceği gibi, aglomerasyon ve bağ ayırmanın etkileri, PES1CF kompozitinin aşınma oranı eğilimini arttırmıştır. Ayrıca, kompozit PES2CF'nin aşınmış yüzeyi Şekil 7.4 (d)'de gösterilmiştir. Tüm numunelerin aşınma kalıntısı boyutuna göre aşınma kalıntısı boyutunun daha büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, polyester matrisine

(PES2CF) ağırlıkça %2 SCF eklendiğinde, bu, en düşük aşınma direncine (daha yüksek aşınma hızı) sahip bir kompozitin niceliksel değeri olan $7,9 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 7.3. Aşınma oranı örnekleri.



Şekil 7.4. 20 N altında kompozitin enine kesitinde aşınmış yüzeyin SEM görüntüleri: (a) PES, (b) PES0,5CF, (c) PES1CF ve (d) PES2CF.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kısa karbon elyaf (SCF) içeriğinin polyester (PES) matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. El yatırması yöntemiyle ağırlıkça farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %2) SCFs'ler içeren kompozitler üretilmiştir. Test sonuçlarına göre, numunelerin eğilme mukavemeti, takviyeli SCF içeriğinden olumsuz etkilenmiştir. 105,14 Mpa ile saf PES malzemesi için daha yüksek eğilme mukavemeti kaydedilmiştir. Öte yandan, % 0,5 takviyeli kompozitin eğilme mukavemeti, % 2 takviyeli kompozitin eğilme mukavemetinden yaklaşık %31,4 daha iyidir. SCF takviyeli polyester kompozitin darbe mukavemetindeki gelişme ise, doğrudan SCF içeriği ile ilgilidir. Böylece, maksimum darbe mukavemeti %2 takviyeli kompozit için gözlemlenmiştir. Yaklaşık 0,20 J ile saf PES en düşük darbe dayanımı performansına sahipken, %2 takviyeli kompozitin darbe dayanımı 0,62 J olarak ölçülmüştür. Aşınma direnci sonuçlarında ise (PES0,5CF) ile güçlendirilmiş polyester matris, $1,5 \times 10^{-3}$ mm³/m ile en yüksek aşınma direnci kapasitesine sahip olurken, en düşük aşınma direnci performansı yaklaşık olarak $7,9 \times 10^{-3}$ mm³/m ile (PES2CF) polyester matrise aittir. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak numunelerin aşınmış yüzeyleri üzerinde yapılan morfolojik çalışmalar, (PES0,5CF) ile güçlendirilmiş kompozitlerin düzgün aşınmış yüzeylere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kırık yüzeylerin morfolojisi yığılmayı gösterir ve PES1CF ve PES2CF kompozitlerinde ayrışma gözlemlenmiştir. Son olarak, SCF'lerin oranı ile ilgili en olumlu etkilenen davranış, darbe mukavemeti iken, SCF'lerin artmasıyla eğilme ve aşınma direnci azalmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda polyester matrisli kompozitlere (PES) ağırlıkça (%0,5, %1 ve %2) oranında SCF eklenmesiyle ilgili gerçekleştirilmiş testlerin tamamında optimum verim %0,5 oranında SCF takviye edilmesiyle elde edilmiştir. Takviye sonrasında malzemenin su emme davranışlarında bir değişme gözlemlenmemiştir.

%0,5 oranındaki takviye ile hem darbe mukavemeti artırılmış hem de tribolojik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiştir. Tez sonucunda, takviye oranının %0,5 oranında tutarak maksimum darbe ve aşınma dayanımı elde edilirken, eğilme mukavemetinin arttırılmasına yönelik olarak, üretim yönteminde iyileştirmeler yaparak metodun uygulanması sırasında ortaya çıkan gözeneklerin önlenmesi önerilmektedir. Yani üretimin vakum altında gerçekleştirilmesi ya da katılaşma sırasında kalıplar üzerine uygulanan bir kuvvet ile bu gözeneklerin oluşmasının önlenmesi yapılan tüm testlerde SCF takviyesinin mekanik ve tribolojik testlerde daha üstün mekanik özellikler elde edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Al Khaddour, S. and Ibrahim, M. B., "Experimental Investigation on Tensile Properties of Carbon Fabric-Glass Fabric-Kevlar Fabric-Epoxy Hybrid Composite Laminates.", *Revue Des Composites Et Des Matériaux Avancés*, 31 (3) (2021).
2. Markovičová, L., Zatkalíková, V., and Hanusová, P., "Carbon fiber polymer composites", *Quality Production Improvement-QPI*, 1 (2019).
3. Masuelli, M. A., "Introduction of fibre-reinforced polymers- polymers and composites: concepts, properties and processes", *Fiber Reinforced Polymers-the Technology Applied for Concrete Repair*, *IntechOpen* (2013).
4. Matei, S., Stoicanescu, M., and Crisan, A., "Composites with short fibers reinforced epoxy resin matrix", *Procedia Technology*, 22: 174–181 (2016).
5. Nancharaiah, D. T. and Anusha, T., "Experimental investigation on mechanical properties of banana fiber polyester resin composites and carbon fiber polyester resin composites", 6 (6): 10 (2017).
6. Durairaj, R. B., Mageshwaran, G., and Sriram, V., "Investigation on Mechanical Properties of Glass and Carbon Fiber Reinforced with Polyester Resin Composite", *International Journal of ChemTech Research*, 7 (2016).
7. Wong, K. J., Nirmal, U., and Lim, B. K., "Impact behavior of short and continuous fiber-reinforced polyester composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (23): 3463–3474 (2010).
8. Xian, G. and Zhang, Z., "Sliding wear of polyetherimide matrix composites: I. Influence of short carbon fibre reinforcement", *Wear*, 258 (5–6): 776–782 (2005).
9. Akgül, Y., "Ortopedik uygulamalar için polimer matrisli kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2020).
10. Chukov, D. I., Stepashkin, A. A., Maksimkin, A. V., Tcherdyntsev, V. V., Kaloshkin, S. D., Kuskov, K. V., and Bugakov, V. I., "Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites", *Composites Part B: Engineering*, 76: 79–88 (2015).
11. Campbell Jr, F. C., "Manufacturing Processes for Advanced Composites", *Elsevier* (2003).
12. Sadeghian, R., Gangireddy, S., Minaie, B., and Hsiao, K.-T., "Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites using vacuum

- assisted resin transfer molding for enhancing the mode-I delamination resistance", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (10): 1787–1795 (2006).
13. De Moraes, Y. M., Ribeiro, C. G. D., Ferreira, C. L., Lima, E. S., Margem, J. I., Nascimento, L. F. C., and Monteiro, S. N., "Mechanical behavior of mallow fabric reinforced polyester matrix composites", *Journal of Materials Research and Technology*, 7 (4): 515–519 (2018).
 14. Ganesan, K., Kailasanathan, C., Sanjay, M. R., Senthamaraiannan, P., and Saravanakumar, S. S., "A new assessment on mechanical properties of jute fiber mat with egg shell powder/nanoclay-reinforced polyester matrix composites", *Journal of Natural Fibers* (2018).
 15. Raja, V. M. and Kumar, S. S., "Determination of static and fatigue characteristics of carbon fiber reinforced polyester composites for automobile applications", *Materials Research*, 22 (2020).
 16. Mazumdar, S., "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering", *CrC Press* (2001).
 17. Sapuan, S. M., Aulia, H. S., Ilyas, R. A., Atiqah, A., Dele-Afolabi, T. T., Nurazzi, M. N., Supian, A. B. M., and Atikah, M. S. N., "Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites", *Polymers*, 12 (10): 2211 (2020).
 18. Miwa, M., Ohsawa, T., and Tahara, K., "Effects of fiber length on the tensile strength of epoxy/glass fiber and polyester/glass fiber composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 25 (5): 795–807 (1980).
 19. Khanna, S. K., Winter, R. M., Ranganathan, P., Yedla, S. B., Kalukanimuttam, M., and Paruchuri, K., "Sample preparation techniques for nano-mechanical characterization of glass fiber reinforced polyester matrix composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34 (1): 53–65 (2003).
 20. Fathi, B., Esfandeh, M., Soltani, A. K., and Amraei, I. A., "Effect of fiber acid treatment on the dynamic mechanical properties of unsaturated polyester/carbon fiber unidirectional composites", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50 (6): 564–567 (2011).
 21. Edoziuno, F. O., Akaluzia, R. O., Odoni, B. U., and Edibo, S., "Experimental study on tribological (dry sliding wear) behaviour of polyester matrix hybrid composite reinforced with particulate wood charcoal and periwinkle shell", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33 (5): 318–331 (2021).
 22. Kiran, M. D., Sukruth, K., Govindaraju, H. K., and BR, L. Y., "Tensile and impact strength of nickel coated short carbon fiber reinforced polyester composite", *Materials Today: Proceedings* (2021).

23. Bahadur, S. and Zheng, Y., "Mechanical and tribological behavior of polyester reinforced with short glass fibers", *Wear*, 137 (2): 251–266 (1990).
24. Prabhu, P., Iqbal, S. M., Balaji, A., and Karthikeyan, B., "Experimental investigation of mechanical and machining parameters of hybrid nanoclay glass fiber-reinforced polyester composites", *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2 (1): 93–101 (2019).
25. Ravikumar, P., Suresh, A. R., and Rajeshkumar, G., "An investigation into the tribological properties of bidirectional jute/carbon fiber reinforced polyester hybrid composites", *Journal of Natural Fibers*, 1–11 (2020).
26. El-Wazery, M. S., "Mechanical characterization of glass-basalt-carbon/polyester hybrid composites", *International Journal of Engineering*, 31 (7): 1139–1145 (2018).
27. Feller, J. F., Linossier, I., and Grohens, Y., "Conductive polymer composites: comparative study of poly (ester)-short carbon fibres and poly (epoxy)-short carbon fibres mechanical and electrical properties", *Materials Letters*, 57 (1): 64–71 (2002).
28. Daramola, O. O., Adewuyi, B. O., and Oladele, I. O., "Corrosion behaviour of heat treated rolled medium carbon steel in marine environment", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10 (10): 888 (2011).
29. Pereira, A. C., Monteiro, S. N., Assis, F. S., and Colorado, H. A., "Charpy toughness behavior of fique fabric reinforced polyester matrix composites", *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2017*, Springer, 3–9 (2017).
30. Gokdai, D., Borazan, A. A., and Acikbas, G., "Effect of marble: pine cone waste ratios on mechanical properties of polyester matrix composites", *Waste and Biomass Valorization*, 8 (5): 1855–1862 (2017).
31. Indran, S., Raj, R. E., Daniel, B. S. S., and Saravanakumar, S. S., "Cellulose powder treatment on *Cissus quadrangularis* stem fiber-reinforcement in unsaturated polyester matrix composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (3): 212–227 (2016).
32. Candido, V. S., da Silva, A. C. R., Simonassi, N. T., da Luz, F. S., and Monteiro, S. N., "Toughness of polyester matrix composites reinforced with sugarcane bagasse fibers evaluated by Charpy impact tests", *Journal of Materials Research and Technology*, 6 (4): 334–338 (2017).
33. El-Tayeb, N. S. M., Yousif, B. F., and Yap, T. C., "Tribological studies of polyester reinforced with CSM 450-R-glass fiber sliding against smooth stainless steel counterface", *Wear*, 261 (3–4): 443–452 (2006).

34. El-Tayeb, N. S. M. and Yousif, B. F., "Evaluation of glass fiber reinforced polyester composite for multi-pass abrasive wear applications", *Wear*, 262 (9–10): 1140–1151 (2007).
35. Yılmaz, M. G., Unal, H., and Mimaroglu, A., "Study of the strength and erosive behavior of CaCO₃/glass fiber reinforced polyester composite", *Express Polym Lett*, 2: 890–895 (2008).
36. De Oliveira, C. G., Margem, F. M., Monteiro, S. N., and Lopes, F. P. D., "Comparison between tensile behavior of epoxy and polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers", *Journal of Materials Research and Technology*, 6 (4): 406–410 (2017).
37. Fındık, F., Mısırlıoğlu, M., and Soy, U., "The structural features of glass fiber reinforced polyester matrix composites", *Science and Engineering of Composite Materials*, 10 (4): 287–296 (2002).
38. El-Wazery, M. S., El-Elamy, M. I., and Zoalfakar, S. H., "Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites", *International Journal of Applied Science and Engineering*, 14 (3): 121–131 (2017).
39. Springer, G. S., Sanders, B. A., and Tung, R. W., "Environmental effects on glass fiber reinforced polyester and vinylester composites", *Journal of Composite Materials*, 14 (3): 213–232 (1980).
40. Gull, N., Khan, S. M., Munawar, M. A., Shafiq, M., Anjum, F., Butt, M. T. Z., and Jamil, T., "Synthesis and characterization of zinc oxide (ZnO) filled glass fiber reinforced polyester composites", *Materials & Design*, 67: 313–317 (2015).
41. Mohammed, R. A., Majeed, R. K., and Gomaa, D. M., "Study the erosion wear behavior for unsaturated polyester resin composites materials reinforced by carbon fibers with Al₂O₃ powder using Taguchi method", *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 21 (5): 213–224 (2017).
42. Patel, N., Patel, K., Gohil, P., and Chaudhry, V., "Investigations on mechanical strength of hybrid basalt/glass polyester composites", *International Journal of Applied Engineering Research*, 13 (6): 4083–88 (2018).
43. Geeth, K. M., Reddy, M. C. S., and Kumar, M. S., "Optimization of dry-sliding wear parameters on carbon fiber reinforced polyester composites using taguchi based greyrelation analysis", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1185 (1): 012003 (2021).
44. Sakin, R., Ay, I., and Yaman, R., "An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials", *Materials & Design*, 29 (1): 212–217 (2008).

45. Voicu, R., "Structural Characterization and Mechanical Behaviour of Carbon Fiber/epoxy Composite for Aeronautical Field", *Materiale Plastice*, 49 (1): 34–40 (2012).
46. Arsun, O., Akgul, Y., and Simsir, H., "Investigation of the properties of Al7075-HTC composites produced by powder metallurgy", *Journal of Composite Materials*, 55 (17): 2339–2348 (2021).
47. Olszewski, A., Nowak, P., Kosmela, P., and Piszczyk, \Lukasz, "Characterization of Highly Filled Glass Fiber/Carbon Fiber Polyurethane Composites with the Addition of Bio-Polyol Obtained through Biomass Liquefaction", *Materials*, 14 (6): 1391 (2021).
48. Sebaey, T. A., Rajak, D. K., and Mehboob, H., "Internally stiffened foam-filled carbon fiber reinforced composite tubes under impact loading for energy absorption applications", *Composite Structures*, 255: 112910 (2021).
49. Akgul, Y., Ahlatci, H., Turan, M. E., Erden, M. A., Sun, Y., and Kilic, A., "Influence of carbon fiber content on bio-tribological performances of high-density polyethylene", *Materials Research Express*, 6 (12): 125307 (2019).
50. Feyzullohoğlu, E. and Recep, İ., "Farklı Yük ve Hızlarda Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerin Aşınması", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5 (1): 259–266.

ÖZGEÇMİŞ

Metin Efe YALÇIN, ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde öğrenime başlayıp 2019 yılında mezun oldu. 2019 yılında başladığı, yüksek lisans eğitimine Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında devam etmektedir. 2019 yılından itibaren özel sektörde çalışmalarına devam etmektedir.