

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARBON VE BAZALT TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE  
SİLİSYUM DİOKSİT NANOPARTİKÜL KATKISININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BATUHAN ŞENKAYA**

**DENİZLİ, MAYIS - 2024**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KARBON VE BAZALT TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE  
SİLİSYUM DİOKSİT NANOPARTİKÜL KATKISININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BATUHAN ŞENKAYA**

**DENİZLİ, MAYIS - 2024**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**BATUHAN ŞENKAYA**

## ÖZET

**KARBON VE BAZALT TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE SİLİSYUM  
DİOKSİT NANOPARTİKÜL KATKISININ MEKANİK ÖZELLİKLERE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**BATUHAN ŞENKAYA**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEMAL MERAN)**  
**DENİZLİ, MAYIS - 2024**

Kompozitlerde istenilen mekanik özellikleri sağlamak adına kullanılan takviye elemanının yapısı ve cinsi önem arz etmektedir. En çok kullanılan takviye elemanları ise yüksek performans liflerinden elde edilen dokuma kumaşlardır. Aynı zamanda kompozitten yüksek performans elde etmek için bu takviye elemanlarına ek nanopartiküllerin kullanımı da mevcuttur. Dokuma kumaş yapısının ve malzemesinin farklılaşmasıyla, kullanılan nanopartikülün bu değişimlere etkisi incelenmesi gereken bir konu olmuştur.

Bu çalışmada takviye kumaşı olarak farklı kumaş alan kütlelerinde bezayağı desen karbon dokuma kumaşlar ve aynı kumaş alan kütlelerinde bezayağı desen bazalt dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Nanopartikül olarak ise silisyum dioksit kullanılmıştır. Ardından vakum infüzyon yöntemi ile oluşturulan kompozit parçalar çekme, üç nokta eğilme ve izod darbe deneylerine tabii tutulmuştur.

Yapılan tüm deneylerde silisyum dioksit nanopartikülünün etkisi en iyi, alan kütlesi 200 g olan karbon kumaş takviyelilerde görülmüştür. Bu kumaşlardan yapılan kompozitlerde vakum infüzyon yöntemi, elyaf/reçine arayüzlerinde daha optimum silisyum dioksit bulundurmasına yardımcı olmuştur. Kumaş alan kütlesi 245 g olan karbon kumaşın daha yoğun, 200 g olan bazalt kumaşın ise daha boşluklu kumaş yapısına yapıya sahip olması vakum infüzyon yöntemi ile bu etkinin oluşmamasına neden olmuştur. Silisyum dioksit olmayan karbon kumaşlardan oluşturulan kompozitlerde, alan kütlelerinin artması çekme dayanımını düşürmüş olup eğilme ve izod darbe dayanımını artırmıştır. Dokuma sıklığı arttığı için bu etki gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kompozit, Karbon Kumaş, Bazalt Kumaş, Nanopartikül, Vakum İnfüzyon, Mekanik Özellikler

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SILICON DIOXIDE NANOPARTICLE ADDITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON AND BASALT REINFORCED COMPOSITES**

**MSC THESIS**

**BATUHAN ŞENKAYA**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. CEMAL MERAN)**

**DENİZLİ, MAY 2024**

In composites, the structure and type of reinforcement used to achieve the desired mechanical properties are crucial. The most commonly used reinforcements are woven fabrics made from high-performance fibers. Additionally, the use of nanoparticles in addition to these reinforcements is also available to achieve high performance from the composite. The effect of the nanoparticle used in these changes with the differentiation of woven fabric structure and material has become a subject that needs to be investigated.

In this study, plain weave carbon woven fabrics with different fabric areal weights and plain weave basalt woven fabrics with the same fabric areal weights were used as reinforcement fabrics. Silicon dioxide was used as the nanoparticle. Then, composite parts manufactured by the vacuum infusion method were subjected to tensile, three-point flexural, and Izod impact tests.

In all experiments, the effect of silicon dioxide nanoparticles was observed to be the best in carbon fabric reinforcements with an areal weight of 200 g. The vacuum infusion method in these fabrics helped to have a more optimal amount of silicon dioxide at the fiber/resin interfaces in the composites. The denser structure of the 245 g carbon fabric and the more porous fabric structure of the 200 g basalt fabric prevented this effect from occurring with the vacuum infusion method. In composites made from carbon fabrics without silicon dioxide, an increase in areal weight has reduced tensile strength while increasing flexural and Izod impact strength. This effect was observed because of the increase in weave density.

**KEYWORDS:** Composite, Carbon Fabric, Basalt Fabric, Nanoparticle, Vacuum Infusion, Mechanical Properties

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
TABLO LİSTESİ .....	vii
SEMBOL LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	3
1.2    Tezin Amacı .....	13
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER .....</b>	<b>18</b>
2.1    Takviye Malzemeleri.....	22
2.1.1    Karbon Elyaf.....	29
2.1.2    Bazalt Elyaf.....	38
2.1.3    Cam Elyaf .....	42
2.1.4    Aramid Elyaf.....	47
2.1.5    Nanopartiküller .....	50
2.2    Matris Malzemeleri .....	55
2.2.1    Termoset Matrisler.....	55
2.2.2    Termoplastik Matrisler .....	60
2.3    Polimer Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri .....	63
2.3.1    El Yatırması Yöntemi .....	64
2.3.2    Püskürtme Yöntemi .....	65
2.3.3    Elyaf Sarma Yöntemi.....	67
2.3.4    Vakum İnfüzyon Yöntemi .....	68
2.3.5    Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM).....	70
2.3.6    Pres Kalıplama Yöntemi .....	72
2.3.7    Pultrüzyon Yöntemi .....	74
<b>3. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>76</b>
3.1    Materyallerin Belirlenmesi.....	76
3.2    Kompozitlerin Oluşturulması .....	81
3.3    Çekme Deneylerinin Yapılması .....	95
3.4    Üç Nokta Eğilme Deneylerinin Yapılması.....	98
3.5    İzod Darbe Deneylerinin Yapılması.....	100
<b>4. DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>	<b>102</b>
4.1    Çekme Deneyi Sonuçları.....	104
4.2    Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları .....	109
4.3    İzod Darbe Deneyi Sonuçları .....	114
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>117</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>127</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Global kompozit pazar büyüklüğü (Milyar \$) .....	13
Şekil 1.2: Global kompozit sektöründeki bazı malzemelerin pazar büyüklüğü (Milyar \$) .....	13
Şekil 1.3: Sıcaklığın etkisi ile elyaflardaki dayanımın değişimi.....	16
Şekil 2.1: Kompozit malzeme .....	18
Şekil 2.2: Malzemelerin sınıflandırılması .....	19
Şekil 2.3: Kompozitlerin sınıflandırılması .....	20
Şekil 2.4: Takviye ediciye göre kompozit malzemeler .....	21
Şekil 2.5: Nanopartikül takviyeli kompozitlerin kullanım alanları.....	21
Şekil 2.6: Dokuma yöntemi .....	23
Şekil 2.7: Temel dokuma desenleri .....	23
Şekil 2.8: UD karbon kumaş .....	24
Şekil 2.9: Kıvrım oranı.....	26
Şekil 2.10: Aynı iplik numarası ve aynı sıklığa sahip kumaşlarda desenin kıvrım oranına etkisi .....	28
Şekil 2.11: PAN esaslı karbon elyaf üretimi ve aşamaları .....	30
Şekil 2.12: PAN polimer yapısı .....	31
Şekil 2.13: PAN liflerinde karbonizasyon sonrası nihai karbon elyaf yapısı ...	32
Şekil 2.14: Karbon elyaf fitil (Tow).....	33
Şekil 2.15: Ziftten karbon elyaf üretimi .....	34
Şekil 2.16: Ticari olarak temin edilebilen karbon elyafların karşılaştırılması .....	36
Şekil 2.17: Karbon elyaftan üretilen bazı mamüller .....	37
Şekil 2.18: Bazalt kayacı.....	38
Şekil 2.19: Bazalt elyafın kimyasal yapısı .....	38
Şekil 2.20: Bazalt elyaf üretim hattı.....	39
Şekil 2.21: Bazalt elyaf fitil (Tow) .....	40
Şekil 2.22: Bazalt elyaftan üretilen bazı mamüller .....	42
Şekil 2.23: Cam elyaf üretim hattı .....	45
Şekil 2.24: Cam elyaf fitil (Tow) .....	46
Şekil 2.25: Cam elyaftan üretilen bazı mamüller.....	47
Şekil 2.26: Meta-aramid ve para-aramid kimyasal reaksiyonu.....	48
Şekil 2.27: Kuru jet ıslak çekim metodu ile aramid lifi üretimi .....	48
Şekil 2.28: Aramid elyaf (Tow) .....	49
Şekil 2.29: Aramid elyaftan üretilen bazı mamüller .....	50
Şekil 2.30: Nanopartikül katkılı elyaf/reçine nanokompozit .....	51
Şekil 2.31: Epoksi reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı .....	57
Şekil 2.32: Vinil ester reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı.....	58
Şekil 2.33: Doymamış polye ester reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı ...	59
Şekil 2.34: El yatırması yöntemi.....	64
Şekil 2.35: Püskürtme yöntemi .....	66
Şekil 2.36: Elyaf sarma yöntemi .....	67
Şekil 2.37: Vakum infüzyon yöntemi .....	68
Şekil 2.38: RTM yöntemi.....	71
Şekil 2.39: SMC hazır kalıplama .....	72

Şekil 2.40: BMC hazır kalıplama hamuru .....	73
Şekil 2.41: BMC ve SMC presleme yöntemi.....	73
Şekil 2.42: Pultrüzyon üretim yöntemi .....	75
Şekil 3.1: Karbon elyaf takviye kumaşları.....	76
Şekil 3.2: Bazalt elyaf takviye kumaşı (200 g/m <sup>2</sup> çift yön bazalt kumaş) .....	78
Şekil 3.3: SiO <sub>2</sub> nanopartikülü.....	80
Şekil 3.4: Kesilen kumaşların ölçüleri .....	81
Şekil 3.5: SiO <sub>2</sub> ile reçinenin elle karıştırılması .....	84
Şekil 3.6: SiO <sub>2</sub> ile reçinenin mekanik karıştırılması .....	84
Şekil 3.7: Vakum etüv işlemi .....	85
Şekil 3.8: Köpüksüz reçine karışımı .....	85
Şekil 3.9: Kürlenmiş epoksi parçaları .....	86
Şekil 3.10: Köpüksüz reçine karışımının sistem içerisindeki ilerleyişi .....	86
Şekil 3.11: SiO <sub>2</sub> nanopartikül katkılı epoksi reçine hazırlık süreci .....	87
Şekil 3.12: Kalıp ayırıcı vaks işleminin yapılması.....	88
Şekil 3.13: Sızdırmazlık bandının yapıştırılması .....	88
Şekil 3.14: Kumaşların kalıba yatırılması .....	89
Şekil 3.15: Soyma kumaşının takviye kumaşların üzerine yerleştirilmesi .....	89
Şekil 3.16: Akış filesinin yerleştirilmesi.....	90
Şekil 3.17: Konnektörlerin yerleştirilmesi .....	90
Şekil 3.18: Vakum torbasının ve hortumlarının bağlanması.....	91
Şekil 3.19: Reçine kesme vanaları .....	92
Şekil 3.20: Reçinenin sisteme vakumlanması .....	92
Şekil 3.21: Üretilen kompozit parçalar .....	93
Şekil 3.22: Post-kür işlemi .....	93
Şekil 3.23: Kompozit levhaların su jeti ile kesimi .....	94
Şekil 3.24: Kesilen kompozit levhalar .....	94
Şekil 3.25: ASTM D3039 standardına göre çift yönlü kumaş takviyeli kompozitlerin çekme deneyi numuneleri ölçüsü.....	95
Şekil 3.26: Zımpara kağıdı ve hızlı yapıştırıcı .....	96
Şekil 3.27: Zımparanın çekme deneyi numunelerine sarımı.....	97
Şekil 3.28: ALŞA 60 tonluk çekme test cihazı .....	97
Şekil 3.29: ASTM D790 standardına göre eğilme deneyi numune ölçüleri .....	98
Şekil 3.30: INSTRON marka 8801 model 5 tonluk test cihazı.....	99
Şekil 3.31: ASTM D256 standardına göre izod darbe deneyi numune boyutları.....	100
Şekil 3.32: CEAST RESIL IMPACTOR izod darbe test cihazı .....	101
Şekil 4.1: 200 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları.....	105
Şekil 4.2: Çekme sonrası 200 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler .....	105
Şekil 4.3: 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları.....	106
Şekil 4.4: Çekme sonrası 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler .....	106
Şekil 4.5: 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları.....	107
Şekil 4.6: Çekme sonrası 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler .....	107
Şekil 4.7: SiO <sub>2</sub> nanopartikül oranının çekme dayanımlarına etkisi .....	108
Şekil 4.8: 200 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları.....	110
Şekil 4.9: Eğilme sonrası 200 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler .....	110



Şekil 4.10: 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları.....	111
Şekil 4.11: Eğilme sonrası 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler ....	111
Şekil 4.12: 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları.....	112
Şekil 4.13: Eğilme sonrası 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler.....	112
Şekil 4.14: SiO <sub>2</sub> nanopartikül oranının eğilme dayanımlarına etkisi.....	113
Şekil 4.15: İzod deneyi sonrası 200 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler.....	115
Şekil 4.16: İzod deneyi sonrası 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler.....	115
Şekil 4.17: İzod deneyi sonrası 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler.....	116
Şekil 4.18: SiO <sub>2</sub> nanopartikül oranının darbe dayanımlarına etkisi.....	116
Şekil 5.1: Hatalı parçalar.....	118
Şekil 5.2: Bezayağı desen 200 g/m <sup>2</sup> ve 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaşların yandan görüntüsü .....	119
Şekil 5.3: 200 g/m <sup>2</sup> ve 245 g/m <sup>2</sup> karbon kumaş kompozitlerdeki arayüzler ...	120
Şekil 5.4: 3K (200 tex) karbon ipliğin ve 100 tex bazalt ipliğin karşılaştırılması .....	121
Şekil 5.5: 200 g/m <sup>2</sup> bazalt kumaş kompozitlerdeki arayüzler .....	122

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

Tablo 1.1: Bazı malzemelerin üretimindeki enerji tüketimleri .....	14
Tablo 1.2: Malzemelerin üretiminin küresel ısınmaya etkileri .....	14
Tablo 1.3: Bazı takviye elyaflarının mekanik özellikleri.....	15
Tablo 2.1: Takviye kumaş konstrüksiyonu .....	24
Tablo 2.2: Son işlem sıcaklıklarına göre karbon elyafların sınıflandırılması ...	31
Tablo 2.3: PAN ve zift esaslı karbon elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	35
Tablo 2.4: Karbon ipliğinin numaralandırılması.....	37
Tablo 2.5: Bazalt kayaç kategorileri .....	39
Tablo 2.6: Bazalt elyafın mekanik özellikleri .....	41
Tablo 2.7: Cam elyafların sınıflandırılması .....	42
Tablo 2.8: Cam elyafların kimyasal yapısı .....	44
Tablo 2.9: Cam elyafların mekanik özellikleri .....	44
Tablo 2.10: Para-aramid ve meta-aramid elyafların mekanik özellikleri .....	49
Tablo 2.11: Başlıca nanopartikül üretim yöntemleri.....	52
Tablo 2.12: Kompozit malzemelerde kullanılan bazı nanopartiküller ve kattığı başlıca özellikler .....	54
Tablo 2.13: Başlıca termoset matrislerin mekanik özellikleri .....	60
Tablo 2.14: Başlıca termoplastik matrislerin mekanik özellikleri .....	63
Tablo 2.15: El yatırması yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	65
Tablo 2.16: Püskürtme yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	66
Tablo 2.17: Elyaf sarma yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	68
Tablo 2.18: Vakum infüzyon yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	70
Tablo 2.19: RTM yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	71
Tablo 2.20: Pres kalıplama yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	74
Tablo 2.21: Pultrüzyon üretim yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	75
Tablo 3.1: Karbon elyaf takviye kumaşlarının özellikleri .....	77
Tablo 3.2: Bazalt elyaf takviye kumaşının özellikleri .....	78
Tablo 3.3: Epoksi reçinenin özellikleri .....	79
Tablo 3.4: Sertleştiricinin özellikleri.....	79
Tablo 3.5: SiO <sub>2</sub> nanopartikülünün özellikleri .....	80
Tablo 3.6: Oluşturulan kompozitlerin numune kodları.....	82
Tablo 3.7: Reçine, sertleştirici ve SiO <sub>2</sub> karışım miktarları .....	83
Tablo 3.8: Kompozitlerin yapımında kullanılan kumaşların ölçüleri ve kat sayıları .....	83
Tablo 3.9: Vakum pompasının özellikleri.....	91
Tablo 4.1: Üretilen kompozit parçaların kütlece elyaf/reçine oranı .....	102
Tablo 4.2: Kompozit parçaların çekme, eğilme ve darbe dayanımları .....	103
Tablo 4.3: Çekme deneyi sonuçları.....	104
Tablo 4.4: Üç nokta eğilme deneyi sonuçları.....	109
Tablo 4.5: İzod darbe deneyi sonuçları .....	114
Tablo 5.1: 1000x1000x2,5 mm ölçülerindeki kompozitlerin maliyetleri .....	125

## SEMBOL LİSTESİ

<b><math>\sigma</math></b>	:	Gerilme
<b>E</b>	:	Elastisite modülü
<b><math>\epsilon</math></b>	:	Birim şekil değişimi
<b>F</b>	:	Kuvvet
<b>GO</b>	:	Grafen oksit
<b>K</b>	:	Karbon elyaf iplik numarası (K: 1000 adet karbon filament)
<b>GNP</b>	:	Grafen nanopartikülü
<b>TDKNT</b>	:	Tek duvarlı karbon nanotüp
<b>RTM</b>	:	Reçine transfer kalıplama üretim yöntemi
<b>UD</b>	:	Unidirectional (Tek yön kumaş)
<b>ILSS</b>	:	İnterlaminar kayma dayanımı
<b>UV</b>	:	Ultraviyole
<b>SMC</b>	:	Tabaka kalıplama bileşeni
<b>BMC</b>	:	Toplu kalıplama bileşeni

## ÖNSÖZ

Çalışmaların hayata geçirilmesinde engin bilgisini, kıymetli tecrübesini, yardım ve desteklerini her daim paylaşan değerli danışmanım Prof. Dr. Cemal MERAN'a; deneysel çalışmalarda katkılarını esirgemeyen Arş. Gör. İnan AĞIR'a ve Arş. Gör. Alperen SOYER'e, tez çalışmasında karbon ve bazalt dokuma kumaşların temin edilmesinde kıymetli iş yerim Spinteks Tekstil İnşaat San. ve Tic. A.Ş. ve tüm fertlerine saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Süreç içerisinde değerli tecrübe ve görüşlerini paylaşan Tekstil Yüksek Mühendisi Serdar BAŞEV'e ve desteklerini her zaman arkamda hissettiğim sevgili aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

**Batuhan ŞENKAYA**

# 1. GİRİŞ

İnsanoğlunun, en eski tarihlerden günümüze kadar olan süreçte kullandıkları araçlar ve gereçler sürekli değişim göstermektedir. Bu değişimin sebebi insanların, buldukları zamanda kullanılan ürünlerden istedikleri performans alamamaları ve bu durumun daha ekonomik ve işlevsel ürünlerin aranmasını teşvik etmesidir. Ahşap ve metal bazlı ürünler birçok alanda kullanılırken özellikle 20. yüzyıldan sonra bu ürünlerin yerini kullanım alanına göre polimer ve temelinde iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle elde edilen kompozit ürünler almıştır.

Yerine göre kullanılması zorunluluk haline gelen kompozit malzemelerin en önemli kullanım sebepleri yüksek mukavemet-yoğunluk oranı, korozyon dayanımı ve üretim yöntemlerinin gelişmiş olmasından dolayı istenilen geometride üretilebilmesidir. Bu sebeplerden dolayı havacılık, enerji, endüstriyel ürünler, denizcilik, savunma sanayi, otomotiv, inşaat ve medikal gibi birçok sektöre çözüm olmaktadır. Esasında takviye ve matris diye adlandırdığımız iki farklı malzemenin birleşmesinden oluşan kompozitlerde polimerler hem takviye hem de matris malzemesi olarak kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak karbon ve cam elyaf, matris malzemesi olarak ise reçinelerden vinilester, epoksi ve polyester reçineler en çok kullanılanlardır.

Kompozit malzemelerden elde edilen mekanik özellikleri iyileştirmek adına birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan matris malzemesinin içerisinde kullanılacak ajanlar ve nanoparçacıklar bu yöntemlerden bazılarıdır. Reçine içerisine katılan nanoparçacıklar matris malzemesi ile takviye elemanları arasında daha iyi bir arayüz oluşturmaktadır. Fakat bunun sağlanabilmesi için reçine içerisinde nanoparçacığın homojen bir şekilde bulunması gerekmektedir.

“Nano” kelimesi esasında Yunan kökenli bir kelime olup günümüzde uzunluk birimi olarak kullanılmaktadır ( $10^{-9}$  m). Bu boyuttaki partiküllerin kompozitlerde kullanılması hakkındaki çalışmalar literatürde son 10-15 sene içerisinde artmış olup oluşturulan kompozitlerde ciddi bir şekilde mekanik ve termal özelliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmalar sayesinde ise piyasada daha üstün özellikli malzemeler üretilebilmiştir. Özellikle havacılık ve uzay sanayi, enerji sektörü gibi yeri geldiğinde ekstrem şartlara dayanacak malzemeler piyasada kendine yer bulmuştur.

Tüm bu özelliklerin yanı sıra kompozit yapımında kullanılan karbon, cam, epoksi ve bazı nanopartiküller gibi malzemelerin üretimi esnasında fazla enerji tüketilmesi ve zararlı yan ürünler ortaya çıkması sebebi ile çevreye zarar vermektedir. İnsanoğlunun gelişen dünya ile enerjiye ve çevreye olan duyarlılığın artması, daha çevreci ve az maliyetlere imal edilebilen malzemelere talebi artırmıştır. İstenilen üstün performanstan ödün vermeden bunu başarmak için biyobazlı malzemelerle ilgili çalışmalar son zamanlarda artmıştır ancak bu açıklığı tam olarak dolduramamıştır.

Karbon elyafın üretiminde çok fazla enerji tüketilmesi ve çevreye çok fazla CO<sub>2</sub> gibi zararlı gazların ortaya çıkması yine yüksek mukavemete sahip ama daha çevreci takviye elemanlarına olan ihtiyacı artırmıştır. Bu konuda devreye bazalt elyafın girdiğini söyleyebiliriz. Bazalt elyafın üretiminde karbon kadar enerji tüketilmemesi ve daha az CO<sub>2</sub> açığa çıkması tercih edilmesi için önemli özelliklerdir. Karbon elyaf kadar yüksek mukavemete sahip olmasa da bazalt elyaf, kendine yüksek performans lifleri arasında yer bulmuştur.

İstenilen yüksek performansa sahip kompozit malzemeler, sadece takviye malzemesinin cinsi ile alakalı değil, aynı zamanda nanopartiküllerle iyileştirilmiş matris malzemesi ve takviye elemanının fiziksel şekli ile de alakalıdır. Dolayısıyla kullanım alanına göre karbon elyafa alternatif olacak bazalt elyaf gibi takviye malzemelerinin, daha uygun maliyetlerle avantajlı yönlerinin kullanımı daha çevreci kompozit malzemelerinin oluşturulmasına olarak sağlamaktadır.

## 1.1 Literatür Özeti

Bu çalışmada kompozit sektörü temsilcilerinin ucuz ve çevreye duyarlı hedefleri doğrultusunda ihtiyaç duyduğu, bazalt elyaftan üretilen kumaş takviyeli kompozitler ile dünyada bulunan en kullanışlı malzemelerden biri olan karbon elyaftan üretilen kumaş takviyeli kompozitler karşılaştırılmıştır. Bu hedef doğrultusunda uygun materyaller ve deney parametreleri seçilmiş olup, bu parametrelere bağlı mekanik özellikleri incelemek için çekme deneyi numuneleri, eğilme deneyi numuneleri ve darbe deneyi numuneleri hazırlanmıştır ve testleri gerçekleştirilmiştir.

Karbon elyaf, bazalt elyafa göre hafif ve mukavemeti daha yüksektir. Bu durum karbonun, elyaflar arasında daha çok kullanılmasına yol açmaktadır. Ancak fiyat olarak bazalt elyaf karbon elyaftan avantajlı konumdadır. Bazalt elyafın performansının karbona göre düşük olmasına rağmen diğer elyaf tiplerine göre hatırı sayılır bir yeri vardır. Bu durum bazaltı ucuz, dayanıklı ve çevreye daha duyarlı malzeme yapmaktadır. SiO<sub>2</sub> nanopartikülleri ile kumaş alan kütlesi arasında ilişki olması, aynı zamanda karbon ve bazalt kumaş takviyeli kompozitlere nanopartikülün etkisinin irdelenmesi tez kapsamındaki çalışmalardır.

Demirci ve diğ. (2020), farklı nanopartiküller ile güçlendirilen Bazalt/Epoksi kompozitler hakkında yaptıkları çalışmalarda kütlece %4 SiO<sub>2</sub> içeren Bazalt/Epoksi kompozit numunelerdeki mukavemet artışının, SiO<sub>2</sub> içermeyenlere göre %27,7 ila %29 arasında bir artış olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda 20 J seviyesinde gerçekleştirilen darbe testleri sonucunda SiO<sub>2</sub> katkılı Bazalt/Epoksi kompozitteki yer değiştirmenin 0,0066 mm olarak en düşük yer değiştirmeye sahip olduğunu, SiO<sub>2</sub> katkısız Bazalt/Epoksi kompozitlerdeki yer değiştirmenin 0,0074 mm olarak en yüksek yer değiştirmeye sahip olduğunu söylemişlerdir.

Divya ve Suresha (2021), SiO<sub>2</sub> katkılı epoksi matrisli karbon kompozitlerin özelliklerini inceledikleri çalışmada, SiO<sub>2</sub> katkısız, %0,5 katkılı ve %1,5 katkılı olarak hazırladığı numunelerde çekme dayanımının sırasıyla 518 MPa, 531,5 MPa ve 560,5 MPa olduğunu açıklamışlardır.

Hashim ve diğ. (2019), nano katkılı bazalt kompozitler üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kütlece %5 SiO<sub>2</sub> katkılı ve %25 SiO<sub>2</sub> katkılı numunelerin sırasıyla çekme dayanımlarını 504 MPa ve 640 MPa olarak açıklamışlardır.

Demirci (2020), oluşturmuş olduğu bazalt takviyeli kompozit malzemeler üzerinde düşük hızlı darbe testi gerçekleştirmiştir. 15 J enerji seviyesindeki testlerde kütlece %4 SiO<sub>2</sub> katkılı kompozitlerde SiO<sub>2</sub> takviyesiz kompozitlere göre yer değişme seviyesi 4,87 mm'den 3,54 mm'ye düşmüştür. Aynı zamanda emdiği enerji 13,56 J'den 13,01 J'e düşmüş olup yansıttığı enerji seviyesi ise 1,44 J'den 1,99 J'e çıkmıştır. Dolayısıyla kütlece %4 SiO<sub>2</sub> katkılı bazalt kompozitler katkısız olanlara göre darbe dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Nayak ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmalarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> katkılı cam/epoksi kompozit malzemelerde eğilme dayanımında en olumlu etkiyi SiO<sub>2</sub> partikül katkılı kompozitler göstermiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> katkılı cam/epoksi kompozitlerde 250 MPa olan eğilme dayanımı SiO<sub>2</sub> katkılı cam/epoksi kompozitlerde 290 MPa seviyesine çıkmıştır.

Rostamiyan ve diğ. (2015), çalıştıkları kompozit malzemeler üzerinde SiO<sub>2</sub> ve nanokil takviyesinin kompozitlerdeki mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Testlerde en iyi mekanik özellikleri (488,53 MPa) kütlece %3,5 SiO<sub>2</sub> katkılı kompozitlerde gözlemlemişlerdir.

Tsai ve Cheng (2009), vakum torbalama ile elde ettikleri cam/epoksi kompozit parçalarda silika (SiO<sub>2</sub>) nanopartikülünün etkisini incelemişlerdir. Sırasıyla kütlece %10, %20 ve %30 oranlarındaki nanosilika katkılı cam/epoksi kompozitlerde basma dayanımının sırayla %9, %7 ve %11 artışı gözlemlenmiştir.

Landowski ve diğ. (2017), sırasıyla kütlece %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7 ve %8 SiO<sub>2</sub> katkılı karbon/epoksi kompozitleri vakum torbalama yolu ile elde etmişlerdir. Eğilme dayanımı, kütlece %2'den %5 katkılı kompozitlere gelince maksimum (~640 MPa) değeri vermiş olup %5'den sonra aglomerasyon (yapı içerisinde belirli bölgede partikül toplanması) nedeni ile giderek düşmeye başladığını tespit etmişlerdir.



Gao ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmalarda cam/epoksi kompozit malzemelerde SiO<sub>2</sub> katkısının epoksi ve elyaf arasında oluşacak arayüzü iyileştirdiğini saptamışlardır. Kompozit parçaların kırılma yüzeyleri incelendiğinde, kütlece %1 SiO<sub>2</sub> katkısında camın yüzey modifikasyonu ile epoksi arasındaki bağın kuvvetli olduğu ve arayüz kayma mukavemeti, elyafın reçineden ayrılma enerjisi gibi parametrelerin iyileştiği tespit edilmiştir.

Qin ve diğ. (2015), sırasıyla kütlece %1, %1,3, %1,7 ve %3,4 SiO<sub>2</sub> katkılı hazırlanmış olduğu karbon/epoksi kompozitlerde arayüz kesme mukavemetini (ILSS) en yüksek 52 MPa ile %1,3 SiO<sub>2</sub> katkısında yakalamış olup en düşük kesme mukavemetini ise 35 MPa ile %3,4 SiO<sub>2</sub> katkısında tespit etmişlerdir.

Sarasini ve diğ. (2014), karbon ve bazalt dokuma kumaşlar ile oluşturulmuş epoksi matrisli kompozitlerin darbe davranışlarını incelemişlerdir. Sandviç benzeri 3:7:3 (bazalt, karbon, bazalt) şeklinde hazırlanan kompozit numuneler sadece karbondan yapılan kompozitlere göre darbe enerjisine daha iyi direnç göstermiş olup hasara karşı daha yüksek toleransa sahiptir.

Bashtannik ve diğ. (2003), bazalt elyaf yüzeyini hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile aşındırdıkları deneylerinde, bazalt elyafın yine de matris malzemesi ile yapışma mukavemeti sağladığını raporlamışlardır. Basalt/HDPE kompozitlerde yapılan deneylerde çekme mukavemeti çözeltide aşındırılmadan önce 30,8 MPa, NaOH çözeltisinden sonra 36,3 MPa, HCl çözeltisinden sonra 37,7 MPa çıkmıştır. Deneylerinin sonucunda bazaltın mükemmel bir kimyasal dayanıma sahip olduğunu belirtip HDPE ile bağ kurmak için arayüzün iyileştiğini söylemişlerdir.

Khan ve diğ. (2011), nanokompozit halinde hazırlanan karbon/epoksi kompozitlerde %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında nanokil takviyesi kullanılmıştır. Kompozitlerde en iyi kırılma tokluğu %3 nanokil takviyesindeki karbon/epoksi kompozitlerde saptanmış olup nanokil seviyesi arttıkça kırılma tokluğunun düştüğü gözlemlenmiştir.

Moon ve Kim (2015), 20 nm, 100 nm ve 200 nm boyutlarında TiO<sub>2</sub> katkılı hazırlanan karbon/epoksi kompozitlerde mekanik özellikleri incelemişlerdir. Farklı boyutlarda Titanyum Dioksit (TiO<sub>2</sub>) kullanılan kompozitlerde en iyi çekme mukavemeti 20 nm boyutlarında TiO<sub>2</sub> kullanılan karbon/epoksi kompozitlerde çıkmıştır. 20 nm/karbon/epoksi kompozitlerde çekme mukavemeti 3,5 GPa, katkısız/karbon/epoksi ve 100 nm/karbon/epoksi kompozitlerde 3,2 GPa, 200 nm/karbon/epoksi kompozitlerde ise 2,5 GPa seviyelerinde tespit edilmiştir.

Haque ve diğ. (2003), nanosilikat katkılı cam elyaf takviyeli kompozit numuneler hazırladıkları çalışmalarda kütlece %1 nanosilikat kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda nanosilikat kullanılmayan kompozitlere göre kesme mukavemeti %44, eğilme mukavemeti %24, kırılma dayanıklılığı ise %23 artmıştır.

Liu ve diğ. (2022), SiO<sub>2</sub> nanopartikül etkisini bazalt elyaf takviyeli kompozitler üzerinde denemişlerdir. kütlece katkısız, %0,5, %1 ve %1,5 SiO<sub>2</sub> eklemesi yapılan bazalt kompozitlerde çekme mukavemetleri sırasıyla 404,12 MPa, 543,42 MPa, 618,22 MPa ve 493,23 MPa çıkmıştır. En yüksek çekme mukavemeti %1 SiO<sub>2</sub> katkısında gerçekleşmiş olup SiO<sub>2</sub> oranı daha da artıkça çekme mukavemetinde azalma olduğu saptanmıştır.

Shi ve diğ. (2014), bazalt (BFRP), cam (GFRP) ve karbon (CFRP) kompozitlerin donma-çözünme döngüleri ile dirençlerini araştırmışlardır. Yaklaşık 18 °C ile 9 °C arasında bir çevrimin 3-4 saat sürdüğü testlerde 300 çevrim gerçekleştirilmiştir. Testten önce ve sonra farklı elyaf tiplerinden oluşturulmuş kompozitlerde mukavemet, sadece bazalt takviyeli kompozitlerde değişmemiştir. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler (BFRP), test sonunda normal mukavemetinin %100'ünü kullanabilirken CFRP ve GFRP mukavemetinin sadece %90'ını verebilmişlerdir. Sonuç olarak sıcaklıklarda anlık değişim yaşanan durumlarda ve sabit mukavemet istenen yerlerde bazalt takviyeli kompozit kullanımının daha doğru olacağını bildirmişlerdir.

Chisholm ve diğ. (2005), nanopartikül olarak SiC kullandıkları karbon/epoksi kompozitlerde SiC oranı sırasıyla %0, %1,5 ve %3'tür. Yapılan deneysel sonuçlar ışığında çekme mukavemeti kütlece %0 yani nanopartikül katkısız kompozitlerde 1190 MPa, ağırlıkça %1,5 SiC katkılılarda 1330 MPa, ağırlıkça %3 SiC katkılılarda ise 480 MPa olmuştur. SiC katkısı olmayan kompozitlerden %1,5 SiC katkısı olan kompozit numunelere mukavemet %11,76 artmış olup %3 SiC katkısı olan kompozitlerde ise %60'a yakın bir azalma gerçekleşmiştir.

Anjum ve diğ. (2013), yaptıkları çalışmalarda kütlece %0, %5 ve %7,5 SiO<sub>2</sub> katkılı cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit numuneler hazırlamışlardır. Gerçekleştirilen çekme testlerinde mukavemetleri sırasıyla SiO<sub>2</sub> katkısızlarda 366 MPa, %5 SiO<sub>2</sub> katkılılarda 336 MPa ve %7,5 katkılılarda 291 MPa olarak saptamışlardır. Ağırlıkça %SiO<sub>2</sub> oranı artıkça doğrusal olarak çekme mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Fakat sertlik, eğilme dayanımı ve darbe dayanımında doğrusal bir artış gözlemlenmiştir.

Topkaya ve diğ. (2020), yaptıkları deneysel çalışmalarda farklı oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü katkılı cam, karbon ve aramid kompozit malzemeler hazırlamışlardır. %0,1, %0,2, %0,3 kütlece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılan kompozitlerde cam elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme mukavemeti % 0,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (355 MPa), aramid elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme mukavemeti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkısız (790 MPa) ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme mukavemeti % 0,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (910 MPa) olarak tespit edilmiştir.

Hulugappa ve diğ. (2016), hazırlamış oldukları cam takviyeli kompozit malzemelerde sırasıyla kütlece %5 ve %10 grafit ve SiC kullanmışlardır. Elle yatırma yöntemiyle üretilen numunelerde en yüksek çekme dayanımı ağırlıkça %10 SiC katkılılarda (404,2 MPa) en düşük çekme dayanımı ise %5 Grafit katkılılarda (342,1 MPa) gözlemlenmiştir.

Ying ve Zhou (2013), cam, karbon ve bazalt elyafları farklı sürelerde farklı sıcaklıklarda tutarak çekme dayanımlarını incelemişleridir. Elyaf lar 300 °C’de 6 saat tutulduktan sonra bazalt elyaf in çekme mukavemeti 1530 MPa’dan 1823 MPa’a (%19,15 artış) çıkmıştır. Cam elyaf in çekme mukavemeti 1502 MPa’dan 1388 MPa’a (%7,58 azalış) düşmüştür. Karbon elyaf in çekme dayanımı ise 1721 MPa’dan 1772 MPa’a (%2,96 artış) çıkmıştır. Bu deneyler sonucunda sıcaklığın değişimi ile en iyi performans artışı bazalt elyafta olmuştur.

He ve diğ. (2012), farklı oranlarda CaCO<sub>3</sub>/epoksi/karbon fiber kompozit malzemeler hazırlamışlardır. Takviye ile matris malzemesinin oluşturmuş olduğu arayüzün ne kadar iyi olduğunu gösteren parametre olan katmanlar arası kayma mukavemetinde (ILSS) en iyi değerin kütlice %4 CaCO<sub>3</sub> nanopartikülüne sahip epoksi/karbon kompozitlerde olduğunu saptamışlardır. %4 CaCO<sub>3</sub> partikülüne sahip kompozitlerin kayma mukavemetinde katkısız olanlara göre %36,6 artış gözlemlenmiştir.

Abdi ve diğ. (2018), CaCO<sub>3</sub> nanopartikülünün kullanıldığı Bazalt Fiber/Epoksi kompozitler hazırlamışlardır. Kütlice %0, %1, %3 ve %5 CaCO<sub>3</sub> nanopartikülü kullanılan kompozitlerde sırasıyla çekme mukavemetleri 414,1 MPa, 447,55 MPa, 497,28 MPa, 476,63 MPa çıkmıştır. Çekme dayanımı en iyi %3 CaCO<sub>3</sub> katkılı bazalt fiber/epoksi kompozitlerde elde edilmiştir. Yine aynı şekilde eğilme dayanımı açısından (557,90 MPa) en iyi değ er %3 CaCO<sub>3</sub> katkılı bazalt fiber/epoksi kompozitlerde saptanmıştır.

Rong ve diğ. (2001), Mikro-TiO<sub>2</sub> (44 µm) ve Nano- TiO<sub>2</sub> (10 nm) parçacıklarının epoksi reçinedeki aşınma direnci üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. TiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin epoksi aşınma oranını önemli ölçüde azaltabildiğini, Mikro-TiO<sub>2</sub> partiküllerinin ise bunu başaramadığını raporlamışlardır.

Anbusagar ve diğ. (2015), çalışmalarında nanokil içeriğinin cam elyaf takviyeli kompozitler üzerinde etkisi incelenmişlerdir. Dört farklı nanokil kombinasyonlarında hazırlanan cam elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemesi olarak polyeşter reçine kullanılmış olup el yatırması tekniğı ile üretilmiştir. Çekme dayanımlarının incelendiğı deneylerde, nanokil katkısız numunelerden kütlece %4 nanokil takviyesine geçilince çekme mukavemeti yaklaşık %28 artmış olup %6 nanokil takviyesine geçilince %13 azalmıştır.

Khashaba (2015), yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi matrislerde %1,5 oranında SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül katkılı tabakalı kompozitlerin sönüm davranışlarını incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda SiC katkılı kompozit malzemenin sönüm oranı katkısız kompozite göre %5 oranında iyileşirken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı kompozitin sönüm oranı %7,2 oranında artmıştır.

Bulut ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada bazalt takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde %0,1, 0,2 ve 0,3 oranında GnPs (grafen nanoplate) katkısı kullanarak yapılan deneylerde çekme mukavemeti, doğal frekans ve sönümleme açısından karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan deneylerde 10 tabaka bazalt kullanılmıştır ve epoksi oranı %40 dır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda çekme mukavemeti açısından 240 MPa ile en iyi sonuç %0,1 oranında elde edilmiştir. Katkısız malzemede çekme mukavemeti ise 212 MPa dır. Çekme mukavemeti açısından %0,1 katkılı malzemenin katkısızlara göre %13,5 artış vardır. Sönüm oranları açısından ise en iyi sonuç %0,2 katkı oranında elde edilmiştir. Sönüm oranları GnPs kullanılmayan malzemelerde 0.014 iken %0,2 GnPs kullanılan malzemelerde 0.022 dir. Buna göre katkısız malzemelere göre %56 artış vardır.

Pathak ve diğ. (2016), yapılan eğilme deneyleri çalışmalarında karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde %0,1-0,6 arasında GO (grafen oksit) katkısı kullanılmıştır. En iyi sonuçlar %0,3 oranında tespit etmişlerdir. GO katkısı olmayan deneylerde eğilme mukavemeti 425 MPa iken %0,3 katkısında 710 MPa'dır. Elastisite modülü ise %0,3 katkılı numunelerde 35 GPa olarak bulunmuştur. %0,6 oranında elastisite modülü 28 GPa olarak bulunmuştur.

Bulut (2017), tarafından yapılan çalışmada 200 g/m<sup>2</sup> bezayağı desen bazalt kumaş kullanılmıştır. Kütlece %0, %0,1, %0,2 ve %0,3 grafen nanopartiküller ile takviye ettiği bazalt kompozit parçalarında çekme mukavemetleri sırasıyla 212 MPa, 240 MPa, 224 MPa ve 223 MPa bulunmuştur. Eğilimde dayanımları sırasıyla 210,37 MPa, 273,91 MPa, 262,22 MPa ve 220,56 MPa olup izod darbe dayanımları ise sırasıyla 95 kJ/m<sup>2</sup>, 110 kJ/m<sup>2</sup>, 105 kJ/m<sup>2</sup> ve 82 kJ/m<sup>2</sup> şeklinde bulunmuştur.

Andreozzi ve diğ. (2023) farklı alan kütlelerine sahip dimi 2x2 desenden 380 g/m<sup>2</sup> (12K), 630 g/m<sup>2</sup> (12K) ve 800 g/m<sup>2</sup> (24K) karbon kumaştan yapıkları çalışmalarında en yüksek çekme mukavemeti 1134 MPa şeklinde 380 g/m<sup>2</sup> kumaştan yapılan kompozitlerde çıkmıştır. 630 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşta bu değer 841 MPa olup 800 g/m<sup>2</sup>'de 722 MPa'dır. Kumaş alan kütlelerinin azalmasıyla çekme mukavemetinde doğrusal bir artış olduğunu belirtilmiştir.

Zhou ve diğ. (2021), çalışmalarında 12K karbon elyaftan 400 g/m<sup>2</sup> dimi 2x2, 660 g/m<sup>2</sup> dimi 2x2 ve 660 g/m<sup>2</sup> bezayağı desenlerden üretilmiş kumaşlardan kompozit plakalar yapılmıştır. En yüksek çekme mukavemeti 400 g/m<sup>2</sup> dimi 2x2 desen karbon kumaştan yapılan kompozitlerde çıkmıştır. Bunu sırasıyla 660 g/m<sup>2</sup> dimi 2x2 ve 660 g/m<sup>2</sup> bezayağı karbon kumaş takip etmiştir. Kuru kumaş hallerinde ise kumaşların kıvrım oranı en yüksek 660 g/m<sup>2</sup> bezayağı karbon kumaşta, en düşük ise 400 g/m<sup>2</sup> dimi 2x2 karbon kumaşlarda tespit edilmiştir. Kıvrım oranının artmasının kompozit halde mukavemeti düşürdüğü tespit edilmiştir.

Kösedağ ve diğ (2023), çalışmalarında grafen ve SiC nanopartikül katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Vakum infüzyon tekniği kullanılarak kütlece %0, %0,5, %1 ve %2 oranlarda kompozit plakalar üretilmiştir. Plakaların üretiminde hem 0° hem de 90° elyaf yönelimli UD karbon kumaşlar kullanılmıştır. Katkı oranlarının ve cinsinin etkilerinin incelenmesi için yapılan çekme deneylerinde genel olarak grafen nanopartikülü, SiC nanopartikülünden daha yüksek mekanik özellikler göstermesini sağlamıştır.

Megahed ve diğ. (2018), tarafından yapılan çalışmalarda takviye olarak alt ve üst kısımlarında dokumasız cam keçelerin bulunduğu çift taraflı cam dokuma kumaşlar kompozit yapımında kullanılmıştır. Kütlece %0,5 SiO<sub>2</sub>, %0,5 nanokarbon, %1 SiO<sub>2</sub>, %1 nanokarbon, %0,25 SiO<sub>2</sub> + %0,25 nanokarbon ve %0,5 SiO<sub>2</sub> + %0,5 nanokarbon takviyeler oluşturulan kompozitler içerisinde kullanılmıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda en yüksek çekme mukavemeti kütlece %0,5 oranında nanokarbon bulunan kompozitlerde elde edilmiş olup nanopartikül katkısız kompozitlere nazaran %19 artmıştır. Ancak %0,5 SiO<sub>2</sub> + %0,5 nanokarbon takviyeler sonrasında çekme mukavemeti katkısız halinin bile altına düşerek %12'lik bir azalmaya sebebiyet vermiştir.

Bağatır (2018), tarafından yapılan çalışmalarında karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf kumaşlardan farklı grafen nanopartikül katkısına sahip el yatırması ile kompozit parçalar üretilmiştir. Grafen nanopartikül oranı kütlece %0, %0,2 ve %0,4 şeklinde kullanılmıştır. Çekme deneyi yapılan numunelerde grafen nanopartikül oranının artması mukavemeti de sürekli artırmıştır. Ancak %0,4 grafen nanopartikül oranında çekme değeri en yüksek değeri almasına rağmen %0,2 grafen nanopartikül oranında çıkan çekme değerleri ile çok farklılık göstermediği bildirilmiştir. Farklı malzemelerin kıyaslanmasında grafen nanopartikülünün mukavemetteki artış etkisi en çok karbon elyaf kumaş takviyeli kompozitlerde görülmüş olup en az ise aramid elyaf kumaş takviyeli kompozitlerde gözlemlendiği bildirilmiştir.

Batı (2022), tarafından yapılan çalışmalarda 200 g/m<sup>2</sup> bezayağı desen aramid kumaş kullanılmış olup el yatırması yöntemi ile kompozit numuneler elde edilmiştir. Kompozitlerde nanopartikül olarak kütlece katkısız (%0), %1, %2 ve %3 oranlarında grafen nanopartikül (GNP) ve tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) kullanıldığı bildirilmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda en yüksek çekme mukavemeti %3 GNP takviyeli aramid kompozitlerde çıkmış olup en düşük ise katkısız aramid kompozitlerde çıkmıştır. Ancak en düşük ve en yüksek çekme mukavemetleri arasında sadece %5,7'lik bir fark olduğu tespit edilmiştir. Diğer nanopartikül takviyelerindeki değerler bu %5,7'lik alan içerisinde kalmaktadır.

Umer ve diğ. (2015), tarafından E-Cam 250 g/m<sup>2</sup> 7/1 saten desen cam kumaştan vakum infüzyon yöntemi ile grafen oksit takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Eğilme dayanımlarının incelendiği çalışmalarında grafen oksit oranları kütlece katkısız (%0), %0,05, %0,1 ve %0,2 şeklinde olduğu belirtilmiştir. Eğilme testleri sonucunda %0,2 grafen oksit kullanılan kompozitlerde katkısız kompozitlere göre eğilme modülünde %21, eğilme dayanımlarında %30 artış olduğu tespit edilmiştir.

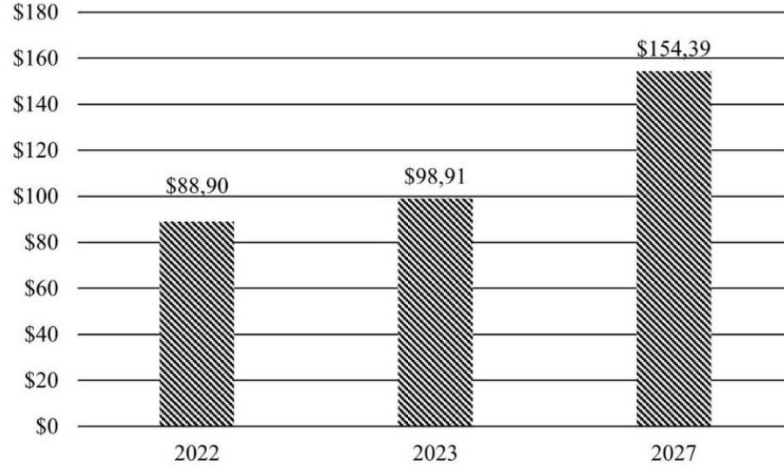
Yukarıdaki literatür çalışmalarında karbon, bazalt ve cam gibi elyaf takviyeli kompozit malzemelerde nanopartikül katkılarının mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Her elyaf tipinde nanopartikül katkısına tepki belirli kütlece orana kadar, mekanik özellikler olarak olumlu yönde olmuştur. Fakat aynı çalışma içerisinde farklı kumaş tiplerinden, farklı kumaş alan kütlelerine sahip takviyelerin de dahil olduğu deney kurgusu ile nanopartikül katkısının etkisinin karşılaştırılmasına çok rastlanılmamıştır. Örneğin bazalt kompozitlerine belirli oranlarda eklenen nanopartikül katkısının, partikül katkısı olmayan karbon kompozitlerle karşılaştırılması gibi çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Aynı şekilde farklı kumaş alan kütlelerine sahip karbon kumaşlardan oluşturulan kompozitlerde nanopartikül katkısının incelenmesine literatürde çok rastlanılmamıştır.

Deney parametreleri, üretim yöntemleri, matris malzemesinin kalitesi, takviye malzemesinin kalitesi, atmosfer ve ortam gibi durumlar kompozitten elde edilecek mukavemete direkt etki etmektedir. Bundan dolayı farklı literatürdeki verilerin karşılaştırılması gerçeğe yakın yorumlar ortaya çıkarmakta kısmen yeterli olmayabilir. Kullanılan takviye elyafı kumaş halinde ise o kumaşa ne kadar fitil bulunduğu, bu fitillerin dokuma sıklığı, sıklığın artması veya azalması ile nanopartikülün etkisinin değişip değişmediği gibi karşılaştırmaların yapıldığı konular mevcut literatür çalışmalarında çok rastlanılmamıştır. Bu sebeplerden dolayı yapılan çalışmalarda, bazalt elyaftan yapılan kompozitlerin karbondan yapılanlara göre kullanılabilirliğine ve SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün kumaş alan kütlesi ile ilişkisine odaklanılmıştır.

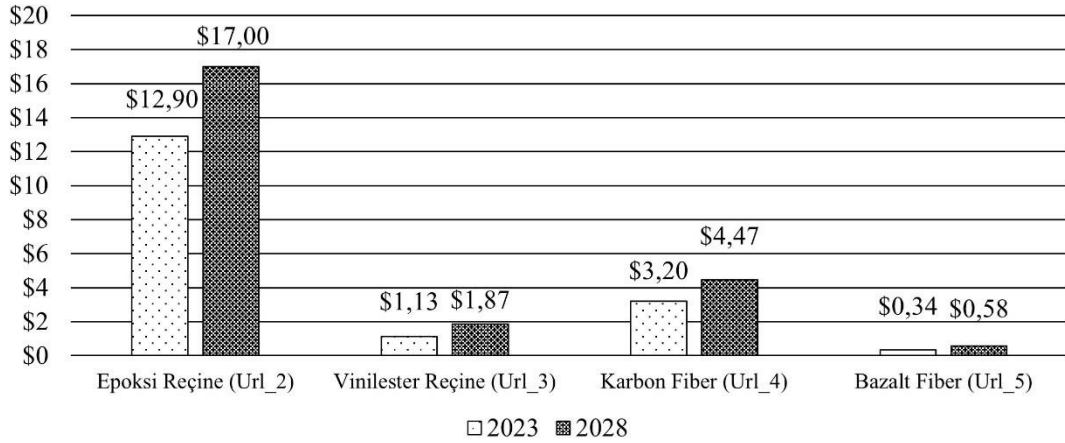


## 1.2 Tezin Amacı

Kompozitlerdeki en önemli takviye malzemelerinden olan karbon ile bazalt kumaşın reçine sistemleriyle kompozit hale getirilip mekanik özelliklerinin tayin edilmesi ve kumaş alan kütesinin mekanik özelliklere etkisinin irdelenmesi bu tezin amaçlarından birisidir. Aynı elyaf farklı gramaj ve aynı gramaj farklı elyaf kumaş takviyesinin yanı sıra mekanik özellikleri geliştirmek için SiO<sub>2</sub> takviye nanopartikülü de kullanılacak olup bazalt ve karbon kumaştan yapılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişim incelenecektir. Sektörde bu malzemelere duyulan üretim ihtiyacı Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de görüldüğü gibi sektörün büyümesi ile beraber artacaktır.



Şekil 1.1: Global kompozit pazar büyüklüğü (Milyar \$) (Url\_1)



Şekil 1.2: Global kompozit sektöründeki bazı malzemelerin pazar büyüklüğü (Milyar \$)

Karbon elyaf ve epoksi reçine gibi polimer esaslı malzemelerin üretiminin artması doğa için tehdit oluşturmakla beraber Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de görüleceği üzere üretiminde harcanan enerji miktarı ve küresel ısınma indeksleri de yüksek malzemelerdir.

**Tablo 1.1:** Bazı malzemelerin üretimindeki enerji tüketimleri

<b>Malzeme</b>	<b>Enerji Tüketimi (MJ/kg)</b>	<b>Referans</b>
Polyester	63-78	Suzuki ve Takahashi (2005)
Epoksi	76-80	Suzuki ve Takahashi (2005)
LDPE	65-92	Patel (1999)
PP	72-112	Patel (1999)
Vinilester	25,7	Ji ve diğ. (2020)
PS	71-118	Ashby (1992)
PLA	33,2	Mahalle ve diğ. (2014)
TPS	15	Mahalle ve diğ. (2014)
Karbon Elyaf	183-286	Suzuki ve Takahashi (2005)
Bazalt Elyaf	18	Fazio (2011)
Keten Elyaf	6,5	Diener ve Siehler (1999)
Alüminyum	196-257	Fitch ve Cooper (2004)
Çelik	30-60	Ashby (1992)
Paslanmaz Çelik	110-210	Ashby (1992)
Bakır	95-115	Ashby (1992)
Çinko	67-73	Ashby (1992)

**Tablo 1.2:** Malzemelerin üretiminin küresel ısınmaya etkileri

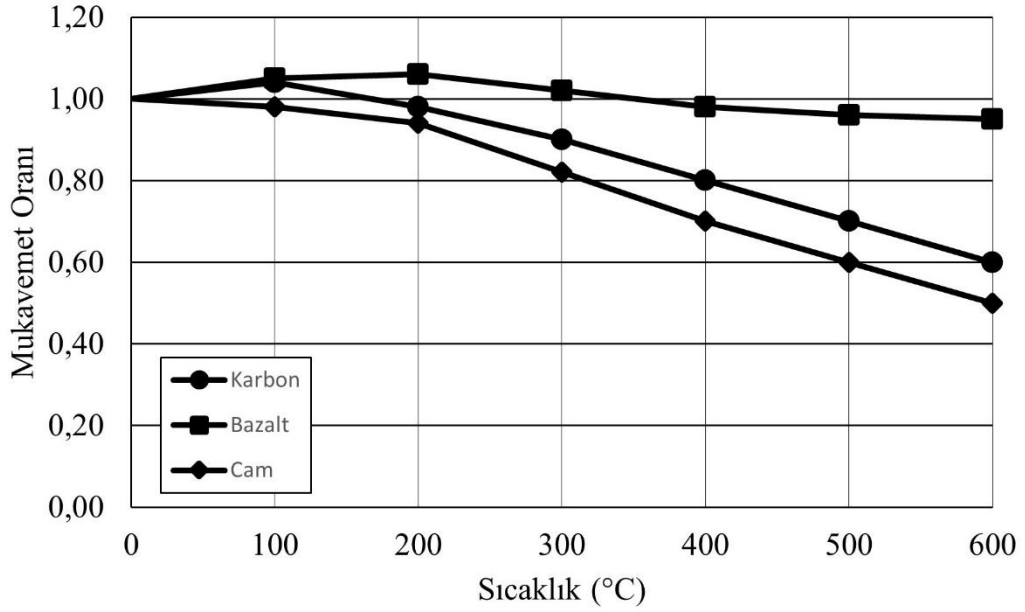
<b>Malzeme</b>	<b>Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO<sub>2</sub>/kg)</b>	<b>Referans</b>
Epoksi	5,9	Boustead (2002)
Karbon Elyaf	31	Das (2011)
Cam Elyaf	2,64	Le Duigou ve diğ. (2011)
Bazalt Elyaf	0,98	Azrague (2016)
Vinilester	4,29	Yılmaz ve diğ. (2022)

Karbon elyaflar sahip olduğu özellikler sayesinde genellikle havacılık sanayi gibi gelişmiş sektörlerde çokça kullanılmaktadır. Fakat hem üretiminde çok fazla enerji harcanması hem de katma değeri yüksek bir elyaf türü olduğu için maliyeti bazalt elyafın maliyetine göre daha yüksektir. Son zamanlarda çevreye daha duyarlı ve ucuz malzemelerden üstün performans elde etme konusu bilim adamlarının dikkatini çekmiştir. Bu konuda devreye bazalt elyafın girdiğini söyleyebiliriz. Kompozitlerde mukavemet-yoğunluk ve diğer özellikler açısından dört elyaf tipi öne çıkmaktadır. Bunlar karbon, cam, bazalt ve aramid elyaflarıdır. Bu elyaflarla ilgili mekanik özellikler ise Tablo 1.3’de verilmiştir.

**Tablo 1.3:** Bazı takviye elyaflarının mekanik özellikleri (Landucci ve diğ. 2009)

<b>Özellikler</b>	<b>Bazalt</b>	<b>E-Cam</b>	<b>S2-Cam</b>	<b>Aramid</b>	<b>Karbon</b>
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,63-2,8	2,54-2,57	2,54	1,45	1,78
Filament Çapı (µm)	6-21	6-21	6-21	5-15	5-15
Çekme Dayanımı (MPa)	3000-4800	3100-3800	4020-4650	2900-3450	3500-6000
Elastisite Modülü (GPa)	93-110	72,5-75,5	83-97	70-140	230-600
Kopma Uzaması (%)	3,1-6	4,7	5,3	2,8-3,6	1,5-2

İyi mekanik özellikler açısından bazalt elyaf, yüksek mukavemetli cam elyaf, aramid ve karbon elyaf gibi elyaflar arasında yer alır. Aynı zamanda bazalt elyafın üretiminde diğerlerine nazaran daha düşük enerji harcanması ve oluşan CO<sub>2</sub> miktarının az olması onu çevre dostu bir elyaf çeşidi yapar. Bazalt fiber diğer adıyla bazalt elyaf, bazalt kayaların ergitilmesiyle elde edilir ve bu özelliklere ulaşması için yanında hiçbir kimyasal katkı maddesi içermez. Termal özelliklerinin çok iyi olması kompozit malzeme haline getirildikten sonra reçinenin yakılarak tekrar bazaltın kullanılmasını sağlar ve geri dönüşümü esnasında özelliklerinde bir kayıp yaşanmaz. Bu durum Şekil 1.3’de gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Sıcaklığın etkisi ile elyaflardaki dayanımın değişimi (Jamshaid ve Mishra 2015)

Karbon ve cam elyaf yaklaşık 600 °C'ye ısıtıldığında mevcut mukavemetlerinin sadece %60'ını kullanabiliyorken bazalt elyafta bu oran %95 seviyelerindedir. Bu özellik bazalt elyafının diğerlerine göre geri dönüşüm konusunda bir adım öne çıkarır. Aynı zamanda kararlı yapıda olması da çevresinde bulunabilecek kimyasallar ile çevreye zararlı tepkimeye girmesini engellemektedir. Bu özellikler bazalt elyafın çevre dostu olduğunu gösterir.

Bazalt elyaf, özellikleri sayesinde geleceğimizin malzemesi olarak kabul edilir. %100 inert bir malzeme olduğu için toksik madde içermez, su ve havayla tepkimeye girmez, yanmaz ve aynı zamanda patlamalara da dayanıklıdır. Ancak bazalt elyafın hammaddesi olan kayaçların uygun kimyasal içerikte bulunma zorluğu ve bu kayaçların tedariki gibi konular dezavantajları arasındadır. Aynı zamanda ergimiş bazalt kayaçlarının homojen bir karışım halinde tutulma zorluğundan kaynaklı dünyada kullanılan takviye malzemelerine bakılınca bazalt elyaftan yararlanma girişimleri cam ve karbondan daha azdır. Bazalt, alkali dayanım olarak öne çıktığı için en çok kullanıldığı sektör inşaat sektörüdür. Fakat bazalt elyafın özelliklerinden gelecekte daha farklı sektörlerde de yararlanılması beklenmektedir. Üretim olarak genellikle Orta Asya, Rusya ve doğu ülkelerinde üretilen bazaltın, üretim teknolojisi yayıldıkça ve karbon, cam gibi elyaf tiplerinin üretim teknolojisine yaklaştıkça kullanım alanları da artacaktır (Jamshaid ve Mishra 2015).

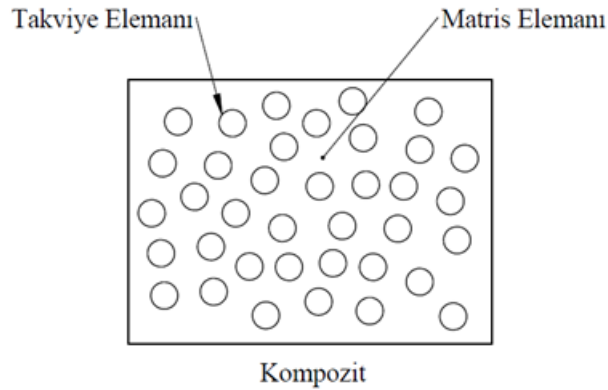
Bu tez kapsamında kumaş hali kullanılan bazalt elyaf, sayılan özellikleri sayesinde çevreye duyarlı hale gelmektedir. Karbon elyaf gibi daha gelişmiş sektörlerde kullanımı az olan bazalt elyafın epoksi reçine ile oluşturdukları kompozitleri karbon kompozitler ile tezde karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda farklı kumaş alan kütlelerindeki karbon kumaşların kompozit haldeki mekanik özelliklere etkisi SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ile beraber irdelenmiştir. Karbon ve bazalt kumaştan oluşturulan kompozit malzemeler maliyet, mukavemet ve kullanım alanları gibi parametrelerde incelenmiştir. Buradaki temel amaç, SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün kumaş tipi ve elyaf cinsi ile nasıl davrandığının mekanik özelliklere dayanarak yorumlanmasıdır.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin makro, mikro veya nano ölçekte birleştirilmesiyle oluşturulan yapı veya parçalar olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla birleştirilen malzemeler kendilerine has özelliklerini korumaya devam eder ve kimyasal olarak bir değişime uğramaz. İnsanoğlunun kullanmış olduğu mühendislik malzemelerinden daha üstün özellikler istemesi sonucu ortaya çıkmaya başlayan kompozit malzemelere tarihsel açıdan çamur ve samanın iyi bir şekilde karıştırılmasıyla ortaya çıkan kerpiç evler örnek verilebilir. Bu örnekten de anlaşılacağı gibi kompozit malzeme elde etmekteki amaç;

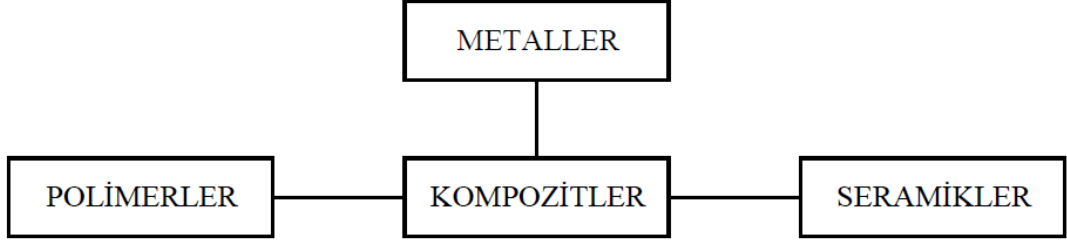
- Korozyon Dayanımı
- Mukavemet
- Hafiflik
- Estetik Görünüm
- Termal ve Isı Dayanımı
- Elektrik İletkenliği
- Akustik Özellikler
- Maliyet

gibi unsurların iyileştirilmesidir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kompozitler esasında iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar takviye ve matris elemanlarıdır. Verilen örnekte saman takviye, çamur ise matris elemanı olarak düşünülebilir.



Şekil 2.1: Kompozit malzeme

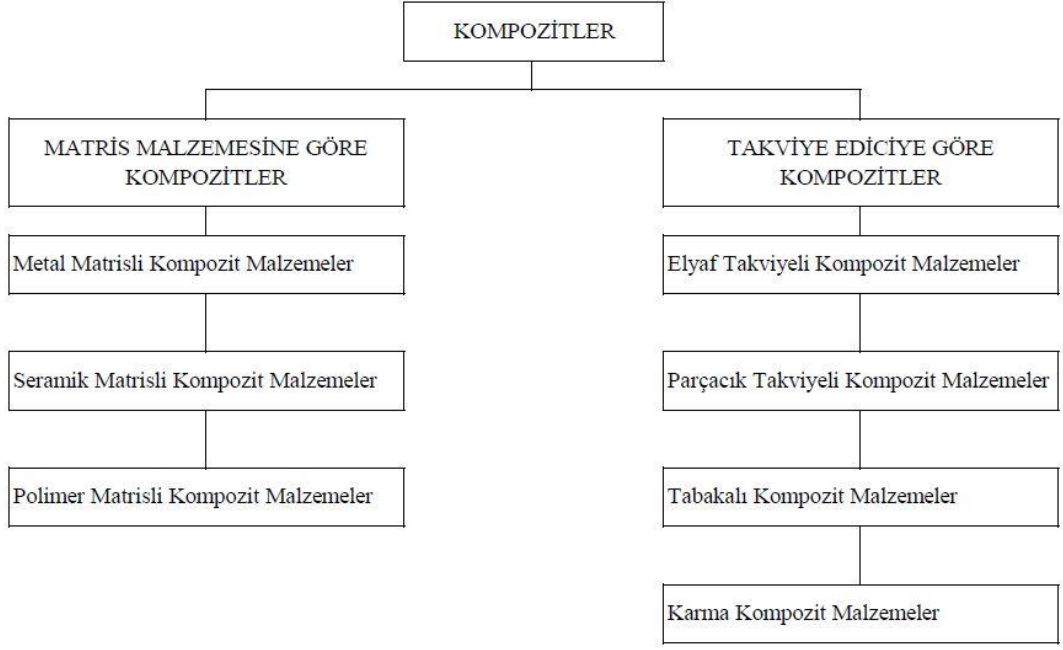
Malzemeler esasında metaller, seramikler ve polimerler olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Kullanıldıkları alanlara göre üstün veya zayıf yönleri bulunan malzemelerin zayıf yönlerini olabildiğince bertaraf etmek için bu malzemeler kompozit malzemelere çevrilebilir. Dolayısıyla Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kompozit malzemeler bu üç ana başlığın kesişim noktasında bulunurlar.



Şekil 2.2: Malzemelerin sınıflandırılması (Kaya 2016)

Kompozitlerde takviye ve matris elemanı olarak seramikler, polimerler ve metaller kullanılabilir. Fakat istediğimiz özelliklerde bir kompozit malzemeyi elde edebilmek için bahsi geçen malzemeleri birleştirmek yeterli olmaz. Kompozite gelecek yükün düzgün bir şekilde karşılanabilmesi için takviye elemanı ve matris arasında uygun bir arayüzey oluşturulması şarttır (Qu 1993).

Takviye fazının esas amacı, parçaya gelen yükleri düzenli bir şekilde paylaşarak karşı koymaktır. Matris malzemesinin amacı ise takviye elemanlarını bir arada tutmak ve gelen yükleri kendi üstünde biriktirmeyip arayüzey vasıtasıyla takviye elemanlarına taşımaktır. Dolayısıyla düzgün oluşturulmayan bir arayüz ile yükler takviye elemanına istenildiği gibi ulaştırılamaz ve takviye elemanından nispeten daha düşük mukavemete sahip matris malzemesinin yapısal bütünlüğünün kaybolmasına neden olur. Yine aynı şekilde gereğinden fazla veya eksik takviye/matris oranı, kompozit parçanın istenilen özelliklere sahip olmamasına sebep olur. Bu yüzden kompozit malzemenin dayanıklılığı hem arayüzey bağının istenilen şekilde olmasına hem de doğru takviye/matris oranına sahip olmasına bağlıdır (Qu 1993). Kompozit malzemeler Şekil 2.3’de görüldüğü gibi matris malzeme yapısına göre ve takviye ediciye göre iki sınıfta incelenebilir.

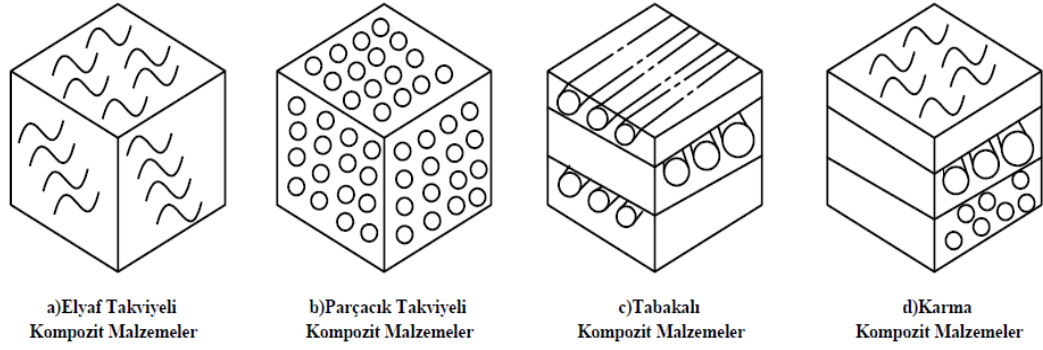


Şekil 2.3: Kompozitlerin sınıflandırılması (Kaya 2016)

Metal matrisli kompozit malzemeler, matris malzemesinde çeşitli metal veya alaşımlarının bulunduğu malzemelerdir. Takviye fazında bulunan malzemeler ise seramik gibi malzemeler olabilir. Örneğin seramiklerin takviye elemanı olarak kullanılıp yüksek elastisite modülü kazanılıp, metal matris sayesinde de gerekli süneklik kompozit malzemeye verilebilir. Böylelikle üstün özellikli malzemeler ortaya çıkar (Vasiliev ve Morozov 2001).

Seramik matrisli kompozit malzemeler yüksek sıcaklıkta çalışılan ortamlar için birebirdir. Hafif olmaları gibi iyi özellikleri olsa da düşük sünekliğe sahiptirler. Bu özellikleri geliştirmek için liflerle takviye edilebilirler. Ayrıca çok iyi elektriksel yalıtım özellikleri gösterir (Seydibeyoğlu 2012). Polimer matrisli kompozit malzemeler, piyasada en çok kullanılan ve karşılaşılan kompozit malzemelerdir. Polimer esaslı oldukları için korozyona son derece dayanıklı ve takviye türüne göre de yüksek mukavemet elde edilebilmektedir. En iyi özellikleri mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olmasıdır. Petrol esaslı malzemelerden elde edildikleri için üretiminde çevreye zarar vermektedir. Termoset bazlı türlerinde ise geri dönüşümü mümkün değildir (Vasiliev ve Morozov 2001).





Şekil 2.4: Takviye ediciye göre kompozit malzemeler (Url\_6)

Kompozitler, takviye edilme türüne göre Şekil 2.4'deki gibi dört şekilde incelenebilmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler karbon, cam, bazalt vb. elyafların düzenli veya düzensiz olarak matris malzemesinde bulunduğu kompozit tipleridir. Genellikle kumaş tipteki takviye elemanları gerekli hesaplamalar sonucu matris içerisinde düzenli bir şekilde konumlandırılabilir. Parçacık takviyeliler metal tozlarının veya nanopartiküllerinin matris içerisinde bulunduğu yapılardır. Tabakalı kompozitlerde, farklı tipteki kompozit malzemeler tabaka halinde yerleştirilir. Buna en güzel örnekler sandviç kompozit yapılardır. Karma kompozit malzemeler ise hem nanopartikül yapıdaki takviye elemanlarının hem de elyaf veya kumaş tipteki takviye elemanlarının bir arada matris içerisinde bulunduğu yapılardır (Kaya 2016). Gelişen teknoloji ile birlikte kompozitlerde nanopartikül kullanımı artmış ve daha ucuza imal edilme fırsatı doğmuştur. Nanopartikül kullanımı ile normal elyaf takviyeli kompozitlerin eksik kalan veya artırılması düşünülen özellikleri geliştirilmektedir. Bu sayede Şekil 2.5'de gösterilen sektörlerde kullanım alanı artmaktadır.



Şekil 2.5: Nanopartikül takviyeli kompozitlerin kullanım alanları (Şen ve diğ. 2010)

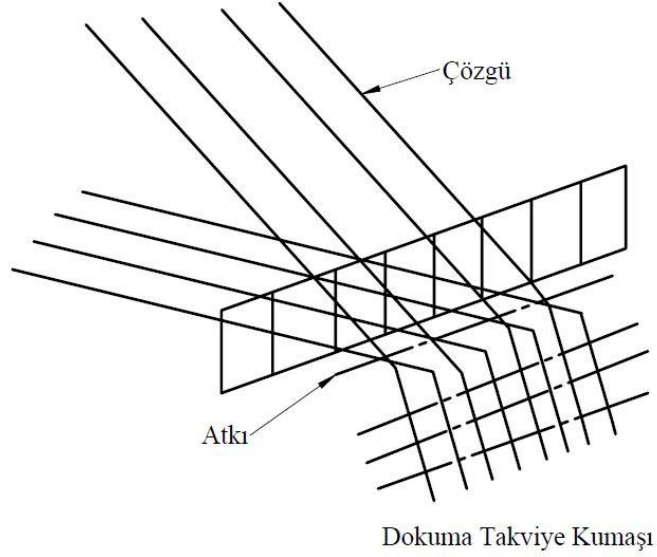
## 2.1 Takviye Malzemeleri

Takviye elemanları, oluşturulacak olan kompozit ürün veya parçanın esas mukavemetini veren, darbe ve yüklemelere karşı dayanması beklenen malzemelerdir. Lif ve parçacık şeklinde iki grupta incelenen takviye elemanlarından beklenen dayanımın sağlanması matris ile oluşturdukları arayüze bağlıdır. Aynı zamanda takviye elemanı ile matris malzemesinin ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyum kalıcı yapısal gerilmelerin oluşmaması açısından son derece önemlidir.

Lif yapısında bulunan takviye elemanlarından en bilindikleri karbon, cam, bazalt ve aramid gibi liflerdir. Parçacık takviye olarak ise SiO<sub>2</sub>, grafen ve metallere elde edilen partikülleri sayabiliriz.

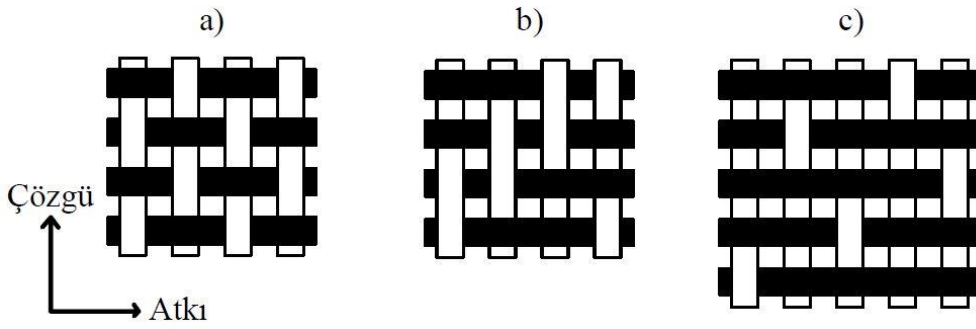
Kompozit sektöründe lifler yani elyaflar hammadde olarak farklı şekillerde kullanılabilir. Filament sarma, pultrüzyon ve preform yapı oluşturmada fitil hali, matris katkıları için toz hali ve vakum infüzyon, RTM vb. üretim yöntemlerinde ise kumaş hali kullanılmaktadır. Oluşturulacak kompozit parçadan alınacak mekanik özellikler takviye/matris malzemelerinin bulunma oranları ile ilişkilidir. Takviye ve matris malzemesinin kullanılmasında ideal bir oran belirlenmelidir. Eğer takviye malzemesi çok fazla ise matris, takviyeleri bir arada tutmak için yetersiz kalır. Aynı şekilde matris malzemesi çok fazla ise esas mukavemeti sağlayacak takviye malzemesi yükü karşılamakta yetersiz kalır. Fakat aynı takviye ve matris malzemesinin aynı oranda ve aynı şartlarda kullanıldığı kompozitlerde mekanik özelliklerdeki değişim kullanılan takviye malzemesinin şekline, kumaş halinde ise kumaş yapısına bağlıdır.

Kompozit takviye kumaşları dokuma, örgülü örme ve dokumasız (unwoven) yüzey üretme yöntemi ile üretilir. Dokuma yöntemi, birbirlerine paralel olarak konumlandırılan örgü ipliklerinin (0°) arasından, atkı ipliklerinin (90°) dik olarak geçmesine dayanan bir yöntemdir ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Var 2021).



**Şekil 2.6:** Dokuma yöntemi (Başev 2022)

Çözü yönü kumaş uzunluğu, atkı yönü de kumaşın genişliğini ifade etmektedir. Dokuma kumaş üretim yöntemi ile Şekil 2.7’de gösterilen üç temel desen üretilebilir. Bunlar bezayağı (plain), dimi (twill) ve saten desenlerdir. Bu desenlerin türevleri olarak adlandırılan kumaş tipleri de mevcuttur. Bu tiplerin en bilineni ve piyasada da sıklıkla bulunanı UD (unidirectional, tek yön) kumaşlardır (Başev 2022).



**Şekil 2.7:** Temel dokuma desenleri a) Bezayağı, b) Dimi, c) Saten (Başev 2022)

UD kumaşlarda, ana iplik malzemesini desteklemek amacıyla atkı yönünde ince bağlayıcı bir iplik daha bulunur. Örneğin Şekil 2.8’de gösterilen UD kumaşlarda çözü yönünde karbon, atkı yönünde ise karbon elyafları bir arada tutmaya yarayan ince bir iplik bulunur. Bu kumaşlarda dokuma deseni yine bezayağı desendir ancak UD diye adlandırılmaktadır (Başev 2022).



**Şekil 2.8:** UD karbon kumaş

Kumaş takviyeli kompozit parçalarda ortaya çıkacak mekanik özellikler, Tablo 2.1’de tanımlanan takviye kumaşının konstrüksiyonu (elyaf malzemesi, iplik numarası, sıklık, desen, kumaş alan kütlesi) ile son derecede ilişkilidir (Kim ve Ye 2012). Dolayısıyla amaçlanan özellikte kompozit üretimi için kumaş yapısındaki parametrelerin ne olacağına doğru belirlenmesi gerekmektedir.

**Tablo 2.1:** Takviye kumaş konstrüksiyonu (Kim ve Ye 2012)

<b>Özellik</b>	<b>Açıklama</b>
Elyaf Malzemesi	Kumaşta bulunan ana materyalin cinsini belirtir (karbon, bazalt, cam vs.)
İplik Numarası	Kullanılan ipliğin veya fitilin belirli uzunluktaki kütlesini ifade eder (3K, 6K, 100 tex, 200 tex vb.)
Sıklık	Kumaştaki atkı ve çözgü ipliklerinin belirli uzunlukta bulunma adetini temsil eder ( $5 \text{ cm}^{-1}$ , 20 adet/10 cm vb.)
Desen	Kumaş desenini belirtir (bezayağı, dimi 2x2, 4/1 saten, vb.)
Kumaş Alan Kütlesi	Sıklık ve iplik numarası verileri ile oluşturulan kumaşın kütlesi belirlenir. Genellikle birimi $\text{g/m}^2$ ’dir.

Dokuma kumaş konstrüksiyonunda bilinmeyen parametreler (2.1) eşitliği ile hesaplanabilir (Başev 2022).

$$KAK = AS \times \dot{I}N + \dot{C}S \times \dot{I}N \quad (2.1)$$

KAK : Kumaş Alan Kütlesi (g/m<sup>2</sup>)

AS : Atkı Sıklığı (cm<sup>-1</sup>, adet/cm)

ÇS : Çözü Sıklığı (cm<sup>-1</sup>, adet/cm)

İN : İplik Numarası (tex, g/km)

Örneğin, atkı ve çözgü sıklığı 5 cm<sup>-1</sup> olan ve 100 tex herhangi bir takviye elyafından üretilen kumaş için alan kütlesi hesaplama;

$$KAK = \left( \frac{5}{0,01 \text{ m}} \cdot \frac{100 \text{ g}}{1000 \text{ m}} \right) + \left( \frac{5}{0,01 \text{ m}} \cdot \frac{100 \text{ g}}{1000 \text{ m}} \right)$$

KAK = 100 g/m<sup>2</sup>'dir.

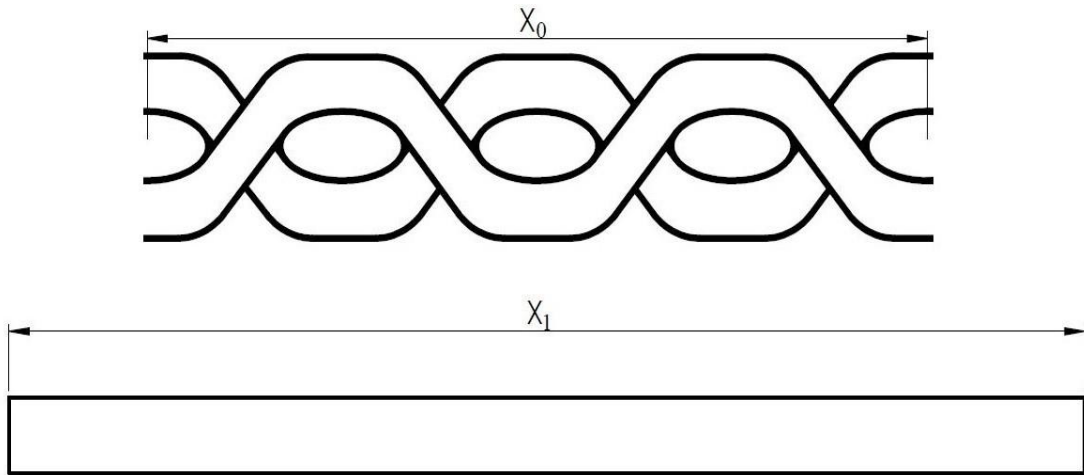
Dokuma makinesinin üretim şartlarına bağlı olarak (2.1) eşitliğinden anlaşılacağı üzere sıklığın artması aynı iplik numarasında kumaş alan kütlesinin artmasına sebebiyet verir. Eğer iplik numarası yüksek, yani ağır bir elyaf kullanılıyor ise nispeten düşük sıklıklarda da yüksek kütleli kumaşlar üretilebilir. Aynı iplik numarası ve desene sahip kumaşlardan yapılan kompozitlerde, kumaş sıklığının artması yük transferine olanak veren daha fazla elyaf/reçine arayüze oluşumuna sebebiyet verir (Houshyar ve diğ. 2005). Ancak her açıdan eşit iki kompozit malzemeyi mukavemet açısından kıyaslayabilmemiz için takviye/matris oranı aynı olmalı dolayısıyla kompozitin kesit alanında eşit miktarda elyaf olmalıdır. Sıklığı fazla olan kumaştan az katlı kompozit yapı, sıklığı az kumaştan çok katlı kompozit yapılar kesitte eşit miktarda elyaf sağlayabilir.

Kumaş konstrüksiyonun kompozit malzemeye etkisi anlamında, elyaf malzemesinin mukavemeti yüksek ise kompozit halinde de yüksek mekanik özellikler göstermektedir.

İplik numarası, kullanılan takviye lifinin kütlesi ile ilişkili bir parametredir. Aynı malzemeden elyaflarda, bir iplikte kaç adet filament bulunduğu göre iplik numarası değişmektedir. Eğer iplikte bulunan elyaf malzemesinin üretim şartları aynı ise çıkan nihai ürünün de mukavemeti aynı olur. Ancak kumaş konstrüksiyonunu belirleyen diğer parametrelerden olan sıklık ve desenin etkisi, oluşturulacak kompozitin mekanik özelliklerinde değişikliğe sebebiyet vermektedir.

### ***Dokuma Kumaşlarda Sıklığın Kompozitteki Mukavemete Etkisi***

Aynı iplik numarasına sahip aynı desenlerdeki kumaşlarda sıklığı artırmak kıvrım oranının artmasına sebebiyet verir. Kıvrım oranı, dokuma kumaş içerisinde ölçülen iplik uzunluğunun normalde kullanılan ipliğin gerçek uzunluğu ile ilişkisi olarak tanımlanabilir. Çözümlü iplikleri atkı iplikleri üzerinden atlarken kıvrılırlar. Bu kıvrılmadan kaynaklı iplik, kumaş içerisinde normalinden kısa görünmektedir. Bu durum Şekil 2.9'da gösterilmiş ve (2.2) eşitliğinde verilmiştir (Zhou ve diğ. 2021).



**Şekil 2.9:** Kıvrım oranı (Zhou ve diğ. 2021)

$$k = \frac{x_1 - x_0}{x_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

k : Kıvrım Oranı (%)

x<sub>1</sub> : İpliğin Normal Uzunluğu (m, cm, mm...)

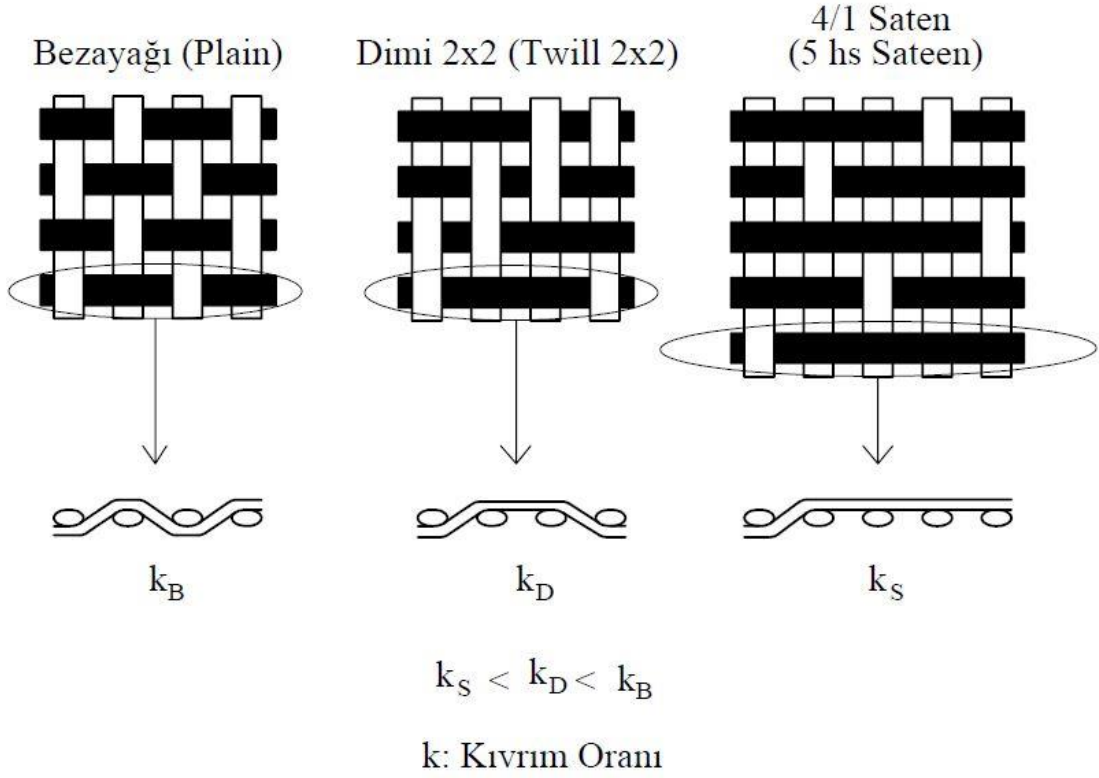
x<sub>0</sub> : İpliğin Kumaşta Görülen Uzunluğu (m, cm, mm...)

Kıvrım oranının artması kumaş içerisinde elyafların daha çok kıvrılması anlamına gelir ve oluşturulacak kompozit malzemelerde bu sebepten dolayı çekme mukavemetini düşürmektedir. Çekme yükü, elyafların doğrusal ilerlememesinden kaynaklı kompozitin iç yapısında da doğrusal bir şekilde karşılanamaz (Ahmad ve diğ. 2021).

Sıklıktan kaynaklı kıvrım oranının artması eğilme dayanımını artırır. Bunun sebebi kıvrım oranı yüksek kumaşlarda çözgü ve atkı ipliklerinin temas yüzeyinin fazla olmasıdır. Dolayısıyla kompozitin iç yapısındaki sürtünme direnci fazladır ve eğilme anında dayanımı da artırmaktadır. Darbe dayanımı da yine aynı şekilde sıklıktan kaynaklı kıvrım oranı artıkça artmaktadır. Atkı ve çözgü ipliklerinin atlama noktasının artması o bölgelerde daha fazla enerji emileceğini göstermektedir (Ahmad ve diğ. 2021).

### ***Dokuma Kumaşlarda Desenin Kompozitteki Mukavemete Etkisi***

Kompozit takviye kumaşlarında en çok kullanılan desenler bezayağı, dimi 2x2 ve 4/1 saten desenlerdir. Aynı iplik numarasına ve sıklığa sahip farklı desenli kumaşlarda farklı kıvrım oranları olabilir. Bu da oluşturulacak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Kompozit kumaş konstrüksiyonlarında eğer iplikler olabildiğince düz bir yol izliyor yani düşük kıvrım oranına sahip ise çekme mukavemetinin artması beklenir. Bezayağı, dimi 2x2 ve 4/1 saten desenlerin yapıları Şekil 2.10'da verilmiştir.



**Şekil 2.10:** Aynı iplik numarası ve aynı sıklığa sahip kumaşlarda desenin kıvrım oranına etkisi

4/1 saten (5 hs sateen) ve dimi 2x2 (twill 2x2) desende atkı veya çözgü ipliği kendisine dik kesişen daha fazla iplik üzerinden atlamaktadır. Bu durum aynı iplik numarası ve sıklığa sahip kumaşlarda kıvrım oranını ve açısını düşürerek çekme mukavemetini artırmaktadır. Aynı zamanda bezayağı desenlerde bağlantı bölgelerinin (atkı ve çözgü ipliklerinin birbirleri üzerinden atladığı bölge) diğer desenlerden nispeten fazla olması kompozit halde iplikler arasında hava hapsedme ihtimalini artırmaktadır. Dolayısıyla bu durum mukavemette düşüşe sebebiyet vermektedir (Houshyar ve diğ. 2005). Ancak üretimden kaynaklı 4/1 saten ve dimi 2x2 desende bağlantı bölgelerinin kompozit içerisinde düzensiz şekilde bulunması, o bölgeleri matris malzemesi zengin bölgeler haline getirebilmektedir (Rouf ve diğ. 2017). Kompozit içerisindeki kumaş katmanlarında, üretimden dolayı bu düzensizliklerin fazla olması mukavemeti düşürebilmektedir (Chairman ve diğ. 2021).



UD (unidirectional, tekyön) kumaşlarda elyaflar olabildiğince düşük kıvrım oranına sahip, doğrusal bir şekilde kumaş içerisinde yer aldığı için çözgü doğrultusunda bezayağı, dimi 2x2 ve 4/1 saten kumaşlardan daha yüksek çekme mukavemeti gösterir (Ahmed ve diğ. 2020). Ancak atkı yönünde bağlayıcı olarak kullanılan ince ipliğin mukavemet açısından bir etkisi olmadığından atkı yönünde alınacak çekme mukavemeti kullanılan matris malzemesi ile neredeyse aynıdır. Eğilme dayanımında ise parça üst yüzeyinde bası, alt yüzeyinde çeki gerilmeleri oluşur. Eğer UD kumaştan oluşturulan kompozit parçada elyaf yönelimi, eğilmedeki çeki ve bası yüklemeleri doğrultusunda ise bu yüklemeler kıvrımsız elyafları kopartmaya zorlanacağı için eğilme dayanımı bezayağı, dimi 2x2 ve 4/1 saten kumaşlardan daha yüksek çıkmaktadır. Ancak çeki ve bası gerilmelerine dik bir elyaf yönelimi olur ise eğilme dayanımı düşük olur.

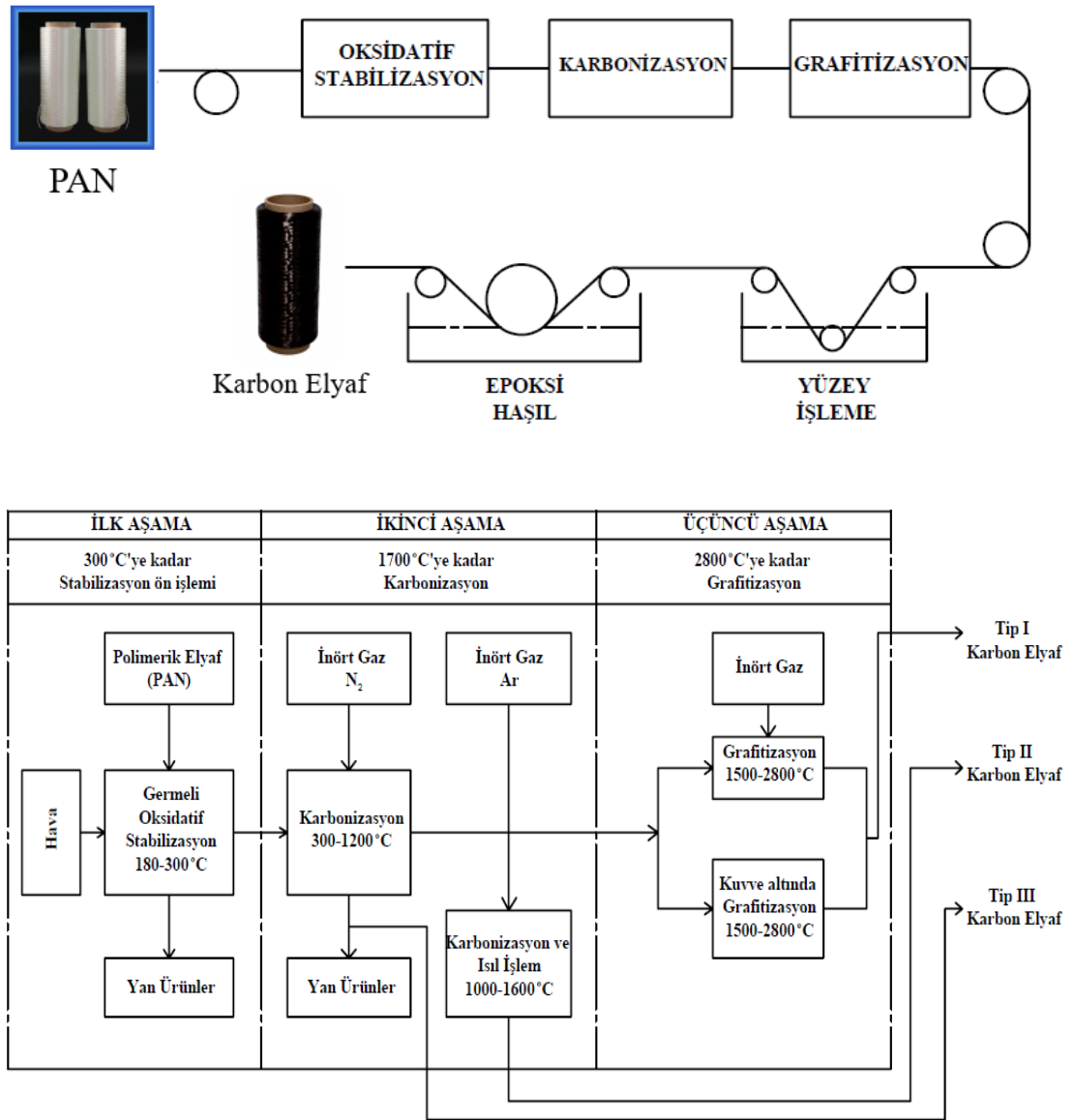
Oluşturulacak kompozit parçada takviye olarak kumaşların tercih edilmesi, esasında birçok etkenin de irdelenmesi anlamına gelmekte ve istenilen performansa göre bu hususların belirlenmesi, kompozitten alınacak performans için son derece önemlidir.

### **2.1.1 Karbon Elyaf**

Kompozit yapılarda en çok aranan unsur olan hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerini tam anlamıyla taşıyan ve en kritik yapılarda da kullanılan karbon fiberler tarihsel açıdan ilk olarak 1879'da kullanılmıştır. En az %90 karbon oranına sahip elyaflara tanım olarak karbon elyaf denir ve ilk olarak Edison tarafından üretilmiş olup elektrik ampullerinde kullanılabileceğini almış olduğu patent ile göstermiştir. İlk lif yapısı ise 1889 yılında oluşturulmuştur (Hoque ve diğ. 2001).

Karbon fiber bir diğer tabiri ile karbon elyaflar, esasen organik temelli polimer yapıdaki elyafların ısıtılmasıyla karbon dışındaki atomların uzaklaştırılması ile üretilir. Ancak bu şekilde üretilen filamentlerde amorf bölge fazla olmakta ve kristalizasyon işlemi uygulanarak mukavemetin artırılması gerekmektedir (Yaman ve diğ. 2006).

Karbon elyafların üretiminde kullanılan üç öncül hammadde bulunmaktadır. Bunlar rayon, poliakrilonitril (PAN) ve zifttir. Bu hammaddeler, temelinde ısıl işlem prosesiyle karbonlaştırılmaktadır ancak ticari nedenlerden dolayı piyasada en çok poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon elyaflar bulunmakta olup üretilen karbon liflerinin yaklaşık %90'mı PAN esaslıdır. PAN lifleri, %54 oranında karbon atomu içerir ancak bu liflerden karbon elyaf üretim verimi yaklaşık %40-45 civarındadır (Yaman ve diğ. 2006). PAN esaslı karbon elyaf üretiminin aşamaları Şekil 2.11'de, çıkan nihai karbon elyafın kategorileri ise Tablo 2.2'de görülmektedir.



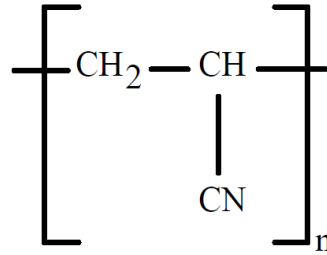
Şekil 2.11: PAN esaslı karbon elyaf üretimi ve aşamaları (Hoque ve diğ. 2001)

**Tablo 2.2:** Son işlem sıcaklıklarına göre karbon elyafların sınıflandırılması (Yaman ve diğ. 2006)

Tip	Son İşlem Sıcaklığı (°C)	Özellik
Tip 1	~2000	Yüksek Modüllü Elyaflar
Tip 2	~1500	Yüksek Mukavemetli Elyaflar
Tip 3	~1000	Düşük Modül, Düşük Mukavemetli Elyaflar

PAN liflerinden karbon elyaf üretiminde öncelikle 180 – 300 °C sıcaklıklarında oksidatif stabilizasyon işlemi yapıldıktan sonra 1000 – 1500 °C sıcaklıklarda karbonizasyon, ardından daha yüksek elastisiteye ulaşılması için 1500 – 2800 °C sıcaklıklarında grafitizasyon işlemi uygulanmaktadır (Hoque ve diğ. 2001).

Akrilonitril gruplarının polimerizasyonu sonucu oluşan ve Şekil 2.12’de kimyasal yapısı verilen PAN polimerlerine uygulanan oksidasyon işleminin temel amacı, malzemeyi ardından izleyeceği ısıl işlemlere dayanır şekilde hazırlamaktır (Pandey ve Kumar 2002).

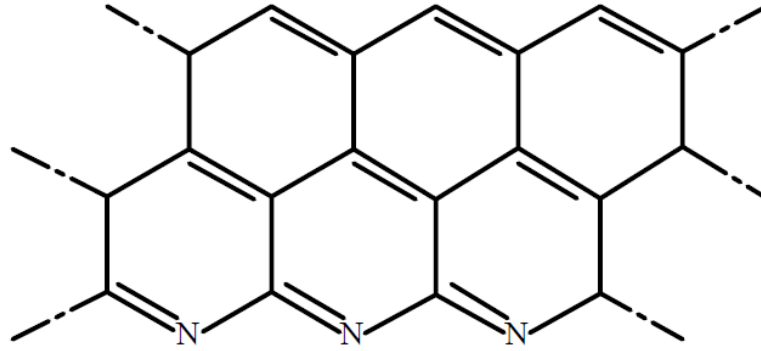


**Şekil 2.12:** PAN polimer yapısı (Bahrami ve diğ. 2003)

Oksidasyon sayesinde Şekil 2.6’da verilen bağ yapısına C = N ve C = O bağları eklenerek HCN, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O gibi yan ürünler ortaya çıkar ve bu yan ürünler sayesinde belli bir miktar H atomu sistemden uzaklaştırılır. Bu sayede PAN moleküllerinin sertlikleri artar ve karbonizasyon işleminde zincir bölünmesini engeller (Pandey ve Kumar 2002).

Karbonizasyon işlemi ise inert gaz ortamında yapılmaktadır. Genellikle azot ve argon inert gaz olarak kullanılarak ortamda bulunan O<sub>2</sub>'nin lifler ile bağ yapıp parçalanmasını engellemektedir. Aynı zamanda ısıl işlem sebebi ile oraya çıkan diğer gazların karbonizasyon fırına temasını keserek zarar vermesini engeller (Worasuvannarak ve diğ. 2003).

İşlem boyunca karbon içermeyen elementler (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>) uzaklaştırılarak vakumlu UV ışık kaynakları sayesinde PAN liflerinde çapraz bağ yapısının oluşturulması artırılır (Wangxi ve diğ. 2003). Karbonizasyon işleminin başlarında yaklaşık %60-70 karbon içeren PAN lifleri, işlemin sonlarına doğru %90'lara kadar karbon içerebilir ve artık karbon elyaf halini almıştır. Tüm bu işlemlerin ardından karbon elyafın sahip olduğu kimyasal yapı Şekil 2.13'de verilmiştir.



**Şekil 2.13:** PAN liflerinde karbonizasyon sonrası nihai karbon elyaf yapısı (Nguyen ve Lee 2022)

En son işlem olan grafitizasyon, esasında çok yüksek modül istenilen ürünler oluşturmak için opsiyonel olarak uygulanır. Bu işlemde sıcaklık 3000 °C sıcaklıklara kadar çıkarak liflerin yaklaşık %99 oranında karbona sahip olması sağlanır (Seventekin 2001). Bu işlemden sonra malzeme grafit haline gelir ve azotun uzaklaştırıldığı zincirler grafit düzlemleri halinde birleşir.

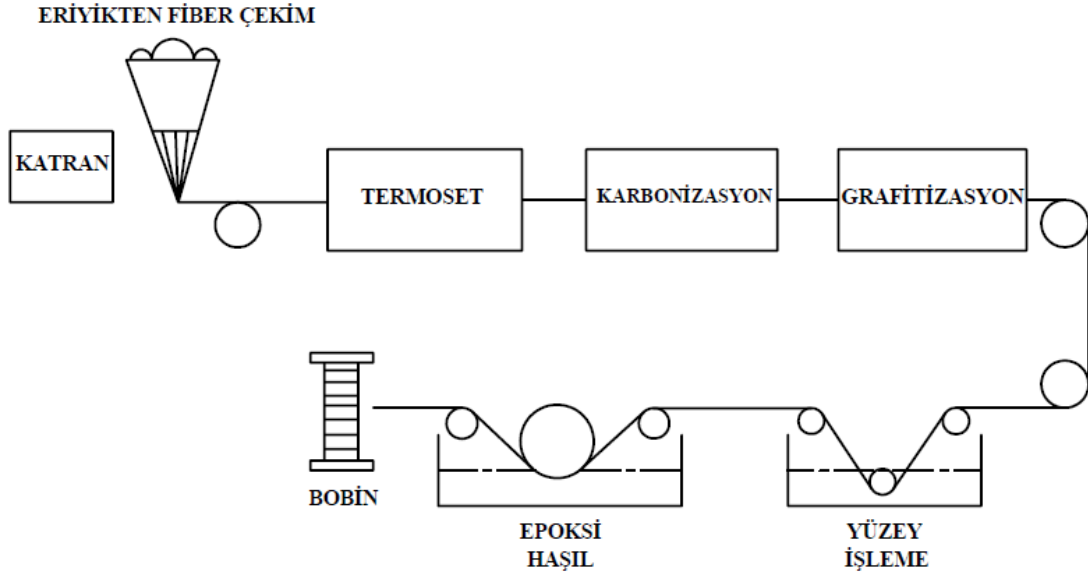
Isıl işlemlerin ardından elyafın kompozit hale dönüştürülürken kullanılan matris malzemesi ile iyi bir arayüzey oluşturması için yüzey işlemi (sizing) yapılmakta, bu şekilde kompozitteki interlaminar kayma dayanımı (ILSS) artırılmaktadır (Edie ve Diefendorf 1993).

Yüzey işleminden sonra tekstilde haşıl ismi verilen bir işlem daha uygulanmaktadır. Buradaki amaç ise kompozit hale gelirken malzemenin ıslanabilme özelliğini artırmaktır. Epoksi reçine, karbon için piyasada en çok kullanılan matris malzemesi olduğu için haşıl işlemi de genellikle epoksi ile yapılmaktadır (Edie ve Diefendorf 1993). En son çıkan karbon elyaf, istenilen iplik numarasında bobinlere sarılarak Şekil 2.14’de görülen nihai hali ile satışa sunulur.



**Şekil 2.14:** Karbon elyaf fitil (Tow) (Url\_7)

Bir diğer hammadde olan ziftten karbon elyaf üretiminin PAN esaslı karbon elyaflara göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Zift bazlı karbon elyaf üretiminde nihai ürünün özelliklerini ziftin yapısı (izotropik ve anizotropik), molekül ağırlığı, fiber çekilebilme uygunluğu gibi parametreler belirlemektedir. Bu nedenle üretimde istenilen özellikte ziftlerin sentezi son derece önemlidir. Üretim yönteminde ise izlenen adımlar fiber çekme, stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon olarak ilerlemektedir ve Şekil 2.15’de verilmiştir.



**Şekil 2.15:** Ziftten karbon elyaf üretimi (Yaman ve diğ. 2006)

Eriyikten elyaf çekiminde zift ergitilerek bir ekstrüder yardımıyla belirli basınç ve boyutlarda nozzlelerden çekilir. Uygun soğutma işleminin ardından bir bobine sarılarak aynı PAN esaslı üretimde olduğu gibi sisteme aktarılır. Burada ekstrüderin sıcaklık ve basınç gibi özellikleri doğrudan üretilecek karbon elyafın mekanik özelliklerini etkilemektedir (Diez ve diğ. 2012).

Oksidatif tepkimelerin gerçekleştiği stabilizasyon aşamasında stabilizasyon derecesi, hızı, uygulanan sıcaklık önem arz etmektedir. Elyafın yapısında bulunan alifatik grupların bu aşamada daha fazla etkilendiği bilinmektedir. Elyaf, bu aşamada termoplastik yapıdan termoset yapıya geçer. Dolayısıyla uygun çözücü eklenerek elyafın camsı geçiş sıcaklığı artırılır ve düşük molekül ağırlıklı bileşenler elyafardan uzaklaştırılır (Kelly ve Zweben 1999).

Ziftten karbon elyaf üretiminde karbonizasyon işlemi inert gazlarla beraber PAN esaslı üretimle benzer sıcaklıklarda gerçekleşir. Karbonizasyonun zifte yaptığı etki, kimyasal bileşimi farklı olduğu için PAN'dan az da olsa farklılıklar gösterebilir ama karbonizasyonun amacı PAN esaslı üretimdeki gibi aynıdır. Burada C-C, C-H aromatik bağları serbest kalır. Malzemenin kendi içerisinde moleküler düzenleme tepkimeleri oluşarak zincir yapısına bağlı hidrojen ve yan ürünlerin bağdan ayrılması gerçekleşir (Tekinalp 2011).

Grafitizasyonda ise bağ yapısı 3 boyutlu bir düzende kristalin grafit yapısına yaklaşıır. Burada malzemenin mukavemeti artırılabilir. Ancak sadece mezofaz ziftlerine bu işlem uygulanabilir ve üst sınır 3100 °C olmalıdır. (Kelly ve Zweben 1999). Karbonizasyon ve grafitizasyon işleminin ardından PAN esaslı karbon elyaflara uygulanana benzer şekilde yüzey işlem ve haşıl işlemleri uygulanmaktadır. Ancak zift esaslı üretilen karbonun yüzeyi daha az reaktif olduğundan işlem sırasında farklı reaksiyon koşulları uygulanmaktadır (Yaman ve diğ. 2006).

Ziftler, karbon elyaf üretiminde işleme başlanmadan önce izotropik ve anizotropik olarak bulunabilmektedirler. Anizotropik olanların molekül ağırlığı yüksek olduğu için mezofaz olarak isimlendirilir. İki türden de karbon elyaf üretimi mevcuttur ancak izotropik olanlar üretim işlemleri boyunca aşırı kimyasal yapı değişimine maruz kalmaktadır. Elyaf çekiminde germe işlemi zorlaşmakta ve bu sebepten dolayı mezofaz yapıda olanlardan daha düşük modüle sahip elyaflar ortaya çıkmaktadır (Edie ve Diefendorf 1993). Elyafların farklılıkları ortalama olarak Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

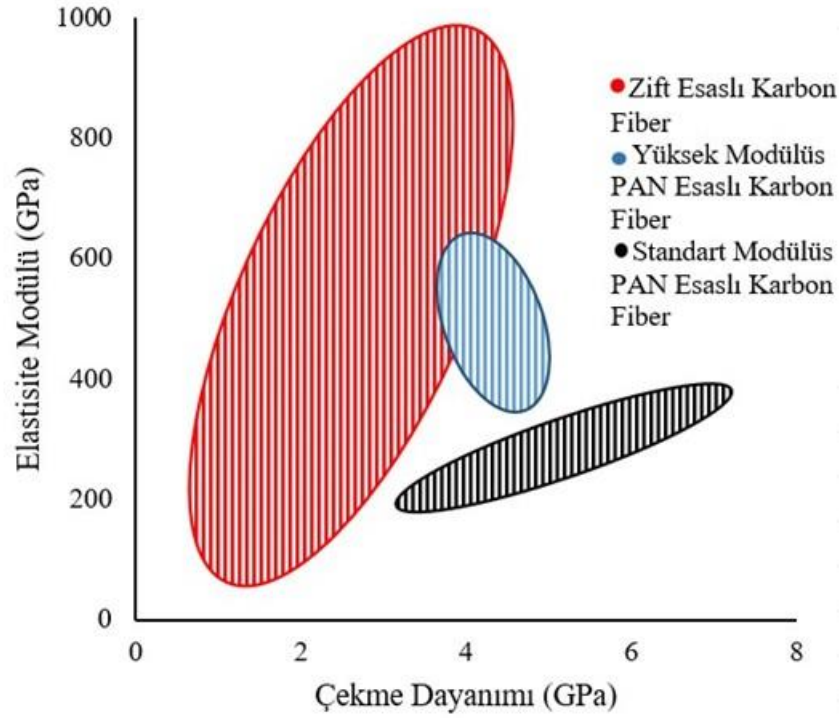
**Tablo 2.3:** PAN ve zift esaslı karbon elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri (Inagaki ve Kang 2014)

<b>Hammadde</b>	<b>Uygulanan Isıl İşlem</b>	<b>Filament Çapı (µm)</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Elastisite Modülü (GPa)</b>
PAN	K	7,0	1,74	3300	230
	G	6,5	1,81	2500	300
Mezofaz Zift	K	10,0	1,98	3300	200
	G	10,0	2,18	2100	520
İzotropik Zift	K	14,5	1,65	720	32
	G	14,5	1,57	600	30

K: Karbonizasyon Sonrası (1300 °C ısı işlem)

G: Grafitizasyon Sonrası (2800 °C ısı işlem)

Hammadde olarak zift, PAN liflerinden %40-50 daha ucuz olup yapı olarak grafit yapısına daha yakındır. Bu sayede daha az sıcaklıklarda grafit yapısı oluşmakta ve karbonizasyon işlemi de daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Zift esaslı üretimde avantajlar olsa da en büyük dezavantajı aynı özellikte hammaddelerin temin edilerek aynı performansta ürün ortaya çıkarmanın zor olmasıdır. Rayon ve bitkisel bazlı kaynaklardan da karbon elyaf üretimi mevcuttur. Ancak hammadde hallerinde düşük karbon bulunması verimliliği oldukça düşürmektedir. %10-20 civarlarında olan verim, PAN esaslı üretimde %40-50, zift esaslı üretimde ise %75 civarındadır. Bu sebeplerden ötürü rayon esaslı üretim piyasada neredeyse yoktur (Edie ve Diefendorf 1993).



Şekil 2.16: Ticari olarak temin edilebilen karbon elyafların karşılaştırılması (Newcomb 2016)

PAN esaslı üretimde performans olarak daha iyi mamüller ortaya çıkmaktadır. Bu durum Şekil 2.16' da verilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere kopma uzaması daha optimum, yüksek çekme mukavemetli ve ısıl işleme bağlı standart özellikte mamüller PAN esaslı üretimde mevcuttur (Newcomb 2016).



Ticari anlamda karbon elyaf, sektörde numaralandırılarak satılmaktadır. Bu numaralandırmada karbon fitilinde (tow) bulunan her 1000 filament için “K” sembolü kullanılır. Piyasada en çok bulunan tipleri tekstil ürünlerin imalatında da hesaplanabilmesi için tex karşılığı ile beraber Tablo 2.4’de verilmiştir.

**Tablo 2.4:** Karbon ipliğinin numaralandırılması

Numaralandırma	Tex Karşılığı	Açıklama
3K	200 tex	3000 adet filament
6K	400 tex	6000 adet filament
12K	800 tex	12000 adet filament
24K	1600 tex	24000 adet filament

Karbon elyaf, farklı şekillerde sektörde kendine kullanım alanı bulmuştur. Kendine uygun iplik numarasında kumaş, fitil ve kesik elyaf hali kullanılmakta olup bu kullanım alanlarına ait örnekler Şekil 2.17’de verilmiştir.



**Şekil 2.17:** Karbon elyaftan üretilen bazı mamüller

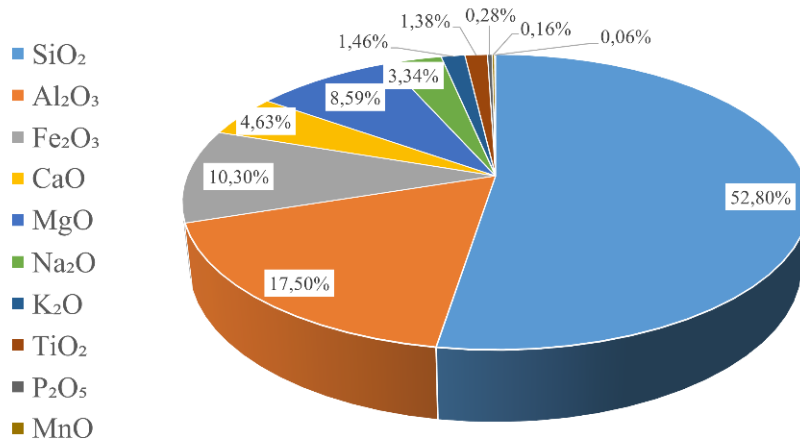
### 2.1.2 Bazalt Elyaf

Bazalt elyaf, bazalt kayalarının ergitilmesiyle çekilerek oluşturulan bir yüksek performans lifidir. Amerikalı bilim adamları tarafından 1923 yılında keşfedilen bazalt elyaf, ilk olarak İkinci Dünya Savaşı zamanlarında ABD ve Sovyet Rusya tarafından askeri amaçlar için kullanılmıştır (Colombo ve diğ. 2012). Şekil 2.18'de gösterilen bazalt, koyu veya siyah renkli volkanik kökenli bir kayadır. Yer kabuğunda ve okyanus tabanlarında en çok bulunan kayalardan biri olup sağlam bir yapıya sahiptir. Porfir, mikrokristalin ve camsı bir yapıya sahip olabilirler. Dünyada çokça bulunmasına rağmen bazalt kayaları buldukları bölgelerde farklı kimyasal yapıya sahip olabilir. Bu da her bazalt tipinin elyaf olarak üretime uygun olmadığını göstermektedir (Czigany 2005).



Şekil 2.18: Bazalt kayacı (Url\_11)

Coğrafi konuma göre kimyasal bileşenlerinde değişiklik olsa da üretilen bazalt elyafın Şekil 2.19'da gösterilen kimyasal yapısı silisyum, demir ve alüminyum oksit açısından zengindir.



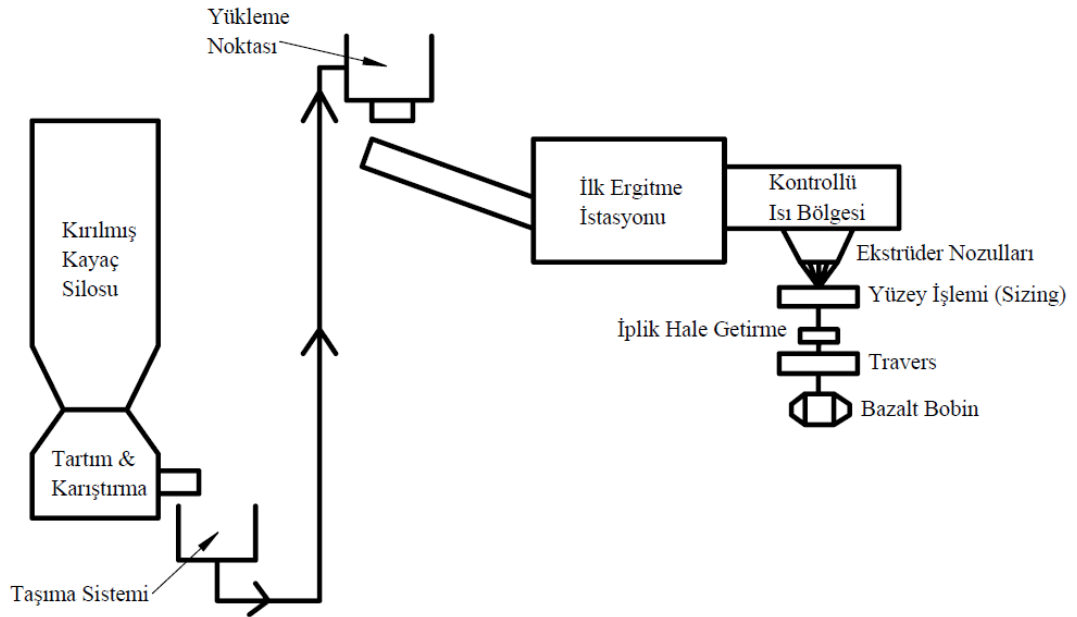
Şekil 2.19: Bazalt elyafın kimyasal yapısı (Militky ve Kovacic 1996)

Bazalt kayaçları Tablo 2.5’de gösterildiği gibi üç başlık altında kategorize edilir. SiO<sub>2</sub> bileşimi %46’nın üzerinde olan bazalt kayaçlar, kalıntı bırakmadan uygun vizkozitede ergime gerçekleştirilmesinden dolayı lif üretimine uygundur (Militky ve Kovacic 1996).

**Tablo 2.5:** Bazalt kayaç kategorileri (Militky ve Kovacic 1996)

SiO <sub>2</sub> Oranı	Kategori
%42	Alkali Bazalt
%43-46	Az Asidik Bazalt
>%46	Asidik Bazalt

Bazalt kayaçlardan bazalt elyaf üretimi birden çok aşamaya bağlı olup Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Öncelikle büyük bazalt kayaçları kırılarak bir siloya atılır. Ardından otomatik sistemle taşınarak ergitme, eriyikten lif çekimi, silan yüzey işlemi ve bobin haline getirme işlemleri yapılır.



**Şekil 2.20:** Bazalt elyaf üretim hattı (Wei ve diğ. 2010)

Ufalanan bazalt kayaçları, yükleme noktasının ardından 1450 °C civarlarında ısıtılmış fırına gönderilir. Burada ergimiş bazalt kayacı dış gazlar ile tepkimeye girmemesi için inert gazlar yardımı ile ergitilir. Ergime anında fırın sıcaklığı nihai olarak üretilecek bazalt elyafın mekanik özellikleri için son derece önemlidir. Kontrollü ısı bölgesinde malzeme kontrolü ve ergimiş bazaltın uygun vizkozitede çekilmesi için bazalt, uygun koşullar için stabilite edilir. Platin alaşımına sahip yüzlerce nozuldan 6 – 22 µm çapta filamentler yerçekimi yardımı ile çekilerek soğutulur. Ardından silan maddesi ile yüzey düzgünlüğü ve reçine uyumluluğu kazandırılır. En son travers yardımı ile bobin hale getirilir (Jamshaid ve Mishra 2015).

Bazalt fitilinde bulunan ve Şekil 2.21’de verilen birden fazla filament sayesinde iplik hale bükülebilir, direkt fitil hali kullanılabilir, kırılıp kesik elyaf olarak veya dokuma gibi tekstil prosesleri ile kumaşa çevrilip kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılabilir (Dias ve Thaumaturgo 2005).



Şekil 2.21: Bazalt elyaf fitil (Tow) (Url\_12)

Mekanik özellikler açısından bazalt elyaf, fiyat/performans olarak karbon elyaftan daha avantajlıdır. Bazalt, Tablo 2.6’da verilen mekanik özelliklere bakılacak olursa karbon ve cam lifleri arasında kendine yer bularak yüksek performans lifleri arasında sınıflandırılır. Diğer liflerden ayrılan en önemli özelliği ise üretiminde düşük CO<sub>2</sub> salınımı olmasıdır. Bu da onu çevreci bir takviye malzemesi haline getirmektedir (Jamshaid ve Mishra 2015).

**Tablo 2.6:** Bazalt elyafın mekanik özellikleri (Landucci ve diğ. 2009)

Özellikler	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2,63-2,8
Filament Çapı	µm	6-21
Çekme Dayanımı	MPa	3000-4800
Elastisite Modülü	GPa	93-110
Kopma Uzaması	%	3,1-6

Bazalt elyafın üretimi esnasında hiçbir katkı maddesi içermemesi, doğal kaynaklardan elde ediliyor olması, nihai ürününün kimyasal tepkimelere girmemesi, toksit ve kanserojen maddeleri barındırmaması, yüksek sıcaklıklarda performansını sürdürdüğü için kompozit haldeyken matrisin yakılarak uzaklaştırılıp tekrar kullanılabilir olması onu çevre dostu “yeşil” kategoride bir malzeme haline getirmektedir (Url\_13). Bazalt elyafın diğer üstün özellikleri ise şu şekildedir (Sezemanas ve diğ. 2005);

- İyi titreşim sönümlenme
- Alkali ve asitlere karşı yüksek direnç
- İyi korozyon dayanımı
- Yüksek UV ve radyasyon dayanımı
- Yüksek darbe dayanımı
- Olağanüstü ısı dayanımı

Bazalt elyaf, nispeten hafif ve dayanıklı olduğu için otomotiv endüstrisinde, sıcaklığa karşı inanılmaz dayanıklılığı sayesinde elektrik sektöründe, kimyasal olarak kararlı bir yapıda bulunduğu için izolasyon amaçlı kimya endüstrisinde, darbe dayanımından kaynaklı ise spor ekipmanları alanında kendine kullanım alanı bulmaktadır. Son zamanlarda alkali dayanımı sayesinde yapı güçlendirme alanında sıklıkla tekstil güçlendirme donatıları olarak kullanılmaktadır. Bazalt elyafın üretiminde standart ürün eldesinin kayaç yapısından kaynaklı zor olması, karbon elyafa nazaran kumaş haline getirilmesinde dokuma zorluğu ve hammaddesi olan kayaçların lojistik sorunları bazalt elyafın dezavantajları arasındadır. Kullanımına yönelik birkaç örnek Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22: Bazalt elyaftan üretilen bazı mamüller

### 2.1.3 Cam Elyaf

Cam elyaf, daha çok soda-kireç silikatları veya boraks silikatları içeren camın ergitilerek çekilmesiyle oluşturulan lifsi yapılardır (Özdemir ve diğ. 2006). Eski tarihlerden itibaren camdan ipliksi yapılar oluşturulmaya çalışılmış fakat prosesdeki eksiklikler nedeni ile istenilen özelliklere sahip elyaf üretimi gerçekleştirilememiştir. Kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılabilir ve tekstil yüzeyleri oluşturulabilecek ilk cam elyaf üretimi 1935 yılında Owens-Illinois Glass Co. firması tarafından üretilmiştir (Özdemir ve diğ. 2006). Süreç içerisinde farklı sektörlerde farklı amaçlar için kullanılacağı ortaya çıkmış olup temel üretilen cam elyaflar özelliklerine göre Tablo 2.7'deki gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 2.7: Cam elyafların sınıflandırılması (Sathishkumar ve diğ. 2014)

Sınıflandırma	Özellik
A-Cam	Dayanıklılık ve Elektrik Direnci
C-Cam	Yüksek Korozyon Dayanımı
D-Cam	Düşük Elektriksel Yalıtım
E-Cam	Yüksek Mukavemet ve Yüksek Elektrik Direnci
AR-Cam	Alkali Dayanım
R-Cam	Asidik Ortama Yüksek Dayanım
S-Cam	En Yüksek Çekme Mukavemeti
S-2 Cam	Yüksek Mukavemet, Modül ve Stabilitate

**A-Cam:** Uygun maliyetli olması için soda-kireç-silika camından üretilir. Diğerlerine göre nispeten daha uygun maliyetlidir. E-Cam kadar yüksek mukavemet ve elektriksel direnç istenmeyen genel alanlarda kullanılabilir. Özellikle asitlere karşı dayanımı oldukça düşüktür (Jones ve Huff 2018).

**C-Cam:** Kalsiyum borosilikat camlarından elde edilen C-Camı korozyon etkilerinin yüksek olduğu koşullarda dayanımından ötürü kullanılmaktadır (Özdemir ve diğ. 2006).

**D-Cam:** Düşük dielektrik sabitine sahip olduğu için özellikle elektronik devre kartlarının özel yalıtım gereksinimleri için kullanılmaktadır (Jones ve Huff 2018).

**E-Cam:** İlk olarak teknik elektronik uygulamalar için geliştirilseler de özellikle dokuma prosesi ile tekstil yüzeyi oluşturmaya uygun oluşu ve nispeten iyi mekanik özellikler göstermesi onu kompozit parça imalatında da kullanılmasına olanak sağlamıştır. %0,8'den daha az oranda alkali oksit içeren alüminyum-bor silikat camlarıdır. Aynı zamanda kimyasal etkilerden oluşacak korozyona da dayanıklılıkları söz konusudur (Özdemir ve diğ. 2006).

**AR-Cam:** Alkali ortama yüksek dayanıklılıkları sayesinde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Özellikle elyaf takviyeli beton yapılar için birebirdir (Jones ve Huff 2018).

**R-Cam:** Kalsiyum-alümina silikat camlarından oluşturulan R-Camı, asidik ortamlara dayanıklılığı ve stabil performans vermesi istenilen alanlarda kullanılır (Özdemir ve diğ. 2006).

**S-Cam:** Mekanik özellikler açısından en iyi cam elyaf tiplerinden biridir. Kompozit parça imalatında takviye olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek yumuşama sıcaklığı ve sertliği ile de öne çıkan bu cam elyaf çeşidi hafif zırh imalatı gibi zorlu şartlarda kullanılabilir (Cameron ve Rapp 2001).

**S-2 Cam:** S tipi cam elyafların daha üst versiyonu olarak düşünülebilir. Mükemmel mukavemet ve darbe dayanımına sahiptir. Birçok katma değerli ürünlerde dayanımı sayesinde kullanılmaktadır. Kompozit parçada takviye olarak kullanılması karbon elyafa yakın veya yüksek mekanik özellikler vermektedir (Dong ve diğ. 2012).

Farklı amaç ve özellikler içeren cam liflerinin sınıflandırılmasına göre Tablo 2.8'deki gibi kimyasal yapısı, Tablo 2.9'daki gibi mekanik özellikleri değişmektedir.

**Tablo 2.8:** Cam elyafların kimyasal yapısı (Hartman ve diğ. 1994, Özdemir ve diğ. 2006)

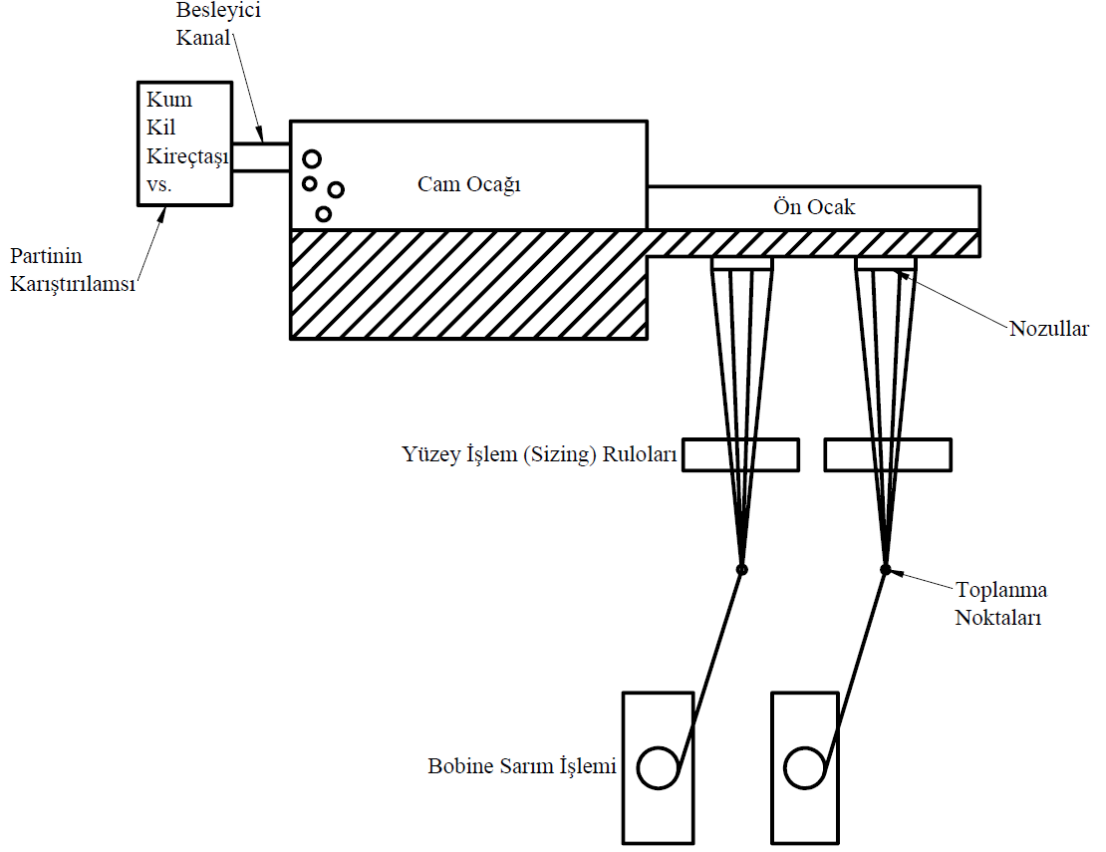
<b>Ağırlıkça Bileşim %</b>	<b>A-Cam</b>	<b>C-Cam</b>	<b>D-Cam</b>	<b>E-Cam</b>	<b>AR-Cam</b>	<b>R-Cam</b>	<b>S-Cam</b>	<b>S-2 Cam</b>
SiO <sub>2</sub>	63-72	64-68	72-75	52-56	55-75	56-60	64-66	64-66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-6	3-5	0-1	12-16	0-5	23-26	24-25	24-26
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-8	0-6	21-24	5-10	3-12	0-0,3	4-6	0-0,05
CaO	6-10	11-15	0-1	16-25	1-10	8-15	0-0,1	0-0,2
MgO	0-4	2-4	-	0-5	-	4-7	9,5-10	9,5-10
BaO	-	0-1	-	-	-	0-0,1	-	-
Li <sub>2</sub> O	-	-	-	-	0-1,5	-	-	-
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	14-16	7-10	0-4	0-2	11-21	0-1	0-0,2	0-0,3
TiO <sub>2</sub>	0-0,6	-	-	0-1,5	0-12	0-0,3	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	1-18	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-0,5	0-0,8	0-0,3	0-0,8	0-5	0-0,5	-	0-0,1
F <sub>2</sub>	0-0,4	-	-	0-1	0-5	0-0,1	-	-

**Tablo 2.9:** Cam elyafların mekanik özellikleri (Sathishkumar ve diğ. 2014)

<b>Özellikler</b>	<b>A-Cam</b>	<b>C-Cam</b>	<b>D-Cam</b>	<b>E-Cam</b>	<b>AR-Cam</b>	<b>R-Cam</b>	<b>S-Cam</b>	<b>S-2 Cam</b>
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,44	2,52	2,13	2,58	2,70	2,54	2,46	2,46
Çekme Muk. (MPa)	3310	3310	2415	3445	3241	4135	4315	4890
Elastisite Mod. (GPa)	68,9	68,9	51,7	72,3	73,1	85,5	86,2	86,9
Kopma Uzama (%)	4,8	4,8	4,6	4,8	4,4	4,8	5,1	5,7



Cam elyafın sürekli filament halinde üretimi bazalt elyafın üretim metoduyla hemen hemen aynıdır ve Şekil 2.23’de gösterilmiştir. Öncelikle öğütülmüş silis kumu, kil, kireçtaşı ve diğer maddeler istenilen miktarlarda tartılarak karıştırma işlemi yapılır.



**Şekil 2.23:** Cam elyaf üretim hattı (Cameron ve Rapp 2001)

Karıştırma işleminin ardından cam ocağında yaklaşık 1500 °C’de ergitilerek ön ocakta bekletilir ve yaklaşık 1250 °C’de çekim işlemi başlar. Nozulların bulunduğu ekstrüderler elektrikli ısıtıcı yardımıyla sabit sıcaklıkta tutulur. Bu nozullar yine bazalt üretim hattında kullanılan nozullar gibi platin kaplıdır. Eriyikten lif çekimi 20-70 m/s hızla başladıktan sonra ön ocakta biriken cam miktarı, eritilmiş camın viskozitesi ve nozul çapına bağlı olarak 5-20 µm çapında cam filamentler elde edilir (Cameron ve Rapp 2001).

Çekim işleminden sonra filamentlerin soğutulması için genellikle yüzey işlem ruloları ile nozullar arasına yerleştirilmiş silindir aplikatörle uygun süre ve hızlarda su verme işlemi yapılır. Yüzey işlem rulolarında filamentleri dış etkenlerden korumak ve oluşturulacak kompozit parçada matris malzemesi ile iyi arayüz oluşturması açısından kimyasal bileşimi değişken olabilen silan ile kaplanır (Cameron ve Rapp 2001).

Toplanma noktalarında kaç adet filament bobine aktarılacak ise o kadar filament bobine sarılır ve dokuma prosesi gibi yöntemler ile tekstil yüzeyi elde etmek için farklı iplik numaralarında Şekil 2.24’de görüldüğü gibi genellikle dıştan sarım cam bobinler elde edilir.



**Şekil 2.24:** Cam elyaf fitil (Tow) (Url\_16)

Cam elyaflar genel olarak birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir. Bilindik organik çözenlerden fazla etkilenmezler, yanmazlar 1150 °C civarlarında ergimeye başlarlar. Elektrik ve ısıyı iletmemektedirler. En büyük dezavantajları ise buldukları ortamın sıcaklığı mukavemetlerini etkilemektedir (Özdemir ve diğ. 2006). Kompozit sektörünün en çok kullanılan takviye materyali olması, ucuz ve bulunabilir olması, nispeten üretim sisteminin kolay olması cam elyafların birçok sektörde hafif ve dayanıklı kompozit yapılar için kullanılmasını sağlamıştır. Bu kullanım alanlarına birkaç örnek Şekil 2.25’de verilmiştir.

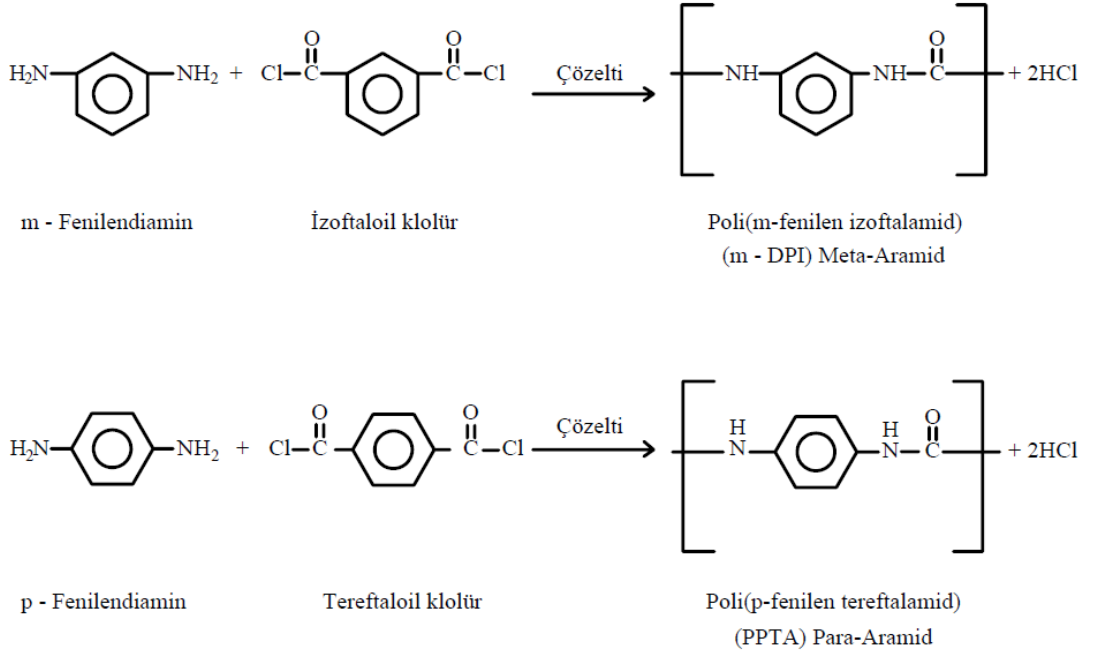


Şekil 2.25: Cam elyaftan üretilen bazı mamüller

#### 2.1.4 Aramid Elyaf

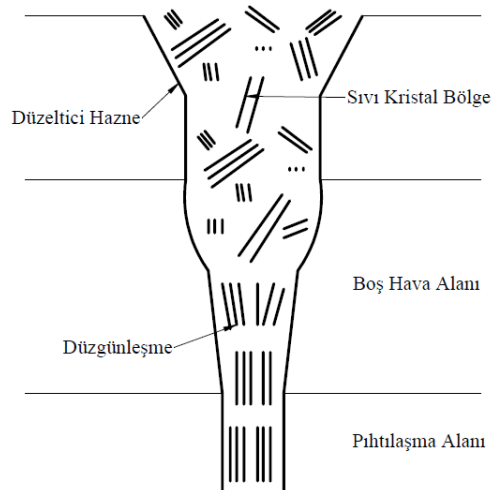
Aramid elyaf, yüksek dayanım ve modülünden dolayı kompozit alanında kullanılan ilk organik elyaf tipidir. Mukavemet/yoğunluk oranı açısından ortalama bir cam elyaflardan daha iyi mekanik özellikler göstermektedirler. ABD Federal Ticaret Komisyonu tarafından en az %85 oranında amid ( - CO – NH - ) bağı bulunan poliamid liflerine aramid lifi tanımı konmuştur (Hearle 2001).

Bağ yapısına bağlı olarak temel iki aramid tipi vardır. Bunlar Şekil 2.26'da gösterilen meta-aramid ve para-aramid lifleridir. 1960'lı yıllarda aramid üzerine yapılan çalışmalar neticesinde DuPont firması Nomex® markası altında ticarileşen yüksek sıcaklığa dayanıklı meta-aramidleri piyasaya sürülmüştür. Ardından daha üstün mekanik özellikler sağlanması amacıyla 1970'li yıllarda aynı firma para-aramid elyaflarına yönelmiş ve Kevlar® markası altında para-aramid elyaflarını geliştirmişlerdir (Jassal ve diğ. 2020).



**Şekil 2.26:** Meta-aramid ve para-aramid kimyasal reaksiyonu (Jassal ve diğ. 2020)

Hem meta-aramid ve hem para-aramid üretiminde öncelikle polikondenzasyon tepkimeleri gerçekleştirilir. Tepkimeler yan reaksiyon oluşumunu, parçalanmayı ve çapraz bağ oluşumunu minimize etmek için 50 °C altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir (Jassal ve diğ. 2020). Ardından Şekil 2.27’de verilen kuru jet ıslak iplik çekimi diye isimlendirilen üretim prosesi ile filament üretimi başlar.



**Şekil 2.27:** Kuru jet ıslak çekim metodu ile aramid lifi üretimi (Yao ve diğ. 2014)

Aramid elyafın üretim sürecinde, sıvı aramid yapısı ısı ve basınç altında tek veya çok delikli ekstrüder yardımıyla hava boşluğu olan hazneye itilir ve ardından hızla pıhtılaşma banyosuna gider. Kuru jet ıslak çekim metodu, geleneksel ıslak çekim yönteminden oldukça farklıdır. Islak çekimde sıvı aramid yapısı direkt pıhtılaşma banyosuna gönderilirken, kuru jet ıslak çekme metodunda su veya seyrek sülfirik asit çözeltisi ile beraber pıhtılaşma banyosuna ekstrüder ile gönderilir. Böylelikle sıvı aramid yapısı pıhtılaşmaya başlamadan önce polimerlerinin daha fazla yönlendirilmesi sağlanır (Jassal ve Ghosh 2002). En son filamentler yüzey (sizing) işlemi görüp kurutulduktan sonra kristal yapılı, yüksek mekanik özellikte ve farklı iplik numaralarında Şekil 2.28'deki gibi aramid elyafları elde edilir.



Şekil 2.28: Aramid elyaf (Tow) (Url\_20)

Farklı elyaf üreticileri, farklı mekanik özelliklere sahip aramid elyafları üretebilmektedir. Ancak genel olarak Tablo 2.10'da verilen mekanik özellikler baz alınabilir.

**Tablo 2.10:** Para-aramid ve meta-aramid elyafların mekanik özellikleri (Akato ve Bhat 2017)

Özellikler	Para-aramid	Meta-aramid
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,44	1,38
Çekme Mukavemeti (MPa)	2900-3000	590-860
Elastisite Modülü (GPa)	70-112	8-12
Kopma Uzaması (%)	2,4-3,6	20-45

Aramid elyaflar, kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak çok uygun bir materyaldir. Özellikle para-aramidlerin, spor malzemelerinde ve denizcilik sektöründe önemli kullanım alanları vardır. Diğer yüksek performans liflerinden ayrılan en önemli özellikleri ise hafiflik ve mükemmel darbe dayanımı özellikleridir. Bu özelliklerinden dolayı da uçakların darbe hasarı görebileceği yerlerde hem tek hem de karbonla hibrit kompozit yapı olarak kullanılmaktadır. Aramid elyaf takviyeli kompozitler, karbon elyaftan yapılan benzerlerine göre 2-4 kat daha fazla darbe enerjisi sönümleyebilirler (Akato ve Bhat 2017). Kullanım alanlarına birkaç örnek Şekil 2.29’da gösterilmiştir.



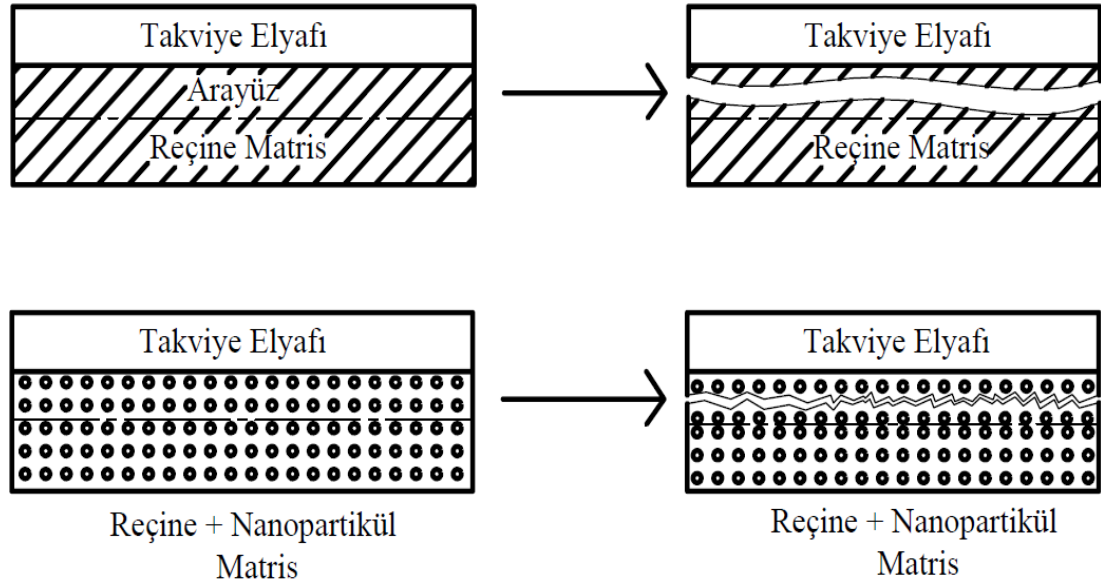
Şekil 2.29: Aramid elyaftan üretilen bazı mamüller

### 2.1.5 Nanopartiküller

Boyut olarak 100 nm altındaki partiküller olarak tanımlanan nanopartiküller, kullanıldıkları malzemelere üstün özellikler katarak son yılların en popüler çalışma konularından biri olmuştur (Gürmen ve Ebin 2008). Nanopartiküller, sahip oldukları şekle bağlı olarak nanotüpler, nanoteller veya nanoçubuklar ve nanokristaller olarak da isimlendirilmektedir.

Nanopartikül malzemelerin keşfi, kombinasyonu ve üretim metotları geliştikçe özel teknolojik ürünler, üstün malzemeler, süper iletkenler ve ilaç taşıyıcılar gibi alanlarda ürünlerin gelişmesine de yol açmaktadır. Kompozit malzemelerin üstün özellikleri yanında taşıdıkları dezavantajları minimuma indirmek için nanopartikül katkılı matris malzemesi kullanımı yaygınlaşmış ve nanokompozitler ortaya çıkmıştır.

Nanokompozitler, en az bir komponenti nano ölçekte olan iki veya daha fazla materyalin karışımı olarak tanımlanmaktadır. İki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesindeki amaç bu malzemelerin tek başlarına göstermiş oldukları absorbiyon, mekanik, kimyasal, elektriksel ve termal özelliklerinin geliştirilmesidir (Bozetine ve diğ. 2016).



Şekil 2.30: Nanopartikül katkılı elyaf/reçine nanokompozit (Li ve diğ. 2020)

Kompozitlerde genellikle takviye ve matris elemanı olarak elyaf ve reçine çeşitleri kullanılmaktadır. Şekil 2.30'da görüldüğü gibi elyaf, reçine ile ne kadar uyumlu olsa da parçaya gelecek yüklemelerde reçine hasar aldığı zaman arayüz bölgesinde çatlak kolay bir şekilde ilerlemektedir (Lee ve diğ. 2015).

Reçinede nanopartikül kullanımı ile arayüzde iyileşmeler sağlanarak o bölgedeki nanopartiküller elyaf ve reçine ayrışmasını daha zor hale getirmekte ve çatlak ilerlemesini olabildiğince engellemektedir. Böylelikle mekanik özellikler, oluşturulan nanokompozit parçada saf reçine halinden daha iyi olmaktadır (Tian ve diğ. 2017). Ancak arayüzde nanopartikül birikiminin iyi sağlanması elyaf takviyesinin şekli, boyutu, reçinenin akış sistematığı ve üretim metodundaki parametrelere bağlıdır.

Nanopartiküllerin üretim yöntemi esasında iki ana başlık altında değerlendirilmektedir. Bu metotlar aşağıdan yukarı (Bottom Up) ve yukarıdan aşağı (Top Down) metotlarıdır. Yukarıdan aşağı metodu, makro boyuttaki malzemelerin dışarıdan mekanik veya kimyasal enerjiyle nano boyutlara indirilmesini kapsamaktadır. Aşağıdan yukarı metodu ise malzemelerin moleküler boyuttan kimyasal reaksiyonlar ile büyütülüp nano boyuta getirilmesini kapsamaktadır (Sharma ve diğ. 2019). Yukarıdan aşağı metodunda en genel örnekler mekanik öğütme sistemleridir. Aşağıdan yukarı metodunda ise kimyasal buhar yoğunlaştırma olabilir. Metotlara ait diğer üretim yöntemleri ise Tablo 2.11’de verilmiştir.

**Tablo 2.11:** Başlıca nanopartikül üretim yöntemleri (Gürmen ve Ebin 2008)

Üretim Yöntemi	Metot
Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma	Aşağıdan Yukarı
Hidrojen Redüksiyon	Aşağıdan Yukarı
Asal Gaz Yoğunlaştırma	Aşağıdan Yukarı
Alev Sentezi	Aşağıdan Yukarı
Mekanik Aşındırma	Yukarıdan Aşağı



**Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma (CVC):** Gaz fazındaki malzemenin ısı parçalanması sonucuyla oluşan atom demetlerinin çıkış hattında toplanmasıyla nanopartikül elde etme yöntemidir (Gürmen ve Ebin 2008). Yüksek miktarlarda nanopartikül üretimi için uygun bir yöntemdir (Wang ve diğ. 2003). Temel olarak SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> nanopartikülleri bu yöntem ile üretilebilmektedir (Rajput 2015). Özellikle karbon nanopartikülü gaz fazında çeşitli yöntemlerle uzunlamasına büyütülerek tek duvarlı ve çok duvarlı yapıda karbon nanotüpler (KNT) elde edilebilir (Mubarak ve diğ. 2013). Karbonun grafen haliyle de grafen ve grafen oksit nanopartikülleri oluşturulabilir (Adetayo ve Runsewe 2019).

**Hidrojen Redüksiyon Yöntemi:** Nanopartikülleri oluşturacak başlangıç çözeltilisinin taşıyıcı H<sub>2</sub> gazıyla redüksiyon gerçekleştirilmesiyle nanopartiküller elde edilir. Temel olarak Fe, Ni, Co ve Ag gibi metalik nanopartiküller üretilebilmektedir (Jang ve diğ. 2004).

**Asal Gaz Yoğunlaştırma:** Malzeme kaynağı, soğuk bir ortamda basınçlı asal gaz yardımıyla ısıtılıp buharlaştırılarak atom demetleri toplanır ve nanopartiküller oluşturulur. Gaz basıncının artırılmasıyla daha çok nanopartikül, hızlı soğuma ile de daha küçük nanopartiküller elde edilebilir. Temel olarak metal oksit nanopartikülleri üretilebilmektedir (Lee ve diğ. 2005).

**Alev Sentezi Yöntemi:** Genellikle metal bazlı bir malzeme olan başlangıç malzemesine alev verilerek ortamdaki H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> taşınmasıyla nanopartiküllerin elde edilmesi yöntemidir. Ticari anlamda üretim için birebirdir. Metal, metal oksit, karbon siyahı ve bunların birleşimleri şeklinde nanopartiküller elde edilebilir. Partikül morfolojisi ve bileşim aralığı gibi unsurlar bu metotta kontrol edilebilir (Johannessen ve diğ. 2004).

**Mekanik Aşındırma Yöntemi:** Makro ölçekteki sert ve gevrek yapıdaki malzemelerin aşındırma veya titreşimli öğütücüler ile üstünden nano boyutta parçacıklar toplanmasıyla nanopartiküller elde edilir. En büyük dezavantajları aşındırıcılardan kaynaklı nanopartiküllerde safsızlıklar oluşması ve açık atmosferde oksitlenmeden dolayı partiküllerin yüzeyinde korozyon oluşmasıdır. Üretilecek nanopartikül, sert ve gevrek yapıdan oluşan makro haliyle sınırlıdır (Gürmen ve Ebin 2008).

Nanopartiküllerin çeşitliliği ile kompozit malzemeye katıldığında alınacak performanslar değişkenlik gösterebilmektedir. Nanopartiküllerin farklı türleri, malzemelerin mekanik, optik, termal ve iletkenlik özelliğini değiştirir. Tablo 2.12'deki gibi uygun miktarda kullanımlarında, karbon nanotüp, grafen ve SiO<sub>2</sub> gibi katkılar malzemenin mekanik dayanımını artırırken, altın veya gümüş nanopartikülleri gibi metalik nanopartiküller malzemelerin elektrik ve optiksel özelliklerini geliştirmektedir.

**Tablo 2.12:** Kompozit malzemelerde kullanılan bazı nanopartiküller ve kattığı başlıca özellikler

Nanopartikül	Kompozitte İyileştirilen Özellik	Referans
SiO <sub>2</sub>	Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü, Darbe Dayanımı	Zheng ve diğ. (2005)
TiO <sub>2</sub>	Çekme Dayanımı, Tokluk, Termal Direnç	Thipperudrappa ve diğ. (2019)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aşınma Dayanımı, Darbe Dayanımı	Bazrgari ve diğ. (2018)
Karbon Nanotüp (KNT)	Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü, Darbe Dayanımı, Camsı Geçiş Sıcaklığı, Bozunma Sıcaklığı	Zhou ve diğ. (2008)
Grafen	Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü, Eğilme Dayanımı, Darbe Dayanımı	Shivakumar ve diğ. (2020)
Grafen Oksit	Çekme Dayanımı, Termal İletkenlik, Elektriksel İletkenlik, Viskoelastik Özellikler	Sharma ve diğ. (2022)
Ag	Elektriksel Özellikler	Tee ve diğ. (2007)

## 2.2 Matris Malzemeleri

Matris malzemeleri, kompozit malzeme yapımında takviye elemanlarını bir arada tutan ve parça üzerine gelen yüklemeleri optimum seviyede takviye elemanlarına aktarması beklenen malzemelerdir. Oluşturulacak kompozit malzemeye verilmek istenen özelliklere göre metal, seramik ve polimer malzemeler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Polimer esaslı kompozitlerin kullanım yaygınlığı daha fazla olduğu için matris malzemelerinde de genellikle polimer esaslı malzemeler tercih edilmektedir. Üretim kolaylığı açısından genellikle matris malzemelerde sıvı halden ısı veya kimyasal reaksiyonlar sonucu katı hale geçebilen malzemeler tercih edilmektedir.

Polimer matris malzemeleri, genel polimerler gibi termoset ve termoplastik olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Matris malzemelerinde, matris yapısının sıvıdan katı hale geçmesi ve daha farklı özellikler kazandırabilmek adına ana malzemeye ek ajanlar polimer yapı içerisine katılmaktadır. Bu ajanlar, polimer matrisin kürleşme süresini ve sıcaklığını ayarlayabildiği gibi viskozitesini ve renk gibi fiziksel özelliklerini de değiştirebilir. Dolayısıyla polimer matrisler, polimer türünün reçine hali olarak kompozit sektöründe kullanılmaktadır.

### 2.2.1 Termoset Matrisler

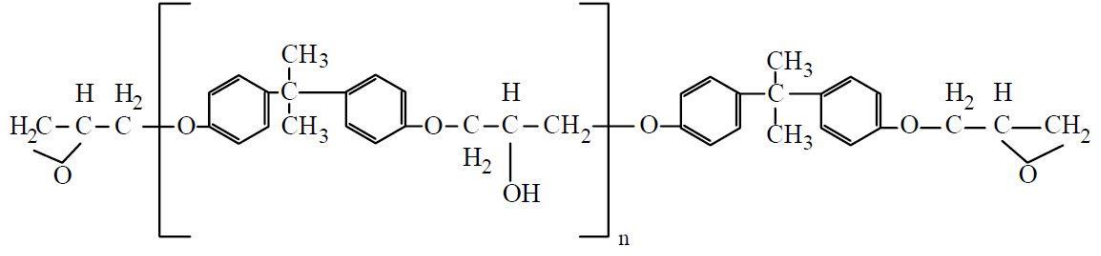
Termosetler, geri dönüşümü olmayan bir sıvı çözeltilisinden başlayarak katı bir malzemeye doğru oluşan bir süreçte karakterize edilen polimer türleridir. Birkaç istisna dışında katı halden ısıtılıp sıvı hale geri dönüşü mümkün değildir. Başlangıçtaki sıvı hali, UV etkisiyle veya dış etkiler tarafından reaksiyona girebilecek bir dizi komonomer çözeltilisinden oluşmaktadır. Termoset polimer üretimindeki ana özellik, tek bir monomerin veya birden çok komonomerin molekül başına üç veya daha fazla reaktif grubun olmasıdır. Bu durum tüm reaksiyonları kapsayan üç boyutlu bir çapraz bağlı yapı oluşturur. Kimyasal reaksiyon tamamlandıktan sonra, nihai malzemenin şeklini değiştirmek mümkün değildir. Tek mümkün olan katı malzemeyi öğütmek ve dolgu malzemesi olarak başka alanlarda değerlendirmektir (Pascault ve Williams 2013).

Termoset reçineler, sıvı halden sertleştirici ajanla beraber ısı verilmesi ile kürleşerek sertleşen yapılardır. Sertleştiricisi ile egzotermik bir reaksiyona giren termoset reçineler iyi korozyon dayanımı, uzun ömürlü olması, yapısal kararlılık, dayanım ve uyumlu takviye elemanlarının piyasadaki sıklığı gibi özelliklerinden dolayı kompozit sektöründe termoplastik reçine tiplerinden daha çok tercih edilmektedirler. Epoksi reçine, vinilester reçine ve polyester reçine sıklıkla kullanılan termoset reçine tipleridir.

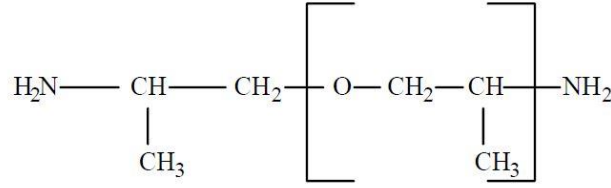
**Epoksi Reçineler:** Epoksi reçineler, polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan termoset polimerlerdir. Reaksiyona gireceği diğer ajanlar ile yan ürün vermemeleri kullanıldıkları zaman kütle kaybetmeyecekleri için ölçümlerde kolaylık sağlamaktadır. İyi bir yapışma özelliğine sahiptir ayrıca kürleştikten sonra iyi kimyasal, korozif dayanım ve yalıtım özellikleri gösterirler. Genellikle epiklorohidrin ve bisfenolün kimyasal reaksiyonu ile üretilirler ve iki ana maddenin farklı oranlarda kullanımında farklı amaçlar için epoksi çeşitleri elde edilebilir (Singla ve Chawla 2010).

Katalizörler, sertleştiriciler veya aktivatörler olarak adlandırılan bir kürleşme ajanı ile epoksi reçine kürleşerek rijit yapı elde edilir. Kürleştirici olarak genellikle amin ajanlar kullanılır ve her bir amin grubundaki hidrojen reaktif olduğundan epoksit halkasını açarak kovalent bağ oluşturabilirler (Singla ve Chawla 2010).

Kompozit alanında kullanılan epoksi, A ve B komponenti olarak satılır ve ikisinin belirli oranlarında karışımında optimum seviyede özellikler belirlenir. Genellikle A komponenti epoksi reçineyi B komponenti ise sertleştiriciyi temsil etmektedir. Sektörde en çok kullanılan A komponentinin kimyasal ismi “bisfenol A'nın diglisidil eteri” olarak, B komponentinin ise “sıvı aromatik aminler” olarak geçmektedir (Yang ve diğ. 2007). Şekil 2.31'de A ve B komponentlerine ait kimyasal yapı verilmiştir.



Epoksi Reçine (Diglisidil Eteri Bisfenol A)



Sertleştirici (Polidiamin Kürleştirici Ajan)

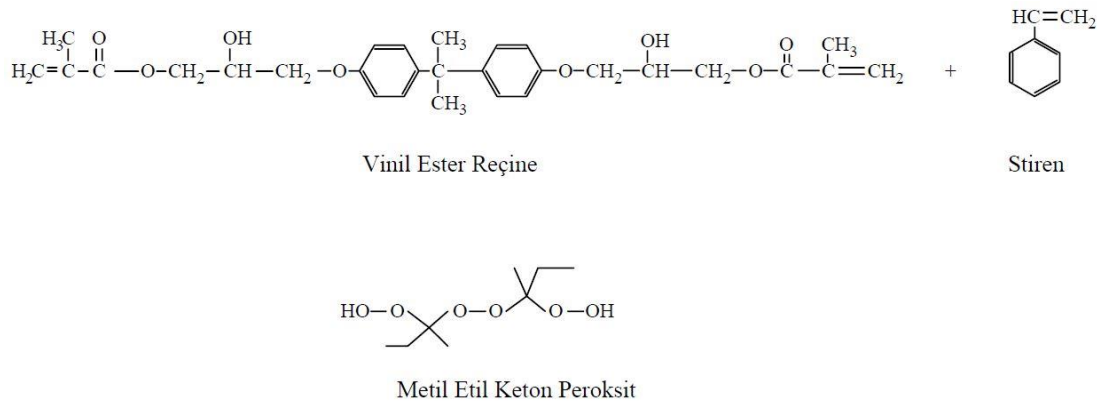
**Şekil 2.31:** Epoksi reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı (Mamudu ve diğ. 2023)

Epoksi reçineler, yüksek mukavemet ve sertlikleri, iyi dielektrik davranışları, kimyasallara, korozyona ve mikro-organizmalara karşı dirençleri, kürlenme sırasında düşük büzülme ve iyi termal özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında üst sınıf reçinelerdendir. Son zamanlarda uzay araştırmaları ve süperiletken kablo teknolojileri alanında da emprenye malzemeleri, yapıştırıcılar, teknik filmler ve elyaf takviyeli kompozit halde kullanılmaktadır (Yang ve diğ. 2007).

**Vinil ester Reçineler:** Epoksi ve genellikle akrilik veya metakrilik asitler gibi karboksilik asitlerin reaksiyonu ile elde edilen reçine sistemleridir. Denizcilik, askeri ekipmanlar gibi alanlarda da dayanıklı kompozitlerin oluşturulmasında görev alan vinil ester reçineler, stiren bileşikleri ile tüm bileşim aralığında homojen bir karışım olarak bulunurlar. Ticari olarak kullanımında uygun viskozite göstermesi için vinil ester reçinenin içeriğinde ağırlıkça %40-45 aralığında stiren bulunmaktadır (Rodriguez ve diğ. 2006).

Vinil ester reçinelerin viskozitesi, moleküllerinin moleküler ağırlığının ve reçinenin stiren içeriğinin ayarlanması ile kontrol edilir. Stiren burada reaktif bir seyreltici olarak görev alırken, vinil ester ise çapraz bağların oluşumunda ana ajan gibi davranır (Ziaee ve Palmese 1999). Aynı zamanda reçinenin kürleştikten sonra mekanik özelliklerin stiren içeriğinin bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini bilmek çok önemlidir. Stiren içeriği optimum seviyeyi aştığında vinil ester çift bağlarının oranı azalır ve stiren çift bağları artar. Bu da daha fazla stirenin eklenmesinin daha az çapraz bağ yapısı oluşturacağından reçinenin mekanik özelliklerini azaltmaktadır (Rodriguez ve diğ. 2006).

Kompozit alanında diğer reçinelerde olduğu gibi vinil ester reçineler, A ve B komponenti olarak bulunur ve A komponenti reçine, B komponenti sertleştirici olarak geçmektedir. A komponentinin kimyasal bilemişi vinil ester + stiren, B komponentinin ise genellikle metil etil keton peroksittir. Kimyasal bileşimler Şekil 2.32’de verilmiştir.



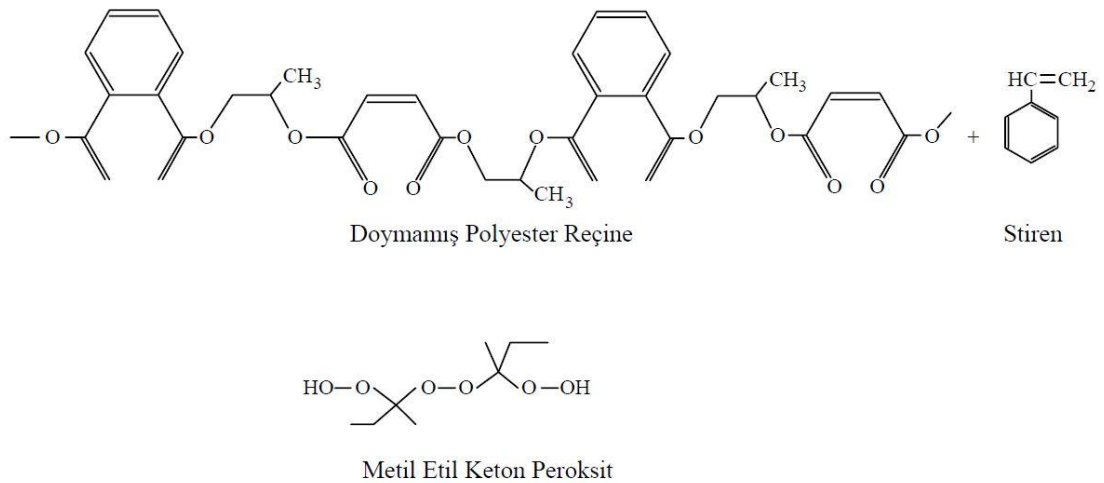
**Şekil 2.32:** Vinil ester reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı (Rodriguez ve diğ. 2006)

Vinilester reçineler, mekanik değerler açısından doymamış polyester ve epoksi reçineler arasında yer alır. Vinil ester reçineler iyi tokluk ve nem direncine sahip olmasından kaynaklı gemi ve tekne inşaatı, ticari ve askeri taşımacılık alanlarında denizcilik sektöründe polyester reçinelerden daha çok tercih edilmektedirler (Kandola ve diğ. 2018).

**Doymamış Polyester Reçineler:** Kompozitlerde kullanılan ilk matris malzemelerinden olan doymamış polyester reçinelerin ticari anlamda üretimleri 1930'lu yıllarda başlamıştır. Bu reçine grubu poliüretanlar ile birlikte en sık kullanılan çapraz bağlanabilir polimerik malzemeler arasındadır. Yüksek dolgu malzemesi, döküm gibi basit işlemler için kullanımı da oldukça yaygındır (Penczek ve diğ. 2005).

İçeriğinde bulunan monomerlerin, kürlenme ajanı ve katkı maddelerine bağlı olarak farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip polyester reçineler üretilebilir. Kompozit alanında en çok cam elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılmaktadırlar (Athawale ve Pandit 2019). Sentezlerinde ise başlıca hammadde olarak dibazik organik asit veya anhidridi ile bir dihidrik alkol (glikol) kullanılır. Çapraz bağ yapabilmeleri için dibazik asidin bir bölümünde doymamış grup veya çifte bağ bulunması gerekmektedir (İpek 2023).

Doymamış polyester reçineler, bünyelerinde vinil esterler gibi stiren bulundurulur. Burada stirenin hizmet ettiği amaç vinil esterlerdeki ile aynı olup viskoziteyi düşürüp çapraz bağ yapımını kolaylaştırmaktır. Reçinenin A komponenti ve B komponenti sırasıyla reçine ve sertleştiricisini temsil etmektedir. Sertleştirici olarak en yaygın metil etil keton peroksitler kullanılmakta olup Şekil 2.33'de doymamış polyester reçinenin kimyasal yapısı gösterilmiştir (İpek 2023).



**Şekil 2.33:** Doymamış polyester reçine ve sertleştiricisinin kimyasal yapısı (İpek 2023)

Termoset reçine tipleri, kullanılacak alana göre maliyet, mekanik, kimyasal özellikler ve takviye elemanı ile iyi arayüz oluşturma gibi etkenler göz önüne alınarak tercih edilmektedirler. Tablo 2.13'de bu reçinelere ait mekanik özellikler verilmiştir.

**Tablo 2.13:** Başlıca termoset matrislerin mekanik özellikleri (Sarasini 2023)

Reçine Tipi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Doymamış Polyester	1,1-1,2	45-90	2,5-4	80-110	3-5,5	2-3,2
Vinilester	1,12-1,32	70-90	3,5-4,5	120-150	2,7-4	2,5-6
Epoksi	1,1-1,4	30-110	2,5-10,5	90-145	2,5-10	0,8-6

### 2.2.2 Termoplastik Matrisler

Termoplastik matrisler, termosetlerde bulunan çapraz bağ yapısı yerine lineer molekül yapısına sahip, belli bir limite kadar ısıtılıp eritildiğinde tekrardan kalıplanabilir ve benzer özellikleri gösterebilen geri dönüştürülebilir matris grubu olarak tanımlanabilir (Wu ve diğ. 2022).

Son zamanlarda geri dönüştürülebilir polimerlerin kompozit endüstrinin birçok alanında kullanımının popülerleşmesi, reaktif termoplastik reçine sistemlerinin hem akademik hem sanayide büyük ilgi görmesini sağlamıştır. Matris malzemesi olarak termoset reçineler kadar iyi mekanik özellikler göstermesi adına çalışmalar hız kazanmıştır (Ageyeva ve diğ. 2018). Elyaf takviyeli termoplastik reçinelerden oluşturulan kompozitlerin 1990'lı yıllardan sonra malzeme formları ve kombinasyonları artmış olup havacılık, otomotiv, denizcilik ve inşaat sektörüne kadar kullanım alanları genişlemiştir (Vaidya ve Chawla 2008).



Poliamid (PA), polipropilen (PP), polietilen (PE) ve polietereketon (PEEK) gibi termoplastik polimerlerde çapraz bağ yapısı yok denilecek kadar az olduğu için tersine dönebilir termal, mekanik ve reolojik özelliklere sahiptir. Cam, karbon ve aramid gibi yüksek performans lifleri ile takviye edilebilmeleri termoplastik polimerlerin reçine gibi kullanılmasının önünü açmıştır. Termosetlere kıyasla, matris malzemesi olarak kullanılacak termoplastiklerin hammaddeleri sınırlı bir raf ömrüne sahip değildir. Ürün formları ihtiyaca yönelik özelleştirilebilir ve yüksek veya düşük hacimli üretilmeye kolayca adapte edilebilir. Endotermik reaksiyonlar vererek çevreye toksit veya çözücü emisyonlar salmazlar ve geri dönüştürülebilir olduğu için birçok konuda termosetlere göre avantajlıdır (Vaidya ve Chawla 2008).

**Poliamid (PA):** Monomerlerin birbirlerine amid bağları ile bağlanmasıyla oluşan polimerlere poliamidler denir. Yüksek kristal yapı, yüksek molekül ağırlığı olan lineer bağlı bir polimer çeşididir. Yüksek gerilemelere dayanıklı olan poliamidin en çok kullanılan çeşitleri PA6 ve PA6,6'dır. Buradaki sayılar içeriğinde bulunan diamine ve dikarboksilik asitteki karbon sayılarını temsil eder (Deopura ve diğ. 2008).

Cam elyaf takviyesi ile birlikte matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılırlar. İki malzemenin ucuz ve dayanıklı olması çoğu alanda uygun maliyette istenilen performansta ürünlerin kullanılmasının önünü açmıştır. Poliamid matrisler kullanılan cam elyaf tipinin özelliklerini göstermesini engellemekle beraber mekanik, kimyasal ve elektrik özelliklerinin iyi bir kombinasyonunu sunmaktadır.

**Polipropilen (PP):** Polipropilen monomerlerinde bulunan çift bağlar katalizörlerin etkisiyle açılır ve açık olan uçlara CH<sub>3</sub> ve H radikalleri bağlanarak polimer zincir yapısına ulaşmaktadır. Yapısal kararlılığa sahip ve korozyon dayanımı iyi olan polipropilen yoğunluğu en az olan polimer türlerinden biridir. Bu özelliği sayesinde de matris malzemesi olarak kullanıldığında mukavemet/yoğunluk oranı yüksek kompozit malzemeler elde edilmektedir. Polipropilen takviyesi olarak en çok cam elyaflar kullanılmaktadır ancak elyaf/matris ayrılması sorunundan dolayı geri dönüşümleri zordur (Alcock ve diğ. 2006).

**Polietilen (PE):** Sentezi en kolay olan termoplastik polimerlerden olan polietilen, çeşitli endüstriyel ürünlerde kullanılmakta olup üretimi en çok yapılan polimer çeşitlerinin başında gelmektedir. Temel olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) olarak iki gruptadırlar. Etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) gazının polimerizasyonu sonucunda oluşmaktadır. Düşük basınçtaki polimerizasyonu sonucu yüksek yoğunluklu, yüksek basınçtaki polimerizasyonu sonucunda düşük yoğunluklu polietilenler elde edilir. Katkılarla takviye edilerek matris malzemesi olarak kullanılır ve olumsuz özellikleri optimize edilerek daha çok ambalaj malzemelerinde kullanılır.

**Polietereterketon (PEEK):** Aromatik moleküler yapıya sahip olan polietereterketon (PEEK) bağ yapısının halkaları arasında keton ve eter fonksiyonel gruplarının kombinasyonlarını içermektedir (Martin ve Martin-Gonzalez 2012). Benzen halkaları, eter ve karbonil grubu PEEK'in yapısını oluşturur ve bu yapı kararlı kimyasal ve fiziksel özellikler göstermesini sağlar.

Yüksek yapısal kararlılık ve termoplastik polimerler arasında en yüksek mukavemetlerden birine sahip olmasından kaynaklı uçak ve türbin kanatlarında dahi kompozit halde kullanılmaktadır. Biyouyumluluğu sayesinde implant yapımında da kullanılmaktadır (Kurtz ve Devine 2007).

PEEK birçok olumlu yanı harici nispeten düşük aşınma dayanımına sahiptir. Bu durumu minimize etmek için PEEK bir matris malzemesi olarak kullanılıp yapısı takviye elemanları ile güçlendirilmektedir. Genellikle mikro veya nanoboyutta karbon vb. inorganik takviye elemanlarının kullanıldığı PEEK kompozit yapılarda mukavemetin artmasının yanı sıra aşınma ve darbe direnci de yükselmektedir (Kumar ve diğ. 2018).

Termoplastik matris malzemeler farkı isterlere göre farklı alanlarda kullanılmakta olup Tablo 2.14'de mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 2.14:** Başlıca termoplastik matrislerin mekanik özellikleri (Vaidya ve Chawla 2008)

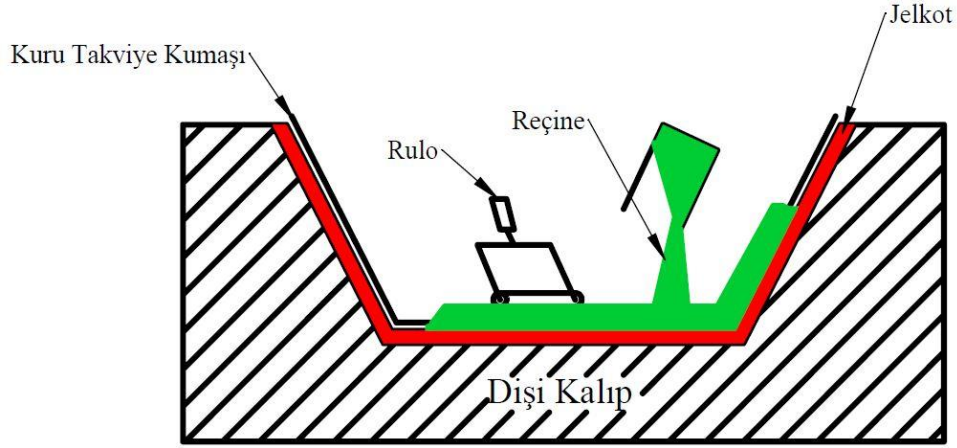
<b>Matris Tipi</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Çekme Mukavemeti (MPa)</b>	<b>Çekme Elastisite Modülü (GPa)</b>	<b>Erime Akış Hızı (g/10 min)</b>	<b>Erime Noktası (°C)</b>
PA	1,03-1,16	40-86	0,7-3,3	15-75	211-265
PP	0,89-0,91	28-39	1,5-1,75	0,47-350	134-165
PE	0,92	10-18	0,15	0,25-2,6	104-113
PEEK	1,3-1,44	90-110	3,1-8,3	4-49,5	340-344

### 2.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Endüstriyel anlamda en çok kullanılan kompozit tipleri elyaf/reçine birleşimleridir. Dolayısıyla bu kompozitleri üretmek için birçok metot geliştirilmiş olup halen daha gelişime açıktır ve yeni metotlar da denenmektedir. Temeli takviye olarak elyaf malzemelerine, başlangıçta sıvı olan veya ısı yardımı ile sıvı hale getirilen matris malzemesinin çeşitli yöntemlerle kalıplanarak emdirilmesi işlemidir. Açık ve kapalı kalıplama olarak ikiye ayrılabilir. Açık kalıplama, bir tarafı atmosfere açık şekilde kalıplanma yapılan yöntemlerdir. Bu yöntemin en bilindik temsilcileri el yatırması yöntemi, püskürtme yöntemi ve elyaf sarma yöntemidir. Kapalı kalıplama ise, dişi-erkek kalıbın olduğu veya kalıp yerine geçebilecek vakum torbalarının kullanıldığı şekillenme işleminin atmosfere kapalı yapıldığı kalıplama yöntemleridir. Kapalı kalıplamada en çok kullanılan yöntemler vakum infüzyon yöntemi, reçine transfer kalıplama yöntemi ve pultrüzyon yöntemleridir.

### 2.3.1 El Yatırması Yöntemi

Endüstride kullanımına başlanan ilk ve sürekli gelişime açık olan, düşük üretim miktarlarında kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu üretim yönteminde genellikle büyük ve karmaşık yüzeye sahip olması istenen parçalar imal edilmektedir. El yatırması metodu Şekil 2.34’de görüldüğü gibi, kalıba yatırılan elyaf veya kumaş haldeki takviye elemanının üstüne reçine dökülerek rulolama yardımı ile reçinenin takviye elemanına yedirildiği yöntemdir (Durgun 2014<sup>a</sup>).



Şekil 2.34: El yatırması yöntemi (Durgun 2014<sup>a</sup>)

Bu uygulamada sıklıkla jelkotlar kullanılmaktadır. Esasen renklendirilmiş reçine olan jelkotlar, parça yüzeyinin kusursuza yakın yüzey pürüzlülüğünde çıkması sağlar. Jelkot, kalıba uygulanmadan önce kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı sürülür. Ardından jelkot uygulaması yapılır ve takviye kumaşları yerleştirilir. Üretilcek parçanın kalınlığına göre kumaşlar katmanlar halinde yatırılır. Burada sıklıkla her kat arasına reçine dökülerek rulo yardımı ile hava boşluğu kalmayacak şekilde yedirilir. Fakat katmanlar halinde yatırılan kumaşlardan sonra reçine uygulamasının yapıldığı üretimler de mevcuttur (Durgun 2014<sup>a</sup>).

Üretilcek parça, kalıbın şekli ile sınırlı olup parçanın sadece kalıba bakan kısmı düzgün bir yüzeye sahiptir. Dolayısıyla erkek kalıp kullanılırsa parçanın dış yüzeyi düzgün olmaz. O yüzden genellikle el yatırmasında kalıp olarak dişi kalıplar kullanılır. Reçine, içerisinde bulunan hızlandırıcı, sertleştirici ve diğer ajanlara bağlı olarak ısıtılarak veya bekleyerek kürleşebilir.

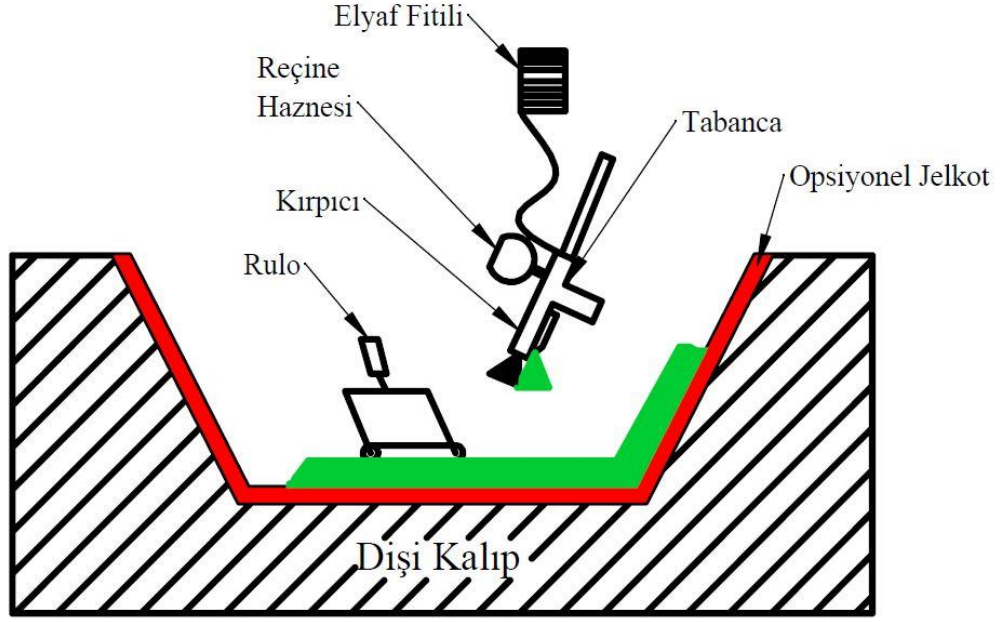
En son apak alma, polishing gibi işlemlerin ardından ürün kullanıma hazır olur. Küçük tekneler, kayıklar ve bazı otomotiv parçaları bu yöntem ile üretilen en bilindik parçalardır. El yatırması metodunun avantajları ve dezavantajları Tablo 2.15’de verilmiştir.

**Tablo 2.15:** El yatırması yönteminin avantajları ve dezavantajları (Durgun 2014<sup>a</sup>)

<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
Az sayılı üretimler için düşük üretim maliyetine sahip olması.	Yöntem işçinin el becerisine bağlıdır.
ğrenilmesi ve uygulanması kolaydır.	Tek yüzü düzgün parçalar imal edilebiliyor olması.
Kalıbı yapılabilen her geometride parça üretimi, tasarım esnekliği.	Aynı tip her üretilen parçada kalınlık toleransının fazla olması.
retime yönelik sarf malzeme temininin kolay olması.	Uygulama anında kumaşların kayma, elyaf düzeninin bozulma ihtimalinin yüksek olması.
Boyutsal kısıtlamamanın olmaması.	Reçinenin bulunmadığı boşluklu parçaların üretim riskinin fazla olması.

### 2.3.2 Püskürtme Yöntemi

Kesik elyaf denilen takviye elemanlarının ve reçinenin bir tabanca yardımı ile kalıba püskürtülmesi ve ardından rulo yardımı ile iyice emdirilmesiyle yapılan bir metottur. Kullanılan tabanca, reçine haznesinden reçineyi alır ve aynı zamanda sürekli filament halinde bulunan elyaf fitilleri tabancaya bağlanarak belirli uzunlukta kesilir. El yatırması ile arasındaki temel fark reçine ve takviye elyafının manuel olarak değil tabanca ile kalıba aktarılıyor olmasıdır. Şekil 2.35’de gösterilen bu üretim metodunda aynı zamanda takviye malzemesinin kumaş formu kullanılamamaktadır.



Şekil 2.35: Püskürtme yöntemi (Url\_25)

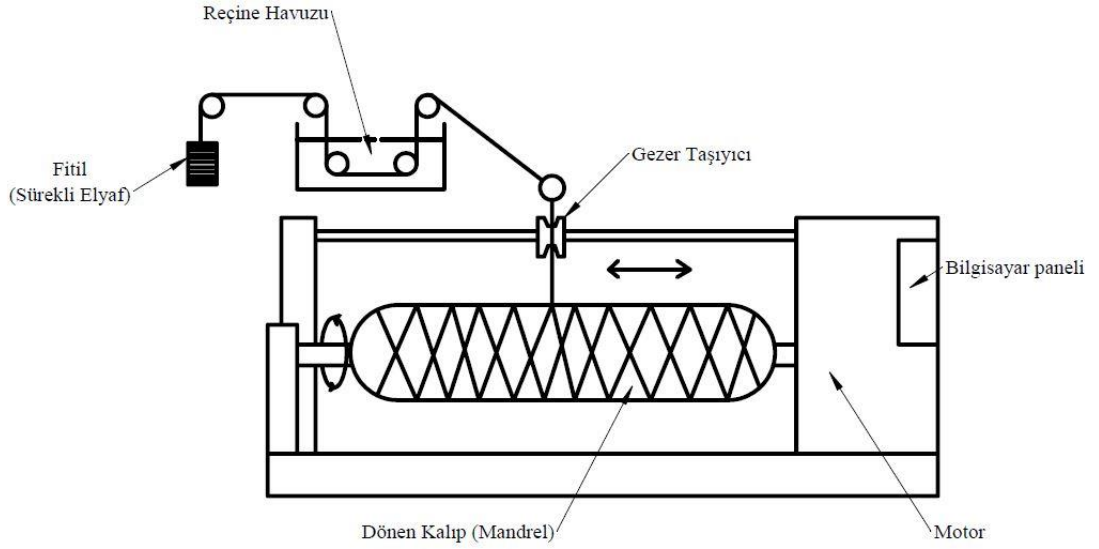
El yatırması metodu ile benzer ilk adımlar izlenerek kalıp ayırıcısı sürülür ve ardından istere göre jelkot uygulaması yapılır. Ardından tabanca yardımı ile fitilden çekilen elyaflar istenilen boyutlarda kırılarak reçine ile beraber kalıba püskürtülür ve rulo yardımı ile iyice emdirilir. Buradaki reçine haznesinde sadece sertleştirici bulunup tabanca hortumundan reçinenin A komponenti gönderilir. Ancak reçinenin kürleşme süresi uzun ise ikisi de haznede bulundurularak püskürtme işlemi yapılabilir. Püskürtme yönteminin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.16’da verilmiştir.

**Tablo 2.16:** Püskürtme yönteminin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük maliyetli bir üretim yöntemidir.	Tek yüzü düzgün parçalar imal edilebiliyor olması.
Kalıbı yapılabilen her geometride parça üretimi, tasarım esnekliği.	Aynı tip her üretilen parçada kalınlık toleransının fazla olması.
El yatırmasına göre daha az malzeme israfı.	Reçinenin bulunmadığı boşluklu parçaların üretim riskinin fazla olması.
İşçiliğin el yatırmasına göre az olması.	Sadece kesik elyaf formunun takviye olarak kullanılabiliyor olması.

### 2.3.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Bu metot, fitillerin silindirik ve simetrik kalıplara belirli bir açı ile sarıldığı üretim yöntemleridir. Elyaf lar önceden bir reçine banyosuna daldırılıp kalıp niyetine kullanılan parçalara sarıldığı gibi kuru sarım yapılarak sonrasında reçine banyosuna da daldırılabilir (Genç 2008). Metodun ilk kullanıldığı zamanlarda çoğu fonksiyon manuel yapılmaktaydı fakat gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde bilgisayar kontrollü şekilde yapılmaktadır ve Şekil 2.36’da gösterilmiştir.



Şekil 2.36: Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma metodunda, kalıp niyetine kullanılan mandrel ismi de verilen parçalar kullanılır. Parçanın dış çapı üzerine ne kadar daha kalınlık eklenilmesi isteniyorsa ona göre operatör belirli parametreleri makineye girmektedir. Boru çapı, lif açısı ve kalıp dönüş hızı gibi parametreler girildikten sonra kalıp sabit hızla dönerken lif dağıtım ünitesi üzerinde ileri-geri hareket ederek sarım işlemi gerçekleşir (Genç 2008).

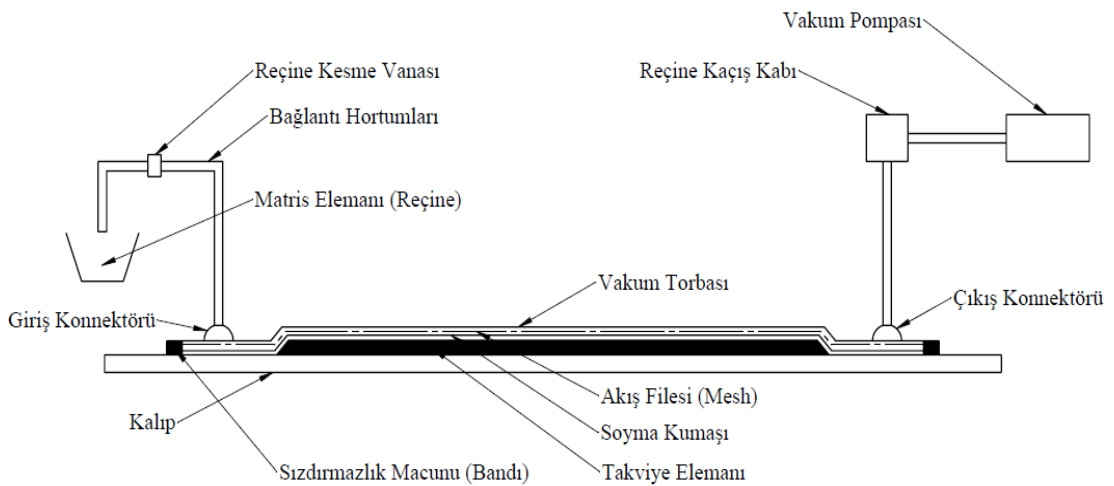
Kalıp niyetine kullanılan silindirik parçalar, tam bir kapalı kompozit tank benzeri ürünlerin oluşturulmasının ardından kompozit yapının içerisinde kalmaktadır. Ancak belli bir bölgesi açık boru benzeri parçaların imalatında kalıp niyetinde kullanılan parça kompozit yapıdan ayrılabilir (Işık 2008). Hidrojen tankı, kompozit boru, roket gövdeleri gibi silindirik parçaların imalatında sıklıkla kullanılmakta olup avantajları ve dezavantajları Tablo 2.17’de verilmiştir.

**Tablo 2.17:** Elyaf sarma yönteminin avantajları ve dezavantajları (Işık 2008)

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Sürekli ve kesintisiz elyaf takviyesi sayesinde yüksek mukavemetli ürünler üretilebilir.	Sadece silindirik ve simetrik malzeme üretimine uygundur.
İmalat için işçilik azdır.	Kalıbın ana parçadan ayrılma zorluğu.
Kolay bir üretim metodudur.	İç bükey tasarımların yapılamaması.
Çeşitli takviye ve reçine malzemeleri kullanılabilir.	Sadece fitil hali bulunabilen takviye elemanları ile üretimin mümkün olması.

### 2.3.4 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum altında bırakılan kumaş takviye elemanına yine vakum yardımı ile reçine transferi yapılan ve Şekil 2.37’de gösterildiği gibi atmosfer basıncından yararlanılarak parçaya şekil verilen kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemde en önemli hususlardan biri kullanılacak reçinenin viskozitesinin yönleme uygun olmasıdır. Hızlı emiş sayesinde üretim süresini kısaltması ve üretim süreci tamamlanmadan reçinenin donmaması optimum ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır (Durgun 2014<sup>b</sup>).



**Şekil 2.37:** Vakum infüzyon yöntemi



Reçine akış yolları ve sistematığının parça imalatında dikkate alınması ve ona göre kurgulanması gerekmektedir. Çok farklı geometrilerde parçalar imal edilebilir ancak üretim metodunun mantığı her zaman aynıdır. Vakum infüzyon yönteminde şu adımlar izlenmektedir;

- Öncelikle kalıptan, yabancı maddeler ve yüzey pürüzlülüğü olabildiğince uzaklaştırılmalıdır. Ardından kalıba kalıp ayırıcı kimyasal sürülür. Vakum altında atmosfer basıncı, yüksek yüklerle baskı yapacağından parçanın kalıptan ayrılması için kalıp ayırıcı birden çok defa uygulanabilir.
- Ardından kullanılacak takviye kumaşı kaç kat ise hepsi üst üste düzgün bir şekilde kalıba yatırılır. Sızdırmazlık elemanı, hem hava hem de reçine kaçışını engellemek için kalıp ve parça büyüklüğüne bağlı olarak kalıbın ilgili yerlerine yapıştırılır.
- Vakum torbasının reçine kürleşmeden parçaya yapışmaması için kumaş katlarının üstüne soyma kumaşı, onun da üstüne reçine akışını düzenlemek için akış filesi yatırılır. Soyma kumaşı, kürleşmiş haldeki parçadan kolaylıkla ayrılabilmesi için kumaşlardan daha büyük boyutlarda kesilir. Akış filesi de aynı şekilde daha büyük boyutlarda yerleştirilebilir.
- Konnektörler reçine giriş-çıkış yerlerine yerleştirilir ve ardından vakum torbası, vakum anında gerginleşmeyecek şekilde sızdırmazlık elemanına yapıştırılarak kalıbın diğer eşi gibi kullanılır. Ardından reçinenin giriş-çıkış yapacağı konnektörlerin olduğu bölgeler delinir ve reçine hortumu konnektörlere sızdırmayacak şekilde bağlanır.
- Reçine giriş kısmındaki hortum reçine haznesine, çıkış kısmındaki hortum reçine kaçış kabına yerleştirilir. Reçine kaçış kabının amacı hem basınçölçeri sayesinde kaçak olup olmadığını anlamak ve reçinenin vakuma kadar gidip cihazı bozmasını engellemektir.
- Vakum, reçinesiz bir şekilde çalıştırılarak sistemde kaçak var mı kontrol edilir. Ardından reçinenin A ve B komponenti istenilen oranda karıştırılarak sisteme verilir, kumaşların tamamen emdiğinden emin olana kadar sistem çalıştırılır.
- İnfüzyon işlemi tamamlandıktan hortumlar sıkılır ve sonra pompa kapatılır. Reçineye bağlı olarak parça bekleyerek veya fırına atılarak ısı yardımı ile kürleştirilir. En son sarf malzemeler kalıptan sökülerek parça kalıptan alınır.

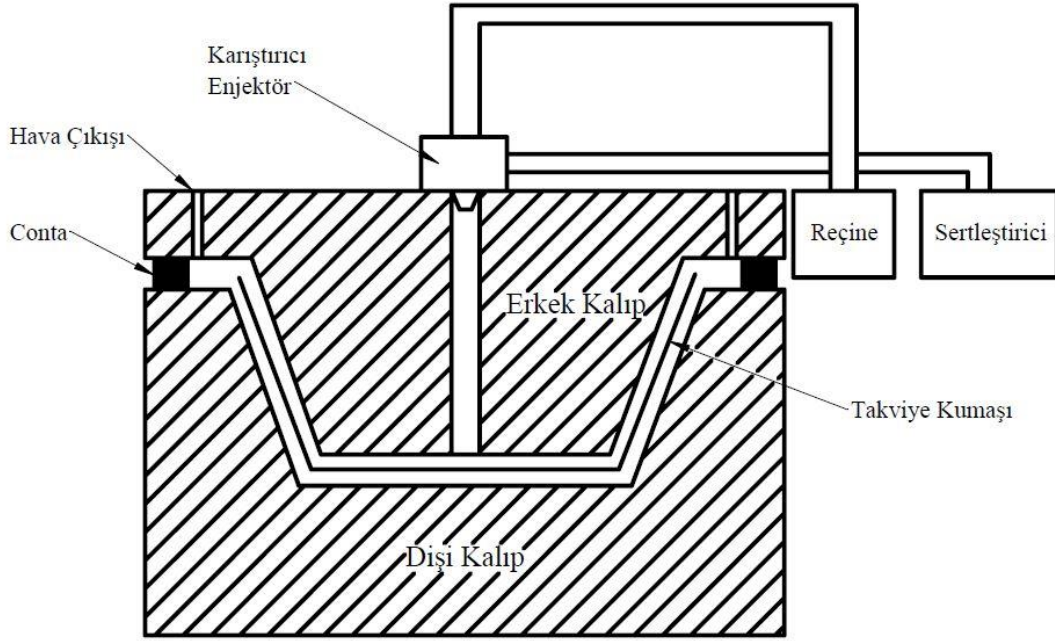
Bu yöntemin, rüzgar türbini ve yat gövdeleri gibi devasa parçaların imalatında kullanılmasının yanı sıra küçük parçaların üretiminde de sıklıkla kullanılmaktadır. Avantajları ve dezavantajları Tablo 2.18’de verilmiştir.

**Tablo 2.18:** Vakum infüzyon yönteminin avantajları ve dezavantajları (Durgun 2014<sup>b</sup>)

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Takviye kumaşına bağlı olarak optimum elyaf oranı sağlanabilir. Bu sayede daha mukavemetli ve uzun ömürlü ürünler üretilebilir.	Ekipman sayısının fazla olması.
Aynı şartlarda aynı malzemelerle standart ürünler elde edilebilmesi.	Sarf malzemelerin çok sayıda olması.
Kapalı bir alanda gerçekleştiği için temiz üretim yapılabilmesi.	Diğerlerine göre nispeten maliyetli bir üretim yöntemi olması.
Büyük parçaların imalatında kullanılabilmesi.	Sadece uygun viskoziteli reçinelerin kullanılabilmesi.
Optimum üretimde minimum reçine sarfıyatı sağlanabilir.	Özellikle büyük parçalar için üretimin karmaşık olması.

### 2.3.5 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

Oluşturulacak parçanın şekline göre önceden kesilmiş takviye kumaşlarının dişi ve erkek kalıplarının arasına yatırılarak kapatıldığı ve kalıp içerisine reçinenin enjekte edildiği bir üretim metodudur. Bu üretim metodunda reçinenin kalıp içerisinde optimum hızda ve sistematik akış sağlayabilmesi için hesaplanan noktalarda üste kalan kalıba reçine giriş bölgeleri açılır. Ayrıca sızdırmazlık için kalıp sınırlarına contalar yerleştirilir ve içeride hava kalmasın diye bu bölgelerin yakınlıklarına hava çıkış kanalları açılır. RTM prosesinin en önemli özelliği iki tarafı da düzgün, isteye göre jelkotlu yüzeyler elde edilebilir olmasıdır (Işık 2008). Üretim metodu Şekil 2.38’de gösterilmiştir.



Şekil 2.38: RTM yöntemi (Chaudhari 2013)

Bu üretim metodunda kalıp malzemesi kompozitten yapılabildiği gibi uzun ömürlü ve sık kullanılacak kalıplar paslanmaz çelikten de yapılabilmektedir. Aynı zamanda uzun ömürlü kalıp kullanımı için özel ısıtma ve soğutma sistemleri kalıplar içerisinde kullanılmaktadır. Kalıplarda kullanılacak basınç, kalınlığı ve kalınlıktan dolayı mekanik özellikleri etkileyeceği için çok önemlidir (Mazumdar 2002). Sistem, orta ve yüksek üretim miktarları için kullanıma uygun olmakla beraber Tablo 2.19’da avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 2.19: RTM yönteminin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Takviye/Matris oranının ayarlanabilir olması.	Kalıp maliyetinin nispeten fazla olması.
Aynı şartlarda aynı malzemelerle standart ürünler elde edilebilmesi.	Özellikle karmaşık kalıplarda reçine özellikleri değişirse akışın da değişmesinden kaynaklı yaşanabilecek problemler.
Kapalı bir alanda gerçekleştiği için temiz üretim yapılabilmesi.	Ayar parametrelerinin çok olması ve her tip reçine ve takviye kumaşı için değişebilmesi.
İki yüzü pürüzsüz parçalar elde edilebilmesi.	Conta, kilit ve vb. aksesuarlarının bakım sıklığı.

### 2.3.6 Pres Kalıplama Yöntemi

Temelinde ısıtılmış dişi ve erkek kalıbın preslenerek aradaki takviye ve matris malzemesinin birbirlerine yedirilmesi mantığına dayanır. SMC, BMC, ıslak sistemli preform ve keçeleri presleme, takviyeli termoplastik levha presleme olarak çeşitleri vardır. Ancak piyasada en çok SMC ve BMC bileşenleri bu yöntem için kullanılmaktadır.

**Tabaka Kalıplama Bileşeni (SMC):** Kompozit parçalarda takviye elemanı, matris reçinesi, dolgu malzemeleri ve diğer ajanlar gibi istenilen malzemelerin toz ve sıvı girdilerinin iki şerit film arasında sıkıştırılarak tabakalar haline getirildiği bütünleştirilmiş kalıplama bileşenleridir. Pestil adı da verilen bu tabakalar sarılarak hazır kalıplanabilir elemanlar olarak satılmaktadır. Bir örneği Şekil 2.39'da verilmiştir.



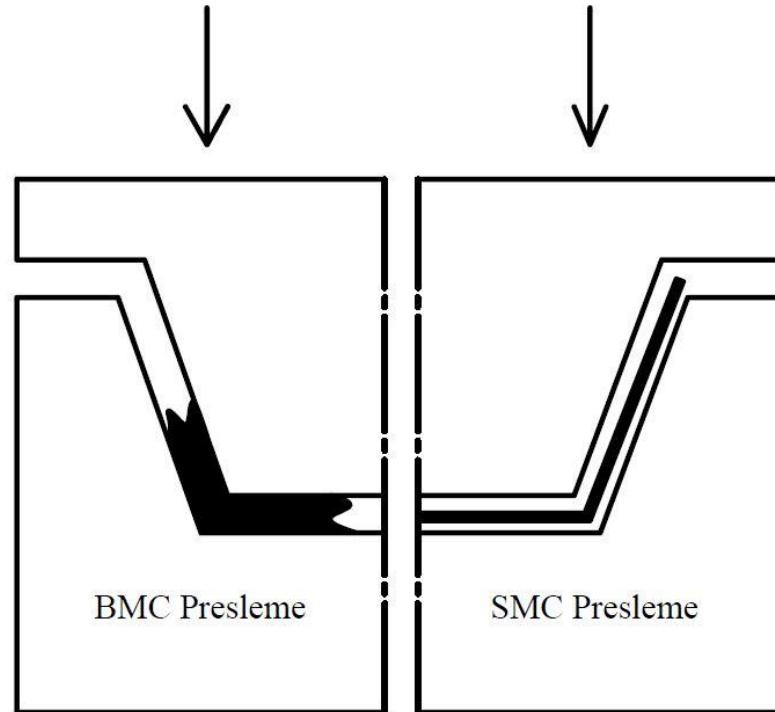
Şekil 2.39: SMC hazır kalıplama (Url\_26)

**Toplu Kalıplama Bileşeni (BMC):** Kırpılmış elyaf takviyesi, reçine, katalizör, toz haldeki dolgu maddeleri ve diğer ajanların karıştırılarak hamur haline getirildiği hazır kalıp malzemeleridir. Örnekleri Şekil 2.40'da gösterilmiştir.



Şekil 2.40: BMC hazır kalıplama hamuru (Url\_27)

Hem SMC hem de BMC bileşenlerin üretiminde sıcak presleme yapılmakta olup Şekil 2.41’de gösterilmiştir. Yüksek üretim hızları ve nispeten düşük mukavemetin yeterli olacağı endüstriyel ürünlerin ve parçaların üretilmesinde birebir bir metottur. Kalıbın preslenmesi ile beraber malzeme içerisinde kalan hava boşlukları basıncın etkisi ile kalıbın yanlarından dışarı atılır. Pres kalıplama yönteminin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.41: BMC ve SMC presleme yöntemi

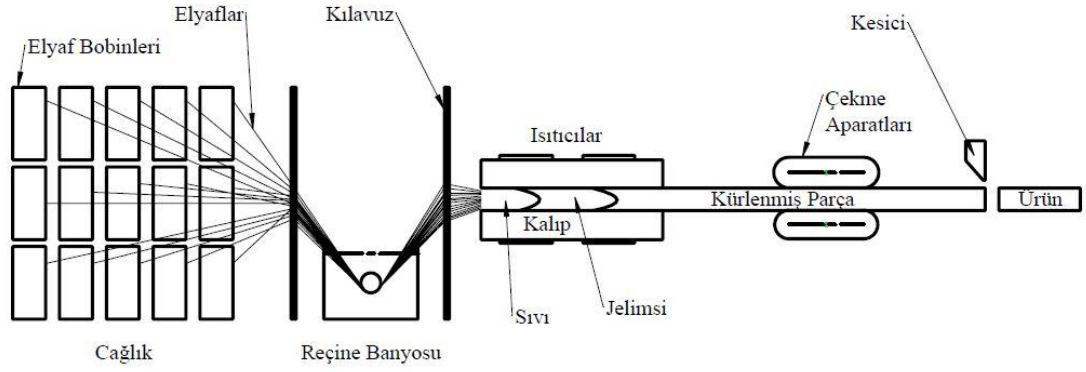
**Tablo 2.20:** Pres kalıplama yönteminin avantajları ve dezavantajları (Işık 2008)

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Hızlı ve seri üretim.	Elyaf oranının az ve karışımların dolgu içermesinden kaynaklı SMC ve BMC'den üretilecek parçaların diğer metotlarda üretilen kompozitlere göre nispeten düşük mukavemette kalması.
Homojen karışımli pestil ve hamurlarında standart ürün elde edilebilir olması.	Pahalı elyaf ve reçine kullanılan BMC ve SMC malzemelerinin pahalı olması.
Tek işlemden nihai ürün elde edilmesi.	Belli süreden sonra kalıpların sık sık nikel veya krom ile kaplama ihtiyacının doğması.

### 2.3.7 Pultrüzyon Yöntemi

Cağlık sisteminde tutulan elyaf fitillerinden elyafların çekilerek bir reçine banyosundan geçirildiği veya reçine enjekte edilerek ısıtıldığı, ardından kademeli ısıtma sistemine tabii tutularak kalıptan geçirilerek kürleştirildiği ve şekil verildiği bir kompozit üretim metodudur. Sonsuz üretim sınıfına giren bu sistem, ekstrüzyon sistemlerindeki gibi profil parçaların üretimde kullanılmaktadır.

Sonsuz üretim olduğu için işçiliğe, sadece set edilirken ve çıkan ürünlerin paketlenmesinde ihtiyaç duyulmaktadır. Pultrüzyon ürünleri tutarlı kaliteye sahip olmakla birlikte çıkan ürünlere ikinci bir işlem uygulanma ihtiyacı duyulmaz. Cağlıktan çekilen elyaflar reçine ile ısıtıldıktan sonra kalıp, kılavuz yardımı ile beslenir. Reçine, kalıptaki ısıtma adımlarında sıvıdan jelimsi yapıya daha sonra da katı hale geçer ve bu sayede parça kalıcı şekil alır. Bu üretim metodunda takviye elyafları kompozitin içerisinde tek yön olarak buldukları için kompozitte de tek yönde, uzun kesitte çekme mukavemeti sağlarlar (Baran 2015). Pultrüzyon üretim metodu Şekil 2.42'de verilmiştir.



Şekil 2.42: Pultrüzyon üretim yöntemi (Baran 2015)

Bu metot ile kare profiller, I ve T profiller, düz plakalar ve silindirik profiller gibi profil mamüller üretilmektedir. Kompozit parça kalıpta sertleştikten sonra çekme ruloları veya aparatıyla çekilerek istenilen uzunluklarda kesilir ve üretim tamamlanmış olur. Pultrüzyon üretim metodunun avantajları ve dezavantajları Tablo 2.21’de verilmiştir.

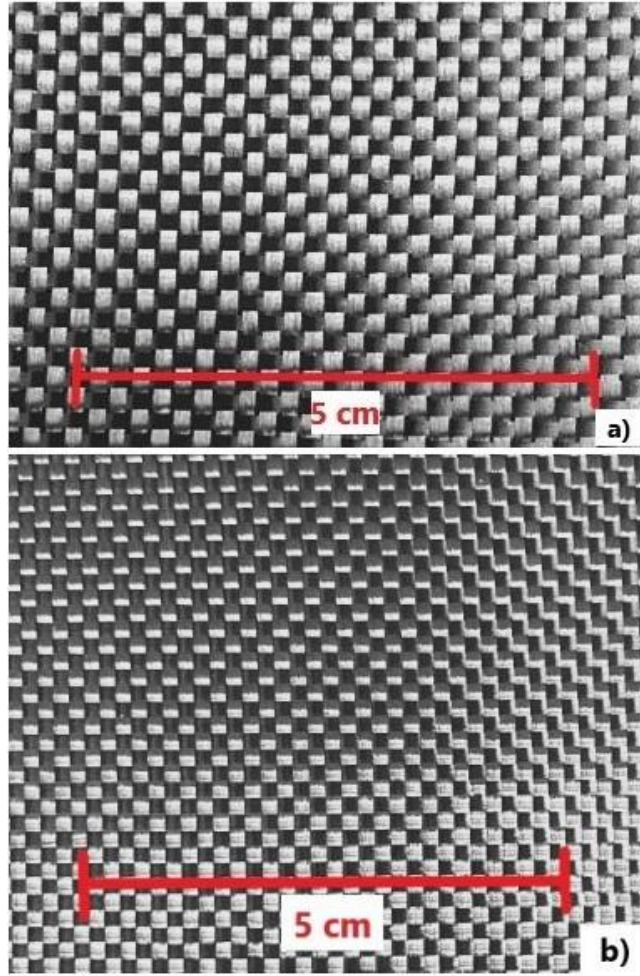
Tablo 2.21: Pultrüzyon üretim yönteminin avantajları ve dezavantajları (Işık 2008)

Avantajlar	Dezavantajlar
Hızlı, seri ve tasarruflu üretim	Tek yön takviyeli kompozit üretimi olduğundan dolayı sadece tek doğrultuda yüksek mukavemet elde edilmesi.
Sonsuz üretim olduğu için istenilen uzunlukta imalat yapılabilmesi.	Reçinelerin sık sık kalıba yapışma eğilimi göstermesi ve kalıpların sık sık kaplanma ihtiyacı duyulması.
Elyaf doğrultusunda takviye elemanından maksimum mukavemet elde edilebilir.	Kalıp içerisinde oluşacak hataya müdahale fırsatı olmaması. Bundan kaynaklı bitmiş üründe hatalı bölgeye kadar kullanımın mümkün olması.
Düşük işçilik.	Sıfırdan üretimde set etme süresinin uzun olması.

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Materyallerin Belirlenmesi

Tez çalışmasında takviye elemanı olarak kullanılan karbon elyaf kumaş takviyeleri 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> kumaş alan kütlelerine sahiptir. 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş DowAksa AKSACA™ A-38 marka 3K elyaftan, 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş ise Mitsubishi Chemical PYROFIL™ TR30S3L marka 3K elyaftan Spinteks Tekstil İnşaat San. ve Tic. A.Ş. tarafından imal edilmiştir. Çift yön (bidirectional) olan karbon kumaşların görselleri ve teknik özellikleri Şekil 3.1 ve Tablo 3.1’de gösterilmiştir.



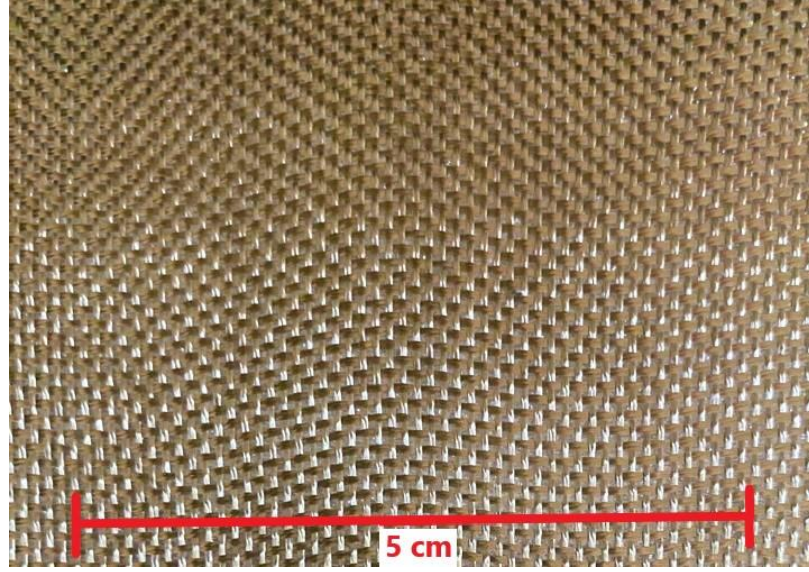
Şekil 3.1: Karbon elyaf takviye kumaşları a) 200 g/m<sup>2</sup> çift yön karbon kumaş, b) 245 g/m<sup>2</sup> çift yön karbon kumaş



**Tablo 3.1:** Karbon elyaf takviye kumaşlarının özellikleri

<b>Özellikler</b>	<b>200 g/m<sup>2</sup> Çift Yön Karbon Kumaş</b>	<b>245 g/m<sup>2</sup> Çift Yön Karbon Kumaş</b>
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,78	1,79
Elyaf Çapı (µm)	7	7
İplik Numarası	3K (200 g/km ±%2)	3K (200 g/km ±%2)
Atkı Sıklığı (cm <sup>-1</sup> )	5 ± %5	6 ± %5
Çözümlü Sıklığı (cm <sup>-1</sup> )	5 ± %5	6 ± %5
Kumaş Alan Kütlesi (g/m <sup>2</sup> )	200 ± %5	245 ± %5
Kumaş Deseni	Bezayağı (Plain)	Bezayağı (Plain)
Çekme Dayanımı (MPa)	3800 ± %5	4120 ± %5
Elastisite Modülü (GPa)	240 ± %5	235 ± %5
Kopma Uzaması (%)	1,6 ± %5	1,75 ± %5

Karbon elyafta “K” sembolü, bir fitilde kaç adet karbon filament olduğu anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle, 3K bir iplikte 3000 adet filament olduğunu belirtmektedir (K = 1000 adet filament). Bazalt fiber takviye kumaşı ise 200 g/m<sup>2</sup> kumaş alan kütlesine sahip olup Zhejiang GBF Basalt Fiber Co., Ltd. firması tarafından 100 tex elyaftan imal edilmiştir. Çift yön (bidirectional) olan bazalt kumaşın görseli ve teknik özellikleri Şekil 3.2 ve Tablo 3.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2:** Bazalt elyaf takviye kumaşı (200 g/m<sup>2</sup> çift yön bazalt kumaş)

**Tablo 3.2:** Bazalt elyaf takviye kumaşının özellikleri

Özellikler	200 g/m <sup>2</sup> Çift Yön Bazalt Kumaş
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,60 – 2,63
Elyaf Çapı (µm)	13
İplik Numarası (g/km, Tex)	100 ± %2
Atkı Sıklığı (cm <sup>-1</sup> )	10 ± %5
Çözü Sıklığı (cm <sup>-1</sup> )	10 ± %5
Kumaş Alan Kütlesi (g/m <sup>2</sup> )	200 ± %5
Kumaş Deseni	Bezayağı (Plain)
Çekme Dayanımı (MPa)	3100 ± %5
Elastisite Modülü (GPa)	88-92
Kopma Uzaması (%)	3,5 ± %5

Matris malzemesi olarak kullanılan ve termoset polimer türlerinden olan epoksi reçinenin markası HEXION EPIKOTE™ Resin MGS® LR635 olup sertleştiricisinin markası ise HEXION EPIKURE™ Curing Agent MGS® LH637'dir. Reçine ve sertleştirici üzerinde çalışma süresini uzun tutmak için kürleşme süresi yüksek ve viskozitesi düşük bir epoksi reçine seçilmiş olup teknik özellikleri Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Epoksi reçinenin özellikleri

Özellikler	Birim	Resin MGS® LR635
Yoğunluk (25 °C'de)	g/cm <sup>3</sup>	1,12 – 1,18
Viskozite (25 °C'de)	mPa.s	2,700 – 3,700
Refrakter endeksi (25 °C'de)	-	1,564 – 1,567

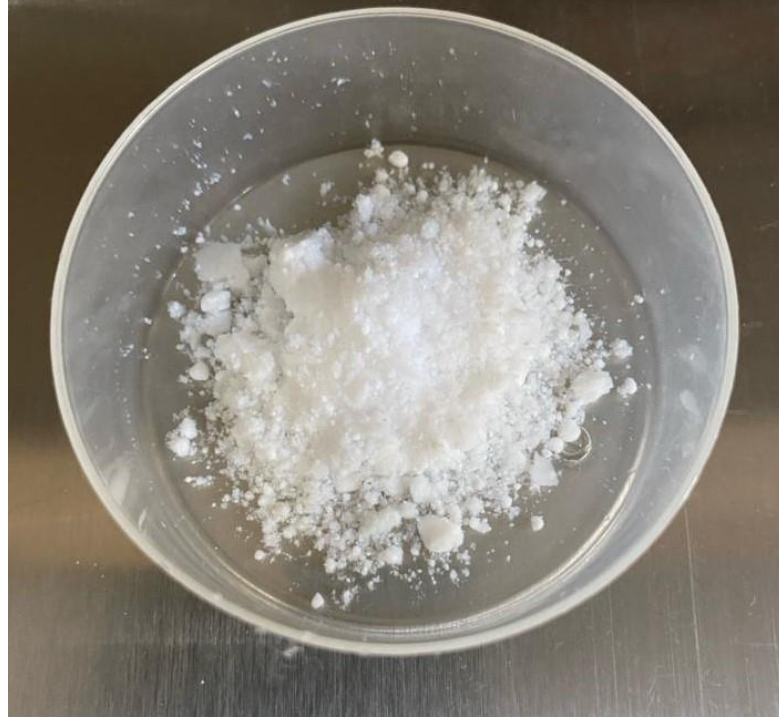
**Tablo 3.4:** Sertleştiricinin özellikleri

Özellikler	Birim	Curing Agent MGS® LH637
Yoğunluk (25 °C'de)	g/cm <sup>3</sup>	0,92 – 0,96
Viskozite (25 °C'de)	mPa.s	5 - 30
Refrakter Endeksi (25 °C'de)	-	1,445 – 1,455
Çalışma Ömrü*	min	~320
T <sub>G</sub> (Camsı Geçiş Sıcaklığı)	°C	~82
Ağırlıkça Karışım Miktarı**		30 ± 2

\*100 g LR635 reçinenin ile LH637 sertleştiricinin karışımında 30 °C'de kürleşme şartlarında

\*\* 100 birim LR635 reçine başına LH637 sertleştirici kullanım miktarıdır. Tez çalışmasında satıcı firma tavsiyesi üzerine 100 (A) / 28 (B) oranında karışım yapılmıştır.

Oluşturulan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini artırma amacı ile içerilerine eklenen nanopartikül olan SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün görseli ve teknik özellikleri Şekil 3.3’de ve Tablo 3.5’de verilmiştir. Nano boyutlarda takviye edilen partiküller epoksinin belirli ağırlık oranlarınca konulmuştur.



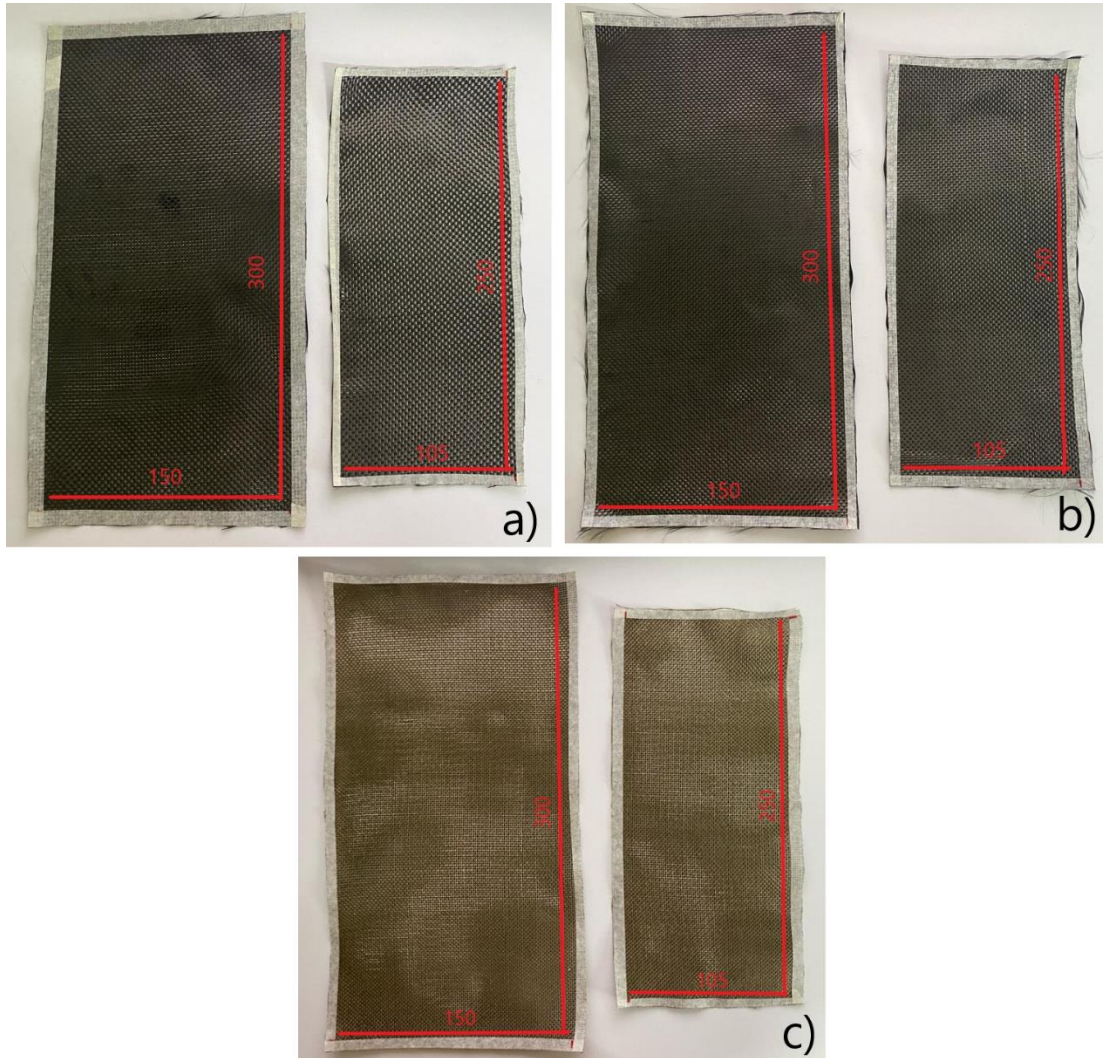
Şekil 3.3: SiO<sub>2</sub> nanopartikülü

Tablo 3.5: SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün özellikleri

Özellikler	Birim	Değerler
Ortalama Çap	nm	13 – 22
Saflık	%	99,95
Renk	-	Beyaz
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2,2
Morfoloji	-	Küresel
Spesifik Yüzey Alanı	m <sup>2</sup> /g	165 - 195

### 3.2 Kompozitlerin Oluşturulması

Çalışmada kullanılan 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> çift yön karbon kumaşlar ve 200 g/m<sup>2</sup> çift yön bazalt kumaşlar çekme, eğilme ve izod darbe deneyleri için farklı boyutlarda kesilmiş olup test metotlarında tavsiye edilen kalınlıklara uygun şekilde kaç kat kullanılacağı belirlenmiştir. Kullanılan kumaş türü, kumaş alan kütlesi, SiO<sub>2</sub> oranı verileriyle de numunelere belirli kodlar verilmiştir. Kesilen kumaş parçaları Şekil 3.4'de, numune kodları ise Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Kumaş toplarından daha iyi ölçü alabilmek için yapıştırılan maskeleme bantları boyutlara dahil olmayıp bantlı kısımlar kumaşlar kalıba yatırılmadan önce kesilmiştir.



**Şekil 3.4:** Kesilen kumaşların ölçüleri a) 200 g/m<sup>2</sup> çift yön karbon kumaş, b) 245 g/m<sup>2</sup> çift yön karbon kumaş, c) 200 g/m<sup>2</sup> çift yön bazalt kumaş

**Tablo 3.6:** Oluşturulan kompozitlerin numune kodları

Numune	Kumaş Alan Kütlesi (g/m <sup>2</sup> )		Kumaş Türü		SiO <sub>2</sub> Oranı (%)		
	200	245	Karbon	Bazalt	0	1	2
200CF0	✓	-	✓	-	✓	-	-
200CF1	✓	-	✓	-	-	✓	-
200CF2	✓	-	✓	-	-	-	✓
245CF0	-	✓	✓	-	✓	-	-
245CF1	-	✓	✓	-	-	✓	-
245CF2	-	✓	✓	-	-	-	✓
200BF0	✓	-	-	✓	✓	-	-
200BF1	✓	-	-	✓	-	✓	-
200BF2	✓	-	-	✓	-	-	✓

SiO<sub>2</sub> oranları kompozit parçaların yapımında kullanılan epoksi reçine ve sertleştiricisinin toplam kütesinin oranlarıdır. SiO<sub>2</sub> nanopartikül takviyesinin kütlece %0 - %1 - %2 oranlarında konulmasının sebebi, literatürdeki çoğu çalışmada SiO<sub>2</sub>'nin %2'den sonra mekanik özellikleri artırmadığı veya azalttığı yönündeki çalışmalardır (Çalışkan 2021, Emrahi vd. 2023). Reçine ve sertleştirici kütlece 100 (A) / 28 (B) karışım oranlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan reçine ve sertleştirici karıştırılmadan önce belirlenen oranlarda ayrı kaplara konularak kütleleri tartılmış ve Tablo 3.7'de görüldüğü gibi toplam kütleye göre SiO<sub>2</sub> miktarları belirlenmiştir. Tablo 3.8'de de kompozit levhaların yapımında kullanılan kumaşların ölçüleri ve kumaş kat sayıları verilmiştir.

**Tablo 3.7:** Reçine, sertleştirici ve SiO<sub>2</sub> karışım miktarları

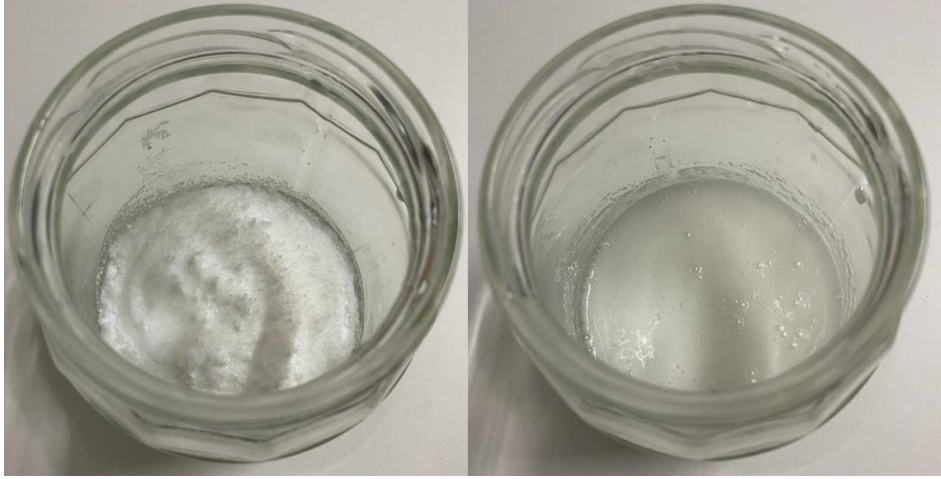
Numune Kodu			Epoksi Reçine Miktarı (g)	Sertleştirici Miktarı (g)	SiO <sub>2</sub> Miktarı (g)	Kütlece % SiO <sub>2</sub> Oranı
200CF0	245CF0	200BF0	175	49	0	%0
200CF1	245CF1	200BF1	175	49	2,24	%1
200CF2	245CF2	200BF2	175	49	4,48	%2

**Tablo 3.8:** Kompozitlerin yapımında kullanılan kumaşların ölçüleri ve kat sayıları

Numune Kodu			Kumaş Boyutları (mm)	Kumaş Kat Sayısı	Elyaf Yönelimi (°)	Kullanılacak Deneyler
200CF0	200CF1	200CF2	150x300	12	0/90	Çekme Deneyi
			105x250	15	0/90	İzod Deneyi
			105x250	15	0/90	Eğilme Deneyi
245CF0	245CF1	245CF2	150x300	10	0/90	Çekme Deneyi
			105x250	12	0/90	İzod Deneyi
			105x250	12	0/90	Eğilme Deneyi
200BF0	200BF1	200BF2	150x300	12	0/90	Çekme Deneyi
			105x250	16	0/90	İzod Deneyi
			105x250	16	0/90	Eğilme Deneyi

SiO<sub>2</sub> katkılı epoksi matris malzemesinin hazırlık sürecinde karışım anında oluşan gazların giderilmesi ve homojen bir karışım elde edilebilmesi çok önemlidir. Epoksi reçinenin hazırlığında;

Belirlenen miktarlardaki reçine (A komponenti) ile SiO<sub>2</sub> elle 20°C’de 10 min boyunca Şekil 3.5’deki gibi yavaş bir şekilde karıştırılmıştır. El ile karışım ile nanopartikülün reçineye yedirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.5: SiO<sub>2</sub> ile reçinenin elle karıştırılması

El ile karışımdan sonra reçineye 20 min boyunca 20 °C’de 1500 min<sup>-1</sup> şartlarında Şekil 3.6’daki özel karıştırıcı uç ile mekanik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Böylelikle karışım homojen hale getirilmiştir.



Şekil 3.6: SiO<sub>2</sub> ile reçinenin mekanik karıştırılması



Mekanik karıştırma işleminin ardından sertleştirici (B komponenti) karışıma eklenerek 10 min boyunca 20 °C’de el ile yavaşça karıştırılmıştır. Karışımda oluşan köpük ve baloncukları karışımdan uzaklaştırmak adına gazların giderilmesi için Şekil 3.7’de vakum etüv işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem 20 °C sıcaklıkta 30 min boyunca yapılmıştır. Böylelikle karışımın içerisindeki gazlar uzaklaştırılmıştır. 30 min süredeki vakum etüv işlemi, o hacimdeki epoksi için köpük ve kabarcıkların gitmesinde yeterli olduğu görülmüştür.



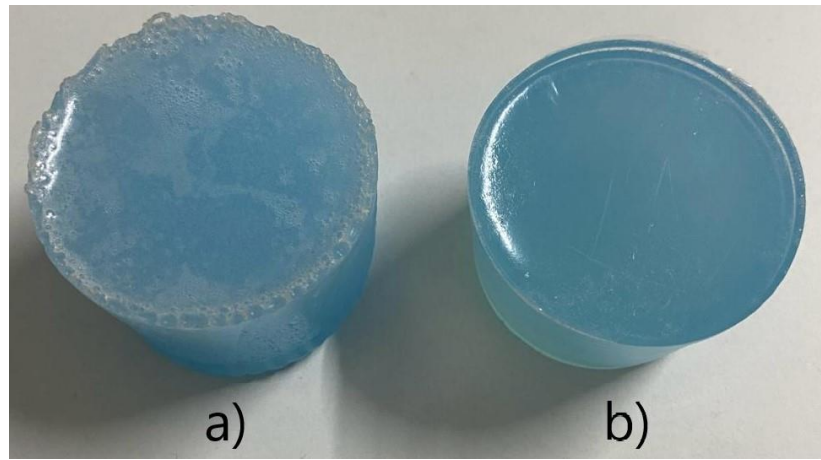
Şekil 3.7: Vakum etüv işlemi

Bu işlemlerin ardından Şekil 3.8’de görülen şekilde köpüksüz karışımlar elde edilmiştir.

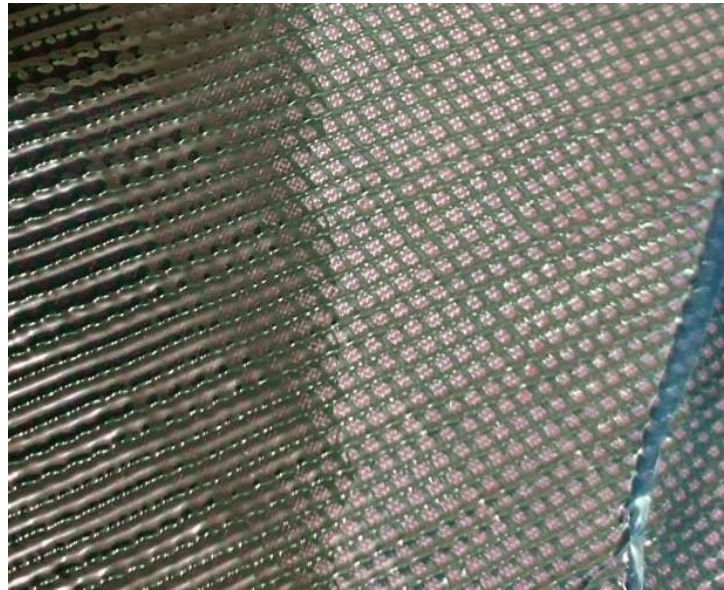


Şekil 3.8: Köpüksüz reçine karışımı

Hazırlık süreci tamamlanan epoksi reçineler, oluşturulacak kompozit parçalar üretilmeden önce kürlenerek denenmiş olup nanopartiküllerin sadece el ile karıştırılmasıyla oluşturulan epoksi reçine ile karşılaştırılmıştır. Karışımın içerisinde bulunan köpük ve gazlar Şekil 3.9’da gösterildiği gibi oldukça fazla olup bu durum kompozit hale getirilen parçalarda iç boşluk ve delaminasyon gibi sebeplerden dolayı mekanik özelliklerde düşüşe sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla reçine hazırlık sürecinin eksiksiz şekilde yapılması çok önemlidir. Şekil 3.10’da ise vakum infüzyon sistemi içerisinde hazırlık süreci eksiksiz yapılan reçinenin kabarcıksız bir şekilde ilerlemesi görülmektedir.

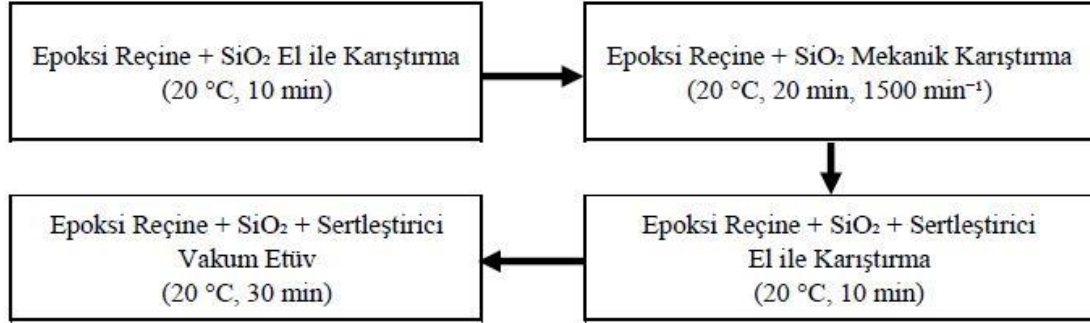


**Şekil 3.9:** Kürlenmiş epoksi parçaları a) Hazırlık süreci eksik yapılan, b) Hazırlık süreci doğru yapılan



**Şekil 3.10:** Köpüksüz reçine karışımının sistem içerisindeki ilerleyişi

SiO<sub>2</sub> katkılı epoksi karışımlarında, reaksiyon sonucu ortaya çıkan gazlar ve karışımın viskozitesinin oldukça artmasından kaynaklı içerisinde bu gazları hapsetmesi üstesinden gelinmesi gereken bir durumdur. Bu durumun üstesinden gelinmesi için bahsedilen reçine hazırlık süreci uygulanmıştır. Bu süreç şematik olarak Şekil 3.11’de de verilmiştir.



Şekil 3.11: SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı epoksi reçine hazırlık süreci

SiO<sub>2</sub> katkısı bulunmayan sadece reçine (A komponenti) ile sertleştiricinin (B komponenti) karıştırıldığı karışımlar 10 min boyunca 20 °C’de el ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu süreç, çok uzun tutulmayarak reçinenin tepkimeye girmeye başlamadan ve viskozitesi artmadan homojen bir karışım hazırlamak adına 10 min boyunca yapılmıştır.

Vakum infüzyon yöntemi, oluşturulacak kompozit parçanın kalıbından havanın komple vakum ile çekilerek atmosferin kendi ağırlığından faydalanılarak kompozit parçanın şekillenmesini ve matris malzemesinin takviye elemanına transferi olarak gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Bu üretim yöntemi, matris malzemesinin takviye elemanı ile kalıpta homojen bir şekilde birleşim yapmasını sağladığı ve hemen hemen kalıbının yapılabildiği her türlü şekilde kompozit parçalar elde edilebildiği için oldukça avantajlı bir yöntemdir. Fakat üretim yönteminde hazırlık kısmı titizlikle yapılmalı ve kalıp içerisindeki akış sistematığının iyi kurgulanmış olması gerekmektedir.

Kalıp olarak kullanılan ve Şekil 3.12’de verilen cam levha öncelikle iyi bir şekilde temizlenmiş ve maskeleme bandı sonraki vaks uygulamasında sızdırmazlık bandının yapıştırılacağı yere gelmesin diye cam levhanın köşelerine bantlanmıştır. Ardından Polivaks™ N marka kalıp ayırıcı vaks ile 5 min boyunca ovalanarak ince bir film şeklinde kaplanması sağlanmıştır. 10 min beklendikten sonra kuru mikrofiber bez ile cam kalıp silinmiştir. Bu işlem üç kez tekrarlanarak uygulanmıştır.



**Şekil 3.12:** Kalıp ayırıcı vaks işleminin yapılması

Ardından maskeleme bandı kenarlardan sökülerek yerine Şekil 3.13’de gösterilen sızdırmazlık bandı yapıştırılmıştır.



**Şekil 3.13:** Sızdırmazlık bandının yapıştırılması

İstenilen kalınlığa göre kat kat yerleştirilen 150x300 ve 105x250 mm boyutlarında kesilen takviye kumaşları Şekil 3.14’de cam kalıba yerleştirilmiş kumaşların kenarlarından çıkan saçaklar temizlenmiştir. Burada sızdırmazlık bandına saçakların yapışmaması büyük önem arz etmektedir.



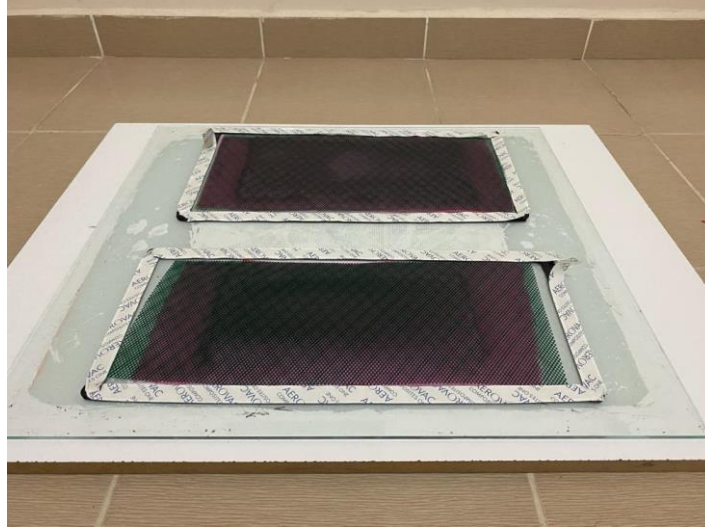
**Şekil 3.14:** Kumaşların kalıba yatırılması

Soyma kumaşı, kompozit parça imalatından sonra esas malzemeden rahat bir şekilde sökülebilmesi için Şekil 3.15’de görüldüğü üzere takviye kumaş boyutlarından daha büyük boyutlarda kesilerek kumaşların üzerine yerleştirilmiştir.



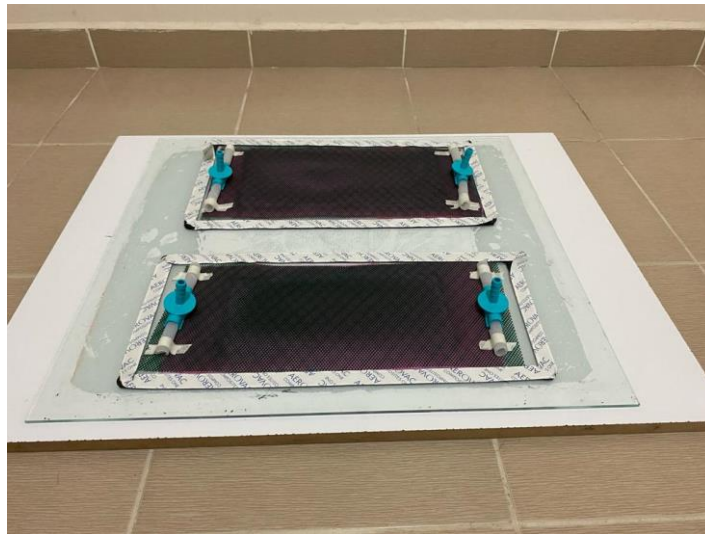
**Şekil 3.15:** Soyma kumaşının takviye kumaşların üzerine yerleştirilmesi

Reçine akışının düzgün ilerleyebilmesi için akış filesi, Şekil 3.16'daki gibi tercihen soyma kumaşıyla aynı boyutlarda kesilerek soyma kumaşının üzerine yerleştirilmiştir.



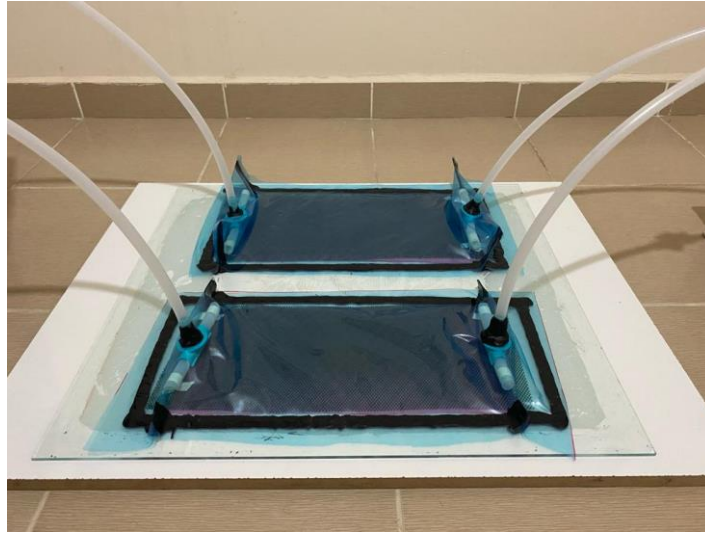
**Şekil 3.16:** Akış filesinin yerleştirilmesi

İnfüzyon spiral hortumu giriş ve çıkış konnektörlerinin arasından geçirilmiştir. Ardından Şekil 3.17'de konnektörler karşılıklı olarak yerleştirilerek hortumların uç kısımları kaymasın diye bantlanarak sabitlenmiştir. Burada akışın başlayacağı ve biteceği yerlerdeki konnektörler soyma kumaşı ve akış filesinin üzerinde olmalı fakat takviye kumaşının olduğu kısımların üzerinde olmamalıdır.



**Şekil 3.17:** Konnektörlerin yerleştirilmesi

Sızdırmazlık bandı açılarak en üste vakum torbası yapıştırılmıştır. Konnektörlerin olduğu hizada vakum anında gerginlik olmaması adına “kulak” denilen paylar verilmiştir. Ardından konnektörlere Şekil 3.18’deki gibi akış hortumu bağlanılmış ve birleşim yeri hava kaçağı olmaması adına sızdırmazlık bandı ile güçlendirilmiştir. Reçine giriş tarafındaki hortumun ucu karışımı yapılan epoksi reçinenin içerisine konulmuştur. Çıkış tarafındaki hortumun ucu ise VALUE VE160N marka vakum pompasına bağlanmıştır. Kullanılmış olan vakum pompasının teknik özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.



**Şekil 3.18:** Vakum torbasının ve hortumlarının bağlanması

**Tablo 3.9:** Vakum pompasının özellikleri

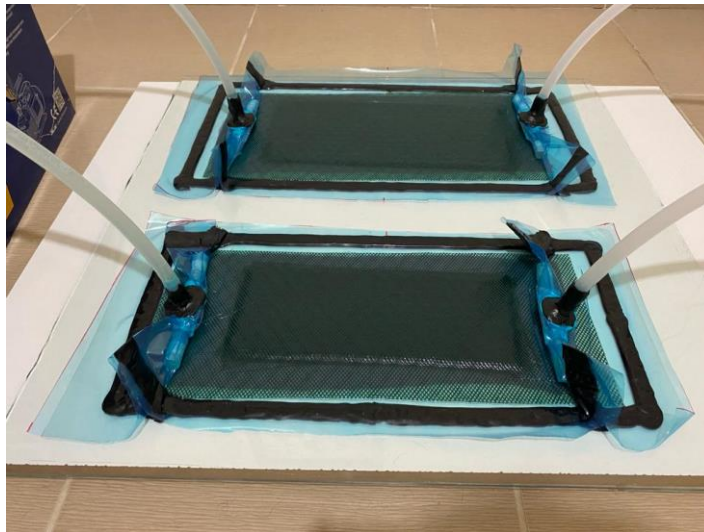
Özellikler	Birim	VALUE VE160N
Kademe	-	Tek Kademe
Voltaj	V	220
Frekans	Hz	50 – 60
Akış Debisi	m <sup>3</sup> /h	10,2
Kısmi Basınç	Pa	2
Motor Gücü	hp	1/2

Giriş ve çıkış kısımlarındaki akış hortumlarının orta kısımlarına fazla reçinenin akışa geçmesini ve vakum altında bekletmek için havanın kaçmasını da engellemek adına Şekil 3.19’da gösterilen reçine kesme vanaları yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.19:** Reçine kesme vanaları

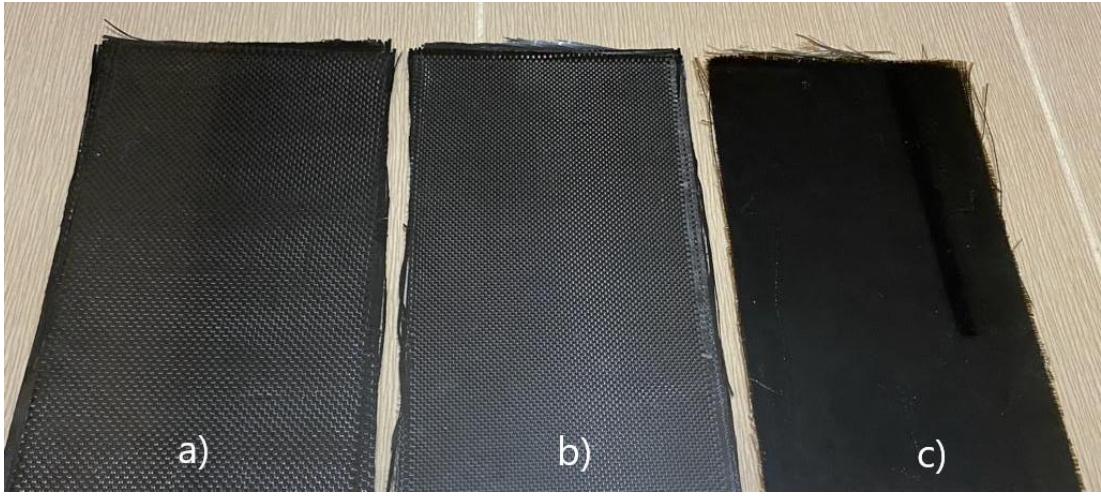
Önce reçinesiz şekilde hava akışı vakumlanarak sistemde herhangi bir yerde kaçak var mı kontrol edilmiş ve 15 min boyunca vakum altında bekletilmiştir. Sistemde kaçak olmadığına emin olunduktan sonra epoksi reçine karışımı sisteme vakumlanmaya başlanmıştır. Takviye kumaşının her tarafı epoksi reçine ile Şekil 3.20’de ıslatıldıktan sonra, önce giriş kısmındaki vana, ardından çıkış kısmındaki vana kapatılmıştır.



**Şekil 3.20:** Reçinenin sisteme vakumlanması



Reçinenin kürleşmesi adına sistem bozulmadan 3 gün boyunca bekletilmiş olup Şekil 3.21'deki gibi kompozit parçalar elde edilmiştir.



**Şekil 3.21:** Üretilen kompozit parçalar a) 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit, b) 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit, c) 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozit

Çınar ve Ekrem (2021), çalışmalarındaki gibi oluşturulan kompozit parçaların esas mukavemetine ulaştırılması adına Şekil 3.22'de 8 h boyunca 80 °C'de post-kür işlemi yapılmıştır. Her bir kompozit levha üretiminde bu aşamalar tekrarlanmıştır.



**Şekil 3.22:** Post-kür işlemi

Elde edilen kompozit levhalar Şekil 3.23’de verilen su jeti tezgahında 1800 bar basınç altında kesilmiştir. Yapılacak testlerde optimum sonucu elde edebilmek adına her parametreden Şekil 3.24’de gösterildiği gibi 4’er adet çekme, eğilme ve izod darbe deney numuneleri ilgili parametrenin aynı levhalarından kesilmiştir. Testlerde her parametre için üçer adet test yapılmış olup sonuç olarak ortalaması alınmıştır. Geri kalan birer numune yedek olarak ihtiyaç dahilinde kullanılmak amacı ile kestirilmiştir.



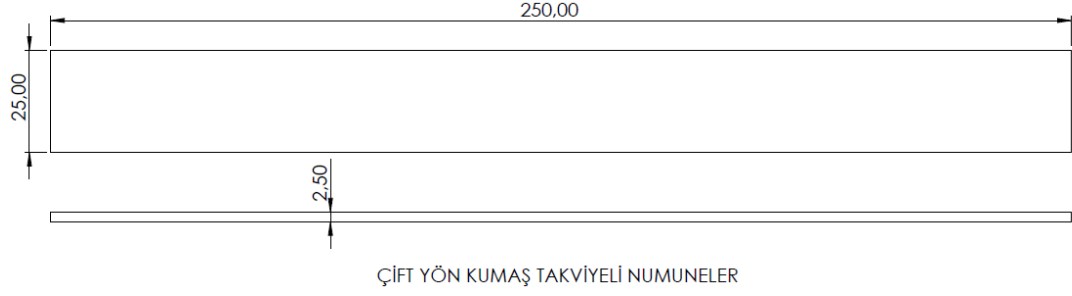
Şekil 3.23: Kompozit levhaların su jeti ile kesimi



Şekil 3.24: Kesilen kompozit levhalar

### 3.3 Çekme Deneylerinin Yapılması

SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı ve katkısız epoksi matrisli karbon ve bazalt kumaş takviyeli kompozit parçaların çekme testleri ASTM D3039 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Çift yön kumaş takviyeli kompozitler için tavsiye edilen numune ölçüleri Şekil 3.25’de verilmiştir.



**Şekil 3.25:** ASTM D3039 standardına göre çift yönlü kumaş takviyeli kompozitlerin çekme deneyi numuneleri ölçüsü

Çekme testlerinde kullanılan kompozit plakaların kalınlıkları sabit olmayıp üretiminde belirlenen kumaş tiplerinin toleransları ve kalıba yatırılan kumaş kat sayılarına göre 2 - 2,5 mm aralığında değiştiği gözlemlenmiştir.

ASTM D3039’a göre numunelerin çekme dayanımı (3.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$R_m = \frac{F_m}{A} \quad (3.1)$$

Burada, “F<sub>m</sub>” kopma anında test numunelerine uygulanan maksimum yük (N) olup, “A” ise numunelerin kesit alanıdır (mm<sup>2</sup>). Elastisite modülü ise cihazda elde edilecek gerilim(σ)-gerinim(mm/mm) diyagramına dayalı bir şekilde (3.2) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Elastisite modülü genellikle gerilimin grafik boyunca değişimi ile gerinim değişimine bölümü olarak belirlenir. Grafikte çıkan eğrinin, eğiminin değişmediği kısımlar hesaba dahil edilir.

$$E_\varphi = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.2)$$

Burada, “ $\epsilon_c$ ” gerinim yani birim şekil değişimi anlamına gelmektedir ve birimsiz bir değerdir. (3.3) eşitliği kullanılarak hesaplanır. “ $L_0$ ” değeri, deneyi yapılacak numunenin ölçüm mesafesidir (mm). “ $L$ ” değeri ise test bitimi numunenin ölçüm mesafesini veren ifadedir (mm).

$$\epsilon_c = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.3)$$

Akma sınırı, (3.1) gibi bir denklem ile hesaplanabilir. Fakat karbon ve bazalt elyaf gibi kopma uzaması az, sünmeyen ve sert malzemelerden oluşturulacak kompozit malzemeler için genellikle hesaplanmaya gerek duyulmaz. Şayet hesaplanmak istenir ise (3.4) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Burada, “ $F_a$ ” akma anında uygulanan (N) yük, “ $A$ ” ise kesit alanıdır (mm<sup>2</sup>). Gerilim-gerinim eğrisinden ise akma sınırı şu şekilde hesaplanabilir.  $\epsilon = \%0,2$  uzama anında yani birim şekil değişiminin 0,002 mm/mm anında ana eğriye paralel bir eğri çizilir ve ana eğriyi kestiği andaki gerilim değeri akma sınırı olarak kabul edilir.

$$R_{\%0,2} = \frac{F_a}{A} \quad (3.4)$$

ASTM D3039 standardına göre Şekil 3.26’da gösterilen UGR marka 80 grid alüminyum oksit zımpara kağıtları 60x100 mm boyutlarında kesilmiştir.



Şekil 3.26: Zımpara kağıdı ve hızlı yapıştırıcı

Kesilen zımpara kağıtları ardından zımpara yüzeyi numuneye temas edecek şekilde hızlı yapıştırıcı yardımı ile tek kat olarak numunelere sarılmıştır. Numunelerin son hali Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: Zımparanın çekme deneyi numunelerine sarılması

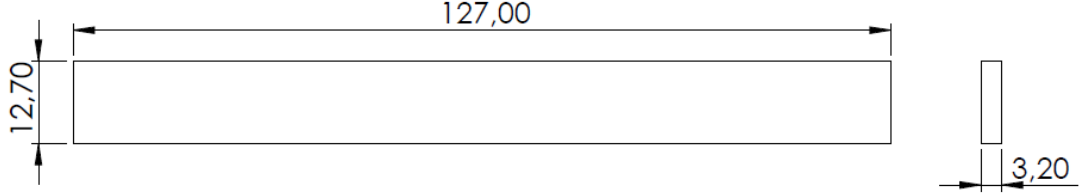
Numunelerin çekme özelliklerinin tayini için Şekil 3.28’de gösterilen hidrolik ALŞA marka 60 tonluk çekme test cihazı kullanılmıştır. ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilen çekme testleri 2 mm/min hızında, ölçüm mesafesi  $L_0 = 50$  mm alınarak oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.28: ALŞA 60 tonluk çekme test cihazı

### 3.4 Üç Nokta Eğilme Deneylerinin Yapılması

SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı ve katkısız epoksi matrisli karbon ve bazalt kumaş takviyeli kompozit parçaların üç nokta eğilme testleri ASTM D790 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili numuneler için tavsiye edilen numune ölçüleri Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29: ASTM D790 standardına göre eğilme deneyi numune ölçüleri

Üç nokta eğilme testlerinde kullanılan kompozit plakaların kalınlığı sabit olmayıp üretiminde belirlenen kumaş tiplerinin toleransları ve kalıba yatırılan kumaş kat sayılarına göre yaklaşık 3,2 mm ± %10 şeklinde değiştiği gözlemlenmiştir.

ASTM D790’a göre numunelerin dayanımı (3.5) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma_e = \frac{3 \cdot F_m \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.5)$$

Burada, “F<sub>m</sub>” eğilme anında test numunelerine uygulanan maksimum yük (N) olup “L” ise mesnetler arası mesafedir (mm). “b” numunenin genişliği olup (mm) “d” ise numunelerin kalınlığıdır (mm). Eğilme modülü ise cihazda elde edilecek gerilim(σ)-gerinim(mm/mm) diyagramına dayalı bir şekilde (3.6) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Eğilme modülü genellikle gerilimin grafik boyunca değişimi ile gerinim değişimine bölümü olarak belirlenir. Grafikte çıkan eğrinin, eğiminin değişmediği kısımlar hesaba dahil edilir.

$$E_e = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (3.6)$$

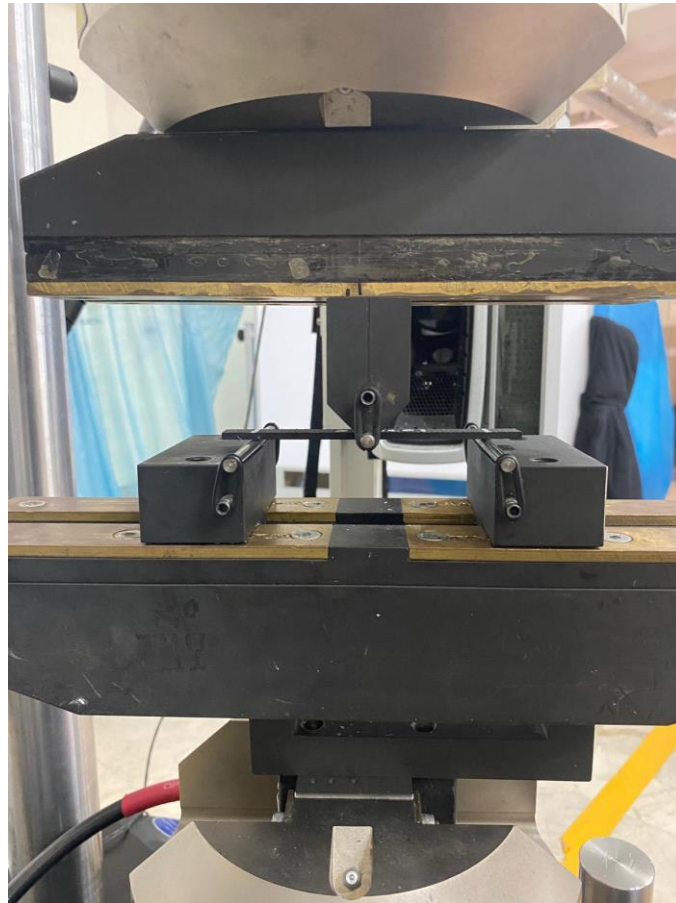
Burada, “ $\epsilon_e$ ” gerinim yani birim şekil değişimi anlamına gelmektedir ve birimsiz bir değerdir. (3.7) eşitliği kullanılarak hesaplanır. Buradaki “D” değeri, test anında numune merkezinin, başlangıçtaki merkezden saptığı mesafedir (mm).

$$\epsilon_e = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2} \quad (3.7)$$

Eğilme için modül, test anında istenilen bir anda (3.6) eşitliği açılarak (3.8) eşitliği ile de hesaplanmaktadır.

$$E_e = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot D \cdot d^3} \quad (3.8)$$

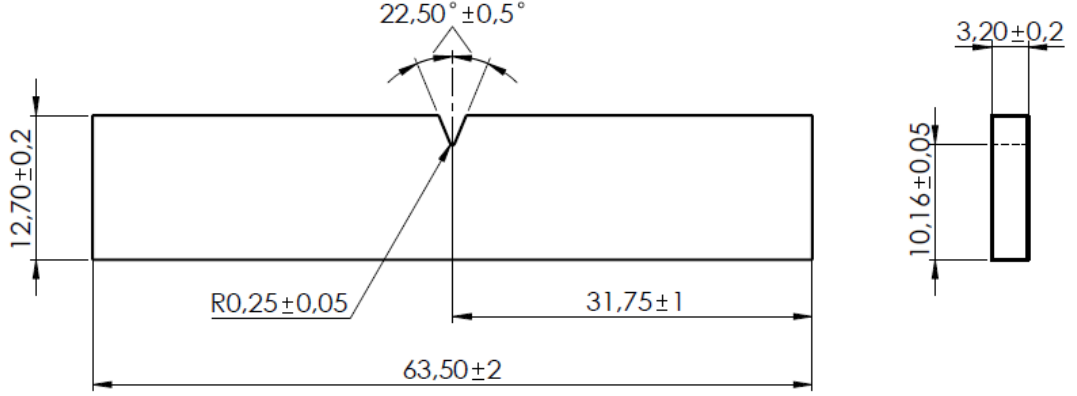
Numunelerin eğilme özelliklerinin tayini için Şekil 3.30’da gösterilen Instron marka 8801 model 5 tonluk cihaz kullanılmıştır. ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilen üç nokta eğilme testleri 2 mm/min hızında, mesnetler arası mesafe kalınlığın 32 katı alınarak oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.30: INSTRON marka 8801 model 5 tonluk test cihazı

### 3.5 İzod Darbe Deneylerinin Yapılması

SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı ve katkısız epoksi matrisli karbon ve bazalt kumaş takviyeli kompozit parçaların izod darbe dayanımı testleri ASTM D256 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili numuneler için tavsiye edilen numune ölçüleri Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.31: ASTM D256 standardına göre izod darbe deneyi numune boyutları

İzod darbe dayanımı testlerinde kullanılan kompozit parçaların kalınlığı diğer testlerde olduğu gibi sabit olmayıp üretiminde belirlenen kumaş tiplerinin toleransları ve kalıba yatırılan kumaş kat sayılarına göre yaklaşık 3,2 mm ± %10 şeklinde değiştiği gözlemlenmiştir.

ASTM D256’a göre numunelerin darbe enerjisi (3.9) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I = m \cdot g \cdot (h - h_1) \quad (3.9)$$

Burada, “m” sarkacın kütlesi (kg) olup “g” yerçekimi ivmesidir (m/s<sup>2</sup>). “h” ise sarkacın numuneye vuruşundan önceki ayarlandığı yüksekliği (m) olup “h<sub>1</sub>” ise vuruştan sonraki yükseldiği mesafedir (m). Bir diğer şekilde, sarkacın numune ile arasındaki açıdan da hesaplanabilmektedir. Bu da (3.10) eşitliğinde verilmiştir.

$$I = m \cdot g \cdot L \cdot (\cos\beta - \cos\gamma) \quad (3.10)$$



Burada ise “L” sarkacın uzunluğu (m) olup “β” vuruştan önceki sarkacın numune ile arasındaki açıdır. “γ” ise vuruş sonrası sarkaç ile numune arasında oluşan açıdır. Darbe dayanımı ise ortaya çıkan darbe enerjisinin kesit alanına bölünerek (3.11) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$I_R = \frac{I}{d \cdot b_0} \quad (3.11)$$

Darbe dayanımı hesaplanırken kesit alanı olarak çentik dibi genişlik ile kalınlık hesaba katılır. “d” kalınlık (m) olup “b<sub>0</sub>” çentik dibinden itibaren genişliktir (m).

Numunelerin darbe dayanımı özelliklerinin tayini için Şekil 3.32’de görülen Ceast Resil Impactor marka darbe test cihazı kullanılmıştır. ASTM D256 standardına göre çentik tarafından gerçekleştirilen darbe testleri 15 J cihaz kapasitesinde, başlangıç sarkaç açısı 150° olarak oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.32: CEAST RESIL IMPACTOR izod darbe test cihazı

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Oluşturulan kompozit parçaların içerisinde bulunan elyaf ve reçine miktarlarının kütlece oranları Tablo 4.1’de verilmiştir. Eğilme ve darbe deney numuneleri ile çekme deneyi numunelerinin kalınlıkları farklı olduğu için aynı parametrelerde ikişer kompozit parça üretilmiştir.

**Tablo 4.1:** Üretilen kompozit parçaların kütlece elyaf/reçine oranı

Numune Kodu	Çekme Numuneleri		Eğilme ve İzod Numuneleri	
	Kütlece Elyaf Oranı (%)	Kütlece Reçine Oranı (%)	Kütlece Elyaf Oranı (%)	Kütlece Reçine Oranı (%)
200CF0	67,93	32,07	67,02	32,98
200CF1	67,81	32,19	67,79	32,21
200CF2	67,68	32,32	67,30	32,70
245CF0	67,24	32,76	67,59	32,41
245CF1	67,94	32,06	67,16	32,84
245CF2	67,66	32,34	67,41	32,59
200BF0	64,12	35,88	64,18	35,82
200BF1	64,84	35,16	64,72	35,28
200BF2	64,44	35,56	64,90	35,10

Metot olarak kumaşlardaki elyaf miktarı hassas terazi ile ölçülmüştür. Vakum infüzyon ardından kompozit parça da ölçülerek bu değerden elyaf miktarı çıkarılıp reçine miktarı bulunmuştur. Kütlece oran olarak karbon kompozitlerde elyaf miktarı  $\%67,5 \pm 0,5$ , bazalt kompozitlerde ise  $\%64,5 \pm 0,5$  arasındadır.

Kompozit parçalara yapılan çekme, eğilme ve izod darbe testlerinin sonucu Tablo 4.2’de verilmiştir. Genel anlamda karbon kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetleri bazalt kompozitlerden yüksek çıkmış olup izod darbe dayanımında ise bazalt kompozitlerin darbe dayanımı karbon kompozitlerden yüksek çıkmıştır.

**Tablo 4.2:** Kompozit parçaların çekme, eğilme ve darbe dayanımları

<b>Numune Kodu</b>	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Eğilme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Darbe Dayanımı (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
200CF0	760	579	62
200CF1	862	657	80
200CF2	949	732	78
245CF0	722	620	66
245CF1	749	614	74
245CF2	689	691	75
200BF0	355	235	101
200BF1	356	207	103
200BF2	353	252	100

#### 4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

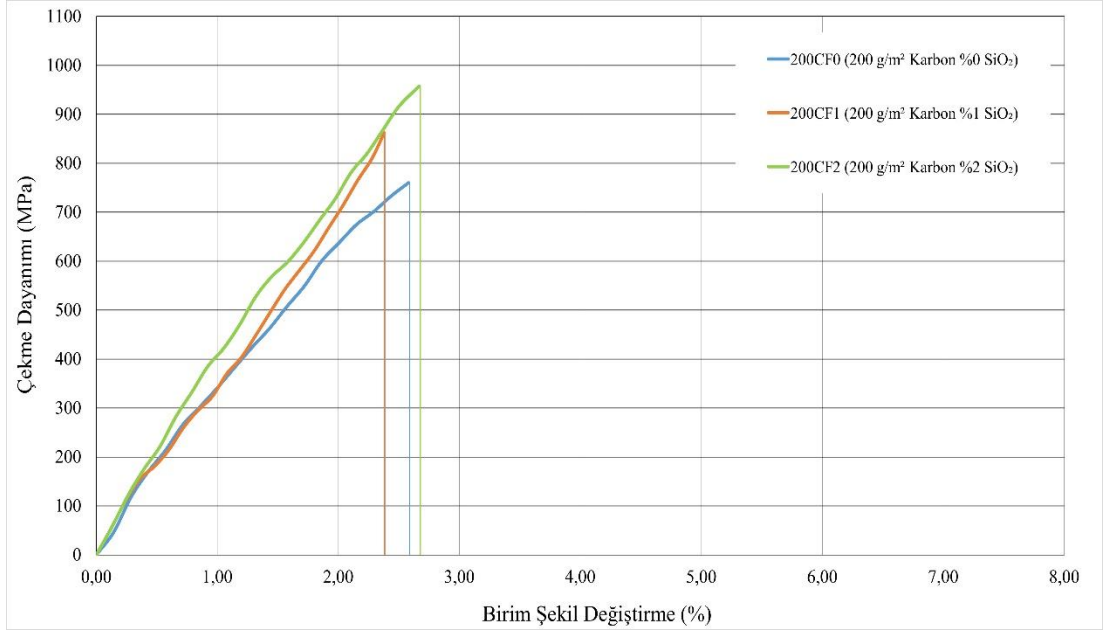
Nanopartikül olarak, epoksi reçinenin belirli ağırlıkça oranlarında katılan SiO<sub>2</sub> katkılı (%1 ve %2) ve katkısız (%0) çekme deneyi numunelerinin test sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: Çekme deneyi sonuçları

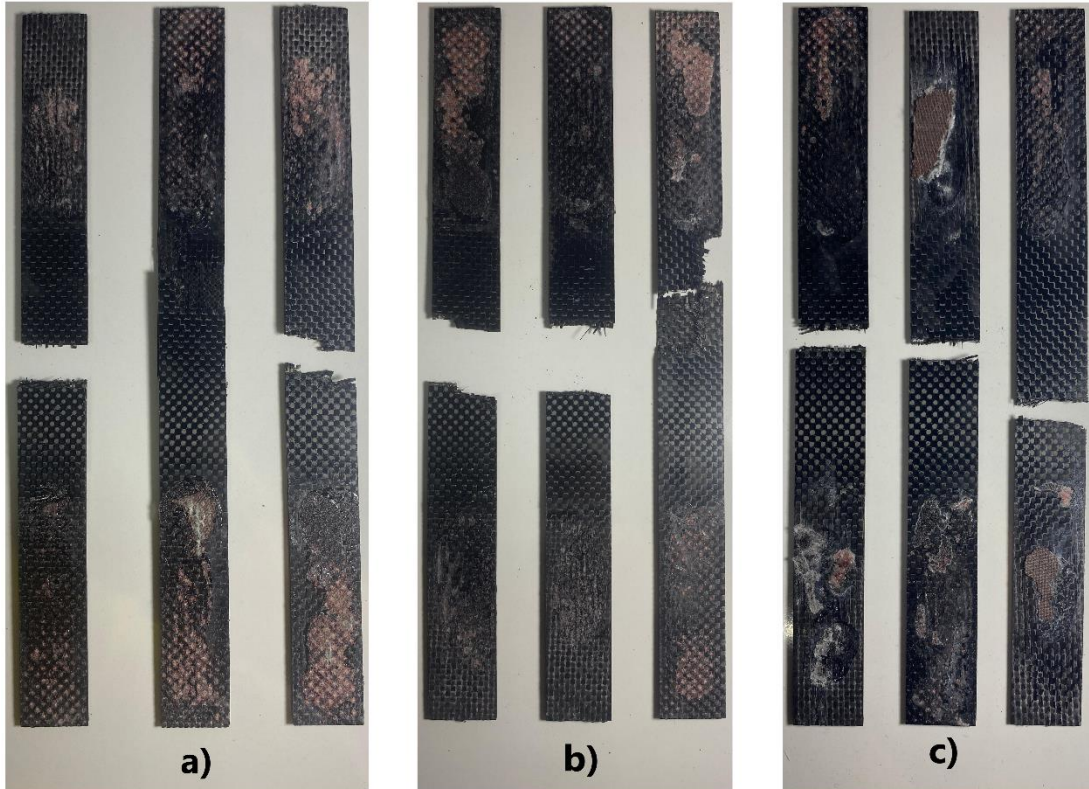
Numune Kodu	Ort. Kalın. (mm)	Ort. Geniş. (mm)	F <sub>max</sub> (N)	R <sub>m</sub> (MPa)	E (MPa)	ε (mm/mm)	L <sub>0</sub> (mm)
200CF0	2,35	25,16	44.931,04	760	32.258,06	0,0258	50
200CF1	2,41	24,97	51.862,94	862	29.411,76	0,0238	50
<b>200CF2</b>	<b>2,37</b>	<b>25,02</b>	<b>56.262,70</b>	<b>949</b>	<b>33.330,06</b>	<b>0,0267</b>	<b>50</b>
245CF0	2,45	25,01	44.237,63	722	28.169,01	0,0240	50
<b>245CF1</b>	<b>2,46</b>	<b>24,92</b>	<b>45.925,10</b>	<b>749</b>	<b>28.571,43</b>	<b>0,0265</b>	<b>50</b>
245CF2	2,54	24,97	43.690,87	689	24.590,16	0,0289	50
200BF0	2,21	24,86	19.505,46	355	4.555,81	0,0714	50
<b>200BF1</b>	<b>2,11</b>	<b>24,94</b>	<b>18.735,30</b>	<b>356</b>	<b>7.735,87</b>	<b>0,0460</b>	<b>50</b>
200BF2	2,19	24,92	19.262,84	353	6.733,24	0,0526	50

Burada tüm numuneler karşılaştırıldığında bazalt kompozitlerin çekme mukavemeti karbon kompozittekilerin en fazla %51,67, en az %37,20’sine sahiptir.

Yapılan çekme testleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve kopma sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

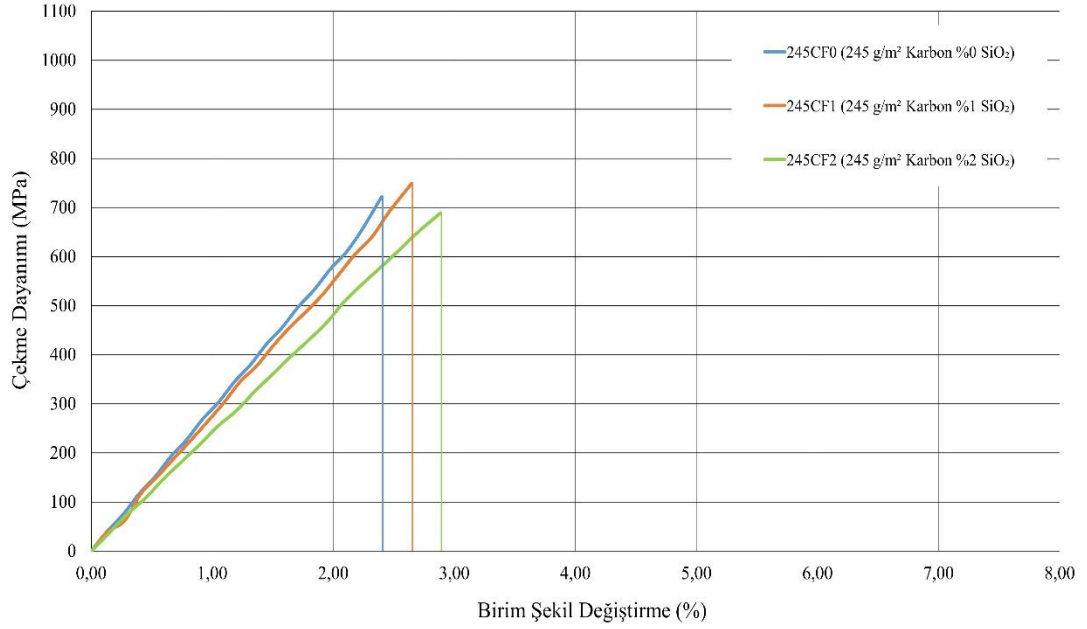


Şekil 4.1: 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları

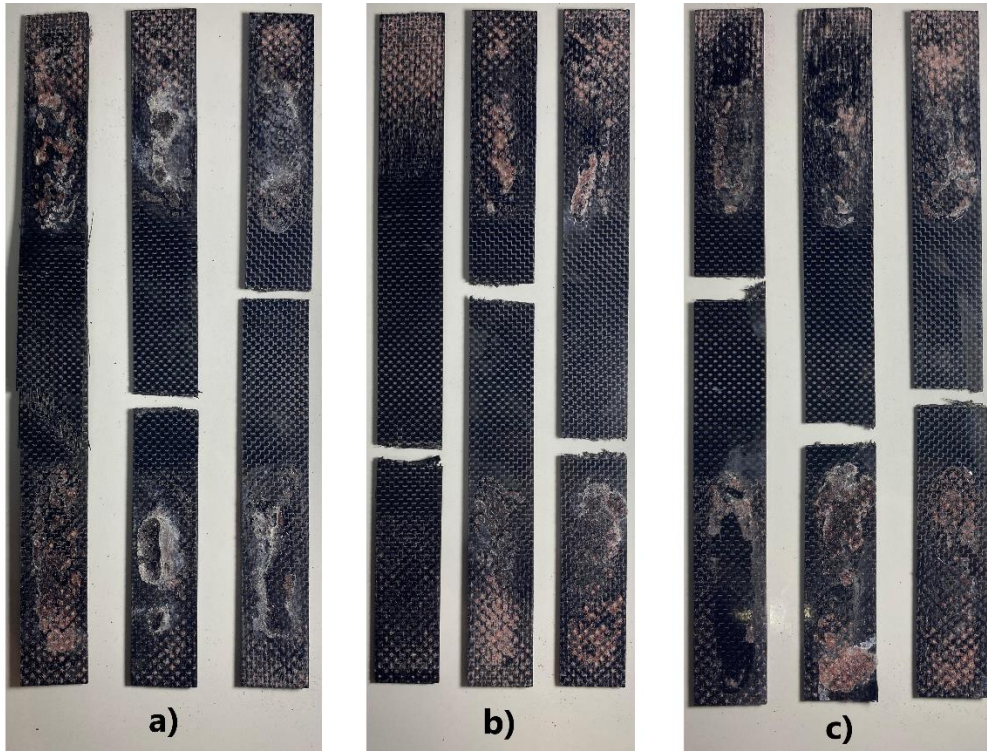


Şekil 4.2: Çekme sonrası 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

Yapılan çekme testleri sonucunda 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve kopma sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

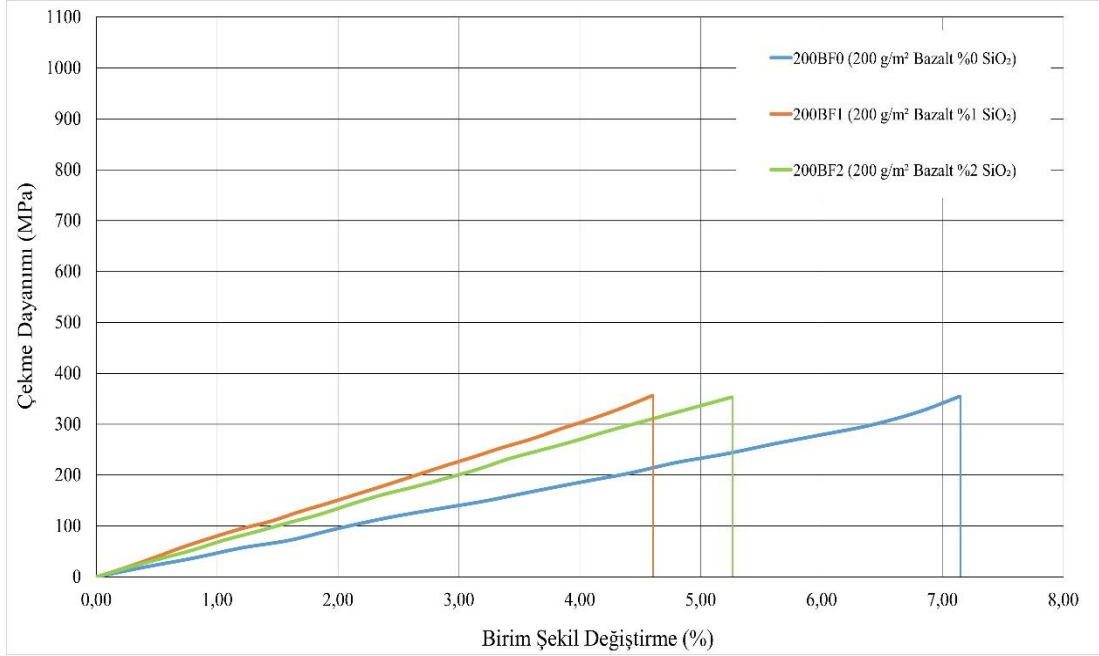


Şekil 4.3: 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları

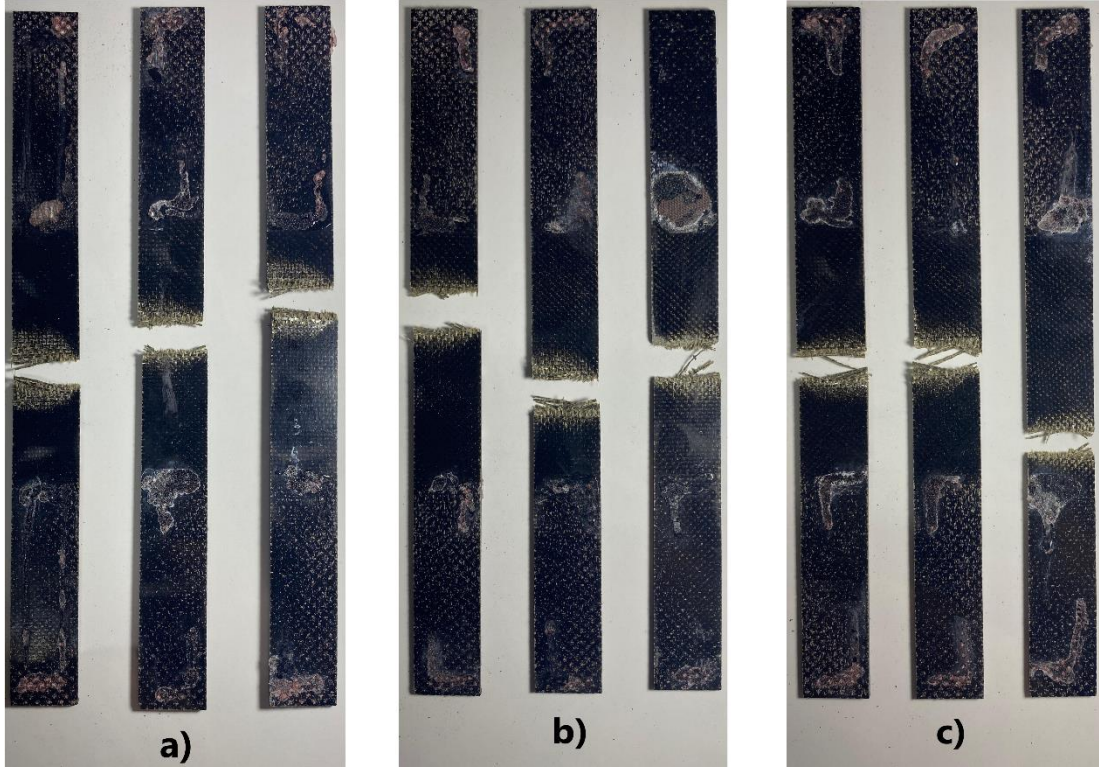


Şekil 4.4: Çekme sonrası 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

Yapılan çekme testleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve kopma sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

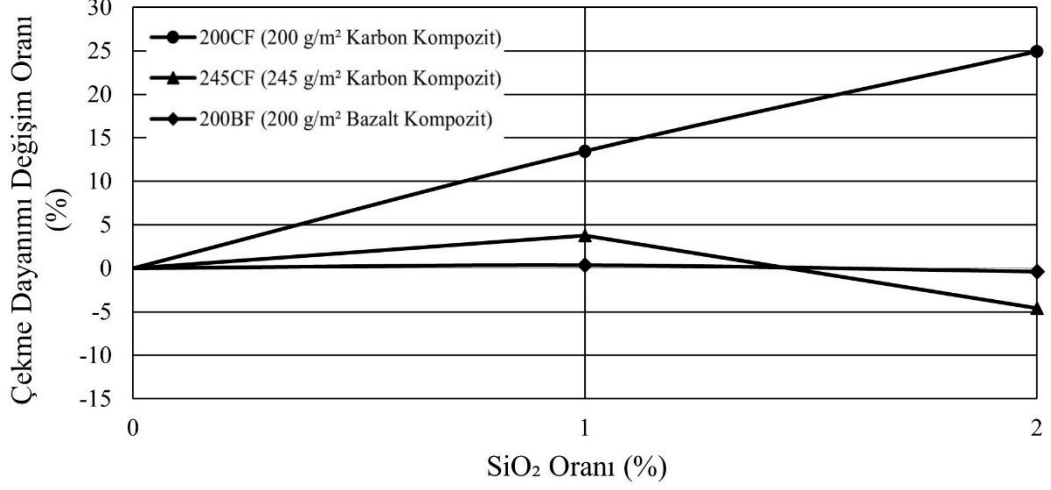


Şekil 4.5: 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları



Şekil 4.6: Çekme sonrası 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının artması, farklı tip takviye kumaşlarından oluşturulan kompozit parçaların çekme dayanımlarında farklı etki göstermiştir. Bu etki Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının çekme dayanımlarına etkisi

Çekme deneyleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla çekme mukavemeti doğrusal bir artış göstermiştir.

245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla çekme mukavemeti önce az miktarda artmış olup sonrasında azalmıştır ve sonuç olarak SiO<sub>2</sub> katkısız haline benzer çıkmıştır.

200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla çekme mukavemeti paralel sonuçlar göstermiş olup ortalama olarak aynı değerleri vermiştir.



## 4.2 Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları

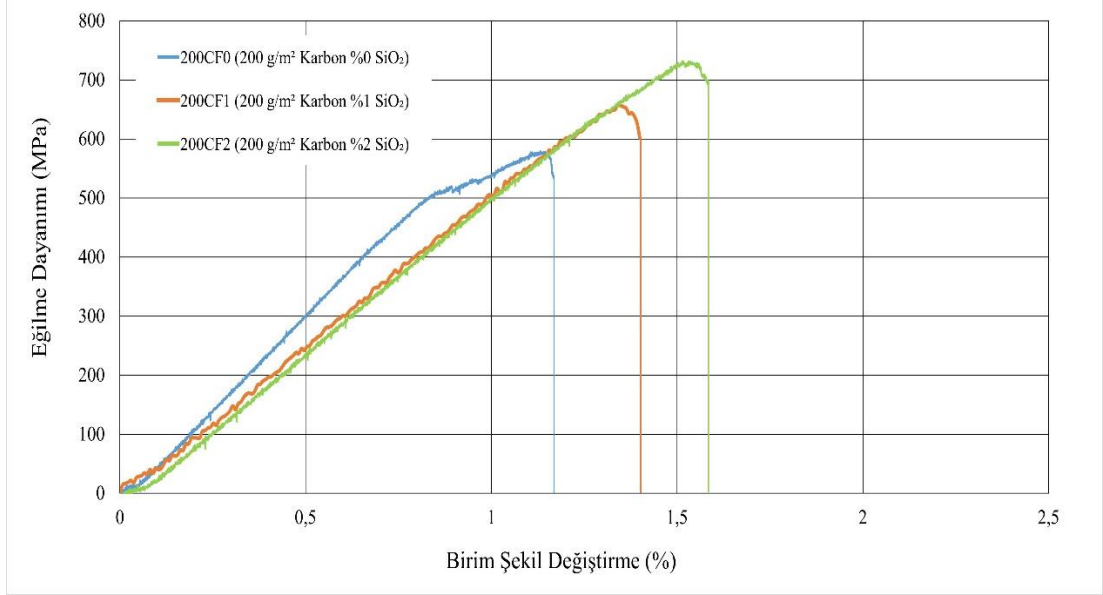
Nanopartikül olarak, epoksi reçinenin belirli ağırlıkça oranlarında katılan SiO<sub>2</sub> katkılı (%1 ve %2) ve katkısız (%0) eğilme deneyi numunelerinin test sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Üç nokta eğilme deneyi sonuçları

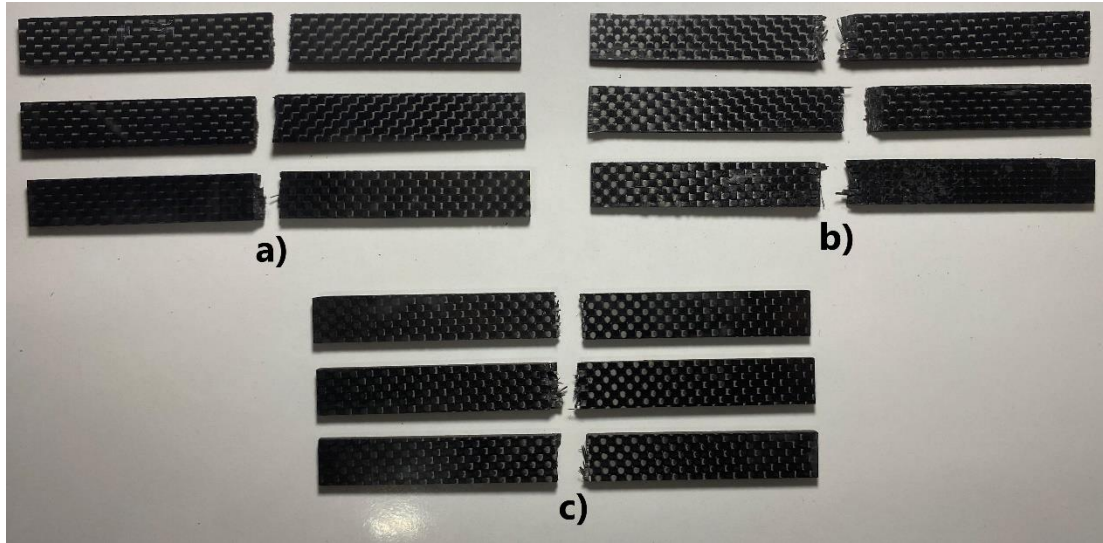
<b>Numune Kodu</b>	<b>Ort. Kalın. (mm)</b>	<b>Ort. Geniş. (mm)</b>	<b>F<sub>e</sub>-max (N)</b>	<b>σ<sub>e</sub>-max (MPa)</b>	<b>E<sub>e</sub> (MPa)</b>	<b>ε (mm/mm)</b>
200CF0	3,53	12,71	545,83	579	60.205,77	0,01168
200CF1	3,11	12,70	538,16	657	50.116,33	0,01400
<b>200CF2</b>	<b>3,11</b>	<b>12,64</b>	<b>596,84</b>	<b>732</b>	<b>48.268,31</b>	<b>0,01587</b>
245CF0	3,23	12,65	545,47	620	45.239,84	0,01447
245CF1	3,05	12,69	483,23	614	46.764,97	0,01455
<b>245CF2</b>	<b>2,98</b>	<b>12,53</b>	<b>539,69</b>	<b>691</b>	<b>50.494,39</b>	<b>0,01520</b>
200BF0	2,94	12,67	180,53	235	13.260,16	0,02263
200BF1	2,88	12,65	152,47	207	13.418,64	0,01863
<b>200BF2</b>	<b>2,97</b>	<b>12,61</b>	<b>196,63</b>	<b>252</b>	<b>15.587,95</b>	<b>0,01963</b>

Burada tüm numuneler karşılaştırıldığında bazalt kompozitlerin eğilme mukavemeti karbon kompozittekilerin en fazla %43,52, en az %28,28’ine sahiptir.

Üç nokta eğilme testleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve test sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

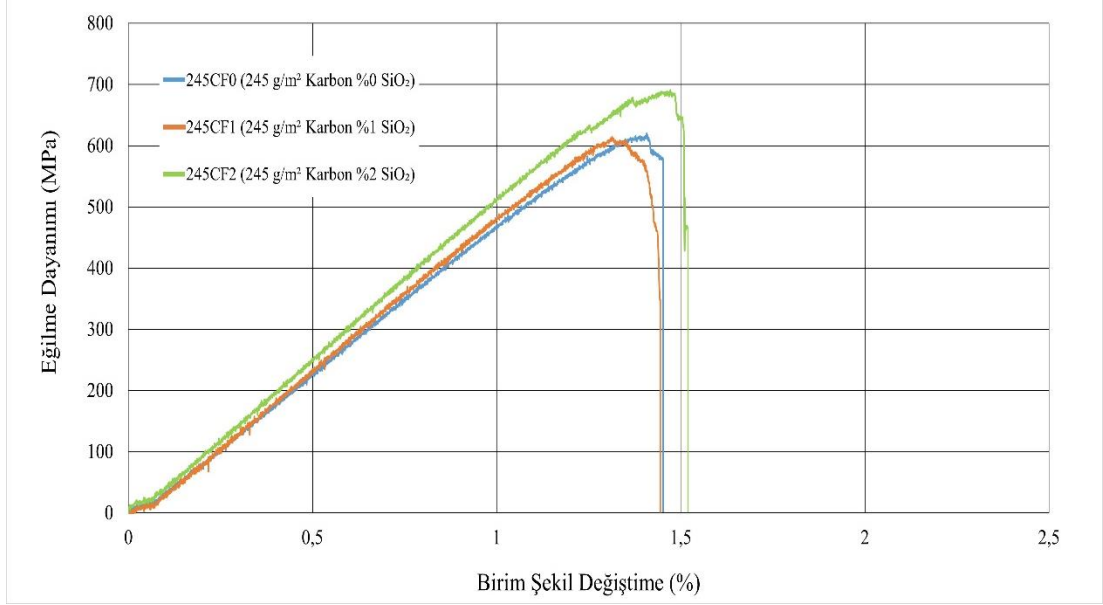


Şekil 4.8: 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları

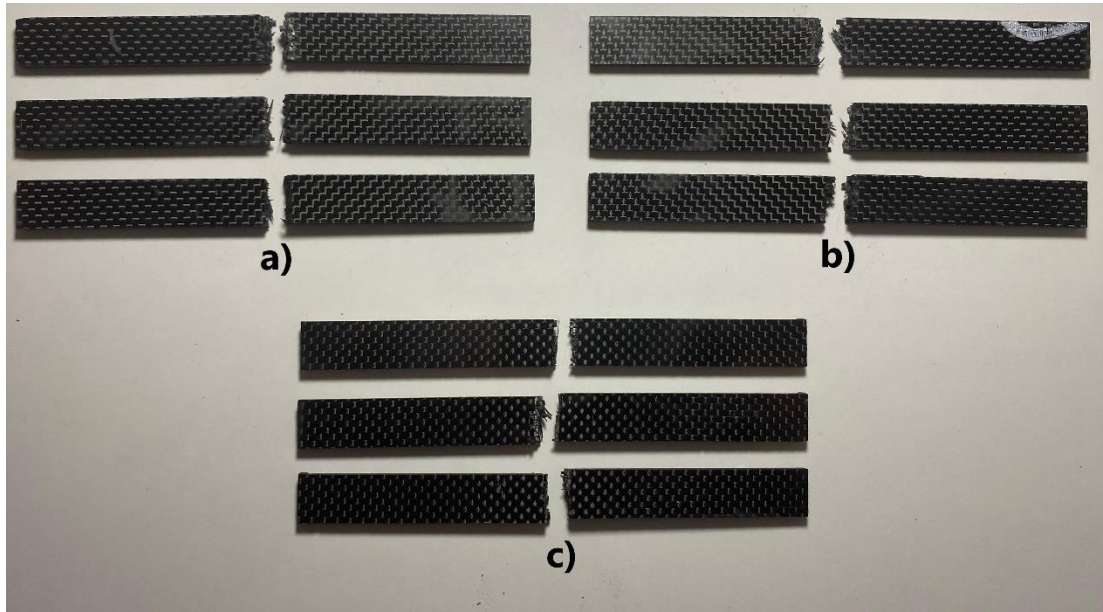


Şekil 4.9: Eğilme sonrası 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

Üç nokta eğilme testleri sonucunda 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve test sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

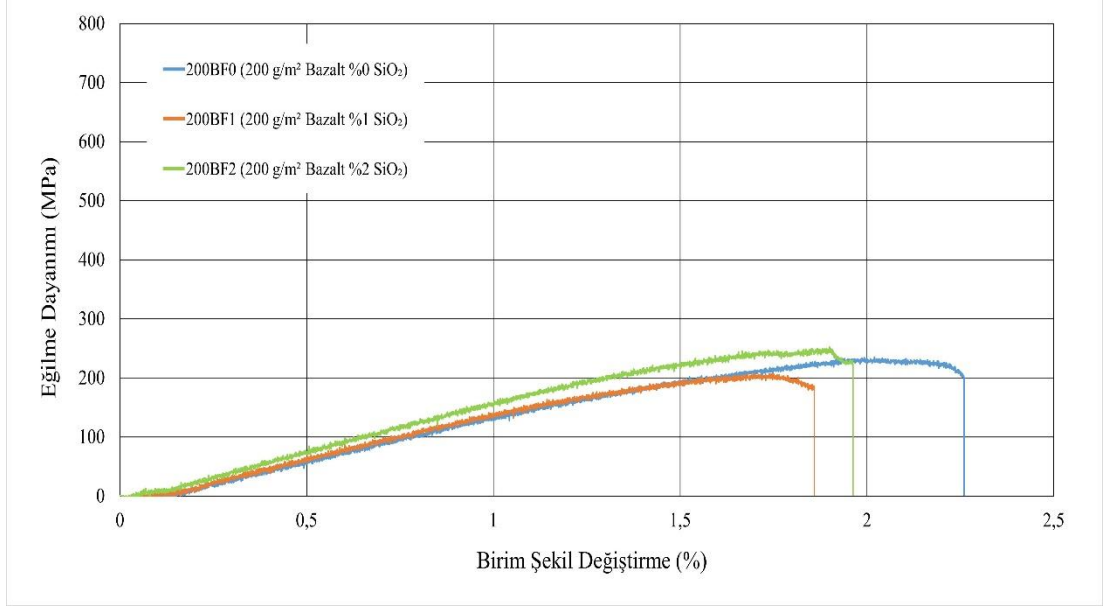


Şekil 4.10: 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları

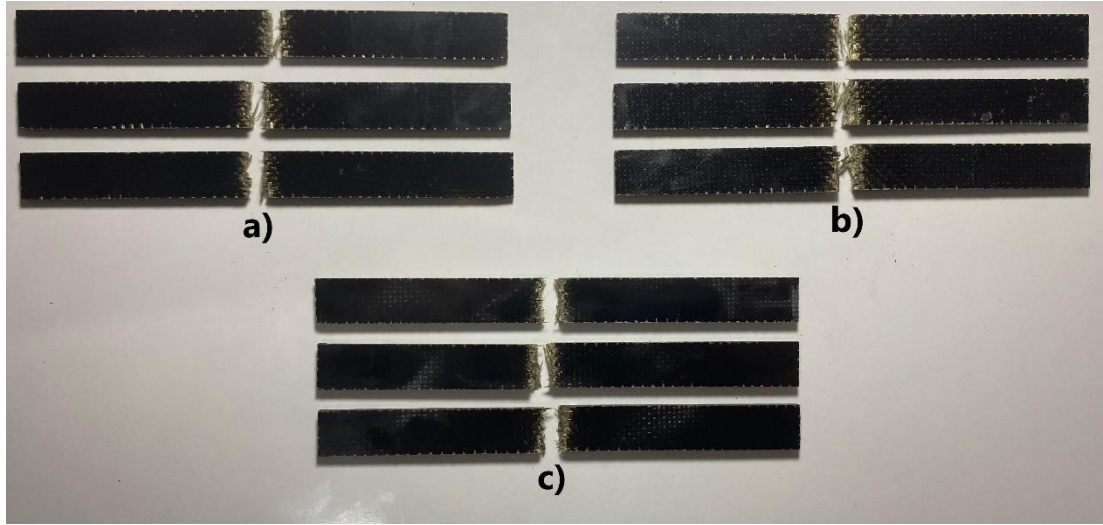


Şekil 4.11: Eğilme sonrası 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

Üç nokta eğilme testleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla oluşan gerilme – birim şekil değişimi grafiği ve test sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

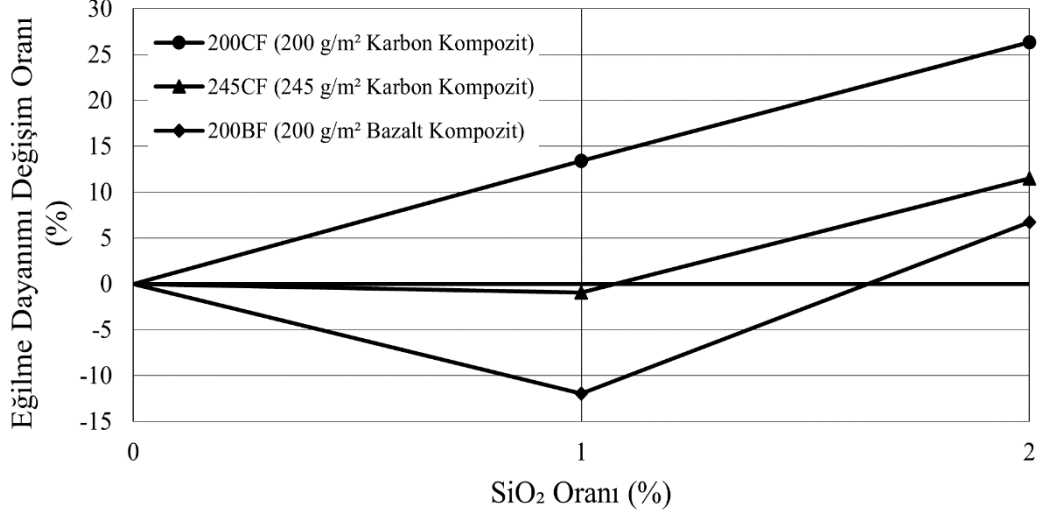


Şekil 4.12: 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımları



Şekil 4.13: Eğilme sonrası 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının artması, farklı tip takviye kumaşlarından oluşturulan kompozit parçaların eğilme dayanımlarında farklı etki göstermiştir. Bu etki Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının eğilme dayanımlarına etkisi

Üç nokta eğilme deneyleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla eğilme mukavemeti doğrusal bir artış göstermiştir.

245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla eğilme mukavemeti önce paralel sonuçlar göstermiş olup sonrasında artmıştır ve sonuç olarak SiO<sub>2</sub> katkısız haline yakın değerler çıkmıştır.

200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla eğilme mukavemeti önce azalmış olup sonrasında artmıştır ve sonuç olarak SiO<sub>2</sub> katkısız haline yakın değerler çıkmıştır.

### 4.3 İzod Darbe Deneyi Sonuçları

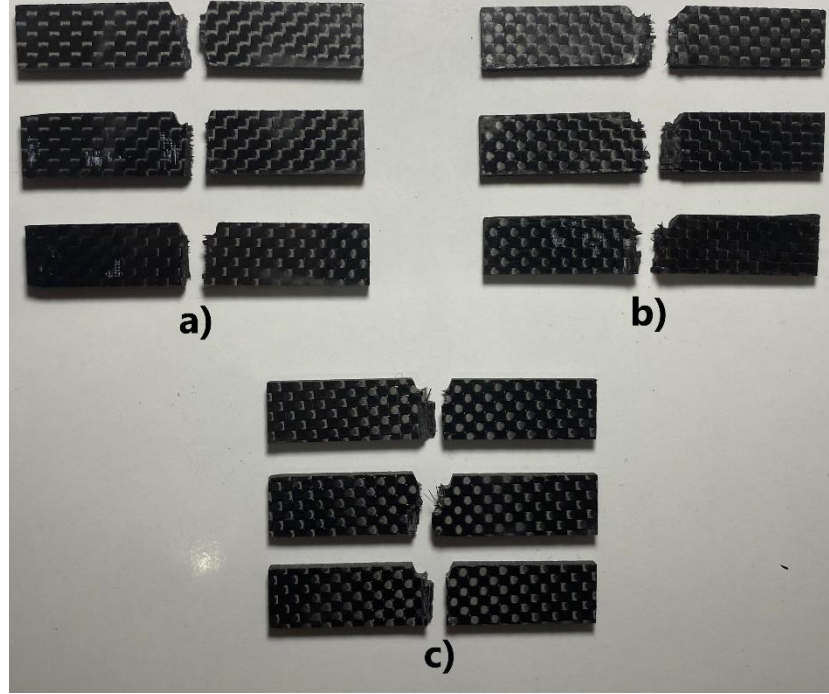
Nanopartikül olarak, epoksi reçinenin belirli ağırlıkça oranlarında katılan SiO<sub>2</sub> katkılı (%1 ve %2) ve katkısız (%0) izod darbe numuneleri test sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir.

**Tablo 4.5:** İzod darbe deneyi sonuçları

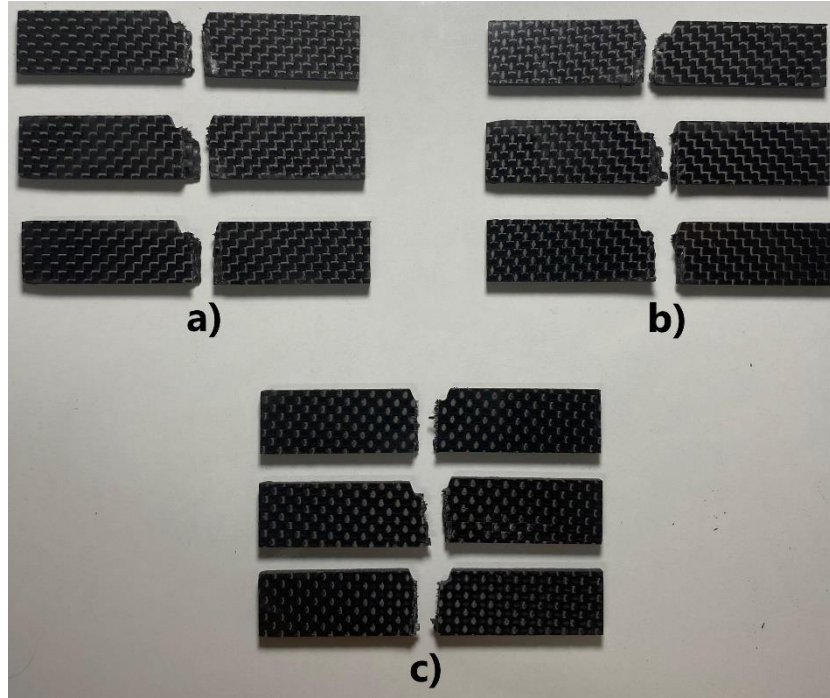
<b>Numune Kodu</b>	<b>Ort. Kalınlık (mm)</b>	<b>Ort. Genişlik (mm)</b>	<b>Darbe Enerjisi (J)</b>	<b>Darbe Dayanımı (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
200CF0	3,53	10,01	2,19	62
<b>200CF1</b>	<b>3,11</b>	<b>9,65</b>	<b>2,40</b>	<b>80</b>
200CF2	3,11	9,65	2,34	78
245CF0	3,23	9,85	2,10	66
245CF1	3,05	10,41	2,35	74
<b>245CF2</b>	<b>2,98</b>	<b>9,84</b>	<b>2,20</b>	<b>75</b>
200BF0	2,94	9,83	2,92	101
<b>200BF1</b>	<b>2,88</b>	<b>9,94</b>	<b>2,95</b>	<b>103</b>
200BF2	2,97	10,81	3,21	100

Burada tüm numuneler karşılaştırıldığında bazalt kompozitlerin darbe dayanımı karbon kompozitlerden yüksek çıkmıştır. Karbon kompozitler, bazalt kompozitlerin en fazla %80, en az %60,19 darbe dayanımına sahiptir.

İzod darbe deneyleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin test sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

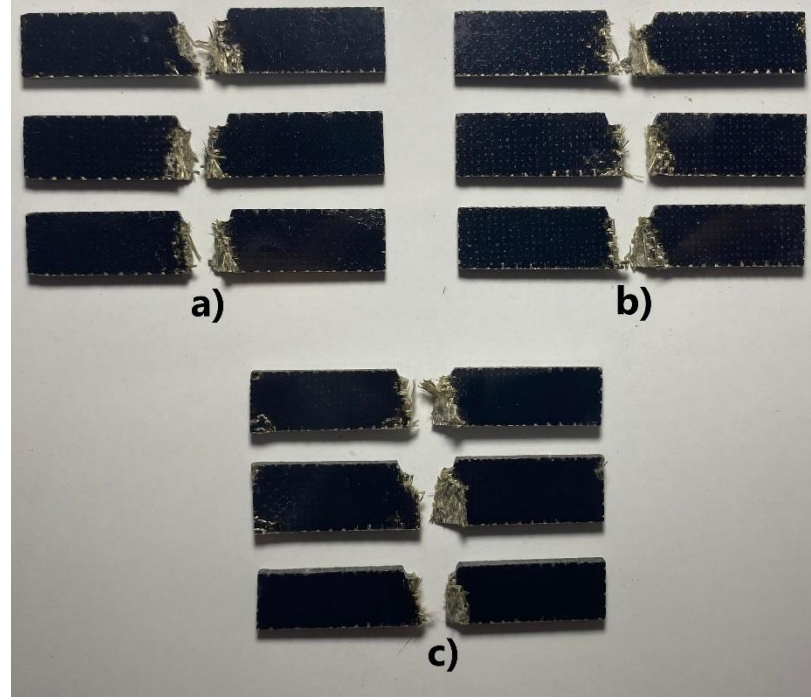


Şekil 4.15: İzod deneyi sonrası 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>



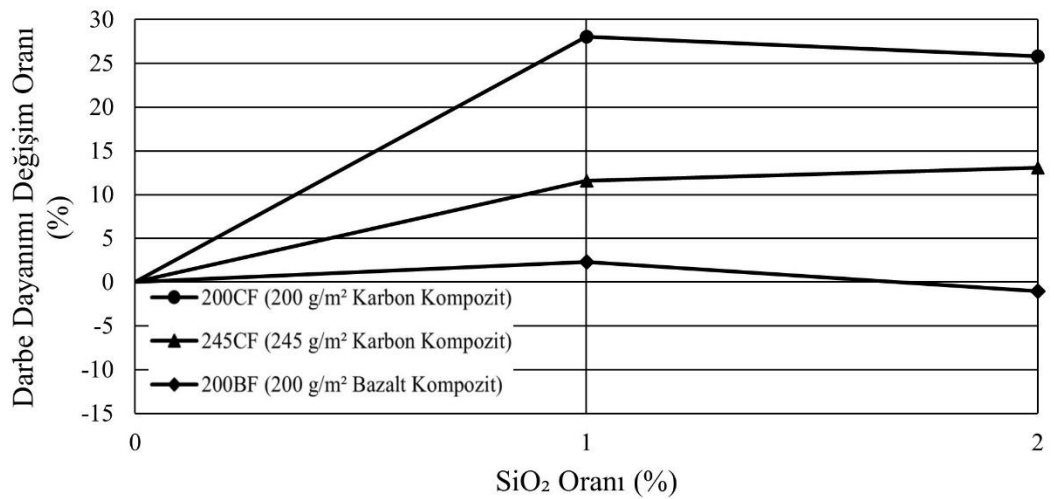
Şekil 4.16: İzod deneyi sonrası 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

İzod darbe deneyleri sonucunda 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin test sonrası görüntüleri Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17: İzod deneyi sonrası 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitler a) %0 SiO<sub>2</sub>, b) %1 SiO<sub>2</sub>, c) %2 SiO<sub>2</sub>

SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının artması, farklı tip takviye kumaşlarından oluşturulan kompozit parçaların darbe dayanımlarında farklı etki göstermiştir. Bu etki Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18: SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranının darbe dayanımlarına etkisi



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nanopartikül olarak SiO<sub>2</sub>'nin kullanıldığı tez çalışmasının amacı bu nanopartikül ektisinin farklı kumaş ve farklı elyaf tiplerinde mekanik olarak nasıl etki yarattığının incelenmesi ve bazalt kompozitlerin çevreci yanından faydalanılarak kullanılabilirliğinin irdelenmesidir. Çalışma kapsamında 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş, 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş ve 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş seçilmiştir. Takviye kumaşlarının desenleri bezayağı olup hepsinin aynıdır. Matris malzemesine yani epoksi reçineye, reçinenin kütlece %0, %1 ve %2 oranlarında SiO<sub>2</sub> nanopartikülü belirli bir sistematik ile eklenmiş ve ardından vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parçalar imal edilmiştir. Kompozit parçaları mekanik özellikler açısından karşılaştırmak için su jeti ile ilgili standartlarda tavsiye edilen boyutlarında kesilmiş olup çekme, üç nokta eğilme ve izod darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir deney parametresi için 3'er numune test edilmiş olup sonuç olarak ortalaması alınmıştır.

Öncelikli olarak parçaların üretiminde bazı hatalı parçalar ortaya çıkmış ve bunların nedenleri saptanarak gerekli önlemler alınmıştır. Şekil 5.1'de verilen bozuk parçaların üretiminde, reçine sistem içerisinde akarken zayıf olamaması için çıkış hortumuna gelmeden hemen vanalar kapatılmıştır. Fakat böyle yapıldığı zaman parçaların kalıba bakan kısımdaki elyafların reçineyi emmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi akış filesi ve soyma kumaşının da bulunduğu parçanın üst kısmındaki elyafların reçineyi daha önce emmeye başlayıp aşağıdaki katmanlar daha sonra reçineyi emmektedir. Ancak çıkış hortumuna reçine, altta kalan katmanlardan daha hızlı ulaşmaktadır. Dolayısıyla bu problemi çözebilmek için reçinenin aşağı kısımlara kadar ilerlemesi beklenmiştir. Bu da az miktarda da olsa reçinenin çıkış hortumunda birikip giriş kısmındaki gibi zayıf olmasına sebebiyet vermiştir. Özellikle SiO<sub>2</sub> katkılı reçineler normalinden daha yoğun ve vizkozitesi yüksek olduğu için bu durum önem arz etmektedir.

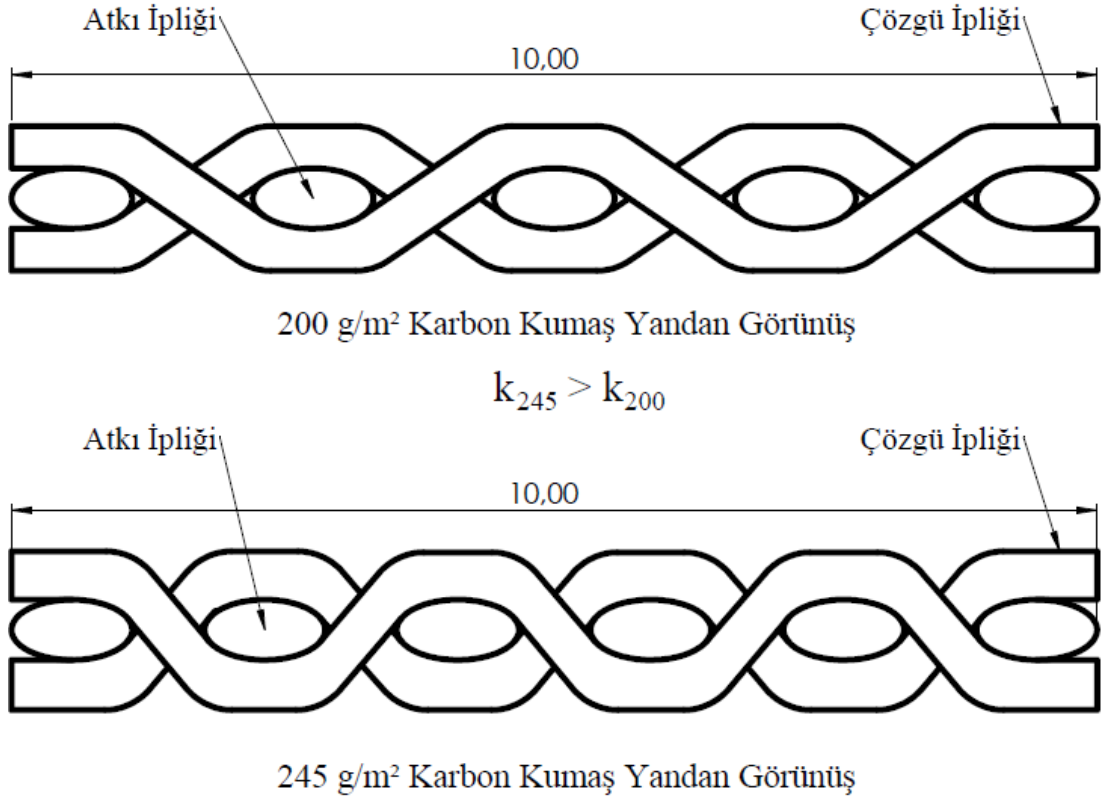


**Şekil 5.1:** Hatalı parçalar

Çekme testlerinin sonucunda;

Aynı elyaf numarasına ve desenine sahip fakat farklı kumaş alan kütlelerindeki  $\text{SiO}_2$  katkısız  $200 \text{ g/m}^2$  ve  $245 \text{ g/m}^2$  karbon kumaş takviyeli kompozitlerde çekme mukavemeti, takviye kumaşının kütlesi artınca azalmıştır. Her ne kadar tez çalışmasında  $245 \text{ g/m}^2$  kumaşa kullanılan elyafın mukavemeti  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaştakine göre yüksek olsa da o kadarlık fark kompozit parça haline geldiğinde çok etkili olmamıştır. Bunun sebebi,  $245 \text{ g/m}^2$  karbon kumaşın sıklığının  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaştan daha fazla olmasıdır. Çift yönlü (bezayağı, dimi 2x2 vb.) kumaşlar için sıklığın fazla olması atkı ve çözgü ipliklerinin birbirleri üzerinden daha fazla atlamasına ve kıvrım oranının artmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum Şekil 5.2’de gösterilmiştir.  $245 \text{ g/m}^2$  karbon kumaşın kıvrım oranı  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaştan fazla olduğu için çekme mukavemeti daha düşüktür.

Andreozzi ve diğ. (2023), çalışmalarında aynı iplik numarasına ve desenine sahip fakat farklı kumaş alan kütlelerindeki kumaşlardan elde edilen kompozit parçalarda, düşük kütleli kumaş takviyeli kompozitin çekme dayanımını daha yüksek bulunmuştur. Düşük alan kütlelerine sahip kumaşın sıklığı az olduğu için daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. Bu durum yapılan tez çalışmasıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.2: Bezayağı desen 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşların yandan görüntüsü

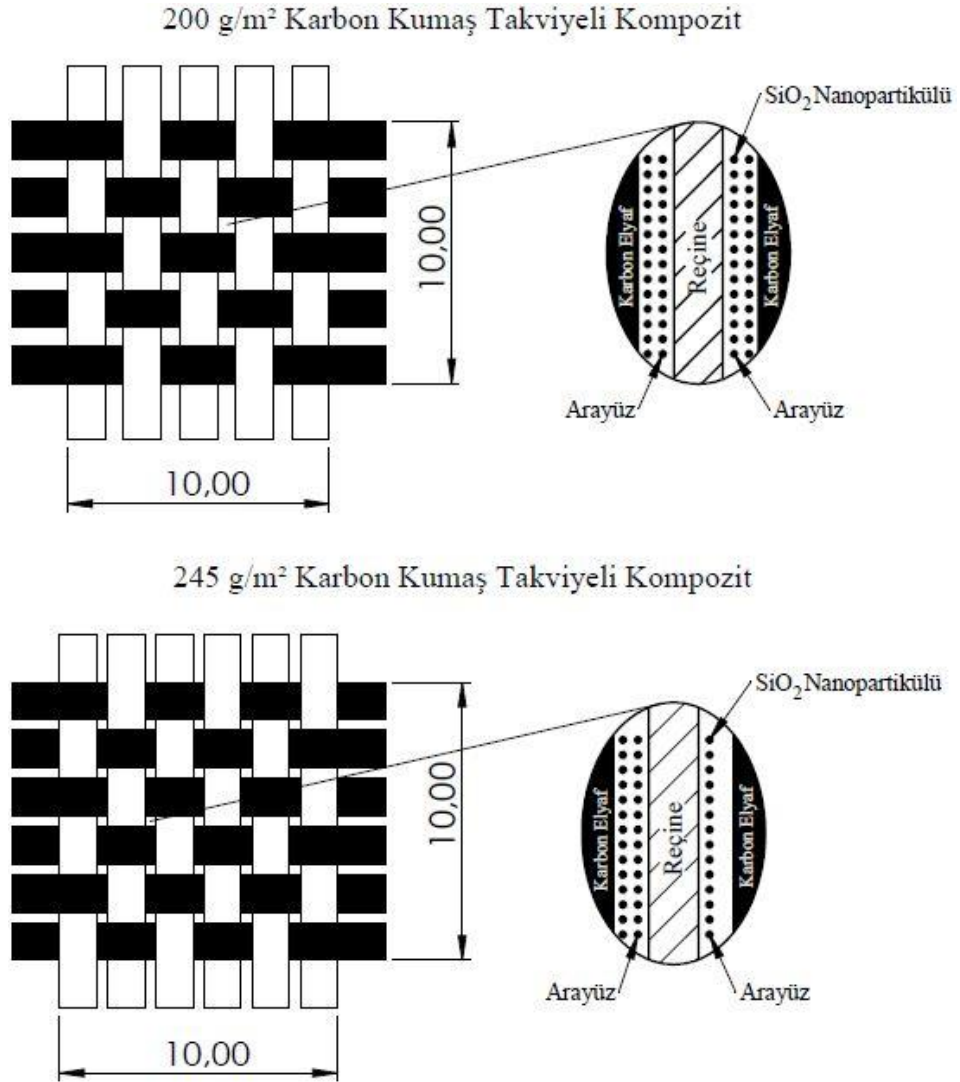
%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı katkısız olanlara göre %13,42 artmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise artış oranı %1 SiO<sub>2</sub> katkılılara göre %10,09 olup katkısızlara göre ise %24,87'dir. SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit parçaların çekme mukavemetleri düzenli bir şekilde artmıştır.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı katkısız olanlara göre %3,74 artmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise %1 SiO<sub>2</sub> katkılılara göre %8,01 azalış olup katkısızlara göre ise azalış %4,57'dir. SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit parçaların çekme mukavemetleri arasında düzenli bir ilişki kurulamamıştır.

200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarında ise SiO<sub>2</sub>'nin etkisi gözlemlenememiştir. Dolayısıyla SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetleri arasında düzenli bir ilişki kurulamamıştır.

Üç farklı kumaş tipinden elde edilen kompozit parçalarda, çekme dayanımına  $\text{SiO}_2$ 'nin etkisi düzenli olarak sadece  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaş takviyeli kompozitlerde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaş yapısının, nanopartikül katkılı reçineyle vakum infüzyon yöntemi kullanılarak kompozit hale getirilmesine daha uygun olmasıdır, arayüz bölgelerinde daha homojen nanopartikül bulundurmasıdır. Bu durum Şekil 5.3'de gösterilmiştir

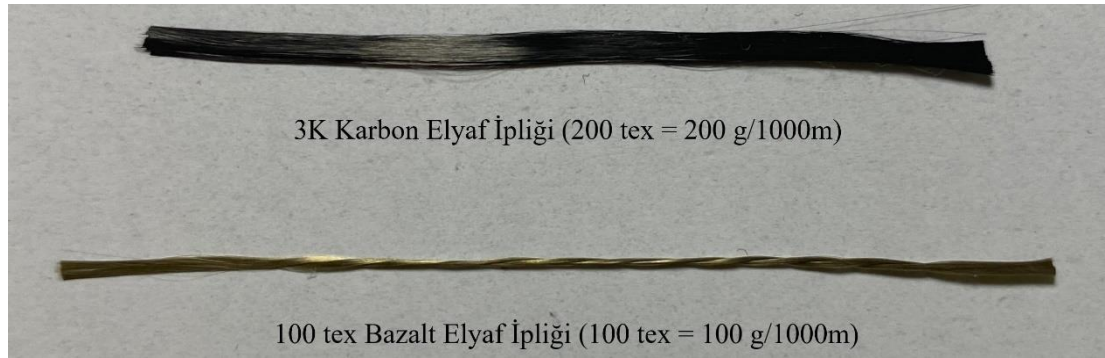
$245 \text{ g/m}^2$  karbon kumaşın sıklığı  $200 \text{ g/m}^2$  karbon kumaştan daha fazladır. Her ne kadar aynı elyaf/reçine oranında ve aynı kalınlıkta kompozitler üretmek için kullanılan kumaşların kat sayıları değişse de sıklığın artması atkı ve çözgü ipliklerinin bağlantı noktalarının artmasına ve yatayda birim uzunlukta daha fazla filament olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 5.3:  $200 \text{ g/m}^2$  ve  $245 \text{ g/m}^2$  karbon kumaş kompozitlerdeki arayüzler

Dolayısıyla sıklığın fazla olması reçinenin, giriş tarafından çıkış tarafına giderken elyafların nanopartiküllere filtre yapmasına sebebiyet verir. Bir diğer söyleyişle nanopartiküller, istenmeyen düzeyde elyaflara tutunarak sistem içerisinde homojen dağılamamaktadır, reçine çıkışına doğru daha az nanopartikülün gitmesine sebebiyet vererek oradaki filamentlerin arayüz kalitesini düşürmektedir. Şanlı (2021), yaptığı çalışmada benzer bir problemle karşılaşmıştır.

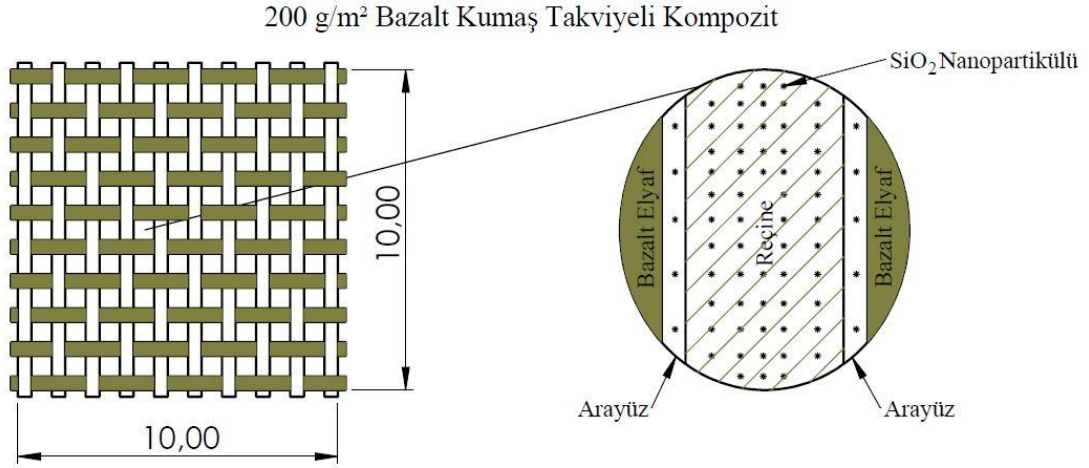
200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde SiO<sub>2</sub> etkisinin görülmemesinin sebebi ise 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşlara nazaran daha boşluklu bir kumaş yapısına sahip olmasıdır. Halihazırda bazalt kumaşın elyaf/reçine oranı karbondakilerden düşük çıkmıştır. Her ne kadar sıklığı diğerlerine göre fazla olsa da bazalt fitili karbon fitilinden çok daha incedir. Bu durum Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.4:** 3K (200 tex) karbon ipliğinin ve 100 tex bazalt ipliğinin karşılaştırılması

Reçinenin sistem içerisinde akışı anında nanopartiküller bu boşluklardan rahatlıkla geçmekte ve reçine zengin bölgelerde daha çok nanopartikül bulunmaktadır. Dolayısıyla elyaflara yeteri kadar yapışamayarak kaliteli arayüzler oluşturamamaktadır. Bu durum yine Şekil 5.5'de gösterilmiştir.

Kısaca 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş yapısal anlamda yoğun, 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş ise boşluklu olduğu için vakum infüzyon yöntemiyle nanopartikül katkılı kompozit hale getirilmesi çekme özellikleri açısından bir avantaj sağlamamaktadır. 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş bu sistem için daha uygundur.



Şekil 5.5: 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş kompozitlerdeki arayüzler

Üç nokta eğilme testleri sonucunda;

SiO<sub>2</sub> katkısız 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde eğilme mukavemeti, takviye kumaşının kütlesi artınca artmıştır. Bunun sebebinin 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşın sıklığının daha fazla olmasıdır. Aynı iplik numarasında ve desendeki kumaşlarda sıklığın artması kıvrım oranını artırır. Dolayısıyla atkı ve çözgü ipliklerinin bağlantı noktaları daha fazladır. Bu noktalarda elyaflar arası temas yüzey alanı fazla olduğu için sürtünme direnci sıklığı az olana göre daha iyidir. Eğilme yüklemesinin bir kısmı bu sürtünme dirençlerini yenmekte güçlük çeker ve sıklığı yüksek olan kumaşta daha iyi eğilme özellikleri göstermektedir.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımı katkısız olanlara göre %13,47 artmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise artış oranı %1 SiO<sub>2</sub> katkılılara göre %11,42 olup katkısızlara göre ise %26,42'dir. SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit parçaların eğilme mukavemetleri düzenli bir şekilde artmıştır.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımı katkısız olanlarla neredeyse aynıdır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanların ise eğilme dayanımı katkısız ve %1 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlara göre %12 artmıştır. SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozit parçaların eğilme mukavemetleri arasında düzenli bir ilişki kurulamamıştır.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımı katkısız olanlara göre %11,91 azalmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise %1 SiO<sub>2</sub> katkılılara göre %21,74 artış olup katkısızlara göre ise artış %7,23'dür. SiO<sub>2</sub> oranının artırılmasıyla 200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozit parçaların eğilme mukavemetleri arasında düzenli bir ilişki kurulamamıştır.

Eğilme dayanımı anlamında SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkısı en iyi şekilde 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi çekme deneyindeki sebepler ile aynıdır (bkz. Şekil 5.3, Şekil 5.5). 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşların arayüzlerinde optimum nanopartikül bulunması eğilme anında başlayan çatlakların ilerlemesini minimuma indirmektedir. Dolayısıyla eğilme dayanımını artırmaktadır.

İzod darbe deneyi testleri sonucunda;

SiO<sub>2</sub> katkısız 200 g/m<sup>2</sup> ve 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerde darbe dayanımı, takviye kumaşının kütlesi artınca artmıştır. Bunun sebebinin 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşın sıklığının daha fazla olmasıdır. Sıklığın artmasıyla atkı ve çözgü ipliklerinin bağlantı noktaları da artmaktadır. Bu noktalar, darbe sönmüleyici elemanlar olarak kompozitte görev aldığı için sayısının artması darbe dayanımını artırmıştır.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 200 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin izod darbe dayanımı katkısız olanlara göre %29,03 artmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise artış oranı katkısızlara göre %25,81 olup %1 ve %2 SiO<sub>2</sub> katkılıların darbe dayanımı hemen hemen aynıdır.

%1 SiO<sub>2</sub> katkılı 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin izod darbe dayanımı katkısız olanlara göre %12,12 artmıştır. %2 SiO<sub>2</sub> katkılı olanlarda ise artış oranı katkısızlara göre %13,64 olup %1 ve %2 SiO<sub>2</sub> katkılıların darbe dayanımı hemen hemen aynıdır.

200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş takviyeli kompozitlerde izod darbe dayanımı hemen hemen tüm SiO<sub>2</sub> katkı oranlarında aynı olup SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün etkisi gözlemlenememiştir.

Karbon kumaş takviyeli kompozitlerde, darbe dayanımının artmasında %1 SiO<sub>2</sub> oranı yetmiştir. SiO<sub>2</sub> oranının daha fazla artırılmasıyla darbe dayanımı arasında sağlıklı bir ilişki kurulamamıştır. SiO<sub>2</sub> nanopartikülü elyaf-reçine arasındaki arayüzelerde yeteri kadar biriktiğinde darbeyi sönmüleyecek etkiye sahiptir. 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaş takviyeli kompozitlerin nanopartiküller ile ilişkili arayüzleri çok optimum olmasa da düzensiz SiO<sub>2</sub> nanopartikül varlığı bile darbe dayanımını artırmıştır. Zaten 245 g/m<sup>2</sup> karbon kumaşın darbe dayanımı orantısal anlamda 200 g/m<sup>2</sup> olandan arayüzü daha kötü olduğu için daha az artmıştır.

200 g/m<sup>2</sup> bazalt kumaş boşluklu bir yapıya sahip olduğu için SiO<sub>2</sub> nanopartikülleri daha çok reçine zengin bölgelerde bulunmaktadır. Dolayısıyla orada bulunan SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin etkisi elyaf takviyesiz epoksi reçineye etki edebileceği kadardır. Bu nedenle takviyeli halinde SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün etkisi gözlemlenememiştir.

Genel anlamda, karbon kompozitlerin mekanik özellikleri bazalt kompozitlerden yüksek çıkmıştır. Bu beklenen bir durum olup literatürdeki birçok çalışma bu durumu desteklemektedir. Ancak bazalt kompozitlerin darbe dayanımı SiO<sub>2</sub> katkılı karbon kompozitlere göre bile daha yüksek çıkmıştır. Karbon fiber kompozitlerin havacılık, otomotiv gibi sektörlerden sonra en çok kullanıldığı sektör endüstriyel ürünler (bisiklet, hafif diğer taşıtlar, kasklar, spor ekipmanları vs.) alanıdır. Buradaki asıl kullanım nedeni hafif ve dayanıklı olmasıdır. Fakat test sonuçlarından da anlaşılacağı gibi bazaltın darbe dayanımı daha yüksek bir malzeme olması bu alanlarda kullanılmasına kapı açabilir.

Veriler ışığında karbon ve bazaltın kompozit hallerindeki yoğunlukları yaklaşık sırasıyla 1,47 - 1,49 g/cm<sup>3</sup> ve 1,74 – 1,76 g/cm<sup>3</sup> şeklinde hesaplanmıştır. Spesifik alanlar dışında endüstriyel ürünlerde bu yoğunluk farkı göz ardı edilebilir. Gerekli hafiflik iki elyafın kompozitlerinde de sağlanabilir. Darbe dayanımı spor ekipmanları, kasklar vb. alanlarda daha öne çıkan bir özelliktir. Çünkü bu ürünlerde temel amaç darbeyi sönmüleyerek uzun süreli kullanım sağlamaktır. Fakat hayatın içerisinde bahsedilen ürünler daha çok karbon elyafın kompozitlerinden üretilmektedir. Bu da ürünü pahalı ve karbon ayak izi fazla bir ürün yapmaktadır.



Bu ürünler, bazalt elyafın kompozitlerinden üretilerek daha uzun ömürlü, darbe dayanımı yüksek, çevreci ve ekonomik olarak üretilebilir. Üretilmiş olan SiO<sub>2</sub> katkısız kompozit parçaların 1000x1000x2,5 mm ölçülerindeki yaklaşık maliyet/yoğunluk karşılaştırması Tablo 5.1’de verilmiştir. Aynı zamanda karbonun küresel ısınma potansiyelinin bazalta göre yaklaşık 32 kat olması endüstriyel ürünler anlamında bazaltın yaygınlaşmasının çevre için ne kadar önemli olacağını göstergesidir.

**Tablo 5.1:** 1000x1000x2,5 mm ölçülerindeki kompozitlerin maliyetleri

<b>Kompozit Parça</b>	<b>Yaklaşık Elyaf Maliyeti (\$)</b>	<b>Yaklaşık Reçine Maliyeti (\$)</b>	<b>Toplam Hammadde Maliyeti (\$)</b>	<b>Sarf Malzeme Maliyeti (\$)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$)</b>	<b>Yoğun. (g/cm<sup>3</sup>)</b>
200CF0	168,00	41,48	209,48	14,67	224,15	1,47– 1,49
245CF0	171,50	41,48	212,98	14,67	227,65	1,47- 1,49
200BF0	13,44	48,12	61,56	14,67	76,23	1,74- 1,76

Yapılan çalışmalarda deney parametreleri artırılarak daha fazla deney seti test edilebilir ve farklı sonuçlar da yorumlanabilir. Bu hususta yapılan öneriler ise aşağıda sıralanmıştır.

- Nanopartikül olarak SiO<sub>2</sub> oranı daha fazla ve aralıklı artırılarak kompozit parçalarda etkisi incelenebilir. (Örneğin; %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5, %3)
- Nanopartikül malzemesi çeşitlendirilerek etkileri irdelenebilir. (Örneğin, grafen, grafen oksit, karbon nanotüp vb.)

- Vakum infüzyondan ziyade farklı üretim yöntemleriyle nanopartikül katkılı kompozitler üretilebilir ve özellikleri incelenebilir. (Örneğin; el yatırması, presleme, RTM, Pultrüzyon vb.)
- Kumaş alan kütlesi, sıklık, iplik numarası, desen gibi parametrelerin değiştirilerek farklı kumaş konstrüksiyonlarındaki kumaşlar takviye olarak kullanılabilir. Etkileri incelenebilir.
- Nanopartikül katkılı reçinenin hazırlık sürecindeki adımlar değiştirilebilir ve iyileştirilebilir. Bu şekilde daha optimum sonuçlar bulunması amaçlanabilir.
- Farklı elyaf malzemeleri takviye olarak kompozitlerde kullanılabilir ve kullanılacak nanopartikül ile uyumu incelenebilir. (Örneğin; S-cam, AR-cam, paraaramid vb.)

## 6. KAYNAKLAR

Abdi, A., Farsani-Eslami, R., Khosravi, H., “Evaluating the mechanical behavior of basalt fibers/epoxy composites containing surface-modified CaCO<sub>3</sub> nanoparticles”, *Fibers and Polymers*, Vol. 19, No: 3, 635-640, (2018).

Adetayo, A. and Runsewe, D., “Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: a review”, *Open Journal of Composite Materials*, 9, 207-229, (2019).

Ageyeva, T., Sibikin, I., Karger-Kocsis, J., “Polymers and related composites via anionic ring-opening polymerization of lactams: recent developments and future trends”, *Polymers*, 10, 357, (2018).

Ahmad, F., Yuvaraj, N., Bajpai, P.K., “Influence of reinforcement architecture on static and dynamic mechanical properties of flax/epoxy composites for structural applications, *Composite Structures*, 255, (2021).

Ahmed, U., Tariq, A., Nawab, Y., Shaker, K., Khaliq, Z., Umair, M., “Comparison of mechanical behavior of biaxial, unidirectional and standard woven fabric reinforced composites”, *Fibers and Polymers*, 21 (6), 1308-1315, (2020).

Akato, K. and Bhat, G., “High performance fibers from aramid polymers”, *Structure and Properties of High-Performance Fibers*, 245-266, (2017).

Alcock, B., Cabrera, N.O., Barkoula, N.M., Loos, J., Peijs, T., “The mechanical properties of unidirectional all-polypropylene composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(5), 716-726, (2006).

Anbusagar, N.R.R., Palanikumar, K., Vigneswaran, R., Rajmohan, M., Sengottuvel, P., “Tensile and flexural properties of glass fibre reinforced nano polymer composite panels”, *Applied Mechanics and Materials Vols*, 372-376, (2015).

Andreozzi, M., Bianchi, I., Gentili, S., Mancina, T., Simoncini, M., “Effect of fabric areal weight on the mechanical properties of composite laminates in carbon-fiber-reinforced polymers”, *Journal of Composites Science*, 7, 351-365, (2023).

Anjum, N., Ajit Prasad, S.L., Suresha, B., “Role of silicon dioxide filler on mechanical and dry sliding wear behaviour of glass-epoxy composites”, *Adv Tribol.*, 1-10., (2013).

Ashby, M.F., *Materials selection in mechanical design*, Oxford : Pergamon Press, (1992).

ASTM, D256-23e1 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, West Conshohocken: ASTM International, (2023).

ASTM, D3039/D3039M-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken: ASTM International, (2017).

ASTM, D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, West Conshohocken: ASTM International, (2017).

Athawale, A.A. and Pandit, J.A., “Unsaturated polyester resins, blends, interpenetrating polymer networks, composites and nanocomposites: state of the art and new challenges”, *Unsaturated Polyester Resins*, 1-42, (2019).

Azrague, K., Wiik, M.K., Alneas, L.I., Schlanbusch, R.D., Johannesson, B., “Life cycle assessment as a tool for resource optimisation of continuous bazalt fibre production in Iceland”, *Engineering Conferences International (ECI) Life Cycle Assessment and Other Assessment Tools for Waste Management and Resource Optimization*, (2016).

Bağatır, T., “Grafen Nanopartikül Takviyesinin Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman, (2018).

Bahrami, S.H., Bajaj, P., Sen, K., “Effect of coagulation conditions on properties of poly(acrylonitrile / carboxylic acid) fibers”, *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 1825-1832, (2003).

Baran, I., “Pultrusion processes for composite manufacture”, *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, 379-414, (2015).

Bashtannik, P.I., Kabak, A.I., Yakovchuk, Y.Y., “The effect of adhesion interaction on the mechanical properties of thermoplastic basalt plastics”, *Mech. Compos. Mater.*, 39(1), 85–88, (2003).

Başev, S., “Tekstil Yapılarının Bina Güçlendirmede Kullanımı Üzerine Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2022).

Batı, S., “Aramid Fiber Takviyeli Kompozitlerde Nanopartikül Takviyesinin Mekanik ve Balistik Özelliklere Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” Doktora Tezi, *Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman, (2022).

Bazgari, D., Moztarzadeh, F., Sabbagh-Alvani, A.A., Rasoulianboroujeni, M., Tahri, M., Tayebi, L., “Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite”, *Ceramics International*, 44(1), 1220-1224, (2018).

Boustead, I., “Ecoprofiles of plastics and related intermediates”, Association of Plastic Manufacturers of Europe (APME) Brussels, Belgium; (2002).

Bozetine, H., Wang, Q., Barras, A., Li, M., Hadjersi, T., Szunerits, S., Boukherroub, R., “Green chemistry approach for the synthesis of ZnO – Carbon dots nanocomposites with good photocatalytic properties under visible light”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 465, 286-294, (2016).

Bulut, M., “Mechanical characterizations of basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets”, *Composites Part B: Engineering*, 122, 71-78, (2017).

Bulut, M., Erkliğ, A., Kanmaz, P., “Vibration-damping characterization of the basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets”, *Sci. Eng. Compos. Mater.*, (2018).

Cameron, N.M. and Rapp, C.F., “Fiberglass”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 3142-3146, (2001).

Chairman, C.A., Jayasathyakawin, S., Babu, S.P.K., Ravichandran, M., “Mechanical properties of basalt fabric plain and twill weave reinforced epoxy composites”, *Materials Today: Proceedings*, 46 (19), 9480-9483, (2021).

Chaudhari, R., “Characterization of high-pressure resin transfer molding process variants for manufacturing high-performance composites”, Ph.D. Thesis, *Karlsruhe Institute of Technology*, Germany, (2013).

Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V.K., Ashfaq, A., Jeelani, S., “Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites”, *Composites Structures*, 67(1), 115-124, (2005).

Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., “Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites”, *Composites Structures*, 94(3), 1165-1174, (2012).

Corbiere-Nicollier, T., Laban, B.G., Lundquist, L., Leterrier, Y., Manson, J.A.E., Joliet, O., “Lifecycle assessment of biofibers replacing glass fibers as reinforcement in plastics”. *Resour Conservation Recycling.*, 33, 267–287, (2001).

Czigany, T., “Discontinuous basalt fiber-reinforced hybrid composites”, *Polymer Composites: From Nano-to Macroscale*, Springer Link, Chapter 17, 309, (2005).

Çalışkan, M.B., “KNT ve SiO<sub>2</sub> Nanopartikül İle Modifiye Edilmiş Karbon-Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2021).

Çınar, K.T. and Ekrem, M., “Nanoparçacık takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme davranışları”, *European Journal of Science and Technology*, (28), 1415-1418, (2021).

Das, S., “Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites”, *Int J Life Cycle Assess.*, 16, 268-282, (2011).

Demirci, İ., Avcı, A., Demirci, M.T., “Investigation of nano-hybridization effects on low velocity impact behaviors of basalt fiber reinforced composites”, *Journal of Composite Materials*, 0(0), 1-14, (2020).

Demirci, M.T., “Low velocity impact and fracture characterizaiton of SiO<sub>2</sub> nanoparticles filled basalt fiber reinforced composites tubes”, *Journal of Composite Materials*, 0(0), 1-19, (2020).

Deopura, B.L., Alagirusamy, R., Joshi, M., Gupta, B., “*Polyesters and polyamides*”, England : Woodhead Publishing Limited, (2008).

Dias, D.P. and Thaumaturgo, C., “Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers”, *Cement Concrete Composites*, 27, 49-54, (2005).

Diener, J. and Siehler, U., “Ecological comparison of NMT and GMT components”, *Angew Makromol Chem*, 272, 1–4, (1999).

Diez, N., Alvarez, P., Santamaria, R., Blanco, C., Menendez, R., Granda, M., “Optimisation of the melt-spinning of anthracene oil-based pitch for isotropic carbon fibre preparation”, *Fuel Processing Technology*, 93 (1), 99-104, (2012).

Divya, G.S. and Suresha, B., “Impact of nano-silicon dioxide on mechanical properties of carbon fabric reinforced epoxy composites”, *Materials Today: Proceeding*, (2021).

Dong, C., Duong, J., Davies, I.J., Flexural properties of S-2 glass and TR30S carbon fiber-reinforced epoxy hybrid composites, *Polymer Composites*, 33(5), 773-781, (2012).

Durgun İ., “El yatırması yöntemi ile kompozit parça üretimi”, *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara, 283-287, (2014).

Durgun İ., “Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi”, 7. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, (2014).

Edie, D.D. and Diefendorf, R.J., “Chapter 2 : Carbon fiber manufacturing”, *Carbon – Carbon Materials and Composites*, Noyes Publications, (1993).

Emrahi, R., Rostamiyan, Y., Tilehnoee, M.H., “Influences of nano-SiO<sub>2</sub> on tensile, flexural and compressive characteristics of open-hole carbon fiber-reinforced polymer laminated composites: Experimental study”, *Functional Composites and Structures*, Vol: 5, No: 3, (2023).

Fazio, P., “Basalt fiber: From earth an ancient material for innovative and modern application”. *Energ. Ambientee Innov.*, 3, 89–96, (2011).

Fitch, P.E. and Cooper, J.S., “Life cycle energy analysis as a method for material selection”. *Trans ASME*, 126, 798–804, (2004).

Gao, X., Jensen, R.E., Mcknight, S.H., Gillespie, J.W., “Effect of colloidal silica on the strength and energy absorption of glass fiber/epoxy interphases”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 1738-1747, (2011).

Gemi, L., Yazman, Ş., Uludağ, M., Dispinar, D., Tiryakioğlu, M., “The effect of 0.5 wt% additions of carbon nanotubes & ceramic nanoparticles on tensile properties of epoxy-matrix composites: A comparative study”, *Mater. Sci. Nanotechnol.*, 1(1): 15-22, (2017).

Genç, G., “Elyaf Sarma Yöntemiyle Üretilen Karbon Elyaf Kompozitlerde Ön Gerilme Parametrelerinin Elyaf ve Kompozit Mukavemetine Etkisi”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).

Gürmen, S. ve Ebin B., “Nanopartiküller ve üretim yöntemleri – 1”, *Metalürji Dergisi*, 31-38, (2008).

Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F., Dean, D., “S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: Manufacturing, structures, thermal and mechanical properties”, *Journal of Composites Materials*, 37 (14), 1821-1837, (2003).

Hartman, D.R., Greenwood, M.E., Miller, D.M., *High Strength Glass Fibers*, Owens-Corning Fiberglass Corporation Pub., (1994).

Hashim, U.R., Jumahat, A., Mahmud, J., “Improved tensile properties of basalt fibre reinforced polymer composites using silica nanoparticles”, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 50, 1-7, (2019).

He, H., Zhang, Z., Wang, J., Li, K., “Compressive properties of nano-calcium carbonate/epoxy and its fibre composites”, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 919-924, (2013).

Hearle, J.W., *High Performance Fibers*, Cambridge: Elsevier, 25, (2001).

Hoque, A., Alam, M.K., Tibbets, G.G., “Synthesis of catalyst particles in a vapor grown carbon fiber reactor”, *Chemical Engineering Science*, 56, 4233-4243, (2001).

Houshyar, S., Shanks, R.A., Hodzic, A., “Influence of different woven geometry in poly(propylene) woven composites”, *Macromolecular Materials and Engineering*, 290(1), 45-52, (2005).

Hulugappa, B., Mysuru, V., Suresha, B., “Effect of fillers on mechanical properties and fracture toughness of glass fiber reinforced epoxy composites”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 4, 1-14, (2016).

Inagaki M. and Kang F., *Materials science and engineering of carbon: fundamentals, Second Edition*, USA : Butterworth-Heinemann, (2014).

İşık, A., “Kompozit Malzemelerden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanın Eğilme ve Burulma Yüğü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uçak ve Uzay Mühendisliği, İstanbul, (2008).

İpek, S., “POSS Modifiye Alev Geciktirici Doymamış Polyester Reçine Sentezi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul, (2023).

Jamshaid, H. and Mishra, R., “A green material from rock: basalt fiber—a review”, *The Journal of The Tekstile Institute*, 107(7), 923-937, (2015).



- Jang, H.D., Hwang, D.W., Kim, D.P., Kim, H.C., Lee, B.Y., Jeong, I.B., “Preparation of cobalt nanoparticles by hydrogen reduction of cobalt chloride in the gas phase”, *Materials Research Bulletin*, 39(1), 63-70, (2004).
- Jassal, M. and Ghosh, S., “Aramid fibres – An overview”, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 27, 290-306, (2002).
- Jassal, M., Agrawal, A.K., Gupta, D., Panwar, K., “Aramid Fibers”, *Handbook of Fibrous Materials*, 207-231, (2020).
- Ji, S., Duan, H., Chen, Y., Guo, D., Ma, H., “A novel phosphorus/nitrogen-containing liquid acrylate monomer endowing vinyl ester resin with excellent flame retardancy and smoke suppression”, *Polymer*, (2020).
- Johannessen, T., Jensen, J.R., Mosleh, M., Johansen, J., Quaade, U., Løvbjerg, H., “Flame synthesis of nanoparticles applications in catalysis and product/process engineering”, *Chemical Engineering Research and Design*, 82(11), 1444-1452, (2004).
- Jones, F.R., “Glass fibres”, (ed: J.W.S. Hearle), *High Performance Fibers*, England : Woodhead Publishing Limited, 191-237, (2001).
- Kandola, B.K., Ebdon, J.R., Zhou, C., “Development of vinyl ester resins with improved flame retardant properties for structural marine applications”, *Reactive and Functional Polymers*, 129, 111-122, (2018).
- Kaya, A.İ., “Kompozit malzemeler ve özellikleri”, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45, (2016)
- Keller, T., “Overview of fibre-reinforced polymers in bridge construction”, *Structural Engineering International*, 12(2), 66-70, (2002).
- Kelly, A., Zweben, C., “Comprehensive composite materials”, *Materials Today*, 2(1), 20-21, (1999).
- Khan, S.U., Iqbal, K., Munir, A., Kim, J.K., “Quasi-Static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (3), 253-264, (2011).
- Khashaba, U.A., Nanoparticle type effects on flexural, interfacial and vibration properties of GFRE composites, *Chin. J. Aeronaut*, 29 (2), 520-533, (2016).
- Kim, K.Y., Ye, L., Interlaminar fracture properties of weft-knitted/woven fabric interply hybrid composite materials, *Journal of Materials Science*, 47, 7280-7290, (2012).

King, M.F.L., Srinivasan, V., Purushothaman, T., “Basalt fiber: An ancient material for innovative and modern application”, *Middle East Journal of Scientific Research*, 22(2), 308-312, (2014).

Kösedağ, E., Ekici, R., Yıldız, N., Çalışkan, U., “Effect of SiC and graphene nanoparticles on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites”, *Polymer Composites*, 44, 12, 8578-8588, (2023).

Kumar, D., Rajmohan, T., Venkatachalapathi, S., “Wear behavior of PEEK matrix composites: A review”, *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14583-14589, (2018).

Kurtz, S.M. and Devine, J., “PEEK biomaterials in trauma, orthopedic and spinal implants”, *Biomaterials*, 28(32), 4845-4869, (2007).

Landowski, M., Strugała, G., Budzik, M., Imielinska, K., “Impact damage in SiO<sub>2</sub> nanoparticle enhanced epoxy-carbon fibre composites”, *Composites Part B: Engineering*, 113, 91-99, (2017).

Landucci, G., Rossi, F., Nicoletta, C., Zanelli, S. “Design and testing of innovative materials for passive fire protection”. *Fire Safety Journal*, 44, 1103–1109, (2009).

Le Duigou, A., Davies, P., Baley, C., “Environmental impact analysis of the production of flax fibres to be used as composite material reinforcement”, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, Vol 5., 153-165, (2011).

Lee, G., Ko, K.D., Yu, Y.C., Lee, J., Yu, W.R., Youk, J.H., A facile method for preparing CNT-grafted carbon fibers and improved tensile strength of their composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 132-138, (2015).

Lee, K.M., Park, S.T., Lee, D.J., Nanogold synthesis by inert gas condensation for immuno-chemistry probes, *Journal of Alloys and Compounds*, 390, 297-300, (2005).

Li, S., Chen, D., Gao, C., Yuan, Y., Wang, H., Liu, X., Hu, B., Ma, J., Liu, M., Wu, Z., “Epoxy-functionalized polysiloxane/nano-SiO<sub>2</sub> synergistic reinforcement in cryogenic mechanical properties of epoxy and carbon fiber reinforced epoxy laminate”, *Composites Science and Technology*, (2020).

Liu, H., Sun, Y., Yu, Y., Zhang, M., Li, L., Ma, L., “Effect of nano-SiO<sub>2</sub> modification on mechanical and insulation properties of basalt fiber reinforced composites”, *Polymers*, 14, 3353, (2022).

- Mahalle, L., Alemdar, A., Mihai, M., Legros, N., “A cradle-to-gate life cycle assessment of wood fibre-reinforced polylactic acid (PLA) and polylactic acid/thermoplastic starch (PLA/TPS) biocomposites”, *Int J Life Cycle Assess*, 19, 1305-1315, (2014).
- Mamudu, U., Dufresne, A., Lim, R.C., “Synthesis and characterization of phosphorylated cellulose nanocrystals for enhanced UV stability of epoxy nanocomposite films”, *Composites Part C: Open Access*, 12(6), (2023).
- Martin, J. and Martin-Gonzalez, M., “The use of PEEK nanorod arrays for the fabrication of nanoporous surfaces under high temperature: SiN<sub>x</sub> example”, *Nanoscale*, 4(18), 5608-5613, (2012).
- Megahed, M., Megahed, A., Agwa, M., “The influence of incorporation of silica and carbon nanoparticles on the mechanical properties of hybrid glass fiber reinforced epoxy”, *Journal of Industrial Textiles*, 0, 1-19, 2018.
- Militky, J. and Kovacic, V., “Ultimate mechanical properties of basalt filaments”, *Textile Research Journal*, 66(4), 225-229, (1996).
- Moon, C. and Kim, B., “Nanoparticle size effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29 (2), 186-190, (2015).
- Morao, A. and Bie, F.D., “Life cycle impact assessment of polylactic acid (PLA) produced from sugarcane in Thailand”, *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 2523-2539, (2019).
- Mubarak, N.M., Abdullah, E.C., Jayakumar, N.S., Sahu, J.N., An overview on methods for the production of carbon nanotubes, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1186-1197, (2014).
- Nayak, R.K., Dash, A., Ray, B.C., “Effect of epoxy modifiers (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) on mechanical performance of epoxy/glass fiber hybrid composites”, *Procedia Materials Science*, 6, 1359-1364, (2014).
- Newcomb, B.A., “Processing, structure and properties of carbon fibers”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 262-282, (2016).
- Nguyen, T.D. and Lee, J.S., “Electrospinning-based carbon nanofibers for energy and sensor applications”, *Applied Science*, 23, 6048-6077, (2022).
- Özdemir, D., Mecit, H.D., Seventekin, N., Öktem, T., “Glass fibers”, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16(1), 281-287, (2006).

- Pandey, G.C. and Kumar, A., "Determination of density of oxidized fiber by IR spectroscopy", *Polymer Testing*, 21, 397-401, (2002).
- Pascault, J.P. and Williams, R.J.J., "Thermosetting polymers", *Handbook of Polymer Synthesis, Characterizations and Processing*, 519-533, (2013).
- Patel, M.K., "Closing carbon cycles: Carbon use for materials in the context of resource efficiency and climate change", *Utrecht University*, (1999).
- Pathak, A.K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T., Dhakate, S.R., "Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites", *Composite Science and Technology*, 135, 28-38, (2016).
- Penczek, P., Czub, P., Pielichowski, J., "Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology", *Advances in Polymer Science*, 1-95, (2005).
- Qin, W., Vautard, F., Askeland, P., Yu, J., Drzal, L., "Modifying the carbon fiber/epoxy matrix interphase with silicon dioxide nanoparticles", *RSC Advances*, 5(4), 2457-2465, (2015).
- Qu, J., "The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials", *Mechanics of Materials*, 14, 269-281, (1993).
- Rajput, N., "Methods of preparation of nanoparticles – a review", *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, (2015).
- Rodriguez, E., Larranaga, M., Mondragon, I., Vazquez, A., "Relationship between the network morphology and properties of commercial vinyl ester resins", *Journal of Applied Polymer Science*, 100(5), 3895-3903, (2006).
- Rong, M.Z., Zhang, M.Q., Liu, H., Zeng, H., Wetzel, B., Friedrich, K., "Microstructure and tribological behavior of polymeric nanocomposites", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 53, No: 2, 72-77, (2001).
- Rostamiyan, Y., Fereidoon, A., Mashhadzadeh, A.H., Salmankhani, A., "Using response surface methodology for modeling and optimizing tensile and impact strength properties of fiber orientated quaternary hybrid nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, 69, 304-316, (2015).
- Rouf, K., Denton, N., French, R.M., "Effect of fabric weaves on the dynamic response of two-dimensional woven fabric composites", *Journal of Material Science*, 52, 10581-10591, (2017).

Sarasini, F., Tirillo, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Iannace, S., Sorrentino, L., “Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites”, *Compos Part B-Eng*, 59, 204-220, (2014).

Sarasini, F., *Vinylester resins as a matrix material in advanced fiber – reinforced polymer (FRP) composites*, Advanced Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications (Second Edition), Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 31-49, (2023).

Sathishkumar, T.P., Satheeshkumar, S., Naveen, J., “Glass fiber-reinforced polymer composites – A review”, *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 33(13), 1258-1275, (2014).

Seventekin, N., “Kimyasal Lifler”, İzmir, 136, (2001).

Seydibeyoğlu, M.Ö., “A novel partially biobased PAN-lignin blend as a potential carbon fiber precursor”, *Biomed Research International*, (2012).

Sezemanas, G., Keriene, J., Sinica, M., Lankaitis, A., Mikulskis, D., “The alkali and temperature resistance of some fibers”, *Material Science*, 11, 29-35, (2005).

Sharma, G., Kumar, A., Sharma, S., Naushad, M., Dwivedi, R.P., Alothman, Z.A., Mola, G.T., “Novel development of nanoparticles to bimetallic nanoparticles and their composites: A review”, *Journal of King Saud University – Science*, 31, 257-269, (2019).

Sharma, H., Kumar, A., Rana, S., Guadagno, L., “An overview on carbon fiber-reinforced epoxy composites: effect of graphene oxide incorporation on composites performance”, *Polymers*, 14(8), 1548-1569, (2022).

Shi, J.W., Zhu, H., Wu, G., Wu, Z.S., “Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze–thaw cycling environments”. *Compos Part B-Eng*, 60, 239-247, (2014).

Shivakumar, H., Renukappa, N.M., Shivakumar, K.N., Suresha, B., “The reinforcing effect of graphene on the mechanical properties of carbon-epoxy composites”, *Open Journal of Composites Materials*, 10, 27-44, (2020).

Singla, M. and Chawla, V., “Mechanical properties of epoxy resin – fly ash composites”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(3), 199-210, (2010).

Suzuki, T. and Takahashi, J., “Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger car”, *The 9th Japan International SAMPE Symposium*, 9-14, (2005).

Şanlı, F., “Nanopartikül Katkılı Elyaf Takviyeli Tabakalı Kompozitlerin Mekanik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, (2021).

Şen, F., Palancıoğlu, H., Aldaş, K., “Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanları”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7, 1, 111-118, (2010)

Tee, D.I., Mariatti, M., Azizan, A., See, C.H., Chong, K.F., “Effect of silane-based coupling agent on the properties of silver nanoparticles filled epoxy composites”, *Composites Science and Technology*, 67(11-12), 2584-2591, (2007).

Tekinalp, H., “Pitch Based Carbon Fibers; The Effect of Precursor Composition on Pore Structure”, Ph.D Thesis, *Clemson University Graduate School*, Clemson, (2011).

Thipperudrappa, S., Kini, A.U., Hiremath, A., “An experimental study to evaluate the effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the strength and stability of unidirectional glass fiber reinforced epoxy composites”, *Materials Research Express*, 6(11), 115347, (2019).

Tian, Y., Zhang, H., Zhang, Z., “Influence of nanoparticles on the interfacial properties of fiber-reinforced-epoxy composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, 1-8, (2017).

Topkaya, T., Çelik, Y.H., Kilickap, E., “Mechanical properties of fiber/graphene epoxy hybrid composites”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34 (11), 4589-4595, (2020).

Tsai, J.L. and Cheng, Y.L., Investigating silica nanoparticle effect on dynamic and quasi-static compressive strengths of glass fiber/epoxy nanocomposites”, *Journal of Composite Materials*, 43, 3143-3155, (2009).

Umer, R., Li, Y., Dong, Y., Haroosh, H.J., Liao, K., “The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles on the processing of epoxy/glass fiber composites using resin infusion”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2183-2192, (2015).

URL\_1 <https://www.360researchreports.com/global-composite-materials-market-21168083>[online], (Kasım 2023)

URL\_2 <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/epoxy-resins-market-762.html>[online], (Kasım 2023)

URL\_3 <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/vinyl-ester-resin-market/>[online], (Kasım 2023)

URL\_4 <https://www.precedenceresearch.com/carbon-fiber-market>[online], (Kasım 2023)

URL\_5 <https://www.researchandmarkets.com/reports/5769139/basalt-fiber-market-global-industry-trends>[online], (Kasım 2023)

URL\_6 <https://www.metalurjik.com/kompozit-malzemelerin-siniflandirilmesi>[online], (Aralık 2023)

URL\_7 <https://www.teijin.com/products/carbon-fiber/>[online], (Aralık 2023)

URL\_8 <https://www.startint.com.au/carbon-fiber-wrap/>[online], (Aralık 2023)

URL\_9 <https://www.addcomposites.com/post/filament-winding-hydrogen-tanks-thermoset>

URL\_10 <https://www.easycomposites.co.uk/virgin-chopped-carbon-fibre-tow>[online], (Ocak 2024)

URL\_11 <https://en.wikipedia.org/wiki/Basalt>[online], (Ocak 2024)

URL\_12 <https://www.hslg-tech.com/products/basalt-fiber-roving.html>[online], (Şubat 2024)

URL\_13 <https://basfiber.com/properties/environmental-friendliness>[online], (Şubat 2024)

URL\_14 <https://www.basaltfiber-cn.com/products/basalt-rebar>[online], (Şubat 2024)

URL\_15 <https://www.swellnet.com/news/design-outline/2019/08/21/the-basalt-board-project-part-1>[online], (Şubat 2024)

URL\_16 <https://www.3b-fibreglass.com/direct-roving>[online], (Şubat 2024)

URL\_17 <https://robbreport.com/motors/marine/majesty-175-largest-fiberglass-superyacht-1234585470/>[online], (Şubat 2024)

URL\_18 <https://moldedfiberglass.com/applications/renewable-energy/wind-energy-components/>[online], (Şubat 2024)

URL\_19 <https://insulation-more.co.uk/blogs/the-pipe-duct-lagging-expert/insulation-materials-101-an-introduction-to-fiberglass>[online], (Şubat 2024)

URL\_20 <https://www.r-g.de/en/art/205120>[online], (Şubat 2024)

URL\_21 <https://www.dupont.com/life-protection/military-body-armor.html>[online], (Şubat 2024)

URL\_22 <https://www.nbtclothing.com/blogs/news/what-is-aramid-lining>[online], (Şubat 2024)

URL\_23 <https://bendingbranches.com/blogs/resources/kevlar-or-aluminum-canoe-how-to-choose-yours>[online], (Şubat 2024)

URL\_24 <https://www.sanmau.net/products/aramid-rope/>[online], (Şubat 2024)

URL\_25 <https://avdesodrone.com/kompozit-malzemeler-nedir-kompozit-uretim-yontemleri-nelerdir/>[online], (Şubat 2024)

URL\_26 <https://www.jm.com/en/fiberglass/assembled-roving-for-sheet-moulding-compound/>[online], (Şubat 2024)

URL\_27 <https://fiberr.com.tr/bmc-hamur>[online], (Şubat 2024)[online], (Ocak 2024)

Vaidya, U.K. and Chawla, K.K., “Processing of fibre reinforced thermoplastic composites”, *International Materials Reviews*, 53(4), 185-218, (2008).

Var, C., “Karbon Kumaş Takviyeli Hibrit Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Müh. Anabilim Dalı, Denizli, (2021).

Vasiliev, V.V. and Morozov, E.V., *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, England : Elsevier Science LTD., (2001).

Wallenberger, F.T., Watson, J.C., Hong, L., “Glass fibers”, (eds: D.B. Miracle and S.L. Donaldson), *Composites*, U.S.A., 21, 77-91, (2001).

Wang, Z.H., Choi, C.J., Kim, J.C., Kim, B.K., Zhang, Z.D., “Characterization of Fe-Co alloyed nanoparticles synthesized by chemical vapor condensation”, *Materials Letters*, 57(22), 3560-3564, (2003).

Wangxi, Z., Jie, L., Gang, W., “Evolution of structure and properties of PAN precursor during their conversion to carbon fibers”, *Carbon*, 41, 2805-2812, (2003).

Wei, B., Cao, H., Song, S., “Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment”, *Materials & Design*, 31(9), 4244-4250, (2010).



- Worasuvannarak, N., Hatori, S., Nakagawa, H., Miura, K., “Effect of oxidation pre-treatment at 220-270 °C on the carbonization and activation behavior of phenolic resin fiber”, *Carbon*, 41, 933-944, (2003).
- Wu, J., Li, C., Hailatihan, B., Mi, L., Baheti, Y., “Effect of the addition of thermoplastic resin and composite on mechanical and thermal properties of epoxy resin”, *Polymers*, 14, 1087-1116, (2022).
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., “Karbon liflerinin üretimi”, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3, 164-173, (2006).
- Yang, G., Fu, S.Y., Yang, J.P., “Preparation and mechanical properties of modified epoxy resins with flexible diamines”, *Polymer*, 48(1), 302-310, (2007).
- Yao, J., Bastiaansen, C.W.M., Peijs, T., “High strength and high modulus electrospun nanofibers”, *Fibers*, 2(2), 158-186, (2014).
- Yılmaz, E., Aydoğmuş, E., Demir, A., “Life cycle assessment and characterization of tincal ore reinforced polyester and vinylester composites”, *JOTCSB*, 5(2), 183-194, (2022).
- Ying, S. and Zhou, X., “Chemical and thermal resistance of basalt fiber in inclement environments”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 28 (3), 560-565, (2013).
- Zheng, Y., Ning, R., Zheng, Y., “Study of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the improved performance of epoxy and fiber composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(3), 223-233, (2005).
- Zhou, G., Sun, Q., Meng, Z., Li, D., Peng, Y., Zeng, D., Su, X., “Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites”, *Composite Structures*, 257, 113366, (2021).
- Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., “Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes”, *Materials Science and Engineering: A*, 475(1-2), 157-165, (2008).
- Ziaee, S. and Palmese, G.R., “Effects of temperature on cure kinetics and mechanical properties of vinyl-ester resins”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 37, 725-744, (1999).