

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK KARBON ELYAF YENİDEN KULLANIMI İÇİN
POLİMER MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİT
MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

HÜROL KOÇOĞLU
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK KARBON ELYAF YENİDEN
KULLANIMI İÇİN POLİMER MATRİSLİ
HİBRİT KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ

HÜROL KOÇOĞLU
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK
II. DANIŞMANI
PROF. DR. GÜRALP ÖZKOÇ

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DEVELOPMENT OF POLYMER MATRIX
HYBRID COMPOSITE MATERIAL
FOR REUSING WASTE CARBON FIBER**

HÜROL KOÇOĞLU
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK
II. THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. GÜRALP ÖZKOÇ

GEBZE
2023

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/12/2022 tarih ve 2022/64 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/12/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hürol KOÇOĞLU'nun tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Babür ÖZÇELİK

ÜYE : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE : Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK

ÜYE : Prof. Dr. Eyup BAĞCI

ÜYE : Doç. Dr. Emel KURAM

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Yakın geçmişte özellikle karbon emisyonun azaltılması ve yakıt ekonomisini sağlamak adına hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin geliştirilmesi oldukça ilgi kazanmıştır. Bu süreçte, üstün spesifik özellikleri nedeniyle karbon elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitler geniş kullanım alanları bulmuştur. Karbon elyafa artan talep zamanla yüksek miktarda karbon elyaf içerikli atığın oluşmasına neden olmuş ve bu atıkların yeniden kullanıma kazandırılması çekici bir çalışma alanı haline gelmiştir. Çoğunlukla geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi ile yeniden kullanımı sağlanan atık karbon elyaflar potansiyelini tam anlamı ile sergileyememektedir. Bu durum atık karbon elyafların yeniden kullanım verimini arttırmak adına yeni yöntem arayışlarını tetiklemiştir. Bu tez çalışmasında kısa atık karbon elyafların yeniden kullanım verimini arttırmak adına yeni bir üretim yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile kısa atık karbon elyafların yüksek katma değerli sürekli elyaf yapılar içerisinde kullanımının sağlanması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında kısa atık karbon elyaflar poliamit 6.6 (PA6.6) elyaflar ile laboratuvar ortamında işlenerek hibrit dokunmamış keçeler haline getirilmiş ve cam elyaf kumaşlar arasına dizilerek sıcak preslenerek özgün hibrit kompozit laminatlar elde edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında özgün hibrit kompozitlerin içerdiği atık karbon elyaf miktarının ve cam kumaş yüzey modifikasyonu türünün fiziksel, mekanik ve dinamik mekanik özellikler üzerine etkileri irdelenmiştir. İkinci aşamada, geliştirilen hibrit kompozitlerin malzeme içeriğinin tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiş, son aşamada ise hibrit kompozit laminatların çevresel koşullar altında özellik değişimleri gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda bu üretim yaklaşımı ile atık karbon elyafların sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımını %24, elastik modülünü %20, eğme dayanımını %60 ve eğme modülünü %50 oranında arttırabildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca cam kumaş yüzey modifikasyonunun özgün hibrit kompozitlerin eğme özelliklerine oldukça yüksek etki sağladığı görülmüştür. Atık karbon elyaf kullanımı kompozit malzemenin erozif aşınma davranışını olumsuz etkilerken, çizilme sertliğini arttırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık Karbon Elyaf, Hibrit Kompozit, Polimer Matris, Yüzey Modifikasyonu, Arayüzey.

SUMMARY

In the recent past, the development of light and high-strength materials has gained high interest, especially to reduce carbon emissions and provide fuel economy. In this process, thanks to their superior specific properties, carbon fiber and carbon fiber reinforced composites have found wide application areas. Increasing demand for carbon fiber has led to generate huge amount of waste containing carbon fiber and reusing these wastes has become an attractive field of study. Waste carbon fibers, which are mostly reused by traditional injection molding method, cannot fully demonstrate their potential. This situation has triggered the search for new methods to increase the reuse efficiency of waste carbon fiber. In this thesis, a new production approach has been developed to increase the reuse efficiency of short waste carbon fibers. With this approach, it is aimed to ensure the use of short waste carbon fibers in high value-added continuous fiber structures. Within the scope of the study, short waste carbon fibers were processed with polyamide 6.6 (PA6.6) fibers in the laboratory and turned into hybrid non-woven mats and hot pressed between glass fiber fabrics and novel hybrid composite laminates were obtained. In the first stage of the study, the effects of waste carbon fiber content and glass fabric surface modification on physical, mechanical, and dynamic mechanical properties of the novel hybrid composites were examined. In the second stage, the effects of the material content of the developed hybrid composites on the tribological properties were examined. In the last stage, the property changes of the hybrid composite laminates under environmental conditions were observed. At the end of the experimental studies, this novel production approach resulted in that waste carbon fibers can increase the tensile strength of continuous fiber reinforced composites by 24%, elastic modulus by 20%, bending strength by 60% and bending modulus by 50%. In addition, it has been observed that the glass fabric surface modification has a very high effect on the bending properties of the novel hybrid composites. While waste carbon fibers negatively affected the erosive wear behavior of the composite material, it increased the scratch hardness.

Keywords: Waste Carbon Fiber, Hybrid Composite, Polymer Matrix, Surface Modification, Interface.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca üstlendiği yoğun ve zorlu görevlere rağmen, bilgi ve desteğini esirgemeyen, danışmanım Prof. Dr. Babür ÖZÇELİK'e ve tez çalışmam sırasında polimer ve kompozitler konusundaki engin bilgilerini benimle paylaşan II. Danışmanım Prof. Dr. Güralp ÖZKOÇ'a paha biçilmez katkılarından dolayı minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitemde bulunarak değerli fikirleri ile katkıda bulunan hocalarım Prof. Dr. Fevzi BEDİR ve Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Üretim metodu geliştirilmesi ve optimizasyonu konusunda değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Mustafa Cengiz ALTAN'a ve deneysel çalışmalarım, tez ve makale yazım süreçlerimde desteğini bir gün dahi esirgemeyen, abiden öte gördüğüm hocam Doç. Dr. Mehmet KODAL'a minnetlerimi sunarım.

Yoğun üretim süreçleri sırasındaki yardımları ile bana destek olan ve birlikte çalışmaktan gurur duyduğum laboratuvar çalışma arkadaşlarım; Nazlı YAZICI, Gizem URTEKİN, Özge İNAN, Merve METİN, Rumeysa YILDIRIM, Gülşah DEMİR'e ve lisans öğrencileri; Muhammed Can DEMİRCİ, Eren ATIŞ, İpek YILMAZ, Zeynep KARA, Zehra Nur AKÇAY, Rabia KUMRU, Sinemnur GÖKÇEK ve Hida ATALAN'a teşekkürü borç bilirim.

Yüzey modifikasyonu çalışmalarındaki katkılarından dolayı Arş. Gör. Dr. Togayhan KUTLUK'a, tribolojik karakterizasyon çalışmalarım için alt yapı imkânı sunan Dr. Öğr. Üyesi Alp Eren ŞAHİN ve Doç. Dr. Sinan FİDAN'a ve tribolojik karakterizasyon çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Orkan Baran KORKUSUZ ve Arş. Gör. Pelin ÖZZAİM'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda kullandığım malzemelerin teminindeki yardımlarından dolayı, Kordsa, DowAksa ve Koloğlu Kimya firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak duygusal iniş ve çıkışlar yaşadığım, yoğun ve uzun tez sürecimde desteğini bir gün dahi bırakmayan ve her zorlukta tekrar ayağa kalkmamı sağlayan sevgili eşim Beste KOÇOĞLU'a ve maddi – manevi desteğini her zaman hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	3
2. TEMEL BİLGİLER	6
2.1. Karbon Elyaf	6
2.1.1. Karbon Elyaf Özellikleri	6
2.1.2. Karbon Elyaf Tarihçesi	9
2.1.3. Karbon Elyaf Üretimi	10
2.1.3.1. PAN Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi	10
2.1.3.2. Zift Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi	12
2.1.3.3. Selüloz Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi	13
2.1.3.4. Lignin Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi	13
2.1.3.5. Diğer Öncüllerden Karbon Elyaf Üretimi	14
2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler	15
2.2.1. Polimerik Matrisli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler	17
2.2.1.1. Termoset Matris Malzemeleri	17
2.2.1.2. Termoplastik Matris Malzemeleri	18
2.3. Atık Karbon Elyaf	19
2.4. Karbon Elyaf ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Geri Dönüşümü	22
2.4.1. Mekanik Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü	23
2.4.2. Isıl Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü	24
2.4.3. Kimyasal Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü	25

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
3.1. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Yeniden İşleme Çalışmaları	28
3.2. Dokunmamış Keçe Üretimi ile Yeniden İşleme Çalışmaları	30
3.2.1. Islak Serme (Wet-laid) Yöntemi Çalışmaları	30
3.2.2. Kuru Serme (Dry-laid) Yöntemi Çalışmaları	31
3.3. Hibrit İplik Üretimi ile Yeniden İşlenme Çalışmaları	34
3.3.1. Sarımlı Eğirme (Wrap Spinning) Yöntemi Çalışmaları	34
3.3.2. Kelebekli Eğirme (Flyer Spinning) Yöntemi Çalışmaları	35
3.3.3. Sürtünmeli Eğirme (Friction Spinning) Yöntemi Çalışmaları	37
3.4. Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı	39
4. MALZEME ve YÖNTEM	41
4.1. Malzeme Seçimi	41
4.2. Malzeme Özellikleri	43
4.3. Numune Hazırlık Aşamaları	45
4.3.1. Cam Elyaf Kumaş Hazırlığı ve Yüzey Modifikasyonu	45
4.3.2. Dokunmamış Keçe Üretimi	47
4.3.3. Hibrit Kompozit Laminat ve Referans Malzeme Üretimleri	49
4.3.4. Test Numunesi Kesim İşlemi	55
4.4. Karakterizasyon Yöntemleri	56
4.4.1. Mekanik ve Dinamik Mekanik Testler	56
4.4.1.1. Çekme Testi	56
4.4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi	57
4.4.1.3. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)	58
4.4.2. Kimyasal Analizler	58
4.4.2.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometresi	59
4.4.3. Fiziksel Analizler	59
4.4.3.1. Yakma Testi	59
4.4.3.2. Optik Mikroskop Analizleri	60
4.4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	60
4.4.4. Tribolojik Analizler	61
4.4.4.1. Eroziyon Aşınma Testi	61
4.4.4.2. Çizilme Testi	63
4.4.4.3. Yüzey Topoğrafyası ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	64

4.4.5. Çevresel Şartlandırma Çalışmaları	65
4.4.5.1. Nem Yutum Ölçümleri	65
4.4.5.2. Nem ve Sıcaklığın Mekanik ve Dinamik Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi	66
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	67
5.1. Hibrit Kompozit Laminatların Fiziksel, Mekanik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyonu	67
5.1.1. Cam Kumaş Yüzey Modifikasyonu Kimyasal Analizi	68
5.1.2. Yakma Testi Sonuçları	70
5.1.3. Çekme Testi Sonuçları	72
5.1.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	79
5.1.5. DMA Sonuçları	85
5.1.6. SEM Analizi Sonuçları	90
5.2. Hibrit Kompozit Laminatların Tribolojik Karakterizasyonu	93
5.2.1. Eroziyon Aşınma Genel Bilgileri ve Literatür Araştırması	94
5.2.2. Eroziyon Aşınma Testi Sonuçları	96
5.2.3. Çizilme Aşınması Genel Bilgileri ve Literatür Araştırması	105
5.2.4. Çizilme Testi Sonuçları	107
5.3. Hibrit Kompozit Laminatlara Çevresel Koşulların Etkisi	111
5.3.1. Nem ve Sıcaklık Etkisi Genel Bilgileri ve Literatür Araştırması	112
5.3.2. Nem Yutum Sonuçları	115
5.3.3. Eğme Testi Sonuçları	118
5.3.4. DMA Sonuçları	121
6. SONUÇLAR	124
6.1. Sonuçlar	124
6.2. Önerileri	128
KAYNAKLAR	130
ÖZGEÇMİŞ	142
EKLER	143

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
σ_f	: Eğme gerilmesi
E_f	: Eğme modülü
b	: Genişlik (eğme testi)
P	: Kuvvet (eğme testi)
L	: Alt destekler arası mesafe (eğme testi)
d	: Kalınlık (eğme testi)
m	: Kuvvet – şekil değişim eğrisi eğimi (eğme testi)
ρ	: Yoğunluk
m	: Kütle (yakma testi)
V	: Hacimsel oran (yakma testi)
Δm	: Kütle kaybı (erozif aşınma testi)
M	: Aşındırıcı partikül kütle (erozif aşınma testi)
F_N	: Normal kuvvet (çizilme testi)
q	: Malzeme sabiti (çizilme testi)
w	: Çizik genişliği (çizilme testi)
HS	: Çizilme sertliği (çizilme testi)
$\Delta W_{(t)}$	: Nem yutum oranı (nem yutum testi)
W_i	: Nem yutum öncesi ağırlık (nem yutum testi)
W_s	: Nem yutum sonrası ağırlık (nem yutum testi)
gr	: Gram
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre

Hz	: Hertz
%X _c	: % kristalinite
T _g	: Camı geçiş sıcaklığı
T _m	: Erime sıcaklığı
E'	: Depo modülü
tanδ	: Kayıp faktör
Al ₂ O ₃	: Alümina
CH ₂	: Metilen
CH ₃	: Metil
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbon dioksit
H ₂ O	: Su
N ₂ O	: Nitröz oksit
SF ₆	: Sülfürhekza florid
3-APTS	: 3-Aminopropiltrietoksisilan
AB	: Avrupa Birliği
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
CF	: Karbon elyaf
CFRC	: Caron Fiber Reinforced Composite (Karbon elyaf takviyeli kompozit)
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
FRPC	: Elyaf takviyeli polimer kompozit
HFCs	: Hidroflorür karbonlar
HT	: Yüksek dayanımlı
IM	: Orta modüllü
LM	: Düşük modüllü
PFCs	: Prefloro karbonlar
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
OPF	: Oksitlenmiş PAN elyaf
PA	: Poliamit
PA6	: Poliamit 6
PA6.6	: Poliamit 6.6
PAN	: Poliakrilonitril
PBS	: Poli(bütilen süksinat)

PBT	: Poli(bütilen tereftalat)
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PEKK	: Polieterketonketon
PLLA	: Poli(L-laktik asit)
PP	: Polipropilen
PPS	: Poli(fenilen sülfid)
PS	: Polistiren
PVC	: Poli(vinil klorür)
SEKK	: Sürekli elyaf katkılı kompozit
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SHT	: Süper yüksek dayanımlı
SM	: Standart modüllü
SMC	: Sheet molding compound
UHM	: Ultra yüksek modüllü

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: PAN ile karbon elyaf üretim aşamaları ve PAN zincir yapısı değişimi.	11
2.2: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin matris malzemesine göre sınıflandırılması.	15
2.3: PA6.6'nın kimyasal yapısı.	19
2.4: Yıllara göre karbon elyaf talebi.	20
2.5: Atık karbon elyaf örnekleri a) kuru tekstil atıkları, b) prepreg atıkları, c) CFRC atıkları, d) kullanım ömrü sonuna gelmiş CFRC.	21
2.6: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri.	23
2.7: Akışkan yataklı geri dönüşüm yöntemi akış şeması.	25
3.1: Atık karbon elyaf yeniden kullanımı için tercih edilen üretim yöntemleri.	28
3.2: Sarımlı eğirme yöntemi ile üretilmiş hibrit iplik ve bobin.	35
3.3: Kelebekli eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve bobin.	36
3.4: Sürtünmeli eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve bobin.	37
4.1: Temin edilen atık karbon elyaf ve üretim öncesi hazırlığı.	43
4.2: 3-APTS kimyasal yapısı.	45
4.3: Cam elyaf kumaş ve kumaş kesim mastarı.	45
4.4: Cam kumaşın 3-APTS ile yüzey modifikasyonu aşamaları.	46
4.5: a) 3-APTS hidroliz reaksiyonu, b) Cam kumaş yüzey modifikasyonu sonrası kimyasal yapı.	47
4.6: PA6.6/Atık karbon elyaf dokunmamış keçe üretim aşamaları.	48
4.7: Çalışmada kullanılan malzeme sınıflandırması ve numune kodlama sistemi.	50
4.8: Tez çalışması için tasarlanan kalıp çizimleri.	52
4.9: Kompozit laminat üretiminde kullanılan sıcak pres.	53
4.10: Kompozit ve hibrit kompozit laminat üretim aşamaları.	54
4.11: Su jeti sonrası test numunelerinin görüntüsü.	55
4.12: a) Çekme testi numunesi ölçüleri, b) Çekme test cihazına numune bağlantısı.	56

4.13:	a) Üç nokta eğme test numunesi ölçüleri, b) Üç nokta eğme cihazına numune bağlantısı.	57
4.14:	a) DMA analizi numunesi ölçüleri, b) DMA cihazına numune bağlantısı.	58
4.15:	Erozif aşınma testi numune fikstürü ve nozul bağlantısı.	61
4.16:	Çizilme testi düzeneği.	63
4.17:	Çizilme genişliği ve derinliği ölçümü.	64
4.18:	Erozif aşınma bölgesi pürüzlülük ölçümü.	65
5.1:	Cam kumaş ve saf silan FTIR spektrumları.	69
5.2:	Levha, kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların çekme dayanımı ve elastik modülü.	72
5.3:	Levhaların tipik gerilme – gerinim eğrileri.	74
5.4:	Kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.	75
5.5:	İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.	77
5.6:	Silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.	77
5.7:	Çekme testi hasar bölgeleri.	78
5.8:	Levha, kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların eğme dayanımı ve eğme modülü.	79
5.9:	Levhaların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.	81
5.10:	Kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.	82
5.11:	İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.	83
5.12:	Silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.	83
5.13:	Üç nokta eğme hasar bölgeleri (a) CA, (b) CS, (c) H20A, (d) H20S.	84
5.14:	Levhaların DMA analizi sonuçları.	87
5.15:	Kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.	88
5.16:	İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.	89
5.17:	Silanlanmış cam kumaş ile üretilmiş hibrit kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.	89

5.18:	Kompozit laminatların SEM görüntüleri a), b) CA, c), d) CD, e), f) CS.	90
5.19:	Hibrit kompozit laminatların SEM görüntüleri a), c) H20A, b), d) H20S.	92
5.20:	Hibrit kompozit laminatların cam kumaş bölgesinin SEM görüntüleri a) H10A, b) H10S, c) H20A, d) H20S, e) H30A, f) H30S.	93
5.21:	Partikül çarpma açısına göre erozyon oranı değişimi.	98
5.22:	30° partikül çarpma açısında oluşan topoğrafyalar a) CA, b) CS, c) H10A, d) H10S, e) H20A, f) H20S.	100
5.23:	H20A laminatının erozif aşınma yüzeyi.	101
5.24:	Ortalama pürüzlülük sonuçları.	102
5.25:	Erozif aşınma bölgesi SEM görüntüleri a), b) S00, c) CA, d) CS, e) H20A, f) H20S.	103
5.26:	Çizilme sertliği sonuçları.	107
5.27:	Çizilme derinliği ölçüm sonuçları.	108
5.28:	Çizilme bölgesi SEM görüntüleri a), b) CA, c), d) CS, e), f) H10A, g), h) H10S.	110
5.29:	PA6.6 levhaların nem yutum sonuçları.	116
5.30:	Kompozit ve hibrit kompozit laminatların nem yutum sonuçları.	117
5.31:	Sıcaklık ve nemin muhafaza edilen eğme dayanımına etkisi.	119
5.32:	Farklı şartlandırma sürelerine göre eğme dayanımı sonuçları a) 100 saat, b) 250 saat, c) 500 saat, d) 1000 saat.	120
5.33:	Sıcaklık ve nemin muhafaza edilen eğme modülüne etkisi.	120
5.34:	Nemin depo modüle etkisi a) CS 23°C, b) CS 60°C, c) H10S 23°C, d) H10S 60°C, e) H20S 23°C, f) H20S 60°C.	122

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Karbon elyaf özellikleri.	7
2.2: Karbon elyaf ve muadil malzemelerin mekanik özellikleri.	7
2.3: Farklı karbon elyaf adlandırmaları ve özellikleri.	8
3.1: Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.	30
3.2: Islak serme yöntemiyle atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.	31
3.3: Kuru serme yöntemiyle atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.	33
3.4: Hibrit iplik yöntemi ile atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.	38
4.1: Cam elyaf kumaş özellikleri.	44
4.2: PA6.6 elyaf özellikleri.	44
4.3: Malzeme kodları ve malzeme içerikleri.	51
4.4: Eroziyon aşınma test parametreleri.	62
4.5: Çizilme test parametreleri.	63
5.1: Karakterizasyon uygulanan malzemeler.	68
5.2: Yakma testi sonucunda hesaplanan hacim oranları.	71
5.3: Çekme testi sonuçları.	73
5.4: Üç nokta eğme testi sonuçları.	80

1. GİRİŞ

Küresel ısınma günümüzde dünyamızı ilgilendiren en büyük problemlerin başında gelmektedir. Karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄), hidroflorür karbonlar (HFCs), nitroz oksit (N₂O), perfloro karbonlar (PFCs), sülfürhekza florid (SF₆) gibi ısı tutma kapasitesi yüksek gazların atmosfer içerisindeki miktarının artması küresel ısınmanın başlıca sebeplerindendir. Bahsedilen bu gazlara genel olarak sera gazı adı verilirken içlerinde en yüksek miktar ve etkiye sahip olanı CO₂ gazıdır. Petrol türevli yakıtların kullanımındaki artış atmosferdeki CO₂ miktarını arttıran en önemli etkenler arasında yer almaktadır.

Atmosferdeki sera gazlarının artışı küresel ısınmaya ve dolayısı ile iklim değişikliğine sebep olması küresel anlamda çevre bilincinin artmasını tetiklemiştir. Bununla beraber Avrupa Birliği (AB) gibi kuruluşlar birçok endüstri sektörü için sert ve bağlayıcı düzenlemeler ve gelecek hedefleri ortaya koyarak dünyamızın yüz yüze kaldığı bu probleme karşı önlemler almaya başlamıştır. AB, CO₂ salınımını azaltmak adına otomotiv ve ticari havacılık endüstrileri için önümüzdeki yıllarda uygulanacak zorlu hedefler belirlemiştir [1]. “Regulation(EU)-2019/63” ile 2021'den itibaren üretilen tüm araçlarının CO₂ salınımlarının, 2015 yılı ortalamalarına göre %40 oranında azaltılmasını zorunlu kılarak, “EuropeanCommission-2014, Clean Sky2” ile 2024'ten sonra üretilen uçakların CO₂ salınımlarının 2014 ortalamalarına göre %20 ila 30 oranında azaltılmasına karar verilmiştir.

Parça/araç ağırlığının azaltılması, yakıt tüketimini dolayısıyla da CO₂ salınımını doğrudan etkilemesi nedeniyle umut vaat eden bir çözüm olarak görülmektedir [2]. Araç ağırlığının azaltılması için en yoğun tercih edilen yöntem hafif malzemelerin geliştirilmesi ve ağır muadilleri yerine kullanımıdır. Bu nedenle, yüksek yoğunluğa sahip metalik malzemeler yerine daha düşük yoğunlukta olan ancak spesifik dayanım ve modül açısından benzer hatta üstün özelliklerine sahip olan polimer matrisli kompozit malzemeler geliştirilmesi konusu birçok sektörde birincil ilgi alanı olmuştur.

Elyaf takviyeli polimer kompozitler (FRPC), tasarımcılara düşük emisyon hedefine ulaşmaları için geniş imkânlar sunan malzemelerdir [3]. Olağanüstü dayanım/ağırlık oranı, uzun hizmet ömrü, yüksek aşınma ve korozyon direnci sayesinde FRPC'ler, başta otomotiv, havacılık, denizcilik, spor ekipmanları ve rüzgâr

enerjisi gibi endüstri kollarında metalik malzemeler yerine kullanım alanı bulmuştur [4-7].

Yüksek sıcaklık ve agresif çalışma koşullarında dayanıklılığı ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı karbon elyaf (CF) ve karbon elyaf takviyeli kompozitleri (CFRC) diğer elyaf takviyeleri arasında ön plana çıkmaktadır [7]. Ancak karbon elyaf üretimi yüksek enerji tüketimi gerektiren bir üretim prosesine sahiptir ve bu karbon elyaf tercihi adına bir handikap oluşturmaktadır [8]. Bu handikap nedeniyle karbon elyaflar genellikle uçaklar ve pahalı spor arabalar gibi yüksek performans gerektiren ve katma değeri yüksek uygulamalarda tercih edilmektedirler. Yüksek üretim maliyetine rağmen, karbon elyaf talebi yıllar içinde istikrarlı bir şekilde artmıştır. Yapılan pazar araştırmaları göstermektedir ki oluşan bu trend yakın gelecekte de devam edecektir. Karbon elyaf üretimi miktarının artan talebi karşılayamama ihtimali de çok uzak bir ihtimal değildir.

Karbon elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere olan yoğun talep, yakın gelecekte bu malzeme ile üretilen ürünlerin kullanım ömrü sonuna gelmesi ile ciddi bir atık problemini de beraberinde getirecektir. Öyle ki önümüzdeki birkaç on yılda rüzgâr enerjisi ve havacılık sektörlerinde sırasıyla 483,000 ton ve 500,000 ton kullanım ömrü sonuna gelmiş CFRC atık malzemenin ortaya çıkması beklenmektedir [9]. Bu denli yüksek miktarda karbon elyaf içeren atık malzemenin meydana gelme ihtimali bile, bu malzemelerin geri dönüşümü ve yeniden kullanımını önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir.

Yakın zamana kadar, karbon elyaf içeren atıkların bertarafı için başlıca yollarından birisi birçok atıkta olduğu gibi toprağa gömme şeklinde olmuştur. Öyle ki 2000'li yıllara kadar karbon elyaf atıkların yalnızca %5'inin geri dönüştürüldüğü raporlanmıştır [8]. Ancak tercih edilen bu yöntem, doğa üzerinde uzun vadeli olumsuz etkilere neden olabilmektedir [10]-[12]. Atıkların toprağa gömülmesi konusunda AB, "EU directive 1999/31/EC" ve "EU directive 2000/53/EC" gibi yönergeler yayınlayarak, bu konuya ciddi kısıtlamalar getirmiştir. Böylece kullanım ömrü sonuna gelen araçların ağırlıkça %95'inin geri dönüştürülmesi ve en az %85'inin tekrar kullanıma kazandırılması şart koşulmuştur. Bu gibi yönergelerin etkisi ile karbon elyafın birçok sektörde kullanılabilmesi için atıklarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı konusunda yeni fikirlere ve gelişmelere ihtiyaç duyulmaktadır [13].

Yakın geçmişteki bu gelişmeler ışığında atık karbon elyafların yeniden kullanımı üzerine literatür ve endüstriyel uygulamalardaki eksikleri gidermek adına bir çalışma yapılması bu tezin motivasyonunu oluşturmuştur. Bu noktada güncel gelişmeler ve literatür daha detaylı incelenerek atık karbon elyafların yeniden kullanımı konusundaki boşluklar belirlenmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, son yıllarda atık karbon elyafların yeniden kullanımı adına özellikle endüstriyel tekstil metotları kullanılarak çeşitli umut veren çalışmaların gerçekleştirildiği görülmüştür. Bunlardan en dikkat çekenleri atık karbon elyafların termoplastik elyaflarla beraber işlenmesi ile hibrit dokunmamış keçelerin (nonwoven mat) ya da hibrit ipliklerin (hybrid yarn) üretildiği çalışmalar olmuştur. Bahsedilen konudaki çalışmalar daha detaylı incelendiğinde ise umut vaat eden sonuçların çoğunlukla 30 mm ve üzerindeki hatta 60 mm'yi geçen uzunluklardaki atık karbon elyaflar ile gerçekleştirildiği ve bunun sebebinin üretim metodunun kısıtları ile alakalı olduğu kanısına varılmıştır. Özellikle yüksek mekanik değerlerin ulaşıldığı hibrit iplik üretimi çalışmalarında sağlıklı yapıda iplik üretimi için oldukça uzun elyaflar kullanılmıştır.

Atık karbon elyaflar elde edilme türlerine göre farklı sınıflara sahipken CFRC'lerin geri dönüşümü sonucu ortaya çıkan atık karbon elyafların büyük çoğunluğunun geri dönüşüm sırasında 30 mm altında uzunluğa sahip olduğu hatta toz şeklinde elde edilebildiği bilinmektedir. Buradan hareketle düşük uzunluktaki atık karbon elyaflar ile yüksek katma değerli yapıların eldesi konusunun çalışmaya açık bir alan olduğu görülmüş ve tez konusunun belirlenmesinde bu nokta üzerine odaklanılmıştır.

1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu doktora tez çalışmasının temel amacı mevcut literatürde eksik olarak görülen görece kısa atık karbon elyaflardan maksimum verimi almak adına yeni ve kolay uygulanabilir bir üretim sistematığı geliştirilmesidir. Yapılan araştırmalar ve ön denemeler sonrasında 30 mm altındaki karbon elyafların tek başına yüksek mekanik değerlere ihtiyaç duyulan yapısal parçalarda ana yük taşıyıcı olarak kullanılmasının mümkün olmadığı görülmüştür. Ancak mevcut üretim metotları ile kısa atık karbon elyaflardan yeterli verimin alınamayacağı düşünülmüştür. Buradan

hareketle atık karbon elyafların hibrit takviye elemanı olarak hali hazırda yüksek dayanıma ve katma değere sahip sürekli elyaf takviyeli kompozitler içerisinde kullanımının sağlanmasının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi ile tez amacına ulaşılacağına karar verilmiştir. Böylelikle mevcut üretim yöntemleri ile çok daha düşük mekanik özelliklere sahip parçaların üretiminde kullanılan kısa atık karbon elyafların daha yüksek katma değerli yapılarda kullanımının sağlanması amaçlanmıştır. Böylelikle literatüre ve olası ticari uygulamalara ışık tutarak kısa atık karbon elyafların potansiyelinden mevcut yöntemlerden daha fazla faydalanmasının sağlanması hedeflenmiştir.

Bu noktada yapılan çalışmada kullanılacak malzemelerin seçimi gerçekleştirilerek ön denemeler yapılmıştır. Öncelikle temin edilen atık karbon elyafların cam kumaşlar ve PA6.6 matrisi ile kullanılmasına karar verilmiştir. Malzeme seçimi hakkında detaylı bilgiler tezin ileriki bölümlerinde sunulmuştur. Amaçlanan yeni üretim yaklaşımının geliştirilmesi için ön denemeler sırasında matris malzemesinin üretim kolaylığı ve farklı elyaflar arasında daha rahat dağılımının sağlanabilmesi için elyaf formda olmasının daha uygun olduğuna karar verilmiş ve ön denemelere PA6.6 elyaflar ile devam edilmiştir. Ön denemeler sonucunda, hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin PA6.6 ve atık karbon elyafların homojen dağılımına yüksek oranda bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle ön denemelerde kullanılan basit (elle) karıştırma yöntemi terk edilerek alternatif arayışına girilmiştir. Uzun süren ön denemeler sonrasında cam kumaşlar arasında kullanılacak olan atık karbon/PA6.6 elyaf karışımının basit bir ıslak serme (wet-laid) yöntemi ile gerçekleştirilebileceği sonucuna ulaşılmış ve tez çalışmalarına geçilmiştir.

Tez çalışmaları sırasında üretilen hibrit kompozitlerin eğme özelliklerinde cam kumaş ve matris arasındaki düşük yapışma davranışının ürünün olası ticarileşmesi konusunda handikap oluşturduğu öngörülmüştür. Bu nedenle çalışmaya cam kumaş yüzey modifikasyon işlemi de eklenerek genişletilmiştir. Ayrıca özgün hibrit kompozitlerin olası kullanım koşulları düşünülerek tribolojik özellikleri ve çevresel koşullar altındaki davranışları da incelenmiş ve raporlanmıştır.

Çalışmanın 1. ve 2. bölümlerinde karbon elyaf, karbon elyaf takviyeli kompozitler, karbon elyaf geri dönüşümü ve atık karbon elyaflar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Atık karbon elyafların yeniden kullanımı konusunda güncel durumunun belirlenmesi adına literatürdeki çalışmalar detaylı şekilde 3. bölüm altında sunulmuştur. Çalışmada kullanılan malzemeler, geliştirilen üretim yöntemi ve

gerçekleştirilen karakterizasyon yöntemlerinin detaylı anlatımı ise 4. bölümde gerçekleştirilmiştir. Doktora tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların bulguları ve yorumlaması 5. bölüm altında üç ana başlık altında sunulmuştur. İlk kısımda geliştirilen yeni yöntemle üretilmiş hibrit kompozit malzemenin atık karbon elyaf ve cam kumaş yüzey modifikasyonuna bağlı olarak fiziksel, mekanik ve dinamik mekanik özellikleri irdelenirken sonuçlar çeşitli gözlem yöntemleri ile desteklenmiştir. İkinci kısımda ise üretilen hibrit kompozit malzemelerin içeriklerine bağlı olarak tribolojik özelliklerinin irdelenmesi amacı ile erozif aşınma ve çizilme testi sonuçları sunulmuş ve yorumlanmıştır. Bulgular bölümünün son kısmında ise hibrit kompozitlerin çevresel koşullar altında davranışlarını gözlemek adına nem ve sıcaklık şartlandırması ile nem yutumu, mekanik ve dinamik mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Tezin 6. ve son bölümünde ise elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde raporlanmış ve konu hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Karbon Elyaf

Yapısal parçaların imalatı için mucize bir malzeme olarak görülen karbon elyaf aynı zamanda grafit elyaf olarak da adlandırılmaktadır. Diğer yapısal malzemeler ile kıyaslandığında karbon elyaf hem çok daha hafif hem de daha güçlü bir malzemedir. Çelik ile kıyaslandığında beş kat daha güçlü ve iki kat daha rijit ve hafif olması, karbon elyafın birçok mühendis ve tasarımcı tarafından tercih edilmesinin sebeplerindendir [14].

Bu elyaflar, bileşenlerin üretiminde tek başına ve olduğu gibi kullanılamamaktadırlar. Karbon elyaflar genellikle bir takviye malzemesi olarak matris içerisinde kullanılırlar. Bu tür makroskobik ve mikroskobik özellikleri birbirinden farklı birden fazla bileşene sahip yapıdaki malzemelere kompozit malzemeler adı verilmektedir. Bu denli yüksek dayanım ve düşük ağırlığa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler birçok endüstri kolunda metalik malzemeler yerine kullanımda uygulama alanı bulmaktadırlar.

2.1.1. Karbon Elyaf Özellikleri

Karbon elyaflar, cam ve organik polimer elyaflar gibi, oda sıcaklığında gerilme korozyonu veya sürünme hasarı göstermezler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, diğer malzemelere kıyasla dayanım ve modül değerleri oldukça yüksektir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler yüksek mukavemet, sertlik, daha düşük ağırlık ve olağanüstü yorulma gerektiren uygulamalar için ideal malzemedir. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklığı, kimyasal stabilite ve yüksek sönümlenme gereksinimi de karbon elyafın tercih sebeplerinin bazılarıdır. Karbon elyaflar iyi elektriksel iletkenliğe, termal iletkenliğe ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler. Genel olarak karbon elyafın üstün özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir [14].

Tablo 2.1: Karbon elyaf özellikleri.

Olumlu	Olumsuz
Yüksek dayanım – ağırlık oranı	Gevrek kırılma davranışı
Yüksek rijitlik	Yüksek üretim maliyeti
Yüksek korozyon direnci	Kullanımı için özel ekipman gereksinimi
Elektriksel iletkenlik	
Yorulma direnci	Yönlenmeye bağımlı özellik
Yüksek çekme dayanımı	
Yanmazlık	
Yüksek ısı iletkenliği	
Düşük ısı genleşme	
Düşük abrazyon aşınması	
Biyolojik uyumluluk ve X ışını geçirgenliği	
Kaydırıcılık etkisi (self-lubricating)	
Mükemmel elektromanyetik kalkanlama	
Yüksek boyutsal kararlılık	

Karbon elyafların ve muadil olabilecek malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir [14]. Çelik ile kıyaslandığında, karbon elyaflar yüksek spesifik mukavemete ve modüle sahiptir. Yine yüksek spesifik özelliklere sahip olan Kevlar elyaflar ile kıyaslandığında karbon elyaflar yine üstün özellikler sergilemektedir. Genel olarak, karbon elyaflar, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, üstün dayanım, modül ve iletkenlik kombinasyonuna sahiptir.

Tablo 2.2: Karbon elyaf ve muadil malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (kg/cm ³)	Modül (GPa)	Spesifik Modül (GPa/ρ)	Dayanım (GPa)	Spesifik Dayanım (GPa/ρ)
Karbon Elyaf	1,82	294	164	7,1	3,9
Kevlar Elyaf	1,45	135	93	2-3	1,5-2
Çelik	7,9	200	25	1-1,5	0,1-0,2
Cam Elyaf	2,5	72	28	2-3	1-1,5
Alüminyum	2,7	76	28	0,5	0,2

Karbon elyaflar farklı öncül malzemelerden (precursor) üretilmektedir. Ayrıca üretim proses parametrelerindeki değişikliklerle farklı özellikler sergilerler. Hedeflenen özelliklere göre karbon elyafın üretim şartlarının belirlenebilmesi bazı durumlarda önemli fayda sağlayabilmektedir. Karbon elyaflar sergiledikleri farklı özelliklere göre adlandırılabilir. Tablo 2.3'te farklı karbon elyaf adlandırmaları ve bu malzemelerin özellikleri verilmiştir [14].

Tablo 2.3: Farklı karbon elyaf adlandırmaları ve özellikleri.

Adlandırma	Özellik
Ultra-yüksek modüllü (UHM)	600-965 GPa (modül)
Yüksek modüllü (HM)	345-600 GPa (modül)
Orta modüllü (IM)	275-345 GPa (modül)
Standart modüllü (SM)	200-275 GPa (modül)
Düşük modüllü (LM)	40-200 GPa (modül)
Yüksek dayanımlı (HT)	> 3,0 GPa (dayanım)
Süper yüksek dayanımlı (SHT)	>4,5 GPa (dayanım)

Karbon elyaflar diğer malzemelere göre önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, üzerinde durulması gereken handikapları da vardır. İlk olarak, Karbon elyaflar plastik deformasyona uğramazlar. Yük altında karbon elyaflar bükülebilir ancak maksimum gerilme değeri aşıldığında, aniden kırılarak hasara uğrarlar. Komponent tasarım süreci sırasında, karbon elyafın bu davranışı, özellikle tasarım güvenlik faktörleri açısından hesaba katılmalıdır. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin, geleneksel malzemelere kıyasla çok daha pahalı olması bir diğer handikapıdır. Karbon elyaf ile yüksek kaliteli yapısal malzemeleri üretmek yüksek yatırım ve işçilik maliyeti ve karmaşık bir süreç gerektirir.

Karbon elyaf takviyeli malzemeler alüminyum, çelik gibi malzemelerde olduğu gibi her yönde homojen ve izotropik özellikler göstermez. Daha önce bahsedilen üstün mekanik özellikler yapıdaki karbon elyafın eksenine doğrultusundaki değerlerdir. Yani karbon elyaflar genel olarak anizotrop özellikler sergiler. Bu nedenle ürün tasarımı diğer izotropik malzemelere göre çok daha kompleks bir hal almaktadır.

2.1.2. Karbon Elyaf Tarihçesi

Karbon elyaf, otuz yılı aşkın bir süredir üstün özelliklerinin kanıtlandığı ve birçok alanda kullanım alanı bulan bir malzeme olmasına karşın keşfedilmesi çok daha eski zamanlara uzanmaktadır. 1880 yılında akkor elektrik lambalarının geliştirilmesi adına birçok çalışma gerçekleştirmiş olan Thomas Edison, pamuk ipliğinin karbonize edilmesi ile elde edilen karbon elyafı vakum altındaki bir cam küre içerisinde kullanmıştır [15]. Daha sonra Edison doğal selülozik malzemelerin çinko klorür gibi çözücüler içerisinde çözdürüp bir kalıptan sıvı içerisine ekstrüde ederek selülozu elyaf haline getirmiştir. Ardından elyaflar bir gaz fırını içerisinde havaya kapalı ortamda karbonize edilmişlerdir. Elde edilen elyaflar kırılgan ve bir yapıya sahip olduklarından dolayı iyileştirilmeye muhtaç olmuştur. İyileştirme çalışmaları, elyafların hidrokarbon buharında bekletilirken elektrik akımına maruz bırakılması ve ayrışan hidrokarbonların elyaf yüzeyi ile etkileşiminin sağlanmasını içermektedir. Böylelikle elyaf özelliklerinde bariz iyileşmeler elde edilmiştir. Bu çalışmalar tarihte karbon elyaf teriminin görüldü ilk çalışmalar olurken, daha sonraki süreçte yapılan geliştirmelere rağmen karbon elyafın elektrik lambalarında kullanımı 1910 yılında tungsten tellerin icadı ile son bulmuştur.

Karbon elyafın hikayesi 1950 yılında R. C. Houtz'un Dupont firması tarafından geliştirilen poliakrilonitril (PAN) elyafını 200°C sıcaklıkta atmosfere açık ortamda 16 – 20 saat boyunca ısıtması sonucu farklı bir yol almıştır [16]. Bu işlem sonucunda Houtz PAN elyafların beyazdan sırasıyla sarı, kahverengi ve siyah renge döndüğünü ve elde edilen ürünün alev altında %30 ağırlık kaybına uğramasına rağmen yanmadığını görmüştür. Bu çalışmada elde edilen ürün oksitlenmiş PAN elyafın (OPF) ilk örneği olmuş ve ancak yaklaşık on yıl sonra ticari önemi ortaya çıkmıştır [17].

Osaka'daki Endüstriyel Araştırma Enstitüsü'nden Shindo liderliğindeki bir ekip, 1959 ve 1962'de patent başvurusunda bulunmuş ve PAN ipliklerden karbon elyaf üretimini ilk gerçekleştiren kişiler olmuşlardır. 1961'de yayınladıkları çalışmalarda, görece yüksek mukavemetli karbon elyafların bir PAN ipliğinin pirolizinden kaynaklandığını kanıtlamışlardır. Bu çalışmalar, PAN öncü malzemesiyle günümüzde karbon elyaflarının için birçok temeli ortaya koymuştur. Ancak ne yazık ki Shindo ve ekibi bu erken çalışmanın ticari öneminden

yararlanmayı başaramamışlar ve sadece kendi yaptıkları sürecin patentini almışlardır [17].

Daha sonraki süreçte Amerika ve İngiltere başta olmak üzere birçok ülkede havacılık ve uzay alanında teşviklerin artması, karbon elyaf üretimi ve üretilen karbon elyafların geliştirilmesi konularında gelişmelerin hızlanmasını beraberinde getirmiştir.

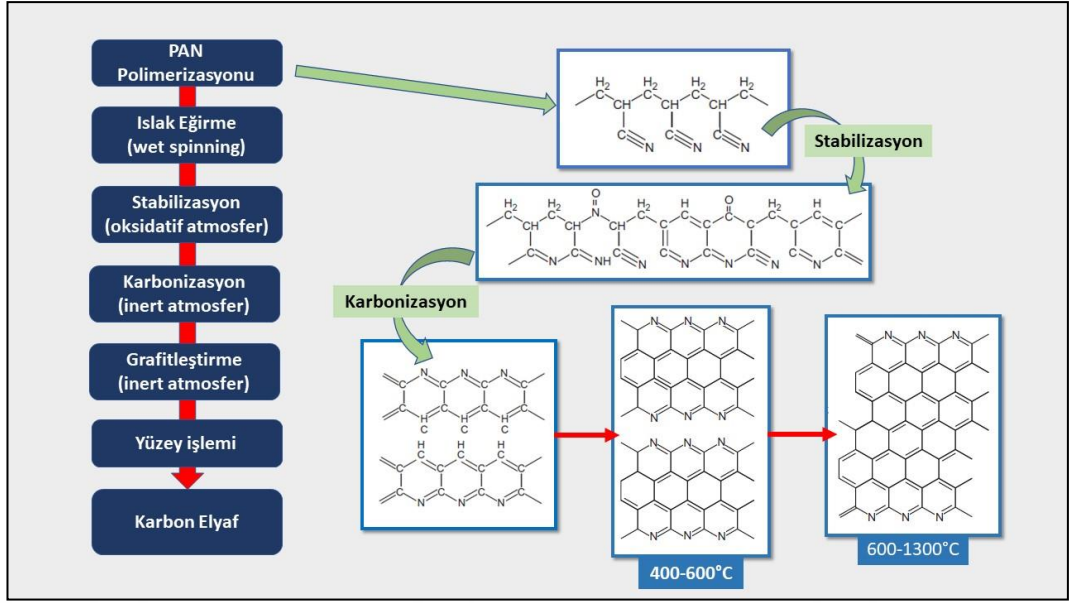
2.1.3. Karbon Elyaf Üretimi

Karbon elyaf üretmek için öncelikle ana elyaf yapısını oluşturmak amacı ile bir öncül malzeme kullanılır. Karbon elyaf üretimi temel olarak bu öncül malzemeden üretilen liflerin karbonizasyonu ile gerçekleştirilir. Karbon elyaf üretimi farklı öncül malzemelerle gerçekleştirilebilmesine karşın genel olarak benzer üretim aşamalarını içermektedir. Karbon elyafın genel üretim aşamalarını; (1) Lif yapma, (2) Stabilizasyon, (3) Karbonizasyon, (4) Yüzey iyileştirmesi ve kaplama olarak sıralayabiliriz [18]. Öncül malzemeler, karbon atomları ile bağlanmış uzun molekül zincirlerine sahip organik polimerlerdir. Her öncülün malzeme içeriği üretici firmadan firmaya değişiklik gösterirken bir üretim sırrıdır.

Karbon elyaf üretimi sırasında farklı türde gazlar ve sıvılar da kullanılmaktadır. Bu malzemelerin bazıları, nihai karbon elyafın istenen özelliklere sahip olması için elyaf ile reaksiyona girecek şekilde tasarlanırken, bir kısmı da elyaf ile belirli reaksiyona girmekten kaçınmak için veya reaksiyona girmemek için tasarlanmıştır. Üretimde kullanılan malzemeler (gazlar ve sıvılar) üreticinin amacına göre değişim göstermektedir [19].

2.1.3.1. PAN Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi

1940 yılında Dupont tarafından geliştirilen Poliakrilonitril (PAN), çekme ve basma özelliklerinin ve ayrıca karbon veriminin yüksek olması nedeniyle günümüzde karbon elyaf üretimi için en çok tercih edilen öncül malzemedir. Güncel ticari karbon elyaf üretiminin neredeyse %90 PAN öncül malzemesi ile gerçekleştirilmektedir. PAN öncül malzemeden karbon elyaf üretim aşamaları ve bu süreçte PAN'ın zincir yapısındaki değişimler Şekil 2.1'de verilmiştir [14].



Şekil 2.1: PAN ile karbon elyaf üretim aşamaları ve PAN zincir yapısı değişimi.

Akrilonitril önce metil akrilat veya metil metakrilat ile karıştırılır ve daha sonra bir poliakrilonitril üretmek için geleneksel bir süspansiyon veya çözelti polimerizasyon işleminde bir katalizör varlığında işlenir. Daha sonra tercih edilen elyaf eğirme (spinning) yöntemi ile elyaflara dönüştürülür. Eğirme adımı elyafın iç atomik yapısı oluşturulur. İstenilen çapa ulaşmak için elyaflar yıkanır ve gerilir. Bu adım, elyaf içindeki moleküllerin yönlendirilmesine yardımcı olur [14].

Karbonizasyon öncesi, elyafların lineer atomik bağlarını termal olarak daha kararlı hale getirmek için stabilizasyon işlemi uygulanır. Bu, liflerin havada 30 – 120 dakika boyunca yaklaşık 200-300°C'ye ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Bu, liflerin havadan oksijen almasına ve iç yapısındaki bağların yeniden düzenlenmesine neden olur. Stabilize edici kimyasal reaksiyonlar karmaşıktır ve birçok adımı içerir; bazıları aynı anda gerçekleşir. Ayrıca, elyafların aşırı ısınmasını önlemek için kontrol edilmesi gerekir [20], [21]. Bazı durumlarda, stabilizasyon sürecini kimyasal olarak hızlandıran farklı gazlar kullanılabilmektedir.

Elyaflar stabilize edildikten sonra karbonizasyon işlemine geçilir. Karbonizasyon oksijen içermeyen bir gazla doldurulmuş bir fırında 1000 – 3000°C sıcaklıkta ve birkaç dakikalık kısa sürede gerçekleştirilir. Fırın ortamında oksijen olmaması nedeniyle, elyaflar yüksek sıcaklıklarda yanmaz ve ısıtıldıkça, su buharı, amonyak, karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen ve nitrojen gibi çeşitli gazlar

oluşturarak karbon olmayan atomlarını uzaklaştırır. Kalan karbon atomları, elyafın uzama yönünde yönlenmiş ve güçlü bağlarla bağlanmış karbon kristalleri üretir [14].

Karbonizasyon sonrası karbon elyafların yüzey iyileştirmesi inert ya da oksidatif ortamda gerçekleştirilebilir. Bu işlemler üretilcek karbon elyafın son kullanım yerine göre değişkenlik gösterebilir. Örneğin kullanılacak matris malzemesine göre karbon elyaf yüzeyi kaplanabilir ya da modifiye edilebilir. Bu işlemlere boyutlandırma (sizing) adı verilmektedir. Bu işlem sonrasında karbon elyaf yüzeyleri daha iyi arayüzey etkileşimi sağlamak adına kaplama işlemine tabi tutulabilir.

2.1.3.2. Zift Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi

Zift, bağ yapmış aromatik halkalardan oluşan viskoelastik bir malzemedir. Zift, petrol veya kömür katranından üretilir. Zift bazlı karbon elyaflar, poliakrilonitril bazlı fiberlere kıyasla gelişmiş elektriksel ve termal özellikler gösterir. İzotropik zift bazlı karbon fiberler 1960'larda ticarileştirilmiştir, ancak mezofaz zift bazlı karbon fiberler 1980'lerde ticarileştirilmiştir. Mezofaz zift bazlı karbon fiber üretimi, poliakrilonitrilden üretime kıyasla pahalıdır [14].

Zift öncül malzemesi ile karbon elyaf üretimi;

- zift hazırlığı,
- eriyik eğirme (melt spinning),
- termosetleştirme,
- karbonlaştırma,
- grafitleştirme,
- yüzey işlemi,

aşamalarından oluşmaktadır.

Zift ile karbon elyaf üretiminde en önemli aşama zift eriyiğinin safsızlıklardan arındırılmasıdır. Bu işlem nihai ürün dayanımına direkt etki eden bir faktördür. Zift bazlı karbon elyaflar 1050 GPa modül değerine ulaşabilirken, en yüksek modüle sahip PAN karbon elyaftan (650 GPa) çok daha üstündür. Zift ile karbon elyaf üretiminde stabilizasyon basamağında PAN'dan farklı olarak termosetleşme görülmektedir [14].

Zift ile karbon elyaf üretiminin PAN'a kıyasla daha ucuz ve daha yüksek oryantasyona sahip olması avantajları arasında gösterilebilir [17].

2.1.3.3. Selüloz Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi

Selüloz, bilinen en eski karbon elyaf öncül malzemesidir. Ekonomik ve ekolojik sebeplerden dolayı günümüzde biyobazlı karbon elyaf üretimine olan ilgi artmaktadır. Selüloz lifleri erimeden termal bozunmaya uğrar ve kristal bir yapıya ulaşırlar. Selülozlardan piroliz yoluyla güçlü bir karbonlu malzeme elde edilebilir. Selülozik öncül malzemelerin özellikleri;

- yüksek termal iletkenlik,
- yüksek saflık,
- mekanik esneklik,
- düşük maliyet,

olarak sıralanabilir [14].

Karbon elyaf üretmek için kullanılan selüloz elyaflar, tekstil sınıfı suni ipek (rayon), cupramonyum suni ipek veya viskoz suni ipektir. Bu öncüllerden yapılan karbon elyaflar genellikle, karbonizasyondan sonra mekanik özellikleri etkileyen, zayıf ve kırılgan özelliğe sahiptirler. Bunun nedeni büyük hava boşlukları içermeleri ve üretim esnasında elyafların arasındaki bağların kırılması gibi üretim problemleridir. Ayrıca iyi mekanik özelliklerin sağlanması için yüksek derecede polimerizasyonun sağlanması ve yapıdaki fibrillerin iyi oryante edilmesi gereksinimi önemli bir handikaptır. Bu üretim problemleri ve kimyasal stabilitesinin düşük olması nedeniyle günümüzde selülozik öncüllerden üretilen karbon elyaflar toplam üretimin %1 – 2 oranını geçmemektedir [14], [17].

2.1.3.4. Lignin Öncülünden Karbon Elyaf Üretimi

Ligninden karbon elyaf üretimi ilk olarak 1960 yılında Japonya'da gerçekleştirilirken elde edilen kötü mekanik değerler nedeniyle daha sonra bu proje sonlandırılmıştır. Ancak son yıllarda petrol ürünlerine bağımlılığın azaltılması adına

gerçekleştirilen teşvikler nedeniyle alandaki çalışmalar tekrar canlanmaya başlamıştır [14].

Ligninde, karbon elyaf üretimi için umut verici bir aday yapan yüksek karbon içeriği mevcuttur. Ayrıca ligninler eriyik eğirmeye göre daha düşük proses maliyetine sahip olan eriyik ekstrüzyon ile elyaf eğirmeye de uygun malzemelerdir [17].

Lignin kullanmanın temel faydaları, düşük maliyeti, yüksek karbon içeriği ve karbonizasyon sırasında yüksek karbon verimidir. Aynı zamanda doğada büyük miktarlarda mevcuttur. Ayrıca, lignin kullanımı, PAN karbonizasyonu sırasında açığa çıkan azotlu gazların elemine edilmesini sağlamaktadır. Ancak, PAN'dan farklı olarak lignin, farklı moleküler ağırlıklara, fonksiyonel gruplara ve kimyasal bağlantılara sahip heterojen bir polimerdir. Bu heterojenlik, petrolden üretilen karbon fiberlere kıyasla mevcut lignin bazlı karbon elyafların daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasına neden olmaktadır [21]. Bu nedenle ligninden karbon elyaf üretimi halen çalışılan olan ve ticarileşmesi için gelişime muhtaç bir yöntemdir.

2.1.3.5. Diğer Öncüllerden Karbon Elyaf Üretimi

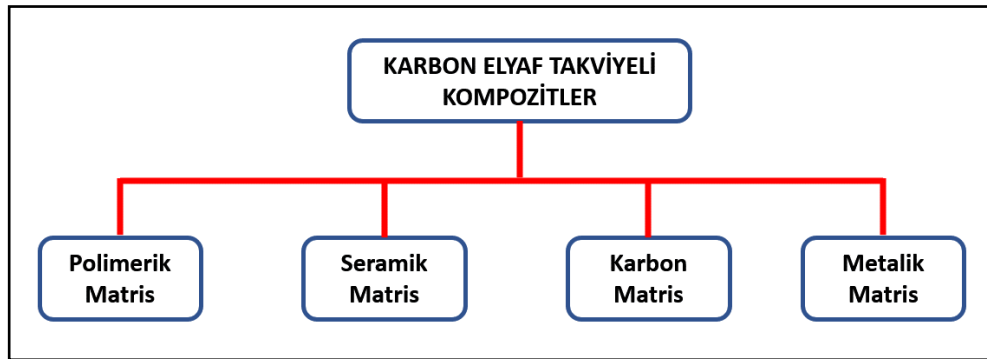
Karbon elyaf için öncül malzeme olarak için başka birçok polimer ile çalışmalar yapılmıştır. İpek, kitosan ve okaliptüs katranı da değerlendirilen diğer malzemelerdendir. Bu denemelerin ana amacı üretim maliyetini azaltmak olmuştur. Bu kapsamda karbon elyaf üretimi için üzerine çalışılmış sentetik polimerler;

- fenolik polimerler,
- poliasenektalin,
- poliamit,
- polietilen,
- polibenzoksazol,
- polibenzimidazol,
- poli(vinilden klorür),
- polistiren,

şeklinde sıralanabilir [17], [19].

2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemeler birden fazla farklı özellikteki malzemenin bir araya getirilmesi ile üretilen malzemelerdir. Bu malzemelerin üretimindeki amaç, nihai üründe istenen özellikleri (dayanım, rijitlik, hafiflik veya esneklik vb.) sağlayabilmek için bileşenlerinin farklı özelliklerinden faydalanmaktır. Metallerde olduğu gibi üretim sırasında farklı fazların oluşması durumu kompozit malzeme tanımına uymayan bir durumdur ve en az iki farklı bileşen olması gerekmektedir. Kompozit malzemelerde, (sandviç yapılar hariç) üç yönde de sürekliliği sağlayan fazı oluşturan malzemeye matris adı verilirken yapıdaki süreksiz faz dolgu ya da takviye olarak adlandırılır. Dolgu malzemesi genellikle partikül/toz şeklinde yapıya katılarak çoğunlukla maliyet düşürülmesi amacı ile kullanılırlar. Takviye malzemeleri ise temel olarak sürekli ve süreksiz olarak sınıflandırılmaktadırlar ve yapıya özellikle mekanik iyileştirme sağlaması amacı ile kullanılırlar. Elyaf takviye elemanı sıklıkla tercih edilen malzemelerken, karbon elyaf üstün özellikleri sayesinde ön plana çıkan bir takviye malzemesidir. CFRC'lerin sürekli fazlarını oluşturan matris malzemesi türüne göre Şekil 2.2'deki gibi sınıflandırılabilirler. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde takviye fazı matris karbon içerikli bir bağlayıcı olmadığı sürece üç boyutta süreksizdir [22].



Şekil 2.2: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin matris malzemesine göre sınıflandırılması.

Karbon elyaflar kırılğan olmalarına rağmen, yüksek dayanımı ve modüle sahip olmaları nedeniyle polimer, metal, karbon ve seramik matrisler içerisinde takviye malzemesi olarak kullanılmasını sağlar. Karbon elyaflar kompozit yapılar içerisinde temel olarak sürekli ve süreksiz (buradaki süreklilik yalnızca elyaf uzunluğu

doğrultusundadır) olarak bulunabilirler. Süreksiz karbon elyaflar genellikle; kısa, kırılmış ya da dokunmamış keçe formunda kullanılırken, sürekli karbon elyaflar; fitil/filament (filament sarma gibi yöntemlerle), dokunmuş kumaş ya da prepreg (genellikle reçine emdirilmiş kumaş formlar) formda tercih edilmektedir.

Takviye ile etkili güçlendirme, özellikle kısa elyaflar için elyaf ve matris arasındaki uyuma (güçlü bağ yapabilme yeteneği) bağlıdır. Tek yönlü bir kompozit için (tüm elyaflar aynı yönde sıralanmış), elyaf doğrultusundaki gerilme dayanımı, elyaf-matris bağlanmasından oldukça bağımsızdır, ancak elyaf doğrultusuna dik gerilme dayanımı ve eğilme dayanımı artan elyaf – matris bağı ile artar. Öte yandan oldukça yüksek arayüzey dayanımı özellikle seramik, karbon gibi kırılgan matrisli yapılarda çatlak ilerlemesinin arayüzeyde enerji sönümlemesini engelleyip direkt olarak elyafları deforme etmesi ve daha kırılgan bir yapıyı beraberinde getirebilir. Sünek matrisli bir kompozitte (örneğin, metaller ve polimerler) ise kırılgan elyafta başlayan bir çatlak, güçlü arayüzey dayanımı olsa dahi çatlağın sünek matrise ulaşması ile sönümlenmeye başlar. Bu nedenle, kırılgan matrisli kompozitler için optimum derecede bir elyaf – matris bağı gerekirken, sünek matrisli kompozitler için yüksek derecede bir elyaf – matrisli bağlanma tercih edilir [22].

Karbon elyafın, karbon ve seramik matrislerle kullanımı kırılganlık açısından sakıncalar içerse de özellikle karbon elyafın dayanımının yanında elektriksek ve ısıl özelliklerinden dolayı amaca yönelik uygulamalarda (son yıllarda seramik matrisli karbon elyaf kompozitlerin yaygın kullanım alanı olarak beton ön plandadır) tercih edilmektedir. Polimer matriste olduğu gibi kırılganlık problemi yaşamayan bir diğer matris malzemesi de metallerdir. Karbon elyaf ile takviye edilen metallerde dayanım değerlerinde önemli artışlar elde edilebilirken karbon elyafın herhangi bir metalden daha katodik olması, matris ile bir galvanik çift oluşturmaya ve metalde korozyon hasarına neden olabilir. Bu nedenle de metalik matrislerde kullanılacak karbon elyaflar korozyonu engelleyecek bir kaplama ile kullanılmaktadırlar [22].

Arayüzeyde ve elyaflarda oluşacak çatlaklara karşı bir sönümleme görevi gören polimerik matrisler, özgül ağırlıklarının diğer matris malzemelerine göre çok düşük olması nedeniyle ön plana çıkmışlardır. Öyle ki karbon elyafın üstün özelliklerinden yararlanmak için en yaygın ve yüksek hacimde tercih edilen matris malzemesi polimerler olmuştur [22].

2.2.1. Polimerik Matrisli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan polimerik matris malzemeleri polimerin ısı özelliklerine göre termoset ve termoplastik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Yakın zamana kadar en çok kullanım alanı bulanlar termosetler olmuştur. Son zamanlarda termosetlerin geri dönüşüm ve tekrar işlenebilme yeteneğindeki kısıtlar nedeniyle termoplastik matris malzemesinin kullanımı gelişim kazanmıştır.

2.2.1.1. Termoset Matris Malzemeleri

Termoset matris malzemeleri genellikle düşük ergime noktasına sahiptir ve oda sıcaklığında sıvı durumdadırlar. Termoset reçine olarak da adlandırılan bu malzemeler kompozit üretimi sırasında bir katalizör ya da ısı etkisi ile katılaşırlar. Bu ürünler, nihai ürün geometrisine sahip bir kalıpta katılaştırılırlar. Çünkü katılma sonrası tekrar sıvılaşmaz, yumuşamaz ya da ısıl şekil değişimine tabi tutulamazlar. Katılma sırasında polimer zincirlerinin yüksek dayanıma sahip çapraz bağlar yapması bunun nedenidir. Isıl enerji ile zincirlerinin hareketliliği sağlanamayan termosetler sınır değerin üzerinde bir ısıya maruz kaldıklarında ise polimer zincirlerinde bozunmaya maruz kalırlar.

Termosetler, malzeme içerisindeki polimer zincirleri katılma sırasında bitişik moleküler zincirler arasında kovalent çapraz bağlar oluşur. Bu bağlar polimer zincirlerinin arasındaki etkileşimi artırarak yüksek sıcaklıklarda titreşim ve dönme hareketlerine karşı gelmesine neden olur. Çapraz bağlama genellikle polimer zincirlerinin %10 ila %50'sinin bağ yapması ile gerçekleşir. Termoset polimerler genellikle termoplastiklerden daha yüksek dayanıma, modüle, sertliğe ve daha iyi boyutsal kararlılığa sahiptirler. Kompozit üretiminde kullanılan en yaygın termoset reçineler; vinil esterler, doymamış poliestерler, fenolikler, poliüretanlar ve epoksilerdir [23].

2.2.1.2. Termoplastik Matris Malzemeleri

Termoplastik polimerler termosetlerin aksine ısıtıldıklarında yumuşarlar ve ısı ile yeniden şekillendirilebilirler. Hatta termoplastik ismi de bu özelliğinden türemiştir (Latince’de “ısı ile şekillendirilebilen” anlamına gelmektedir). Bu işlem tersinir (tekrarlanabilir) bir şekilde uygulanabilir. Termoplastik polimerlerin zincirleri arasında bulunan zayıf ikincil Van der Waals bağlar sıcaklık arttıkça açılarak zincir hareketliliğinin kolaylaşmasına neden olur. Böylelikle sıcaklık artışı ile termoplastik malzemeleri şekillendirilmesi kolaylaşır. Ancak sıcaklık seviyesi erime sıcaklığının üzerine çıktıktan sonra polimer zincir titreşimleri artar ve bu titreşim kuvvetlerinin zincir üzerindeki birincil kovalent bağları kırarak seviyeye çıkması termoplastiklerin bozunması ile sonuçlanır [23].

Özellikle karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde çoğunlukla termoset reçineler tercih ediliyor olsa da genel kullanım miktarı açısından en yaygın kullanılan polimerler termoplastiklerdir. Öyle ki ticari olarak üretilen polimerlerin %85’i termoplastiktir. Termoplastik malzemeler polimer zincirlerinin katılma sırasında aldığı şekle göre amorf ve kristalin olarak iki gruba ayrılırlar.

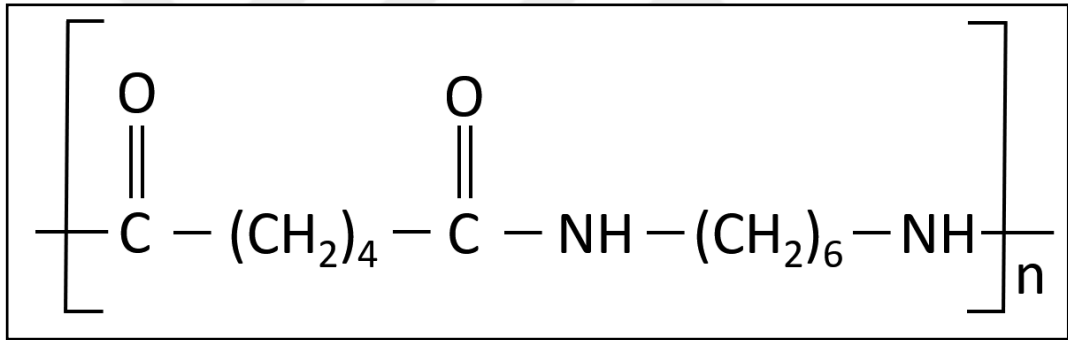
Amorf termoplastikler de katılma sırasında polimer zincirler birbirleri arasında zayıf bağlar yaparlar ve zincir dağılımları yönlenme yapmadan rastgele dağılırlar. Polimer malzemelerde yumuşama sıcaklığı olarak kabul edilen camsı geçiş sıcaklığı (T_g), amorf termoplastiklerde işleme sıcaklığının başlangıcı olarak kabul edilir. T_g üzerine çıkan amorf termoplastik zincirleri arasındaki bağlar zayıflar ve şekillendirmeye uygun hale gelirler.

Kristalin termoplastikler de ise amorflerden farklı olarak soğuma esnasında polimer zincirleri birbiri üzerine katlanarak daha düzenli bir yapıyı oluştururlar. Polimerlerin % kristalinite miktarı (% X_c) diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) gibi yöntemlerle belirlenebilir. Kristalin termoplastikler normal şartlarda %100 oranında kristalin yapıda değildir. Bu nedenle aslen yarı kristalin yapıdadırlar. Yarı kristalin yapıdaki termoplastiklerin kristal fazının ortadan kaybolduğu sıcaklık erime sıcaklığı (T_m) olarak adlandırılır. Kristalin ve yarı kristalin termoplastikler erime sıcaklığı üzerinde işlenebilirler [24].

Toplam termoplastik üretiminin %70’inden fazlası polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), poli(vinil klorür) (PVC) gibi görece düşük maliyetli

termoplastiklerden oluşmaktadır. Günümüzde termosetlere alternatif olarak kullanılmaya başlayan yüksek performanslı termoplastiklere mühendislik termoplastikleri adı verilmektedir. Poliamitler (PA), polikarbonatlar (PC), poli(fenilen sülfid) (PPS)'ler, poliimidler (PEI), polieterketonlar (PEEK ve PEKK gibi) yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilen termoplastikler arasında yer almaktadır [24].

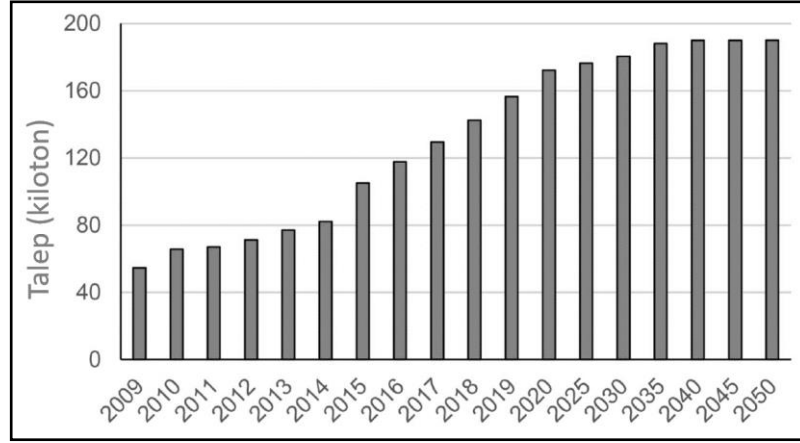
Çalışmada matris malzemesi olarak mühendislik termoplastiklerinden poliamit 6.6 (PA6.6) seçilmiştir. Poliamit'in ticari isimlerinden birisi de nyondur ve PA'lar kömür ya da petrol hammaddesinden üretilmektedir. PA'ların en yaygın kullanılan türleri PA6 ve PA6.6 olarak adlandırılanlardır. Bunların arasındaki isimlendirme farkı tekrar eden birimlerin içerdikleri karbon atomu sayısından gelmektedir. PA6.6 adipik asit ve hekzametilendiamin arasındaki kondenzasyon reaksiyonu ile üretilmektedir. PA6.6'nın kimyasal yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir [25].



Şekil 2.3: PA6.6'nın kimyasal yapısı.

2.3. Atık Karbon Elyaf

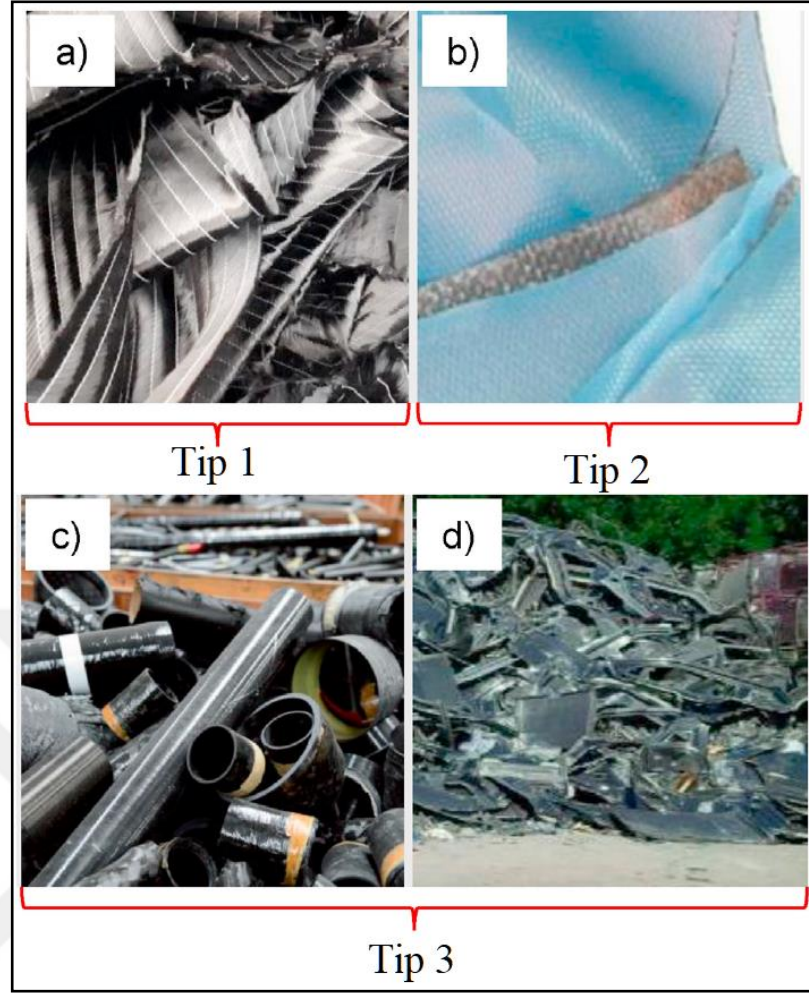
Karbon elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üstün özellikleri nedeniyle geniş uygulama alanları bulması yıllar geçtikçe karbon elyafa olan talebin artmasını beraberinde getirmiştir. Öyle ki karbon elyafa olan talep 2010 ile 2020 yılları arasında üç katına çıkmış ve yapılan ön görümlere göre 2050 yılında yıllık talebin 200 kilotonu aşması beklenmektedir (Şekil 2.4) [26].



Şekil 2.4: Yıllara göre karbon elyaf talebi.

Karbon elyafa olan talebin bu denli artması beraberinde bazı zorlukları getirmektedir. Karbon elyafın üretiminin yüksek enerji gerektirmesi ve öncül malzemelerinin fosil yakıt kaynaklı olması başlı başına bir problemken bu denli yüksek talep yakın zamanda mevcut üretim kapasitesinin çok üzerine çıkacağını göstermektedir. Ayrıca üretimi gerçekleştirilen karbon elyaf bazlı komponentlerin sonsuza kadar kullanılması söz konusu değildir. Bu da yakın gelecekte çok yüksek miktarda kullanım ömrünü tamamlamış karbon elyaf içeren atığın oluşmasına neden olacaktır.

Atık karbon elyaflar yalnızca kullanım ömrünü tamamlayan nihai ürünlerden açığa çıkmamaktadır. Atık karbon elyaf, en baştan karbon elyafın üretimi, işlenmesi, dokunması, kompozit ya da diğer nihai üretimi öncesi ve sonrasında da açığa çıkabilmektedir. Örneğin, karbon elyaf üretiminin hemen sonrasında bobinlere sarılması sırasında sarım makinelerinin işlem payı olarak bobin sonu adlandırılan atık ürünler ortaya çıkabilirken, karbon elyaf kumaş dokuma sürecinde ya da bu kumaşlar ile kompozit üretimi öncesinde parça geometrisi dışında ve kumaş kenarı olarak adlandırılan bir başka atık karbon elyaf malzemedir. Atık karbon elyaflar oluşum şartları nedeniyle farklı özellikler taşıyabilirler. Bu nedenle en genelleştirilmiş atık karbon elyaf sınıflandırması atığın oluştuğu zamanki durumu göz önüne alınarak yapılmıştır. Şekil 2.5'te yapılan bu sınıflandırmaya örnekler verilmiştir [13].



Şekil 2.5: Atık karbon elyaf örnekleri a) kuru tekstil atıkları, b) prepreg atıkları, c) CFRC atıkları, d) kullanım ömrü sonuna gelmiş CFRC.

Tip 1 olarak adlandırılan atık karbon elyaflar, herhangi bir reçine ya da matris ile temas olmaksızın genellikle bobin sonu, fazlalık kumaş parçaları gibi kuru halde elde edilenlerdir. Bu tip atıklar karbon elyaflar ısıtma işlemi gibi özelliklerini değiştirebilecek bir uygulamaya maruz kalmamalarından dolayı işlenmemiş (virgin) karbon elyaflara yakın özellikler sergilerken yalnızca süreklilik ve formlarında bozulma mevcuttur [11].

Tip 2 atık karbon elyaflar, elyaf ya da kumaş forma getirildikten reçine ile işlenen ve prepreg benzeri yapılarda oluşan atıklardır. Bu tip ıslak atık karbon elyaf olarak da adlandırılırken, tıpkı kuru kumaşlarda olduğu gibi kompozit üretimi öncesi ya da varsa reçinelerinin son kullanma tarihine ulaşması ile açığa çıkabilirler [11].

Tip 3 atık karbon elyaflar ise diğer iki tipten farklı olarak bir ısıtma ya da kimyasal işleme tabi tutulmuş ve nihai ürün haline gelmiş yapılardan elde

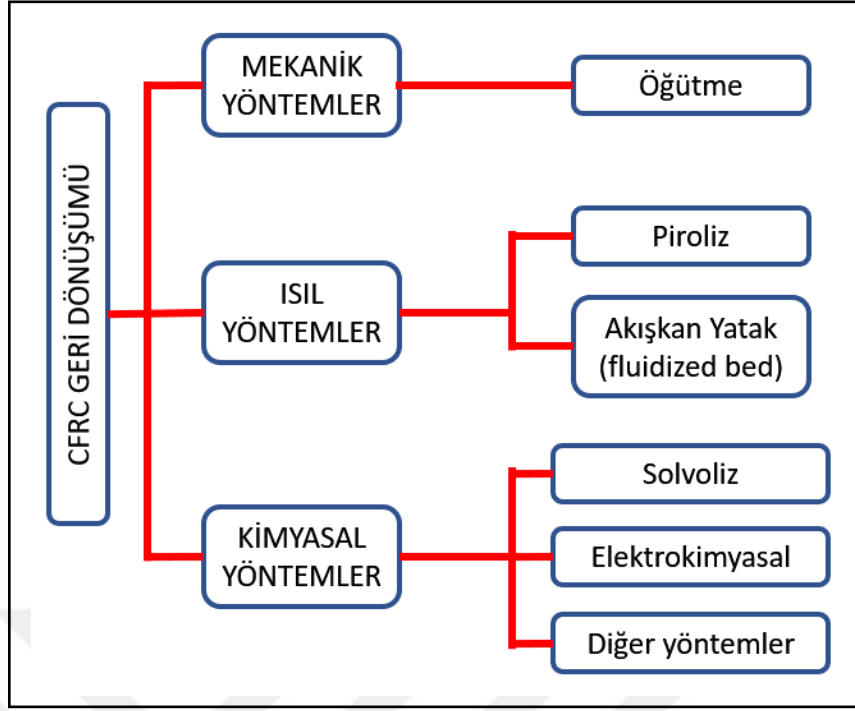
edilmektedirler. Bu tür içerisinde kullanım ömrü sonuna gelmiş karbon elyaf takviyeli kompozitler, hasara uğramış komponentler bulunmaktadır [11].

2.4. Karbon Elyaf ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Geri Dönüşümü

Kullanım ömrü sonuna gelmiş karbon elyaf takviyeli kompozit bileşenlerin gün geçtikçe artması atık yönetimi probleminin oluşmasını tetiklemiştir. Yakın zamana kadar bu tür atıkların bertarafı büyük oranda toprağa gömme ya da yakma işlemleri ile sağlanmıştır. Hatta 2015 yılında kullanım ömrünü tamamlamış havacılık kompozitlerinin %98'nin toprağa gömüldüğü raporlanmıştır [14]. Bu bertaraf yöntemlerinde yakma sayesinde kompozit malzemelerden enerji üretilirken her iki yöntemde de çevreye büyük oranda zarar veren sonuçlar gözlemlenmiştir. Artan çevre bilinci ile AB gibi kuruluşlar çeşitli yaptırımlar uygulayarak bu yöntemlerden daha çevreci süreçlere geçilmesine öncü olmuştur. Buna ek olarak, daha önce de bahsedildiği üzere dünya çapında karbon elyafa olan ilgilinin ve talebin artması ve yüksek üretim maliyetleri karbon elyaf içeren kompozitlerin geri dönüşümünü önemli bir çalışma alanı haline getirmiştir. Bu çalışmalardaki başarı ile atık karbon elyaflar yeniden kullanıma kazandırılarak hem çevreye olan olumsuz etkilerin önüne geçilmiş hem de yüksek maliyetli karbon elyafların artan talebine daha ekonomik yöntemlerle karşılık verilebilir.

Kuru atık karbon elyaflar (Tip 1) dışındaki atık karbon elyaflar tekrar kullanılmaları için bir geri dönüşüm prosesine tabi tutulmalıdır. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin en çok kullanıldığı alanlardan olan havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere üretilen üstün özellikli ve yüksek katma değerli yapısal parçalar büyük oranda termoset reçine içermektedir. Termoplastik malzemelere göre yeniden işlenmesi mümkün olmayan bu matris malzemesi kompozitlerin kullanım ömrü sonunda kompleks geri dönüştürme proseslerinden geçmesi gerekmektedir.

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşümü için kullanılan yöntemler temel olarak mekanik, ısı ve kimyasal olarak üç ana gruba ayrılırken, diğer alt sınıflandırmalar Şekil 2.6'da verildiği gibidir.



Şekil 2.6: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri.

2.4.1. Mekanik Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü

Mekanik geri dönüşüm, teknolojik olarak en eski CFRC geri dönüşüm yöntemidir ve atığın boyutsal olarak küçültülmesini amaçlar. İlk olarak, kompozitler mekanik bir kırıcı ile parçalara ayrılır, ardından ise dairesel hareket yapan ve çeşitli kesici bıçaklara sahip öğütücü yardımı ile öğütülür ve öğütülen malzemelerin farklı boyutlardaki eleklerden geçirilmesi ile çok geniş bir boyut aralığında geri dönüştürülmüş malzeme elde edilir [27]. Bu mekanik geri dönüşümden elde edilen geri dönüşüm ürünleri, ekstrüzyon, enjeksiyon ve SMC (sheet molding compound) yöntemler kullanılarak yeniden kullanıma kazandırılır. Mekanik yöntemler ile geri dönüştürülen elyaflar boyutsal olarak deforme oldukları için görece daha düşük katma değere sahip ürünlerin üretiminde kullanılabilirler.

Geri dönüşüm sırasında CFRC'lerin neden olduğu işleme ekipmanında meydana gelen hasarlar genellikle mekanik geri dönüşümün işletme maliyetini artırır, dolayısıyla geri dönüştürülenlerin ekonomik marjını azaltır. Mekanik öğütme işlemi toksik değildir ve işlem oda sıcaklığında gerçekleştirilebilir [28]. Bu işlem, 50 mm'ye kadar boyuttaki atıklara uygulanabilir ve işlenmemiş karbon elyafların çekme dayanımının %50 – 65'ine ulaşılabilir. Bu geri dönüşüm yönteminin temel sağlık ve

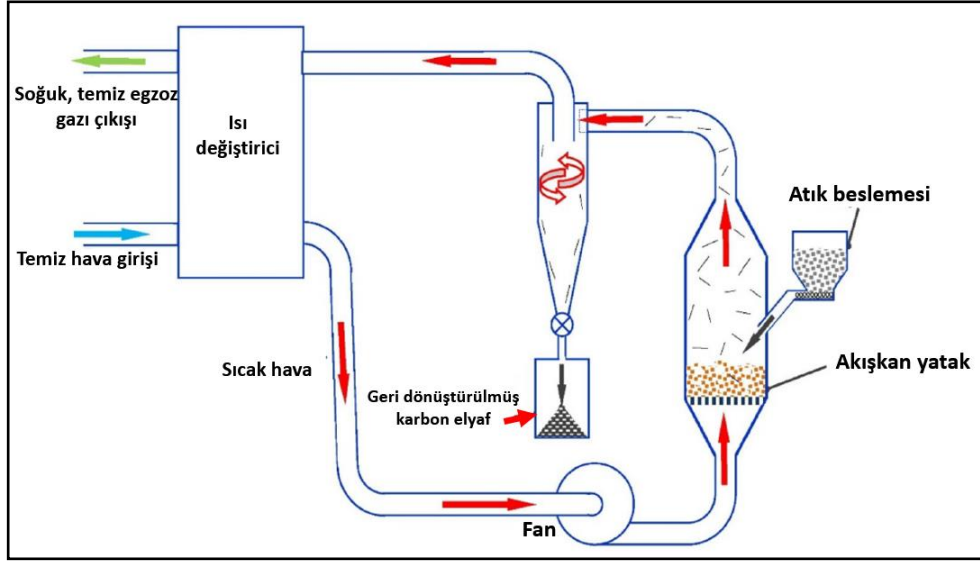
güvenlik tehlikesi, geri dönüşüm sisteminden çıkan tozdur ve uygun koruyucu ekipman kullanımı ve partikül ve toz emme özellikli iyi havalandırma ile üstesinden gelinebilir [26].

2.4.2. Isıl Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü

CFRC'lerin ısıtılma yöntemleri ile geri dönüşümü yüksek sıcaklık ya da akışkanlar kullanılarak matris malzemesinin yapıdan uzaklaştırılarak elyafların eldesi şeklinde gerçekleştirilir. Isıl yöntemler piroliz ve akışkan yatak (fluidized bed) olarak ikiye ayrılır.

Piroliz, termoset matrisli kompozitlerin oksijensiz inert gaz ortamında 400–1000 °C arasındaki bir sıcaklığa ısıtılması ile gerçekleştirilir ve yüksek modüllü uzun karbon elyafların geri kazanılmasını sağlar [10], [27]. İşlenmemiş karbon elyafların çekme dayanımının %80 – 85'ine ulaşılabilir [28]. Piroliz sırasında, ayrışan ve yapısı bozulan matris, gaz, yağ, katran ve kömür üreterek yapıdan uzaklaşır [29], [30]. Piroliz sonrasında elde edilen elyafların kullanılabilmesi için yüzeyindeki kalıntıların giderilmesi gereklidir. Genellikle, poliestere reçineler tam dönüşüm için daha düşük bir sıcaklık gerektirir, ancak epoksi reçineler ayrışma için daha yüksek bir sıcaklık gerektirir. Piroliz ile elde edilen geri dönüştürülmüş karbon elyafların mekanik özellikleri matrisi uzaklaştırmak için gerekli sıcaklık değeri ile ters orantılıdır.

Akışkan yataklı geri dönüşüm yöntemi (Şekil 2.7), 2000'li yıllarda Nottingham Üniversitesi'nde geliştirilen ve şu anda pilot ölçekte faaliyet gösteren bir yöntemdir. Bu yöntemde CFRC'ler 6 – 20 mm boyutunda parçalara ayrıldıktan sonra, 450 ila 550°C sıcaklıkta ve 10 – 25 kPa basınç altında sıcak hava akımıyla bir silis kumu yatağına ısıtılırlar [28]. Bu yöntemin handikapları, geri dönüşüm koşullarına bağlı olarak kirletici gaz açığa çıkması, organik çözücülerin varlığı ve yüksek enerjinin gereksinimidir. Reaksiyon sıcaklığı, matrisin belirgin elyaf bozunması olmadan uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde seçilir. Hızlı ısıtmanın ardından elyaflar matrisin uzaklaşması ile ayrılarak bir siklon yardımı ile toplanır. Matristen salınan gazlar, yan ürünleri oksitlemek üzere değerlendirilir. Geri dönüştürülmüş elyaf uzunluğu 5 – 10 mm aralığındadır ve işlenmemiş karbon elyafların çekme dayanımının %10 – 75'ine ulaşılabilir [10], [26], [28].



Şekil 2.7: Akışkan yataklı geri dönüşüm yöntemi akış şeması.

2.4.3. Kimyasal Yöntemlerle Karbon Elyaf Geri Dönüşümü

CFRC geri kimyasal yöntemlerle geri dönüşümü çeşitli çözücüler kullanılarak ortam basıncı altında gerçekleştirilebilir. Elektrokimyasal geri dönüşüm yöntemleri, CFRC bileşenlerini ayrıştırmak için yüksek elektrik akımları kullanırken, katalitik depolimerizasyon yöntemleri de yüksek derecede temiz, kalıntısız karbon fiber elde etmek için ortam basıncında etkilidir.

Solvoliz yönteminde, elyafları matrinden ayırmak için çözücüler veya ısıtılmış çözücüler kullanılır. Solvoliz yöntemi genellikle kritik üstü, kritik altı ve kritiğe yakın olarak sınıflandırılır [27].

Su, çevre dostu yapısı nedeniyle diğer çözücülere göre yaygın olarak tercih edilmektedir. Etanol, aseton, metanol ve düşük kritik sıcaklık ve basınçta bunların su ile karışımları da çözücü olarak çalışılmıştır [26]. Kimyasal geri dönüşümü ile yüzeyinde kalıntı bırakmadan uzun geri dönüştürülmüş karbon elyaflar üretilebilir. Bu nedenle mekanik özelliklerde küçük bir azalma ile yüksek kaliteli karbon elyaflar elde edilebilir. Piroliz ile karşılaştırıldığında, kimyasal yöntemler, daha düşük bir sıcaklık gereksinimi, daha temiz ve daha uzun karbon elyaf eldesi ile öne çıkmaktadır. Ancak solvoliz, yüksek sıcaklık ve basınçlarda korozyon dayanımına sahip pahalı ekipman gerektirir. Buna ek olarak kullanılan çözücüler, çevre ve insan fizyolojisi üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Akışkan yatak işleminin bu özellikleri, genellikle endüstriyel ölçekli uygulamasını sınırlar [31].

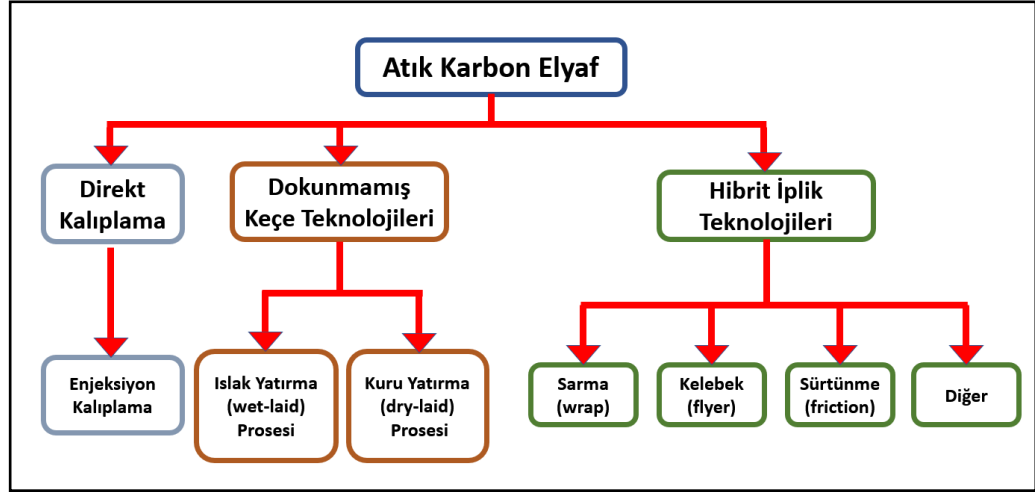
Elektrokimyasal geri dönüşümün yüksek voltajlı elektrik darbeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bir kap içerisine doldurulan atık ürünler üzerinden elektrotlar arasında oluşturulan yüksek voltajlı elektriğin geçirilmesi yöntemin temel prensibidir. Bu yöntemde enerjinin büyük kısmı malzeme yerine sistemin diğer parçaları üzerine aktarılabildiği için yüksek enerji gerektiren bir yöntemdir. Mekanik geri dönüştürmeye göre daha uzun ve temiz atık karbon elyaf üretilen bu yöntemde mekanik yöntemlere göre 2,6 kat daha fazla enerji tüketilmektedir [26].



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere karbon elyafa olan ilginin yıllar içerisinde üstel olarak artış göstermesi ve bununla beraber ortaya çıkan yüksek atık miktarı ve karbon elyaf talebini karşılayamama handikabı karbon elyaf geri dönüşümü ve bu ürünlerin yeniden kullanımını önemli bir çalışma alanı haline getirmiştir. Özellikle atık karbon elyafların geri dönüşümünde termoset reçineli ürünlerin zorluk yaratması ve termoplastik reçinelerin çeşitli avantajlar sağlaması atık elyaflar ve termoplastiklerin bir arada kullanımını arttırmıştır. Doktora tez çalışmasında atık karbon elyafların yeniden kullanımı için mevcut üretim metodlarının handikaplarını gözlemlene ve bu eksiklikleri gidermek amacı ile yeni bir yaklaşım geliştirmek amaçlanmıştır. Buradan hareketle öncelikle atık karbon elyafların yeniden kullanımı adına günümüze kadar gerçekleştirilen çalışmaların detaylı ve dikkatli incelenmesi gerekmiştir. Bu nedenle bu bölüm içerisinde atık karbon elyafların yeniden kullanımı adına gerçekleştirilen çalışmalar detaylı bir şekilde raporlanmıştır.

Geleneksel olarak, atık karbon elyafı kompozit üretimine entegre etmek için enjeksiyonlu kalıplama ve dokunmamış (nonwoven) teknolojiler kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplamada, kısa atık karbon elyaf, termoplastik bir matris ile karıştırılarak bir kalıp içerisine enjekte edilir. Dokunmamış keçeler ile atık karbon elyaf kullanımı ise termoplastik elyaflar kullanılarak izotropik ve anizotropik yapıların eldesi için ıslak (wet-laid) ve kuru (dry-laid) yöntemler olarak adlandırılan yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile üretilen hibrit keçeler sıcak presleme gibi yöntemler kullanılarak kompozit levhalar üretilmektedir. Bu geleneksel yöntemler ile üretilen bu kompozitler, sınırlı performans kapasitesine, düşük elyaf hacmine ve zayıf elyaf yönelimine sahiptir [11], [32]. Atık karbon elyafın yeniden kullanımı için geliştirilen daha yeni yaklaşımlar arasında bant (tape) ve hibrit iplik (hybrid yarn) teknolojileri bulunmaktadır. Bu yöntemler arasından özellikle hibrit iplik yapılarından üretilen kompozitler, geleneksel teknolojilere dayalı kompozitlere kıyasla gelişmiş çekme özellikleri sergilemiştir. Şekil 3.1’de atık karbon elyaf yeniden kullanımı için tercih edilen yöntemlerin sınıflandırılması verilmektedir.



Şekil 3.1: Atık karbon elyaf yeniden kullanımı için tercih edilen üretim yöntemleri.

3.1. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Yeniden İşleme Çalışmaları

Enjeksiyon kalıplama, elyaf takviyeli termoplastiklerin geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Atık karbon elyafların yeniden kullanımı için de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemle, herhangi bir atık karbon elyaf türünden (Tip 1, Tip 2 ve Tip 3) kısa elyaflar, termoplastik polimerlerle karıştırılarak bir kalıp içerisine eriyik halde enjekte edilerek kompozit malzemeler üretilmektedir. Genel olarak, Tip 1 atıklardan elde edilen karbon elyaflar çok iyi bağlanma ve takviye özelliklerine sahiptir. Dolayısıyla bu tür elyaflara herhangi bir ek işlem uygulanmaz. Buna karşılık, Tip 2 veya Tip 3 atıklardan geri dönüşüm ile elde edilen elyaflara arayüzey iyileştirmesi adına bazı ön işlemler uygulanabilir.

McNally ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş karbon elyafları polietilen (PE) matris içerisinde kullanmak amacı ile eriyik kalıplama yöntemi kullanmıştır. Çalışmada, mekanik özelliklerin daha yüksek elyaf içeriği ile arttığı sonucuna varmıştır [33]. Han ve arkadaşları geri dönüştürülmüş karbon elyaf ve poli(L-laktik asit) (PLLA) matris ile ekstrüzyon yöntemini kullanarak termoplastik kompozitlerin kristallenme kinetiği ve mekanik özellikleri hakkında incelemelerde bulunmuştur [34]. Wong ve arkadaşları enjeksiyon kalıplama yöntemi ile geri dönüştürülmüş karbon elyaf takviyeli PP kompozitler üreterek PP üzerine yapılan maleik anhidrit aşılama işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir [35]. Chen ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş karbon elyaflara kimyasal bir işlem uygulayarak poli(bütlen tereftalat) (PBT) polimeri ile kompozit üretimi gerçekleştirmiş ve atık

karbon elyaf miktarının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini raporlamıştır. Çalışmada enjeksiyon kalıplamada daha yüksek bir elyaf miktarının mekanik özellikleri geliştirdiği sonucuna varılmıştır [36].

Feng ve arkadaşları geri dönüştürülmüş karbon elyafların yüzeyini iki kimyasal işlemle modifiye ederek PA termoplastığı ile kompozitler üretmiştir. Atık karbon elyaflar ilk olarak asit ile muamele edilirken diğer işlem epoksi uyumlaştırıcı ile kaplanmasıdır. Bu işlemler ile, mekanik özelliklerin önemli ölçüde arttığı ve atık karbon elyaf miktarının da mekanik özellikleri arttırdığı sonucuna varılmıştır [37]. Yan ve arkadaşları polikarbonat (PC)/akrilonitril bütadien stiren kopolimer (ABS) karışımları ile üretilen kompozitlerin arayüzeyini iyileştirmek için geri dönüştürülmüş karbon elyafa bir uyumlaştırıcı uygulayarak kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir [38]. Han ve arkadaşları, atık karbon elyaf yüzeyini 3-glisidoksi propil trimetoksisilan ile modifiye ederek poli(bütlen süksinat) (PBS) matrisini takviye etmişler ve kompozitlerin mekanik özelliklerini ve kristallenme davranışını incelemişlerdir [39].

Stoeffler ve arkadaşları eriyik harmanlama yoluyla PPS termoplastik matrisine geri dönüştürülmüş karbon takviyesi yapmışlar ve ardından enjeksiyon kalıplama ile kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir [40]. Lee ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş karbon elyaf yüzeyini plazma ile modifiye ederek PP matris ile kompozitler üretmiştir. Çalışmada, plazma işleminin geri dönüştürülmüş karbon elyaf yüzeyini başarıyla modifiye ettiği ve kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [41]. Hirayama ve arkadaşları, ekstrüzyon ve enjeksiyon işlemleriyle geri dönüştürülmüş karbon elyaflar ve PP ile termoplastik kompozitler üretmiştir [42]. Luo ve arkadaşları uzun karbon elyaflar ve PA polimeri kullanarak çekirdek/kabuk yapısına sahip peletler geliştirmiş ve bunları daha sonra kompozit üretimi için enjeksiyon kalıplamada kullanmışlardır [43].

Atık karbon elyaf ve termoplastiklerin enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilen anlatılan çalışmalar Tablo 3.1’de özetlemiştir [11]. Tablo 3.1’den görüleceği üzere bu yöntemle yalnızca kısa atık karbon elyaflar kullanılabilmiş ve kompozitlerin çekme dayanımları 20 MPa ile 200 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Bu düşük mekanik değerlerin sebepleri arasında matris özellikleri, üretim esnasında elyafların maruz kaldığı kayma kuvvetleri ile hasara uğraması ve elyaf yönelmesinin rastgele olması bulunmaktadır. Enjeksiyon kalıplama sırasında elyaf yönünü kontrol etmek neredeyse imkansızdır.

Bu nedenle, atık karbon elyaflardan alınabilecek verimi arttırmak için yeni teknolojiler geliştirilmiştir.

Tablo 3.1: Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.

Referans No	Elyaf Tipi	Matris	V _{elyaf} (%)	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
[33]	Tip 3	PE	30	0,73	22
[34]	Tip 3	PLLA	15	11,8	110
[35]	Tip 2	PP	30	14,7	50,6
[36]	Tip 3	PBT	25	12,7	150
[37]	Tip 3	PA6	25	20	170
[38]	Tip 3	PC/ABS	20	16,6	131
[39]	Tip 3	PBS	20	6,2	58
[40]	Tip 2	PPS	40	30,3	191
[41]	Tip 3	PP	15	-	-
[42]	Tip 3	PP	07	2,1	30,9
[43]	Tip 1	PA6	24	13,2	146

3.2. Dokunmamış Keçe Üretimi ile Yeniden İşleme Çalışmaları

3.2.1. Islak Serme (Wet-laid) Yöntemi Çalışmaları

Elyafların dokunmamış matlar haline getirilmesi için kullanılan en yaygın yöntem ıslak serme yöntemidir. Bu yöntem kâğıt yapma (papermaking) olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemde kısa elyaflar, bir çözücü içerisinde tek başına ya da termoplastik elyaflarla beraber karıştırılarak dağıtılır ve çözücüyü uzaklaştırmak için filtrelendir. İşlem sonunda elyafların rastgele olarak yapıda dağıldığı ve neredeyse izotropik özelliklere sahip dokunmamış yapılar elde edilir. Eğer dokunmamış keçeler yalnızca takviye elyafından üretilmişse, polimer filmler arasında sıcak preslenerek, polimer elyaflar ile birlikte üretilmişler ise direkt olarak sıcak presleme yolu ile kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Bu yöntemin atık elyafların yeniden kullanımı için ilk defa Szpieg ve arkadaşları tarafından kullanılmış ve atık karbon elyaf dokunmamış keçeler PP filmler arasında preslenmesi ile kompozit levhalar üretilmiştir [44].

Turner ve arkadaşları PA6 ve PA6.6'dan oluşan iki bileşenli bir polimer elyaf (çekirdek PA6.6, kılıf PA6) ve atık karbon elyaf ile dokunmamış keçe üretmek için kâğıt yapma tekniğini kullanmış ve sıcak presleme ile kompozit malzeme üretimini gerçekleştirmiştir [45]. Wei ve arkadaşları, ıslak serme yöntemini kullanarak atık karbon ve PA elyaflar kullanarak kompozit levhalar üretmiş ve farklı kalıplama basınçlarının kompozit mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir [46]. Wölling ve arkadaşları, arık karbon elyaf ve PP elyaflarla ticari ıslak serme yöntemi ile hibrit matlar üreterek sıcak presleme ile kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada kullanılan ticari ıslak serme yöntemi makine üretim yönüne bağlı olarak elyaf yönlenmesinde farklılıklar meydana getirmiştir. Bu nedenle çalışmada makine üretim yönünün kompozit mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kompozitlerin çekme dayanımının her iki yönde de neredeyse aynı çıktığı ve bunun izotropik yanın elde edildiğini gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [47].

Islak serme yöntemi ile atık karbon elyafların yeniden kullanımı için gerçekleştirilen çalışmaların özet hali ve sonuçları Tablo 3.2'de verilmiştir [11]. Bu tablodan görüldüğü gibi ıslak serme yöntemi ile üretilen kompozitlerin, enjeksiyon kalıplama ile üretilenlere benzer mekanik sonuçlar (15 MPa ila 150 MPa) vermiştir. Bunlara düşük sonuçlara zayıf elyaf oryantasyonu, kısa elyaf uzunluğu gibi etkenler neden olabilir.

Tablo 3.2: Islak serme yöntemiyle atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.

Referans No	Elyaf Tipi	Matris	V _{elyaf} (%)	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
[44]	Tip 3	PP	25	4,2	15
[45]	Tip 2	PA6	25	17	150
[46]	Tip 2	PA6	20	-	-
[47]	Tip 3	PP	20	11 ^a 12 ^b	75 ^a 78 ^b
a: Makine doğrultusu b: Makine doğrultusuna dik					

3.2.2. Kuru Serme (Dry-laid) Yöntemi Çalışmaları

Tarıklama (carding) kuru serme yöntemi ile dokunmamış keçe üretimi için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemde keçe üretimi için kullanılmak istenen

elyaflar taraklama makinesine yüklenerek makine içerisindeki tambur yüzeylerinde bulunan tarak ya da iğne benzeri yapılar yardımı ile karıştırılarak bir araya getirilmektedir. Bu makine içerisindeki tarak ya da iğneler dokunmamış keçe içerisindeki elyafların üretim doğrultusunda yüksek oranda yönlenmesini sağladığından elde edilen ürün rastgele dağılımlı ya da izotropik yapılı olmamaktadır. Bu nedenle bu keçeler ile izotropik yapılı kompozitler üretmek için aynı dokunmuş kumaşlarda olduğu gibi yönlenmeye göre dizme işlemi gerekmektedir. Bu yöntemde atık karbon elyaf gibi takviye malzemeleri tek başına ya da ıslak sermede olduğu gibi termoplastik elyaflarla beraber işlenebilmektedir.

Cornacchia ve arkadaşları atık karbon elyaf ve PP elyaflar kullanarak taraklama makinesinde hibrit dokunmamış keçeler üretmiş ve sıcak presleme yoluyla kompozit levhalar elde etmiştir [48]. Wei ve arkadaşları, atık karbon elyaf ve PA elyaflarla kâğıt yapma ve taraklama yöntemleri kullanarak kompozitler üretmiş ve üretim yöntemi açısından kompozitlerin mekanik özelliklerini kıyaslamıştır [49].

Yin ve arkadaşları atık karbon elyaf ve PA6.6 elyaflar kullanarak taraklama makinesinde hibrit dokunmamış keçeler üretmiş ve bu keçelerle kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada makine doğrultusunda ve yönlenmeye dik olarak mekanik testler gerçekleştirilmiş ve makine üretim yönünde yüksek yönlenmeden dolayı daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir [50]. Holmes, atık karbon elyaf ve PA elyaflarla taraklama makinesinde üretilmiş keçeler kullanarak kompozit otomotiv parçası ürettiklerini raporlamış ve artan atık karbon elyaf miktarı ile parçaların mekanik özelliklerinin arttığı sonucunu bildirmiştir [51].

Lutzkendorf ve ark. atık karbon elyaf ve PP elyaflarla taraklama makinesi kullanarak hibrit dokunmamış keçeler üretmiş ve ardından sıcak presleme ile kompozit levhalar üretmiştir. Bu çalışma sonucunda, üretilen kompozitlerin otomotiv iç aksamalarının imalatına uygun olabileceği ve doğal elyaflı kompozitlere kıyasla %30'a kadar ağırlık azaltımına ek olarak yeterli mekanik özellikler elde edebileceğini raporlamışlardır [52]. Wölling ve arkadaşları, ıslak sermeye ek olarak taraklama ile ürettikleri kompozitlerin de özelliklerini raporlamıştır [47].

Atık karbon elyafların yeniden kullanımı için kuru serme yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmaların içerikleri ve sonuçları Tablo 3.3'te özetlenmiştir [11]. Tablo 3.3'ten görüleceği üzere, kuru serme yöntemi ile üretilen kompozitlerin özelliklerinin enjeksiyon ve ıslak serme ürünü kompozitlere göre üstündür. Bu özellikler, elyaf tipi, matris tipi ve elyaf hacim fraksiyonuna göre değişkenlik

göstermektedir. Örneğin, Yin ve arkadaşları çalışmalarında Tip 1 atık karbon elyaf kullanarak diğer çalışmalara göre üstün özellikler elde etmiştir [50]. Ayrıca Yin ve arkadaşları ve Holmes'in çalışmalarında mekanik özelliklerin atık karbon elyaf hacim oranı artışı ile arttığı sonucuna varmıştır [50], [51]. Ayrıca, matris tipi de mekanik özellikleri önemli ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir, örneğin PA matrisi ile üretilen kompozitlerin özellikleri PP matrislilere göre oldukça yüksek elde edilmiştir. Bunlara ek olarak kuru serme yönteminde kullanılan taraklama makinesinin elyafları yönlendirmesinden dolayı mekanik özelliklerin yükseldiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.3: Kuru serme yöntemiyle atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.

Referans No	Elyaf Tipi	Matris	V_{elyaf} (%)	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
[48]	Tip 3	PP	25	-	-
[49]	Tip 3	PA6	25	22 ^a	120 ^a
	Tip 3	PA6		17 ^b	80 ^b
[50]	Tip 1	PA6.6	20	30 ^a	350 ^a
	Tip 1	PA6.6		10 ^b	220 ^b
	Tip 1	PA6.6		35 ^a	400 ^a
	Tip 1	PA6.6		15 ^b	200 ^b
[51]	Tip 3	PA6.6	20	23,7 ^a	178 ^a
	Tip 3	PA6.6		26,5 ^a	217 ^a
[52]	-	PP		-	-
	-	PP		-	-
	-	PP		-	-
[47]	Tip 3	PP		17 ^a	150 ^a
	Tip 3	PP		15 ^b	125 ^b
a: Makine doğrultusu b: Makine doğrultusuna dik					

Bu sonuçlara göre açıkça görülmektedir ki kuru serme yöntemi ile üretilen kompozitler ıslak serme ile üretilen muadillerine göre üstün özellikler göstermektedir. Tüm bu üstün özelliklere karşın kuru serme işlemi ile gerçekleştirilen çalışmalarda atık karbon elyaf uzunluğu 30 mm üzerinde seçilmiştir. Bunun nedeni olarak taraklama makinesinin tarakları arasında çok kısa elyafların işlenmesinin problem oluşturabilmesidir. Islak serme yöntemi ile yapılan çalışmalarda ise atık karbon elyaf uzunlukları 3 ile 24 mm arasında seçilmiştir. Bunun bir sebebi çözücü içerisindeki mekanik karıştırma sırasında elyafların hasara uğramasından çekinilmesi olabilir ancak çalışmalarda böyle bir raporlama

sunulmamıştır. Buradan hareketle ıslak sermenin kuru sermeye göre daha düşük mekanik değerler vermesinin bir sebebi daha kısa elyaflar kullanılmış olması olarak değerlendirilebilir.

3.3. Hibrit İplik Üretimi ile Yeniden İşleme Çalışmaları

Atık karbon elyaflardan maksimum verimi almak için mevcut üretim yöntemlerine alternatif yöntemlerin geliştirilmesi son yıllarda önem kazanmıştır. Bu amaçla yakın zamanda geliştirilen hibrit iplik üretimi mevcut yöntemlere göre çeşitli üstünlüklere sahiptir. Bu hibrit iplikler, daha yüksek elyaf oryantasyonu, kompaktlığı ve elyaf hacim oranı ile elyafly yapılar geliştirmek için geleneksel ve gelişmiş eğirme makineleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde öncelikle hibrit dokunmamış keçe üretimine benzer şekilde atık elyaflar ve termoplastik elyaflar bir taraklama makinesinde hibrit ağlar haline getirilmektedir. Bu ağlar daha sonra şeritler haline getirilerek gerdirilmektedir. Üretilen şeritler daha sonra bir iplik eğirme makinesi yardımı ile hibrit iplik haline getirilmektedir. Bu işlemler farklı eğirme teknikleri ile gerçekleştirilebilmektedir. İplik eğirme yöntemi; sarımlı (wrap), kelekli (flyer) ve sürtünme (friction) olmak üzere üç farklı metotta gerçekleştirilebilmektedir. Eğirme yöntemi ne olursa olsun üretilen hibrit iplikler daha sonra bir çerçeve üzerine sarılıp sıcak preslenerek tek yönlü (unidirectional) kompozitler üretilebilmektedir.

3.3.1. Sarımlı Eğirme (Wrap Spinning) Yöntemi Çalışmaları

Sarımlı eğirme, daha yüksek elyaf oryantasyonu ve yüksek homojenlik sağlayarak hibrit iplik yapılarının üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu yüksek homojenlik ve oryantasyon, atık karbon elyaflardan kompozit üretimi için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Sarımlı eğirme yönteminde hibrit şeritler haline getirilen yapılar merdaneler arasında gerdirildikten sonra bir miktar salınarak gevşetilir ve bu yapı üzerine sürekli bir iplik sarılarak yapı elde edilir. Sarımlı eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve sarılmış bobin Şekil 3.2’de verilmiştir [11].



Şekil 3.2: Sarımlı eğirme yöntemi ile üretilmiş hibrit iplik ve bobin.

Sarımlı eğirmede, kısa elyafların üzerine sürekli bir elyaf sarıldığı için kısa elyaflar yapı içerisinde iplik boyuna paralel hizalanırlar. Ayrıca seçilen sarım ipliğın lineer yoğunluğu da oldukça düşüktür. Özellikle diğer eğirme teknikleriyle karşılaştırıldığında tek düze (uniform) bir iplik yapısı elde edilebilir. Bu eğirme yöntemiyle Akonda ve arkadaşları, atık karbon elyaf ve polipropilen elyaflar kullanarak hibrit iplikler üretmiş ve bu hibrit iplikler bir çerçeve üzerine sarılıp sıcak preslenerek tek yönlü kompozit levhalar üretilmiştir. Bu çalışmada karbon elyaf hacim oranının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir [53]. Goergen ve arkadaşları aynı yöntem ile atık karbon elyaf ve PA elyaf ile gerçekleştirdikleri çalışmada ürettikleri hibrit iplikler ile kıvrımsız (non-crimp) kumaşlar üretmiştir [54] .

3.3.2. Kelebekli Eğirme (Flyer Spinning) Yöntemi Çalışmaları

Kelebekli eğirme yönteminde fitil olarak adlandırılan burulmuş ve uniform bir iplik üretimi gerçekleştirilir. Bu yöntemde taraklama makinesinden çıkan şeritler burularak istenilen özellikte ve yönlenmede hibrit iplikler üretilirken kelebek adı verilen bir mekanizma ile iplikler bobin çevresine sarılır [11]. Kelebekli eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve bobin Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kelebekli eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve bobin.

Hengsterman ve arkadaşları, 40 – 100 mm arasındaki uzunluklardaki atık karbon elyaf ve PA6 elyaflar kullanarak hibrit iplik eğirmek için kelebekli eğirme yöntemini kullanmış ve laboratuvar ölçekli bir üretim sistemi kurmuştur. Ayrıca elyaf uzunluğunun, burma seviyesinin ve elyaf hacim oranının hibrit ipliğin çekme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [55].

Geri dönüştürülmüş karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki burma seviyesi ve elyaf hacim oranının etkisi Hengstermann ve arkadaşları tarafından başka bir çalışmada incelenmiştir. Çalışma, kompozitlerin mekanik özelliklerinin fiber hacim fraksiyonundan önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuş ve maksimum dayanım, %50 karbon elyaf hacim oranında elde edilmiştir [56]. Ayrıca, bir diğer çalışmada karbon elyaf uzunluğunun kompozit mekanik özelliklerini çok az bir miktarda etkilediği sonucuna raporlanmıştır. Çalışmada bunun nedenin uzun elyaf işlemeye uygun bir taraklama makinesinin kullanılmamış olması olarak açıklanmıştır. Böylece uzun elyaflar daha fazla deformasyona uğramış ve kompozit dayanımında çok az bir artışı sağlayabilmiştir [57]. Başka bir çalışmada, elyaf yüzey modifikasyonun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı yüzey modifikasyonuna sahip atık karbon elyaflar ile hibrit iplik üretilerek ve bunlarla tek yönlü kompozitler üretilmiştir. Çalışma sonucunda termoplastik kaplamaya sahip atık karbon elyaflarla üretilmiş kompozit malzemelerin en iyi mekanik özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir [58]. Hasan ve arkadaşları bu eğirme yöntemi ile farklı bir yaklaşım geliştirmiş ve atık karbon elyafları suda çözünebilen bir elyaf ile

eğirmiştir ve kompozit üretimi öncesinde yapı suya tabi tutularak yalnızca karbon elyaftan oluşan bir yapı etmişlerdir. Daha sonra bu yapı termoset bir reçine emdirilerek kompozit haline getirilmiştir [59].

Miyake ve arkadaşları, atık karbon elyaf ve termoplastik elyaf ile üretilecek hibrit şeritler için yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yeni yaklaşıma Gill kutusu adı vermişlerdir. Çalışmada hibrit ipliklerden kompozit üretimi gerçekleştirerek kompozit yapısındaki elyaf dağılımı incelenmiştir. Ayrıca üretilen tek yönlü kompozitlerin 1000 MPa'ya dayanan çekme dayanımı sergilediği raporlanmıştır [60].

3.3.3. Sürtünmeli Eğirme (Friction Spinning) Yöntemi Çalışmaları

Sürtünmeli eğirme, daha yüksek elyaf yönelimli hibrit iplik üretimi için geliştirilmiştir. Bu yöntemde iplik çekirdeğinde sürekli bir elyaf kullanılarak kısa elyafların bu sürekli elyaf üzerine eğrilmesi sağlanır. Böylece iplik dayanımı artırılmış olur. Bu eğirme tekniği, iplik yüzeyine temas etmek için zıt yönlerde hareket eden iki delikli eğirme tamburunu içerir. Elyafı eğirme tamburlarının yüzeyine bastırmak için emme havası basıncı kullanılır. Sürekli elyaf ve kısa elyaflar arası oluşturulan sürtüne sayesinde kompakt bir hibrit iplik imalatı gerçekleştirilir. Sürtünmeli eğirme yöntemi ile üretilmiş hibrit iplik ve bobinin görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir [11].



Şekil 3.4: Sürtünmeli eğirme yöntemi ile üretilen hibrit iplik ve bobin.

Sürtünmeli eğirme ile üretilen hibrit ipliklerin yapısının incelenmesi adına Hasan ve arkadaşları atık karbon elyaf ve PA elyaflarla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Üretilen hibrit ipliğin çekirdeğinde sürekli PA filament kullanılırken kılıf yapısında atık karbon ve kısa PA elyafları kullanılmıştır [61].

Anlatılan her üç yöntem ile de hibrit iplik üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Bu çalışmaların içerikleri ve sonuçları özet olarak Tablo 3.4'te verilmiştir [11].

Tablo 3.4: Hibrit iplik yöntemi ile atık karbon elyaf yeniden kullanım çalışmaları.

Ref. No	Eğirme Yöntemi	Elyaf Tipi	Elyaf Uzunluğu (mm)	Matris	V _{elyaf} (%)	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
[53]	Sarmalı	Tip 3	50	PP	15	21	105
	Sarmalı	Tip 3	50	PP	28	32	160
[55]	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	30	-	-
	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	50	-	-
	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	70	-	-
[57]	Kelebekli	Tip 1	40	PA6	50	72	740
	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	50	72	760
	Kelebekli	Tip 1	80	PA6	50	73,6	800
[56]	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	30	35	444
	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	50	68	838
	Kelebekli	Tip 1	60	PA6	70	74	274
	Kelebekli	Tip 3	65	PA6	50	38,5	801
[60]	Eğirme	Tip 1	200	PP	12,8	12,2	78
[59]	Kelebekli	Tip 1	60	-	-	-	-
	Kelebekli	Tip 1	60	-	-	-	-
[61]	Sürtünmeli	Tip 1	60	PA6	36	74	960
	Sürtünmeli	Tip 1	60	PA6	41	85	1030
[58]	Kelebekli	Tip 1	80	PA6	48	82	1110
	Kelebekli	Tip 1	80	PA6	49	84	990

Hibrit ipliklerden hazırlanan kompozitler umut verici mekanik özellikler göstermiştir. Bu yüksek mekanik özellikler hibrit iplik teknolojisinin mükemmel elyaf oryantasyonu ve daha yüksek yapısal kompaktlık sağlamasına bağlanabilir. Atık karbon fiberin hassas bir şekilde işlenmesi için hibrit iplik eğirme parametrelerinin optimizasyonu önem az etmektedir. Tablo 3.4'teki sonuçlar göz önüne alındığında hibrit ipliklerden üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin elyaf tipi, matris tipi, elyaf uzunluğu, elyaf hacim oranı ve eğirme tipinden etkilendiğini göstermektedir. Genel olarak, Tip 1 atık karbon elyaftan ve %50 elyaf

hacim fraksiyonuna sahip ve PA matrisi ile geliştirilen termoplastik kompozitler, en yüksek çekme dayanımı sonucunu vermiştir. Bu yöntemle üretilen kompozitlerin sonuçları diğer yöntemlere göre çok daha umut vaat etmesine karşın hibrit iplik içeriğinde kullanılan 50 mm üzeri atık karbon elyaflar bir handikap oluşturmaktadır. İplik üretiminde elyafların birbirine sağlıklı tutunabilmesi için boylarının çok kısa olmaması gerekmektedir. Bunun için net sonuç veren bir çalışmaya rastlanmamasına karşın geri dönüştürülmüş elyafların büyük kısmının 3 – 6 mm gibi kısa elyaflardan oluşması hibrit iplik yönteminde bu elyafların değerlendirilememe ihtimali bu yöntemin kısıtlarındandır.

3.4. Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı

Bölüm 3’te sunulan literatür çalışmaları incelendiğinde atık karbon elyafların yeniden değerlendirilmesi için kuru serme yöntemi ile üretilen dokunmamış keçeler ve hibrit iplik üretimi umut vaat eden sonuçlar vermektedir. Ancak bu çalışmaların ortak noktası her iki yöntem ile de oldukça yüksek uzunluğa sahip atık karbon elyafların değerlendirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu iki yöntemde de oldukça karmaşık teknolojiler ve buna uygun makineler gereklidir.

Atık karbon elyafların özellikle geri dönüşüm kaynaklı sağlananları hacmen işlem görmemişlere göre daha yüksek miktardadır. Buna ek olarak geri dönüşüm işlemi görmüş karbon elyaflar uzunluklarını büyük oranda kaybederken birçok kısmı neredeyse toz halinde elde edilmektedir.

Literatür çalışmalarının verileri ve atık karbon elyafların durumu düşünüldüğünde ise kuru yatırma ve hibrit iplik üretiminde kullanılamayacak boyuttaki kısa karbon elyafların değerlendirilmesi halen önemli ve katma değere açık bir konudur.

Çalışmada amaçlanan 30 mm altındaki atık karbon elyafların yüksek katma değerli sürekli elyaf takviyeli yapılarda kullanımının sağlanması ve bunun için yeni yaklaşımlar geliştirilmesi, literatürde halen açık görülen yukarıda bahsedilen açığı kapatma potansiyeline sahiptir. Geliştirilecek yeni yaklaşımla bu denli kısa atık karbon elyafların yüksek katma değerli yapılara mekanik açıdan iyileştirme sağlaması durumunda kısa atık karbon elyafların potansiyelinden daha fazla yararlanılabilecektir.

Doktora tez çalışmasının bu ana amacına ulaşılması ile yeni geliştirilecek hibrit kompozitlerin otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanım için aday olması da ayrı bir olası katkıdır. Ayrıca geliştirilen kompozitin tribolojik özelliklerinin araştırılması ve su ve sıcaklık ortamından özelliklerinin ne denli etkilendiğinin araştırılması da bu yeni hibrit kompozitin olası kullanım alanları için önemli bilgiler sunacaktır.



4. MALZEME ve YÖNTEM

Tez çalışmasında daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere atık karbon elyafların yüksek katma değerli sürekli elyaf katkılı kompozitlerin yapısında kullanılabilirliğini araştırmak amaçlanmıştır. Tez çalışmasında yeni bir üretim metodu ile atık karbon elyaf katkılı hibrit kompozit laminat üretimi gerçekleştirilmiştir. Atık karbon elyafın yapıya katkısının gözlemlenebilmesi için farklı referans numuneler üretilerek bunların geliştirilen hibrit kompozit laminatlar ile mekanik, dinamik-mekanik ve tribolojik kıyasları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sürekli elyaf fazı oluşturan cam kumaşların yüzey modifikasyonu yapılarak aynı hibrit kompozit laminatlar üretilmiş ve cam kumaş yüzey modifikasyonun bu özgün kompozitlerin özelliklerine etkileri irdelenmiştir. Deneysel çalışmanın son bölümünde ise optimum özelliklerin elde edildiği hibrit kompozit laminatların ve referanslarının sıcaklık ve nem altındaki davranışları incelenmiştir.

4.1. Malzeme Seçimi

Tez çalışması süresince üretilen kompozitler ve referans numuneler için üç farklı malzeme kullanılmıştır, Bunlar geri kullanımını amaçladığımız atık karbon elyaf, sürekli elyaf katkısı olarak kullanılan cam kumaş ve matris malzemesi olarak kullanılan PA6.6 elyaflardır. Doğru malzemelerin seçimi tez çalışmasının hedeflerine ulaşması için önem arz eden bir adım olmuştur. Bu nedenle çalışma öncesinde yapılan birkaç ön denemeden ve literatürdeki diğer çalışmalardan yararlanılmıştır.

Üçüncü bölümde anlatıldığı üzere atık karbon elyaflar elde edilme çeşitlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu çalışmada ülke içinden geri dönüşüm ile elde edilmiş Tip 2 ve Tip 3 atık karbon elyaf temini mümkün olmamıştır. Bu nedenle üretim esnasında bobin sonu gibi bölümlerden elde edilen Tip 3 olarak adlandırılan atık karbon elyaflar tercih edilmiştir. Bu elyafların geri dönüşüm sonucunda elde edilen atık karbon elyaflar için de anlamlı sonuçlar vermesi adına atık karbon elyafların herhangi bir yüzey modifikasyonu ya da kaplamaya sahip olmaması tercih edilmiştir. Böylelikle atık karbon elyaf ile matris arasında herhangi bir maliyet arttırıcı işlem olmaksızın kullanımını sağlamak amaçlanmıştır. Seçilen bu atık

karbon elyafların 30 mm altında uzunluklarda temini mümkün olmamıştır. Bu nedenle elyaf boyutlama işlemi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

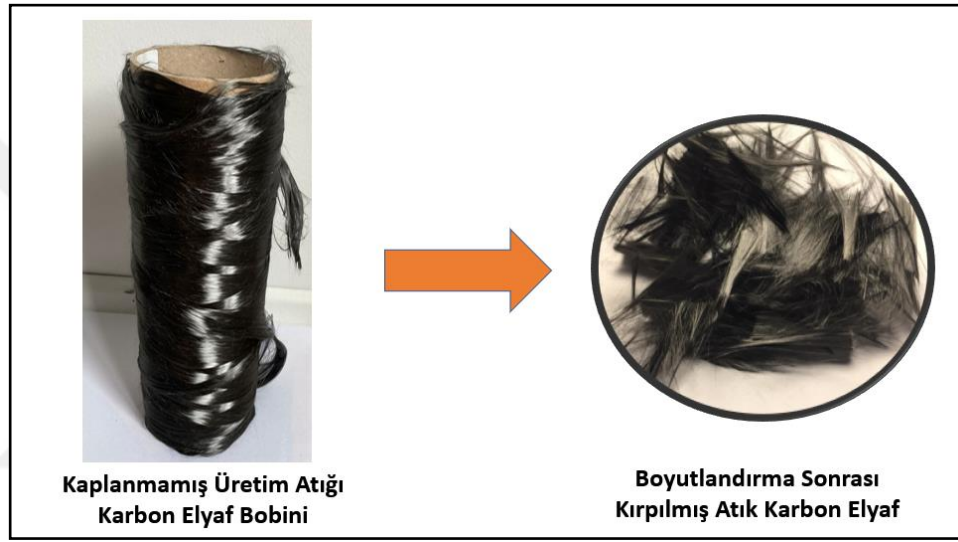
Kullanılan sürekli elyaf yapının seçimi için elyaf türü, dokuma türü ve yüzey modifikasyonu gibi özelliklerin belirlenmesi çalışmanın ileriki aşamaları için önemlidir. Öncelikle elyaf türü için geniş kullanım alanına sahip cam ve karbon elyaf kumaşlar arasında bir seçim yapılmıştır. Karbon elyaf kumaşların mekanik özellikleri Bölüm 2’de anlatıldığı üzere oldukça yüksektir. Bununla birlikte bu çalışma kapsamında atık karbon elyafların kullanıldığı için bunların mekanik performansının işlem görmemiş karbon elyaf kumaşlara kıyasla düşük olması kaçınılmazdır. Dolayısıyla tez çalışması kapsamında aynı zamanda özellikle otomotiv sektöründe çok yaygın kullanım alanı olan cam elyaf kumaş sürekli elyaf katkısı için tercih edilmiştir. Cam elyaf kumaşın seçiminin bir diğer nedeni de atık karbon elyafın yapıya sağlayabileceği katkının net bir şekilde gözlemlenebilecek olmasıdır. Daha sonra kumaş dokuma türü seçimi için 0° ve 90° yönlerinde eşit atkılı ve çözümlere sahip olan düz (plain) dokuma cam kumaş tercih edilmiştir. Cam kumaş seçimi sırasında öne çıkan bir diğer önemli özellik de kumaştaki elyafların yüzey modifikasyonudur. Bu aşamada kompozitlerdeki ana yük taşıyıcı olacağı düşünülen cam kumaşların matris ile arayüzey uyumluluğuna sahip olması istenmiş ancak PA6.6 matris ile uyumlu cam kumaş temini mümkün olmamıştır. Bu nedenle epoksi ile uyumlu bir kumaş seçilmiştir.

Matris malzemesi olarak üretilecek hibrit kompozit laminatların kullanım ömrü sonunda kolay geri dönüşümün önemli bir kıstas olmasından dolayı termoplastik malzemeler arasından seçim yapılmıştır. Üstün termal ve mekanik özelliklerinin etkisi ve elyaf formda eldesinin mümkün olmasından dolayı mühendislik termoplastikleri arasından PA6.6 seçilmiştir.

Kompozit üretiminde kullanılan temel fazlar dışında bu çalışma için önem arz eden bir diğer malzeme seçimi de cam kumaş yüzey modifikasyonunda kullanılacak olan kimyasalın seçimi olmuştur. Matris malzemesi olarak seçilen PA6.6 ve cam elyaf arasında daha yüksek bir etkileşimin sağlanması amaçlanan yüzey modifikasyonu işlemi için literatürden yararlanılmıştır. Bu noktada özellikle poliamit bazlı polimerler ile yüksek etkileşime girebilmesi nedeni ile aminosilanlar üzerinde durulmuş ve kimyasal seçimi bu gruptan yapılmıştır.

4.2. Malzemelerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan herhangi bir yüzey modifikasyonu ya da kaplamaya sahip olmayan (unsized), üretim atığı olarak meydana gelen karbon elyaflar DowAksa firmasından bobin halinde temin edilmiştir. Daha sonra bu elyaflar 12 mm boyutlarında kesilerek tez kapsamındaki üretimlerde kullanılmıştır. Bobin halinde temin edilen atık karbon elyaf ve kesim sonrası kompozit üretiminde kullanılan boyutlandırma sonrası kırılmış atık karbon elyaf Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Temine edilen atık karbon elyaf ve üretim öncesi hazırlığı.

Çalışmada kullanılan cam kumaşlar için Çin menşeli Jushi firmasının E6CRWR300A kodlu ürünü seçilmiş ve bu ürünün temini Gebze’deki Koloğlu Kimya firmasından sağlanmıştır. Temin edilen cam elyaf kumaşın özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Cam elyaf kumaş özellikleri.

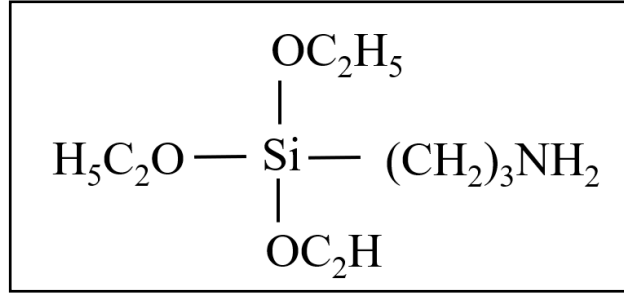
Özellik	Birim	Değer
Kumaş Yoğunluğu	gr/m ²	300
Kumaş Genişliği	cm	127
Dokuma Türü	Düz (Plain)	
Filament Çapı	mikron	15 ± 1,2
Filament Yoğunluğu	g/cm ³	2,54
Yüzey Modifikasyonu	Epoksi uyumlu	

Matris malzemesi için kullanılan KraTos Mikro PA6.6 elyafların temini Kordsa firmasından sağlanmıştır. Bu ürünün özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: PA6.6 elyaf özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	1,14
Uzunluk	mm	6-12
Filament Yarıçapı	mikron	27
Çekme Dayanımı	MPa	900
Kopma Anındaki Uzama	%	17,55
Erime Sıcaklığı	°C	260
Alkali Direnci	Çok iyi	
Korozyon Direnci	Çok iyi	
Fiber Sayısı	1/kg	111 milyon
Lif Türü	Monofilamanet	
Hammade Türü	%100 Poliamit 6.6	

Evonik firmasının Dynasytan AMEO ticari isimli 3-Aminopropiltrietoksisilan (3-APTS) ürünü cam kumaşların yüzey modifikasyonu işleminde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 3-APTS’nin kimyasal yapısı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: 3-APTS kimyasal yapısı.

4.3. Numune Hazırlık Aşamaları

Bu bölüm altında tez çalışması süresince üretimi gerçekleştirilen levha, kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların ön hazırlık aşamaları, üretimleri ve test numunesi hazırlığı hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur.

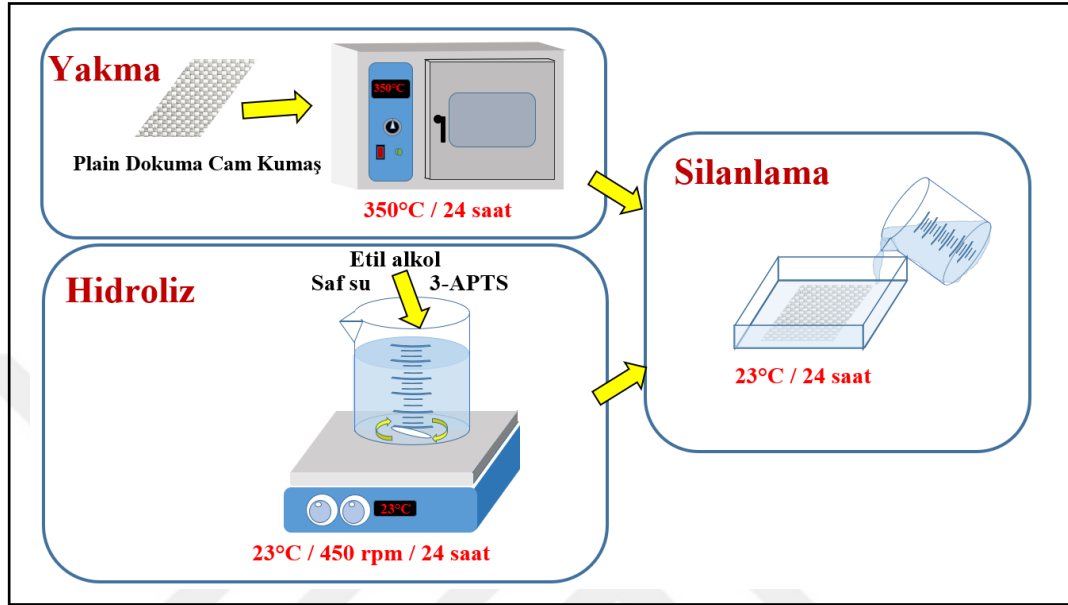
4.3.1. Cam Elyaf Kumaş Hazırlığı ve Yüzey Modifikasyonu

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen kompozit üretimlerinde aynı rulo üzerinden kesilmiş cam kumaşlar kullanılmıştır. Kompozit üretimi için cam kumaşların gerekli ölçülerde kesimi için Şekil 4.3'te gösterilen bir master kullanılmıştır. Kesimler boyutsal sapmalardan kaçınmak adına dairesel maket bıçağı ile tek hamlede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3: Cam elyaf kumaş ve kumaş kesim mastarı.

Çalışma kapsamında cam kumaş hem yüzey modifikasyonuna tabi tutularak hem de yüzey modifikasyonu olmaksızın kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmıştır. Şekil 4.4'te cam kumaşların yüzey modifikasyonunda izlenen yol şematik olarak gösterilmektedir.



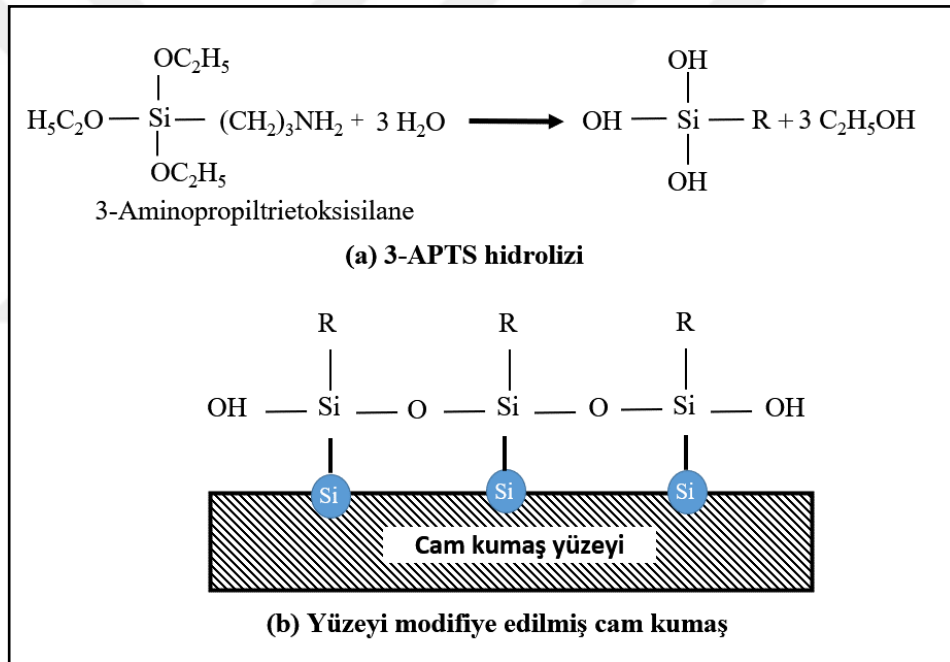
Şekil 4.4: Cam kumaşın 3-APTS ile yüzey modifikasyonu aşamaları.

Çalışma kapsamında Koloğlu firmasından temin edilen cam kumaş epoksi reçinelere uygun yüzey kaplaması içeren bir malzemedir. Çalışmada kullanılan PA6.6 ile cam elyafın uyumluluğunu arttırmak için ilk olarak cam kumaşın ticari kaplaması ortadan kaldırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kesilen cam kumaşlar 350°C sıcaklıkta 24 saat kül fırınında yakılmış ve barındırmış olduğu ve kimyasal içeriği net olarak bilinmeyen kaplama yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Ardından PA6.6 ile cam elyaf arasındaki arayüzey etkileşimini arttırmak için amino silan bazlı ve PA6.6 ile uyumluluğu artırabileceği endüstriyel olarak bilinen bir silan bağlayıcı ajan kullanılarak cam kumaş yüzeyleri modifiye edilmiştir.

Bu aşamada silanlama işlemi için çözelti hazırlığı yakma işlemi ile aynı anda başlatılmıştır. Silan çözeltisi, hacimce %90 etil alkol, %5 saf su ve %5 3-APTS içerecek şekilde bir beher içerisinde hazırlanmıştır. Daha sonra çözelti manyetik karıştırıcı yardımı ile oda sıcaklığında 24 saat süre ile karıştırılmıştır. Bu işlemin amacı silanın hidroliz edilerek cam kumaş ile bağlanmaya hazır hale getirilmesidir. Yakma ve çözelti hazırlama işlemleri eş zamanlı gerçekleştirildikten sonra ise kumaşlar bir kap içerisine alınarak üzerleri tamamen kapanacak şekilde silan

çözeltisine daldırılmıştır. Silanlama işlemi 24 boyunca gerçekleştirilmiştir. Silanlama sonrası cam kumaş ile bağ yapmayan kalıntıların uzaklaştırılması için kumaşlar saf suyla yıkanarak 80°C etüvde 24 saat süre ile kurumaya bırakılmıştır.

3-APTS'nin hidrolizi sırasında beklenen reaksiyon Şekil 4.5a'da verilirken, cam kumaşın silanlama işlemi sonrasında modifiye edilmiş yüzeyinde beklenen yapı Şekil 4.5b'de verilmiştir. Hidroliz esnasında çözelti içerisinde bulunan H₂O molekülleri 3-APTS'nin amin bulunmayan uçları ile reaksiyona girerek Şekil 4.5'teki gibi etoksi gruplarını koparması ve 3-APTS'nin fonksiyonelleşmesini sağlaması beklenmektedir. Silanlama işlemi sırasında ise fonksiyonelleşen 3-APTS uçlarının hem diğer 3-APTS hem de cam kumaş yüzeyindeki Si atomları ile bağ oluşturarak cam kumaş yüzeyinde reaktif bir yapı oluşturması beklenmektedir.



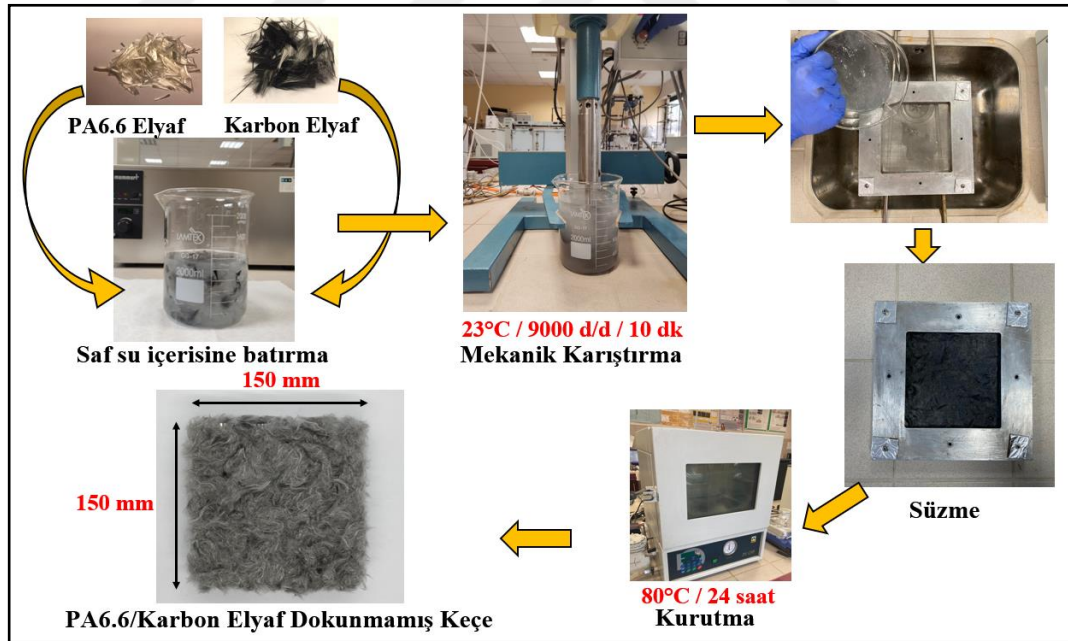
Şekil 4.5: a) 3-APTS hidroliz reaksiyonu, b) Cam kumaş yüzey modifikasyonu sonrası kimyasal yapı.

4.3.2. Dokunmamış Keçe Üretimi

Tez çalışmasında atık karbon elyaflar PA6.6 elyaflar ile beraber işlenerek dokunmamış keçe haline getirilmiştir. Böylelikle birbiri içerisinde homojenizasyonu oldukça yüksek, rastgele dağılmış iki faz elde edilmiştir. Çalışmanın başlangıcında iki elyafın karıştırılma işlemi el ile sağlanmış ve homojen karışımın sağlanamadığı

görülmüştür. Bu nedenle literatürde genellikle görece kısa elyaf lar için tercih edilen ıslak serme yönteminin bir benzeri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Islak serme metodunda iki farklı elyaf bir sıvı içerisinde mekanik olarak karıştırılıp süzülerek dokunmamış yapıda bir keçe eldesi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen PA6.6/CF dokunmamış keçe üretim aşamaları Şekil 4.6’da verilmiştir. Dokunmamış keçe üretimi ilk olarak istenilen miktar ve karışım oranında atık karbon elyaf ve PA6.6 karışımlarının tartımı ile başlamaktadır. Ardından bu karışım saf su dolu bir beher içerisine dökülmüştür. Daha sonra VMA-GETZMANN marka ve model mekanik karıştırıcı yardımı ile oda sıcaklığında karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. 9000 devir/dakika hızda 10 dk süren karıştırma işlemi sonrasında karışım, 150 mm x 150 mm boyutlarında ve alt yüzeyinde 300 mesh süzgeç teli bulunan bir kap içerisine dökülerek yavaşça süzülmesi sağlanmıştır. Saf suyun süzülmesi sonucunda istenen karışım oranındaki PA6.6/CF dokunmamış keçeler elde edilmiştir. Hali hazırda ıslak olan dokunmamış keçeler daha sonra yapışmaz bir kâğıt üzerine serilerek 80°C’deki etüvde 24 saat kurutularak nemden arındırılmıştır.



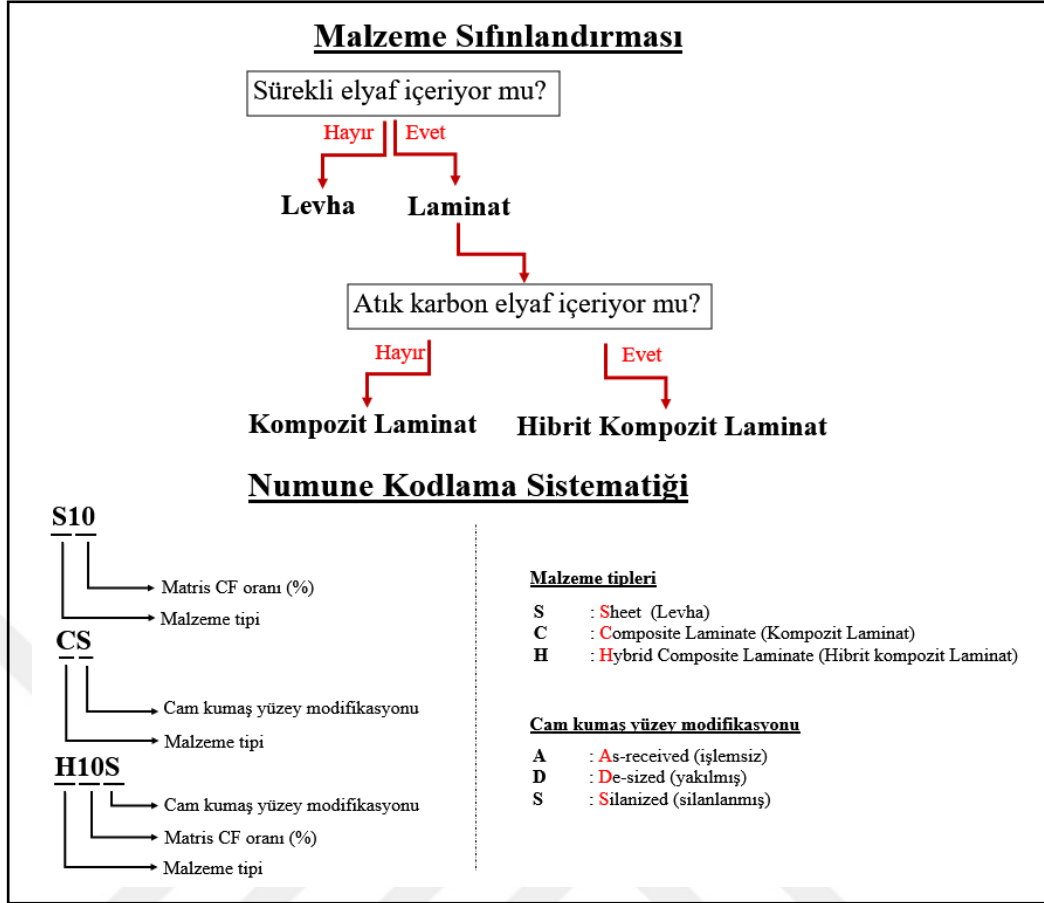
Şekil 4.6: PA6.6/Karbon Elyaf dokunmamış keçe üretim aşamaları.

Bu çalışmada, ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında atık karbon elyaf içeren dokunmamış keçe üretilmiştir. Hibrit kompozit laminatların üretiminde kullanılan keçeler her bir katman için toplam ağırlıkları 6 gram, alansal yoğunlukları ise 266 g/m² olacak şekilde hazırlanmıştır.

4.3.3. Hibrit Kompozit Laminat ve Referans Malzeme Üretimleri

Tez çalışmasında geliştirilen özgün hibrit kompozit laminatlar ve kıyası yapılacak olan kompozit laminat ve levhalar çalışma için özel tasarlanan alüminyum kalıp ve sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde verilecek sonuçların düzgün ve anlaşılır şekilde takip edilebilmesi için üretilen malzemelerin sınıflandırması ve adlandırılması yapılmıştır (Şekil 4.7). Üretilen malzemeler sürekli elyaf faz içerip içermediğine göre iki ayrı sınıfta ele alınmıştır. Sürekli elyaf yani cam kumaş içeren ürünler oluşturdukları tabakalı yapıdan dolayı laminat, içermeyenler ise levha olarak adlandırılmıştır. Laminatlar ise atık karbon elyaf içerip içermediğine göre sınıflandırılırken, karbon elyaf içermeyenler kompozit laminat, içerenler ise hibrit kompozit laminat olarak adlandırılmıştır. Tüm bu malzemeler ile üretilen numuneler ise matrislerinde içerdikleri atık karbon elyaf oranı (varsa) ve cam kumaş (varsa) yüzey modifikasyonuna göre kodlanmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme sınıflandırması ve numune kodları Şekil 4.7’de verilirken, üretilen tüm malzemelerin içerikleri Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tez çalışması ön çalışmalarında seçilen malzemeler ile sıcak presleme yöntemi için literatürde sıklıkla rastlanan iki levha ve bir çerçeveden oluşan deneme kalıbı ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Bu üretimler sonucunda cam kumaşların presleme esnasında formlarının bozulduğu ve elyaf açılarının değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca presleme esnasında eriyip PA6.6’nın çerçeve ve alt – üst levhalar arasında sızmasından kaynaklı kompozit yüzeyleri arasında paralelliğin bozulduğu görülmüştür. Yapılan ön mekanik testlerde de üretilen laminatlar yüksek sapmalı verdiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle sıcak presleme esnasında cam kumaşların kaymadan bir arada tutulabildiği, istenilmesi durumunda farklı kalınlıklarda numune üretimine elverişli ve kalıptan numunenin rahatlıkla ayrılabilmesine uygun bir kalıp tasarlanması ihtiyacı doğmuştur.



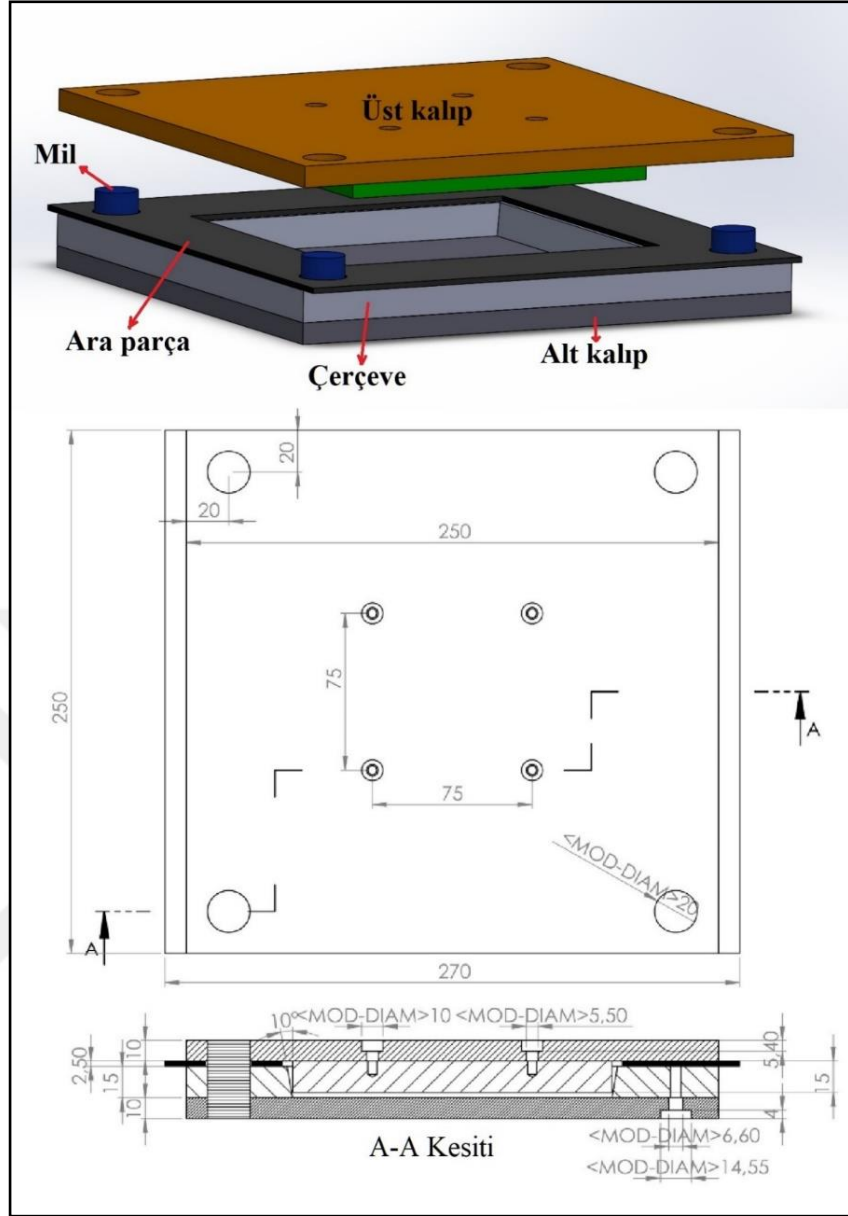
Şekil 4.7: Çalışmada kullanılan malzeme sınıflandırması ve numune kodlama sistematığı.

Bu çalışma kapsamında yukarıda bahsedilen özelliklere sahip bir kalıp tasarımı yapılmış ve tüm malzemelerin üretimi için bu kalıp kullanılmıştır. Tasarlanan kalıbın teknik resmi Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu kalıp beş ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; ayrılabilir iki parçadan oluşan üst kalıp, alt kalıp, alt kalıba montajı yapılan çerçeve, kapama hareketi esnasında alt ve üst kalıbın yataklanmasını sağlayan miller ve malzeme kalınlığının sabit tutulmasını sağlayan ara parçadır.

Tablo 4.3: Malzeme kodları ve malzeme içerikleri.

	Malzeme Kodu	Malzeme İçeriği	Matris CF oranı	Cam Kumaş Yüzey Modifikasyonu
Levhalar	S00	PA6.6	0	-
	S10	PA6.6/CF	10	-
	S20	PA6.6/CF	20	-
	S30	PA6.6/CF	30	-
Kompozit Laminatlar	CA	PA6.6/GF	0	İşlemsiz
	CD	PA6.6/GF	0	Yakılmış
	CS	PA6.6/GF	0	Silanlanmış
Hibrit Kompozit Laminatlar	H10A	PA6.6/CF/GF	10	İşlemsiz
	H20A	PA6.6/CF/GF	20	İşlemsiz
	H30A	PA6.6/CF/GF	30	İşlemsiz
	H10S	PA6.6/CF/GF	10	Silanlanmış
	H20S	PA6.6/CF/GF	20	Silanlanmış
	H30S	PA6.6/CF/GF	30	Silanlanmış
*GF: Cam Elyaf Kumaş kısaltması olarak kullanılmıştır.				

Şekil 4.8’de teknik resmi verilen kalıbın malzeme üretiminin gerçekleştiği kalıp boşluğu 150 mm x 150 mm ölçülerinde bir kare prizma şeklindedir. Presleme basıncının erime öncesi ve sonrasında tamamen malzemeye iletilmesi için üst kalıp erkek, çerçeve ile alt kalıp dişi şeklinde tasarlanmıştır. Üretilecek malzemenin kalınlık ve iki yüzeyi arasındaki paralelliğin korunması için alt ve üst kalıbın düşey ekseninde yataklanması için miller kullanılırken, millerin çalışması için bileşenler üzerine uygun delikler açılmıştır. Ayrıcı üretilen malzemenin kalıptan rahatça çıkarılabilmesi için kalıp boşluğunun kenarları 10°’lik açı ile eğimli şekilde işlenmiştir. Tasarımı yapılan bu kalıbın üretimi 7075 alüminyum malzeme ile gerçekleştirilirken, malzeme seçiminde alüminyumun çelik malzemeye göre daha düşük ısı kapasiteye ve ısı iletim katsayısına sahip olması etken olmuştur. Böylelikle üretim sırasında kalıbın ısınması ve soğuması için gerekli süre olabildiğince kısa tutulabilmektedir.



Şekil 4.8: Tez çalışması için tasarlanan kalıp çizimleri.

Laminat ve levha üretimlerinin gerçekleştirildiği sıcak pres Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu cihazın maksimum kapama basıncı 250 bar, maksimum çalışma sıcaklığı 300°C ve maksimum çalışma alanı 330 mm x 330 mm’dir.

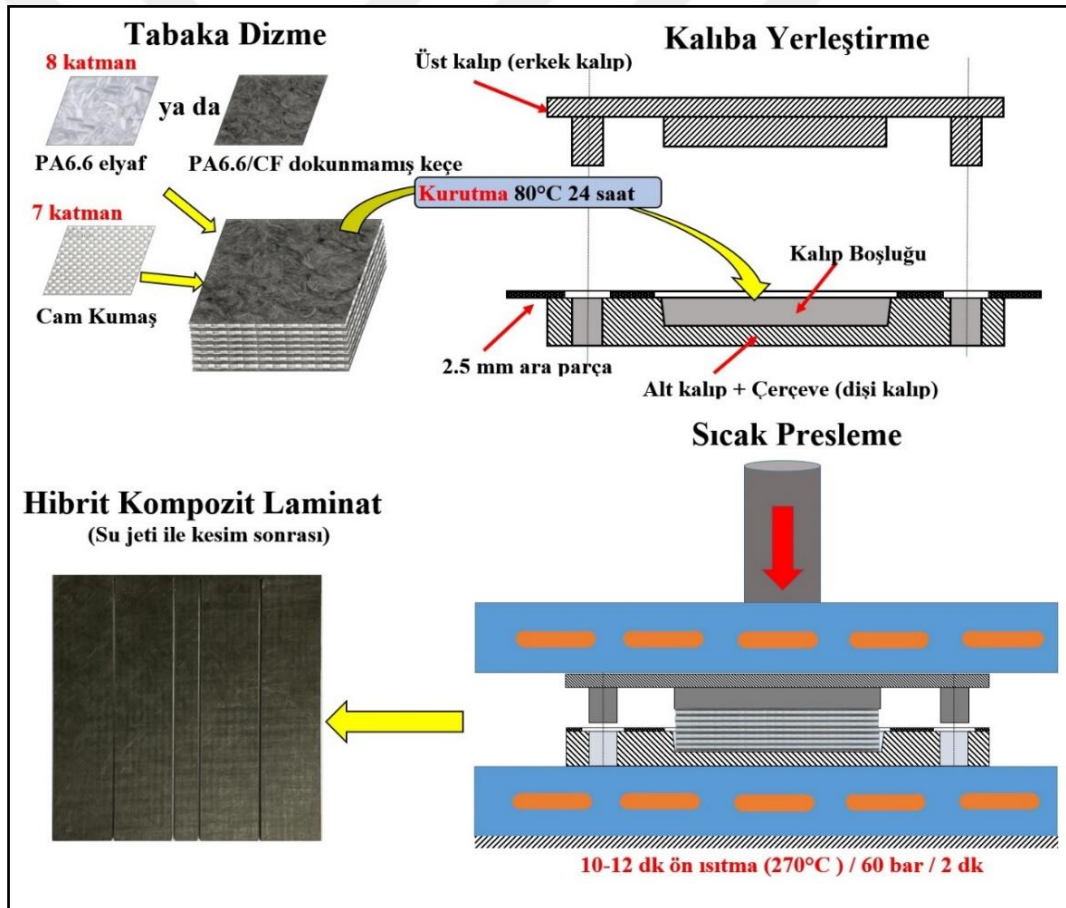


Şekil 4.9: Kompozit laminat üretiminde kullanılan sıcak pres.

Tez çalışmasında üretilen hibrit kompozit laminatların alt bileşenlerinin özelliklerini gözlemlemek ve beraber kullanımlarında elde edilen sonuçları irdelemek hibrit kompozitin geliştirilmesi adına önem arz etmektedir. Bu nedenle, öncelikle matris malzemesi olarak kullanılan PA6.6 malzemesinin özelliklerini incelemek adına saf PA6.6 levhalar (S00) üretilmiştir. Yine hibrit kompozit içerisinde kullanılan ve matris görevi görmesi istenen atık PA6.6/CF dokunmamış keçelerin özelliklerinin gözlemlenebilmesi için yalnızca bu keçeler ile üretilmiş PA6.6/CF levhalar (S10, S20, S30) hibrit kompozitlerin matris özelliklerine göre ne kadar bir özellik artışı sağladığını gözlemlemek adına üretilmiştir. Referans olarak üretilen bir diğer malzeme ise hibrit kompozitlerdeki sürekli elyaf fazını oluşturan cam kumaşların özelliklerini gözlemlemek için üretilen cam kumaş/PA6.6 kompozit laminatlardır. Bu laminatlar cam elyaf kumaş yüzey modifikasyonuna göre üç sınıfa (CA, CD, CS) ayrılmıştır. Bunlar; yüzey işlemi uygulanmayan cam elyaf kumaşlar (as-recieved), ticari kaplaması yakılarak uzaklaştırılan cam elyaf kumaşlar (desized) ve silanlanmış cam elyaf kumaşlar ile üretilen kompozit laminatlardır. Çalışmanın ana ürünü olan hibrit kompozit laminatlar ise işlemsiz ve silanlanmış cam kumaşlar ile gerçekleştirilirken, matriste kullanılan dokunmamış keçeler içerdikleri karbon elyaf miktarına göre üç farklı oranda üretilmişlerdir.

Bahsedilen laminat üretim aşamaları Şekil 4.10'da verilmiştir. Laminat üretimi için öncelikle yedi kat cam kumaş ve 8 kat dokunmamış keçe üst üste dizilerek

preform haline getirilmiştir. Preformlar içerdikleri nemin giderilmesi için 24 saat süreyle 80°C kurutulduktan sonra yüzeylerine silikon kalıp ayırıcı sprej uygulanan kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıp 270°C sıcaklığa ısıtılmış pres içerisine yerleştirilerek sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak preslemenin ilk aşamasında kalıp ve malzemenin istenen sıcaklığa gelmesi için ön ısıtma uygulanmıştır. Bu aşamada kalıp ve pres yüzeylerinin teması sağlanmış ve sıcaklığın kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Bu süre malzeme türüne göre 10 ila 12 dakika arasında değişiklik göstermiştir. Ön ısıtma sonrasında ise 60 bar basınç altında 2 dakika süre ile sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme sonrası kalıp sıcak presten çıkartılarak oda sıcaklığındaki ikinci bir prese yerleştirilip 1 bar basınç altında soğuması beklenmiştir.



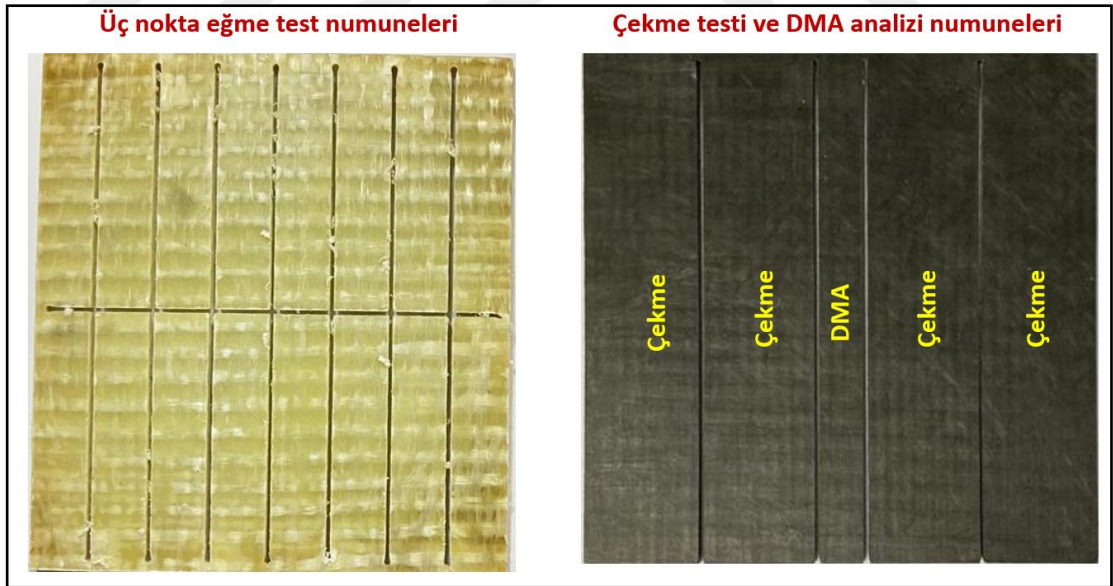
Şekil 4.10: Kompozit ve hibrit kompozit laminat üretim aşamaları.

Tez çalışmasında üretilen PA6.6 ve atık PA6.6/CF levhalar ise laminat üretiminden farklı olarak cam kumaşlar kullanılmadan ve 11 kat dokunmamış kecenin üst üste dizilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Levha üretimi için de yine aynı

kalıp ve sıcak presleme basamakları kullanılırken, sıcak presleme parametrelerinde de laminatlarla aynı değerler kullanılmıştır.

4.3.4. Test Numunesi Kesim İşlemi

Tez çalışmasında üretilen laminat ve levhalar ilk olarak çapaklarından arındırılmış ve test numunesi kesim işlemi su jeti ile gerçekleştirilmiştir. Test standardına göre belirlenen ölçülerde kesimler yapmak için farklı takım yolları kullanılmıştır. Üç nokta eğme, çekme ve DMA test numunelerinin su jeti ile kesim sonrasındaki görüntüleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Test numunesi boyutlarının küçük olması sebebi ile numunelerin ayrı yarı levha ve laminatlar üzerinden kesimi mümkün olmamıştır. Çünkü kısa numune boyutları kesim esnasında numunelerin kesim havuzuna düşmesine neden olmuştur. Bu nedenle, test numuneleri birbirlerine 1mm x 1 mm’lik bağlantılar olacak kesilmiştir. Birbirine bağlı şekilde kesilen test numuneleri daha sonra dremel yardımı ile birbirlerinden ayrılmış ve oluşan çapaklar zımparalanmıştır.



Şekil 4.11: Su jeti sonrası test numunelerinin görüntüsü.

4.4. Karakterizasyon Yöntemleri

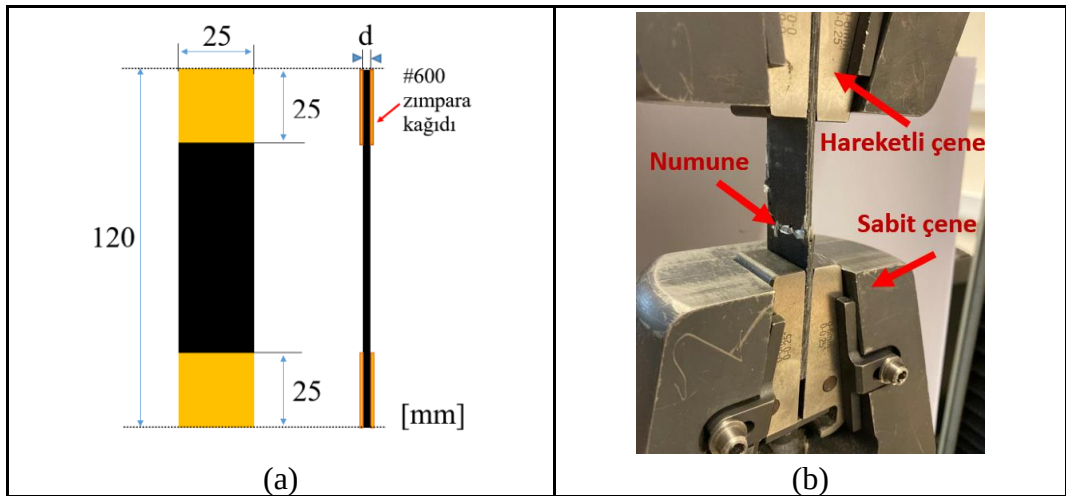
Bu bölüm altında tez çalışması kapsamında üretilen malzemelere uygulanan karakterizasyon işlemlerinin detayları sunulmuştur.

4.4.1. Mekanik ve Dinamik Mekanik Testler

Tez çalışması kapsamında üretilen malzemelerin mekanik ve dinamik mekanik özelliklerini incelemek adına; çekme testi, üç nokta eğme testi ve dinamik mekanik analiz karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu karakterizasyonların uygulama şartları hakkında detaylı bilgiler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.4.1.1. Çekme Testi

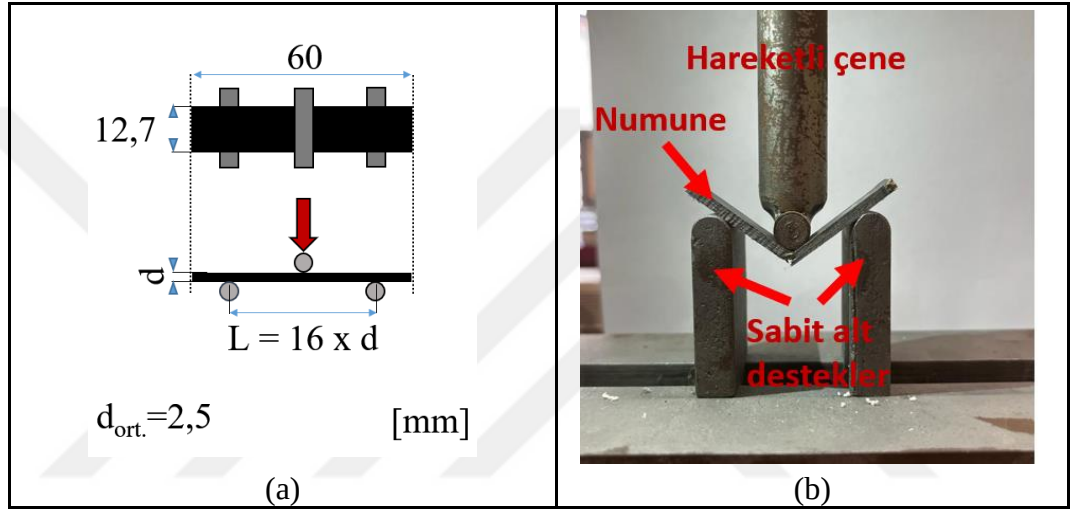
Çekme testleri Intstron 6800 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında cihazın 50 kN'luk yük hücresi kullanılmıştır. Malzemelerin çekme testleri ASTM D-3039 standardına uygun şekilde yürütülürken kullanılan numune boyutları Şekil 4.12.a'da ve numunelerin çekme test cihazına bağlantısı Şekil 4.12.b'de verilmiştir. Testler 2 mm/dk'lık çene hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi testleri her bir malzeme için farklı üç levhadan kesilmiş 12 numuneye uygulanmış ve sonuçlar raporlanmıştır.



Şekil 4.12: a) Çekme testi numunesi ölçüleri, b) Çekme test cihazına numune bağlantısı.

4.4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi

Malzemelerin üç nokta eğme testleri Llyod Instruments LRX plus marka ve model test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler ASTM D-790 standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Üç nokta eğme testleri esnasında alt mesnetler arası mesafeler test edilen numunenin kalınlığının 16 ± 1 katı olacak şekilde ayarlanırmış ve çene hızı 2 mm/dk olarak uygulanmıştır. Kullanılan numune ölçüleri Şekil 4.13.a'da, numunenin test cihazına yerleşimi ise Şekil 4.13.b'de verilmiştir.



Şekil 4.13: a) Üç nokta eğme test numunesi ölçüleri, b) Üç nokta eğme cihazına numune bağlantısı.

Malzemelerin üç nokta eğme testleri her bir malzeme türü için üç farklı levhadan kesilmiş 30 numuneye uygulanmış ve sonuçlar raporlanmıştır. Üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen eğilme modülü ASTM D-790'da bahsedildiği üzere Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

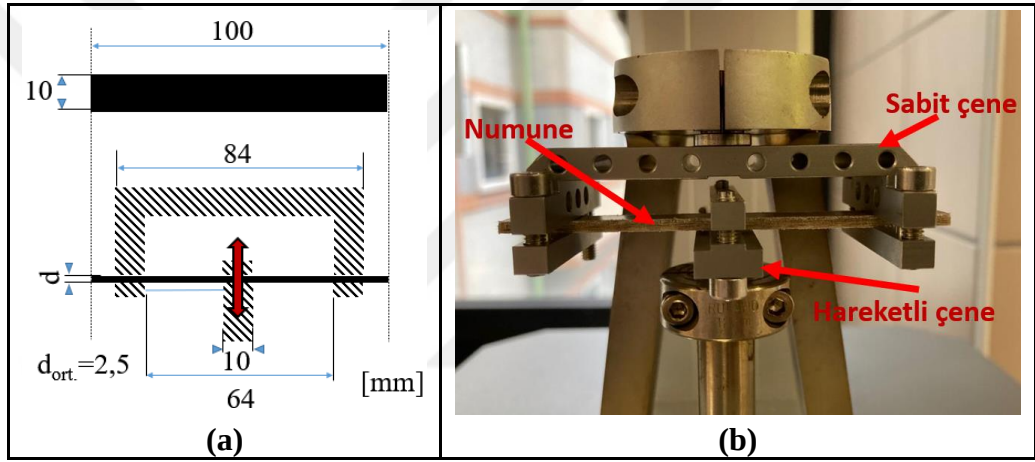
$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (4.1)$$

$$E_f = L^3m/4bd^3 \quad (4.2)$$

burada; L , alt mesnetler arası mesafeyi, m , kuvvet – şekil değişimi grafiğinin lineer bölgesindeki eğimi, b , numune genişliği ve d , numune kalınlığını göstermektedir.

4.4.1.3. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

Malzemelerin viskoelastik özellikleri Metravib DMA50 model dinamik mekanik analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Analizler ASTM D5023'e göre oda sıcaklığından 10°C/dk ısıtma hızı ile 200°C'ye kadar 3 Hz frekansta ve çift ankastré yüklemé modunda gerçekleştirilmiştir. Su jeti ile Şekil 4.14.a'da verilen ölçülerde hazırlanan test numuneleri, cihaza Şekil 4.14.b'deki gibi yerleştirilmiştir. DMA analizleri sonrası malzemelerin sıcaklığa bağılı depo modül (E') ve kayıp faktör ($\tan\delta$) sonuçları raporlanmıştır. Her bir malzeme türü için üç farklı levhadan kesilmiş birer numune analiz edilmiştir.



Şekil 4.14 a) DMA analizi numunesi ölçüleri, b) DMA cihazına numune bağlantısı.

4.4.2. Kimyasal Analizler

Üretilen farklı içeriklerdeki malzemelerin birbiri ile uyumlu çalışması mekanik özelliklere önemli oranda etki etmektedir. Bu nedenle uygulanan yüzey modifikasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Aksi durumda yapılan modifikasyon işlemi nihai üründe beklenen özellik artışı yerine düşüşüne sebep olabilmektedir. Bu nedenle modifikasyon uygulanan bileşenlerin kimyasal açıdan incelenmesi ve yüzey modifikasyonunun başarılı şekilde sağlandığını gözlemlemek gerekmektedir.

4.4.2.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektrometresi

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi analizleri (FTIR), Perkin Elmer Spectrum100 model test cihazı ile yapılmıştır. Numuneler ATR ünitesindeki elmas kristal üzerine yerleştirilerek 650-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında taranarak spektrumlar elde edilmiştir.

FTIR analizleri cam kumaşların yüzey modifikasyonunun incelenmesi için yakılan ve silanlanan cam kumaşlara uygulanmıştır. Bu analizde amaç yakma işlemi sonrasında cam kumaş yüzeyindeki ticari kaplamanın uzaklaştırılıp uzaklaştırılamadığını gözlemlemek ve silanlanan kumaşlarda silan moleküllerinin başarılı bir şekilde yüzeye tutunduğuna emin olmak olmuştur.

4.4.3. Fiziksel Analizler

Tez çalışması kapsamında üretilen malzemelerin kalitesinin ölçülmesi ve numunelerin test koşulları altındaki davranışlarının gözlemlenmesi için fiziksel test metotlarına başvurulmuştur.

4.4.3.1. Yakma Testi

Üretilen laminat ve levhaların kalitesinin tespiti için içerdikleri hava boşluğu miktarının incelenmesi genel olarak kabul gören bir yöntemdir. Bu nedenle çalışmada tüm malzeme gruplarının içerdikleri hava boşluğunun ölçülmesi adına yakma testi kullanılmıştır. Bu test ile hava boşluğu miktarı dışında malzemelerin içerdiği karbon elyaf, cam kumaş, PA6.6 matris bileşenlerinin hacimsel oranlarının gözlemlenmesi sağlanmıştır. Bu testler ASTM D-2734 standardına göre gerçekleştirilirken, numunelerin içerdikleri hava boşluğu Eşitlik 4.3 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Hava boşluğu } \% = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_{komp}}{m_{komp}} \left(\frac{m_{CF}}{m_{CF}} + \frac{m_{GF}}{m_{GF}} + \frac{m_{PA6.6}}{m_{PA6.6}} \right) \right) \quad (4.3)$$

Yakma testi için öncelikle numuneler Metler Toledo XS204 model yoğunluk ölçer ile tartılıp yoğunlukları ölçülmüştür, Böylelikle kompozit ağırlığı (m_{komp}) ve yoğunluğu (ρ_{komp}) belirlenmiştir. Ardından numuneler 500°C sıcaklık altında yanmaz kruzeler içerisinde iki saat süreyle yakılmıştır. Matris malzemesi tamamen yanıp yapıdan uzaklaştıktan sonra ise kalan yapıdaki varsa karbon elyaf ve cam elyaflar bir cımbız yadımı ile dikkatlice birbirinden ayrılarak ayrı ayrı tartılmıştır (m_{CF} ve m_{GF}). Karbon elyaf, cam kumaş ve PA6.6 elyaf yoğunlukları (ρ_{CF} , ρ_{GF} ve $\rho_{PA6.6}$) da yine aynı cihazda ölçülürken, kompozit içerisindeki karbon elyaf, cam kumaş ve toplam elyaf hacimsel oranları (V_{CF} , V_{GF} , V_T) Eşitlik 4.4 ile hesaplanmıştır.

$$V_{CF} = 100 \times \frac{m_{CF}/\rho_{CF}}{m_{CF}/\rho_{CF}}, \quad V_{GF} = 100 \times \frac{m_{GF}/\rho_{GF}}{m_{GF}/\rho_{GF}}, \quad V_T = V_{CF} + V_{GF} \quad (4.4)$$

4.4.3.2. Optik Mikroskop Analizleri

Erozif aşınma testi, çizilme testi, çekme ve eğme testi sonucunda malzeme üzerinde oluşan hasar mekanizmalarının ve değişimlerin makro boyutta gözlemi için Nikon LV100 model mikroskop kullanılmıştır.

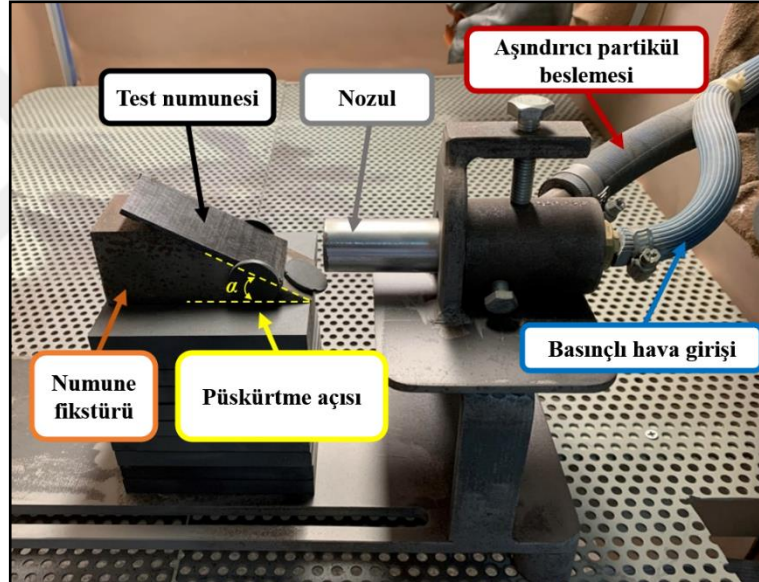
4.4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Çekme testi sonucunda hasar bölgesinin gözlemlenmesi, hasar mekanizmalarının belirlenmesi ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun ara yüzey yapışmasına etkisinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca erozif aşınma ve çizilme testleri sonrasında aşınmış bölgedeki hasar mekanizmalarının gözlemlenmesi için de SEM analizi gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri öncesi tüm numuneler uygun boyutlarda ve gözlemlenmek istenen bölgeye zarar vermeyecek şekilde kesilmiş ve gözlem yüzeyleri iletkenlik sağlamak adına altın ile kaplanmıştır. Ardından yüzey morfolojileri FEI marka QUANTA 400F Field Emission model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

4.4.4. Tribolojik Analizler

4.4.4.1. Eroziyon Aşınma Testi

Gerçekleştirilen eroziyon aşınma testleri özel olarak tasarlanmış test düzeneğinde ASTM G-76-07 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği, havayı basınçlandırmayı sağlayan bir kompresör, basınçlandırılmış havanın depolandığı basınçlı hava tankı, kumlama kabini, basınçlı hava ve aşındırıcı partikül püskürtmeye yarayan bir nozul ve numuneyi istenilen açılarda sabitlemeye yarayan bir numune fikstüründen oluşmaktadır. Kumlama kabini içerisinde kullanılan numune fikstürü ve nozul Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.15: Eroziyon aşınma testi numune fikstürü ve nozul bağlantısı.

Eroziyon aşınma testleri bir kompresör ile basınçlandırılan havanın bir regülatör yardımı ile istenilen basınçta nozula iletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Nozulda bulunan yan besleme sayesinde basınçlı havanın oluşturduğu vakum ile bir konteyner içerisinde bulunan aşındırıcı partiküller hızlandırılarak hedef numune üzerine yollanmaktadır. Çalışmada kullanılan eroziyon aşınma test parametreleri Tablo 4.4’te verilmiştir.

Eroziyon aşınma testlerinde her bir hedef malzeme için altı farklı püskürtme açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) kullanılarak gerçekleştirilirken, aşındırıcı türü,

aşındırıcı boyutu, püskürtme basıncı, aşındırıcı kütleli debisi, püskürtme süresi, nozul çapı ve nozul – hedef numune uzaklığı parametreleri sabit tutulmuştur. Püskürtme açısı aynı zamanda partiküllerin numuneye çarpma açısı olarak da kabul edilmektedir. Bu test parametreleri içinde aşındırıcı kütleli debisi dışındaki parametreler direkt olarak ayarlanabilirken, aşındırıcı kütleli debisi püskürtme basıncı ve aşındırıcı özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle çalışmadaki aşındırıcı kütleli debisinin belirlenmesi için 2 bar basınç ile 30 saniye süresince püskürtme gerçekleştirilmiş ve bu sürede harcanan aşındırıcı partikül kütlesi ölçülmüştür. Aşındırıcı partikül kütlesinin püskürtme süresine bölünmesi ile aşındırıcı kütleli debisi hesaplanmıştır.

Tablo 4.4: Eroziyon aşınma test parametreleri.

Test Parametreleri	Değerler
Püskürtme açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
Aşındırıcı türü	Al ₂ O ₃
Aşındırıcı partikül boyutu	212-300 µm
Püskürtme basıncı	2 bar
Aşındırıcı kütleli debisi	19 g/s
Püskürtme süresi	30 s
Sıcaklık	Oda sıcaklığı
Nozul çapı	5 mm
Nozul – numune arası mesafe	20 mm

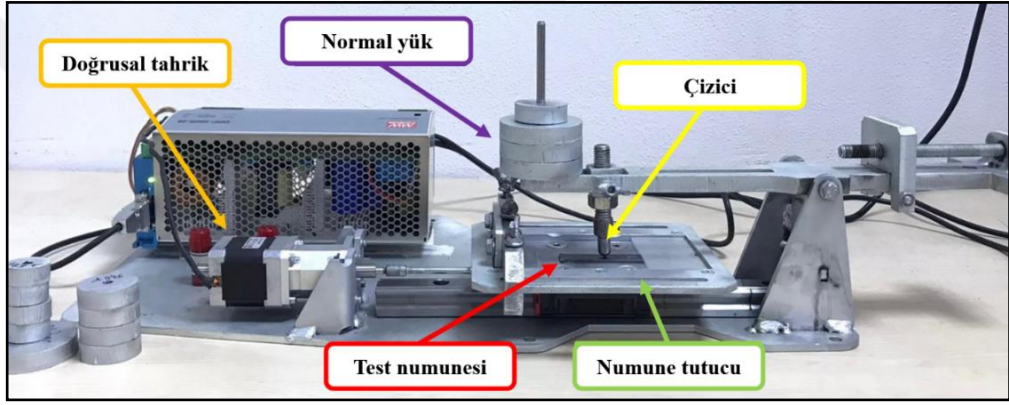
Eroziyon aşınma testleri öncesinde ve sonrasında hedef numunelerin kütleleri ölçülmüş ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Erozyon\ oranı = \Delta m / M \quad (4.5)$$

Burada Δm hedef numunenin eroziyon aşınma testi sonundaki kütle kaybını, M ise eroziyon aşınma süresince hedef numune üzerine gönderilen aşındırıcı partikül kütlesini temsil etmektedir. Böylelikle boyutsuz bir büyüklük olarak erozyon oranı hesaplanmış ve raporlanmıştır.

4.4.4.2. Çizilme Testi

Çizilme testleri, özel tasarlanmış bir çizilme testi düzeneğinde ASTM G-171-03 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çizilme testi için kullanılan test düzeneği Şekil 4.16'da ve test esnasında kullanılan test parametreleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Çizilme testleri 200 µm yarı çaplı küresel uca sahip Rockwell tipi bir çizici ile gerçekleştirilirken, çizilme 66,25 N'luk bir normal yük altında gerçekleştirilmiştir. Test sırasında numuneler numune tutucuya yerleştirildikten sonra çizici yük altında numune yüzeyine teması sağlandıktan sonra numune 5 mm/s hız ile 15 mm mesafe ile hareket ettirilmiştir.



Şekil 4.16: Çizilme testi düzeneği.

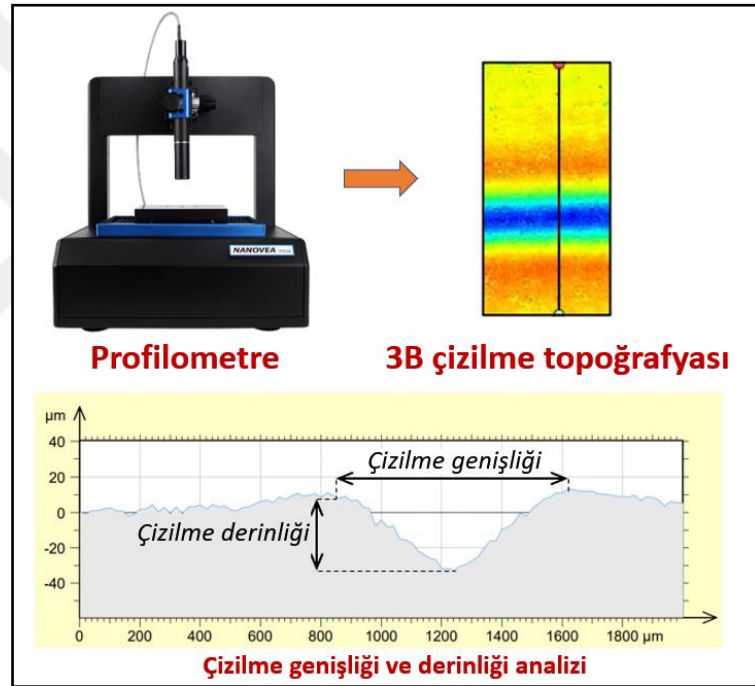
Tablo 4.5: Çizilme test parametreleri.

Test Parametreleri	Değerler
Çizici Tipi	Rockwell (200 µm yarı çap)
Normal Kuvvet	66,25 N
Lineer hareket hızı	5 mm/s
Çizilme uzunluk	15 mm

Gerçekleştirilen çizilme testleri sonrasında, aşağıdaki eşitlik kullanılarak malzemelerin çizilme sertlikleri HS hesaplanmıştır.

$$HS = q \left[\frac{4F_N}{\pi W^2} \right] \quad (4.6)$$

Burada, F_N normal kuvvet, w çizilme genişliği, q ise malzeme sabitini temsil etmektedir, Normal kuvvet test düzeneğinde kullanılan yük ve kuvvet kolu yardımı ile hesaplanırken tüm testler için sabit tutulmuştur. Malzeme sabiti malzemenin türü ne göre seçilirken, genellikle viskoelastik malzemeler için 1, rijit plastik malzemeler için ise 2 tercih edilmektedir. Bu çalışmada malzeme sabiti 1 olarak seçilmiştir. Çizilme sertliği hesaplanması için kullanılan çizilme genişliği değeri ise Nanovea PS50 marka optik profilometre ile ölçülmüştür. Ölçümler taranan çizik topoğrafyasının en geniş bölümü göz önüne alınarak bilgisayar ortamında ölçülmüştür. Çizilme yüzey topoğrafyası, oluşan yüzey profili ve ölçülen çizilme genişliği Şekil 4.17’de verilmiştir.

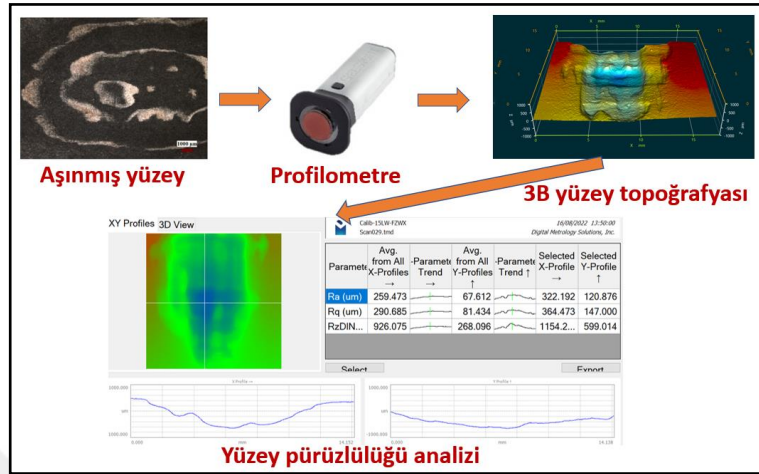


Şekil 4.17: Çizilme genişliği ve derinliği ölçümü.

4.4.4.3. Yüzey Topoğrafyası ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Erozif aşınma testi sonucunda oluşan kraterlerin yüzey topoğrafyası incelemesi ve oluşan kraterin yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için GelSight marka temaslı profilometre kullanılarak ölçülmüştür. Erozif aşınmaya maruz bırakılan numunelerin aşınma bölgeleri Şekil 4.18’de gösterilen temaslı prob’un yüzeye temas ettirilmesi ile taranmış ve aşınmış yüzey üç boyutlu topoğrafyası elde edilmiştir. Daha sonra

cihazın programı yardımı ile aşınmanın en derin olduğu bölgeyi kapsayacak şekilde yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.18: Erozif aşınma bölgesi pürüzlülük ölçümü.

4.4.5. Çevresel Şartlandırma Çalışmaları

Çalışma kapsamında üretilen kompozit laminatların çevresel koşullar altında özelliklerindeki değişimin incelenmesi amacıyla silanlanmış cam kumaş ile üretilen kompozit laminatlar (CS) ve hibrit kompozit laminatlar (H10S, H20S) oda sıcaklığında ve 60°C sıcaklık altında neme maruz bırakılmışlardır. Ardından kısa aralıklarla numunelerin nem yutumları ölçülmüş ve 100, 250, 500 ve 1000 saat şartlandırma süreleri sonunda malzemelerin mekanik ve dinamik mekanik özellikleri gözlemlenerek, nem ve sıcaklığın malzemelerin özelliklerine etkileri irdelenmiştir.

4.4.5.1. Nem Yutum Ölçümleri

Numuneler toplamda 1000 saat süreyle oda sıcaklığı ve 60°C sıcaklık altında yüksek neme maruz bırakılmışlardır. Nem yutum çalışmaları ASTM D-570 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda numuneler öncelikle 48 saat süre ile 80°C’de etüvde nemden arındırılmış ve akabinde oda sıcaklığına soğutularak ağırlıkları hassas terazi yardımı ile ölçülmüştür. Sonrasında numuneler iki farklı sıcaklık ortamında tamamen su altında kalacak şekilde su banyolarına daldırılmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken numunelerin geniş yüzeylerinin su ile temasının

sağlanmıştır. İlk ağırlıkları bilinen numuneler daha sonra belirlenen zaman aralıklarında su banyosundan çıkarılıp kuru bir bez yardımı ile kurulandıktan hemen sonra tekrar ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin nem yutum miktarlarındaki değişimler;

$$\Delta W_{(t)} = \frac{W_i - W_s}{W_s} \times 100 \quad (4.7)$$

eşitliği ile hesaplanarak raporlanmıştır. Burada, $\Delta W(t)$ yüzde nem yutum miktarını (t: süre), W_i numunelerin kuru ağırlıklarını, W_s ise numunelerin nem yutum sonrası ağırlığını temsil etmektedir.

4.4.5.2. Nem ve Sıcaklığın Mekanik ve Dinamik Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Nem ve sıcaklık nedeni ile malzemelerin içerdikleri nem miktarının değiştirmesi malzemenin iç yapısında mikro hasarlara ve özellik kayıplarına neden olabilmektedir. Özellikle nemin elyaf katkılı yapılarda elyaf – matris arasında hasara neden olabilmesi nem ve sıcaklığın malzeme özelliklerine etkisinin önemini arttırmaktadır. Bu çalışma kapsamında kompozit laminatlar, oda sıcaklığı ve 60°C ortam sıcaklığında saf su içerisinde 100, 250, 500 ve 1000 saat şartlandırılması sonrasında üç nokta eğme testi ve DMA analizlerine tabi tutulmuştur. Test ve analizler sonrası nem ve sıcaklığın malzemelerin mekanik ve viskoelastik özelliklerinde oluşturduğu değişimler gözlemlenmiştir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarının bulguları ve tartışmaları üç alt bölümde sunulmuştur.

İlk bölümde, çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen levhalar, kompozit laminatlar ve hibrit kompozit laminatların fiziksel, mekanik, dinamik mekanik incelemelerine yer verilmiştir. Tezin özgün ürünü olan hibrit kompozit laminatların diğer iki referans grubu ile kıyası ile atık karbon elyaf katkısının ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun özelliklere etkileri bu bölümde irdelenmiştir. İkinci bölümde, üretilen malzemelerin tribolojik karakterizasyon bulguları ve tartışmaları raporlanırken, atık karbon elyaf katkısı ve cam kumaş yüzey modifikasyonun tribolojik özelliklere etkisi irdelenmiştir. Üçüncü bölümde ise yalnızca silanlanmış cam kumaş ile üretilen kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların çevresel koşullar altında şartlandırılmasının malzemelerin nem yutumu, mekanik ve dinamik mekanik özelliklerine etkisi raporlanmış ve atık karbon elyaf katkısının etkisi irdelenmiştir.

5.1. Hibrit Kompozit Laminatların Fiziksel, Mekanik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyonu

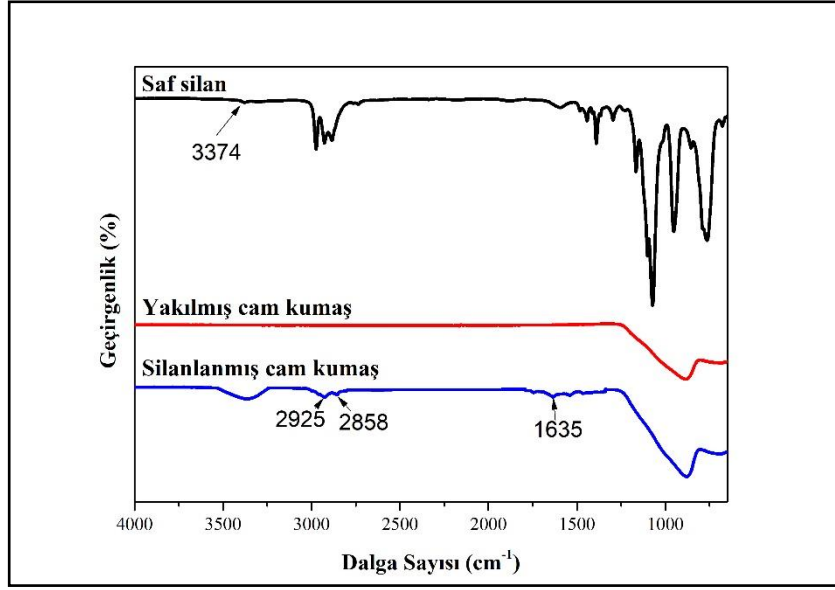
Bu bölümde gerçekleştirilen cam kumaş yüzey modifikasyonu işleminin kimyasal gözlem bulguları ve çalışmada üretilen tüm malzemelerin yakma testi, çekme testi, üç nokta eğme testi, DMA ve SEM analizi bulguları ayrı başlıklar altında raporlanmıştır. Bu bölüm içerisinde bulguları sunulan malzemelerin malzeme kodları ve malzeme içerikleri sonuçların takibini kolaylaştırmak adına Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Karakterizasyon uygulanan malzemeler.

	Malzeme Kodu	Malzeme İçeriği	Matris CF oranı	Cam Kumaş Yüzey Modifikasyonu
Levhalar	S00	PA6.6	0	-
	S10	PA6.6/CF	10	-
	S20	PA6.6/CF	20	-
	S30	PA6.6/CF	30	-
Kompozit Laminatlar	CA	PA6.6/GF	0	İşlemsiz
	CD	PA6.6/GF	0	Yakılmış
	CS	PA6.6/GF	0	Silanlanmış
Hibrit Kompozit Laminatlar	H10A	PA6.6/CF/GF	10	İşlemsiz
	H20A	PA6.6/CF/GF	20	İşlemsiz
	H30A	PA6.6/CF/GF	30	İşlemsiz
	H10S	PA6.6/CF/GF	10	Silanlanmış
	H20S	PA6.6/CF/GF	20	Silanlanmış
	H30S	PA6.6/CF/GF	30	Silanlanmış
*GF: Cam elyaf kumaş kısaltması olarak kullanılmıştır.				

5.1.1. Cam Kumaş Yüzey Modifikasyonu Kimyasal Analizi

Kompozit laminat üretimi için kullanılan cam kumaşlar, cam kumaş – matris arayüzeyinin iyileştirilmesi ve nihai ürünlerin özelliklerinin artırılması amacı ile silan ile modifiye edilmiştir. Silanlama işleminin başarı ile gerçekleştirildiğinin kanıtlanması kompozit üretimi için önem arz etmektedir. Ticari ve içeriği tam bilinmeyen bir yüzey kaplamasına sahip cam kumaşlar öncelikle yakılmış ve kaplamalarından arındırılmıştır. Ardından uygulanan silanlama işlemi ile cam kumaşların yüzeyleri matris ile uyumlu olacak şekilde modifiye edilmiştir. Yakma işlemi sonrasında cam kumaş yüzeyinde herhangi bir organik yapının kalmadığının ve silanlama işlemi ile silan moleküllerinin yüzeye bağlandığının gözlemlenebilmesi için FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. FTIR analizlerinin sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Cam kumaş ve saf silan FTIR spektrumları.

FTIR analizi ile öncelikle yakılmış cam kumaşların yüzeyinde herhangi bir organik kaplamanın kalmadığını gözlemlemek ardından da silanlanmış cam kumaş yüzeylerinde 3-APTS'nin içerdiği ya da cam ile yaptığı bağların gözlemlenmesi beklenmektedir. Buradan hareketle Şekil 5.1'deki spektrumlar incelendiğinde yakılmış cam kumaş yüzeyinde yalnızca 1200 ila 800 cm^{-1} dalga boyu aralığındaki absorpsiyon bantlarının genliğinin azaldığı görülmüştür. Bu bölgedeki absorpsiyon azalması cam kumaş yapısındaki Si-O- bağlarını [62] işaret ettiğinden dolayı çalışmada yakma işleminin (ticari kaplamanın uzaklaştırılması) başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür. Silanlama işleminin başarısının irdelenmesi için saf silan ve silanlanmış cam kumaş spektrumları incelendiğinde, saf silan spektrumundaki 3374 cm^{-1} 'lik pik ve silanlanmış cam kumaş spektrumunda 3200-3500 cm^{-1} arasında gözlemlenen absorpsiyon bandı amin grubu (NH_2) varlığını işaret etmektedir [63]. Ek olarak, saf silan ve silanlanmış cam kumaşın spektrumunda yaklaşık 1635 cm^{-1} dalga boyunda amin grubunun bir başka karakteristik piki gözlenmiştir [64]. Silanlanmış cam kumaş spektrumunda 2925 cm^{-1} ve 2858 cm^{-1} dalga sayılarında diğer belirgin tepe noktaları tespit edilirken, bu noktalar sırasıyla metilen (CH_2) ve metil (CH_3) gruplarının gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır [65]-[67]. Bu sonuçlar, yakma işlemi ile cam kumaş yüzeyindeki ticari kaplamanın uzaklaştırıldığını ve cam kumaş yüzeyine 3-APTS'nin başarı ile bağlandığını göstermiştir.

5.1.2. Yakma Testi Sonuçları

Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etki eden unsurların başında üretim esnasında yapıda oluşan hava boşlukları gelmektedir. Sıcak preste gerçekleştirilen üretimlerde herhangi bir vakum ortamı oluşturulmaması, matrisin eriyerek elyaf lar arasına nüfuz etmesi sırasında hava kabarcıklarının yapıdan uzaklaştırılmasını zorlaştıran bir etkindir. Bu nedenle üretimi yapılan tüm malzemelerin kalite kontrolü niteliğinde olan hava boşluğu ölçümleri önem arz etmektedir. Hava boşluğu oranı farklı malzemeler arasında büyük farklar göstermesi durumunda mekanik test sonuçlarının kıyası anlamsız hale gelecektir. Buradan hareketle çalışmada üretilen tüm malzemelerin içerdikleri hava boşluklarının belirlenmesi ve kalite kontrolünün sağlanması adına yakma test gerçekleştirilmiştir. Yakma testinde malzemeler üzerinden kesilen numuneler 500°C’de kül fırınında yakılırken, işlem öncesi ve sonrası tartımlar gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin yakma işlemi sonrasında cam kumaş ve atık karbon elyaflardan oluşan katmanlar elde edilmiştir. Bu malzemelerin işlem sonrası tartımları her iki elyaf grubunun birbirinden dikkatlice ayrılması ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yakma testi öncesi ve sonrasında yapılan tartımlar/yoğunluk ölçümleri sayesinde malzemelerin içerdikleri hava boşluğu ve yapıda bulunan elyafların hacimsel oranları hesaplanmıştır. Levhaların (PA6.6 veya PA6.6/CF içeren), kompozit laminatların (PA6.6/Cam kumaş içeren) ve hibrit kompozit laminatların (PA6.6/CF/Cam kumaş içeren) yakma testi sonucunda hesaplanan hava boşluğu, matris ve elyaf hacimsel oranları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Levhaların (S00, S10, S20, S30) içerdikleri hava boşlukları incelendiğinde, standart sapmaların da göze alınması ile yapıdaki karbon elyaf miktarının hava boşluğuna doğrudan bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Ayrıca levhaların karbon elyaf oranları incelendiğinde sonuçların teorik olarak hesaplanan hacimsel karbon elyaf oranına çok yakın olduğu görülmektedir.

Karbon elyaf içermeyen kompozit laminatların (CA, CD, CS) sonuçları incelendiğinde, cam kumaş yüzey modifikasyonun hava kabarcığı ya da cam kumaş oranında ciddi bir etki yapmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.2: Yakma testi sonucunda hesaplanan hacim oranları.

Malzeme Kodu	Malzeme İçeriği	Hava Boşluğu Oranı (%)	Karbon Elyaf Oranı (%)	Cam Kumaş Oranı (%)	Toplam Elyaf Oranı (%)
S00	PA6.6	4,7 ± 0,4	-	-	-
S10	PA6.6/CF	5,5 ± 0,2	6,5 ± 0,6	-	6,5 ± 0,6
S20	PA6.6/CF	4,5 ± 0,3	13,7 ± 0,6	-	13,7 ± 0,6
S30	PA6.6/CF	5,5 ± 0,2	20,2 ± 0,2	-	20,2 ± 0,2
CA	PA6.6/GF	5,7 ± 0,9	-	31,9 ± 0,6	31,9 ± 0,6
CD	PA6.6/GF	5,3 ± 1,0	-	31,7 ± 0,7	31,7 ± 0,7
CS	PA6.6/GF	5,0 ± 1,4	-	31,0 ± 0,6	31,0 ± 0,6
H10A	PA6.6/CF/GF	4,0 ± 1,2	3,6 ± 0,4	31,6 ± 1,0	34,7 ± 0,9
H20A	PA6.6/CF/GF	5,5 ± 0,5	6,5 ± 0,8	30,7 ± 0,6	37,0 ± 1,3
H30A	PA6.6/CF/GF	6,8 ± 1,9	12,7 ± 0,5	27,0 ± 0,7	39,6 ± 0,9
H10S	PA6.6/CF/GF	2,8 ± 1,0	3,8 ± 0,3	30,8 ± 0,5	34,7 ± 0,5
H20S	PA6.6/CF/GF	3,7 ± 0,5	6,7 ± 0,8	30,2 ± 0,8	37,5 ± 0,7
H30S	PA6.6/CF/GF	5,9 ± 1,1	12,7 ± 0,5	27,7 ± 0,9	40,5 ± 0,9
*GF: Cam elyaf kumaş					

Hibrit kompozit laminatlarda (H10A, H20A, H30A, H10S, H20S, H30S) ise hava boşluğu açısından matrisin içerdiği karbon elyaf miktarının ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun etkili olduğu sonucuna varılmıştır. İşlenmemiş cam kumaşlarla üretilen (H10A, H20A, H30A) ve silanlanmış cam kumaşla üretilen (H10S, H20S, H30S) hibrit kompozit laminatlarda matristeki karbon elyaf miktarının artışı ile yapıdaki hava boşluğu miktarının artmıştır. Örneğin H10A laminatı yaklaşık %4 oranında hava boşluğu içerirken, H30A laminatı %70 oranında bir artış ile %6,8'e çıkmıştır. Benzer değişim H10S ve H30S arasında da %110'a yakın bir oranda artış ile elde edilmiştir.

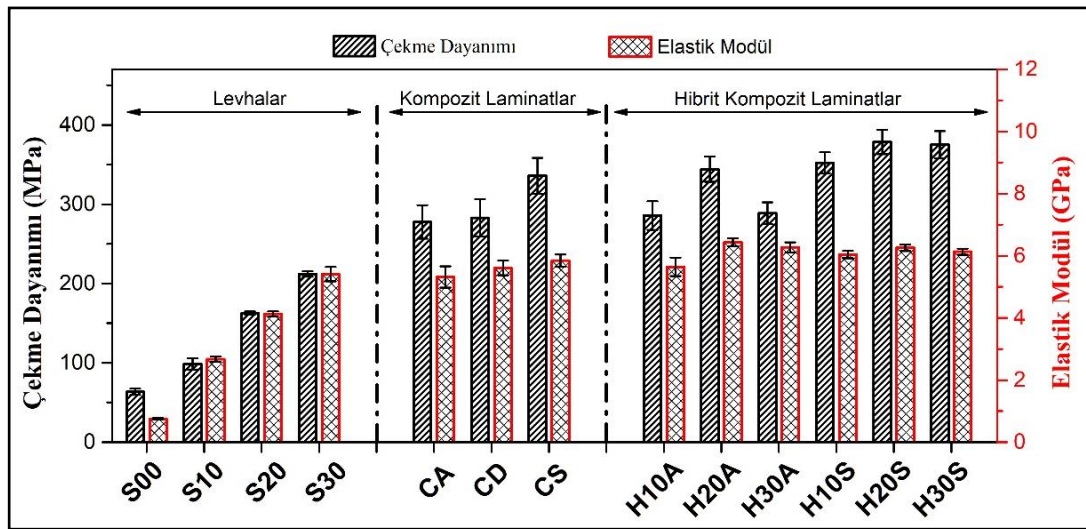
Hibrit kompozit laminatlarda hava boşluğu miktarının cam kumaş yüzey modifikasyonuna ile değişimi irdelendiğinde, silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların (H10S, H20S, H30S), işlenmemiş cam kumaşla üretilen muadillerine (H10A, H20A, H30A) göre %30 oranında daha az hava boşluğu içerdiği görülmüştür. Bu da hibrit kompozit laminatlar için silanlama işleminin hava boşluklarını azaltıcı, matristeki karbon elyaf oranını ise artırıcı etki yaptığı sonucuna göstermektedir. Bir başka deyişle cam kumaş silanlama işleminin hibrit kompozit laminat kalitesini artırıcı etki yaptığı söylenebilmektedir. Hava boşluğu değişimleri

oransan olarak çok fazla görünse de toplam hacim içerisindeki oranları birbirine yakın olması sebebiyle üretilen malzemelerin mekanik özellik açısından kıyasına engel bir durum oluşturmamıştır.

Karbon elyaf içermeyen kompozit laminatların hacimce %31 ila 32 arasında cam kumaş içerdiği görülmektedir. Buradan hareketle cam kumaş yüzey modifikasyonunun beklenildiği gibi kompozit laminatlardaki cam kumaş oranına bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Cam kumaş yüzey modifikasyonunun etkisini karbon elyaf içeren kompozit laminatlarda da benzer şekilde karbon elyaf ve cam kumaş oranlarını değiştirici etki göstermemiştir.

5.1.3. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 5.2’de malzemelerin içerdikleri atık karbon elyaf ve (varsa) cam kumaş yüzey modifikasyonunun çekme dayanımı ve elastik modülüne etkisi gösterilmiştir. Değerlerin daha rahat gözlemlenmesi için Şekil 5.2’deki bar grafiğın değerleri ise Tablo 5.3’te sunulmuştur. Ayrıca malzeme türüne göre tipik gerilim – gerinim eğrileri Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.2: Levha, kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların çekme dayanımı ve elastik modülü.

PA6.6 ve atık karbon elyaf kullanılarak üretilen levhaların (S00, S10, S20, S30) çekme testi sonuçlarına göre yapıdaki atık karbon elyaf miktarının beklendiği gibi çekme dayanımı ve elastik modülünü arttırdığı sonucuna varılmıştır. Karbon

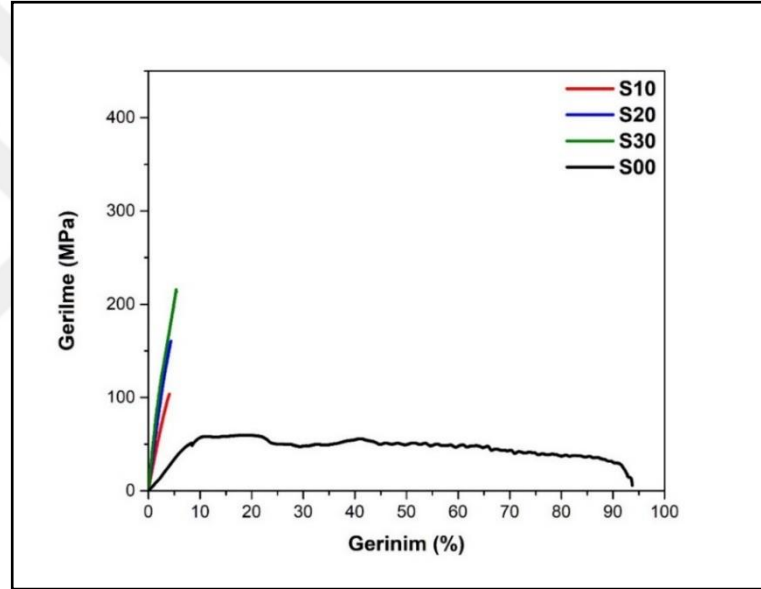
elyaf içermeyen S00 levhasının çekme dayanımı 63,7 MPa ve elastik modülü 0,76 GPa seviyelerinde elde edilirken %30 karbon elyaf içeren S30 levhasının çekme dayanımı ve elastik modül değerleri sırasıyla 212,0 MPa ve 5,41 GPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca levhaların içerdikleri karbon elyaf miktarının artışı ile çekme dayanımı ve elastik modül değerlerinin orantılı bir şekilde arttığı söylenebilmektedir. Çekme dayanımı ve elastik modül sonuçlarının aksine, kopma uzaması sonuçları atık karbon elyaf varlığı ile önemli ölçüde azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 5.3: Çekme testi sonuçları.

	Malzeme Kodu	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Levhalar	S00	63,7 ± 4,0	0,76 ± 0,03	84,6 ± 5,9
	S10	98,7 ± 7,2	2,67 ± 0,08	3,8 ± 0,5
	S20	162,9 ± 2,3	4,13 ± 0,08	4,3 ± 0,4
	S30	212,0 ± 3,4	5,41 ± 0,23	4,9 ± 0,7
Kompozit Laminatlar	CA	277,7 ± 21,1	5,32 ± 0,34	7,5 ± 0,5
	CD	282,7 ± 23,6	5,61 ± 0,24	7,7 ± 0,6
	CS	336,0 ± 22,5	5,85 ± 0,20	8,6 ± 0,6
Hibrit Kompozit Laminatlar	H10A	285,8 ± 18,2	5,64 ± 0,30	8,2 ± 0,6
	H20A	344,2 ± 15,9	6,43 ± 0,13	7,6 ± 0,9
	H30A	288,5 ± 13,8	6,27 ± 0,16	7,7 ± 0,5
	H10S	352,4 ± 13,1	6,04 ± 0,12	7,8 ± 0,9
	H20S	378,5 ± 15,4	6,56 ± 0,11	6,7 ± 0,6
	H30S	375,0 ± 17,2	6,13 ± 0,10	7,2 ± 0,4
*GF: Cam elyaf kumaş				

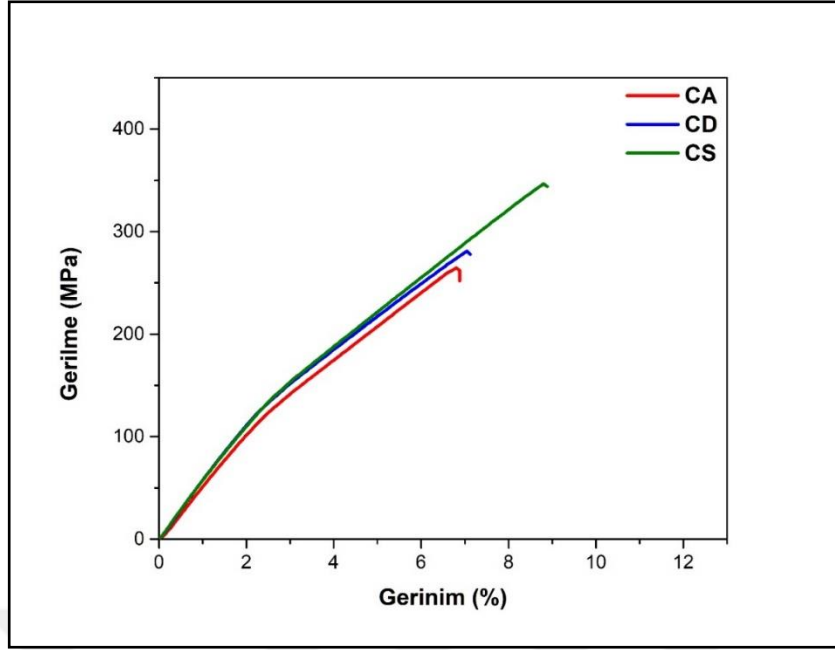
Şekil 5.3'te levhaların karakteristik gerilme – gerinim eğrileri verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, PA6.6/CF kompozit levhalar (S10, S20, S30) beklendiği gibi gevrek kırılma sergilemiştir. Sadece PA6.6 içeren S00 levhası kolayca plastik deformasyona uğrarken, atık karbon elyaf ile takviye edilmiş levhalar neredeyse hiç plastik deformasyon göstermemiştir. Bunun sebebi iki malzeme arasında çok yüksek oranda elastik modülü farkının olmasıdır [68]. Ayrıca, karbon elyaf yükleme oranı arttıkça kopma uzama değerlerinin neredeyse değişmediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada üretilen karbon elyaf takviyeli levhaların çekme testi sonuçları,

literatürdeki çalışmalarla benzer sonuçlar vermiştir. Örneğin, You ve arkadaşları, geleneksel yöntemlerle (eriyik karıştırma ve enjeksiyon kalıplama) ağırlıkça %1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) içeren PA6.6/CF kompozitler üretmiş ve karbon elyaf oranının %10'dan %30'a arttırılması ile çekme dayanımında 100 MPa'dan 181 MPa'a ulaşan dayanım artışı elde etmiştir [69]. Benzer bir sonuç ELG Carbon Fiber firmasının dokunmamış keçe teknolojisi ile gerçekleştirdiği endüstriyel bir çalışmada gözlemlenmiştir. Çalışmada atık karbon elyaf miktarının %30'dan %40'a arttırılması ile çekme dayanımlarında 177,9 MPa'dan 217,1 MPa'a yükselişi ile elde edilmiştir [51]. Tez çalışmasında üretilen levhaların sonuçlarının bu çalışmaların sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3: Levhaların tipik gerilme – gerinim eğrileri.

Atık karbon elyaf içermeyen kompozit laminatların çekme dayanımı ve elastik modül sonuçları incelendiğinde, cam kumaş yüzey modifikasyonun kompozitlerin çekme özelliklerini önemli oranda etkilediği görülmüştür. İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen kompozit laminatlar (CA) 270,9 MPa çekme dayanımı gösterirken, silanlanmış cam kumaş içeren muadilleri (CS) %21 oranında daha yüksek çekme dayanımı göstererek 336 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca, yakılmış cam kumaşlarla üretilen CD laminatları da CA'dan daha yüksek çekme dayanımı ve elastik modüle sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4: Kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.

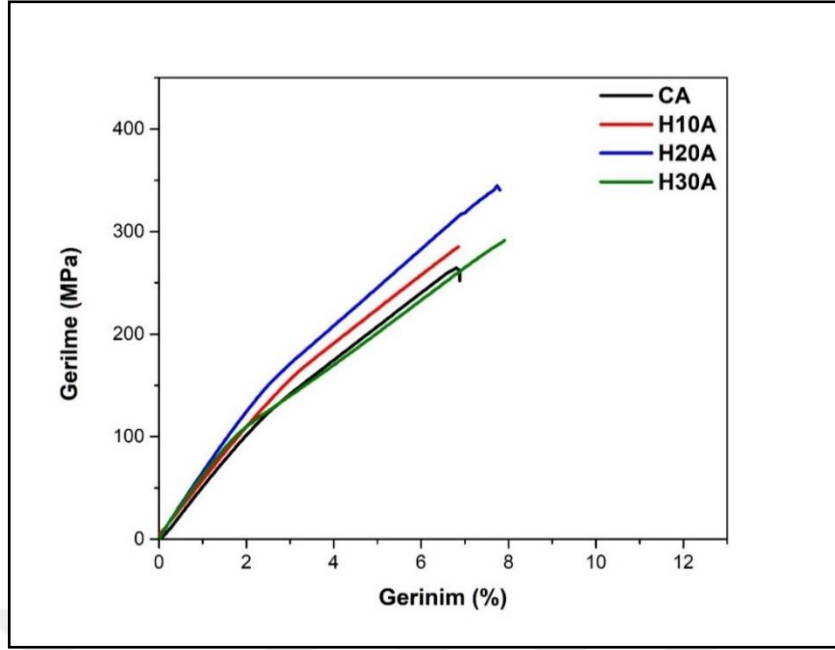
Şekil 5.4'teki eğriler ve Tablo 5.3'ten görüleceği üzere silanma ile kopma uzamasında ciddi bir artış elde edilmiştir. Kopma uzama değerleri cam kumaş silanlamasından sonra %15 oranında artmış göstermiştir. Bu artış, PA6.6'nın -COOH grupları ile 3-APTS'nin -NH₂ grubu arasındaki kimyasal etkileşimlerden kaynaklanan cam kumaş ve PA6.6 arasındaki ara fazın oluşumuna atfedilebilir. Böylece elyaf – matris ara fazının oluşması ile deformasyon gecikmiştir [70]. Ayrıca, kompozit laminatların elastik modülü de silanlama sonrası %10'luk bir artış ile 5,32 GPa'dan 5.85 GPa'a yükselmiştir. Kompozit laminatların elastik modülündeki bu artış, yüksek modüllü cam elyafların PA6.6 zincirlerinin hareketini kısıtlamasına bağlanabilir. Ayrıca, silanlama ile oluşan ara faz sayesinde daha verimli homojen bir kuvvet aktarımını sağlanması da çekme dayanımı ile birlikte elastik modül artışına neden olabilir. Silanlama etkisi ile elde edilen bu dayanım ve modül artışının benzeri literatürdeki çalışmalarda da raporlanmıştır. Yu ve arkadaşları, bazalt elyaf yüzeyini modifiye etmek için farklı silan ajanları kullanılmış ve bu elyafları PA6.6 malzemeyi takviye etmek için kullanmıştır. Çalışma sonucunda silanlanan elyafların matrisle daha fazla etkileşime girerek daha yüksek çekme dayanımı ve elastik modül değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır [71], [72].

Hibrit kompozit laminatların çekme testi sonuçları incelendiğinde, atık karbon elyaf miktarı artışı ile cam kumaş yüzey modifikasyonundan bağımsız olarak çekme dayanımı ve elastik modül değerlerinde artışlar elde edilmiştir. Ancak levhaların

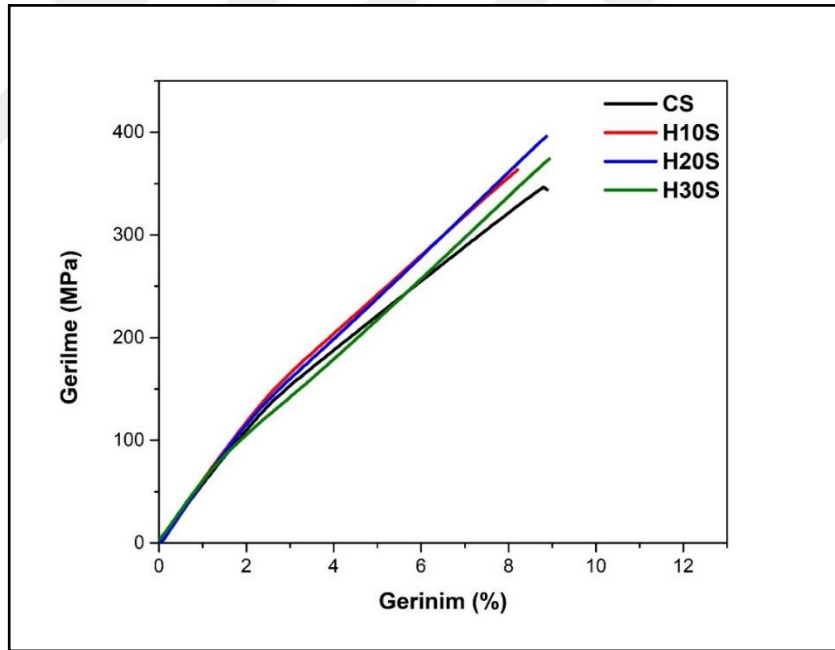
aksine, dayanım ve modül artışı atık karbon elyaf miktarı artışı ile süreklilik göstermemiştir. Hibrit kompozit laminatların hem elastik modülü hem de çekme mukavemeti değerleri, karbon elyaf içeriği ağırlıkça %10'dan %20'ye çıktığında cam kumaş türü fark etmeksizin artmıştır. Çalışmadaki en yüksek çekme dayanımı ve elastik modülü sırasıyla 567,4 MPa ve 6,56 GPa ile H20S laminatına aittir. Öte yandan, %30 karbon elyaf yüklemesinin olduğu hibrit kompozit laminatların (H30A ve H30S) mekanik özelliklerinde %20 karbon elyaf içerenlere göre (H20A ve H20S) düşüş oluşmuştur. Bu düşün sebebi üretim sırasında her bir cam kumaş arasına serilen dokunmamış keçe miktarının sabit tutulmasıdır. Keçe miktarı sabit tutulurken, atık karbon elyaf miktarının artışı ile keçe içerisindeki PA6.6 miktarı azalmış ve elyafların yeterince ile ıslatılamamasına neden olmuştur [73]. Yakma testi sonucunda ölçülen hava boşluğu oranı sonuçları da bu durumu doğrular niteliktedir.

Geliştirilen üretim yönteminin verimini gözlemlemek için yalnızca hibrit kompozitlerin kıyaslanması doğru olmayacaktır. Bu nedenle Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterildiği gibi atık karbon elyaf içermeyen kompozit laminatlar (CA ve CS) aynı cam kumaş içeriğine sahip hibrit kompozit laminatlar karşılaştırılmalıdır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da açık olarak görüleceği üzere hibrit kompozitler atık karbon elyaf katkısız muadillerine göre üstün çekme özellikleri göstermiştir. Bu durum her atık karbon elyaf oranı için geçerli olmuştur. İşlenmemiş kumaşla üretilen laminatlarda %20 karbon elyaf katkısında (CA ile H20A kıyası) %24 eğme dayanımı ve %20 elastik modül artışı elde edilirken, silanlanmış kumaş ile (CS ile H20S kıyası) yaklaşık %12 oranında çekme dayanımı ve elastik modül artışı elde edilmiştir.

Silanlama işleminin etkisi ise kompozit laminatlarda olduğu gibi hibrit kompozit laminatlarda da çekme dayanımı ve elastik modülü arttırıcı etki göstermiştir. İçerdikleri atık karbon elyaf oranından bağımsız olarak tüm karbon elyaf oranı için silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatın (H10S, H20S H30S) çekme dayanımı ve elastik modülü işlenmemiş kumaşla üretilen muadillerine (H10A, H20A, H30A) göre daha yüksektir. Örneğin H20A laminatının çekme dayanımı 344.2 MPa, elastik modülü 6,43 GPa iken, H20S eğme dayanımına 378,5 MPa ve elastik modülü 6,56 GPa olarak elde edilmiştir. Silanlamanın sağladığı bu özellik artış yine daha önce bahsedildiği gibi cam kumaş ve PA6.6 matris arasında silan sayesinde oluşan ara faz ile daha yüksek etkileşim ve daha güçlü bağların oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.5: İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.

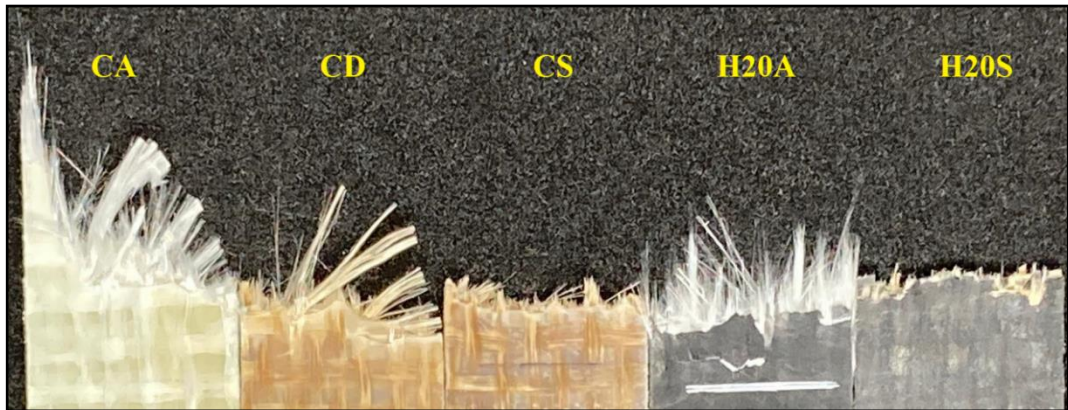


Şekil 5.6: Silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik gerilme – gerinim eğrileri.

Genellikle yapısal parçaların üretiminde kullanılan st37 (DIN S235JR) çeliğinin 3 mm ve altındaki kesitlerinde çekme dayanımı 360 ila 510 MPa arasında değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen üretim metodu sayesinde; atık CF katkısı ile H20S laminatında 336 MPa'dan (CA) 378,5 MPa'a dayanım artışı elde

edilmiştir. Bu da atık CF katkısı sayesinde özgün hibrit kompozitin çekme dayanımının yapısal çeliklerin çekme dayanımı alt limitine ulaşıldığını göstermektedir. H20S laminatının çekme dayanımı kompozitin yoğunluğu ile oranlandığında 239,7 MPa/ρ spesifik dayanım değerine ulaşıldığı görülmüştür. H20S laminatı ile st37 çeliğinin spesifik özellikleri karşılaştırıldığında ise spesifik çekme dayanımı açısından H20S'in %261 ila %426 oranında daha üstün spesifik çekme dayanımı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çekme testi sırasında numuneler üzerinde oluşan hasar mekanizmalarını gözlemlemek için numunelerin hasar bölgelerinin makro görüntüleri Şekil 5.7'de sunulmuştur. Buradan görüleceği üzere hem kompozit laminat hem de hibrit kompozit laminatların hasar mekanizmaları içerdikleri cam kumaşın türüne benzerlik göstermektedir. Örneğin, işlenmemiş cam kumaş içeren CA ve H20A ve yakılmış cam kumaş içeren CD laminatlarında çekme testi sonrasında sıyrılmış oldukça uzun cam elyaflar görülmüştür. Bu gözlemden yola çıkarak bu laminatlarda matris ile elyafların aynı anda hasara uğramadığı söylenebilir. Bu da uzama esnasında matris ile elyaflar arasında düşük yapışma nedeniyle erken hasarlar oluştuğu sonucuna işaret etmektedir. Silanlanmış kumaş içeren CS ve H20S laminatları görüntüleri incelendiğinde ise sıyrılmış elyafların çok düşük miktarda ve uzunlukta olduğu görülmektedir. Yine buradan matrisle elyafların neredeyse aynı anda hasara uğradığı sonucu çıkarılabilir. Bunun nedeni ise silanlama etkisi ile cam kumaş ile PA6.6 matris arasında güçlü bir yapışma elde edilmiş olmasıdır. Çekme testi sonuçları ve makro gözlemlerin daha detaylı incelenmesi için daha sonra çekme numunelerinin hasar bölgelerinden alınan parçalara uygulanan SEM analizleri sunulacaktır.

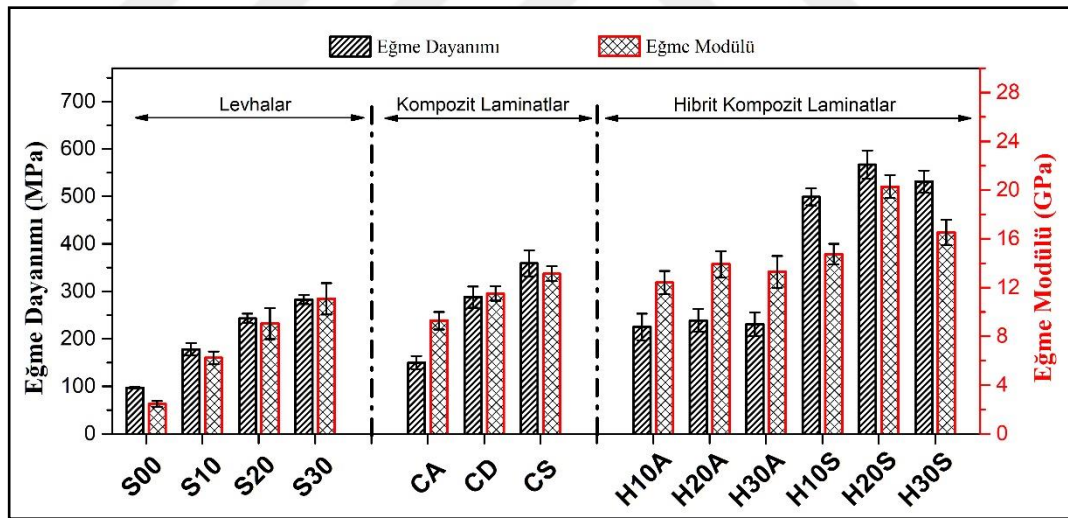


Şekil 5.7: Çekme testi hasar bölgeleri.

Silanlamanın ve atık karbon elyaf miktarının çekme testi sonuçlarına yaptıkları olumlu etkiler net bir şekilde görülürken, tez çalışmasının ana amacı olan atık karbon elyafın sürekli elyaf katkılı yapıda değerlendirilmesinin çekme testi açısından sağlandığı söylenebilmektedir.

5.1.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Üç nokta eğme testleri özellikle tabakalı yapılarda matris ve sürekli elyaf tabakalar arasındaki ara yüzey özelliklerinin daha iyi anlaşılması adına önemlidir. Eğme dayanımı numunenin uzunluğu doğrultusundaki eksenine dik doğrultuda uygulanan kuvvete karşı dayanma yeteneğini temsil etmektedir. Malzeme içeriğine göre eğme dayanımı ve eğme modülü değişimi sonuçları Şekil 5.8’de ve eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri Tablo 5.4’te verilmişken, malzemelere türlerine göre tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi grafikleri Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.8: Levha, kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların eğme dayanımı ve eğme modülü.

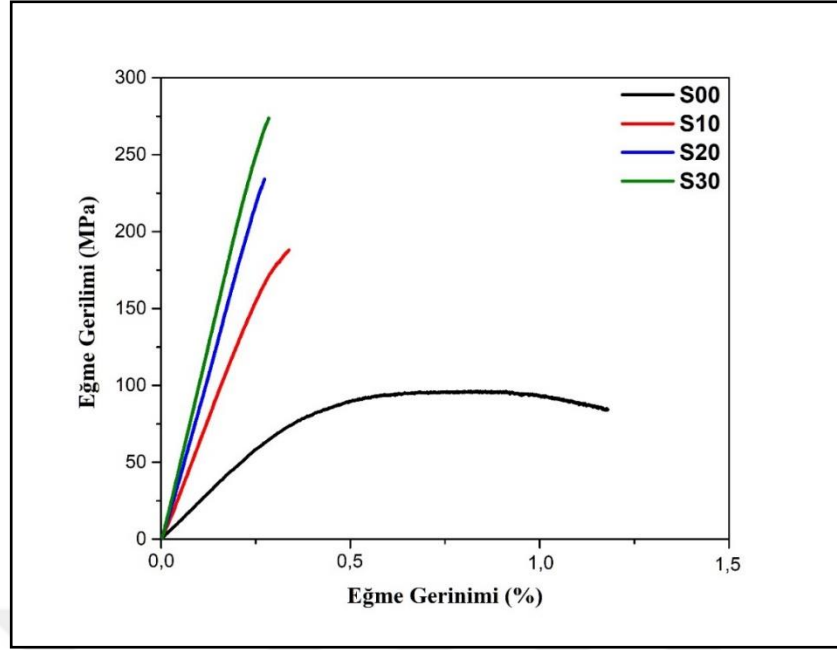
Levhaların üç nokta eğme testi sonuçları incelendiğinde tıpkı çekme testi sonuçlarında olduğu gibi PA6.6 matris içerisine eklenen atık karbon elyaf miktarının artışı ile eğme dayanımı ve eğme modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Levhalar arasında en yüksek eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri sırasıyla 283,4 MPa ve 11,08 GPa şeklinde S30 levhasına aittir. Eğme dayanımı ve modül artışının karbon

elyaf miktarı artışı ile orantılı sonuçlar vermesi beklenen bir sonuçtur. Ancak dokunmamış keçe üretimi esnasında atık karbon elyafın yapıda homojen dağıtılmaması bu orantıyı bozabilecek bir etkidir. Bu nedenle sonuçlardaki tutarlılık dokunmamış keçe üretimi esnasında atık karbon elyafın başarılı bir şekilde yapıda dağıtıldığını göstermektedir. Ayrıca özellikle eğme dayanımı sonuçlarındaki düşük standart sapmalar da bunu desteklemektedir.

Tablo 5.4: Üç nokta eğme testi sonuçları.

	Malzeme Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
Levhalar	S00	97,0 ± 2,0	2,45 ± 0,23
	S10	178,2 ± 13,0	6,23 ± 0,52
	S20	243,2 ± 12,0	9,05 ± 1,28
	S30	283,4 ± 9,4	11,08 ± 1,29
Kompozit Laminatlar	CA	150,3 ± 13,5	9,28 ± 0,73
	CD	288,2 ± 22,4	11,51 ± 0,59
	CS	356,4 ± 27,5	13,14 ± 0,62
Hibrit Kompozit Laminatlar	H10A	225,7 ± 28,2	12,41 ± 0,95
	H20A	239,4 ± 24,0	13,91 ± 1,08
	H30A	231,5 ± 24,7	13,29 ± 1,31
	H10S	499,3 ± 17,9	14,74 ± 0,85
	H20S	567,4 ± 29,9	20,29 ± 0,94
	H30S	531,3 ± 23,2	16,53 ± 1,03
*GF: Cam elyaf kumaş			

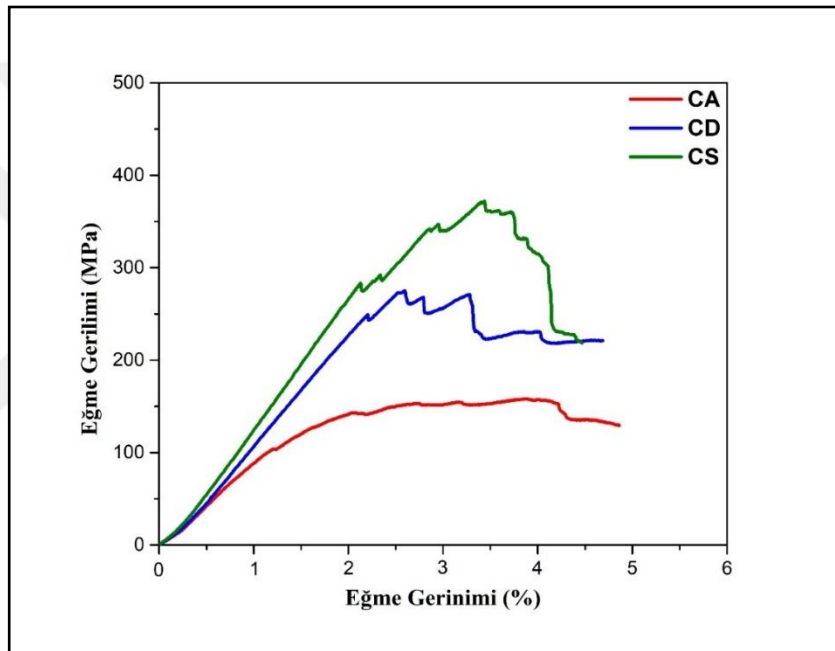
Levhaların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri Şekil 5.9’da verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere atık karbon elyaf katkısı ile malzeme sünek karakterden gevreğe geçiş yapmaktadır. Saf PA6.6 levha (S00) oldukça yüksek plastik deformasyon gösterirken, atık karbon elyaf içeren levhalar maksimum eğme gerilmesi esnasında ani bir şekilde hasara uğramışlardır. Bu sonuç karbon elyafın PA6.6’ya göre oldukça yüksek modül değerine sahip olması ile açıklanabilir.



Şekil 5.9: Levhaların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.

Şekil 5.10'da atık karbon elyaf içermeyen kompozit laminatların tipik eğme gerilmesi – eğme gerinimi eğrileri verilmiştir. Buradan açıkça görüldüğü üzere cam kumaş yüzeyindeki ticari kaplamanın kaldırılması ve silanlama işlemleri kompozit laminatın eğme dayanımını arttırmıştır. Yakılmış kumaş ile üretilmiş CD laminatının eğme dayanımı, işlenmemiş kumaş ile üretilenlere (CA) göre %91,7 oranında artış göstererek 288,4 MPa değerine ulaşırken, silanlanmış kumaş ile üretilen CS ise %137,1 artış ile 356,4 MPa'a yükselmiştir (Tablo 5.4). Ayrıca benzer artışı eğme modülünde de görmem mümkün olmuştur. Silanlamanın eğme dayanımını artırıcı etki ettiği sonucu literatürdeki benzer çalışmalarla da tutarlıdır. Örneğin, Kiss ve arkadaşları farklı yüzey modifikasyonlarına sahip cam kumaşlar ve PA6 filmler kullanarak sıcak preste ürettikleri kompozit laminatların eğme dayanımı sonuçları da benzer değişimler göstermiştir. Çalışmada amino silan ile muamele edilmiş cam kumaş takviyeli laminatların, yüzey modifiyesi bulunmayan cam kumaşlara oranla yaklaşık üç kat daha yüksek eğme dayanımı (519.8 MPa) sergilediği raporlanmıştır [74]. Yakın zamanda gerçekleştirilen bir başka çalışmada dışçilikte kullanılmak üzere üç farklı silan (3-(metakriloksi)propiltrimetoksi silan (3-MPS), 3-(glisidiloksi)propiltrimetoksi silan (3-GPS), ve 8-(metakriloksi)oktiltrimetoksi silan (8-MOTS)) ile modifiye edilmiş cam elyaflar ile üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir [75]. Thadathil Varghese ve arkadaşları, silanlanmamış cam elyaflarla üretilmiş kompozitlerin en düşük eğme dayanımını

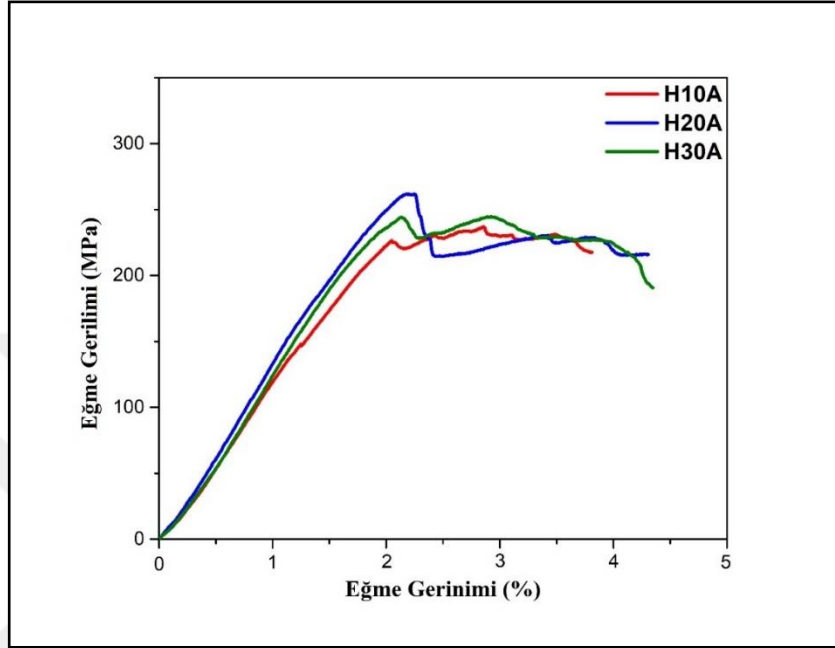
verdiğini, bununla birlikte, cam elyafın silanlanması ile silan türünden bağımsız olarak dental kompozitlerin eğme özelliklerini önemli ölçüde arttığını raporlamışlardır. Yine başka bir çalışmada, Cho ve arkadaşları, üretan dimetakrilat ve trietilen glikol dimetakrilat monomerlerinin bir karışımı olan bir diş reçinesinin ile S-cam elyaflarının yüzey modifikasyonunun mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır [76]. Çalışmada cam elyafların silanlanması ile kompozitlerin eğme dayanımı önemli ölçüde iyileşmiştir. Literatürdeki tüm bu bulgular, silanlanmış cam elyaf içeren polimer kompozitlerin mekanik özelliklerindeki iyileştirdiğini göstermektedir ve tez çalışması sonuçlarıyla tutarlıdır.



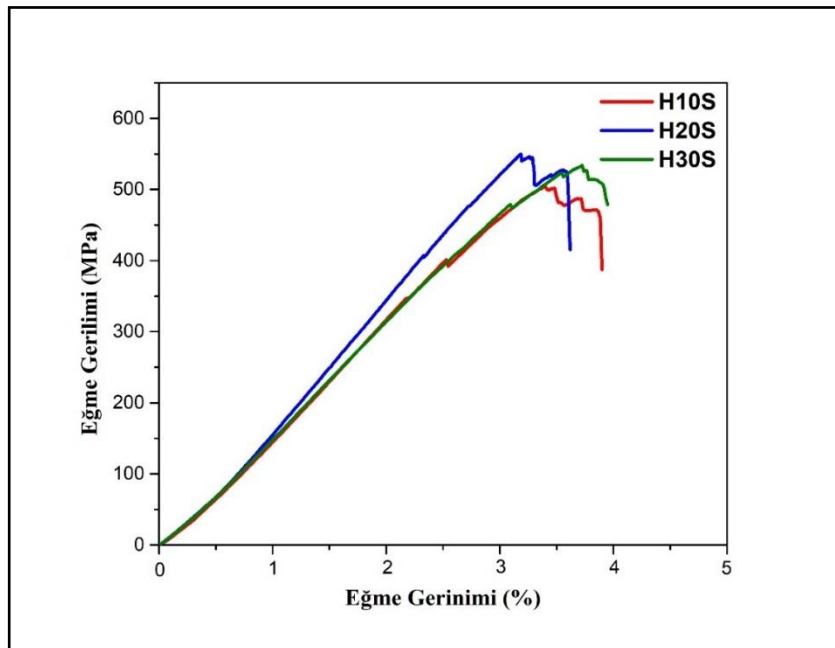
Şekil 5.10: Kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.

Şekil 5.11 (işlenmemiş cam kumaş) ve Şekil 5.12 (silanlanmış cam kumaş) atık karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri verilmiştir. Her iki laminat grubunun da atık karbon elyaf ile takviyenin eğme dayanımını arttırdığı görülmüştür. Bu artış her iki grupta da benzer bir trendde seyretmiş, eğme dayanımı %20 karbon elyaf oranına kadar artarken bu orandan sonra artış durmuştur. %30 karbon elyaf oranında gözlemlenen bu durumun sebebi dokunmamış keçe içerisindeki matris (PA6.6 elyaf) miktarının yapıyı bir arada tutmak için yeterli olmaması olarak düşünülmektedir. İşlenmemiş cam kumaşlarla üretilen kompozitler karşılaştırıldığında, atık karbon elyaf içeren H20A laminatı içermeyen CA'ya göre %60 eğme dayanımı ve %50 eğme modülü artışı

göstermiştir. Silanlanmış kumaşla üretilen muadillerinde ise H20S laminatı CS'ye göre %60 ve %55 eğme dayanımı ve eğme modülü artışı sağlamıştır. Çekme testi sonuçları ile beraber bu sonuçlar, atık karbon elyafların sürekli elyaf takviyeli kompozit yapılarda başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

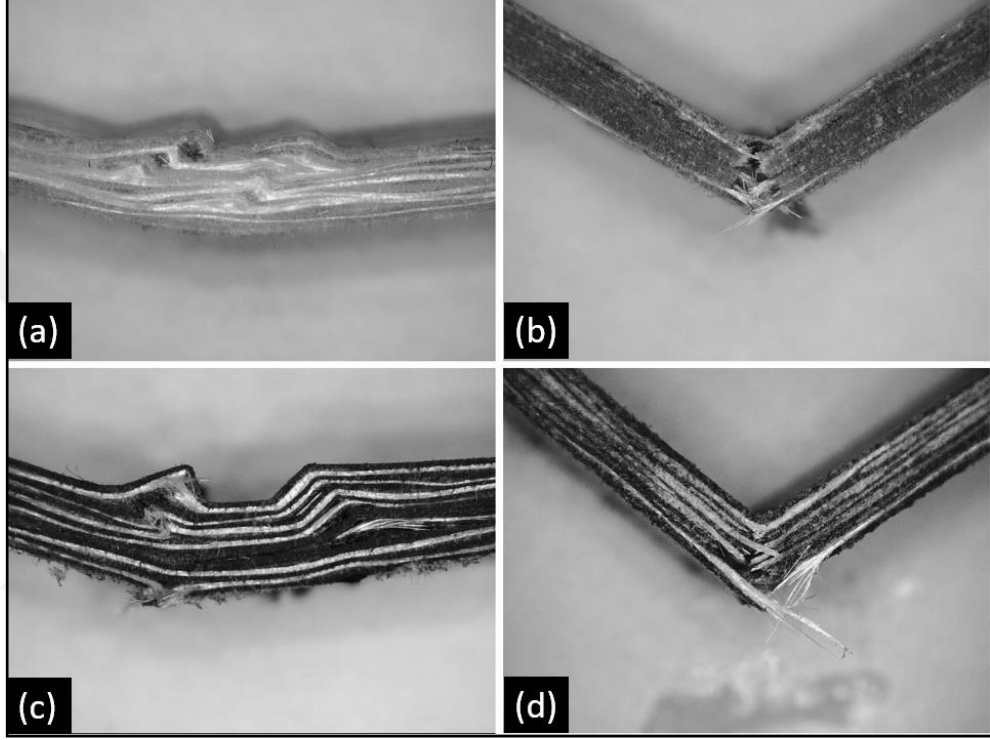


Şekil 5.11: İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.



Şekil 5.12: Silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların tipik eğme gerilimi – eğme gerinimi eğrileri.

Üç nokta eğme testi malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili direkt sonuçlar verebilirken, elyaf takviyeli (özellikle tabakalı) yapılarda elyaf – matris arayüzeyi ile ilgili direkt sonuçlar verememektir. Ancak hasar bölgelerinin incelenmesi ile bir arada kullanılarak dolaylı çıkarımlar yapmak mümkündür. Bu nedenle üç nokta eğme testi sırasında oluşan deformasyonların incelenmesi elde edilen görüntüler için Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13: Üç nokta eğme hasar bölgeleri (a) CA, (b) CS, (c) H20A, (d) H20S.

Şekil 5.13a ve Şekil 5.13c'de görüldüğü gibi hasarlı bölgede tabakalar arası delaminasyon ve numunelerin basma gerilmesinin olduğu tarafta mikro burkulmaların hasarlarının olduğu görülmektedir. Oluşan mikro burkulmalar matris ile elyafların arayüzey dayanımının yetersiz olmasından ve kuvvet aktarımı sırasında zayıf arayüzeyde erken ayrılmaların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Elyaf – matris arasındaki yapışma yeterli düzeyde sağlandığında mikro burkulmaya karşı direnç artar ve arayüzeyde erken deformasyonun önüne geçilebilir. Öte yandan Şekil 5.13b ve 5.13de de verilen görüntülerde silanlanmış kumaşlarla üretilen CS ve H20S laminatlarının üç nokta eğme testi sırasında arayüzey kusuru içermediği açıkça görülmektedir. Bu görüntülerden görüldüğü üzere test sırasında hem çekme hem de basma bölgelerinde elyaf ve matris malzemeleri beraber şekilde hasara uğrayarak

kırılmışlardır. Bu bulgular sayesinde silanlamanın kompozit malzeme içerisindeki cam kumaş – matris arayüzeyini önemli ölçüde iyileştirdiği çıkarımı yapmak mümkündür. Eğme dayanımı ve eğme modülü sonuçları ile de beraber düşünüldüğünde, bu çıkarım daha güçlü hale gelmektedir.

Üç nokta eğme testi sonuçlarında şaşırtıcı bir şekilde, işlenmemiş cam kumaş ile üretilmiş hibrit kompozit laminatların (H10A, H20A ve H30A), S20 ve S30 levhalarından daha düşük eğme dayanımı ve modülüne sahip olduğu görülmüştür. Çekme testi sonuçlarıyla tutarsız olan bu durumun sebebi çekme yüklemesine göre eğme yüklemesi daha çok elyaf – matris arayüzeyine bağımlı sonuçlar vermesinden kaynaklanmaktadır. Üç nokta eğme testi sırasında sürekli elyaf yapı çekme testinde olduğu gibi çeneler arasına sabitlenmediği için kuvvet aktarımı mecburen malzemenin sürekliliğine bağlı olmaktadır. Elyaf – matris arayüzeyinde bulunan bir kusur (hava boşluğu, aglomere olup ıslanmamış bir yapı, safsızlıklar vb.) ya da düşük dayanım kaynaklı erken bir hasar bu aktarımı ciddi seviyede sekteye uğratacağından eğme testi sonuçları arayüzey özelliklerine daha bağlı sonuçlar vermektedir. Eğme testi sonuçlarındaki bu handikap, geliştirilen yeni üretim yönteminin uyumsuz matris – elyaf seçimi ile özellikle eğme dayanımı açısından kullanışsız olabileceğini göstermiştir. Bu üretim yönteminde kullanılacak olan sürekli elyaf seçilirken matris ile kimyasal uyumun sağlanması önem arz etmektedir.

5.1.5. DMA Testi Sonuçları

DMA genellikle fiber takviyeli polimer malzemede elyaf – matris arayüzünün özelliklerini incelemek için kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. Belirlenen yükleme ve yataklama modunda (çekme, eğme, basma vb.) malzeme üzerine belirlenen frekans ve büyüklükte yük ya da deplasman uygulanan bu yöntemde ortam sıcaklığı belirlenen ısıtma hızı ile ısıtılmaktadır. Başlangıç sıcaklığından hedef sıcaklığa kadar tekrarlı olarak devam eden yükleme ile malzemenin viskoelastik özellikleri hakkında bilgiler edinilebilir. Çalışma kapsamında üretilen tüm malzemelere DMA testleri uygulanmış ve sonuçları bu bölüm altında sunulmuştur.

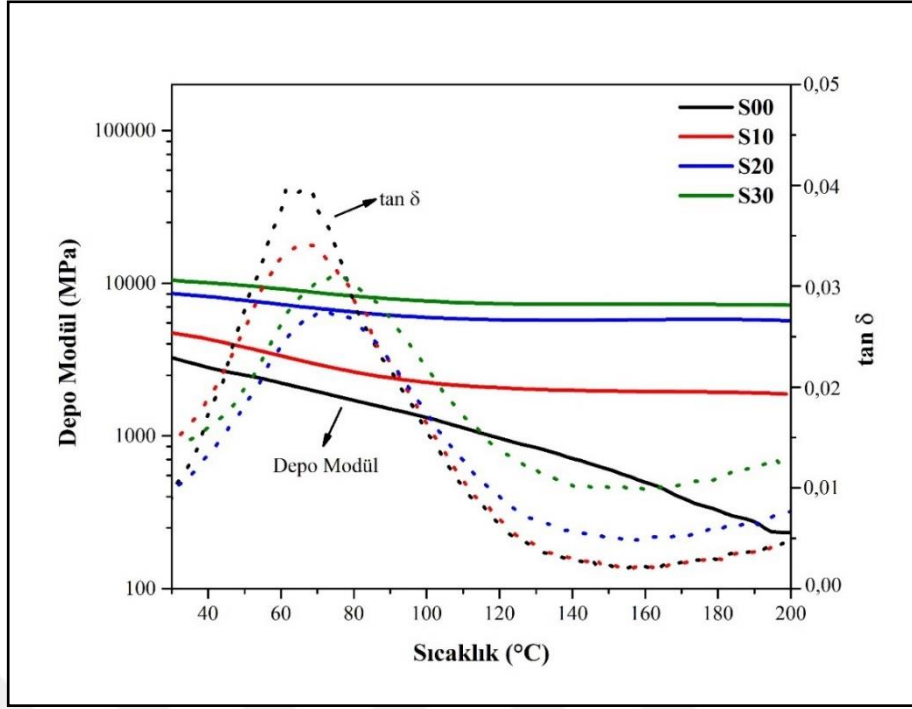
Plastik deformasyona mahal vermeyecek şekilde tekrarlı olarak gerçekleştirilen yüklemeler elastik malzemelerde eş zamanlı olarak karşılık verirken polimerik malzemeler gibi viskoelastik yapıya sahip malzemelerde gecikmeli bir cevap

oluşmaktadır. Bu gecikme malzeme içerisindeki hareket esnasında oluşan kayıplardan kaynaklanmaktadır. DMA analizleri ile malzemenin elastik ve viskoelastik olarak verdiği tepkiler ölçülerek malzeme iç yapısı ile çıkarımlar yapılabilmektedir [77], [78].

Depo modülü (E') malzemenin elastik davranışını temsil eden bir büyüklüktür. Ayrıca E' malzemelerin yük taşıma kapasitesinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Aynı üretim şartları altında üretilmiş elyaf takviyeli yapılarda depo modülün doğrudan arayüzey dayanımı ile orantılı olması beklenmektedir. Elyaf – matris arası arayüzey yapışmasının iyileşmesi kuvvetin matristen elyaflara aktarımını daha iyi hale getirecektir. Bu da depo modülün artışını beraberinde getirecektir [79], [80].

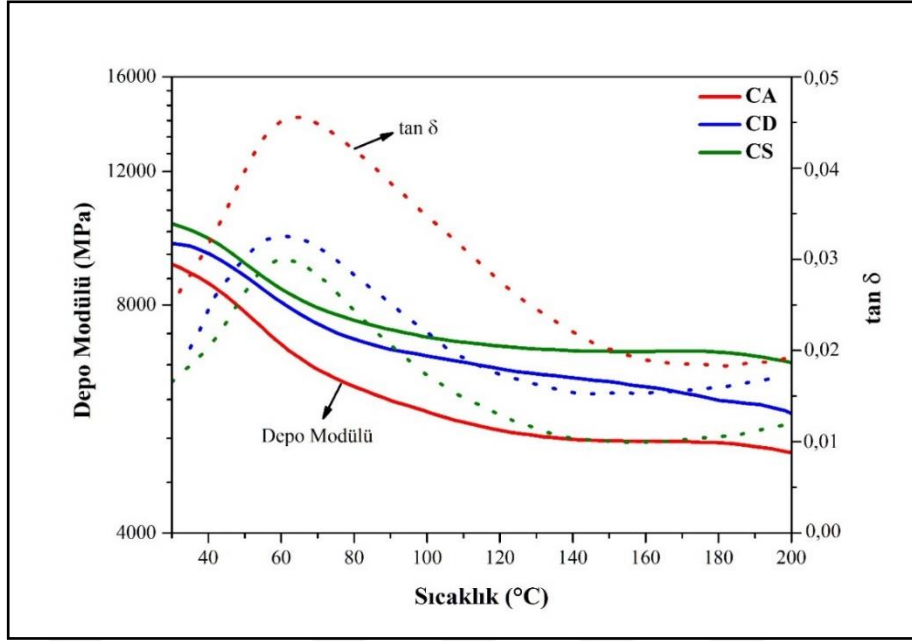
Malzemenin viskoelastik özelliklerini temsil eden kayıp modül (E'') ise uygulanan yükleme sırasında malzeme içerisinde oluşan kayıpları temsil etmektedir. Ayrıca sönüm faktörü olarak da adlandırılan kayıp ve depolama modülü oranı olan $\tan\delta$ malzemelerin yükleme anında malzeme içerisinde sönümlenen enerjinin iletilen enerjiye oranı olarak kabul edilebilir: Sönüm faktörü ($\tan\delta$) ile elyaf – matris arayüz dayanımı hakkında çıkarımlarda bulunmak mümkündür. Ayrıca $\tan\delta$ moleküler hareketlerden etkilenen hassas bir göstergedir [81]. $\tan\delta$ 'nin büyüklüğü, arayüzey yapışma dayanımı ile ters orantılıdır. Elyaf – matris arasındaki zayıf yapışma, arayüzde oluşan sürtünmelerden dolayı daha fazla mekanik enerji kaybına neden olabilir, bu da $\tan\delta$ değerinin artması demektir [79]-[82]. Ayrıca, $\tan\delta$ eğrisinin tepe noktasının olduğu sıcaklık değeri, malzemenin camsı yapıdan viskoz yapıya geçtiği camsı geçiş sıcaklığını (T_g) vermektedir.

Şekil 5.14'te levhaların DMA analizi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre saf PA6.6'ya atık karbon elyaf eklenmesiyle depo modül değeri arttırmış ve $\tan\delta$ 'nin genliği azaltmıştır. Yani yükleme esnasında oluşan mekanik enerji kaybı azalmış viskoelastik yapıdan daha elastik bir yapıya geçiş olmuştur. DMA sonuçları, karbon elyafın varlığının, takviye etkisi sağlayarak malzemelerin rijitliğini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, yapıdaki karbon elyaf miktarının artışı ile $\tan\delta$ eğrilerinin maksimum noktasının olduğu sıcaklık daha yüksek seviyelere kaymıştır. Karbon elyafların polimer zincir hareketliliği üzerindeki kısıtlayıcı etkiden dolayı, artan karbon elyaf içeriği ile levhaların T_g değerlerinin arttığı söylenebilir.



Şekil 5.14: Levhaların DMA analizi sonuçları.

Şekil 5.15'ten atık karbon elyaf içermeyen kompozit laminatların DMA analizi sonuçları verilmiştir. Cam kumaşların yakılması ya da silanlanması ile üretilen kompozit laminatlar (CD, CS), işlenmemiş cam kumaşla üretilen kompozit laminatlara (CA) kıyasla E' değerlerini artırdığı ve $\tan\delta$ genliğinin düştüğü sonucuna varılmıştır. İncelenen sıcaklık aralığında, silanlanmış cam kumaş ile üretilmiş kompozit laminatlar (CS), diğer kompozit laminatlara kıyasla en yüksek depolama modülünü göstermiştir. CS laminatların üstün özellikleri, matristen elyaflara daha yüksek oranda kuvvet aktarımının sağlandığı daha güçlü elyaf – matris arayüzey etkileşimine atfedilebilir [79]. Bu bulgular, daha önce anlatılan mekanik test sonuçlarını ve hasar bölgelerinde gözlemlenen hasar mekanizmalarını doğrular niteliktedir.

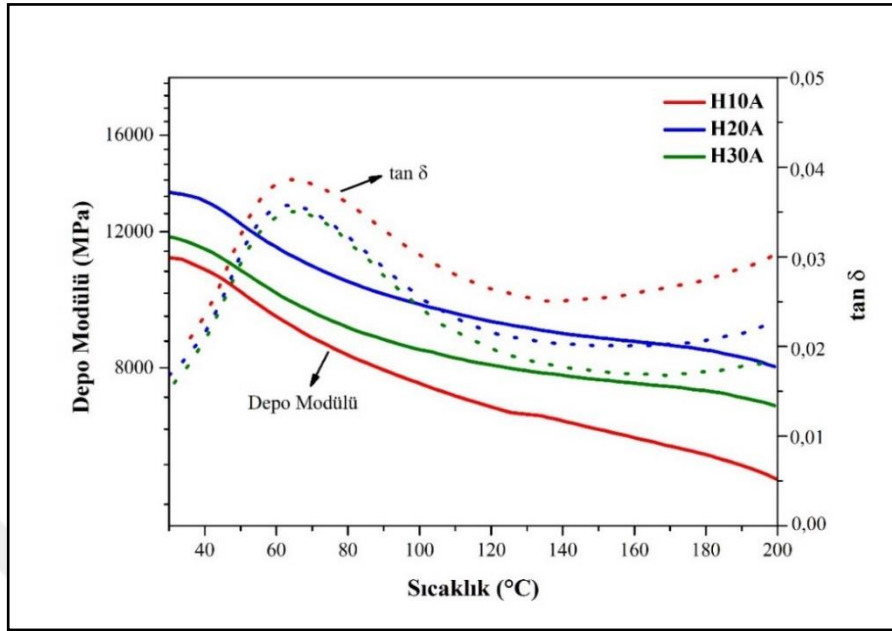


Şekil 5.15: Kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.

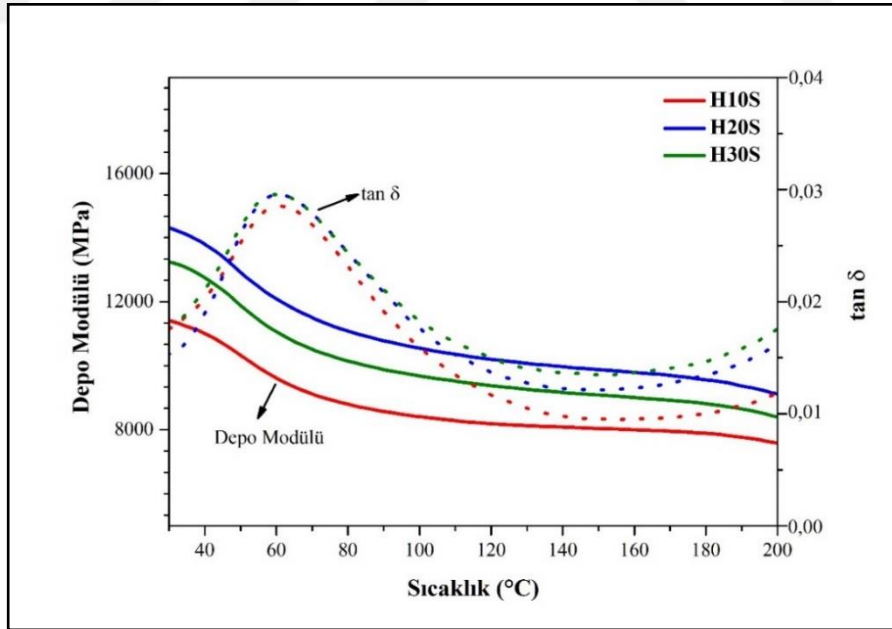
İşlenmemiş cam kumaş ve silanlanmış cam kumaşlarla üretilen hibrit kompozit laminatların DMA analizi sonuçları Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de verilmiştir. Her iki hibrit kompozit laminat grubunda da atık karbon elyaf miktarının depolama modülü ve $\tan \delta$ değişimine benzer etkiler gösterdiği görülmüştür. En yüksek depolama modülü hem işlenmemiş gibi hem de silanlanmış cam kumaş içeren hibrit kompozit laminatlarda matrisinde ağırlıkça %20 karbon elyaf içeren laminatlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte, karbon elyaf içeriği arttıkça malzemelerin $\tan \delta$ genliklerinin belirgin bir değişime uğramadığı görülmüştür. Ayrıca hibrit kompozit laminatların depolama modülü artışı ile ilgili eğme ve çekme dayanımlarında olduğu gibi bir eşik bölgesi gözlemlenmiştir. Hibrit kompozit laminatların depolama modülü, matris % karbon elyaf miktarı %20’ye ulaşana kadar yükselirken oran %30’a çıktığında azalma görülmüştür.

Atık karbon elyaf ile hibritleştirme işleminin laminat dinamik mekanik özelliklerini etkileyici biçimde arttırdığı sonucu elde edilmiştir. Örneğin, atık karbon elyaf ile hibritleştirme, karbon elyaf içermeyen kompozit laminat numunelere kıyasla depolama modülünü yaklaşık %50 oranında arttırmıştır. Hibrit kompozit laminatların depolama modülü, yüzey modifikasyonu açısından karşılaştırıldığında, silanlanmış cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatlar, işlenmemiş cam kumaşla üretilen muadillerinden daha yüksek depo modülün gösterirken $\tan \delta$ genliklerinde 0,04’ten 0,03 seviyelerine önemli bir düşüş olduğu da görülmüştür. $\tan \delta$ genliğindeli bu

azalma, cam kumaşların silanlanmasıyla hibrit kompozit laminatların arayüz kalitesini önemli ölçüde artırdığını sonucunu göstermektedir.



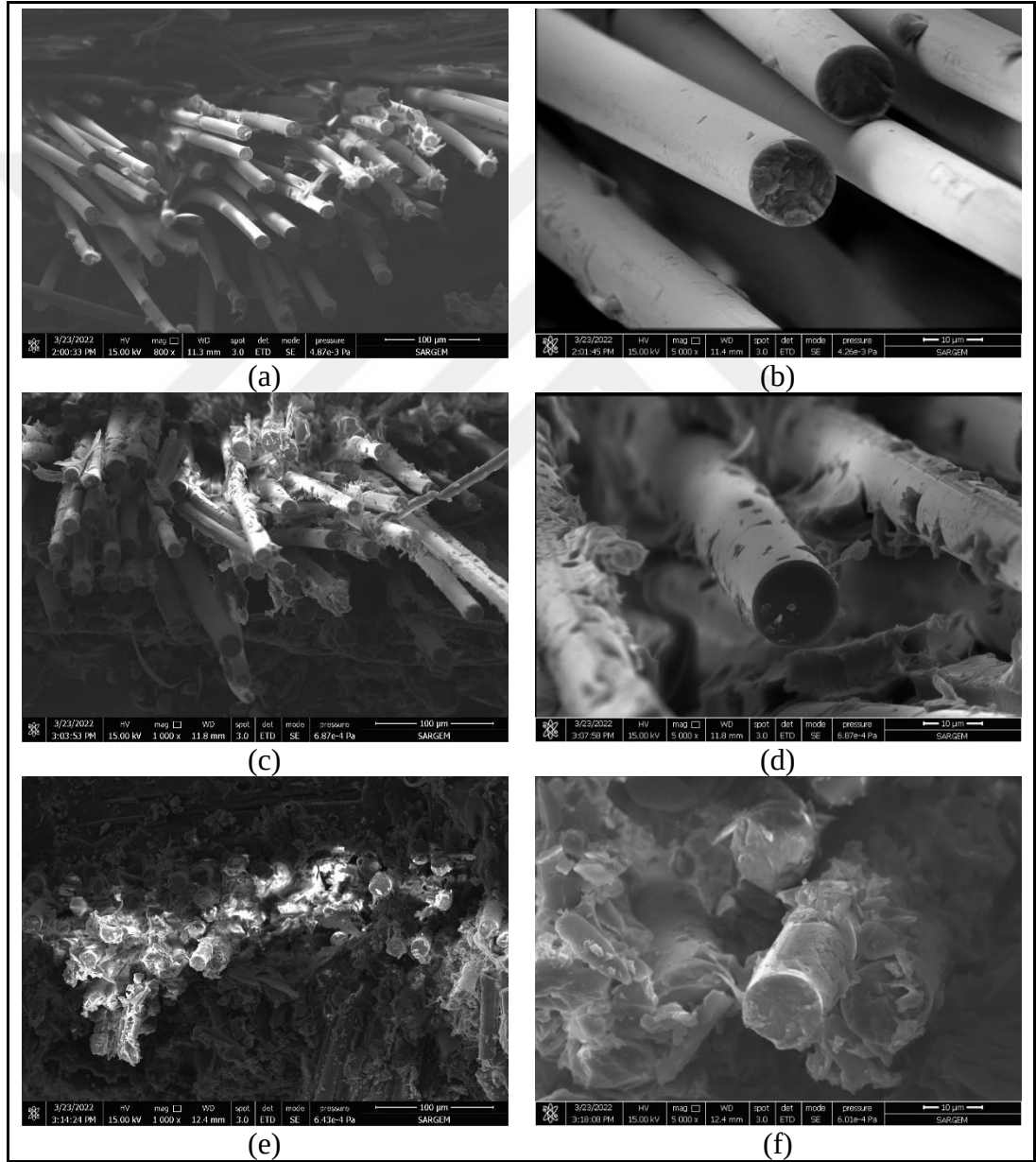
Şekil 5.16: İşlenmemiş cam kumaş ile üretilen hibrit kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.



Şekil 5.17: Silanlanmış cam kumaş ile üretilmiş hibrit kompozit laminatların DMA analizi sonuçları.

5.1.6. SEM Analizi Sonuçları

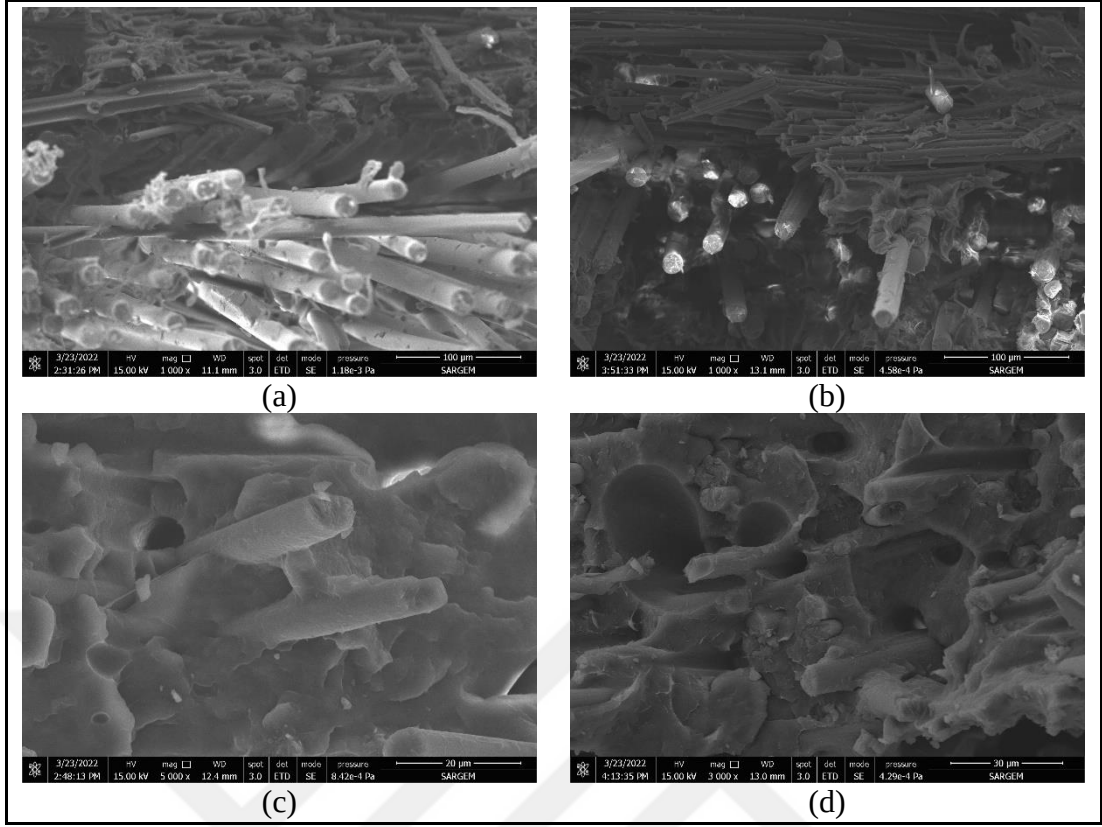
Kompozit laminatların kırılma yüzeyi morfolojisini ve arayüzey davranışını incelemek ve mekanik ve dinamik mekanik testlerle elde edilen sonuçların sebeplerinin irdelenmesi için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.18'de cam kumaş yüzey modifikasyonunun kırılma yüzeylerine etkisini incelemek için kompozit laminatlar üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri verilmiştir.



Şekil 5.18: Kompozit laminatların SEM görüntüleri a), b) CA, c), d) CD, e), f) CS.

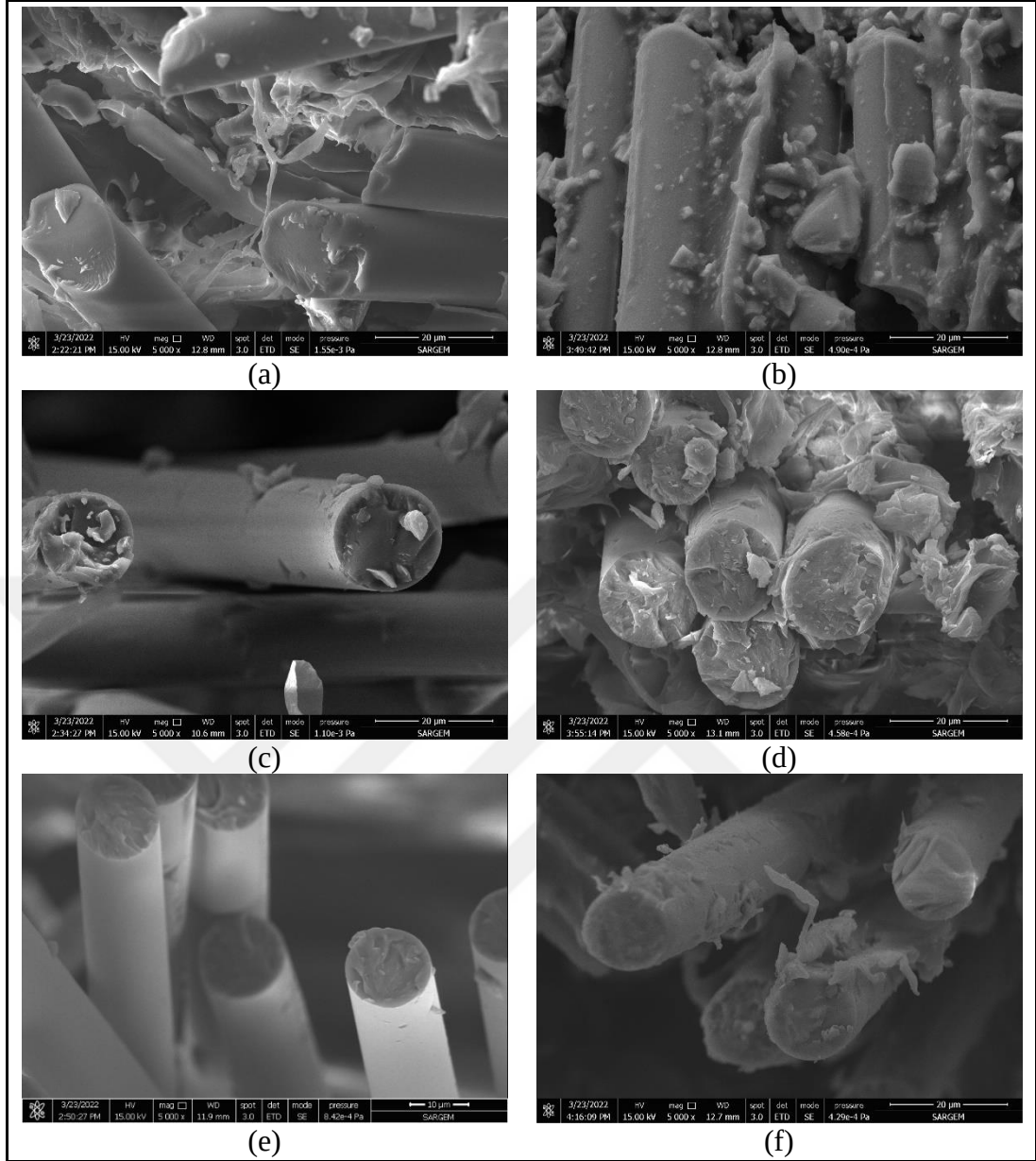
Şekil 5.18.a ve Şekil 5.18.b'deki SEM görüntülerinden açıkça görüldüğü gibi, CA laminatının polimerik tabakası ile cam kumaş tabakaları arasında çok düşük arayüzey etkileşimi mevcuttur. Bu zayıf arayüzey sebebiyle matris malzemesi cam kumaş yüzeyinden ayrılarak elyaf soyulmalarına (peel-off) neden olmuştur. Ayrıca, CA laminatında cam elyaf yüzeylerinde birçok bölgede neredeyse hiç matris kalıntısı gözlemlenmemiştir (Şekil 5.18.b). Bu da mekanik yüklemeler esnasında kuvvet aktarımının yapıda homojen sağlanamadığının bir başka kanıtıdır. Öte yandan yakılmış cam kumaş ile üretilen CD laminatlarının hasar bölgelerinde CA'ya nazaran daha iyi bir arayüzey etkileşimi ve beraberinde daha yüksek miktarda matris kalıntısı görülmektedir (Şekil 5.18.d). Silanlanmış cam kumaş ile üretilen CS laminatın elyaf yüzeylerinde ise diğerlerinin aksine, yüksek arayüzey etkileşimini ve yapışmasını işaret eden yüksek miktarda matris kalıntısı görülmektedir (Şekil 5.18.f).

SEM incelemeleri ile cam kumaş – matris arasındaki etkileşimi gözlemlemek kadar herhangi bir yüzey modifikasyonuna sahip olmayan atık karbon elyafın matris ile etkileşimini incelemek de önem arz etmektedir. Çalışması kapsamında atık karbon elyafların bir yüzey modifikasyonu olmaksızın kullanılabilirliğini sağlamak olası nihai ürünlerin maliyetini düşüren önemli bir sonuçtur. Buradan hareketle iki farklı cam kumaş ile üretilmiş H20A ve H20S laminatlarının hasar bölgelerinin düşük büyütme değerindeki SEM görüntüleri Şekil 5.19.a ve Şekil 5.19.b'de ve karbon elyaf içeren bölgelerin yüksek büyütme oranındaki SEM görüntüleri Şekil 5.19.c ve Şekil 5.19.d'de verilmiştir. Şekil 5.19.a ve Şekil 5.19.b'den cam kumaş tabakaları ve atık karbon elyaf içeren bölgeler açık şekilde görülmektedir. Bu görüntülerden ayrıca sıcak presleme sırasında PA6.6 elyafların eriyerek başarılı şekilde tüm cam kumaş atkı ve çözgülerinin arasına nüfuz ettiği elyafları iyi bir şekilde ıslattığı ve yapının bir arada kalmasını sağladığı söylenebilir. Şekil 5.19.c ve Şekil 5.19.d'de ise karbon elyafların yapıda genellikle rastgele dağılım sergilediği ve matris içerisine gömüldüğü görülmektedir. Ayrıca hasar bölgesindeki atık karbon elyafların yüzeylerinin matris tarafından halen kaplı olması ve fiber soyulmalarının gözlemlenmemesi atık karbon elyaf ve PA6.6 matrisin uyumlu olduğuna işarettir.



Şekil 5.19: Hibrit kompozit laminatların SEM görüntüleri a), c) H20A, b), d) H20S

Tüm hibrit kompozit laminatların cam kumaş bölgelerinin SEM görüntüleri Şekil 5.20'de verilmiştir. Şekil 5.20.a, Şekil 5.20.c ve Şekil 5.20.e'de gösterildiği gibi, hasar bölgesindeki cam elyaflar yüzleri tıpkı CA laminatındaki gibi pürüzsüzdür. Bunun sebebi elyaf ile matrisin düşük etkileşiminden kaynaklı zayıf arayüzey dayanımıdır. Böylelikle yükleme anında arayüzey kolayca hasara uğramış ve elyaflar matristen sıyrılmıştır. Bu sonuçlar, özellikle üç nokta eğme testinde basma gerilmesi bölgesinde net bir şekilde gözlemlenen mikro burkulmaların nedenini ortaya koymaktadır. Düşük arayüzey yapışması nedeniyle eğme yüklemesi esnasında elyaf matris arayüzeyinde hasar oluşmuş ve özellikle basma gerilmesinin olduğu bölgede güç aktarımı süreksizlik nedeniyle sağlanamadığından cam kumaş tabakaları katlanmaya başlamıştır. Bu da mikro burkulma hasar mekanizmasının gözlemlenmesine neden olmuştur. Aksine, H10S, H20S ve H30S laminatlarının cam elyaf bölgelerinin SEM görüntülerinde (Şekil 5.20.b, Şekil 5.20.d, ve Şekil 5.2.f) elyaf yüzeylerinde önemli miktarda matris kalıntısı tespit edilmiş ve bu silanlamanın arayüzey etkileşimini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.20: Hibrit kompozit laminatların cam kumaş bölgesinin SEM görüntüleri a) H10A, b) H10S, c) H20A, d) H20S, e) H30A, f) H30S.

SEM görüntülerinde gözlenen silanlanmış cam elyaf – matris arasındaki mükemmel yapışma, üç nokta eğme testi numunelerin hasar bölgeleri görüntülerindeki bileşenlerin beraber hasara uğramasının nedenini açıklamaktadır.

5.2. Hibrit Kompozit Laminatların Tribolojik Karakterizasyonu

Kompozit malzemeler geniş kullanım alanlarından dolayı farklı zorlayıcı etkenler altında çalışmak durumunda kalabilirler. Bu zorlayıcı etkenler bazen yüksek

hızla çarpan bir katı partikül bazen de malzeme üzerine temasta bulunan sivri ve sert bir cisim olabilmektedir. Özellikle hava araçları ve otomobillerin dış aksamalarında kullanılan kompozit bileşenler yüksek hızlı hava ve bu hava içerisindeki küçük aşındırıcı partiküller ile temas halindedirler. Bu tür şartlar altında malzemeler yüksek enerjiye sahip partiküllerin çarpması nedeniyle erozif aşınmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca otomotiv iç aksamalarında kullanılan kompozit bileşenler yolcu ile etkileşim halindedirler. Bu da anahtar, kalem gibi sivri uçlu ve sert materyaller ile teması ve malzemelerin çizilmesini beraberinde getirebilmektedir. Bu tür etkileşimlerden kaynaklanan hasarlar komponentlerin hem mekanik hem de görsel açıdan kullanım ömrüne olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen özgün hibrit kompozit malzemelerin olası kullanım alanlarında otomotiv ve havacılık endüstrilerinin yer aldığı düşünüldüğünde malzemelerin erozif aşınma ve çizilme açısından tribolojik özelliklerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu bölümde geliştirilen hibrit kompozitlerin katı partikül erozyonu ve çizilme davranışları incelenmiştir. Tribolojik incelemelere mekanik özelliklerinde olumsuz sonuçlar gösteren H30A ve H30S laminatları dahil edilmemiştir.

Tribolojik karakterizasyonlar sayesinde atık karbon elyaf katkısının ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun erozif aşınma ve çizilme davranışına etkisinin incelendiği çalışmada H10A, H20A, H10S ve H20S hibrit kompozit laminatlarına ek olarak atık karbon elyaf katkısız CA ve CS kompozit laminatları ve saf PA6.6 (S00) levhalar kullanılmıştır.

5.2.1. Erozif Aşınma Genel Bilgileri ve Literatür Araştırması

Tipik bir aşınma modu olan katı partikül erozyonu, bir akış içerisinde bulunan aşındırıcı parçacıkların hedef malzemeye çarparak yüzeyden kademeli olarak malzeme uzaklaştırdığı bir süreçtir. Malzemenin yapısal bütünlüğünü bozduğu ve malzeme özelliklerini olumsuz etkilediği için havacılıktan enerji sektörüne kadar çeşitli mühendislik uygulamalarında önemli bir problem olarak görülmektedir. Malzemelerin katı partikül erozyonunu davranışı hedef malzeme özelliklerine, aşındırıcı partikül özelliklerine, test parametrelerine ve çevresel koşullarına bağlıdır [83], [84].

Genellikle sünek malzemeler aşındırıcı partiküllerin yüzeye düşük açı (15 – 30°) ile çarptığı durumlarda daha fazla erozif aşınmaya gösterirken, tam gevrek malzemeler daha yüksek açılarda (90°) yüksek aşınma göstermektedir. Polimerik malzemelerde ve polimer matrisli kompozitlerde erozif aşınma karakteristiğini belirleyen en önemli etken matris malzemesidir [85]. Suresh ve arkadaşlarının yedi farklı polimerik malzeme ile gerçekleştirdikleri çalışmada, tüm malzemeler için en yüksek erozif aşınmanın 30° çarpma açısında görüldüğü raporlanmıştır [85]. Rajesh ve arkadaşlarının bir dizi poliamit (PA6, PA6.6, PA66/PA6.10, PA11, PA12 ve aromatik PA) ile gerçekleştirdiği çalışmada da benzer şekilde en yüksek aşınma 30° çarpma açısında elde edilmiştir [86].

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler ile yapılan erozif aşınma çalışmalarında ise elyaf takviyesinin mekanik özellikleri artırıcı etki göstermesine karşın erozif aşınma direncini düşürdüğü ve erozif aşınmayı artırıcı etki yaptığı raporlanmıştır [87]-[91]. Ayrıca elyaf takviyesi türünün, miktarının ve oryantasyonun erozif aşınma özelliklerini etkilediği de yapılan çalışmalarla raporlanmıştır.

Miyazaki ve Hamao kısa cam ve karbon elyaf takviyeli PEI ve PEEK kompozitlere erozif aşınma uygulamış ve elyaf türünden bağımsız olarak elyaf miktarının aşınmayı arttırdığını gözlemlemiştir [90]. Arjula ve arkadaşları kısa cam elyaf takviyeli PEEK ve PPS kompozitlerde benzer sonuçları raporlamış ve saf polimerin aşınmasının kompozite göre çok daha düşük olduğunu belirtmiştir [88], [89].

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde erozif aşınma elyaf yönüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Literatürde sürekli elyaf takviyeli kompozitlerle gerçekleştirilen çalışmalarda erozyon oranın elyaf doğrultusuna paralel doğrultuda ve düşük çarpma açılarında oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir [87], [92], [93]. Harsha ve Jha tek yönlü karbon ve cam elyaf kumaş ve çift yönlü cam elyaf kumaş içeren kompozitlerle gerçekleştirdiği çalışmada tüm elyaf takviyelerinin erozyon oranını arttırdığını ve kompozitler arasında en düşük aşınmayı çift yönlü kumaş içeren kompozitlerin gösterdiğini raporlamıştır [94].

Literatürdeki çalışmalar elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin matris malzemelerinin sünek davranışı aksine yarı sünek erozif aşınma davranışı gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Arjula ve arkadaşları PEEK ve PEKK malzemelere uyguladığı erozif aşınma ile en yüksek aşınmanın 30° çarpma açısında olduğunu ancak tek

yönlü cam kumaş ile kompozitlerinin en yüksek aşınmayı 60°'de verdiğini raporlamıştır [87]. Sarı ve arkadaşları ise kısa karbon ve cam elyaf takviyeli PEEK kompozitler ile gerçekleştirdikleri çalışmada en yüksek aşınmanın 45°'de elde edildiği sonucuna varmıştır [95].

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dayanımını önemli oranda arttıran elyaf matris arayüzey iyileştirmesinin erozif aşınmaya etkisi ile ilgili literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda elyaf yüzey modifikasyonun erozyon direncini arttırabildiği görülmüştür [91], [96]. Miyazaki ve arkadaşları silanlanmış ve işlem görmemiş kısa cam elyaf ve PA6 matris kullanarak ürettikleri kompozitlerde erozif aşınma çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarda silanlamanın mekanik değerleri arttırdığı gibi erozyon direncini de arttırdığı sonucuna varılmıştır [91]. Termoset matris ile gerçekleştirilen benzer çalışmalarda da silanlamanın olumlu etkisi raporlanmıştır [97]-[99].

Geri dönüştürülmüş ya da atık elyaflar ile üretilmiş kompozitlerin aşınma davranışı ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar farklı aşınma modlarını içerirken erozif aşınma modunu içermemektedir [100]-[102].

Literatürdeki çalışmalar düşünüldüğünde bu çalışmada geliştirilen özgün hibrit kompozitlerin olası erozif aşınma davranışı hakkında net bilgiler edinmek mümkün olmamıştır. Bu nedenle özgün bir malzeme içeriğine sahip olan bu kompozitleri ticari ürüne dönüşebilmesi için erozif aşınma karakterizasyonun yapılması önem arz etmektedir. Ayrıca bu çalışma silanlama işleminin hibrit yapılı kompozitlerin erozif aşınma davranışına etkisi hakkında literatürde öncü bir çalışma olacaktır.

5.2.2. Erozi Aşınma Testi Sonuçları

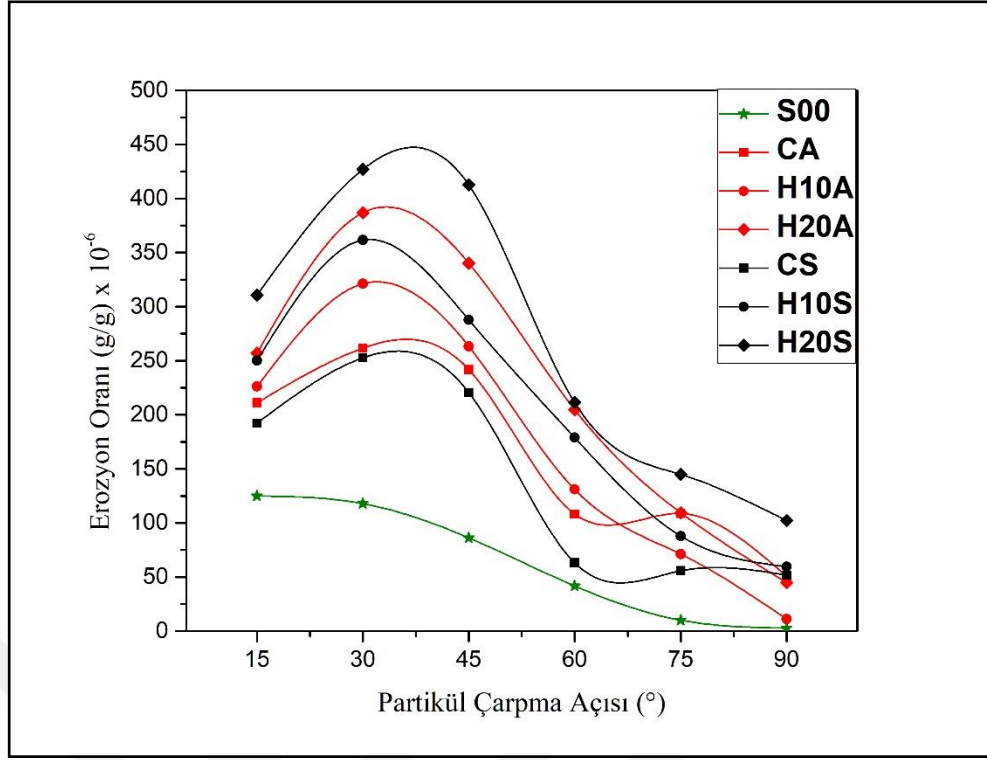
Malzemelerin katı partikül erozyonu davranışı sünek veya gevrek olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Maksimum erozyon miktarı, sünek erozyon davranışı gösteren malzemeler için 15-30° çarpma açısında, gevrek erozyon davranışı gösteren malzemeler için ise 90° çarpma açısında meydana gelmektedir [84]. Polimerlerin sünek erozyon davranışı gösterdiği, yani maksimum erozyon oranlarının 30° çarpma açısında gözlendiği literatürden bilinmektedir [85]. Şekil 5.21'de çarpma açısının bir fonksiyonu olarak katkısız PA6.6 levhanın (S00), iki farklı cam elyaf kumaş ile takviye edilmiş kompozit laminatların (işlenmemiş kumaş CA, silanlanmış kumaş

CS) ve 2 farklı oranda atık karbon elyaf ile hibritleştirilmiş hibrit kompozit laminatların (işlenmemiş cam kumaş ile H10A ve H20A, silanlanmış cam kumaş ile H10S, H20S) erozyon oranları sunulmuştur. Eroziyon aşınma testi sırasında aşındırıcı partiküller yüzeye saplanıp numunenin kütleinde artışa sebep olabilmektedir. Bu duruma inkübasyon evresi adı verilmektedir. İnkübasyon genellikle kısa süreli partikül püskürmesinin bir sonucudur. Bu nedenle çalışmada inkübasyon evresinin olmayacağı bir partikül püskürtme süresi belirlenmiştir.

Şekil 5.21’de S00’nın maksimum erozyonunun 15°-30° meydana geldiği ve sünek erozyon davranışı gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç literatürde poliamit malzeme ile gerçekleştirilen eroziyon aşınma çalışmalarının sonuçları ile tutarlıdır [86], [103], [104]. Ayrıca kompozit malzemelerin (CA, CS, H10A, H20A, H10S, H20S) saf PA6.6’dan farklı olarak yarı sünek erozyon davranışı gösterdiği ve maksimum erozyon oranlara 30°-45° aralığındaki partikül çarpma açısında ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Kompozit laminatların (CA ve CS) erozyon oranları incelendiğinde ise cam kumaş katkısının her iki kumaş türü için de S00’a göre erozyon oranını arttırdığı görülmektedir (Şekil 5.21). Bu noktada cam elyafların kırılkan yapısından dolayı eroziyon aşınmanın arttığı düşünülmektedir. Bu sonuçla paralel olarak literatürde Tilly ve Sage de cam elyaf takviyesi ile PA6.6’nın erozyon davranışının kötüleştiğini raporlamıştır [105]. Literatürde cam elyaf ve farklı polimerlere gerçekleştirilen çalışmalarda da benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür [87], [94], [106].

Atık karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit laminatlarda, atık karbon elyaf takviyesiyle beraber erozyon oranlarının hem S00’dan hem de CA ve CS’den daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5.21). Ayrıca karbonun takviye yüzdesinin %10’dan %20’te artışıyla birlikte erozyon oranının artmaya devam ettiği görülmektedir. Bunun bir sebebi cam kumaş takviyesinde bahsedildiği gibi karbon elyafların kırılkan yapısından dolayı partikül çarpma işlemi ile daha fazla kırılkan yapının hasara uğrayarak yapıdan kolayca uzaklaşmasıdır. Literatürde farklı matris malzemeleri içerisine kısa karbon elyaf takviyesiyle birlikte erozyon oranlarında artış görülen çalışmalar mevcuttur [83], [90], [91], [95], [107]-[109].



Şekil 5.21: Partikül çarpma açısına göre erozyon oranı değişimi.

Silanlama işlemi ile elyaf – matris arayüzey özelliklerinin iyileştiği literatürdeki birkaç çalışmada raporlanmıştır [74], [110]. Eroziyon aşınma sürecinde iyi bir arayüzey iki farklı duruma neden olabilmektedir. İyi elyaf matris arayüzeyi durumunda, partiküller elyafa çarptığında iyi yapışmadan kaynaklı elyafların matristen ayrılması güçleşebilir. Böylece elyafların matris içerisinde kalarak erozyon oranı azalabilir. Ancak arayüzey iyileştirmesi ile arayüzey dayanımı matris dayanımından yüksek olduğu durumda elyaflar yüzeyden uzaklaşırken beraberinde yüksek miktarda matris de uzaklaştırabilirler. Bu durumda ise erozyon oranında artış meydana gelebilmektedir. Şekil 5.21’den silanlamanın etkisi incelendiğinde kompozit laminatlara uygulanan silanlama işleminin arayüzey ve mekanik özellikleri artırmanın yanında erozyon direncini de arttırdığı söylenebilir. Aşındırıcı partikül darbeleri sırasında cam elyafların matrise daha iyi tutunması, eroziyon aşınmanın azalmasına neden olmuştur. Literatürde de bu sonuca paralel olarak ara yüzey özelliklerinin iyileşmesiyle birlikte erozyon direncinin arttığına yönelik çalışmalar mevcuttur [91], [96]-[98].

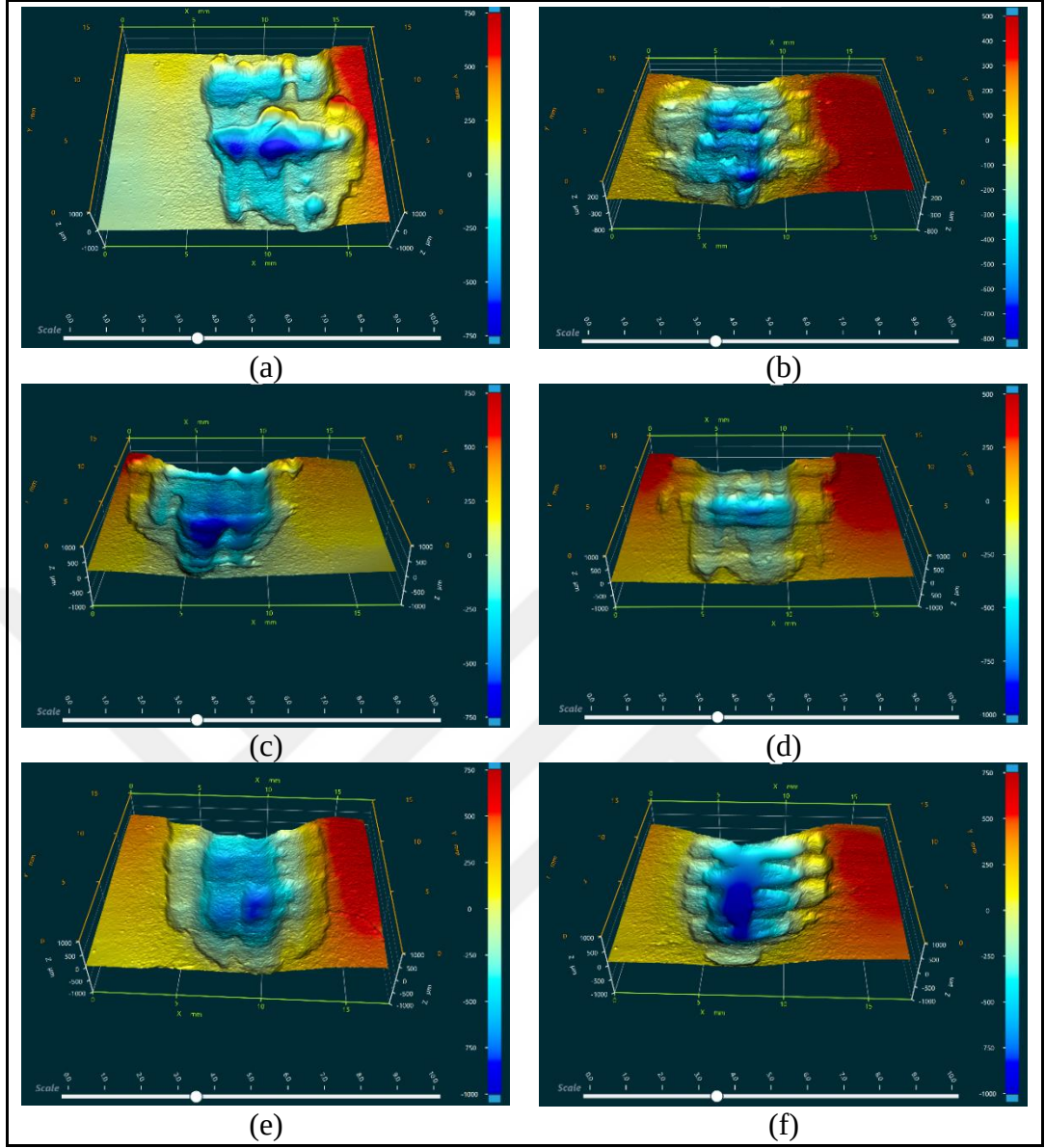
Arayüzey iyileştirmesinin kompozit laminatlarda getirdiği eroziyon aşınma direnci artışının aksine atık karbon elyaflı hibrit kompozit laminatlarda böyle bir iyileşme görülmemektedir. Aksine erozyon oranı karbon elyaf oranından bağımsız

artmaktadır. Bunun nedeni yüksek arayüzey dayanımı nedeniyle erozif aşınma sırasında matrinden cam elyafla birlikte daha büyük parçaların uzaklaşmasıdır. CA ve CS laminatında bu durum gözlemlenmezken, hibrit kompozit laminatlarda gözlemlenmesi de atık karbon elyafların matris darbe dayanımını (aşındırıcı partikülün yüksek enerji ile çarpması esnasındaki darbe yükü) düşürmesine bağlanabilir.

Erozif aşınma sonucunda kompozit malzemelerde meydana gelen maksimum erozyon oranları 30°'lik partikül çarpma açısında elde edilmiştir. Tüm kompozitlerin bu çarpma açısı altında aşındırılması sonucunda elde edilen aşınma kraterlerinin üç boyutlu topoğrafyaları Şekil 5.22'de verilmiştir.

Şekil 5.22.a ve 5.22.b'de verilen CA ve CS kompozit laminatları yüzey topoğrafyası sonuçları incelendiğinde bu malzemelerin yüzeyinde hibrit kompozit laminatlara göre daha sık olan erozyon çukurlarının meydana geldiği görülmektedir. Bu iki laminatta da 700 – 750 µm derinliğinde çok küçük bir oranda krater olduğu görülürken malzemenin büyük oranda 250-500 µm derinliğine kadar aşındığı gözlemlenmiştir. Hibrit kompozit laminatlara göre gözlemlenen sık kraterler erozyon oranları ile paralel ve tutarlıdır. Ayrıca kompozit laminatlarda silanlama etkisi ile elde edilen daha düşük erozyon oranı da CA ve CS laminatlarının topoğrafya görüntüleri ile tutarlıdır.

Hibrit kompozit laminatların üç boyutlu yüzey topoğrafyaları incelendiğinde CA ve CS'den daha derin krater çukurlarının elde edildiği ve derinliğin yer yer 1000 µm'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.22.c, 5.22.d, 5.22.e ve 5.22.f). Hibrit kompozit laminatlarda atık karbon elyaf miktarının artışı erozyon oranı arttırmakla beraber, yüzey topoğrafyasında daha derin kraterlerin oluşmasını da sağlamıştır. Üç boyutlu topoğrafya sonuçlarında karbon elyaf miktarının %10'dan %20'ye çıkması ile 1000 µm derinliğine sahip bölgenin arttığı açıkça görülmüştür. Ayrıca hibrit kompozitlerde silanlanmış cam kumaş kullanımı ile artan erozyon oranı ile tutarlı olarak krater derinliklerinde de artış elde edilmiştir. Şekil 5.22.c ve 5.22.e'de işlenmemiş cam kumaşla üretilen H10A ve H20A laminatlarının topoğrafyalarında gözlemlenen kraterlerin derinlikleri 750 µm derinliğinde geniş aşınma bölgeleri gözlemlenirken silanlanmış cam kumaş ile üretilen H10S ve H20S laminatlarının (Şekil 5.22.d ve 5.22.f) topoğrafyalarında 1000 µm derinliğinde geniş bölgeler elde edilmiştir.



Şekil 5.22: 30° partikül çarpma açısında oluşan topoğrafyalar a) CA, b) CS, c) H10A, d) H10S, e) H20A, f) H20S.

Partikül çarpma açısının aşınma yüzeyine etkisini incelemek için işlemsiz cam kumaşla üretilen %20 atık karbon elyaf içeren hibrit kompozit laminatların (H20A) erozif aşınma sonrası yüzeylerinin mikroskop görüntüleri Şekil 5.23'te verilmiştir. H20A laminatının her partikül çarpma açısı ile erozyonu sonrası görüntüleri verilirken partikül çarpma açısının numune topoğrafyasına etkisi irdelenmiştir.

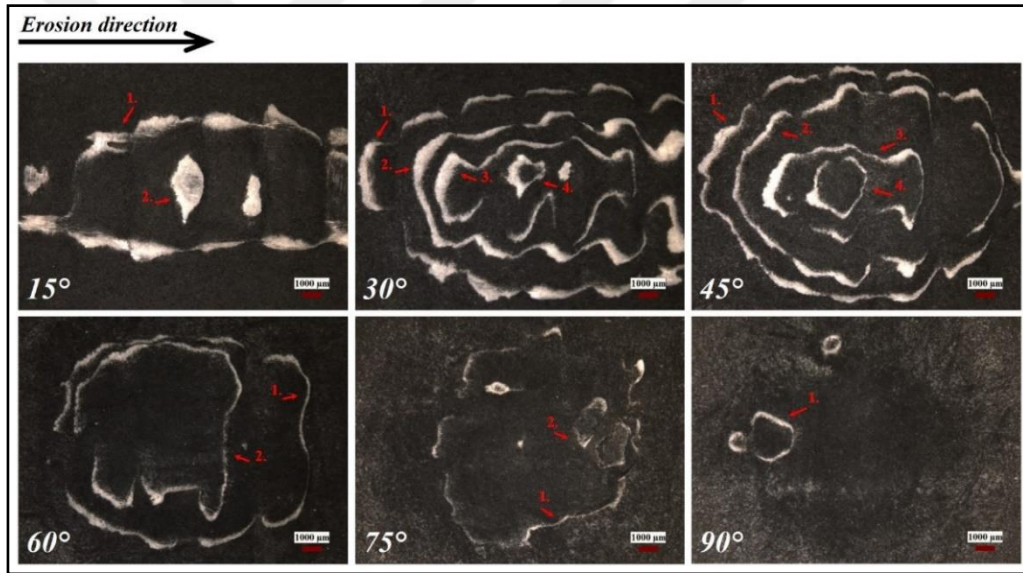
15° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin yüzeye çok dar bir açıyla gelip yüzeyden kayıp gittiği için derin olmayan fakat yüzeysel olarak geniş bir aşınma izi meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.23). Partiküller derine nüfus edemediği için

tabakalı kompozitin erozyonunda çok az sayıda cam katmana ulaşıldığı görülmektedir.

2. cam kumaş katmanının aşındığına dair küçük çaplı izler görülebilmektedir.

30° çarpma açısında erozif aşınmayı kontrol eden yatay bileşen baskın olduğu için laminatta sünek erozyon davranışı göstererek maksimum erozyon meydana gelmiştir (Şekil 5.23). Yüzeysel hasarın yanı sıra partiküller test numunesinde çok daha derine nüfus edebilmiştir. Bu da erozyonu arttırıcı bir diğer sebeptir. 4. cam fiber kumaş katmanına kadar inmiş aşınma görülmektedir.

45° çarpma açısı ile yüzeye gelen aşındırıcı partiküllerin 135° ile geri sekeceği beklendiğinden dolayı aşınma belirli bir alanda bölgesel olarak daha fazla olmuştur (Şekil 5.23). Daha dar alanda bir hasar oluşmasına karşın 30° çarpma açısındaki erozyonla hemen hemen hemen aynı sayıda tabakaya nüfuz edildiği görülmektedir. Aşınma 30° çarpma açısına kıyasla daha düşük seviyededir.

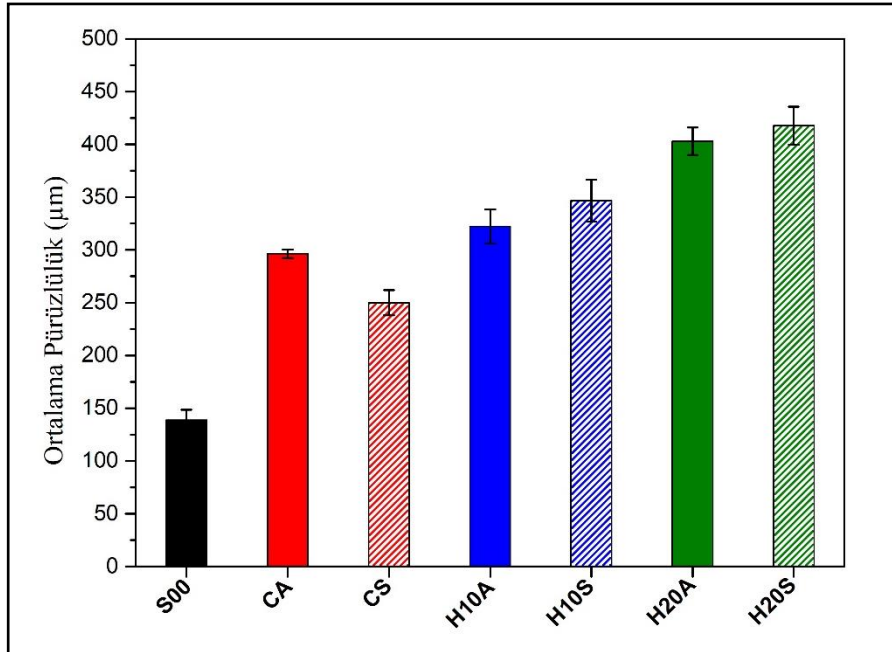


Şekil 5.23: H20A laminatının erozif aşınma yüzeyi.

60° ve 75° çarpma açılarındaki erozyonda da daha düşük hasarların meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.23). Sünek erozyon davranışında çarpma açısının yataydaki bileşeni azaldıkça erozyon da azalmıştır. Literatürde kırılğan takviye elemanları ile desteklenmiş polimer matrisli kompozitlerin yarı-sünek davranış göstermesi sonucu maksimum aşınmanın daha yüksek açılara (45°-60°) kaydığı örnek çalışmalar da mevcuttur. Fakat bu çalışmada kırılğan cam kumaş ve atık karbon elyaf takviyeleri erozif aşınmayı arttırmasına karşın erozyon davranışının gevrekleşmesine neden olmadığı için maksimum erozyon 30°'de meydana gelmiştir.

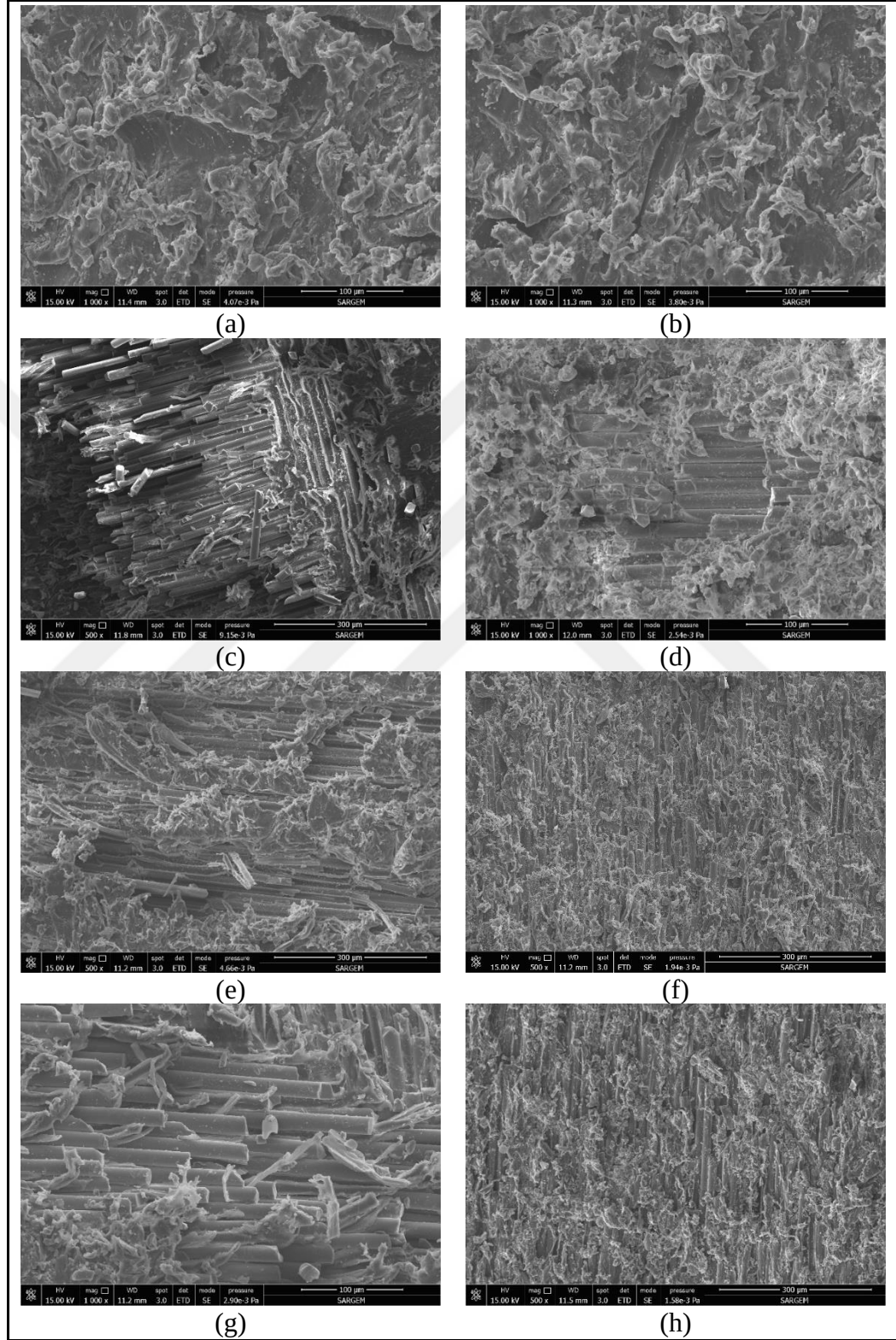
90° çarpma açısında ise partikül darbeleri yüzeyde dövme etkisi yapacaktır. Kırılgan malzemelerin maksimum erozyonu bu açıda meydana gelmesine karşın sünek erozyon davranışı sergilemiş olan S00 ve kompozitlerinde en düşük aşınma meydana gelmiştir. 90° çarpma açısı ile yüzeye gelip, geldiği doğrultuda geri seken partiküllerin ardından gelen partiküller ile çarpışması sonucu kinetik enerjilerini azaltıyor olması da aşınmayı düşüren bir diğer faktör olmuştur. Partiküllerin tabakalı kompozitte alt tabakaya yeterince nüfuz edemediği, sadece bölgesel olarak açığa çıkarabildiği görülebilmektedir (Şekil 5.23).

Katı partikül erozyonu sürecinde, aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine tekrarlı çarpması yüzey pürüzlülüğünün artmamasına neden olur. Yüzey pürüzlülüğü, katı partikül erozyonu sonrası yüzey özelliklerini gösteren temel parametrelerden biridir. Literatürde erozyon sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü ile erozif aşınma oranı arasındaki ilişkinin anlaşılmasına yönelik kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Barkoula ve Karger-Kocsis aşınma bölgesindeki yüksek pürüzlülüğün yüksek aşınmayı gösterebileceğini raporlamıştır [98]. Şekil 5.24'te 30° çarpma açısındaki erozif aşınma sonrası aşınma bölgesinden ölçülen pürüzlülük değerleri verilmiştir. Bu sonuçlar erozif aşınma sonuçları ile aynı trendde sonuçlar verirken Barkoula'nın sonuçlarını da doğrular niteliktedir.



Şekil 5.24: Ortalama pürüzlülük sonuçları.

Şekil 5.25'te erozyona uğramış malzemelerin 30° çarpma açısındaki erozif aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.25: Erozif aşınma bölgesi SEM görüntüleri a), b) S00, c) CA, d) CS, e) H20A, f) H20S.

Sünek erozyon davranışında mikro kesme ve mikro sürme mekanizmaları, gevrek erozyon davranışında ise mikro çatlakların oluşumu ve büyümesi görülmektedir [111]. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin erozif aşınmasında hasar modu genellikle matris mikro çatlamasını, elyaf – matris bağlarının ayrılmasını, elyafların kırılmasını ve malzeme ayrılmasını içeren birleşik bir süreçtir. PA6.6'nın sünek yapısından dolayı katı partikül erozyonu sonrası baskın olan hasar mekanizması plastik deformasyonlardır. Ayrıca saf polimerin aşınmasında mikro sürme mekanizmalarının aktif olduğu görülmektedir (Şekil 5.25.a ve Şekil 5.25.b). CA laminatının sem görüntülerinde ise yerinden çıkmış, kırılmış cam elyaflar görülmektedir (Şekil 5.25.c).

Şekil 5.25.d'de silanlanmış cam kumaşla üretilen CS laminatının erozyon sürecinde yüzeye gelen partiküller öncelikle matris malzemesini uzaklaştırmıştır. Matrisin çıkarılması sonucu görünür hale gelen elyaflar aşındırıcı partiküllerin tekrarlı darbeleri ile eğilmeye zorlanmışlardır. Bunun sonucunda elyaf çatlaması, elyaf kırılması, kırılan elyafların uzaklaştırılması gibi deformasyon süreçleri meydana gelmiştir. Fakat silanlama işlemi sonucu sağlanan iyi elyaf – matris arayüzeyi erozyon direnci sağlamıştır ve elyaflar yerinden çıkarılamamıştır. Ayrıca iyi yapışma sebebiyle fiberlerin etrafına yapışmış aşınmış matris kalıntıları görülmektedir (Şekil 5.25.d).

Silanlanmamış cam kumaşla üretilen H10A laminatı erozif aşınma sonrası açığa çıkan elyafların matristen yoksun olduğu görülmektedir (Şekil 5.25.e), fakat silanlanmış muadilinde (H10S) aşınması sonrası elyafların yerinde olduğu ve matrisçe zengin oldukları görülmektedir (Şekil 5.25.f). Aynı durum %20 karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitin silanlı ve silansız hali için de geçerlidir. H20A laminatında matristen yoksun, yalın, çıplak elyaflar gözlemlenirken (Şekil 5.25.g), silanlanmış muadilinde (H20S) elyaflar etrafına yapışmış matris enkazlarının olduğu görülmektedir (Şekil 5.25.h). Bu durum silan modifikasyonu sonrası elde edilen iyi cam elyaf – matris arayüzünün göstergesidir. İyi arayüzey yapışması mekanik özelliklere yaptığı olumlu katkının aksine hibrit kompozitlerde erozyon direncini olumsuz etkilemiştir.

5.2.3. Çizilme Aşınması Genel Bilgileri ve Literatür Araştırması

Kompozit yapılar, çalışma sırasında keskin cisimlerle aşınma gibi çeşitli hasarlara maruz kalabilir. Bunlar, bir veya daha fazla katmanda derin çizikler, yarıklar ve oluklar oluşturabilir ve erken hasarı teşvik ederek makroskopik stres artışına neden olabilir. Çizilme, polimerik malzemelerin performansını olumsuz etkileyen en yaygın hasarlardan biridir. Çizilme yöntemi, belirli bir yük altında belirli bir hızda numune yüzeyi boyunca rijit bir girinti hareket ettirmeyi içerir ve numunelerde aşındırıcı hasarın ardındaki mekanizmalar hakkında bilgi sağlayan mekanik bir deformasyon süreci olarak tanımlanır. Çizme işlemiyle malzeme üzerinde gevrek kırılmalar ve malzeme kaybından kaynaklı kırılma izleri ya da plastik deformasyon kaynaklı sünek izler oluşur.

Genel olarak, polimerlerin çizilme direnci, uygulanan yük ve hız, çizici boyutu ve yapısı, polimerin yapısı ve test sıcaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak değişir. Poliamitler ve bunların kompozitlerinin çizilme direnci, bazı endüstrilerde, özellikle otomotiv uygulamalarında ve uzun vadeli estetiğin önemli olduğu diğer optik uygulamalarda daha önemlidir. Bu tür endüstriyel uygulamalarda, boyutları ve uzunlukları ne olursa olsun çizikler, malzemelerin estetik görünümünü ve dolayısıyla kullanım ömürlerini kısaltabilir. Çizilmenin altında yatan temel mekanizmaları anlamak, bu tür sorunları çözmek için çok önemlidir [112]-[117].

Rajesh ve Bijw, üç farklı tipteki on poliamitin çizilme davranışının uygulanan yük ile değişimini incelemiş ve çizik genişliği, sürtünme kuvveti, penetrasyon derinliği ve temas bölgesi boyutunun uygulanan yük ile neredeyse doğrusal olarak arttığını bulmuştur. Rijit aromatik gruplar içeren amorf PA ve PA6.6'nın seçilen tüm yükleme koşullarında en yüksek çizilme sertliği değerlerini sergilediğini ve oldukça esnek polietilen gruplarına sahip poliamitin seçilen yükleme aralığında en düşük çizilme sertliği değerlerini gösterdiğini raporlamışlardır [114].

Sinha ve arkadaşları, PA6/nanokil kompozitinin çizilme ve normal sertlik özelliklerini araştırmış ve nanokil yüzdesindeki artışla birlikte çizilme derinliğinin ve çizilme sertliğinin azaldığını ancak normal sertlik, akma dayanımı ve elastik modülün arttığını sonucuna ulaşmışlardır [118].

Mindivan, grafen nano taneciklerin PA6'nın tribolojik ve mekanik davranışları üzerindeki etkisini araştırırken, Grafen nano tanecik katkısının, gerilme

dayanımından ödün vermeden PA6'nın elastik modülünü, mikrosertliğini, çizilme sertliğini ve tribolojik performansını iyileştirebileceğini raporlamıştır [119].

Literatürde PA matrisli elyaf katkılı kompozitlerin çizilme davranışı ile ilgili bir çalışmaya rastlanmazken, Cheng ve arkadaşları, kısa cam elyaf takviyeli PBT kompozitlerin çizilme performansı üzerindeki cam elyaf içeriğinin ve oryantasyonunun etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, cam elyaf ilavesinin PBT'nin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ancak genel olarak zayıf çizilme direnci oluşturduğu sonucuna varmıştır [120].

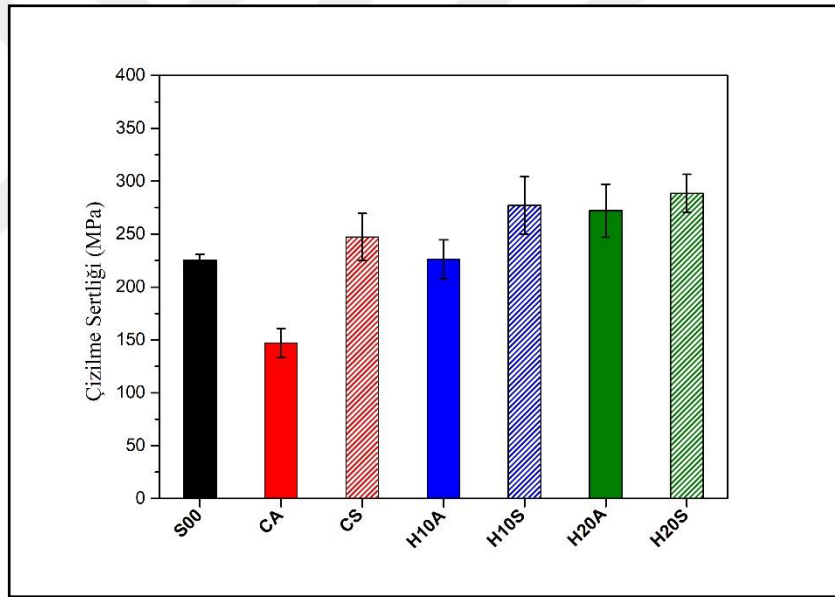
Molazemhosseini ve arkadaşları ise kısa karbon elyaf ve nano-SiO₂ partikülleri ile takviye edilmiş PEEK bazlı hibrit kompozitlerin mikromekanik özelliklerini nanoindentasyon ve nano çizilme yöntemlerini kullanarak araştırmıştır. Saf PEEK'e kısa karbon elyaf katkısının, malzemenin elastik modülünde ve sertliğinde kayda değer bir artış elde etmişlerdir. Ayrıca, kısa karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitine, ağırlıkça %2'ye kadar nano-SiO₂ parçacıkları eklendiğinde elastik modül ve sertlikte ikinci bir iyileştirme sağlamışlardır. Normal yer değiştirme ve sürtünme katsayısının, matris yoğun bölgeden elyaf bölgeye ilerlediğinde önemli ölçüde azalma eğiliminde olduğunu raporlamıştır [121].

Sambale ve arkadaşları, elyaf yüzey işleminin ara faz oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için boyutlandırılmış (sized) ve boyutlandırılmamış (unsized) cam elyaf takviyeli termoplastik PBT malzemede nano ölçekli çizilme testi gerçekleştirmiştir. Bulgular, elyaf boyutlandırmasının elyaf matris yapışmasını ve dolayısıyla kırılma dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Kaplanmış cam elyaf numuneleri ile karşılaştırıldığında, boyutlandırılmamış cam elyaf numunelerinin daha düşük çekme dayanımına ve fark edilir ölçüde daha küçük ara fazlara sahip olduğunu keşfetmiştir [122].

Aslan ve arkadaşları atık sisal/cam, sisal/karbon hibrit elyaf takviyeli PP kompozitlerin abrazif aşınma davranışını ve mekanik özelliklerini incelemiş ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere sisal elyaf eklemenin daha düşük mekanik özellikler ve sürtünme katsayısında artışla sonuçlandığını, ancak cam elyaf takviyeli kompozitlere sisal elyaf eklemenin daha iyi tribolojik özellikler ve kabul edilebilir mekanik performansla sonuçlandığı sonucuna varmışlardır. Aynı hibrit oranları için sisal/cam hibrit kompozitlerin aşınma hacminin sisal/karbon hibrit kompozitlerden çok daha düşük olduğunu da belirtmişlerdir [123].

5.2.4. Çizilme Testi Sonuçları

Üretilen kompozit laminatların çizilme davranışının incelenmesi için işlenmemiş ve silanlanmış cam kumaşlarla üretilmiş kompozit laminatlar (CA ve CS) ve %10 ve %20 oranında atık karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit laminatlar (H10A, H20A, H10S, H20S) çizilme testine tabi tutulmuştur. Kompozitlerde matris olarak kullanılan PA6.6 malzemenin referans olması adına katkısız PA6.6 levhalar (S00) da çalışmada incelenmiştir. Çizilme testi sonucunda oluşan deformasyon bölgeleri optik profilometre yardımı ile tarandıktan sonra malzemelerin çizilme sertlikleri hesaplanmıştır. Çalışmada elde edilen çizilme sertliği sonuçları Şekil 5.26'da verilmiştir. Ayrıca çizilme deformasyon bölgesindeki çizilme derinlikleri Şekil 5.27'de sunulmuştur.



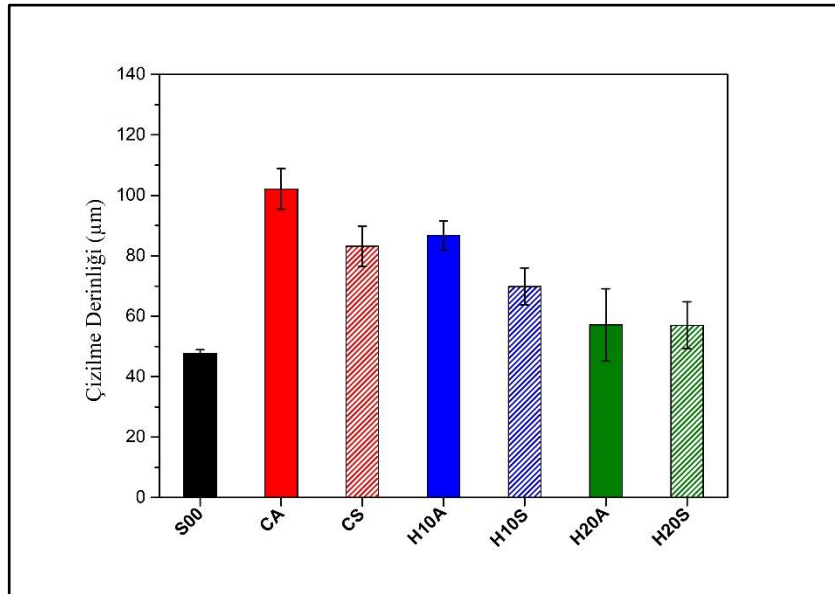
Şekil 5.26: Çizilme sertliği sonuçları.

Çizilme sertliği sonuçlarına göre işlenmemiş cam kumaş ile üretilen CA laminatlarının saf PA6.6'dan üretilmiş S00 levhalarından daha düşük çizilme sertliği gösterdiği görülmüştür. Buna karşın, silanlanmış cam kumaşla üretilen CS laminatının çizilme sertliği S00'a göre bir miktar daha yüksek elde edilmiştir. Mekanik ve dinamik mekanik analiz sonuçlarında daha önce sunulduğu üzere matris ve cam kumaş arasındaki yapışma dayanımını iyileştiren silanlama işlemi böylelikle kompozit malzemenin çizilme sertliğine de olumlu etki etmiştir. Bu sonuç ışığında,

işlenmemiş cam kumaşla üretilen CA laminatının matris ve elyaf katmanları çizilme testi esnasında birbirinden ayrı yapılar gibi davrandığı ve daha kolay deforme olduğu söylenebilir.

İşlenmemiş cam kumaşla üretilen hibrit kompozit laminatların (H10A ve H20A), CA laminatının aksine S00'dan daha yüksek çizilme sertliği gösterdiği görülmüştür. Bu da atık karbon elyaf takviyesinin yapıyı çizilmeye karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermektedir. Ayrıca hibrit kompozit laminatın içerdiği atık karbon elyaf miktarındaki artış ile çizilme sertliğinin bir başka deyişle çizilme dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır.

Silanlanmış cam kumaşla üretilen hibrit kompozit laminatların (H10S ve H20S) çizilme sertlikleri incelendiğinde atık karbon elyaf içermeyen laminatlarla (CA ve CS) benzer şekilde işlenmemiş kumaşla üretilen muadillerine (H10A ve H20A) göre daha yüksek çizilme sertliği gösterdiği görülmüştür. Bu da erozif aşınma sonuçlarından farklı olarak atık karbon elyaf takviyesiyle bile silanlamanın çizilme özelliklerini iyileştirmeye devam ettiğini göstermektedir. Buna ek olarak silanlanmış kumaşla üretilen hibrit kompozitlerde atık karbon elyaf miktarının artması ile çizilme sertliğindeki artış işlenmemiş cam kumaşla üretilenlere göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu da silanlamanın yani arayüzey dayanımının iyileştirilmesinin çizilme sertliğine baskın şekilde etki ettiğini göstermektedir.

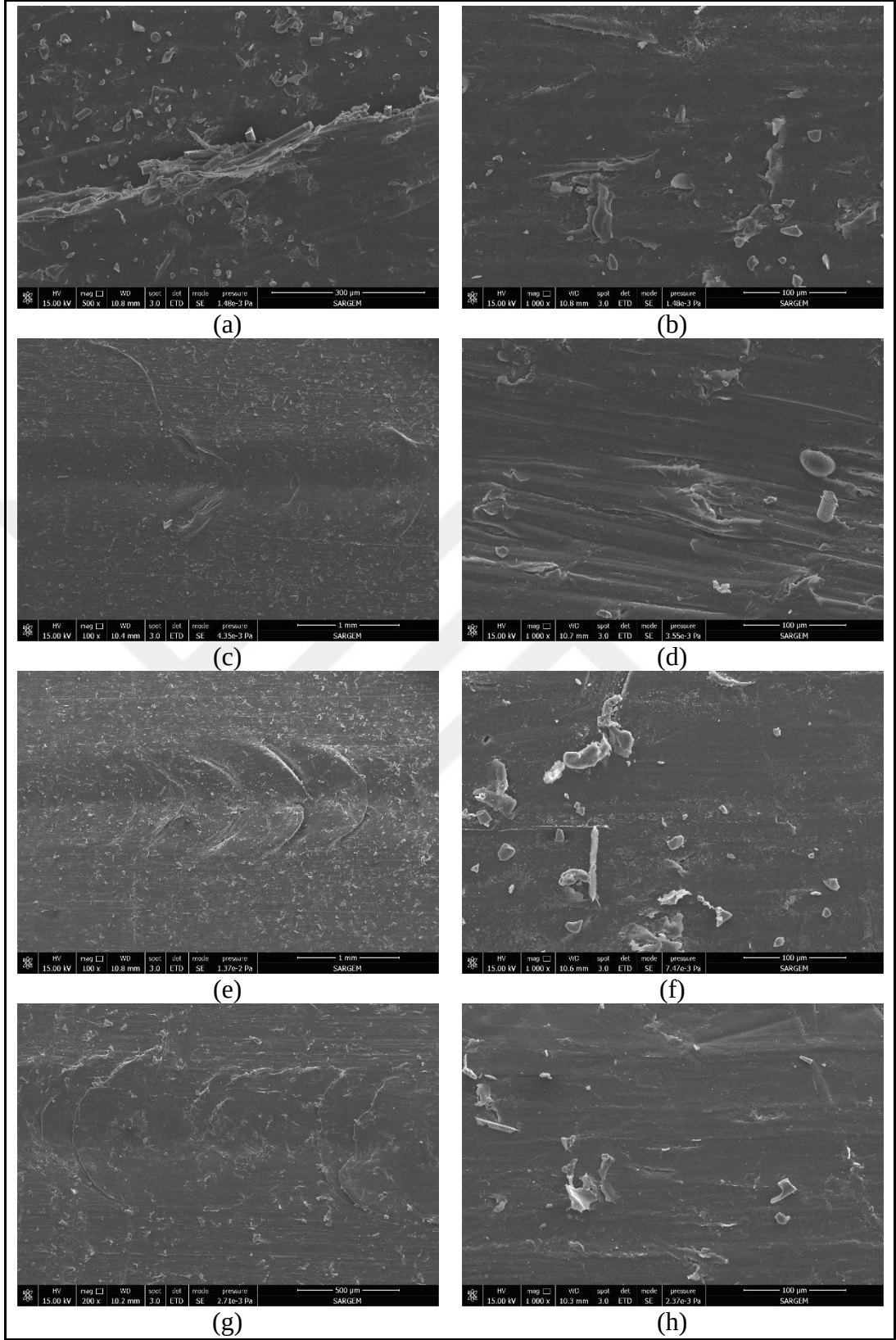


Şekil 5.27: Çizilme derinliği ölçüm sonuçları.

Çizilme derinliği sonuçları incelendiğinde silanlama işleminin hem normal hem de hibrit kompozitlerde çizilme derinliğini düşürücü bir etki sağladığı görülmüştür. Bu sonuç çizilme sırasında çizici ucun matris ve elyaf arasındaki dayanımın artışı ile penetrasyon kabiliyetinin azaldığını göstermektedir.

Atık karbon elyaf katkısının çizilme derinliğine etkisi incelendiğinde ise çizilme sertliği sonuçları ile ters şekilde azaltıcı etki gösterdiği açıkça görülmüştür. Çizilme derinliğindeki düşüşün çizilme dayanımını ve dolayısıyla çizilme sertliğini arttıracak düşünülüğünde bu sonuçlar tutarlı ve beklendiği gibidir. Atık karbon elyafın rijit yapısının kompozit içerisine eklenmesi ile çizilme hasarının oluştuğu yüzeyde çizicinin penetrasyonun ve hareketinin kısıtlandığı/zorlaştığı söylenebilir.

Çizilme testleri sonrasında hasar mekanizmalarının gözlemlenmesi için SEM analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.28'de sunulmuştur. Şekil 5.28.e (H10A) ve 5.28.g'de (H10S) stick-slip (yapış-kayma) davranışının neden olduğu fish scale (balık pulu) hasarı gözlemlenmiştir. Çizilme testinde çizicinin parça yüzeyinde sabit hızla hareket etmesi istenmekte ve düzenek buna göre tasarlanmaktadır. Ancak pratikte bu her zaman mümkün olmayabilir. Bahsedilen bu iki SEM görüntüsünde görüldüğü gibi çizicinin hareketi esnasında malzemenin çizici önünde toplanması ve hareketi kısıtlaması (stick) ve yavaşlatması, ardından malzemenin hasara uğrayarak kırılması ile çizicinin kayarak (slip) hareketini tekrar eski hızına devam ettirmesi gibi durumlar meydana gelebilir. Oluşan bu hasar mekanizmasında önce çizicinin hareketine devam edebilmesi için önünde biriken malzemenin neden olduğu direnci aşması gerekir. Bu bölgeden sonra çizici düşük sürtünme ve direnç kuvvetine karşı kayar ve nispeten daha hızlı ve pürüzsüz hareket eder. Bu mekanizma tekrarlanarak devam edebilir ve bu hasar mekanizmasının tekrarı ile oluşan yapıya fish scale adı verilmektedir [116]. Daha iyi çizilme direnci gösteren H10S laminatının çizilme bölgesi nispeten daha pürüzsüzdür ve çok az stick-slip hasar mekanizması gözlemlenmektedir (Şekil 5.28.g). H10A laminatının çizilme direnci daha düşük olduğundan, çizici H10S laminatının çizilmesindeki kadar düzgün kayamamış ve daha fazla hasar oluşmuştur. Daha belirgin stick-slip yapısının varlığı bunun kanıtıdır (Şekil 5.28.e). Ek olarak, Şekil 5.28.f ve Şekil 5.28.h'de, yüzeyde çizilmenin neden olduğu aşınma kalıntıları, çatlakları ve boşlukları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.28: Çizilme bölgesi SEM görüntüleri a), b) CA, c), d) CS, e), f) H10A, g), h) H10S.

CA ve CS laminatlarının SEM görüntülerinde (Şekil 5.28.a, 5.28.b, 5.28.c ve 5.28.d) ise hibrit kompozitlerin aksine balık pulu oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu sonuç laminatların hibrit kompozit laminatlara göre nispeten yüksek tokluğuna sahip olmasına bağlanabilir [112]. Şekil 5.28.a ve 5.28.b’de CA laminatının yüzeyindeki yırtıklar, plastik olarak deforme olmuş aşınma kalıntıları ve matrinden dışarı çıkmış kırık elyaflar gözlemlenmiştir. Silanlanmış cam kumaş ile üretilen CS laminatında çizilme ile hasara uğrayarak matrinden çıkan elyaflar gözlemlenmezken (Şekil 5.28.c ve 5.28.d), CA laminatında gözlenen bu hasarın nedeninin cam elyaf ve matris arasındaki zayıf arayüzey dayanımı olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.28.c’de CS laminatının çizilme yüzeyinde mikro ölçekli boşlukların olduğu ve güçlükle algılanabilen bir balık pulu modelinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca CS laminatının hasar bölgesindeki aşınma kalıntıları, yırtıklar ve boşluklar Şekil 5.28.d’de görülebilmektedir.

5.3. Hibrit Kompozit Laminatlara Çevresel Koşulların Etkisi

Tez çalışması kapsamında geliştirilen hibrit kompozit laminatların özellikleri ve referans malzemelerle kıyasları detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ışığında cam kumaş yüzey modifikasyonunun hibrit kompozit laminat mekanik özelliklerine baskın bir şekilde etki ettiği görülmüştür. Üretilen özgün kompozitin ticari bir ürüne dönüşebilmesi adına olası çalışma şartlarında maruz kalabileceği ortam koşullarının etkilerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda yüksek nem ve sıcaklığın malzeme özelliklerine etkileri çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, numuneler oda sıcaklığı ve 60°C ortam sıcaklığında saf su içerisinde batırılarak şartlandırılmıştır. Daha sonra farklı şartlandırma süreleri sonunda malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Numunelerin nem yutum miktarlar 24 saat gibi kısa aralıklarla 1000 saat süresince ölçülürken, eğme ve DMA testleri 100, 250, 500 ve 1000 saatlik şartlandırma süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Genel Bilgiler ve Literatür Araştırması

Günümüzde elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin yüksek dayanım/ağırlık oranları sebebiyle geniş kullanım alanlarına sahip olması bu malzemeler ile çok çeşitli bileşenlerin üretilmesine ve böylelikle çok çeşitli çalışma şartlarına maruz kalabilmelerine neden olmaktadır. Özellikle otomotiv parçalarında kaput altı parçalarında tercihe edilen FRPC'ler yüksek sıcaklık ve neme maruz kalabilirken, havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemeler yüksek ve düşük sıcaklıkla beraber yüksek neme maruz kalabilmektedir. Bu örnekleri rüzgâr gülleri, spor ekipmanlarının üretildiği kompozit malzemeler için de çoğaltmak mümkündür. Bu tür nem ve yüksek/düşük sıcaklık şartları altında çalışması beklenen kompozit malzemeler. Çalışma süresince nem miktarı ve dolayısıyla ağırlıklarının değişmesi gibi etkenlere maruz kalabilmektedir.

Kompozit malzemelere nem oranlarının artışı (nem penetrasyonu), büyük oranda difüzyon mekanizması ile gerçekleşmektedir. Nemin kompozit malzemelere nüfuz etmesinin diğer yaygın mekanizmaları, kılcallık ve mikro çatlaklar yoluyla taşınmasıdır. Bu mekanizmaların her biri, ancak kompozitlerde belirli bir hasar meydana geldikten sonra aktif hale gelir. Sıklıkla, bu ek mekanizmaları harekete geçirerek nem penetrasyonunu artıran bu hasar, kendi içinde kompozitin sıcak ve nemli bir ortama maruz kalmasının doğrudan bir sonucudur. Bir kompozit tarafından nem yutum oranı birkaç faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlileri, matris ve lif tipi, difüzyon yönüne göre lif oryantasyon dağılımı, şartlandırma sıcaklığı, kompozit ve çevre arasındaki su konsantrasyonundaki fark ve emilen suyun matris ile kimyasal olarak reaksiyona girip girmediği olarak sıralanabilir.

Zorlu çalışma şartlarına uzun süre maruz kalmak, kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde kaybın oluşmasını tetiklemektedir [124]. Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar arasından organik elyaflar dışındakiler genellikle yüksek/düşük sıcaklıklarda ve nemli iklimlerde önemli değişikliklere uğramadığı varsayılırken [125], [126], kompozitin matrisini oluşturan polimerik malzemelerin bozunması bahsedilen bu mekanik özellik kaybının birincil nedeni olmaktadır. Polimerik malzemenin nem ve sıcaklık etkisiyle bozunmasının dışında elyaf – matris arayüzey özelliklerinin düşüşü de önemli etkenlerden biridir.

Tez çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan PA6.6 ve diğer poliamit reçineler neme karşı oldukça hassastır. Poliamit, polar amid grupları içeren yarı kristalli bir termoplastik olması bunun en önemli sebeplerindendir. Poliamitler amorf kısmındaki -HN- amid gruplarının varlığı nedeniyle suyu yoğun bir şekilde emerler. Su molekülleri önce boş alanı, yani serbest hacmi işgal eder ve daha sonra hidrojen bağları ile etkileşime girer. Belirli miktarda birikmiş molekül veya kümeler, zincir hareketliliğinin aktivasyonunu indükler ve moleküller arasındaki çekimi azaltarak polimerin esneklemesine yol açar [124]. Bu kimyasal etkileşim, plastikleşme ve fiziksel bozulma ile malzemenin sünekliğini arttırırken dayanım ve modül değerlerinin azalmasına neden olabilmektedir [127].

Poliamitin nem ve sıcaklıktan önemli derecede etkilenmesinden dolayı geliştirilen özgün hibrit kompozitlerin nem ve sıcaklık ortamından nedeni etkilendiğinin gözlemlenmesi ve olası kullanım alanları için bir kılavuz oluşturulmasının önem arz ettiği düşünülmüştür. Ayrıca bu bölüm altında poliamit bazlı malzemelere nem ve sıcaklık etkisinin incelendiği çalışmalar özet olarak derlenmiştir.

Sang ve arkadaşları, karbon kumaş takviyeli poliamit 6 (PA6.6/CF) laminatların hidrotermal yaşlanma davranışı ve mekanik dayanıklılığı hakkında bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada farklı sıcaklıklardaki saf suya daldırılan PA6.6/CF laminatların nem yutumu, çekme ve eğme testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda çekme dayanımlarının korunumunun eğme dayanıma oranla daha yüksek olduğu ve su sıcaklığı artışının hasar oluşumunu tetiklediği sonucuna ulaşılmıştır [128]. Yine Sang ve arkadaşları benzer başka bir çalışmada kısa karbon elyaf ve PA6 kullanarak benzer işlemleri ve gözlemleri gerçekleştirmiştir [127].

Vlasveld ve arkadaşları, cam kumaş, PA6 ve tabakalı silika nanopartikül kullanarak ürettikleri kompozit laminatların nem ve sıcaklık altında eğme dayanımı ve basma dayanımı değişimlerini incelemiştir. Çalışmada nano partikül katkısının ve şartlandırma koşullarının mekanik özelliklere etkileri irdelenirken, nano partikül katkısının malzeme mekanik özelliklerine önemli katkıda bulunduğu sonucuna varmıştır [129].

Lei ve arkadaşları, sürekli karbon elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin sıcaklık ve nem ortamındaki nem yutumu ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Tek yönlü karbon kumaş kullanılan çalışmada elyaf yönündeki dayanımların nemden az

etkilendiğini ancak elyaf yönüne dik doğrultuda mekanik özelliklerin nem ile çok yüksek oranda düştüğü sonucuna varılmıştır [130].

Colucci ve arkadaşları otomotiv sektöründe kullanım ömrü sonuna gelen karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin geri dönüşüm performansını araştırmak amacı ile bir döngü oluşturmuşlardır. Öncelikle plastik enjeksiyon ile üretilen kısa elyaf takviyeli PA6.6 kompozitlere hızlandırılmış yaşlanma kabini içinde nem, sıcaklık ve UV ortamlarına maruz bırakarak kullanım sırasındaki şartları simüle etmişlerdir. Ardından kompozitleri geri dönüşüm prosesine tabi tutarak yeniden üretim gerçekleştirmişlerdir. Bu süreçte geri dönüşüm öncesi ve sonrası malzemelerin mekanik, termal ve morfolojik özellikleri incelenirken yaşlandırılmış numunelerin geri dönüşüm için uygun özelliğe sahip olduğu raporlanmıştır [131].

Poliamid bazlı kompozit malzemeler, çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mühendislik malzemelerinin sayısız avantajının yanı sıra, higrotermal koşullara karşı önemli bir hassasiyeti, büyük bir dezavantajı temsil etmektedir.

Pivdiablyk ve arkadaşları, üç farklı sürekli elyaf yönlenmesine sahip cam kumaş takviyeli PA6 kompozitlerinin farklı sıcak ve nem ortamları altındaki özellik değişimlerini incelemiştir. Çalışmada nem ortamının sıcaklığındaki değişim ile mekanik özelliklerin yüksek oranda etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik sonuçlardaki düşüşün nedeni olarak malzeme içerisine hapsolan nemin plastikleştirici etkisi olarak gösterilmiştir [124].

Arhant ve arkadaşları, tek yönlü karbon elyaf prepregler ile ürettikleri PA6 matrisli kompozitleri 100 ila 140°C arasındaki üç farklı sıcaklık altında neme tabi tutmuşlar ve uyguladıkları mod I yüklemesi altında çatlak ilerlemesi ve tabakalar arası kırılma tokluğu özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda ise nem ve sıcaklık etkisi ile kırılma tokluğu değerlerinin yüksek oranda kaybedildiği sonucuna varılmıştır [132].

Thomason, iki farklı yüzey modifikasyonuna sahip kısa karbon elyaf ile enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanarak ürettikleri PA6.6/CF kompozitlere farklı sıcaklık ve nem ortamında yaşlandırma işlemi uygulamış ve süreç ile değişen mekanik, ağırlık ve boyutsal özelliklerini incelemiştir. Sonuçlarda CF yüzey modifikasyonunun yaşlandırma sonucu mekanik özellik kaybına etki ettiği sonucuna varılırken yaşlandırma süresinin artışı ile bu etkinin ortadan kalktığı raporlanmıştır [133]. Thomason ve arkadaşları benzer bir çalışmada bu sefer iki farklı yüzey

modifikasyonuna sahip kısa cam elyaf (GF) ile gerçekleştirdikleri çalışmada GF/PA6.6 kompozitler 70°C'de bir glikol-su karışımında şartlandırılarak dinamik mekanik analiz ve çentiksiz Charpy darbe testi ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, glikol-su karışımlarındaki yaşlanmanın, bu malzemelerin termo-mekanik performansında önemli değişikliklere neden olduğunu ortaya koymuştur. Farklı sıcaklıklarda koşullandırmadan sonra elde edilen mekanik performansın, kompozit polimer matris tarafından emilen sıvı seviyesinin bir fonksiyonu olarak düşünüldüğünde üst üste bindirilebileceği gösterilmiştir [134]. Thomason ve Ali, bir başka çalışmada benzer üretimler gerçekleştirmiş ve saf polimer ve kompozitlerin 70°C'de bir glikol-su karışımında şartlandırılması ile malzemelerin boyutsal değişimlerini incelemiştir [135].

Ishak ve Berry, farklı oranlarda kısa karbon elyaf takviyeli PA6.6 kompozitler üreterek farklı sıcaklıklar altında neme tabi tutmuş ve suyun malzemeye difüzyonunu incelemiştir. Ayrıca çalışmada nem tutumu limitine ulaşan numuneler ve nem tutumu limitine ulaştıktan sonra tekrar kurutulan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Sonuçlarda nemin ve sıcaklığın çekme dayanımını önemli seviyede düşürdüğü ancak tekrar kurutulan numunelerin dayanımlarını büyük oranda geri kazandığı gözlemlenmiştir [136].

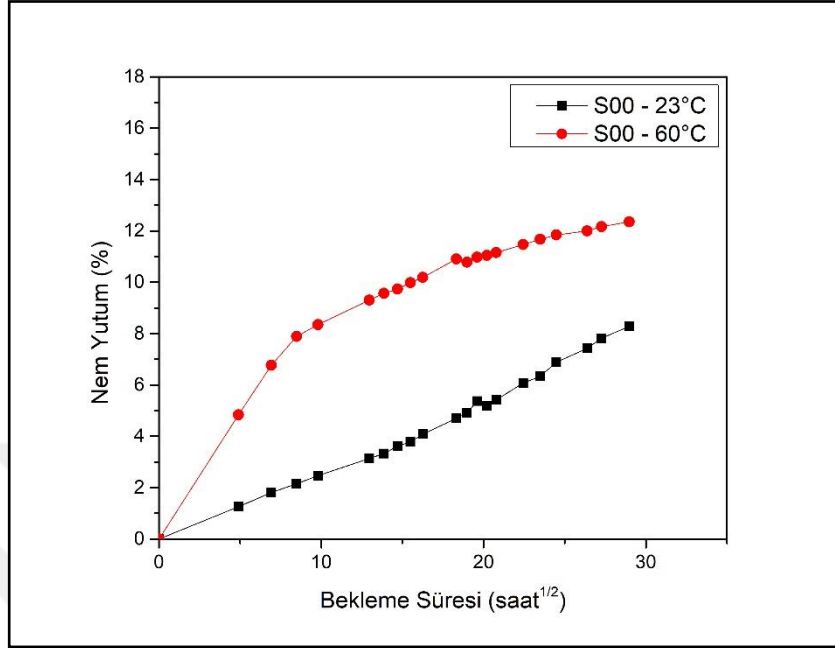
Valentin ve arkadaşları, saf PA6.6'la birlikte kısa ve sürekli cam elyaf katkılı PA6.6 kompozitlerin üç farklı sıcaklık ve üç farklı bağıl nem altında davranışlarını incelemiştir. Bu çalışma sonucunda malzemelerin mekanik özelliklerine maksimum etki eden bir nem yutum miktarı olduğu sonucu raporlanmıştır [137].

5.3.2. Nem Yutum Sonuçları

Nem yutum çalışması kapsamında saf PA6.6'dan üretilmiş S00 levhalarının ve silanlanmış cam kumaş ile üretilmiş kompozit ve hibrit kompozit laminatların (CS, H10S, H20S) 23°C (oda sıcaklığı) ve 60°C sıcaklık altında 1000 saat bekleme süresi boyunca nem yutum miktarı sırasıyla Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da verilmiştir.

Atık karbon elyaf ve cam kumaşlar, su ve sıcaklık (60°C gibi düşük sıcaklıklar) etkisi ile fiziksel ve kimyasal yapılarında değişime uğramazlar. Bu nedenle kompozit malzemelerin nem ve sıcaklık altında davranışlarının doğru yorumlanabilmesi için

bileşenler arasında su ile etkileşime girmesi beklenen tek malzeme olan matrisin nem yutum davranışının incelenmesi önem arz etmektedir.

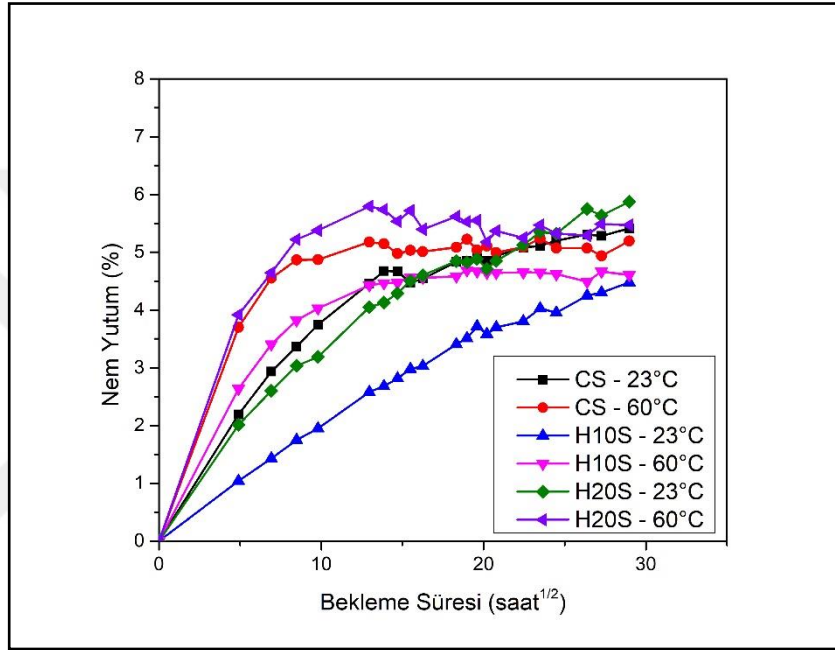


Şekil 5.29: PA6.6 levhaların nem yutum sonuçları.

Şekil 5.29'dan görüleceği üzere PA6.6 malzemesinin nem yutum miktarı saf su içerisinde geçirdiği süre ile artarken, ortam sıcaklığının nem miktarını yüksek oranda yükseltmiştir. 1000 saatlik bekleme süresi sonunda 60°C sıcaklıkta şartlandırılan S00 levhasının %12 oranında nem yutumu gerçekleştirdiği görülürken, oda sıcaklığında şartlandırılan muadilinde bu oran yalnızca %8'dir. Yüksek sıcaklık altında şartlandırılan PA6.6'nın nem yutum hızını 100 saat sonrasında yavaşlamıştır. Bu da malzemenin doyum noktasına yaklaştığını ya da nem difüzyonunun yavaşladığını işaret etmektedir. Oda sıcaklığında ise 1000 saat sonunda dahi nem yutum hızında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu grafikten çıkarılabilecek bir diğer sonuç da her iki sıcaklık koşulu için de nem doyumuna tamamen ulaşamamış olduğudur.

Kompozit malzemelerin ortam sıcaklığı ve bekleme süresi ile nem yutum miktarlarının değişimi incelendiğinde (Şekil 5.30) PA6.6 matris malzemesinin aksine 1000 saat sonunda tüm kompozitlerim nem doyumuna ulaştığı görülmüştür. Ayrıca PA6.6'da %12 oranında bile gözlemlenmeyen doyum noktası kompozit malzemelerde içeriğine bağlı olarak %4,4 ila %5,4 arasında gözlemlenmiştir. Nem yutum hızının her üç laminat (CS, H10S, H20S) için de 60°C'de daha yüksektir ve

bu sıcaklıkta 100 saatlik bir bekleme süresinde laminatlar nem doyumuna ulaşmıştır. Oda sıcaklığında şartlandırılan laminatlar ise doyuma ancak 500 ila 1000 saat arasındaki bekleme sürelerinde ulaşabilmiştir. Atık karbon elyaf takviyesinin nem yutumu hızına etkisi incelendiğinde ise her ikisi sıcaklık ortamı için de %10 atık karbon elyaf katkısının adeta bir bariyer etkisi göstererek nem yutumu hızını düşürdüğü görülmektedir. Ancak oranın %20'ye çıkması ile nem yutumu hızı karbon elyaf takviyesiz CS laminatına yakın olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.30: Kompozit ve hibrit kompozit laminatların nem yutumu sonuçları.

Atık karbon elyaf miktarının nem doyumu noktalarına da etki ettiğini de söylemek mümkündür. Örneğin en yüksek doyum noktası yaklaşık %5,4 ile %20 atık karbon elyaf içeren H20S laminatında elde edilirken en düşük doyum noktası ise yaklaşık %4,4 ile H10S laminatına aittir. Literatür çalışmaları göz önüne alındığında malzemenin içerdiği toplam elyaf hacminin artması ile aynı matrise sahip malzemelerin doyum noktalarının düştüğü sonuçları raporlanmıştır [128,130,136]. Elyafların neredeyse nem tutmadığı düşünüldüğünde literatürdeki bu sonuçlar tutarlıdır. Ancak bu çalışmada H20S laminatının CS'ye göre gösterdiği beklenmedik yüksek nem doyum noktasının sebebini açıklamak mümkündür. Çalışmanın önceki bölümlerinde raporlanan laminatların hava boşluğu miktarları (Şekil 5.2) incelendiğinde atık karbon elyaf miktarı artışı ile hibrit kompozitlerin içerdiği hava boşluklarının arttığı görülmektedir ve malzemenin daha yüksek hava boşluğu

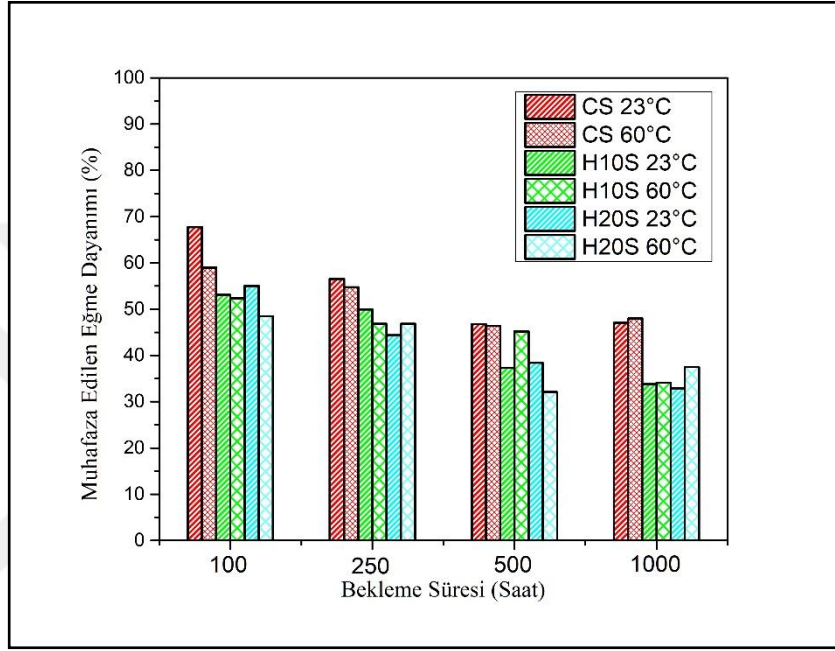
içermesi nüfuz eden nemin depolanacağı daha geniş bölgeler sağlaması açısından bu sonuca etki edebilmektedir. Daha önce raporlanan mekanik test sonuçlarında %20 atık karbon elyaf takviyesinin mekanik özelliklere olumsuz bir etki göstermediği ancak %30 oranına çıkıldığında özellik düşüşü yaşandığı raporlanmıştır. Bunun nedeni olarak yapıda yüksek miktarda matrisçe fakir bölgenin oluşmasıdır. Nem yutum sonuçları da benzer bir durumun daha küçük boyutta %20 atık karbon elyaf takviyesiyle oluştuğunu işaret etmektedir. Buradan hareketle H20S laminatında elde edilen nem yutum hızı ve doyum noktasındaki bu beklenmedik sonuçların nedeni laminatın içerdiği yüksek hava boşluğu miktarı ve nem nüfuziyetini hızlandırıcı etki yapan mikro çatlak oluşumunu tetikleyen matrisçe fakir bölgelerler içermesi ile açıklanabilir.

5.3.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Çevresel koşullar arasında yer alan nem ve sıcaklık elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine yüksek oranda etki eden dış etkenler arasındadır. Özellikle malzemenin içerisine nüfus eden nem polimer matrisin kimyasal yapısında bozunmalar, zincir kırılmalarına sebebiyet verebilmektedir. Nem difüzyonunu arttırıcı etki gösteren sıcaklık ise bu bozunmalara dolaylı yoldan katkıda bulunmaktadır. Özellikle elyaf – matris arayüzey dayanımının önemli olduğu yükleme koşullarında nem ve sıcaklık etkisi de daha fazla görülmektedir. Bu nedenle çalışmada farklı şartlandırma sürelerine maruz kalan numunelerin üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.31’de iki farklı sıcaklık altında neme maruz bırakılan kompozit laminatların eğme dayanımını muhafaza değerlerinin neme maruz bırakma süresi değişimi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde eğme dayanımı açısından nemden en az etkilenen malzemenin CS laminatı olduğu görülmektedir. CS laminatı 100 saatlik bir süre içerisinde %32 civarı bir eğme dayanımı kaybına uğrarken, H10S ve H20S hibrit kompozit laminatlar bu sürede dayanımlarının neredeyse yarısını kaybetmiştir. Eğme dayanımındaki düşüşü 250, 500 ve 1000 saatlik süreçte de atık karbon elyafsız CS kompozitinde diğerlerinden daha az gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar arasında dikkat çeken bir diğer sonuç ise dayanım düşüşlerinin her malzeme ve şartlandırma koşulu için 500 ve üzeri sürelerde çok değişim göstermemiştir. Nemle

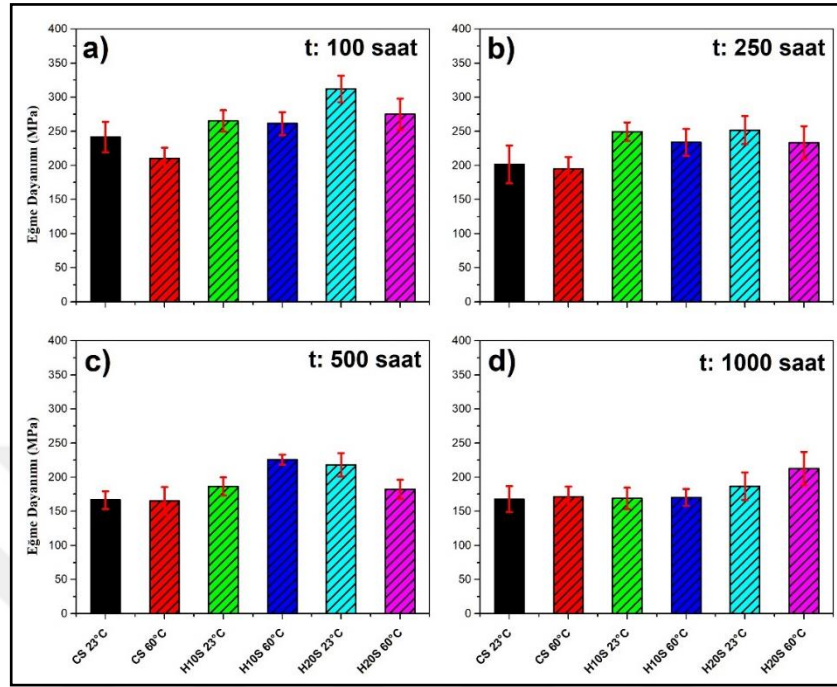
birlikte sıcaklığın eğme dayanımına etkisi incelendiğinde ise 100 ve 250 saatlik süreçlerde sıcaklığın dayanımı ekstradan düşürdüğü görülmüştür. Ancak 250 saat sonrasında sıcaklığın bariz bir etkisi gözlemlenmemiştir. Literatürde Sang ve arkadaşlarının karbon elyaf kumaş/PA6 kompozit ile gerçekleştirdikleri benzer çalışmada 1000 saat sonunda nem ve sıcaklık etkisiyle eğme dayanımlarında %40'a yakın kayıp elde etmişlerdir [128].



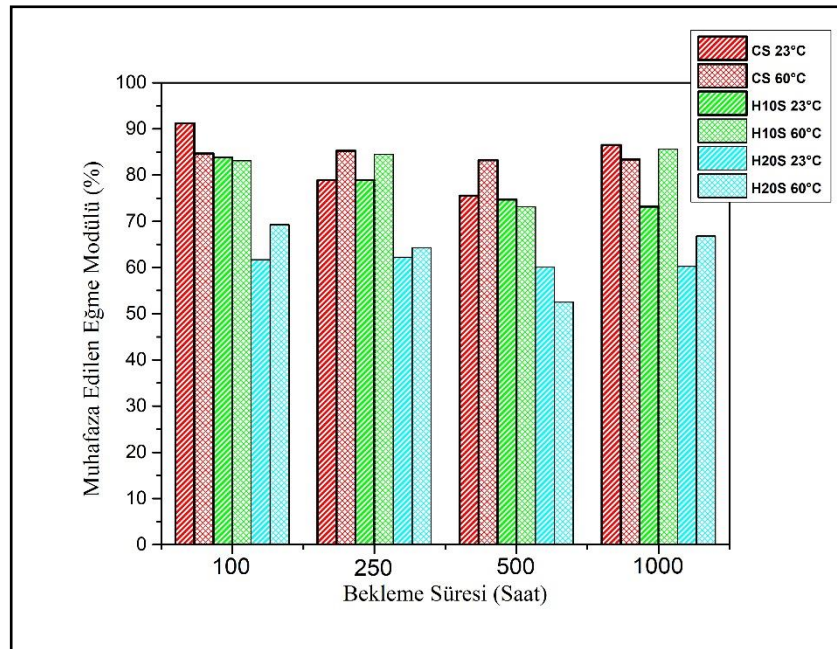
Şekil 5.31: Sıcaklık ve nemin muhafaza edilen eğme dayanımına etkisi.

Şekil 5.32’de kompozit laminatların neme maruz kalma sürelerine göre eğme dayanımları verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 500 saatlik şartlandırma süresine kadar hibrit kompozit laminatların eğme dayanımlarının yüksek düşüş oranlarına karşın atık karbon elyafsız CS laminatından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca 1000 saat şartlandırma süresi sonunda neredeyse tüm laminatların 150 MPa seviyesinde dayanım gösterdiği ve birbirinden neredeyse farklı olmadığı sonucu elde edilmiştir. Daha önceki bölümlerde işlenmemiş cam kumaşla üretilen CA kompozitinin düşük arayüzey dayanımı nedeni ile 150 MPa seviyesinde eğme dayanımı gösterdiği düşünüldüğünde 1000 saatlik nem ve sıcaklık uygulaması ile kompozit laminatların cam kumaş – matris ara yüzeyinin yüksek oranda bozulduğu söylenebilir. Neme tabi tutulan hibrit kompozit laminatların (H10S, H20S) 1000 saat sonundaki dayanımlarının neme tabi tutulmamış ve işlenmemiş cam kumaşla üretilen muadillerinin (H10A ve H20A) altında sonuç vermiştir. Bu durum nemin cam kumaş

– matris arayüzeyi dışında atık karbon elyaf – matris arayüzeyinde de olumsuz etkiler yaptığını kanıtlamaktadır.



Şekil 5.32: Farklı şartlandırma sürelerine göre eğme dayanımı sonuçları a) 100 saat, b) 250 saat, c) 500 saat, d) 1000 saat.



Şekil 5.33: Sıcaklık ve nemin muhafaza edilen eğme modülüne etkisi.

Nem ve sıcaklık altında şartlandırma süresine göre muhafaza edilen eğme modülü sonuçları Şekil 5.33'te verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde tüm kompozit laminatların nem ve sıcaklık etkisi ile eğme modüllerinde kayıp yaşadığı ancak modül düşüş oranlarının şartlandırma süresi ile neredeyse değişmediği sonucu elde edilmiştir. Nem ve sıcaklık etkisi ile eğme modülünde en yüksek oranda kayıp yaşayan malzeme H20S laminatı olmuştur.

5.3.4. DMA Sonuçları

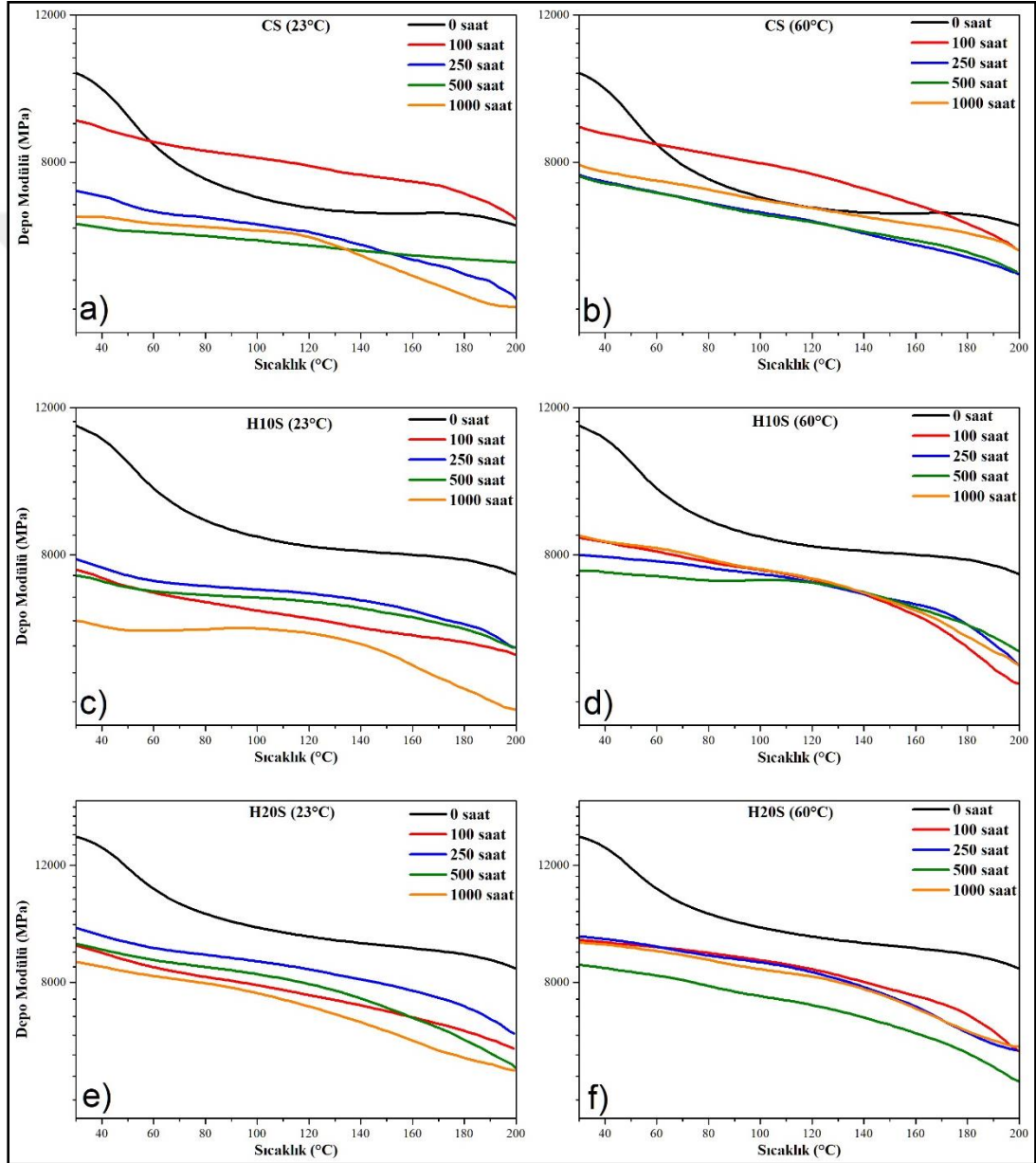
Oda sıcaklığı ve 60°C sıcaklık altında saf su içerisinde şartlandırılan kompozit malzemelerin 100, 250, 500 ve 1000 saat sonundaki DMA analizi sonuçları Şekil 5.34'te verilmiştir.

Şekil 5.34'te görüleceği üzere, bir önceki bölümde nem ve sıcaklık etkisi ile malzemelerin eğme modülüne benzer bir şekilde depo modülünün de nem etkisi ile düşüş gösterdiği görülmektedir. Depo modülleri hiçbir laminat için şartlandırma süresinin artışıyla belirgin bir trend oluşturmadığı görülmüştür. Ancak 30°C'deki depo modülü sonuçları incelendiğinde birkaç istisna haricinde 60°C sıcaklıkta neme tabi tutulan numunelerin depo modüllerinin daha yüksek sonuçlar gösterdiği söylenebilmektedir.

Şekil 5.34.a ve Şekil 5.34.b'den CS laminatının 23°C sıcaklık altında 100 saat sonunda depo modülü yaklaşık %12, 60°C sıcaklık altındaki nem koşulunda da benzer şekilde %14 oranında düştüğü görülmektedir. Şartlandırma süresi artışı ile 23°C'deki şartlandırma sıcaklığında bu kayıp %34'e kadar düşmüştür ve en düşük depo modülü değeri 500 saat şartlandırma süresi sonunda gözlemlenmiştir. 60°C'deki en düşük depo modül değeri ise yine 500 saat sonunda gözlemlenirken düşüş oranı %24'te kalmıştır.

Şekil 5.34.c ve Şekil 5.34.d'den H10S laminatının 23°C sıcaklık altında 1000 saat sonunda depo modülü yaklaşık %41 oranında düşüş göstererek en düşük sonucu verdiği görülmektedir. Aynı laminatın 60°C sıcaklık altındaki nem koşulunda ise en düşük sonucu 500 saat sonrasında ve %32 oranında düşüş ile gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bunun yanında H10S laminatının tüm şartlandırma süreleri için depo modül değerleri 60°C sıcaklık koşulunda daha yüksek sonuçlar vermiştir.

Şekil 5.34.e ve Şekil 5.34.f'deki sonuçlar da H10S laminatına benzer bir dağılımda elde edilmiştir. H20S laminatının 23°C' şartlandırma sıcaklığındaki en düşük depo modül değeri 1000 saat sonunda gözlemlenmiştir. Bu süre sonundaki depo modül düşüşü %35 oranında gerçekleşmiştir. Aynı laminatın 60°C şartlandırma sıcaklığındaki en düşük depo modülü ise 500 saat sonunda elde edilmiş ve düşüş yine %35 oranlarında elde edilmiştir.



Şekil 5.34: Nemin depo modüle etkisi a) CS 23°C, b) CS 60°C, c) H10S 23°C, d) H10S 60°C, e) H20S 23°C, f) H20S 60°C.

Nem şartlandırmasının depo modüle etkisi için genelleme yapmak gerekirse oda sıcaklığındaki nem şartlandırmasının 60°C’dekine göre malzeme üzerinde daha büyük hasarlar meydana getirdiğini söylemek mümkündür. Ancak şartlandırma süresinin etkisi ile ilgili genelleme yapabilecek bir sonuç elde edilmemiştir.



6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında kısa atık karbon elyafların yeniden kullanım verimini arttırmak amacıyla yeni bir üretim yaklaşımı geliştirmek amaçlanmıştır. Çalışmada kısa atık karbon elyafların sürekli elyaf takviyeli yapılar içerisinde kullanımını sağlayan bir üretim yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem ile atık karbon elyaf lar cam kumaş larla beraber kullanılarak hibrit kompozit laminatlar üretilmiştir. Çalışma sonucunda geliştirilen yeni üretim yaklaşımı ile atık karbon elyaf ların yüksek katma değerli sürekli elyaf takviyeli yapılarda kullanımının mümkün olduğu görülmüş ve tez çalışmasının hedefine ulaşılmıştır.

Deney sel çalışmaların ilk bölümünde, atık karbon elyaf miktarının ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun malzemelerin fiziksel, mekanik ve dinamik mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Deney sel çalışmaların ikinci bölümünde, geliştirilen hibrit kompozit laminatların katı partikül erozyonu ve çizilme davranışları araştırılmıştır. Bu bölüm altında gerçekleştirilen çalışmalarla yapıya katılan atık karbon elyaf ın ve cam kumaş yüzey modifikasyonunun tribolojik özellikleri çalışılmıştır.

Deney sel çalışmaların üçüncü bölümünde ise geliştirilen hibrit kompozitler farklı sıcaklıklar altında neme maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen çevresel şartlandırmalar sonunda, malzemelerin nem yutumu, mekanik ve dinamik mekanik özelliklerine; malzeme içeriği, şartlandırma süresi ve sıcaklığın etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma ile;

- Kısa atık karbon elyaf ın yüksek katma değerli sürekli elyaf takviyeli yapılar içerisinde kullanımını mümkün kılan yeni bir üretim metodu geliştirilmiştir.
- Geliştirilen yeni üretim metodu sayesinde kısa atık karbon elyaf ın yüksek katma değerli yapıların mekanik özelliklerine katkı sağlayabildiği kanıtlanmıştır.
- Literatürde ilk defa kısa atık karbon elyaf lar ve sürekli elyaf lar bir arada kullanılarak hibrit bir kompozit malzeme üretilmiştir.
- Geliştirilen üretim metodu ve üretilen hibrit kompozitler sayesinde kısa atık karbon elyaf lardan alınabilecek verimin arttırılabileceği görülmüştür.

Deneyisel çalışmaların birinci bölümünde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Atık karbon elyaf ile üretilen hibrit kompozit laminatların eğme dayanımının atık karbon elyaf içermeyen muadillerine göre %20'ye varan çekme dayanımı ve elastik modül artışı sağladığı görülmüştür.
- Matristeki atık karbon elyaf oranının %20'ye çıkarılması ile silanlanmamış cam kumaşla üretilen kompozitlerde çekme dayanımının 277,7 MPa'dan (CA) 344,2 MPa'ya (H20A), elastik modülün 5,32 GPa'dan (CA) 6,43 GPa'ya (H20A) yükseldiği görülmüştür.
- Silanlanmış cam kumaşla üretilen kompozitlerde ise çekme dayanımı 336 MPa'dan (CS) 378,5 MPa'ya (H20S), elastik modül 5,85 GPa'dan (CS) 6,56 GPa'ya (H20S) yükselmiştir.
- Atık karbon elyafsız kompozit laminatlarda (CA, CS), silanlama ile cam kumaş yüzey modifikasyonunun çekme dayanımı ve elastik modüle sırasıyla %20 ve %10 oranında etki ettiği görülmüştür.
- Hibrit kompozit laminatlarda da atık karbon elyaf içermeyen laminatlardaki gibi silanlamanın çekme dayanımı ve elastik modülü arttırdığı görülmüştür. Bu artışlar her atık karbon elyaf oranı için gözlemlenmiştir.
- Atık karbon elyaf katkısının etkisi eğme dayanımı ve eğme modülü değerlerinde daha yüksek oranda gözlemlenmiştir.
- İşlemsiz cam kumaşla üretilen kompozitlerde matristeki atık karbon elyaf miktarının %20'ye çıkarılması ile eğme dayanımı 150,3 MPa'dan (CA) 239,4 MPa'ya (H20A), eğme modülü 9,28 GPa'dan (CA) 13,91 GPa'ya (H20A) yükselmiştir. Bu da eğme dayanımında %60, eğme modülünde yaklaşık %50 artışa tekabül etmektedir.
- Silanlanmış cam kumaş ile üretilen kompozitlerde matristeki atık karbon elyaf miktarı %20'ye çıkarıldığında ise eğme dayanımı 356,4 MPa'dan (CS) 567,4 MPa'ya (H20S), eğme modülü 13,14 GPa'dan (CS) 20,29 GPa'ya (H20S) yükselmiştir. Bu sonuçlar eğme dayanımında %59, eğme modülünde ise %54 artışı temsil etmektedir.

- Atık karbon elyafsız kompozitlerde silanlama ile eğme dayanımında %137, eğme modülünde ise %42 artış elde edilmiştir (CA ve CS laminatlar kıyaslandığında).
- Hibrit kompozit laminatlarda silanlama işlemi ile eğme dayanımında %137, eğme modülünde %46 artış gözlemlenmiştir (H20A ve H20S laminatlar kıyaslandığında).
- İşlemsiz cam kumaşla üretilen hibrit kompozitlerin eğme özelliklerinin PA6.6/CF levhalarının altında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Eğme yüklemesi açısından sürekli elyaf yapı ile matris kimyasal uyumunun yöntemin uygulanabilirliği için olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- DMA analizleri sonucunda PA6.6/CF levhaların depo modülünün ve Tg'sinin atık karbon elyaf miktarı ile doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür. Bunun, matrise göre çok yüksek elastik modüle sahip olan karbon elyafın polimer zincirlerin hareketini kısıtlamasından kaynaklanmıştır.
- Silanlama işleminin hem normal hem de hibrit kompozitlerin depo modülü arttırdığı hem de $\tan\delta$ genliklerini düşürdüğü görülmüştür. Bu sonuçlar cam kumaşının silanla modifiye edilmesinin elyaf – matris arayüzeyinin iyileştiğini kanıtlar niteliktedir.
- Atık karbon elyafın malzemenin viskoelastik özelliklerine etkisi incelendiğinde, cam kumaş yüzey modifikasyonundan bağımsız olmakla beraber karbon elyaf miktarının %20'ye kadar artışı ile depo modülü değerinin yükseldiği görülmüştür.
- Üç nokta eğme ve çekme testleri sonrasında numunelerin hasar bölgelerindeki yapıların cam kumaş yüzey modifikasyonu ile direkt bağlantılı olduğu görülmüştür.
- Gerçekleştirilen makro ve mikro gözlemler sonucunda, silanlama işleminin cam elyaf – PA6.6 matris arasındaki uyumu arttırdığı ve arayüzey yapışmasını iyileştirdiği görülmüştür. Silanlama işlemi ile mekanik testler sonucunda elde edilen artışların ana sebebinin arayüzeyde elde edilen iyi yapışma olduğu sonucuna varılmıştır.
- Mekanik ve dinamik mekanik özellik sonuçlarının birbiri ile paralel olarak matristeki atık karbon elyaf miktarının %20'nin üzerine çıkması ile artış trendini terk ederek düşüşe geçtiği tespit edilmiştir. Bu sonuçların hibrit kompozit üretimi

sırasında matris miktarının sabit tutulmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Atık karbon elyaf miktarının %20 üzerine çıkması ile PA6.6 matrisinin miktarının yapıyı bir arada tutamayacak düzeye düştüğü sonucuna varılmıştır.

Deneyisel çalışmaların ikinci bölümünde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- PA6.6'nın erozif aşınma testleri sonrasında en yüksek erozyon oranı 15° ile 30° arasında gerçekleşmiştir. Bu da matris malzemesinin açık şekilde sünek erozif aşınma davranışı sergilediğini göstermiştir.
- Kompozit ve hibrit kompozit laminatların en yüksek erozyon oranı değerleri 30°'de elde edilirken, erozyon oranı eğrileri malzemelerin 30° – 45° arasında daha yüksek aşınma gösterebileceğine işaret etmiştir. Bu sonuçlar kompozit malzemelerin atık karbon elyaf içersin ya da içermesin erozif aşınma karakteristiğinin sünekten yarı süneğe kaydığını göstermiştir.
- Cam kumaş yüzey modifikasyonundan bağımsız olarak yapıdaki atık karbon elyaf miktarının artışı ile erozyon oranının arttığı görülmüştür.
- Atık karbon elyaf içermeyen kompozit laminatlarda cam kumaş silanlama işlemi erozyon oranını düşürürken, hibrit kompozit laminatlarda erozyon oranını arttırmıştır.
- Erozif aşınma sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğünün erozyon oranıyla orantılı olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Atık karbon elyaf miktarı artışı ile malzemenin çizilmeye karşı direnci artmıştır.
- Silanlama işleminin malzemelerin çizilme sertliğini arttırdığı ve çizilme derinliğini azalttığı sonucu elde edilmiştir.

Deneyisel çalışmaların üçüncü bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Ortam sıcaklığının artışı nem yutum hızını arttırmıştır.

- Oda sıcaklığında şartlandırılan hibrit kompozit laminatlar 500 saat sonunda doyuma ulaşırken, atık karbon elyaf içermeyen CS ancak 1000 saat sonunda doyuma ulaşmamıştır.
- 60° sıcaklıkta neme tabi tutulan laminatların tamamı 100 saat sonunda doyuma ulaşmıştır.
- Matrisin %10 atık karbon elyaf ile takviye edilmesi ile nem yutum hızının azaldığı görülmüştür.
- Matrisin %20 atık karbon elyaf ile takviye edilmesi malzemenin nem kapasitesini ve nem yutum hızını arttırmıştır. Bunun yapıdaki PA6.6 miktarının azalmasının tetiklediği mikro çatlak oluşumundan kaynaklandığı düşünülmüştür.
- Her iki sıcaklık koşulunda da 100 saat nem şartlandırması altında hibrit kompozitlerin eğme dayanımında %50 oranında kayıp yaşandığı görülmüştür.
- Atık karbon elyaf içeriğinin nem ve sıcaklık etkisi ile eğme dayanımı ve eğme modülü kaybını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- 1000 saat dışındaki tüm nem şartlandırmalarında H2O laminatı daha yüksek eğme dayanımı göstermiştir.
- 100 saatlik nem şartlandırma süresine kadar sıcaklık artışının eğme dayanımında azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 250, 500 ve 1000 saatlik şartlandırma sürelerinde eğme dayanımında meydana gelen azalış ve ortam sıcaklığı arasında bir korelasyon gözlemlenmemiştir.
- Nemin kompozit laminat ve hibrit kompozit laminatların depo modülünü düşürdüğü gözlemlenirken, şartlandırma süresi değişiminin depo modül düşüşü için bir trend oluşturmadığı sonucuna varılmıştır.
- Nem şartlandırma sıcaklığının 23°C'den 60°C'ye çıkarılması ile depo modüldeki düşüş miktarı azalmıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışma süresince elde edilen birikim ve deneyim sayesinde ilerinde geliştirilen yöntemle atık karbon elyaf ile takviye edilmiş polimerik kompozit malzeme çalışacak araştırmacılara aşağıdaki öneriler yapılmaktadır:

- Matriste %20 üzerinde atık karbon elyaf takviyesinin sağlanabilmesi için farklı alansal yoğunluklarda PA6.6/CF dokunmamış keçeler ile çalışmanın olumlu sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.
- Çalışmada eğme dayanımına göre düşük olduğu gözlenen çekme dayanımının yükseltilmesi adına tek yönlü cam kumaşlarla çalışılabilir.
- Atık karbon elyaf takviyesi ile artan erozyon oranının düşürülmesi için dokunmamış keçe üretimi sırasında yapıya elastomerik parçacık katkısının olumlu sonuçlar verebileceği öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Liu Z., Turner T. A., Wong K. H., Pickering S. J., (2021), “Development of high performance recycled carbon fibre composites with an advanced hydrodynamic fibre alignment process” *Journal of Cleaner Production*, 278, 123785.
- [2] Meng F., McKechnie J., Pickering S. J., (2018), “An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 207–220.
- [3] Karakaya N., Papila M., Özkoç G., (2020), “Effects of hot melt adhesives on the interfacial properties of overmolded hybrid structures of polyamide-6 on continuous carbon fiber/epoxy composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139, 106106.
- [4] Rani M., Choudhary P., Krishnan V., Zafar S., (2021), “A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades”, *Composites Part B: Engineering*, 215, 108768.
- [5] Hasan M. M. B., Abdkader A., Cherif Ch., Spennato F., (2019), “Fibre hybrid composites consisting of discontinuous waste carbon fibre and continuous glass filaments developed for load-bearing structures with improved impact strength”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 126, 105610.
- [6] Clyne T. W., Hull D., (2019), “An Introduction to Composite Materials”, 3rd Edition, Cambridge University Press.
- [7] Pakdel E., Kashi S., Varley R., Wang X., (2021), “Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes”, *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105340.
- [8] He D., Soo V. K., Kim H. C., Compston P., Doolan M., (2020), “Comparative life cycle energy analysis of carbon fibre pre-processing, processing and post-processing recycling methods”, *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104794.
- [9] Lefeuvre A., Garnier S., Jacquemin L., Pillain B., Sonnemann G., (2019), “Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050”, *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 30–39.
- [10] Pakdel E., Kashi S., Varley R., Wang X., (2021), “Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes”, *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105340.

- [11] Khurshid M. F., Hengstermann M., Hasan M. M. B., Abdkader A., Cherif C., (2020), “Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites – A review”, *Journal of Composite Materials*, 54, 1925–1944.
- [12] Khalil Y.F., (2018), “Comparative environmental and human health evaluations of thermolysis and solvolysis recycling technologies of carbon fiber reinforced polymer waste”, *Waste Management*, 76, 767–778.
- [13] May D., Goergen C., Friedrich K., (2021), “Multifunctionality of polymer composites based on recycled carbon fibers: A review.”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 70–81.
- [14] Bajpai P., (2021), “Carbon Fiber”, 2nd. Edition, Elsevier.
- [15] Edison T. A., (1879), “Electric Lamp”, U.S. Patent 223,898.
- [16] Houtz R. C., (1950), “Orlon” Acrylic Fiber: Chemistry and Properties”, *Textile Research Journal*, 20, 786–801.
- [17] Morgan P., (2005), “Carbon Fibers and Their Composites”, 1st Edition. CRC Press.
- [18] Mazumdar S. K., (2002), “Composites manufacturing: materials, product, and process engineering”, 1st Edition, CRC Press LLC.
- [19] Bajpai P., (2013), “Update on Carbon Fiber”, 1st Edition, Smithers Rapra Technology Ltd.
- [20] Minus M., Kumar S., (2005), “The processing, properties, and structure of carbon fibers”, *JOM*.
- [21] Huang X., (2009), “Fabrication and Properties of Carbon Fibers”, *Materials*, 2, 2369–2403.
- [22] Chung D. D. L., (1994), “Carbon Fiber Composites”, 1st Edition, Butterworth-Heinemann.
- [23] Callister W. D., (2001), “Fundamentals of Materials Science and Engineering”, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [24] Xanthos M., (2009), “Functional Fillers for Plastics”, 2nd Edition, Wiley – VCH.
- [25] Ashby M. F., (1998), “Engineering Materials 2”, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [26] Zhang J., Chevali V. S., Wang H., Wang C-H., (2020), “Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling”, *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053.

- [27] Meng F., Olivetti E. A., Zhao Y., Chang J. C., Pickering S. J., McKechnie J., (2018), “Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options”, *ACS Sustain Chem Eng*, 6, 9854–9865.
- [28] Zhu J-H., Chen P., Su M., Pei C., Xing F., (2019), “Recycling of carbon fibre reinforced plastics by electrically driven heterogeneous catalytic degradation of epoxy resin”, *Green Chemistry*, 21, 1635–1647.
- [29] Overcash M., Twomey J., Asmatulu E., Vozzola E., Griffing E., (2018), “Thermoset composite recycling – Driving forces, development, and evolution of new opportunities”, *Journal of Composite Materials*, 52, 1033–1043.
- [30] Gastelu N., Lopez-Urionabarrenechea A., Solar J., Acha E., Caballero B., López F., (2018), “Thermo-Catalytic Treatment of Vapors in the Recycling Process of Carbon Fiber-Poly (Benzoxazine) Composite Waste by Pyrolysis”, *Catalysts*, 8(11), 523.
- [31] Liu Y., Farnsworth M., Tiwari A., (2017), “A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda”, *Journal of Cleaner Production*, 140, 1775–1781.
- [32] Harbers T., Ebel C., Drechler K., (2014), “Highly Efficient Production and Characterization of CFRP Made from Recycled Carbon Fibers”, *SEICO 14-35th International Technical Conference & Forum*, Paris, France, 3 October – 3 November.
- [33] McNally T., Boyd P., McClory C., Bien D., Moore I., Millar B., (2008), “Recycled carbon fiber filled polyethylene composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 107, 2015–2021.
- [34] Han H., Wang X., Wu D., (2012), “Preparation, crystallization behaviors, and mechanical properties of biodegradable composites based on poly(L-lactic acid) and recycled carbon fiber”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 1947–1958.
- [35] Wong K. H., Syed Mohammed D., Pickering S. J., Brooks R., (2012), “Effect of coupling agents on reinforcing potential of recycled carbon fibre for polypropylene composite”, *Composites Science and Technology*, 72, 835–844.
- [36] Chen Y., Wang X., Wu D., (2013), “Recycled carbon fiber reinforced poly(butylene terephthalate) thermoplastic composites: fabrication, crystallization behaviors and performance evaluation”, *Polymers for Advanced Technologies*, 24, 364–375.
- [37] Feng N., Wang X., Wu D., (2013), “Surface modification of recycled carbon fiber and its reinforcement effect on nylon 6 composites: Mechanical

properties, morphology and crystallization behaviors”, *Current Applied Physics*, 13, 2038–2050.

- [38] Yan G., Wang X., Wu D., (2013), “Development of lightweight thermoplastic composites based on polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer alloys and recycled carbon fiber: Preparation, morphology, and properties”, *Journal of Applied Polymer Science*, 129, 3502–3511.
- [39] Han H., Wang X., Wu D., (2013), “Mechanical properties, morphology and crystallization kinetic studies of bio-based thermoplastic composites of poly(butylene succinate) with recycled carbon fiber”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88, 1200–1211.
- [40] Stoeffler K., Andjelic S., Legros N., Roberge J., Schougaard S. B., (2013), “Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber”, *Composites Science and Technology*, 84, 65–71.
- [41] Lee H., Ohsawa I., Takahashi J., (2015), “Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties”, *Applied Surface Science*, 328, 241–246.
- [42] Hirayama D., Saron C., Botelho E. C., Costa M. L., (2017), “Ancelotti Junior AC. Polypropylene Composites Manufactured from Recycled Carbon Fibers from Aeronautic Materials Waste”, *Materials Research*, 20, 519–525.
- [43] Luo H., Xiong G., Ma C., Li D., Wan Y., (2014), “Preparation and performance of long carbon fiber reinforced polyamide 6 composites injection-molded from core/shell structured pellets”, *Materials and Design*, 64, 294–300.
- [44] Szpieg M., Wysocki M., Asp L. E., (2009), “Reuse of polymer materials and carbon fibres in novel engineering composite materials” *Plastics, Rubber and Composites*, 38, 419–425.
- [45] Turner T. A., Pickering S. J., Wong K. H., (2014), “Challenges in developing nylon composites commingled with discontinuous recycled carbon fibre”, 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Seville, Spain, 22-26 June.
- [46] Wei H., Nagatsuka W., Lee H., Ohsawa I., Sumimoto K., Wan Y., (2018), “Mechanical properties of carbon fiber paper reinforced thermoplastics using mixed discontinuous recycled carbon fibers”, *Advanced Composite Materials*, 27, 19–34.
- [47] Wölling J., Schmieg M., Manis F., Drechsler K., (2017), “Nonwovens from Recycled Carbon Fibres – Comparison of Processing Technologies”, *Procedia CIRP*, 66, 271–276.
- [48] Cornacchia G., Galvagno S., Portofino S., Caretto F., Casciaro F., Matera D., (2009), “Carbon fiber recovery from waste composites: an integrated

approach for a commercially successful recycling operation”, SAMPE 09’ conference, Baltimore, USA, 18-21 May.

- [49] Wei H., Lee H., Nagatsuka W., Ohsawa I., Kawabe K., Murakami T., (2015), “Systematic comparison between carding and paper-making method for producing discontinuous recycled carbon fiber reinforced thermoplastics”, 20th International conference on composite materials, Copenhagen, Denmark, 19-24 July.
- [50] Yin G., Cai G., Wei H., Nagatsuka W., Kohira T., Morisawa J., (2017), “Novel carding process to improve mechanical properties of recycled carbon fiber card web reinforced thermoplastic”, 21st International Conference on Composite Materials, Xi’an, China, 20-25 August.
- [51] Holmes M., (2018), “Recycled carbon fiber composites become a reality”, *Reinforced Plastics*, 62, 148–153.
- [52] Lützkendorf R., Reussmann T., Danzer M., (2017), “Hybrid Composites with Recycled Carbon Fibres”, *Lightweight Design Worldwide*, 10, 16–19.
- [53] Akonda M. H., Lawrence C. A., Weager B. M., (2012), “Recycled carbon fibre-reinforced polypropylene thermoplastic composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 79–86.
- [54] Goergen C., Schommer D., Duhovic M., Mitschang P., (2020), “Deep drawing of organic sheets made of hybrid recycled carbon and thermoplastic polyamide 6 staple fiber yarns”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33, 754–778.
- [55] Hengstermann M., Raithel N., Abdkader A., Hasan M., Cherif C., (2016), “Development of new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers for high performance composites. Part-I: basic processing of hybrid carbon fiber/polyamide 6 yarn spinning from virgin carbon fiber staple fibers”, *Textile Research Journal*, 86, 1307–1317.
- [56] Hengstermann M., Hasan M., Abdkader A., Cherif C., (2017), “Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers (rCF) for high-performance composites. Part-II: Influence of yarn parameters on tensile properties of composites”, *Textile Research Journal*, 87, 1655–1664.
- [57] Hengstermann M., Hasan M. M., Abdkader A., Cherif C., (2016), “Influence of Fibre Length and Preparation on Mechanical Properties of Carbon Fibre/Polyamide 6 Hybrid Yarns and Composites”, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 24, 55–62.
- [58] Hengstermann M., Hasan M. M. B., Scheffler C., Abdkader A., Cherif C., (2021), “Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part III: Influence of sizing on textile processing and composite properties”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34, 409–430.

- [59] Hasan M. M. B., Hengstermann M., Dilo R., Abdkader A., Cherif C., (2017), "Investigations on the Manufacturing and Mechanical Properties of Spun Yarns Made from Staple CF for Thermoset Composites", *Autex Research Journal*, 17, 395–404.
- [60] Miyake T., Imaeda S., (2016), "A dry aligning method of discontinuous carbon fibers and improvement of mechanical properties of discontinuous fiber composites", *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2, 117–123.
- [61] Hasan M. M. B., Nitsche S., Abdkader A., Cherif C., (2018), "Carbon fibre reinforced thermoplastic composites developed from innovative hybrid yarn structures consisting of staple carbon fibres and polyamide 6 fibres", *Composites Science and Technology*, 167, 379–387.
- [62] Bikiaris D., Matzinos P., Larena A., Flaris V., Panayiotou C., (2001), "Use of silane agents and poly(propylene-g-maleic anhydride) copolymer as adhesion promoters in glass fiber/polypropylene composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 81, 701–709.
- [63] Arun Prakash V. R., Rajadurai A., (2020), "Inter laminar shear strength behavior of acid, base and silane treated E-glass fibre epoxy resin composites on drilling process", *Defence Technology*, 13, 40–46.
- [64] Arslan C., Dogan M., (2020), "The effects of fiber silane modification on the mechanical performance of chopped basalt fiber/ABS composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33, 1449–1465.
- [65] Fiore V., di Franco F., Miranda R., Santamaria M., Badagliacco D., Valenza A., (2021), "Effects of anodizing surface treatment on the mechanical strength of aluminum alloy 5083 to fibre reinforced composites adhesive joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 108, 102868.
- [66] Bonon A. J., Weck M., Bonfante E. A., Coelho P. G., (2016), "Physicochemical characterization of three fiber-reinforced epoxide-based composites for dental applications", *Materials Science and Engineering: C*, 69, 905–913.
- [67] Wang Q., Zhang Y., Liang W., Wang J., Chen Y., (2020), "Effect of silane treatment on mechanical properties and thermal behavior of bamboo fibers reinforced polypropylene composites", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 155892502095819.
- [68] Yang Y., Li D., Si G., Liu Q., Chen Y., (2017), "Improved thermal and mechanical properties of carbon fiber filled polyamide 46 composites", *Journal of Polymer Engineering*, 37, 345–353.
- [69] You J., Jee S. M., Lee Y. M., Lee S-S., Park M., Kim T. A., (2021), "Carbon fiber-reinforced polyamide composites with efficient stress transfer via

plasma-assisted mechanochemistry”, *Composites Part C: Open Access*, 6, 100209.

- [70] Kodal M., Topuk Z. D., Ozkoc G., (2015), “Dual effect of chemical modification and polymer precoating of flax fibers on the properties of short flax fiber/poly(lactic acid) composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 42564.
- [71] Yu S., Oh K. H., Hwang J. Y., Hong S. H., (2019), “The effect of amino-silane coupling agents having different molecular structures on the mechanical properties of basalt fiber-reinforced polyamide 6,6 composites”, *Composites Part B: Engineering*, 163, 511–521.
- [72] Yu S., Oh K. H., Hong S. H., (2019), “Effects of silanization and modification treatments on the stiffness and toughness of BF/SEBS/PA6,6 hybrid composites”, *Composites Part B: Engineering*, 173, 106922.
- [73] Yan X., Wang X., Yang J., Zhao G., (2021), “Optimization of process parameters of recycled carbon fiber-reinforced thermoplastic prepared by the wet-laid hybrid nonwoven process”, *Textile Research Journal*, 91, 1565–1577.
- [74] Kiss P., Schoefer J., Stadlbauer W., Burgstaller C., Archodoulaki V. M., (2021), “An experimental study of glass fibre roving sizings and yarn finishes in high-performance GF-PA6 and GF-PPS composite laminates”, *Composites Part B: Engineering*, 204, 108487.
- [75] Thadathil Varghese J., Cho K., Raju Farrar P., Prentice L., Prusty B. G., (2022), “Influence of silane coupling agent on the mechanical performance of flowable fibre-reinforced dental composites”, *Dental Materials*, 38, 1173–1183.
- [76] Cho K., Wang G., Raju R., Rajan G., Fang J., Stenzel M. H., (2019), “Influence of Surface Treatment on the Interfacial and Mechanical Properties of Short S-Glass Fiber-Reinforced Dental Composites”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, 32328–32338.
- [77] Menard H. P., (2008), “Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction”, 2nd Edition, CRC Press.
- [78] Arslan C., Dogan M., (2018), “The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites”, *Composites Part B: Engineering*, 146, 145–154.
- [79] Goriparthi B. K., Suman K. N. S., Mohan Rao N., (2012), “Effect of fiber surface treatments on mechanical and abrasive wear performance of polylactide/jute composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 1800–1808.

- [80] Huda M. S., Drzal L. T., Mohanty A. K., Misra M., (2008), “Effect of chemical modifications of the pineapple leaf fiber surfaces on the interfacial and mechanical properties of laminated biocomposites”, *Composite Interfaces*, 15, 169–191.
- [81] Cui H., Kessler M. R., (2014), “Pultruded glass fiber/bio-based polymer: Interface tailoring with silane coupling agent”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65, 83–90.
- [82] Zhao D., Hamada H., Yang Y., (2019), “Influence of polyurethane dispersion as surface treatment on mechanical, thermal and dynamic mechanical properties of laminated woven carbon-fiber-reinforced polyamide 6 composites”, *Composites Part B: Engineering*, 160, 535–545.
- [83] Harsha A. P., Tewari U. S., Venkatraman B., (2003), “Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites”, *Wear*, 254, 693–712.
- [84] Barkoula N-M., Karger-Kocsis J., (2008), “Review Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites”, *Journal of Materials Science*, 37, 3807–3820.
- [85] Arjula S., Harsha A. P., Ghosh M. K., (2008), “Solid-particle erosion behavior of high-performance thermoplastic polymers”, *Journal of Materials Science*, 43, 1757–1768.
- [86] Rajesh J. J., Bijwe J., Tewari U. S., Venkataraman B., (2001), “Erosive wear behavior of various polyamides”, *Wear*, 249 (8), 702–714.
- [87] Suresh A., Harsha A. P., Ghosh M. K., (2009), “Solid particle erosion of unidirectional fibre reinforced thermoplastic composites”, *Wear*, 267, 1516–1524.
- [88] Suresh A., Harsha A. P., Ghosh M. K., (2009), “Solid particle erosion studies on polyphenylene sulfide composites and prediction on erosion data using artificial neural networks”, *Wear*, 266, 184–193.
- [89] Suresh A., Harsha A. P., Ghosh M. K., (2010), “Erosion studies of short glass fiber-reinforced thermoplastic composites and prediction of erosion rate using ANNs”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 1641–1652.
- [90] Miyazaki N., Hamao T., (1994), “Solid Particle Erosion of Thermoplastic Resins Reinforced by Short Fibers”, *Journal of Composite Materials*, 28, 871–883.
- [91] Miyazaki N., Takeda N., (1993), “Solid Particle Erosion of Fiber Reinforced Plastics”, *Journal of Composite Materials*, 27(1), 21–31.
- [92] Tewari U. S., Harsha A. P., Häger A. M., Friedrich K., (2002), “Solid particle erosion of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheretherketone composites”, 252, 992–1000.

- [93] Pei X., Friedrich K., (2012), "Erosive wear properties of unidirectional carbon fiber reinforced PEEK composites", *Tribology International*, 55, 135–140.
- [94] Harsha A. P., Jha S. K., (2008), "Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence", *Wear*, 265, 1129–1135.
- [95] Sari N. Y., Sinmazcelik T., Yilmaz T., (2011), "Erosive wear studies of glass fiber- and carbon fiber-reinforced polyetheretherketone composites at low particle speed", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24, 333–350.
- [96] Sharma M., Bijwe J., Singh K., Mitschang P., (2011), "Exploring potential of Micro-Raman spectroscopy for correlating graphitic distortion in carbon fibers with stresses in erosive wear studies of PEEK composites", *Wear*, 270, 791–799.
- [97] Miyazaki N., Hamao T., (1996), "Effect of interfacial strength on erosion behavior of FRPs", *Journal of Composite Materials*, 30, 35–50.
- [98] Barkoula N-M., Karger-Kocsis J., (2002), "Solid Particle Erosion of Unidirectional GF Reinforced EP Composites with Different Fiber/Matrix Adhesion", 21(15), 1377-1388.
- [99] Vigneshwaran S., Uthayakumar M., Arumugaprabhu V., Ramesh A., Muthu Kumar K., Pasupathi K., (2019), "Effect of chemical treatment on erosion properties of jute polyester composites", *AIP Conference Proceedings*, 2057, 020063.
- [100] Souza J. R., Silva R. C. L., Silva L. V., Medeiros J. T. N., Amico S. C., Brostow W., (2015), "Tribology of composites produced with recycled GFRP waste", *Journal of Composite Materials*, 49, 2849–2858.
- [101] Ahsan Q., Lin L. M., Munawar R. F. B., Mohamad N., (2016), "Effect of recycled carbon fiber reinforcement on the wear behavior of epoxy composite", *Journal of Materials Research*, 31, 1900–1907.
- [102] Latiff A. A., Mohamad N., Jeefferie A. R., Nasir M. H. M., Siti Rahmah S., Mahamood M. A., Abdullah M. I. H. C., Ab Maulod H. E., (2016), "Correlation of wear characteristics with hardness of recycled carbon fiber prepreg reinforced polypropylene composites", *Journal of Materials Research*, 31, 1908–1913.
- [103] Tilly G. P., (1969), "Erosion caused by airborne particles", *Wear*, 14, 63–79.
- [104] Debnath U. K., Chowdhury M. A., Nuruzzaman D. M., (2017), "The Experimental Characteristics and Evaluation of Nylon-12 in Erosion Process", *Journal of Testing and Evaluation*, 45(3), 773-787.
- [105] Tilly G. P., Sage W., (1970), "The interaction of particle and material behaviour in erosion processes", *Wear*, 16, 447–465.

- [106] Barkoula N-M., Karger-Kocsis J., (2002), “Effects of fibre content and relative fibre-orientation on the solid particle erosion of GF/PP composites”, 252(1-2), 80-87.
- [107] Harsha A. P., Thakre A. A., (2007), “Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites”, *Wear*, 262, 807–818.
- [108] Zhao G., Hussainova I., Antonov M., Wang Q., Wang T., Yung D. L., (2015), “Effect of temperature on sliding and erosive wear of fiber reinforced polyimide hybrids”, *Tribology International*, 82, 525–533.
- [109] Özzaim P., Korkusuz O. B., Fidan S., Sinmazçelik T., (2002), “Investigation of particle erosion of polytetrafluoroethylene and its composites”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 14644207221081964.
- [110] Ozkoc G., Bayram G., Bayramli E., (2004), “Effects of polyamide 6 incorporation to the short glass fiber reinforced ABS composites: An interfacial approach”, *Polymer*, 45(26), 8957–8966.
- [111] Parsi M., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., McLaury B. S., Shirazi S. A., (2014), “A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 850-873.
- [112] Surampadi N. L., Ramiseti N. K., Misra R. D. K., (2007), “On scratch deformation of glass fiber reinforced nylon 66”, *Materials Science and Engineering A*, 456, 230–235.
- [113] Hamdi M., Zhang X., Sue H. J., (2017), “Fundamental understanding on scratch behavior of polymeric laminates”, *Wear*, 380–381, 203–216.
- [114] Rajesh J. J., Bijwe J., (2005), “Investigations on scratch behaviour of various polyamides”, *Wear*, 259, 661–668.
- [115] Shams S. S., El-Hajjar R. F., (2013), “Effects of scratch damage on progressive failure of laminated carbon fiber/epoxy composites”, *International journal of mechanical sciences*, 67, 70-77..
- [116] Jiang H., Cheng Q., Jiang C., Zhang J., Yonghua L., (2015), “Effect of stick-slip on the scratch performance of polypropylene”, *Tribology International*, 91, 1–5.
- [117] Jiang H., Browning R., Sue H. J., (2009), “Understanding of scratch-induced damage mechanisms in polymers”, *Polymer*, 50, 4056–4065.
- [118] Sinha S. K., Song T., Wan X., Tong Y., (2009), “Scratch and normal hardness characteristics of polyamide 6/nano-clay composite”, *Wear*, 266, 814–821.

- [119] Mindivan F., (2017), “Effect of graphene nanoplatelets (GNPs) on tribological and mechanical behaviors of polyamide 6 (PA6)”, *Tribology in Industry*, 39, 277–282.
- [120] Cheng Q., Jiang H., Li Y., (2020), “Effect of fiber content and orientation on the scratch behavior of short glass fiber reinforced PBT composites”, *Tribology International*, 146, 106221.
- [121] Molazemhosseini A., Tourani H., Naimi-Jamal M. R., Khavandi A., (2013), “Nanoindentation and nanoscratching responses of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica”, *Polymer Testing*, 32(3), 525-534.
- [122] Sambale A. K., Schöneich M., Stommel M., (2017), “Influence of the processing parameters on the fiber-matrix-interphase in short glass fiber-reinforced thermoplastics”, *Polymers*, 9(6), 221.
- [123] Aslan M., Tufan M., Küçükömeroğlu T., (2018), “Tribological and mechanical performance of sisal-filled waste carbon and glass fibre hybrid composites”, *Composites Part B: Engineering*, 140, 241–249.
- [124] Pivdiablyk I., Rozycki P., Jacquemin F., Gornet L., Auger S., (2020), “Experimental analysis of mechanical performance of glass fibre reinforced polyamide 6 under varying environmental conditions”, *Composite Structures*, 245, 112338.
- [125] Grammatikos S. A., Evernden M., Mitchels J., Zafari B., Mottram J. T., Papanicolaou G. C., (2016), “On the response to hygrothermal aging of pultruded FRPs used in the civil engineering sector”, *Materials and Design*, 96, 283–295.
- [126] Malpot A., Touchard F., Bergamo S., (2015), “Effect of relative humidity on mechanical properties of a woven thermoplastic composite for automotive application”, *Polymer Testing*, 48, 160–168.
- [127] Sang L., Wang C., Wang Y., Hou W., (2018), “Effects of hydrothermal aging on moisture absorption and property prediction of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites”, *Composites Part B: Engineering* 153, 306–314.
- [128] Sang L., Wang Y., Wang C., Peng X., Hou W., Tong L., (2019), “Moisture diffusion and damage characteristics of carbon fabric reinforced polyamide 6 laminates under hydrothermal aging”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 123, 242–252.
- [129] Vlasveld D. P. N., Daud W., Bersee H. E. N., Picken S. J., (2007), “Continuous fibre composites with a nanocomposite matrix: Improvement of flexural and compressive strength at elevated temperatures”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 730–738.

- [130] Lei Y., Zhang T., Zhang J., Zhang B., (2021), “Dimensional stability and mechanical performance evolution of continuous carbon fiber reinforced polyamide 6 composites under hygrothermal environment”, *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2126–2137.
- [131] Colucci G., Ostrovskaya O., Frache A., Martorana B., Badini C., (2015), “The effect of mechanical recycling on the microstructure and properties of PA66 composites reinforced with carbon fibers”, *Journal of Applied Polymer Science*, 132(29).
- [132] Arhant M., Lolive E., Bonnemains T., Davies P., (2022), “A study of pure hydrolysis of carbon fibre reinforced polyamide 6 composites tested under mode I loading”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 152, 106719.
- [133] Thomason J. L., (2007), “Structure–property relationships in glass-reinforced polyamide, Part 3: Effects of hydrolysis ageing on the dimensional stability and performance of short glass–fiber-reinforced polyamide 66”, *Polymer Composites*, 28, 344–354.
- [134] Thomason J. L., Ali J. Z., Anderson J., (2010), “The thermo-mechanical performance of glass-fibre reinforced polyamide 66 during glycol–water hydrolysis conditioning”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 820–826.
- [135] Thomason J. L., Ali J. Z., (2009), “The dimensional stability of glass–fibre reinforced polyamide 66 during hydrolysis conditioning”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 625–634.
- [136] Ishak Z. A. M., Berry J. P., (1994), “Hygrothermal aging studies of short carbon fiber reinforced nylon 6.6”, *Journal of Applied Polymer Science*, 51, 2145–2155.
- [137] Valentin D., Paray F., Guetta B., (1987), “The hygrothermal behaviour of glass fibre reinforced Pa66 composites: A study of the effect of water absorption on their mechanical properties”, *Journal of materials science*, 22(1), 46-56.

ÖZGEÇMİŞ

Hürol KOÇOĞLU, 2008 yılında Gönen Anadolu Lisesinden mezun olarak, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başladı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı sene içerisinde Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2015 yılında yüksek lisans derecesini aldı. 2016 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başlayan KOÇOĞLU, 2015 yılından beri Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde, Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Koçoğlu H., Kodal M., Altan M. C., Özçelik B., Özkoç G., (2022), “A new approach for the reuse of scrap carbon fiber in high-added value continuous fiber reinforced composite structures”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 163, 107272.

