

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN  
ÖZELİKLERİNİN NANOSELÜLOZ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KUYUMCU**

**Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Polimer Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN**

**OCAK 2018**



**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN  
ÖZELİKLERİNİN NANOSELÜLOZ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KUYUMCU  
(155101014)**

**Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Polimer Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN**

**OCAK 2018**



Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 155101014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mustafa KUYUMCU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÖZELİKLERİNİN NANOSELÜLOZ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN**  
Yalova Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN**  
Yalova Üniversitesi

**Doç. Dr. Bünyamin KARAGÖZ**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Ozan TOPRAKÇI**  
Yalova Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** **22 Aralık 2017**  
**Savunma Tarihi :** **24 Ocak 2018**





*Aileme ve Biricik Zeytin Çekirdeđime,*





## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı'nın desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle çalışmamın her aşamasında beni bilgilendiren ve yaptığım çalışmanın bu seviyeye gelmesinde büyük emeği olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Atilla TAŞDELEN'e, çalışmam süresince her türlü desteğini esirgemeyen meslektaşım sayın Cenk KURTULUŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca bana malzeme gönderen ve kesim işlemlerinde yardımcı olan; Metyx kompozit, Hayat kimya ve Çizgi mobilya firmalarına teşekkürlerimi borç bilirim.

Jüri üyelerim sayın Yrd. Doç. Dr. Ozan TOPRAKÇI ve Doç. Dr. Bünyamin KARAGÖZ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma 2017/YL/002 nolu proje ile Yalova Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir.

Ocak 2018

Mustafa KUYUMCU  
(Polimer Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. TEORİK BİLGİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	6
2.1.1 Elyaf özellikleri.....	11
2.1.1.1 Cam elyaf .....	11
2.1.1.2 Karbon elyaf.....	13
2.1.1.3 Aramid elyaf.....	15
2.1.2 Matris özellikleri .....	15
2.1.2.1 Epoksi reçine .....	17
2.1.2.2 Polyester reçineler .....	20
2.1.2.3 Vinilester reçineler .....	20
2.1.3 Elyaf-matris arayüzey özellikleri .....	20
2.2 Tabakalı Kompozitler.....	23
2.2.1 Çok Eksenli Kumaşlar .....	24
2.3 Nanokompozitler.....	26
2.3.1 Nanokompozitlerin sınıflandırılması .....	27
2.3.2 Polimer matrisli nanokompozitler.....	28
2.3.3 Nanodolgunlar.....	30
2.3.3.1 Nanoselüloz.....	31
2.3.4 NKS/Polimer nanokompozitlerin hazırlanması .....	36
2.4 Elyaf Takviyeli Nanokompozitler.....	38
2.4.1 Elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri.....	40
2.4.1.1 Vakum Torbalama.....	41
2.5 Hibrid Kompozitler .....	43
2.5.1.1 Tek bir malzemede inorganik/organik bileşenler.....	45
2.5.1.2 Hibrid nano/mikro kompozitler.....	45
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>47</b>
3.1 Malzemeler.....	47
3.2 Cihazlar .....	47
3.3 NKS Modifiye Epoksi Sistemlerin Hazırlanması .....	51
3.4 Kompozit Test Plakaların Üretimi .....	52
3.4 Mekanik Karakterizasyon .....	58

3.4.1 Çekme testi.....	59
3.4.2 Düzlem içi kayma testi.....	60
3.4.3 Üç nokta eğme testi.....	60
3.4.4 İzod darbe dayanım testi.....	61
3.5 Isıl Karakterizasyon.....	62
3.5.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre.....	62
3.5.2 Termogravimetrik analiz.....	62
3.6 Mikroyapı Karakterizasyonu.....	62
3.6.1 Taramalı elektron mikroskobu.....	63
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>
4.1 Optimum NKS/Epoksi Oranının Belirlenmesi.....	65
4.1.1 Çekme özellikleri.....	65
4.1.2 Üç nokta eğme özellikleri.....	67
4.1.3 İzod darbe dayanımı özellikleri.....	68
4.1.4 NKS nanodolgununun camsı geçiş sıcaklığına etkisi.....	69
4.1.5 NKS nanodolgununun bozunma sıcaklığına etkisi.....	70
4.2 NKS Nanodolgununun Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	71
4.2.1 Düzlem içi kayma (IPS) özellikleri.....	71
4.2.2 Üç nokta eğme özellikleri.....	74
4.2.3 İzod darbe dayanımı özellikleri.....	77
4.3 Mikroyapısal İnceleme.....	83
4.3.1 SEM mikrografikleri.....	83
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>85</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>87</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>93</b>

## KISALTMALAR

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>BNS</b>	: Bakteriyel Nanoselüloz
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	: Kalsiyum karbonat
<b>CE</b>	: Cam elyaf
<b>CNT</b>	: Karbon nanotüp
<b>CTP</b>	: Cam Takviyeli Plastik
<b>DGEBA</b>	: Diglisidil eter bisfenol-A
<b>DMA</b>	: Dinamik mekanik analiz
<b>DSC</b>	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
<b>DWCNT</b>	: Çift duvarlı karbon nanotüp
<b>E</b>	: Epoksi matris
<b>FRP</b>	: Elyaf takviyeli polimer
<b>ILSS</b>	: Tabakalar arası kayma dayanımı
<b>IPS</b>	: Düzlem içi kayma
<b>ISO</b>	: International Organization for Standardization
<b>KE</b>	: Karbon elyaf
<b>MFS</b>	: Mikrofibril selüloz
<b>NKS</b>	: Nanokristalin selüloz
<b>NS</b>	: Nanoselüloz
<b>NCF</b>	: Kıvrımsız kumaş
<b>PMK</b>	: Polimer Matrisli Kompozit
<b>POSS</b>	: Polihedral oligomerik silseskuokzan
<b>PLS</b>	: Polimer tabakalı silikat
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silika
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>Td</b>	: Bozunma sıcaklığı
<b>TDS</b>	: Teknik bilgi formu
<b>Tg</b>	: Camsı geçiş sıcaklığı
<b>TGA</b>	: Termogravimetrik analiz
<b>VARIM</b>	: Vakum destekli reçine infüzyon metodu
<b>ZnO</b>	: Çinko oksit



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Nanoselüloz türleri [43].....	32
<b>Çizelge 2.2</b> : Hammadde cinsine göre nanoselüloz boyutları [ 51]. .....	35
<b>Çizelge 2.3</b> : Farklı kimyasal etkileşimler ve kuvvetleri [19]. .....	44
<b>Çizelge 4.1</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme özelliklerine etkisi .....	76
<b>Çizelge 4.2</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme özelliklerine etkisi .....	77
<b>Çizelge 4.3</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanımı (paralel) etkisi .....	78
<b>Çizelge 4.4</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanımı (normal) etkisi .....	79
<b>Çizelge 4.5</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin izod darbe dayanımı (paralel) etkisi .....	80
<b>Çizelge 4.6</b> : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin normal izod darbe dayanımı (normal) etkisi .....	81
<b>Çizelge 4.7</b> : NKS nanodolgununun epoksi matrisli cam ve karbon elyafı kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi.....	82





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1.</b> Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması: 1) elyaf takviyeli kompozit, 2) parçacık takviyeli kompozit, 3) tabakalı kompozit[10] .....	6
<b>Şekil 2.2:</b> Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi [11].....	6
<b>Şekil 2.3:</b> Elyaf, matris ve kompozit malzeme temsili gerilim-gerinim grafiği [12] ..	7
<b>Şekil 2.4:</b> Çekme dayanımının elyaf yönelimine bağlı grafiği [14] .....	9
<b>Şekil 2.5:</b> Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf formları ve yönlendirmeleri .....	10
(a) sürekli ve yönlendirilmiş, (b) süreksiz ve yönlendirilmiş, (c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş [16].....	10
<b>Şekil 2.6</b> Cam hammaddesi kullanılarak cam elyaf prosesi[20].....	12
<b>Şekil 2.7:</b> PAN hammaddesi kullanılarak karbon elyaf üretim süreci [21].....	14
<b>Şekil 2.8:</b> Termoset polimerlerin çapraz bağ yapısının şematik gösterimi[24].....	16
<b>Şekil 2.9:</b> DGEBA esaslı epoksi reçinenin üretim reaksiyon mekanizması [15] .....	17
<b>Şekil 2.10:</b> Epoksi reçinelerde kullanılan amin esaslı sertleştiriciler [15].....	18
<b>Şekil 2.11:</b> Epoksi reçinenin amin esaslı sertleştirici ile sertleşme reaksiyonu [15].	19
<b>Şekil 2.12:</b> Elyaf takviyeli kompozit malzemenin mikro yapısı[29].....	21
<b>Şekil 2.13:</b> Tabakalı kompozit yapıda yönlendirilmiş tabakaların genel görünüşü[26] .....	23
<b>Şekil 2.14:</b> Dokuma ve tek yönlü kumaşlar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi a) Eşit özellikler b) Eşit olmayan özellikler [26] .....	24
<b>Şekil 2.15:</b> Çok eksenli kumaşın dizilim görünümü [30].....	25
<b>Şekil 2.16:</b> Dokuma ve kıvrımsız kumaşlarda dalgalanma durumu (a) Dokuma kumaş; dalgalanma var, reçine zengin bölgeler “r” (b) Kıvrımsız kumaş; dalgalanma yok [16].....	25
<b>Şekil 2.17:</b> Farklı boyutlara sahip nanodolgu çeşitleri [31].....	30
<b>Şekil 2.18:</b> Selüloz yapısı[40].....	31
<b>Şekil 2.19:</b> Amorf ve kristalin selüloz[41] .....	32
<b>Şekil 2.20:</b> NKS, MFS ve BNS ‘un morfolojik yapıları[46] .....	33
<b>Şekil 2.21:</b> MFS-NKS farkı[53] .....	34
<b>Şekil 2.22:</b> Nanodolguların polimerler içerisine etkin şekilde dağıtılmasında kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler [68].....	37
<b>Şekil 2.23:</b> Ultrasonikasyon cihazı [73].....	38
<b>Şekil 2.24:</b> Elyaf takviyeli nanokompozit dizaynı [76].....	39
<b>Şekil 2.25:</b> Kompozit malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması .....	40
<b>Şekil 2.26:</b> Vakum torbalama yönteminin çizimsel gösterimi [78] .....	42
<b>Şekil 2.27:</b> Vakum torbalama yönteminde kullanılan ana malzemeler [78] .....	43
<b>Şekil 3.1 :</b> Manyetik karıştırıcı cihazı.....	47
<b>Şekil 3.2 :</b> Ultrasonikasyon cihazı .....	48
<b>Şekil 3.3 :</b> Etüv fırın cihazı .....	48
<b>Şekil 3.4 :</b> Elektromekanik test cihazı .....	49
<b>Şekil 3.5 :</b> İzod darbe test cihazı.....	49

Şekil 3.6 : DSC test cihazı .....	50
Şekil 3.7 : Termogravimetrik analiz cihazı.....	50
Şekil 3.8 : SEM cihazı .....	51
Şekil 3.9 : NKS/epoksi nanokompozitlerin ve saf epoksinin oluşturulma aşamaları	51
Şekil 3.10 : NKS/epoksi karışımının hazırlama aşamaları .....	52
Şekil 3.11 : Çekme ve eğme testleri için oluşturulan silikon kalıplar .....	52
Şekil 3.12 : Kalıp ayırıcının kalıp yüzeyine uygulaması .....	53
Şekil 3.13 : Kalıp çevresine sızdırmazlık bandı uygulaması .....	53
Şekil 3.14 : Ayırıcı film ve soyma kumaşı serim işlemi.....	54
Şekil 3.15 : Cam ve Karbon elyafların ve reçinenin hazırlanması .....	54
Şekil 3.16 : Reçine ve sertleştiricisinin karıştırılması.....	55
Şekil 3.17 : Cam ve karbon elyaf katlarının reçine ile ıslatılması .....	56
Şekil 3.18 : Soyma kumaşı, ayırıcı film ve emici uygulaması .....	56
Şekil 3.19 : Sistemin vakum naylonu ile kapatılması.....	57
Şekil 3.20 : Sistemin vakum altına alınması.....	57
Şekil 3.21 : Üretilen cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozit test plakası.....	58
Şekil 3.22 : NKS/epoksi nanokompozitleri için mekanik test numuneleri.....	59
Şekil 3.23 : Cam ve karbon kompozit test numunelerinin hazırlanması .....	59
Şekil 3.24 : NKS/epoksi nanokompozit numunesi çekme testi .....	60
Şekil 3.25 : Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozit numunesi düzlem içi kayma testi .....	60
Şekil 3.26 : Cam ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozit numuneleri üç nokta eğme testi .....	61
Şekil 3.27 : Çentiksiz izod darbe testinde kompozitlere normal ve paralel test uygulaması.....	61
Şekil 4.1 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin çekme modülüne etkisi .....	65
Şekil 4.2 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımına etki .....	66
Şekil 4.3 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin kopma uzaması (%) etkisi .....	67
Şekil 4.4 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin eğilme modülüne etkisi .....	67
Şekil 4.5 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımına etkisi .....	68
Şekil 4.6 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin izod darbe dayanımına etkisi .....	69
Şekil 4.7 : NKS/epoksi nanokompozitlerin DSC eğrileri .....	70
Şekil 4.8 : NKS/epoksi nanokompozitlerin TGA ve DTG eğrileri ve kalan kül miktarları .....	70
Şekil 4.9 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri .....	71
Şekil 4.10 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri .....	72
Şekil 4.11 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma uzaması (%) değeri karşılaştırmalı grafikleri .....	72
Şekil 4.12 : NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri .....	73

<b>Şekil 4.13</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri .....	73
<b>Şekil 4.14</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma uzaması (%) değeri karşılaştırmalı grafikleri .....	74
<b>Şekil 4.15</b> : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri .....	75
<b>Şekil 4.16</b> : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri .....	75
<b>Şekil 4.17</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri .....	76
<b>Şekil 4.18</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri .....	77
<b>Şekil 4.19</b> : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanım (paralel) testi karşılaştırmalı grafikleri .....	78
<b>Şekil 4.20</b> : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanım (normal) testi karşılaştırmalı grafikleri .....	79
<b>Şekil 4.21</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin izod darbe dayanım (paralel) testi karşılaştırmalı grafikleri .....	80
<b>Şekil 4.22</b> : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin normal izod darbe dayanım testi karşılaştırmalı grafikleri .....	81
<b>Şekil 4.23</b> : NKS/epoksi matrisli cam ve karbon elyaf kompozitlerin SEM görüntüleri .....	83



## SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN NANOSELÜLOZ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

### ÖZET

Yüksek performanslı kompozitler; denizcilik, otomotiv, uzay-havacılık ve savunma sanayilerinde sıklıkla kullanılan bir malzeme grubudur. Gelişen teknolojiyle birlikte bu malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi beklenmektedir. Son yıllarda yeni malzemelerin geliştirilmesinde nanokompozitler önemli katkılar sağlamaktadır. Nanokompozitler polimer sistemleri içerisine en az bir boyutu 100 nanometreden küçük olan parçacıkların dağılması ile oluşan heterofazlı kompozit yapılarıdır. Kullanılan nano boyutlu parçacıkların yüzey alanının çok geniş olmasından dolayı ilave edildiği polimerlerin mekanik ve ısıl dayanımlarını geliştirmektedir. Polimer nanokompozit üretimi amaçlı kullanılan malzemelerden biride iki boyutuda nanometrik ölçüde olan yenilenebilir kaynaklardan kolaylıkla elde edilebilen nanokristalin selüloz yani nanoselüloz (NKS,NS) malzemesidir. Uygun yöntemler kullanılarak polimer içerisine NKS molekülleri dağıtılarak nanokompozitler elde edilmektedir. Bu nano modifiye polimer sistemleri sürekli elyaf ile takviyelendirilerek, mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmiş yüksek performanslı kompozitler oluşturulabilmektedir.

Tez çalışmamızda, matris sistemi olarak NKS katkılı epoksi nanokompozit, takviye sistemi olarak iki eksenli (0°-90°) kıvrımsız karbon ve cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. NKS nanoparçacıklarının, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompoziti ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Burada amaç matris sistemi olan epoksi reçinenin dayanımını artırılmasıyla kompozit yapının mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Öncelikle %1, 2, 4 ve 6 oranlarında NKS/epoksi nanokompozitleri hazırlanıp, bunların mekanik ve ısıl analizleri sonucu optimum NKS besleme oranı belirlenmiştir. Akabinde karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit plakalar vakum torbalama yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu; düzlem içi kayma, üç nokta eğme ve izod darbe dayanım testleri ile ölçülmüştür. Sonuçlar; NKS nanodolgunuz numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmış ve NKS varlığının kompozit özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Ek olarak mekanik testler sonucu hasar gören kırılma yüzeylerinin SEM analizleri yapıp elyaf-matris arayüzey özellikleri incelenmiştir.

Epoksi matris için %4 oranında NKS içeriğinin optimum besleme oranı olduğu bulunmuştur. Buna göre üretilen %4 NKS/epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapının mekanik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm mekanik testlerde NKS nanodolgunuz içeriğine sahip kompozitlerin dayanım, modül ve uzama değerlerinde %4,40 ile %27,18 arası değişen oranlarda iyileşmeler tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** cam elyaf, epoksi reçine, hibrit kompozit, karbon elyaf, nanoselüloz



## IMPROVEMENT OF CONTINUOUS FIBER REINFORCED EPOXY BASED COMPOSITES WITH NANOCELLULOSE

### SUMMARY

High-performance composites can be commonly used in marine, automotive, aerospace and defence industries. With developing technology, the properties of these materials should be improved. Nowadays, the nanocomposites, which are one kind of composite materials containing nanometer-sized inorganic nanoparticles, can be utilized to improve physical properties of polymers. The nanosized reinforcing materials, typically in the range of 1–100 nm, are uniformly dispersed in and fixed to a polymer matrix. Depending on the nanoscale dimension, nanosized reinforcing materials are categorized as one-dimensional (graphites and clays), two-dimensional (nanofibers, nanocellulose, nanotubes, or whiskers) and three-dimensional (spherical silica, metal particles, polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS), and semiconductor nanoclusters). Among them, the nanocellulose, also called nanocrystalline cellulose (NCC), is a material composed of nanosized cellulose fibrils with a high aspect ratio (length to width ratio). It has been used in various high-performance products such as, composites and packaging, rheology modifiers, pharmaceuticals and cosmetics, information and communications industry. The inclusion of nanosized reinforcing materials into a polymer matrix not only dramatically improves the mechanical properties (e.g., strength, modulus and rigidity) but also reduces its flammability, heat evolution and viscosity during processing. Moreover, it brings advanced new functions in the final materials that finds applications in many industrial fields.

In this work, mechanical properties of carbon and glass fiber-reinforced epoxy composites with two-dimensional ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) woven were improved by addition of nanocrystalline cellulose as reinforcing material. The mechanical properties of obtained nanocomposites were investigated in accordance with the standard tests (ISO 527-2 and ISO 178). Thermal properties of the nanocomposites were also investigated by DSC and TGA analyses. Firstly, the optimum NCC loading starting from 1% to 6% in the epoxy matrix was determined by thermal and mechanical analyses. The optimum loading was found as 4% according to thermal and mechanical tests. Then, the glass (70% w/w) and carbon (65% w/w) fibers were included in the NCC/epoxy systems. The mechanical properties of glass/NCC/epoxy and carbon/NCC/epoxy composites were investigated and the improvement between 4.4 and 27.18% were found. Thus, the small addition of NCC (4%, w/w) not only improve the mechanical properties of glass/epoxy composite but also carbon/epoxy composite. The morphology of hybrid composites was also investigated by scanning electron microscopy. Both non-hybrid (glass/epoxy or carbon/epoxy) and hybrid (glass/NCC/epoxy or carbon/NCC/epoxy) composites displayed similar microstructures in the SEM micrographs.

**Key words:** glass fiber, epoxy resin, hybrid composite, carbon fiber, nanocellulose





## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, II. Dünya savaşı esnasında mevcut alışlagelmiş malzemeler tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri de malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmektedir [1].

Polimer kompozit uzun senelerdir kullanılan bir teknoloji iken bu işlemin nanometre boyutunda yapılarak nanoparçacık takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi son yıllarda malzeme biliminde yeni ve ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Bu yönde geliştirilen polimer nanokompozitler bileşenlerin en az birinin boyutunun 100 nm' den daha küçük olduğu nano ölçekli kompozit malzemelerdir. Polimer nanokompozit üretimi amaçlı kullanılan malzemelerden biride iki boyutuda nano seviyede olan tamamen doğal yapısıyla nanokristalin selüloz yani nanoselüloz (NKS ya da NS) malzemesidir. Matris içinde moleküler seviyede dağılan, takviye edici özellikler sağlayan, özellikle mekanik mukavemet üzerinde ciddi bir etkiye sahip olan NKS parçacıkları nano ölçekli şekil ve boyutları sayesinde polimere mekanik ve ısı özellikler sağlamaktadır [2].

Birçok seramik ve metalik malzemelerle karşılaştırıldığında, yüksek dayanım/ağırlık ve modül/ağırlık oranında olan elyaf takviyeli kompozitler mühendislik malzemeleri sınıfında bulunmaktadır. Son yıllar içerisinde yapılan çalışmalarda; nano ve mikro boyutta parçacık katılmış polimer matrisin elyaf ile takviyesinin özellik ve performans açısından gelişen potansiyeli farkedilmiştir. Bu duruma bakıldığında; nanoparçacıklar, elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek en uygun dolgu malzemeleri olarak görülmektedir. Nanoparçacık eklenmesiyle, malzemedeki tabakalar arası mukavemet, sertlik, eğilme mukavemeti ve termal dayanıklılık gibi matrise bağlı olan özellikleri önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [3].

## 1.1 Tezin Amacı

Nanokompozit içerikli elyaf takviyeli kompozit ürünler son yıllarda çalışılan yeni bir malzeme çeşididir. Literatürde; çeşitli kompozit malzeme üretim metodleri ile üretilen grafen, karbon nanotüp ve nanokil bulunduran elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve ısı özelliklerinin belirlenmesi konusunda çeşitli araştırmalar mevcuttur. Fakat DGEBA esaslı epoksi reçine, çift yönlü kıvrımsız karbon ve cam elyaf kumaş kullanılarak elde edilen kompozitlere nanokristalin selüloz (NKS) ilavesiyle özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, NKS nanodolgununun karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerine eklenerek mekanik ve ısı özelliklere olan etkisini incelemektir.

Tezin ikinci bölümünde elyaf takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler, nanoparçacık takviyeli kompozitler, elyaf takviyeli nanokompozitler ve elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri gibi teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise NKS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması, karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi ve cam elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozitlerin üretimi ile bunların mekanik ve ısı karakterizasyonlarına ait malzemeler ve yöntemler ortaya konulmuştur. Karakterizasyon sonuçları ve mekanik testler sonucu hasar gören kırılma yüzeylerinin mikro yapı incelenmeleri dördüncü bölümde yer almaktadır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar nedenleri ortaya koyularak tartışılmıştır. Tezin beşinci ve son bölümünde ise genel sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

## 1.2 Literatür Araştırması

Mühendislik malzemesi olarak; performansı, işleme kolaylığı, üstün termal ve mekanik özelliklerinden nedeniyle epoksi reçineler özellikle elyaf takviyeli kompozitlerde en çok kullanılan matris malzemeleri arasındadır. Yapılan birçok çalışmada epoksi reçine içerisine nanodolgu eklenmesinin elyaf takviyeli kompozit özelliklerini iyileştirildiği bildirilmiştir.

Chowdhury ve ekibi [4]; dokuma karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretmek için vakum destekli reçine infüzyon yöntemini kullanmıştır. Nanokil parçacıklarının termal ve eğilme özelliklere olan etkileri araştırılmıştır. Değişik ağırlık yüzdelerinde yüzey modifiyeli montmorillonite mineralleri SC-15 epoksi

içerisine ultrasonikasyon vahıstasıyla dağıtılmıştır. Sonra ise nanofazlı epoksi ile dokuma karbon elyaf kullanılarak vakum destekli reçine infüzyon yöntemini ile karbon/epoksi nanokompozitler üretilmiştir. Ayrıca kürlenme yapılan numuneler eğilme testine yapılmış, eğilme dayanımı ve modülünde sırasıyla %14 ve %9'luk artış elde edilmiştir. Camı geçiş sıcaklığında ise yaklaşık 13 °C'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.. Karbon/SC-15 epoksi kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri açısından ağırlıkça %2'lik nanokil takviyesinin optimum besleme olduğu görülmüştür. Mikro-yapısal çalışmalar; nanokilin elyaf ve matris arası yapışmayı iyileştirdiğini gösterilmiş ve böylelikle mekanik özellikler iyileşmiştir.

Haque ve ekip arkadaşları [5]; vakum destekli reçine infüzyon yöntemini kullanarak S-Glass cam elyaf takviyeli ve çok düşük oranda tabakalı silikat içeren laminatların mekanik özelliklerinde yüksek oranda iyileşme olduğunu saptamıştır. %1 oranında nanosilikat ile, S-Glass/epoksi-kil nanokompozitlerin tabakalar kırılma tokluğunda, içi kayma geriliminde ve eğilme dayanımında sırasıyla %23, %44 ve %24 iyileştirmelerin olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde elde edilen nanokompozitin benzerlerine göre 26 °C daha yüksek bozunma sıcaklığına sahip tespit edilmiştir.

Kim ve arkadaşları [6]; Karbon nanotüp ilave edilmiş karbon elyaf/epoksi laminatların özelliklerini araştırılmıştır. Epoksi sistem içerisine ağırlıkça %0,3'lük Karbon nanotüp katkısının eğilme modülünde ve dayanımında sırasıyla %12'lik ve %18'lik artış sağladığı belirlenmiştir. Artış nedeni ise yapı içerisindeki CNT kütlelerinin elyaf ve matris çevresinde güçlü bağlar oluşturması sebebine dayandırılmıştır.

Kornmann ve arkadaşları [7]; diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) esaslı ve anhidrit küreleşme ajanlı epoksi sistemi kullanarak epoksi-tabakalı silikat nanokompozitini başarılı bir şekilde sentezlemiştir. Nanokompozit matris ile cam elyaf takviyeli laminatlar üretmek için; vakum torbalama, sıcak pres ve el yatırması yöntemleri kullanmıştır. Laminatların eğilme testleri sonuçlarına göre; nanotabakaların varlığı eğilme modülünü %6, eğilme dayanımını %27 oranında artış sağlamıştır.



## 2. TEORİK BİLGİ

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Genellikle matris olarak ifade edilen ana faz ile takviye edici olarak kullanılan ikincil fazdan oluşurlar.

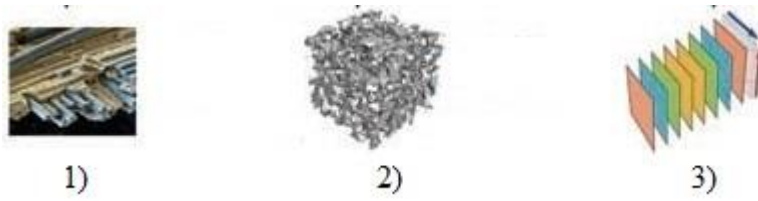
Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, kırılmış veya parçacıklı yapılar kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu, genel yükü ve taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf-matrisi bir arada tutmak yanında çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerin dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır[1].

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, genelde matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırma yapılabilmektedir [8]. Matris malzemesine göre sınıflandırma;

- Polimer matrisli kompozitler,
- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler olarak yapılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler (PMK), matris olarak polimer reçinenin takviye olarak elyafların kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin oda sıcaklığındaki üstün özellikleri yanında kolay üretimi ve düşük maliyeti nedeniyle, kompozitler arasında en çok uygulama çeşitliliğine miktarına sahip olmaktadır. Polimerik kompozitler yüksek mukavemet, sertlik, aşınmaya karşı direnç, boyutsal ve termal kararlılık gibi özellikleriyle pek çok avantaj sunar. Ayrıca sertlik ve mukavemet açısından metallerle yarışabilecek durumda olmasının yanında çok da hafiftir. [9]

Takviye elemanlarına göre sınıflandırma ise Şekil 2.1’de gösterildiği gibidir;



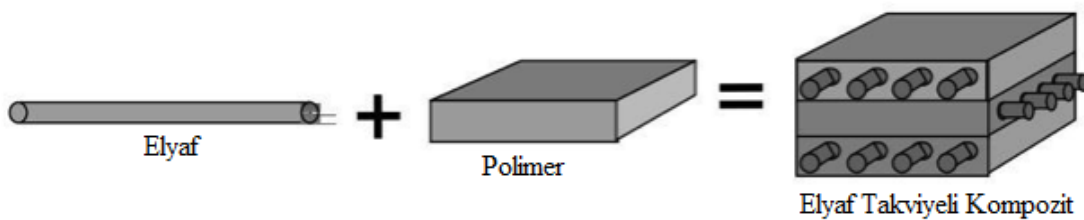
**Şekil 2.1.** Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması: 1) elyaf takviyeli kompozit, 2) parçacık takviyeli kompozit, 3) tabakalı kompozit[10]

Bu sınıflandırma içerisinde elyaf takviyeli kompozitler ve elyafların belirli formlarda hazırlanmasıyla oluşan tabakalı kompozitler en sık kullanılanlardır. Son yıllarda parçacık takviyeli kompozitlerin geliştirilmesinde ise; parçacık takviyesi olarak en az bir boyutu nanometre ( $10^{-9}$  m) seviyesinde olan malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu özellikteki malzemeler nanokompozit olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmamızda parçacık takviyeli kompozitler bölümünde nanokompozitler anlatılacaktır.

## 2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

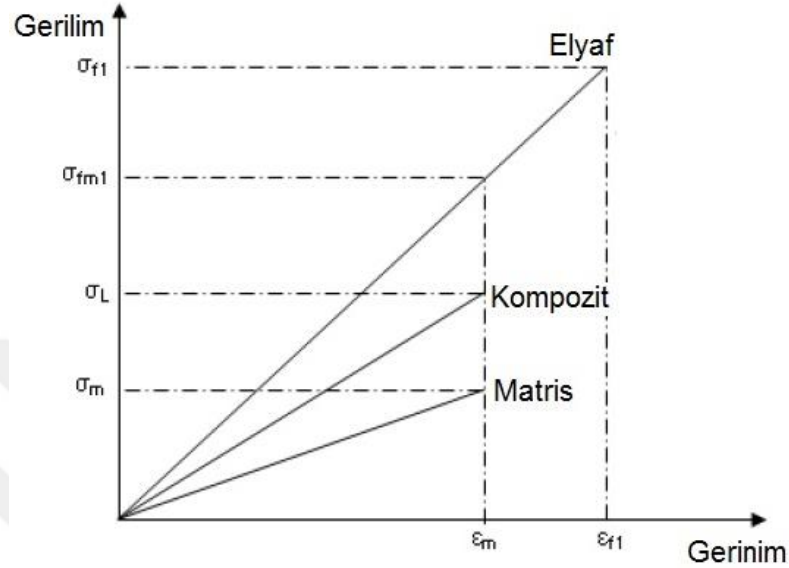
Elyaf takviyeli kompozitler; yumuşak ve sünek matris içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilmektedir. Bu çeşit takviyeli kompozitler havacılık, denizcilik, otomotiv, savunma sanayi ve spor ekipmanlarının üretimi bunlara örnektir. Dayanımları, üretim esneklikleri ve hafiflikleri gibi özellikleri endüstriyel alanlarda kullanımlarını arttırmaktadır.

Farklı türde birçok elyaf kompozitlerde takviye amacıyla kullanılır. Polimerlerin elyaflarla takviyelendirilmesi sonucu üstün özelliklere sahip kompozit malzeme meydana gelir. Şekil 1.2’de elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin şematik gösterimi yer almaktadır.



**Şekil 2.2:** Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi [11].

Elyaf takviyeli kompozitlerde malzeme üzerine gelen yükleri karşılayan bileşen elyaftır, polimer matris ise elyafları belirli yapıda bir arada tutan ortamı meydana getirmektedir[1]. Bu sebeple kullanılan elyafın mekanik dayanımı matristen önemli ölçüde yüksek olmalıdır [12 ].



**Şekil 2.3:** Elyaf, matris ve kompozit malzeme temsili gerilim-gerinim grafiği [12]

Bu malzemeler hazırlanırken elyaflara ait birtakım özelliklere dikkat edilmelidir. Bunlar;

- Elyafın mekanik özellikleri,
- Elyaf uzunluğu,
- Elyaf miktarı,
- Elyaf kalınlığı,
- Elyafın yönlenme biçimidir [12].

Bu ana noktalar seçilen üretim tekniğiyle birlikte kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemektedir.

**Elyaf Uzunluğunun Etkisi;** Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri sadece elyafın özelliklerine değil, aynı zamanda matris fazının, uygulanan yükün ne kadarını elyafa iletebildiğine de bağlıdır. Bu yük aktarımı, matris ve elyaf fazları arasındaki ara yüzey bağ kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilidir. Kompozit malzeme dayanım ve rijitliğinin belirgin bir şekilde artması için, elyaf boyunun kritik bir

değerden uzun olması gereklidir. Bu kritik elyaf boyu, elyaf çapı, çekme dayanımı ve elyaf-matris ara yüzey bağı dayanımına dayanımı, hangisi küçükse ona bağlıdır.

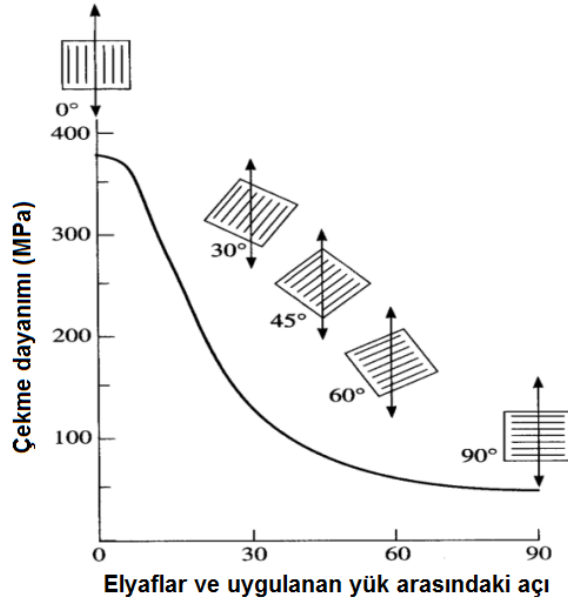
Birçok cam ve karbon elyaf-matris kombinasyonları için, bu kritik uzunluk elyaf çapının 20 ile 150 katı civarında olup, 1 mm mertebelerindedir. Elyaf boyu arttıkça, elyafın takviye etkisi daha da artar. Uygulanan gerilmenin elyafın dayanımına eşit olduğu anda için gerilme-eksenel konum değişimi gösterilmiştir.

Kısa süreksiz elyaf için, elyaf etrafındaki matris deforme olarak neredeyse hiç gerilme iletmez ve elyafın dayanıma katkısı çok az olur. Kompozitin dayanımında fark edilir bir artışın sağlanabilmesi için elyafın sürekli olması şarttır[13].

**Elyaf Yönlenmesi Etkisi;** Elyaf yönlenmesi ve yerleşimi, yoğunluğu ve dağılımı gibi tüm değişkenler elyaf takviyeli kompozitlerin dayanım ve diğer özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Yönlenme konusunda elyafın paralel olarak sadece çekme yönünde yönlenmesi, tamamen rastgele yönlenmesi olarak iki sınır durum söz konusu olabilir. Sürekli elyaf, uygulanan gerilmeyle aynı yönde (doğrultuda) , süreksiz elyaf aynı yönlü, rastgele veya kısmi yönlenmeye sahip olabilir[13].

Elyaf dağılımının düzgün olması durumunda, kompozitten çok daha iyi özellikler elde edilebilir. Elyafın matris içerisindeki yerleşimi kompozit yapının dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Elyafın matris içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, elde edilecek kompozitin çekme/basma gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır, bu özelliğe anizotropi adı verilir. Örneğin; kompozitin kopma dayanımı, elyafın yönlendirildiği eksene yapılan yüklemelerde en büyük iken elyaf eksenine 90° olan yüklemelerde en düşüktür. Şekil 2.4'te bu etki gösterilmiştir.





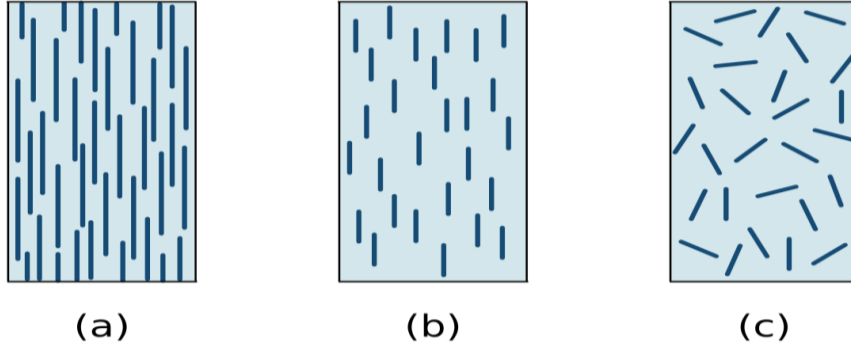
**Şekil 2.4:** Çekme dayanımının elyaf yönelimine bağlı grafiği [14]

Benzer şekilde darbe dayanımı, ısıl iletkenlik, ısıl genişleme gibi davranışlar da elyafların yönlenme eksenine açısal olarak bağlıdır. Elyafarla takviyeli kompozitlerde, elyaf yönlenmesi ayarlanarak sözü edilen özelliklerin yöne bağlı kontrolü sağlanır [15].

**Elyaf Kalınlığının Etkisi;** kompozit özelliklerini etkileyen bir diğer önemli değerdir. İnce elyaflarla üretilen kompozitlerde matrisin elyaf ile temas ettiği yüzeyi daha büyüktür. Temas alanının artması, elyaf-polimer etkileşimlerini artırarak kompozit içerisinde yük aktarımını kolaylaştırır. Bu yüzden aynı kütlede ince ve kalın elyaflarla takviye edilen kompozitlerde, ince elyaflarla takviye edileni daha mukavemetli olmaktadır[15].

**Elyaf Miktarı Etkisi;** Genel olarak kompozit malzemenin mekanik mukavemeti içerisindeki elyaf miktarı arttıkça yükselir ancak elyaf oranı belli bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bunun nedeni, elyaf artışına bağlı olarak kompozit yapı içerisindeki polimer miktarının azalması ve matrisin işlevini kaybederek elyafları bir arada tutamamasıdır[15].

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri yönünden çok önemlidir. Elyaf takviyelerde kendi içlerinde fiziksel biçimlerine göre; sürekli elyaflar, yönlendirilmiş kısa elyaflar ve kırılmış kısa elyaflar olarak ayrılmaktadır [16].



**Şekil 2.5:** Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf formları ve yönlenmeleri  
(a) sürekli ve yönlenmiş, (b) süreksiz ve yönlenmiş, (c) süreksiz ve rastgele yönlenmiş [16]

Elyafın tipi; uygulama yerine ve kompozit malzeme üretim metoduna göre belirlenir. Genellikle yapısal uygulamalar için sürekli elyaflar önerilirken yapısal olmayan uygulamalar için süreksiz ve rastgele yönlenmiş elyaflar tavsiye edilir. Fakat yönlendirilme özelliklerinden sebebiyle sürekli elyaf takviyeli kompozitler, başka takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Bu tip kompozitlerde elyaflar; fitil, iplik, demet veya tel şekillerinde kullanılır [17].

Kompozitin kullanıldığı alan ve üzerine gelen yüklemeler dikkate bir şekilde ele alındığında; çekme, basma ve eğilme gerilmeleri için istenilen dayanıma sürekli elyaflar sayesinde ulaşılabilir. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgeler, elyaf doğrultusunda ( $0^\circ$ ) en yüksek performans gösterirler. Lakin elyaf eksenine dik ( $90^\circ$ ) doğrultuda düşük özellikler elde edilir çünkü bu bölgelerde matris dayanımı temel olmaktadır. Kompozitlerde takviyelendirme nedeni sadece tekil elyafların/filamentlerin kullanıldığı üretim yöntemleri kısıtlıdır. Çok fazla uygulamada elyafların kullanımının kolaylaştırılması için elyafların düzenlenmiş olması gerekmektedir. Bu düzenleme elyaf filamentlerinin kumaş formunda üretilmesiyle mümkün olmaktadır. Teknik tekstiller sınıfında yer alan kumaş formunda takviyelerde değişik açılarda üretim yapılarak beklenen doğrultularda yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olacaktır [18].

### **2.1.1 Elyaf özellikleri**

Kompozit malzemede takviye elemanının en önemli görevi; matrisin maruz kalacağı gerilmeleri taşıyarak kompozit malzemenin mukavemetini arttırmaktır. Takviye elemanları mutlaka matrisle güçlü bir bağ sistemi oluşturmalıdır [9].

Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde en sıklıkla kullanılan takviye elyaflar; karbon, cam ve aramit elyaflarıdır. Tipik elyaf çapları 5 µm ile 20 µm arasında değişmektedir [18]. Bu tez çalışmasında elyaf takviyesi olarak karbon elyaf ve cam elyaf kullanılmıştır.

#### **2.1.1.1 Cam elyaf**

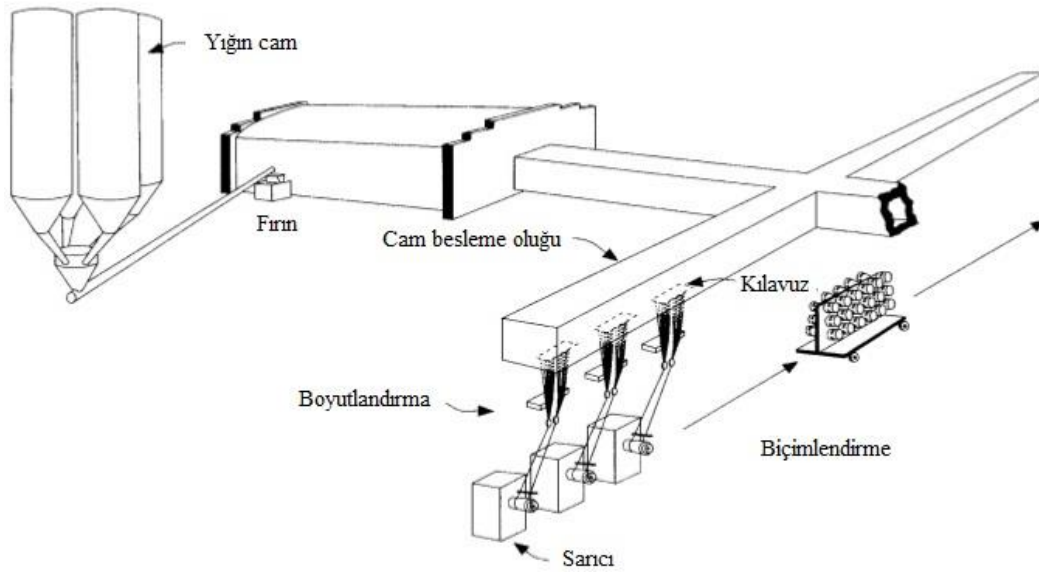
Cam elyafın esasını; silik-kum meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinde oluşur. Polimer esaslı kompozitlerden yaygın olarak kullanılan ve ucuz olan takviye elemanıdır. Sili atomları üç boyutlu rastgele bağlanmış polihedra ağını oluşturmak için oksijen atomlarına kovalent bağla bağlanır. Değişik valansın kanyonları oksijen atomlarına bazıları ile iyoniksel olarak bağlanır. Bu nedenle, dengeyi daha küçük birimlere ayırır.

Plastik esaslı kompozitlerde kullanılan genel tipi E-Cam alkali olmayan boron silikat olup iyi elektrik yalıtımı özellikleri için geliştirilirken S-cam daha pahalı fakat daha yüksek modüle sahip magnezyum ve alüminyum silikat ihtiva eder. En çok kullanılan cam (E-cam) elyafların çapı 3-20 µm arasındadır.

C-camı ise oldukça iyi korozyon direncine sahip ancak mekanik özellikleri düşüktür. Camların dayanımı, özellikle, yüzey üzerinde kusurlar ve mikro-çatlaklarla birlikte kaçınılmaz dahili hatalara bağlıdır. Yüksek kalite elyafları üretmek için yüksek saflıktaki malzemelerin homojen şekilde ergimiş olması, yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve hemen koruyucu kaplama uygulanmış olması gerekmektedir[1].

Cam elyafların yüzey karakteristikleri, çok az bir çatlama bile gerilme özelliklerini etkilediğinden, çok önemlidir. Başka bir sert malzeme sürtünmesiyle yüzey kolaylıkla çatlayabilir. Keza, cam yüzeyler kısa bir süre bile normal atmosferle karşılaştığında yüzey tabaka genellikle zayıflar ve bu durum matrisle olan bağlantıyı etkiler. Bu nedenle cam elyaflar çekilirken, yüzeylerinin tahrip olmasını önleyecek ve çevresel etkilerden koruyacak ince bir malzeme tabakasıyla kaplanır[19].

Cam elyaflar; camların elektirik fırınında yaklaşık 1200-1500C° de ergitilmesi ve eriyen camların bir platin alaşımli olan potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı şekilde aşağı doğru demetler halinde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilerek üretilir. Daha sonra kaplama uygulanması ve demetler halinde makaralara sarılarak yaklaşık 3 kg'lık halinde depolara gönderilir. Kaplama formülasyonu karışık fakat bu elyafları hasardan korur. Kaplama maddesi, genellikle Silane ihtiva eder. Bu molekülün bir kısmı Si-O bağları aracılığıyla cam reaksiyona girerken, silane üzerindeki organik guruplar reçine ile uyumluluk sağlarlar. Bu elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmamasına rağmen olduğu ucuzdur.



**Şekil 2.6** Cam hammaddesi kullanılarak cam elyaf prosesi[20].

Kompozit malzemelerde ilk uygulamalara cam takviyeli plastik esaslı kompozitler (CTP) kullanılarak radar kubbeleri yapılarak başlanılmıştır. Bu kompozitlerin; hafiflik, elektro manyetik geçirgenlik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle en uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Yine gemi yapım tekniği, 1942 yılında CTP ile gerçekleşmiştir.

Kompozit malzemeler kullanarak uçak pervanelerinin gelişmesi hızlandırılmıştır. Çapın artması ile ağırlığında artması sonucu bir saç kapak çapı 1-6 m arasında değişmektedir. Yaklaşık 4.5 m çapa sahip 4 kenarlı bir uçak pervanesi metal malzeme ile yapıldığında yaklaşık 450 kg olurken kompozit malzemede ise 180 kg civarında olup bunun sonucu olarak da tekerlek göbeğinde ve kontrol dişlisinde merkezkaç kuvvet azalmaktadır. Bu pervanelerde, ana kiriş olarak davranması için tek yönlü örgü ve şerit elyaflar pervane eksenine doğrultusunda ve burulmaya karşı

dirençli olması için de örgün cam 45 doğrultuda yönlendirilerek pervane iç kısmında ise poliüretan köpük kullanılmıştır. Bu tip pervane yapısı düz şekilden bombeli şekle kademeli değişme için karbon kullanımı ana kirişlerde sürdürülmüşken pervane alt yüzeyinde ise halka şekil içine cam elyaflar yerleştirilmiştir. Böylece bütün montaj reçine ile doldurulmuş ve ısıtma işlemi uygulanarak iç ve dış metal kollar ile güvenli yapışan halka kenarlı bir kütleyle birleştirilmesi sağlanmıştır.

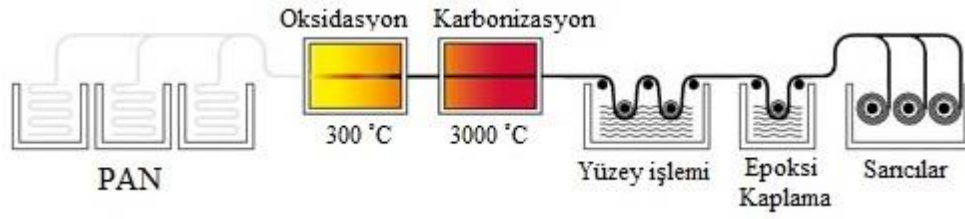
Cam elyaflı kompozitlere göre hayli ağırlık tasarrufu sağlanabilmektedir. Sahil botları, küçük ve büyük yatlar, hızlı deniz motorları veya tekneler, cam/karbon ve aramid birleşimi karma malzemelerden yapılmaktadır.

Volkswagen şirketi tarafından 1980 yılında ince cidarlı tüpler, cam/epoksi süngerli sandviç kompozitten yapılmıştır. [1]

### **2.1.1.2 Karbon elyaf**

Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ancak kullanımı her geçen gün artan bir elyaf grubudur. Karbon elyafı cam elyafına göre daha güçlü ve hafiftir ancak üretim maliyeti yüksektir. Bu elyaflar, takviye elemanı olarak kullanılan yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastik modülüne sahip olan karbon elyaflar turbostratik grafitin küçük kristallerinden oluşan karbonun allotropik formundan biridir[2]. Bu özelliklerinde dolayı karbon elyaf takviyeli kompozitler günümüzde yaygın olarak spor ve hobi (olta, golf sopası gibi) amaçlı ekipmanlarda, elyaf sarma yöntemiyle roket gövdelerinde, basınçlı kaplarda, askeri ve ticari amaçlı sabit kanatlı ve helikopter gibi hava taşıtlarında (kanat, gövde, stabilizatör ve kuyruk dümeni gibi) yapısal eleman olarak kullanılır[13].

Karbon elyaf organik maddelerden üretildikleri için “organik fiber” olarak da adlandırılırlar. Karbon elyaflarda ham madde olarak poliakonitril (PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) olarak kullanılır. Dolayısı ile üretildikleri maddelere göre isim alırlar[1]. Günümüzde kullanılan karbon elyaflarının sadece %10’u zift esaslıdır. Rayon ise sadece düşük modül elyaflar için kullanılır. Hammade, üretim maliyeti, termal ve mekanik özellikler dikkate alındığında PAN içerikli karbon elyaf en uygun malzemedir[3].



**Şekil 2.7:** PAN hammaddesi kullanılarak karbon elyaf üretim süreci [21]

PAN esaslı karbon elyaflar % 93-95 arasında karbon içeren karbon elyafları kompozit malzemeleri daha mukavemetli ve daha hafif yapabilmek için sürekli geliştirilmektedir. Endüstriyel olarak PAN polimerinden karbon elyaf üretim metotları birbirini ardın sıra takip eden dört aşamada gerçekleşmektedir;

1. *Oksidasyon:* Bu süreçte elyaflar hava ortamında 300°C’de ısıtılır. Bu muamele, elyaftan hidrojenin ayrılmasını ve daha uçucu olan oksijenin eklenmesini sağlar. Bundan sonra karbonizasyon işlemi için elyaflar kesilerek grafit teknelerine aktarılır. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Yapılan işleme sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye döner ve ardından siyah olur.

2. *Karbonizasyon:* Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000°C’ye kadar ısıtılmasıyla %100 karbonlaşması aşamasıdır. Karbonizasyon sürecinde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.

3. *Yüzey iyileştirmesi:* Karbon yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın matris malzemesine çok iyi şekilde bağlanabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılması işlemidir.

4. *Kaplama:* Elyafları kompozit üretiminde kullanılabilmek için korumak için yapılan bir sonlandırma işlemidir. Bu kısımda; teknik olarak apreleme (sizing) adı verilen işlemle elyaf yüzeyi reçine ile kaplanır. Kaplama, elyafın daha kolay taşınabilmesini sağlarken matris ile takviye arası arayüzey özelliklerindeki pozitif etkilemektedir. Karbon elyafında bu kaplama işlemi için genel de epoksi kullanılır [22].

Karbon elyafları piyasada sürekli ve kırılmış elyaf şeklinde bulunabilir. Elyaf çapları 6 ile 10 µm aralığında olan, 1000-24000 iplikçikten oluşan demetler; fitil ve dokumalarda, tek yönlü bantlarda ve önceden reçine emdirilmiş elyaflarda (prepreg) kullanılmaktadır. Demetlerden oluşan kumaş formundaki elyaflar kompleks şekilli parçaların kalıplanarak üretilmesine daha uygundur. Karbon elyaflar pahalıdır, bundan dolayı fiyatın arka planda olduğu uzay araçları, füzeler, roketler ve uçaklar

gibi yüksek teknolojili alanlarda kullanılırlar. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin otomobil sektörü için kullanılmasına en büyük engel fiyatları halen metallere rekabet edecek seviyede olmayışıdır. Karbon elyaflar farklı tür polimer matrislerle, en sık epoksi reçinelerle kullanılırlar. Karbon elyafı epoksi reçineler ile birleştirildiğinde yüksek dayanım ve sertlik özellikleri gösterir [23]

### **2.1.1.3 Aramid elyaf**

Aramid elyaf, 1970'lerin başında kullanılmaya başlanan yüksek dayanım ve yüksek elastiklik modülüne sahip malzemelerdir. Özellikle sıra dışı dayanım-yoğunluk oranı nedeniyle aranan bir malzemedir. Kimyasal olarak bu malzeme grubu poli(parafenilen tereftalamid) olarak bilinir. Birçok aramid malzeme vardır. en yaygın olan ikisinin ticari ismi Kevlar ve Nomeks 'tir. Kevların farklı mekanik özelliklere sahip Kevlar 29, 49, ve 149 gibi türleri de bulunmaktadır. Sentezleme sırasında, rijit moleküller sıvı kristal bölgelerinde olduğu gibi, elyaf yönünde yönlenir. Mekanik olarak bu elyaf, çekme yönünde diğer polimer elyafa göre daha yüksek çekme dayanımı ve modülüne sahip olup, basma zorlanması altında dayanımı daha düşüktür. Ayrıca bu malzeme kendine has tokluk, darbe dayanımı, sürünme ve yorulma direncine sahiptir. Kimyasal olarak güçlü asit ve bazlara karşı duyarlıdır, ancak diğer kimyasal ve çözücülere karşı oldukça kararlıdır.

Aramid elyaf, en çok epoksi ve polyester gibi polimer matris malzemeleri ile birlikte kullanılır. Elyaf oldukça esnek ve diğerlerine göre sünek olduğundan, çoğu tekstil işlemlerine tabi tutulabilir. Aramid elyafın kullanıldığı tipik kompozit uygulamaları; blastik ürünler, , halatlar, güdümlü mermi gövdeleri ve basınçlı kaplardır. Ayrıca otomobil fren ve debriyaj baskı balatası ile salmastra gibi sızdırmazlık elemanlarında asbest yerine kullanılmaktadır[13].

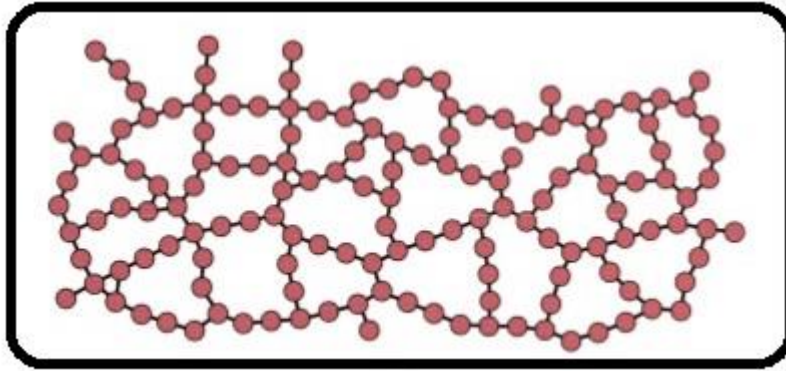
### **2.1.2 Matris özellikleri**

Matris malzeme kompozitlerin ikinci temel bileşenidir. Matris fazının bazı fonksiyonları yerine getirme görevi vardır; ilk olarak, elyafı bir arada tutarak dışarıdan uygulanan gerilmeyi elyafa iletmek ve homojen şekilde dağılımı sağlamaktır; burada, gerilmesinin sadece çok küçük bir kısmı matris tarafından taşınır. Ayrıca matris malzemesi sünek olmalıdır. Bunun yanında, elyafın elastiklik modülü matristen çok daha yüksek olmalıdır. Matrisin ikinci görevi ise elyafın

yüzeyini mekanik aşınma ve kimyasal reaksiyon gibi çevresel etkilerden korumaktır. Bu tür çevresel etkiler yüzeyde daha düşük çekme dayanımına neden olabilecek yüzey kusurlarına yol açabilir. Son olarak da matris, elyafı birbirinden ayırarak göreceli bir süneklik ve plastiklik sağlayarak oluşan çatlakların elyaftan elyafa geçişini engelleyerek, ani kırılmayı önler. Böylece matris çatlak ilerlemesini önleyen bir engel görmüş olur. Elyaf tek tek hasar görse bile, tüm kompozitin hasarı çok sayıda birbirine komşu elyafın kırılması kritik bir değere ulaşana kadar gerçekleşmez[13].

Polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastikler olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Termoplastikler sıcaklıkla tekrar şekil verilebilen plastiklerdir. Birbirlerine zayıf van der Waals bağları ve mekanik kilitlemeler ile bağlı olan uzun polimer zincirlerinden oluşurlar. Bu bağlar, kovalent bağlara göre oldukça zayıf olduğundan dolayı çoğu termoplastik malzeme kolaylıkla eritilebilmektedir.

Termoset polimerler ise oda sıcaklığında sıvı halde bulunup daha az enerji gereksinimiyle kullanılabilmelerinden dolayı termoplastiklere göre daha çok tercih edilmektedir. Sıvı haldeki monomerler kimyasal reaksiyon (polimerizasyon) sonucu sertleşerek uzun ve aralarında kuvvetli bağlar oluşan katı polimer haline gelir. Sertleşme sırasında molekül zincirleri, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi çapraz bağlanma yaparlar[24].



**Şekil 2.8:** Termoset polimerlerin çapraz bağ yapısının şematik gösterimi[24]

Termoset polimerler kurlenmiş veya çapraz bağlı bileşikler olduğundan uzun ömürlü ve ısıya dayanıklıdırlar. Bu gruptaki malzemelerin yeniden işlenmesi veya şekillendirilmesi mümkün değildir. Sertleştikten sonra, moleküller kimyasal ve faz değişimine uğrar, polimer zincirleri arasında üç boyutlu çapraz bağlar oluşur. Üç



boyutlu ağ yapılar ısıtıldıklarında basınç uygulandığında bile akamazlar, soğutma ve ısıtmayla polimer eski haline dönemez[13]. Termosetler çoğu kimyasal içinde çözülmez ve zorlu hava şartlarında dahi uzun ömürlüdür. Oda sıcaklığında sınırlı çalışma zamanı, sertleşme için geçen uzun proses zamanı, kopma esnasındaki düşük uzama ve kırılganlıkları termosetlerin dezavantajlarıdır [23].

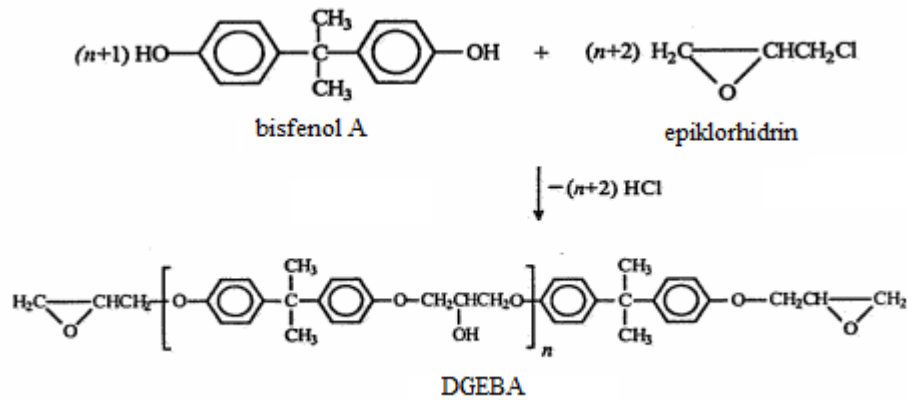
Kompozit malzemelerde termoset esaslı matris malzemeler olan polyester, vinilester ve epoksi reçineler yaygın olarak kullanılır. Epoksi reçine yüksek maliyetli olmasına rağmen, yüksek mekanik özellikleri, üstün elektriksel özellikleri, korozif sıvılara ve ortamlara karşı dayanımı, farklı alt katmanlarla iyi bir şekilde yapışabilme kabiliyetleri, iyi boyutsal ve ısıl kararlılıkları gibi birçok özelliğinden dolayı yüksek performanslı kompozitler için en çok kullanılan termoset esaslı matristir [9].

### 2.1.2.1 Epoksi reçine

Epoksiler fevkalade matris malzemesidir; üretimleri kolaydır, büzülme zayıftır, yapışma özellikleri çok iyidir, aleve dayanıklı ve kimyasal maddelere dirençlidir, mekanik özellikleri iyidir, sıcak kalıplanabilir. 50-150 °C'de kürlenebilir, kürlenmeden yan ürün çıkmaz.

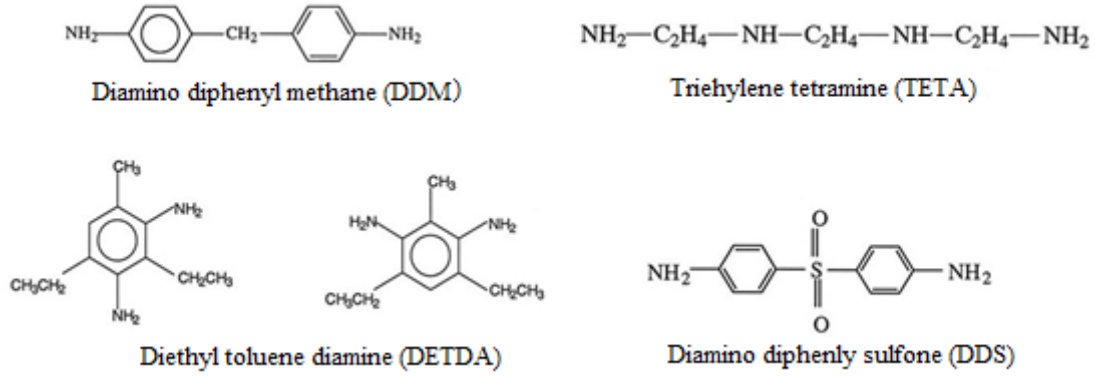
Epoksi reçine, epoksi grupları içeren reçinelerdir; epoksi veya epoksi grubu, genellikle glisidil eter, glisidil amin veya alifatik bir halka sisteminin bir parçası olarak bulunur[19].

Günümüzde ticari olarak en yaygın kullanılan epoksi reçine, epiklorohidrin ve bisfenol-A arasındaki reaksiyondan oluşturulan DGEBA esaslı epoksi reçinedir.



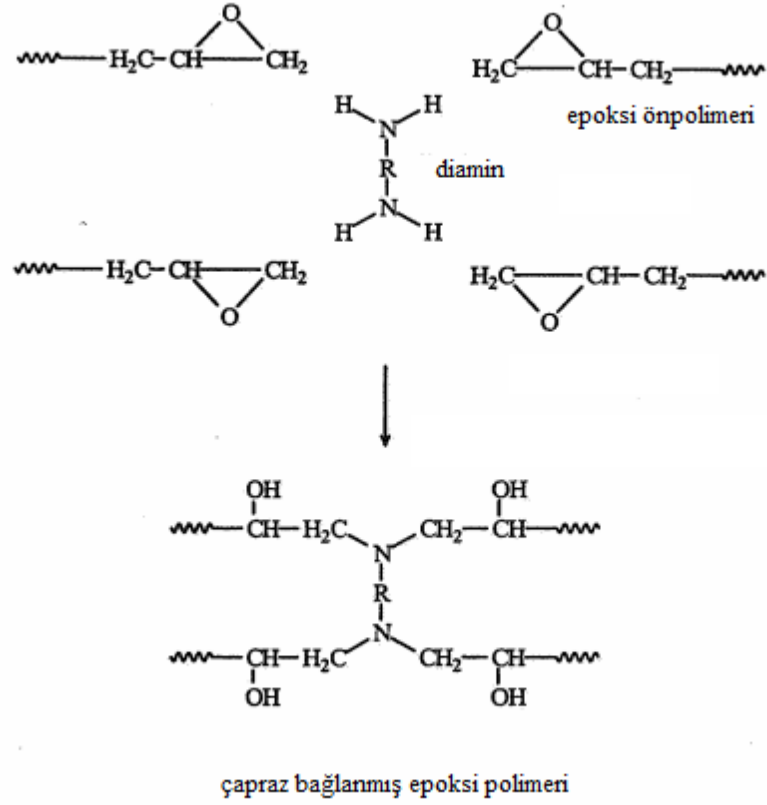
**Şekil 2.9:** DGEBA esaslı epoksi reçinenin üretim reaksiyon mekanizması [15]

Epoksi reçineler kolaylıkla sıvı halden katı hale geçerek serleşebilirler. Bu sertleşme kimyasal bir katkının (sertleştirici) epoksi içerisine katılması ile gerçekleşir. Sertleştirici seçiminde en az reçine seçimi kadar önem taşımaktadır. Bu seçim oluşturulacak ürünün performansını direk olarak etkilemektedir. Yapılmış olan çalışmalar sonucunda epoksi reçineler için birçok farklı tip sertleştirici malzeme üretilmiştir. Bunlar içerisinde en çok kullanılanları; alifatik, siklo-alifatik, aromatik aminler ve poliaminlerden gibi amin esaslı kimyasallardır [13]. Şekil 2.9’da epoksi reçinelerin sertleştirilmesinde kullanılan amin esaslı sertleştiriciler yer almaktadır.



**Şekil 2.10:** Epoksi reçinelerde kullanılan amin esaslı sertleştiriciler [15]

Epoksi reçine ile sertleştirici birlikte karıştırıldığında amin grupları kovalent bağ oluşturmak suretiyle epoksi grupları ile reaksiyona girer. Birçok amin için, çapraz bağlanma reaksiyonu Şekil 2.10’daki basitleştirilmiş reaksiyon üzerinden yürür.



**Şekil 2.11:** Epoksi reçinenin amin esaslı sertleştirici ile sertleşme reaksiyonu [15]

Çapraz bağlı yapının dallanmış noktalarını vermek için her birincil amin grubu iki epoksi grubuyla reaksiyona girer [13]. Epoksiler, genellikle bir aminle katılma reaksiyonu mekanizmasıyla kürlenir. Zincir sonlarındaki iki epoksi ucun amin uçlara bağlanmasıyla kompleks bir 3D zincir ağ yapı meydana gelir. Kürlenmede epoksi/amin oranının optimizasyonu önemlidir.

Epoksilerin çapraz bağlanırken uçucu madde açığa çıkmaz, çapraz bağlanma sonrası çekme oranları (%1-2) diğer termoset reçinelere göre düşüktür. Ancak fiyatları yüksektir ve sertleşme zamanları uzundur. Sertleşme zamanını düşürmek için hızlandırıcılar kullanılır, böylece çapraz bağlanma tepkimeleri daha kısa sürede gerçekleşebilir. Kullanım sıcaklıkları 150°C ye kadar çıkabilmektedir. Epoksi reçineler kırılmandır, dayanıklılığını artırmak için bazen termoplastik parçacıklar karıştırılır. Ayrıca mekanik özellikleri sıcak ıslak koşullarda önemli derecede düşer. Moleküldeki iki aromatik halkalı grup, doğrusal gruplara kıyasla mekanik ve termal gerilimleri daha iyi absorbladığından, epoksi reçinelerin stiffness, ısıya direnç ve elektrik izolasyon özellikleri çok iyidir. Mekanik özellikleri ve çevreye dirençlerinin

diğer pekçok termoset malzemeden üstün olması uygulamada epoksilerin önemini artırır[19].

Epoksi matrisli kompozitleri uzay-havacılık, savunma sanayi ve denizcilik sektörlerinde kullanılmayı en önemli ileri kompozit uygulamaları olarak gösterilir.. Özellikle uçak kanat ve gövdesini içeren askeri havacılık parçalarında epoksi esaslı kompozitler metalik olmayan kompozit dizaynı için gereken beklentileri karşılayabilmektedir. Havacılık için yapılmış olan epoksi kimyasının aynısı, günümüzde hafif bisiklet iskeletleri, kayak, golf sopası, yarış arabası ve müzik aletleri üretiminde de kullanılmaktadır [25].

### **2.1.2.2 Polyester reçineler**

Doymamış poliestlerler iyi işlenebilir olmaları ve çevresel koşullara dirençleri nedeniyle çok kullanılan matrislerdir. Özellikle çok üstün özellikler gerektirmeyen denizcilik endüstrisinde yararlanılan kompozitlerin üretiminde kullanılır.

Poliester reçinelerin çoğu viskoz stiren-poliester çözeltisi halindedir. Stiren ilavesi poliestlerin viskozitesini düşürür ve poliestler moleküler zincirlerin çapraz bağlar gerektirmeyen kürlenmesini sağlar; reaksiyonda yan ürün çıkmaz. Ürün, basınç uygulanmadan kalıplanabilir.

Poliester reçineler polimerizasyon reaksiyonları devam ettiğinden depolama süresi sınırlıdır. Kullanım süresini uzatmak için üretim sırasında inhibitör ilave edilir. Kürlenme işlemi, kimyasal reaksiyonlara girmeyen bir katalizörle hızlandırılır[19].

### **2.1.2.3 Vinilester reçineler**

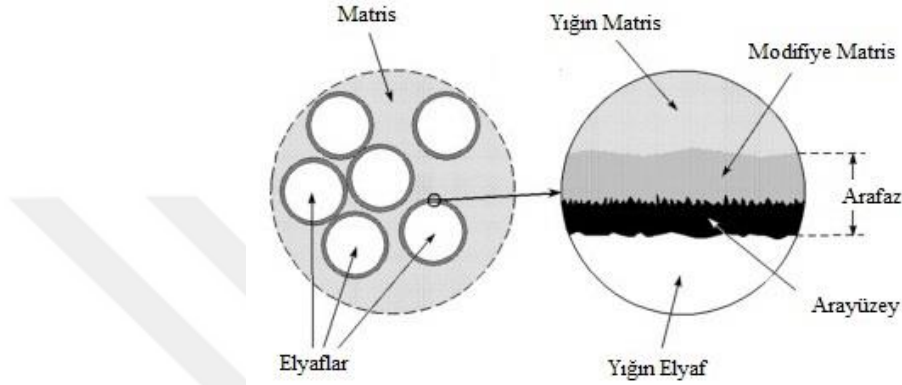
Poliester reçinelere benzer polimerlerdir, fakat zincir sonlarında aktif gruplar vardır ve moleküldeki ester grupları daha azdır.

Ester grupları suya karşı hassastır hidrolizlenerek parçalanırlar. Vinilesterler, poliestler reçinelere kıyasla suya ve kimyasal maddelere karşı da dirençlidir. Zincir sonlarında bulunan reaktif uçlar daha uzun zincirler oluşmasını sağlar, dolayısıyla deformasyon sırasında daha fazla enerji absorblama kapasitesindedir. Vinilester reçineler petrokimya endüstrisinde çok kullanılır[19].

### **2.1.3 Elyaf-matris arayüzey özellikleri**

Kompozit bir malzeme daima, matris ve dispers fazların fiziksel, kimyasal veya mekanik olarak etkileştiği, gerilimi matristen takviye faza transfer eden, arayüz veya

arafaz denilen bir yüzey bulunur. Arayüzey; kompoziti oluşturan matris ve takviye elemanından sonraki üçüncü önemli unsurdur ve bileşenlerin birbirilerine olan sınırır. Bir kompozitte arayüz bölge, kompozitin son özellikleri belirleyen elemanı olduğundan son derece önemlidir. Kompozitin verimli olabilmesi için fazların bir araya gelip yüzey arasında bağlanmaları gerekir. Matris elyaf etkileşimi arayüz boyunca yapılır. Şekil 2.12’da elyaf ve matris arası arayüzeyi temsili olarak gösteren kompozit mikro yapısı yer almaktadır.



**Şekil 2.12:** Elyaf takviyeli kompozit malzemenin mikro yapısı[29]

Arayüz, matris ve elyaf arasında yükün transferinde kuvvetli olmalı, aşındırıcı en aza indirmeli ve bağlanmanın kopmasını kontrol edebilmektedir. Arayüzün kompozitin kesilmesi, bükülgenliği, darbe direnci, kırılmasının ilerlemesi ve elyafların dizilişleri gibi özellikler üzerinde önemli etkileri vardır.

Arayüz çeşitli işlemlere cevap verebilmelidir; örneğin, yüzey arası kuvvetleri kontrol edebilmesi, elyaf/matris arasındaki reaksiyonları engelleyebilmelidir. Bu tür fonksiyonları prosesleri, fabrikasyon ve hatta yüksek sıcaklıklarda ve sert çevre koşullarında da sürdürebilmelidir.

Arayüz iki-boyutlu bir bölgedir, içinde bulunduğu hacim boyunca bir veya daha fazla parametre farklılaşmalar (süreksizlik) meydana gelir; örneğin, elastik modül, kimyasal potansiyel, kimyasal bileşikler oluşumu, termal genişleme katsayısı bu tür parametrelerdir.

Kompozit malzemeye uygulanan yük matristen, iyi bağlanmış bir arayüz vasıtasıyla takviye malzemeye iletilir. Elyaf-matris arayüzde bir kimyasal potansiyel gradienti vardır, böylece oluşan arayüz bölgenin özellikleri, her iki (elyaf ve matris) elemandan farklıdır.

Arayüz çeşitli bileşimlerde ve/veya formlarda olabilir; örneğin, basit bir atomik bağlar dizisi olabilir; matris /takviye malzemelerin reaksiyon ürünlerini içerebilir; çeşitli takviye kaplamalar olabilir.

Arayüzler, kompozit türleri de dikkate alındığında, çeşitli şekillerde tanımlanabilir:

- Kompozit mikroyapının matris ve takviye malzemeleri arasında yer alan kısmıdır, takviye ve matris arasındaki teması sağlayan alandır.
- Bir kompozitin birbirinden aynı, fiziksel olarak farklı elemanları arasındaki sınırdır. Bazı hallerde ilave edilen ayrı bir faz bölgedir.
- Bir arayüz bölgede, bu arayüzün iki tarafında eklenmiş elemanların yer aldığı birer arayüz, yani iki arayüz bulunur.
- Elyaflarda cam ve sizingin karşılaştığı alandır.
- Bir laminatta takviye ve laminatlayıcı reçinenin karşılaştığı alandır.

Arayüzdeki bağlanmada; matris malzemesi elyafı çok iyi sarabilmeli ve ıslatabilmelidir. Islanma iyi olmazsa, zayıf bir arayüz meydana gelir. Islatılabilirlik ilk şarttır ancak iyi bir arayüz için yeterli şart değildir. Arayüz bağlanması normal koşullarda yeterli sağlamlıkta oluşmuyorsa, bir takım yöntemler kullanılır.

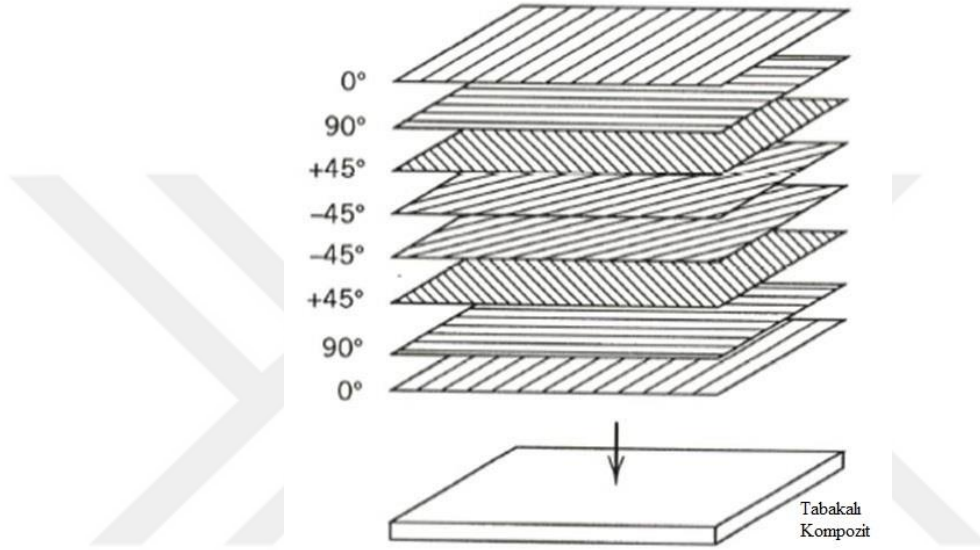
Bunlar;

- Takviye elemanının yüzeyini pürüzlendirerek, sürtünmeyle mekanik bağlanmayı artırma,
- Takviye elemanının yüzeyini düşük yüzey enerjisi veren maddeler ile temizleme,
- Bağ yapıcı özelliği olan ilave maddeler kullanma,
- Kimyasal buhar kullanarak kuvvetli bağ yapma yöntemini uygulama,
- Matrisi modifiye etme [26].

Kompozitlerde, elyaf-matris arayüzler tarafından işgal edilen alan çok geniştir. Arayüz etrafındaki matrisin özellikleri elyaf tarafından modifiye edilir. Elyaf/hacim oranı  $2/r$  ile değişir, ve arayüz bölgesinin önemi elyaf çapının küçülmesiyle artar. Nanopartikül (çap: 10-100 nm) takviyeler durumunda çok küçük hacim fraksiyonlarında kompozitin özelliklerinde çarpıcı değişikliklerle karşılaşılır[25].

## 2.2 Tabakalı Kompozitler

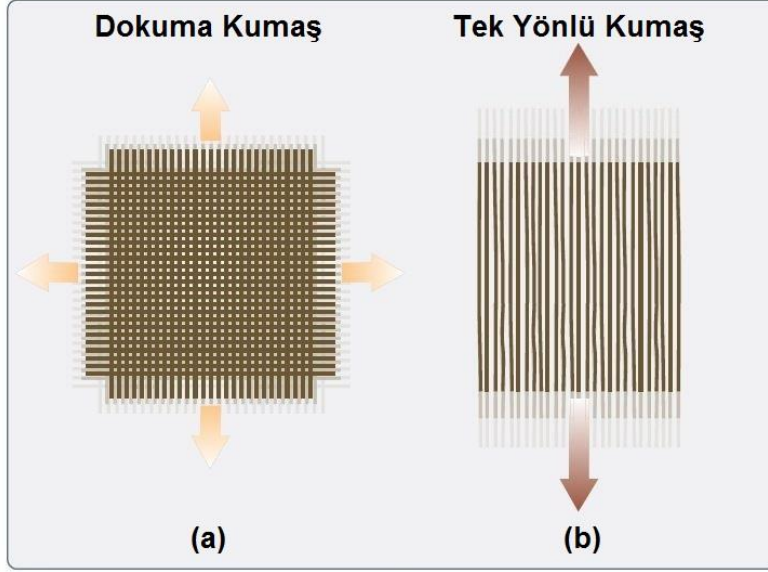
Tabakalı kompozit yapılar en eski ve en çok kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerden biridir. Tabaka; matris içerisinde örülmüş elyaflar veya tek yönlü elyaf düzlemidir. En az iki tabakanın bileşeni ile tabakalı kompozitlerin üretimi yapılabilmektedir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların birleşimi ile birçok yönde yüksek dayanım değerleri elde edilir [21]. Şekil 2.13'de gösterildiği gibi tabakaların yönlendirilmesi ile tabakalar yığını oluşmaktadır.



**Şekil 2.13:** Tabakalı kompozit yapıda yönlendirilmiş tabakaların genel görünüşü[26]

Her bir tabakanın diğer tabakadan bağımsız olarak deforme olma eğilimi mevcuttur. Bundan dolayı laminatlarda kayma gerilmeleri meydana getirmektedir. Delaminasyona neden olan kayma gerilmeleri laminat kenarlarında en fazla oluşmaktadır. Bu durumun engellenmesi için tabakalar arası bölgenin kuvvetlendirilmesi konusu önem kazanmaktadır. Tabakalar arası bölge; matris modifikasyonu sonucu iyileşen arayüzey bağlanması ile güçlendirilebilmektedir.

Yapısal alanlarda kullanılan kompozitler genel de çok katlıdır. Her tabaka tasarım amaçlarına göre değişen elyaf doğrultularında tek katlı kompozitten meydana gelebilir. Tek yönlü kompozit malzemeler elyaf yönünde daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve anizotropik (farklı yönlerde farklı özelliklerin sergilenmesi) davranış sergiler. Dokuma tipi elyaf kullanarak hazırlanan kompozitlerde ise her iki yönde eşit özellikler elde edilmektedir [11]



**Şekil 2.14:** Dokuma ve tek yönlü kumaşlar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi a) Eşit özellikler b) Eşit olmayan özellikler [26]

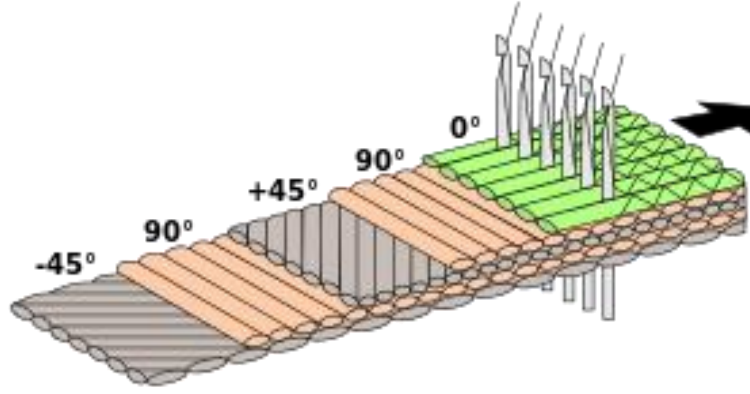
Anizotropik davranış elyaf takviyeli kompozitlerin en büyük handikabıdır. Bu sebeple, birkaç yönden ağırlık ile karşılaşacak kompozitlerde, yükün geldiği yönlerde eşit mukavemet oluşturmak amacıyla elyaflar kumaş formunda üretilirler. Kumaş formu; sürekli elyaf demetlerinin tekstil makinelerinde istenilen şekilde örülmesi veya dokunması ile elde edilir. Kumaş formundaki takviye malzemeleri tekstil takviyeler olarak adlandırılmaktadır [27].

Tekstil takviyelerin; kolay işlenebilme, şekillendirilebilme ve tasarımda esneklik sağlayabilme gibi avantajları bulunmaktadır. Saç örgüsü (braiding), dokuma (woven), örme (knitting), dikim (stitched) ve çok eksen (multiaxial) teknolojileriyle üretilen kumaşlardır. Çok eksen teknolojisiyle üretilen kumaşlar en sık kullanılan tekstil takviyeleri arasındadır [28].

### 2.2.1 Çok Eksenli Kumaşlar

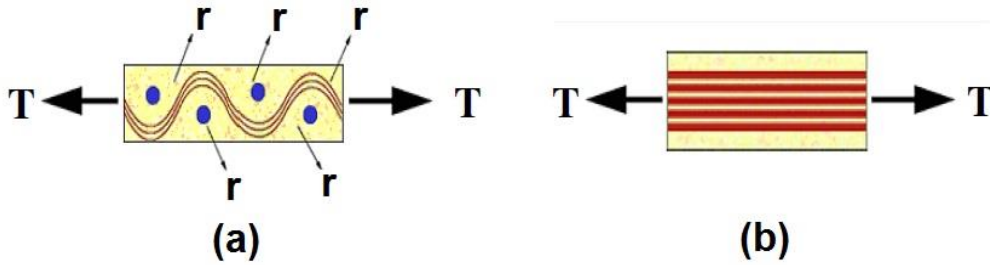
Son yıllarda kompozit parçaların tasarımında çok eksenli kumaşların kullanımı gün geçtikçe artmış göstermektedir. Çok eksenli kumaşların yapısındaki iplik gruplarında herhangi bir kıvrım olmamasından dolayı kıvrımsız kumaşlar (Non-crimp fabric, NCF) olarak adlandırılmaktadırlar [26]. Çok eksenli kumaşlar diğer bir deyişle kıvrımsız kumaşlar; elyaf sürekliliği, elyafların çok katmanlı olarak üretimi gerçekleşebilmesi ve doğrultularının kontrol edilebilmesinden dolayı ağırlık taşıyan elemanların imalatı için en makul güçlendirme malzemesi olarak kabul edilmektedirler [29].





**Şekil 2.15:** Çok eksenli kumaşın dizilim görünümü [30]

Dokuma kumaşlarda çekme yüklemeleri altında dalgalanma (crimp) oluşmaktadır fakat kıvrımsız kumaşların ipliklerinde dalgalanma durumu olmadığı için özellikle düzlem içi mekanik özellikleri, eşit elyaf hacim oranına sahip olan dokuma kumaşlara göre oldukça yüksektir. Böyle olmasının sebebi ise dalgalanma durumunda kompozitin birim alanında reçine zengin bölgeler oluşması ve elyaf miktarının azlığında dolayı mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır.[28]. Şekil 2.16’te dokuma ve kıvrımsız kumaşlardaki dalgalanma durumu gösterilmiştir.



**Şekil 2.16:** Dokuma ve kıvrımsız kumaşlarda dalgalanma durumu (a) Dokuma kumaş; dalgalanma var, reçine zengin bölgeler “r” (b) Kıvrımsız kumaş; dalgalanma yok [16]

Kıvrımsız kumaşlar takviye malzemesi olarak özellikle yüksek performanslı tekneler ve rüzgar türbin kanatlarındaki kompozitlerde işlev görmektedir. Son yıllarda uzay ve havacılık sanayisindeki kullanımları giderek artış göstermekte ve ilerki yıllarda bu alanda kullanılan ana takviye malzemesi olacağı söylenmektedir. Bu uygulama ile bir seferde farklı kumaş katmanlarına sahip bir yapı oluşturulabildiğinden işçilik maliyetleri düşüktür ve dokuma kumaşlara göre çok kolay biçimlendirilebilmektedir [28].

### 2.3 Nanokompozitler

Nanokompozitler, kompoziti oluşturan bir veya daha çok fazın nano skala (<100 nm) boyutlarında olduğu bir malzemeler sınıfıdır. Nano skala bir fazın ilavesindeki genel düşünce, çeşitli bileşenler arasında bir sinerji yaratılarak malzemeden istenilen yüksek performans özelliklerine ulaşabilmektir. Nanokompozitlerde kullanılan inorganik komponentler üç-boyutlu yapılarda (zeolitler gibi), iki-boyutlu tabakalı malzemeler, bir-boyutlu ve sıfır boyutlu malzemeler olabilir. Malzeme boyutlarının nanometre seviyelere düşürülmesinin direkt etkilerinden biri, elektronların hareketinin sınıflandırılmasıyla kuvantizasyon etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Bu durumda yapının boyutlarına bağlı olarak farklı enerji seviyeleri oluşur ve özellikle bulk malzemeden farklı yapay yapılar hazırlanabilir. Yapısal kompozisyonun ve boyutların kontrol edilebilmesiyle, özel uygulamalara yönelik, malzemelerin yapılması mümkün olabilmektedir[19].

Bir nanometre, bir metrenin milyonda biridir; yani, insan saç telinin çapının yüz bin'de biri, kırmızı kan hücresinin binde biri ve DNA'nın yarısı kadar bir büyüklüktür. Nanomalzemelerin boyutsal morfolojilerine göre nanokompozitler 0D, 1D, 2D, ve 3D yapılarda olabilir. Bulk (kütle) malzemeler nano skala yapı bloklarından yapılır veya nano skala nanoyapılardan meydana gelir. Bulk malzemelerin (çevrede görülen büyük parçalar) fiziksel özellikleri makroskobiktir; yani aynı veya süreklidir. Kum tanecikleri gibi mikron büyüklüklerdeki malzemeler de benzer fiziksel özellikler gösterir. Fakat taneciklerin büyüklüğü nano boyutlara düştüğünde davranışları klasik fizik ilkeleriyle (hareket, enerji, v.s.) açıklanamaz; artık kuantum mekanik ilkeleri söz konusu olur. Bir malzemenin nano skaladaki örneğin, optik, mekanik ve elektriksel özellikleri makroskaladaki (bulk hali) değerlerinden çok farklı, hatta tam tersi bile olabilir[19].

Takviye malzemenin yüzey alanı/hacim oranı nanokompozitin yapı-özellik ilişkisini belirler. Partikül boyutu, nanokompozit sistemlerin özelliklerinde önemli değişiklikler sağlar; katalitik aktivite (<5 nm), sert magnetik malzemeleri yumuşatma (<20 nm), refraktif indekste değişiklik (<50 nm), elektromagnetik özelliklerde değişiklik (<100 nm), kuvvet ve dayanıklılık artırma (<100 nm), sertlik ve plastiklikte modifikasyon (<100 nm) gibi özellikler partikül boyutlarıyla gerçekleştirilebilir[19].

Nanomalzemeler doğanın her yerindedir, çevrenin parçalarıdır. En popüler Nanomalzeme odundur. Odunun yapısı hiyerarşik bir skala gösterir; en büyük skalada kısa fiberler (20-30 µm çap, 2,5 mm uzunluk), orata skalada nanofiberler (<100 nm çap, >1 µm uzunluk), ve en küçük skalada kristalitler (<5 nm çap, < 300 nm uzunluk) bulunur. Partikül boyutlarının nanometre seviyeye ulaşılmasıyla kompozitteki arayüzde etkileşimler çok yükselir, dolayısıyla malzemenin özellikleri fevkalade gelişir. Mekanik özellikler yapının küçülmesiyle yükselir; yumuşak yapıdan odun kristallere doğru gidildiğinde, örneğin 12, kuvvet ise 100 kat yükselir[19].

Nanomalzemeler genellikle dört grup altında toplanabilir: karbon malzemeler, metal bazlı malzemeler, dendrimerler ve nanokompozitlerdir. Karbon bazlı malzemeler çoğunluğu karbon karbon olan malzemelerdir; iç boş küreler, elipsoidler veya tüpler gibidir. Nanokompozitler nanotakviye malzemelerin (nanopartiküller, nanotüpler, v.s.) büyük, bulk malzemelerle (matrisler) uygun metotlarla bir araya getirilmesiyle sentezlenen nanomalzemelerdir[19]

### 2.3.1 Nanokompozitlerin sınıflandırılması

Nanokompozitler de matris malzemeye göre üç sınıf altında toplanabilir.

- Polimer Matris Nanokompozitler(PMNC)
- Metal Matris Nanokompozitler (MMNC)
- Seramik Matris Nanokompozitler (CMNC)

Diğer bir sınıflandırma sisteminde nanokompozitin içerdiği organik ve inorganik maddeler dikkate alınmıştır.

- İnorganik-inorganik nanokompozitler: Organik matriste inorganik dolgu malzemelerinin bulunduğu nanokompozitler.
- İnorganik-inorganik nanokompozitler: Organik matriste organik dolgu malzemelerinin bulunduğu nanokompozitler.
- Hibrid malzemeler

Nanokompozitler içerdiği fazlar ve/veya malzemeler dikkate alındığında çeşitli kaynaklar tarafından farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Örneğin yapılarına göre nanokompozitler iki temel sınıfta toplanmıştır[19].

***Mikrokristal matris (mikro-nanotip) nanokompozitler:*** Bu gruptaki nanokompozitlerde ikinci fazın nanometre boyutlardaki tanecikler (küresel,

fiberimsi, levha şekilli) matris zerreciklerinin (grain) intergranüler, intragranüller veya intergranüler/intragranüler bölgelerinde dağıtılır[19].

#### ***Nanokristal matris nanokompozitler:***

- Nano-nano tip nanokompozitler: Nanokristalin bir matriste nanokristalin fazlar veya amorf malzemelerin bulunduğu nanokompozitler.
- Nano-fiber tip nanokompozitler: Nanokristalin bir matriste nanoboyutlu fiberlerin dağıtıldığı nanokompozitler.
- Nano-nanotabaka tip nanokompozitler: İkinci fazın nanotabakalarında nanokristalin zerreciklerin bulunduğu nanokompozitler.

Polimerik ürünler üretimlerinin kolay olması, hafifliği ve genellikle yumuşak olmalarından dolayı endüstride çok kullanılan malzemelerdir. Ancak, metaller ve seramiklerle kıyaslandığında kuvvet ve modüllerinin daha düşük olması gibi dezavantajları da vardır. Bu olumsuzluklar polimer matrislere fiberler, plateletler veya partiküller gibi takviye malzemeler ilave giderilebilir. Bu amaçlarla kullanılan nano boyutlarda takviye malzemelerin verimi, mikro skalalı takviyeli malzemelere göre çok daha yüksektir[19].

Biyoparçalanabilir polimer bazlı nanokompozitlerin içerdiği matris ve tabakalı (montmotrilonite) nanokompozitlerin hazırlanması, tanımlanması ve kristalizasyon davranışları ve ergime reolojileri gibi özelliklerin incelenmesiyle ilgili geniş araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Biyoparçalanabilir polimerli nanotakviyeler çevre dostu malzemeler üretiminde önemli sistemlerdir[19].

#### **2.3.2 Polimer matrisli nanokompozitler**

Polimer matris nanokompozitler (PMNC) modern plastik endüstrisinin geleneksel dolgulu polimerler veya polimer karışımlarına radikal bir alternatiftir. Polimer matris nanokompozitlerde matris polimerik bir malzemedir. Matris içinde dağıtılmış olan ikinci faz nano skala boyutlarındaki takviye fazdır. Takviye fazın çok çok küçük boyutlarda olması geleneksel kompozitlere (mikrokompozitler) kıyasla nanokompozitlerin arayüz-hacim oranının önemli derecede yüksek olmasını sağlar. Dolayısıyla malzemenin özelliklerinde bozulma olmadan ikinci fazın hacim fraksiyonu azaltılabilir[19].

Polimer matris nanokompozitler üç grup altında toplanabilir.

#### ***Polimer Matris-Süreksiz Takviyeli( Tabakasız) Nanokompozitler***

- 1D: Malzemenin üç boyutlu da nanometre skalasında olduğunda, izoboyutlu partiküller olarak tanımlanır. Örneğin, spherik silika, metal partiküller ve yarıiletken nanoclusterler.
- 2D: iki boyut nano skalada ve bir boyutu daha fazla olan takviye malzemeler: karbon nanotüpler ve selüloz whisker
- 3D: Sadece bir boyutun nanometre skalada, diğer iki boyutun daha büyük olduğu nanotakviye malzemeler polimer-tabaklı nanokompozitler olarak tanımlanır. Örnekle, grafit, killer, tabakalı silikat[19].

### ***Tabakalı Takviyeli Polimer Nanokompozitler***

Polimer tabakalı silikat (PLS) nanokompozitler, saf polimerler ve geleneksel mikro ve makro polimer matris kompozitlerle kıyasladığında çok gelişmiş özellikler gösterirler. Örneğin, yüksek modül yüksek kuvvet ve ısıya dayanıklılık, düşük alevlenme, gaz geçirgenliği ve biyobozunabilirlik gibi[19].

PLS nanokompozitlerde takviye malzeme olarak genellikle tabakalı silikatlar kullanılır. Bu malzemeler iki önemli özelliğe sahiptir. Birincisi silikat partiküllerin birbirinde ayrı tabakalarda içinde dağılabilmesi, ikincisi ise yüzey kimyasının organik ve inorganik katyonlarla iyon değiştirme reaksiyonlarına uyumlu olmasıdır[19].

Tabakalı polimer nanokompozitlerin elde edilmesinde en çok kullanılan yapısal malzemeler phyllosilikatlardır. Bu phyllosilikatlarda hidratlanmış katyonlar (Li, Na,Rb,CS) diğer organik katyonlarla yerdeğiştirdiğinde ( iyon-değiştirme) daha büyük bir ara tabaka boşluğu elde edilir.

Bir polimer ve tabakalı silikatla (modifiye veya doğrudan) hazırlanan nanokompozitler gelişmiş mekanik ve malzeme özellikleri gösterir; yüksek modül, kuvvet ve ısıya dayanıklılık, gaz geçirgenliği ve alevlenebilirlik, biyoparçalanabilir polimerlerde yüksek biyoparçalanabilirlik gibi. Nanokompozitlerdeki bu gelişmiş özelliklerin temeli matris ve tabakalı silikatlar arasındaki yüzey arası etkileşimin, geleneksel dolgulu takviyeli sistemlerden göre daha kuvvetli olmasıdır[19].

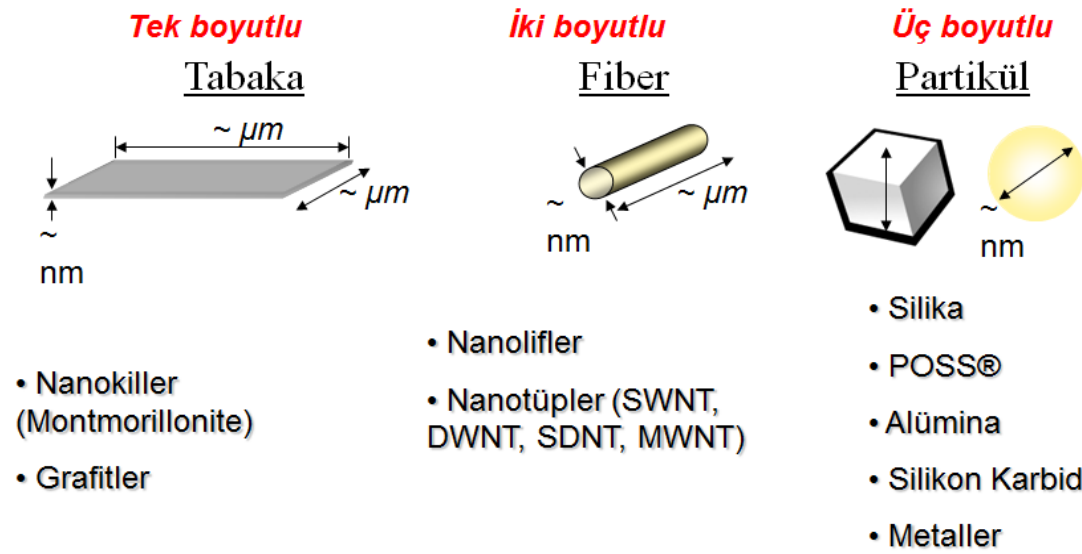
### ***Polimer-Nanofiber/CNT Nanokompozitler***

Karbon nanofiberler düzensiz 'bambu-gibi'den düzenliliği çok yüksek 'cup stacked' grafit yapıya kadar değişen, çeşitli formlarda ve çaplarda ( 50-200 nm ) malzemelerdir. Pek çok polimer matriste (epoksi, poliimid, fenolikler gibi termoset

polimerler ve polipropilen, polistiren, polimetilmetakrilat, naylon12 ve polietereterketon gibi termoplastik polimerler) takviye olarak kullanılır.

### 2.3.3 Nanodolgular

Nanokompozitlerin yapımında kullanılan dolgu malzemeleri nanometre seviyesindeki boyut sayısına göre; tek, iki ve üç boyutlu olarak sınıflandırılmaktadır [31].



Şekil 2.17: Farklı boyutlara sahip nanodolgu çeşitleri [31].

Tek boyutlu nanodolgular; malzemenin yalnızca bir boyutunun nanometrik ölçekte olduğu nanodolgulardır. Kalınlığı birkaç nanometre ve uzunluğu ile genişliği mikrometreleri bulabilen tabakalardan oluşan yüksek boy/en oranına sahip kil ve grafitler tek boyutlu nanodolgulara örnektir. Özellikle nanokiller gerek maliyet gerekse modifikasyonunun kolay yapılmasından dolayı bir çok çalışma ve üründe yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [32].

İki boyutlu nanodolgular; iki boyutunun nanometrik diğer boyutunun ise daha büyük ölçekte olduğu malzemelerdir. Bu malzemelere örnek olarak; nanolifler yani nanoselüloz, nanotüpler ya da kil kristalleri verilebilir [33].

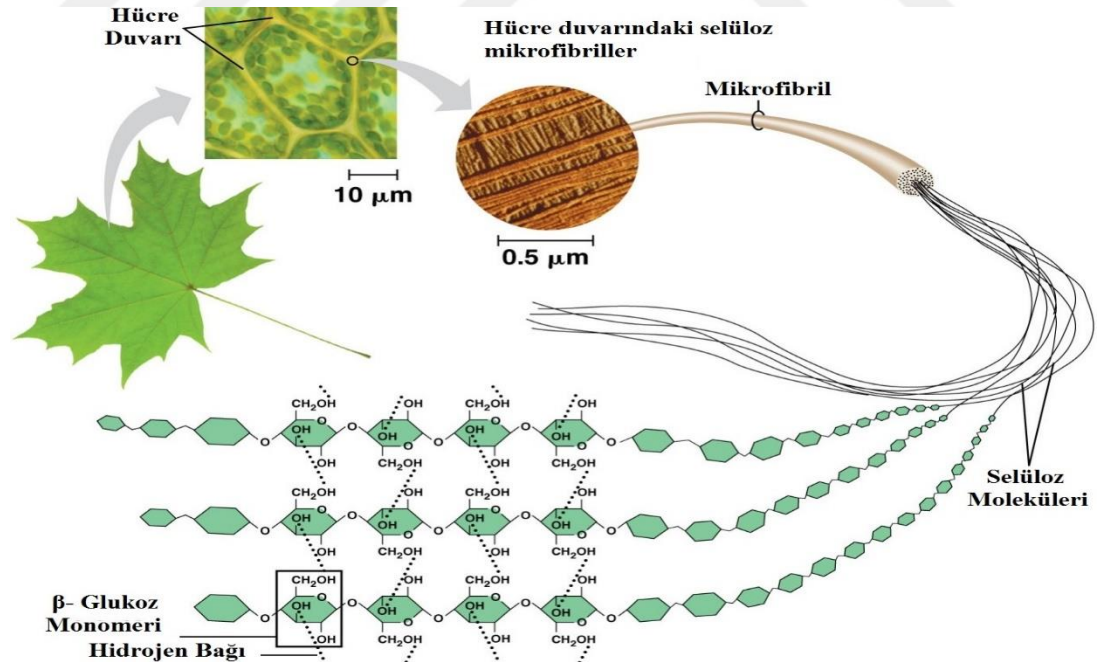
Üç boyutlu nanodolgular; genelde izo-boyutsal küresel parçacıklar olarak bilinen ve tüm boyutlarının nanometrik ölçekte olduğu malzemelerdir. Karbon siyahı, çinko oksit (ZnO), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ), kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), polihedral

oligomerik silseskuokzan (POSS) gibi üç boyutlu nanodolgunlar da nanokompozit sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır [34].

Son yıllarda NS nanodolgunları; nanometre boyutu, yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmesi ve polimerleri mekanik dayanım açısından eşsiz takviyelendirme kapasitelerinden çıkarabilme özelliğinden dolayı oldukça ilgi çekmektedir.

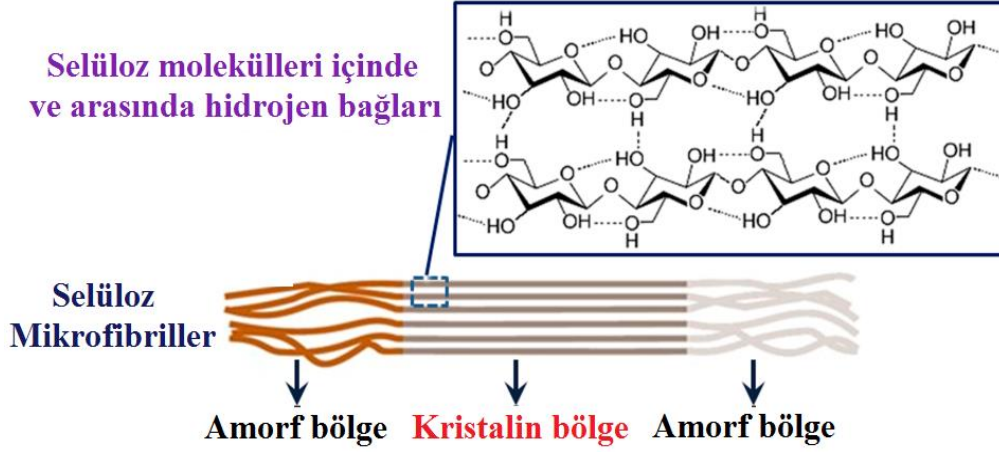
### 2.3.3.1 Nanoselüloz

Odun hamuru, pamuk, keten ve kenevir gibi birçok doğal bitkinin hücre çeperinin temel bileşenleri selüloz, lignin ve hemiselülozdur. Bu yapılar büyük molekülü, yapısal olarak karmaşık ve güçlkle analiz edilebilen bileşiklerdir. Odunun % 40-50'si, keten-kenevirin %45'i ve pamuğun % 90'ı selüloz liflerinden oluşmaktadır. Selüloz bitki biyokütlesinin ana bileşenidir ve hücre çeperinin iskeleti selüloz fibrillerinden (lifleri) oluşmaktadır. Dünyada en yüksek oranda bulunan selüloz organik bir polimerdir. Filtre kağıtları ise selülozun en saf halinde kullanılmaktadır. Selüloz lifi tekstil, mukavva ve kağıt da dahil olmak üzere birçok farklı ürünün yapımında kullanılmaktadır[35-39].



Şekil 2.18: Selüloz yapısı[40]

Selüloz fibrilleri yalnızca kristal yapıda değildir, daha düzensiz amorf kısımlarda ihtiva etmektedir.. Kristalizasyon seviyesi de selülozun elde edildiği kaynağa göre farklılıklar göstermektedir



**Şekil 2.19:** Amorf ve kristalin selüloz[41]

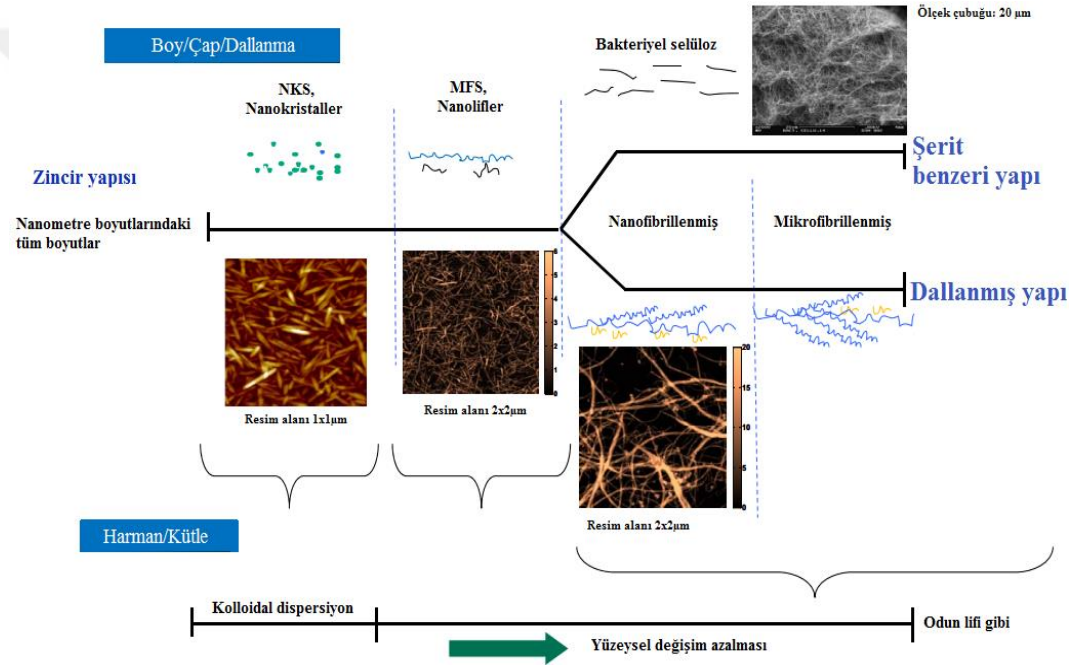
Nanoselüloz, yüksek boy-en oranına sahip nano boyutlu lifleri içeren bir malzemedir. Bu liflerin genişliği genel de 5-100 nm'dir ve uzunluk ise nanoselüloz türüne göre 2000 nm'ye kadar değişkenlik göstermektedir. Nanokristalin selüloz (NKS), nanoselüloz mikrofibrillenmiş selüloz (MFS) ve bakteriyel nanoselüloz (BNS) olmak üzere üç çeşit tipte üretilmekte ve bu ürünler farklı boyutlarda olup, değişik özellikleri ve ayrı üretim yöntemlerini kapsamaktadırlar (Çizelge 2.1) [42].

**Çizelge 2.1 :** Nanoselüloz türleri [43].

<b>Nanoselüloz türü</b>	<b>Literatürde karşılaşılan diğer isimler</b>	<b>Elde edilen kaynak</b>	<b>Boyutlar</b>
Mikrofibril selüloz (MFS)	Nanofibril, Mikrofibril, Nanofibrillenmiş selüloz, Nanofibril selüloz	Odun, şeker pancarı, kenevir, Keten, patates yumrusu.	Çap: 5-60 nm Uzunluk: > 1000 nm
Nanokristalin selüloz (NKS)	Selüloz nanokristal, nanoselüloz iğnecikleri, selüloz mikro kristal	Odun, pamuk, buğday samanı, dut kabuğu, hayvansal selüloz	Çap: 5-60 nm Uzunluk: 100-250 nm
Bakteriyel nanoselüloz (BNS)	Bakteriyel selüloz, mikrobiyel selüloz, biyoselüloz	Şeker, selüloz	Çap: 20-100 nm Uzunluk: Nanofiber ağı



BNS *Gluconacetobacter* türü aerobik bir bakteri türünden elde edilmektedir. MFS ilk kez 1970'lerin sonu ile 1980'lerin başında Sandberg ve ekip arkadaşları tarafından üretilmiştir. Odun selülozu lifleri süspansiyon halinde mekanik yolla MFS'ye çevrilmiştir. Makine olarak yüksek basınç homojenizatör kullanılmıştır. Mekanik işlem, lifleri katmanlara ayırarak yaklaşık 5-50 nm çapındaki mikrofibrilleri serbest hale getirmektedir [44-45]. Kısacası MFS, büyük selüloz fiberlerin mekanik yolla nano boyuttaki fiberlere ayrıştırılmasıdır. NKS iğne şeklindeki selüloz kristallerinden oluşmaktadır. Saf haline getirilmiş selülozdan amorf bölümlerin uzaklaştırılması ile üretilmektedir.



**Şekil 2.20:** NKS, MFS ve BNS 'un morfolojik yapıları[46]

MFS ve NKS ise mikrofibriler materyalleri ayırmak ve izole etmek için doğal liflerin delaminasyonu ile elde edilmektedirler. Doğal lifler birbirlerine sıkı bir şekilde bağlanmakta ve lifleri dağıtmak yalnız iki yolla mümkün olabilmektedir.

1. Kuvvetli asidik koşullarda hidroliz
2. Homojenizatör yardımıyla mekanik parçalama

İlk yöntem kuvvetli asidik şartları altında gerçekleşmekte olup, asit özellikle liflerin kristal olmayan yani amorf bölgelerine etki etmektedir. Asit hidrolizinde en çok hidroklorik asit kullanılmakta ve elde edilen mikrokristalin selüloz (MKS) olarak

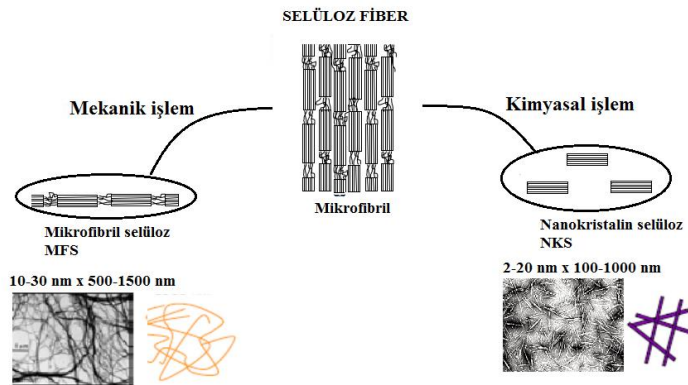
adlandırılmaktadır. Hidroliz yönteminde ayrıca sülfürik asitte kullanılabilmekte olup, kullanılan sülfürik asit selüloz üzerinde sulfat ester gruplarının meydana gelmesine neden olmakta bu ise liflerin ayrımını ve stabilizasyonu kolaylaştırıcı bir rol oynamaktadır[47].

Asit hidrolizini takiben süreç için kullanılan cihaz sonikasyon olarak adlandırılan ses dalgalarının etkisine maruz kaldığında yapı parçalanmakta, lifler birbirinden ayrılmakta ve oluşan ürün selüloz kristalitleri, nanokristalin selüloz (NKS) olarak adlandırılır. Oluşan bu ürün kristalin olmayan alanların bozunması nedeniyle yüksek kristallik derecesine sahip olup, oldukça düşük en boy oranına sahiptir[48].

Düşük en boy oranı sıvı ortamlarda kiral nematik (Kolesterik sıvı kristal, sarmal yapılı, dolayısıyla kiral olan bir sıvı kristal tipidir ve kolesterik sıvı kristaller kiral nematik sıvı kristaller olarak da bilinir) fazların hazırlanmasında yararlı olmakta ancak nispeten mekanik özellikler bakımından zayıf jellerin oluşumuna sebebiyet vermektedir[49].

Oluşan MFS kristalin olmayan amorf bölgelerin önemli bir kısmının bozunmadan kalması sebebiyle NKS'a nazaran daha düşük DP derecesine sahiptir. Bundan hariç yüksek DP ve en boy oranına sahip MFS'lar liflerin daha yüksek oranda bağlantı oluşturabiliyor olması sebebiyle daha güçlü jellerin üretimine imkân vermektedir. Bu metotla elde edilen ürünlerdeki en büyük sorun ise yüksek enerji tüketimidir.

İkinci yöntemde ise lifler yüksek basınçlı homojenizatörler yardımıyla birbirinden ayrılmakta olup, oluşturulan ürün MFS, NSK veya basitçe nanoselüloz olarak adlandırılmaktadır[50].



Şekil 2.21: MFS-NKS farkı[53]

NKS'nin yüzey fonksiyonları hidroliz aşamasında kullanılan aside bağlı olmaktadır. HCl kullanıldığında selüloz yüzeyi zayıf bir şekilde negatif yük yüklenmektedir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ise negatif yükü arttırmaktadır zira glukoz birimlerinin yaklaşık onda birinde sülfat ester grupları oluşmaktadır. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile hazırlanan NKS'lerde yüzey yükü fazla olduğu için taneciklerin birbirini itme kuvveti fazla olmakta ve koloidal bir süspansiyon oluşmaktadır. Oluşan NKS kristallerin boyutu hidroliz süresi ile direkt ilişkilidir. Uzun reaksiyon süresi boyutu düşürmektedir. Fakat NKS'nin boyutlarını belirleyen en önemli etmen hammaddedir. Çeşitli hammaddelerden sülfürik asit hidrolizi ile oluşturulan NKS'lerin boyutları Çizelge 2.2'te gösterilmektedir.

**Çizelge 2.2 :** Hammadde cinsine göre nanoselüloz boyutları [ 51].

<b>Kaynak</b>	<b>L (nm)</b>	<b>D (nm)</b>
Pamuk	170	85
Mikrokristalinselüloz	200-600	5
Şeker pancarı	200	5
Buğday samanı	250	5
Hayvansal selüloz	1000	15

1990 başlarında Revol ve ekip arkadaşları H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile selülozu hidrolizleyerek oluşan NKS'leri birçok yönden incelemiştir. Bu araştırma birçok NKS çalışmasına ışık tutmuştur [ 51-56].

İlk defa Brown tarafından sirke fermantasyonu esnasında, sıvı yüzeyde oluşan jelatinimsi yapıdan izole edilen *Acetobacter xylinum*'un, uygun bir besi ortamında üretildiğinde, yüksek miktarda ekstra selüler jelatinimsi bir yapı sentezlediği belirtilmiştir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda, selüloz ürettiği bilinen bakteriler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bakteriler tarafından üretilen bu selüloza da “Bakteriyel Selüloz” isimlendirilmiştir. En iyi selüloz üreticisi olan *Acetobacter xylinum*, asetik asit bakterisi olarak bilinir. Yoğun olarak çalışılan bakteriyel selüloz, kimyasal

olarak bitkisel selüloz ile benzer olmasına karşı, bakteriyel selülozun moleküler yapısı ve fiziksel özellikleri bitkisel selülozdan farklıdır. Bakteriyel selülozun, fibril ağ çapının 0.1 µm olduğu belirtilmektedir. Fibril ağının çapı bitkisel selülozun yaklaşık % 1'i kalınlığındadır. MFS ve NKS'den farklı olarak BNS ağı yapıya sahip bir polimerdir [57, 58].

Tüm nanoselüloz çeşitleri yüksek mekanik özelliklere sahip olduğundan ve bariyer özellikleri de geliştirildiğinden son yıllarda montmorillonit gibi polimer nanokompozitlerde nano katkı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kendine özgü morfolojisi, yüksek yüzey alanı ve düşük yoğunluğu (1.61 g/cm<sup>3</sup>) gibi sebeplerden dolayı da nano selüloz kompozitler, bilim dünyasında büyük bir ilgi uyandırmıştır. Birçok bilim insanı üç tip nanoselülozu da kullanarak mekanik, ısıl ve bariyer özelliklerin iyileştiği nanoselüloz polimer kompozitler sentezlemiştir [59-67].

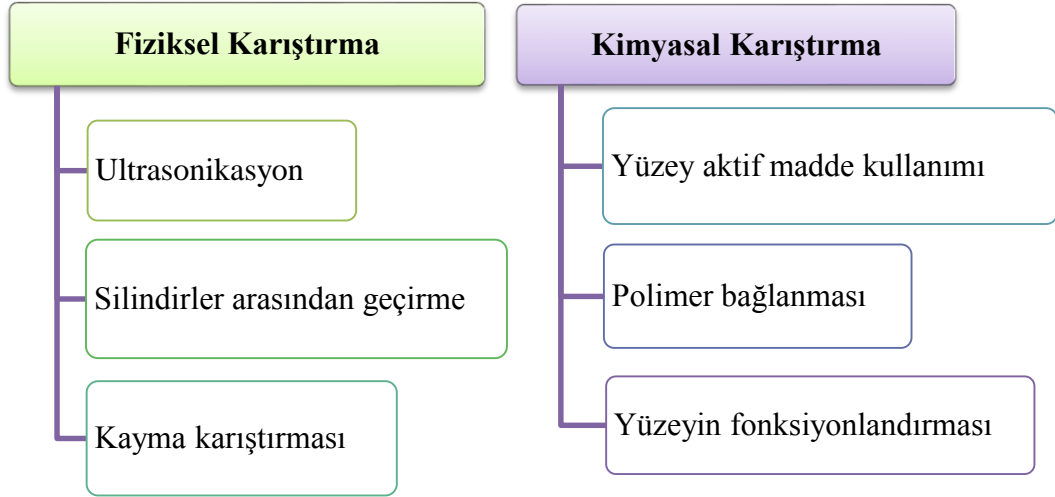
Son yıllarda üretim kolaylığından ve daha küçük boyutta selüloz fibriller elde edilebildiğinden dolayı NKS, nano katkı olarak daha çok tercih edilebilmektedir.

#### **2.3.4 NKS/Polimer nanokompozitlerin hazırlanması**

Nanodolguların sahip oldukları üstün özellikleri meydana çıkarabilmek için ilk olarak dikkat edilmesi gereken mevzu, nanodolguları polimer matris içerisine homojen bir biçimde dağıtılmasıdır. Böylelikle matris ile nanodolgu arasında etkin bir yük aktarımı ve homojen gerilme dağılımı oluşturulurken gerilme konsantrasyonu oluşturan alanların azalması sağlanır [68].

Nanodolguların matris içerisinde topaklaşması ve yetersiz dağılımı, nanokompozitlerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi sonucunu meydana getiren en önemli etkendir [69].

Bu dağılım sorunu çözmek için çeşitli fiziksel ve kimyasal metot geliştirilmiştir. Şekil 2.22'de bu metotlar gösterilmiştir.



**Şekil 2.22:** Nanodolguların polimerler içerisine etkin şekilde dağıtılmasında kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler [68]

Nanodolguların polimer matris içerisine dağıtılmasında kullanılacak fiziksel metot, polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır. Nanodolguları düşük ve orta düzeyde viskoziteye sahip reçineler içerisinde homojen olarak karıştırmak için en çok kullanılan yöntemlerden biri ultrasonikasyon işlemidir. Örneğin; Lin ve ekip arkadaşları [70]; epoksi reçineyi üç farklı metot kullanılarak Cloisite 15 A® kil ile modifiye etmiştir. Bu metotlar; doğrudan karıştırma, çözelti ile karıştırma ve ultrasonikasyon olmuştur. Nanokompozitin mikroyapı araştırmaları; ultrasonikasyon işleminin nanokillerin dağılımı açısından en düzgün sonuçları verdiğini gösterildi.

Ultrasonikasyon kullanıldığında ses dalgaları sayesinde nanodolgu kümeleri dağılır ve reçine içerisinde homojen bir dağılım sağlanır. Ultrasonikasyon işlemi sırasında , basınçlı ses dalgaları sıvı ortam içinde yayılır. Yayılım esnasında yüksek ve alçak basınç bölgeleri oluşur. Bu bölgelerin oluşma sıklığı ses frekansına bağlıdır. Düşük basınç bölgelerinde, yüksek şiddetli ses dalgaları küçük vakum baloncuklarının veya boşluklarının oluşmasına neden olabilir. Bu baloncuklar kritik hacme ulaştıklarında daha fazla enerji absorplayamazlar ve yüksek basınç bölgesinde sesli bir şekilde patlarlar. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir. Bu patlama ile yüksek sıcaklık ve basınç açığa çıkar. Ek olarak bu baloncuklar patladığında yüksek hızlı sıvı jetlerinin oluşmasına sebep olur. Meydana gelen sıvı jet akımları yeteri kadar enerjiye sahip olabilirse nanodolguları bir arada tutan kuvvetleri yenebilir ve sıvı içerisinde dağılmasını sağlayabilir [71]. Şekil 2.23’de ultrasonikasyon cihazı gösterilmiştir.



**Şekil 2.23:** Ultrasonikasyon cihazı [73]

Ultrasonikasyon, içine nanodolgu atılmış reçine kabının ultrasonik banyoya koyulması ile veya ultrasonik dalga yayabilen bir metal çubuğun bu kabın içine daldırılması ile sağlanabilir. İlk metot literatürde banyo ultrasonikasyonu olarak adlandırılırken diğer metot uçlu ultrasonikasyon olarak adlandırılmaktadır [72].

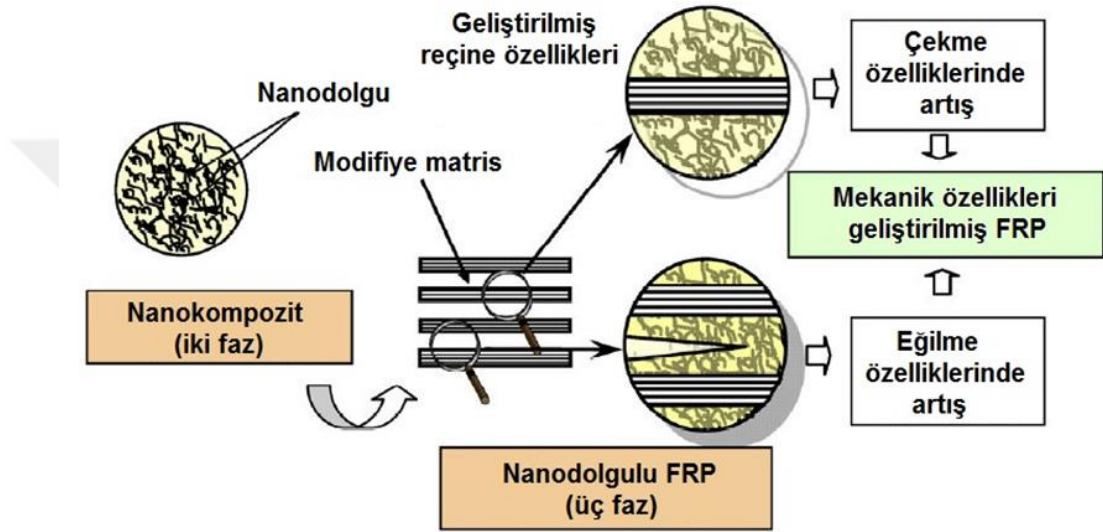
NKS nanoparçacıklarında polimer matris içerisine fiziksel yöntemler ile katılabilmektedir. Fiziksel karıştırma yöntemleri ile NKS nanoparçacıklarını polimer matris içerisine katmanın birçok avantajı vardır. Bunlar;

- Kolay proses edilişi,
- Çok yönlülüğü,
- Hızlı ve ekonomik oluşudur [74].

## **2.4 Elyaf Takviyeli Nanokompozitler**

Elyaf takviyeli kompozitlerde (FRP), mekanik özellikler yönünden yapılan malzeme tasarımlarında elyaf yönelimleri değiştirilerek istenilen doğrultularda yüksek mekanik özellikler oluşturulabilmektedir. Hem elyaf hemde nano boyutlu takviyenin bir arada bulunduğu kompozitler ele alındığında ise FRP'lerin "zayıf halkası" olarak nitelendirilen tabakalar arası bölgenin takviye edilmesi önem artırmıştır. Tabakalar arası bölge elyaf takviyesinin olmadığı matris yoğun bölge olup, kompozit malzemenin yaşam ömrü sırasında delaminasyon veya matris çatlaması gibi farklı mekanizmalar ile hasara uğrayarak kompozit malzemenin işlevini yitirmesine sebep olabilir [75].

Oldukça zayıf olan tabakalar arası bölge özellikleri, tabakalı kompozit sistemlerin genel performansını sınırlandırır. Bu bağlamda, nanodolgunar üstün özellikleri sayesinde; tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arası dayanımının iyileştirilmesi ve tabakalı kompozit malzemeleri hasara uğratmadan servis performansının artırılması konusunda önemli bir dolgu malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır [68]. Şekil 2.24'te elyaf takviyeli nanokompozit dizaynı yer almaktadır [76].



**Şekil 2.24:** Elyaf takviyeli nanokompozit dizaynı [76]

Elyaf takviyeli kompozit özelliklerinin nanodolgunarla geniştirilmesi birkaç faktör ile ilişkilendirilmektedir. Bunlar;

- Nanodolgunarın sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı matris özelliklerinin gelişmesi,
- Matris, nanodolgu ve elyaflar arasında sinerjik etki,
- Nanodolgu sayesinde elyaf-matris yapışmasının gelişmesidir [76].

Nanodolgu içeren elyaf takviyeli kompozitlerde, nanodolgunar ile polimer matris arasında morfolojik ve diğer özellikler bakımından yeni bir ara yüzey meydana getirmesi öngörülür. Yeni arayüzey bağlanması çoğunlukla nanodolgunar ile polimer matrisin kimyalarına bağlıdır. Nanodolgunar ile polimer matris arasında zayıf arayüzey bağlantısı olursa, bu nanodolgunar matris içerisindeki süreksiz elyaflar gibi davranırlar. Elyaf takviyeli nanokompozitler için en mühim gereklilik, kompozite

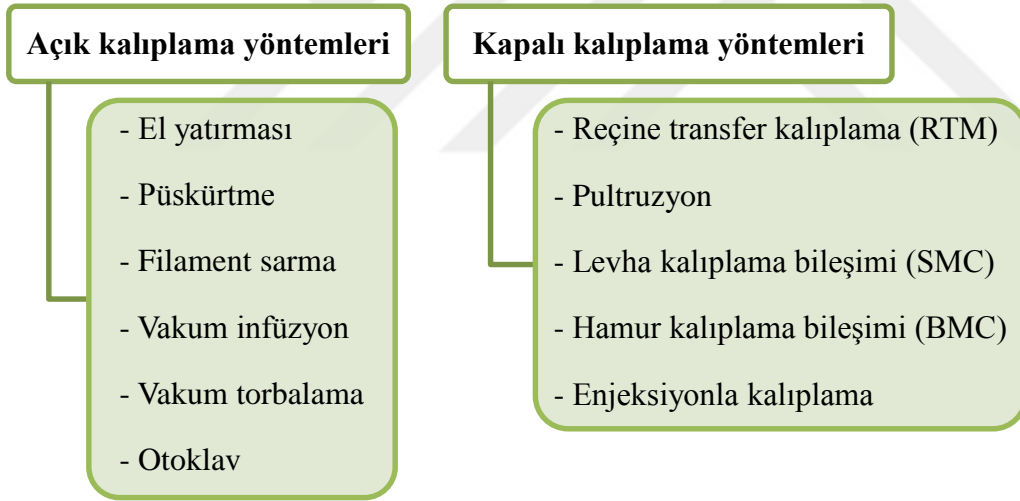
yük uygulandığında yükün matris tarafından etkin bir şekilde hem arayüze hemde elyaflara aktarılmasıdır [77].

Özetle elyaf takviyeli nanokompozitlerin performansını etkileyen en mühim iki faktör; nanodolguların matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması ve nanodolgular ile matris arasındaki arayüzey yapışmasıdır.

#### 2.4.1 Elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretim yöntemi; kullanılan elyafın çeşidine, kısa veya uzun olmasına, sürekli veya süreksiz oluşuna, yönlü olup olmamasına bağlı olarak değişebilir. Kullanılan reçinenin termoset veya termoplastik oluşu da üretim yöntemini etkilemektedir. Ayrıca üretilecek parçanın geometrisi ve üretim adedi de kullanılacak üretim yöntemini belirleyicidir [68].

Kompozit üretim yöntemleri temelde; açık ve kapalı kalıplama yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemler Şekil 2.25’de şematik olarak dizilmiştir.



Şekil 2.25: Kompozit malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması

Elde edilmek istenen özelliklerde ve şekilde elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi için birçok üretim yöntemi mevcuttur. Bunlardan bazıları önemli alt yapı yatırımı gerektirmektedir. Örnek verirse; filament sarma yöntemi ile içi boş silindirik kompozit ürün parçaların üretimi, otoklav kullanılarak yüksek mukavemetli yapısal sistemlerin üretimi yada pultrüzyon uygulaması ile sürekli formda levha ve profillerin üretimi alt yapı gerektiren ve teknik olarak da uygulanmaları daha zor olan üretim yöntemleridir. Fakat bazı kompozit üretim yöntemleri az alt yapı maliyeti ile kolaylıkla uygulanabilir hale getirilebilmektedir. Örneğin; vakum



torbalama yöntemi düşük maliyetli bir uygulama olmasının yanında, teknik olarak da uygulanması basit olan bir yöntemdir. Vakum torbalama yöntemi ile laboratuvar ortamında kolaylıkla kompozit malzemelerden yapısal elemanların üretilmesi mümkündür [18].

#### **2.4.1.1 Vakum Torbalama**

Vakum torbalama üretim yöntemi esas itibarı ile kumaş formundaki elyafların kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin elyaflar üzerine fırça rulo vb. takımlar ile dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Bu sistemde laminasyonu sıkıştırmak için atmosferik basınçtan yararlanılır. Vakum torbalama ile alışılmış elle yatırma yönteminin dezavantajları ortadan kaldırılarak daha dayanıklı ve hafif kompozit ürünlerinin üretimleri muhtemeldir.

Vakum torbalama; genelde bir tarafı kalıp yüzeyi diğer tarafı ise hava geçirmez naylon kaplamadan oluşur. Naylon malzeme, kalıbın üzerine yapıştırılarak içerideki ortamın hava geçirmezliği sağlanır. Bu esnada düzeneğin içindeki ve dışındaki hava basıncı birbirine eşittir. Sonrasında ise vakum pompası çalıştırılarak düzeneğin içindeki hava emilir ve ortamın vakum altında kalması sağlanır. Ortamdaki hava basıncı düştüğü için düzeneğin yüzeyinde atmosferik basınçtan dolayı bir baskı oluşur. Düzeneğin içindeki ve dışındaki basınç değerlerinin farkı ise laminasyon yüzeyine uygulanan baskı kuvvetini belirler. Teorik olarak ortamda yaratılabilecek maksimum vakum -1 atm dir. Bu da düzeneğin içindeki tüm havanın alınması ile sağlanır.

Atmosfer tarafından uygulanan basınç kuvveti elyaf ve reçine arasındaki havanın dışarı çekilmesini sağlamak ve bu sayede hava kabarcıklarından arınmış tabakalı bir yapı imalatını mümkün kılmaktadır. Nihayetinde üretilen tabakalı kompozit yapı içinde hava kabarcıklarının neden olduğu boşluklar en düşük seviyeye indirilmekte ve çatlak oluşma kaynakları yok edilerek yapının mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır.

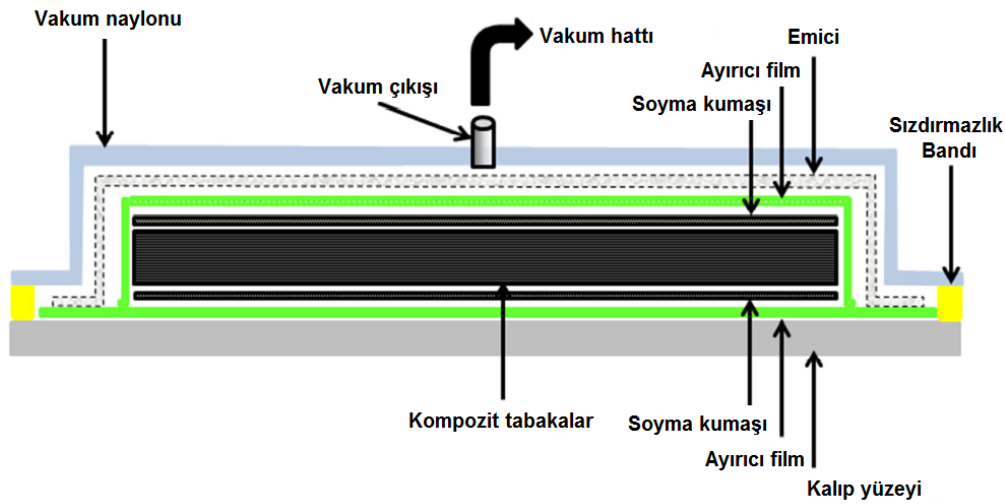
Vakum uygulaması sonunda tabakalı yapı içinde kalan fazla reçine dışarı çekilerek, yapının elyaf/reçine oranının daha yüksek olması sağlanmaktadır. Kompozit yapının sağlam bir şekilde işlevini sürdürebilmesi için elyafların reçine ile tam olarak ıslanması gerekir. Fakat reçine kırılğan bir malzeme olduğu için kompozit yapı içinde reçine oranının yüksek olması bütün yapının daha kırılğan olmasına sebep

olacaktır. Dolayısıyla, elyaf/reçine oranının yüksek olması vahıstasıyla bütün kompozit yapının kırılmalığı azalacaktır.

Vakum uygulaması esnasında katmanlar birbiri üzerine basacaklarından, katmanların yapışma mukavemeti daha güçlü olacaktır. Bir başka ifadeyle tabakalar arası kayma dayanımı artacaktır.

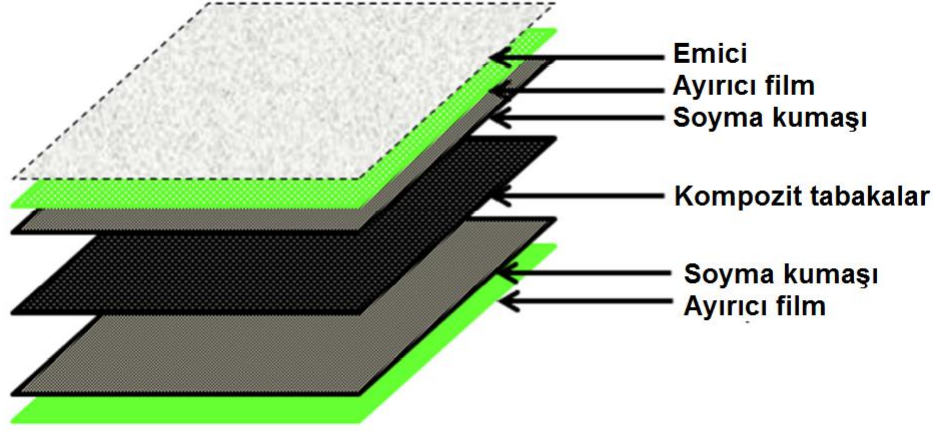
Vakum uygulaması sayesinde reçinenin tüm katmanlar arasına çok daha iyi yayılması ve bütün katmanlar içine tam olarak nüfuz edebilmesi sağlanmakta, bu sayede bütün bölgelerin reçineyle ıslatılmış olması garanti edilebilmektedir. Böylelikle daha homojen bir reçine dağılımı oluşturularak kompozit yapının mukavemetinin sayısal veya analitik yöntemler ile daha doğru olarak hesaplanabilmesine imkan tanımaktadır [18].

Şekil 2.26'da vakum torbalama yönteminin çizemsel gösterimi ve bu sistemde kullanılan temel birimler yer almaktadır.



Şekil 2.26: Vakum torbalama yönteminin çizemsel gösterimi [78]

Soyma kumaşı, emici, vakum torbası, ayırıcı film, sızdırmazlık bandı ve kalıp ayırıcı süreç öncesi kullanılan malzemelerdir. Malzemeler kirlenmelerden korunmuş olmalı ve reçinenin kurlenme sıcaklığı ile uyumlu olmalıdır. Bölüm 3'te bu malzemelerin kullanım amaçları detaylı şekilde anlatılmıştır.



Şekil 2.27: Vakum torbalama yönteminde kullanılan ana malzemeler [78]

## 2.5 Hibrid Kompozitler

Hibrid malzemelerin geçmişi tam olarak tanımlanamasa da eski dünyada organik ve inorganik komponentler karışımlarını varlığı bilinmektedir. Tarihsel kalıntılar binlerce yıl öncesinde inorganik pigmentler ve diğer inorganik ve organik komponentlerden hazırlanan boyaların kullanıldığını göstermektedir. Yani, hibrid malzemeler ve hatta nanoteknoloji, 20. yüzyılın sonuna ile 21. yüzyılın başlarında geliştirilmeye başlanan bir buluş olmaktan çok, yüzyıllardır var olan teknolojilerdir denebilir. Bilim adamlarının bu konulara eğilmeleri özellikle yeni fiziko kimyasal karakterizasyon metodlarının devreye girmesiyle başlamıştır.

Organik polimerlerde (kauçuk gibi) dolgu malzeme olarak inorganik malzemeler kullanırken inorganik ve organik malzemeler karışımları uygulamaya alınmıştır. İnorganik-organik hibridlerin üretimi kolay olduğundan malzeme kimyasının çeşitli dallarında uygulanır.

Birbirlerine benzemeyen malzemelerin herhangi bir kombinasyonu bir hibrid olarak düşünülebilir. Klasik bir örnek bir metal veya balpeteği veya sert bir plastik köpeğin (göbek), bazı yüksek performans FRP (fiber takvieli polimer) ince kabuklara bağlanmasıyla elde edilen yapısal malzemedir. Kabuklar yüksek yüzey gerilim ve sıkıştırma yükünü taşırlar, göbek hafiftir, yapısal kararlılığı sağlar. Diğer bir örnek olarak fiber takviyeli reçine laminatlarla alüminyum levhaların kombinasyonu gösterilebilir.

‘‘Hibrid malzeme’’ terimi geniş bir malzeme aralığını kapsayan pek çok farklı sistem için kullanılır; örneğin, yüksek kristalin yapıli koordinasyon polimerler, amorf sol-jeş

bileşikler, inorganik ve organik üniteler arasında etkileşimli veya etkileşimsiz malzemeler gibi. En geniş anlamda tanımlandığında, bir hibrid malzeme, moleküler skalada karıştırılmış iki pay (veya parça) içeren birer malzemedir. Genellikle bunlardan biri inorganik, diğeri organik yapıdadır. İnorganik ve organik kısımların bağlanmasındaki olası etkileşimlere göre hibrid malzemeler iki grup altında toplanır.

- Sınıf I Hibrid Malzemeler: iki faz arasında zayıf etkileşimler bulunur: van der waals, hidrojen bağları veya zayıf elektrostatik etkileşimler gibi.
- Sınıf II Hibrid Malzemeler: Bileşenler arasında kuvvetli kimyasal bağların olduğu hibrid malzemeler.

Kimyasal etkileşimlerin kuvveti kademeli olarak değiştiğinden zayıf ve kuvvetli etkileşimler arasında kararlı bir geçiş vardır; örneğin, zayıf koordinatif bağlardan daha kuvvetli hidrojen bağları olabilir. Bağlama enerjisine göre farklı kimyasal etkileşimlerin sınıflandırılması Çizelge 2.3. gösterilmiştir.

**Çizelge 2.3** : Farklı kimyasal etkileşimler ve kuvvetleri [19].

Etkileşim Tipi	Kuvvet, kJ/mol	Aralık	Karakter
Van der waals	50	Kısa	Seçici değil, yönsüz
H-bağı	5-65	Kısa	Seçici, yönlü
Koordinasyon bağı	50-200	Kısa	Yönlü
İyonik	50-250*	Uzun	Seçici değil
Kovalent	350	Kısa	Genellikle geri dönüşsüz

\*Solvent ve iyon çözeltiye bağlıdır; veriler organik ortam içindir.

İnorganik ve organik bloklar arasında kuvvetli bloklar arasında kuvvetli etkileşimler olmaması durumunda ‘blend’ler (harman veya karışım) oluşur. Tipik bir örnek olarak organik polimerlerle inorganik kümeler veya partiküller arasındaki kuvvetli (kovalent) etkileşim gösterilebilir. Bir inorganik ve organik ağ yapının kuvvetli kimyasal etkileşim olmaksızın ilişkilenebilmesi ‘interpenetrating ağ yapı (IPN)’ olarak tanımlanır. Örneğin, bir organik polimerde bir sol-jel malzemenin oluşması gibi. Bu iki örnek de sınıf-I hibridlere girer. Sınıf-II hibridler farklı inorganik yapı malzemelerinin organik polimerlere kovalent bağlarla bağlanmasıyla veya organik polimerlerin birbirleriyle kovalent bağlar oluşturmasıyla meydana gelir.

İnorganik-organik hibrid malzemeler ve inorganik-organik nanokompozitler arasında kesin bir sınır olmadığı söylenebilir. Organik veya inorganik yapısal ünitelerden birinin boyutunun 1-100 nm aralığında olması halinde ‘nanokompozit’ terimi

kullanılmaktadır; hibrid malzemeler ve nanokompozitler arasında kademeli geçiş olduğu söylenebilir. Çünkü, hibrid malzemelerde kullanılan büyük yapı blokları (inorganik clusterler gibi) nanometre skalada da yapılabilir. Nanokompozitlerde kullanılabilen nanopartiküller, nanoçubuklar ve kil mineralleri galerileri tipik inorganik ünitelerdir[19].

### **2.5.1.1 Tek bir malzemede inorganik/organik bileşenler**

Tek bir matris içinde iki veya daha fazla tür fiberin bir araya getirildiği kompozitler ‘‘hibrid’’, veya ‘‘hibrid kompozit’’ olarak tanımlanır. Hibrid fiber kompozitler iki veya daha fazla farklı doğal veya doğal ve sentetik fiberler karışımı içerebilir.

İnorganik-organik hibridlerin en görünür avantajı inorganik ve organik maddelerin ayrı ayrı özelliklerinin tek bir malzemede bir araya getirilmesidir. Bunun için pek çok olası kombinasyon bulunduğundan alan çok geniştir. Bu alandaki diğer bir itici güç de multifonksiyonel malzemelere olan taleplerdir. Örneğin, spesifik optik, elektronik veya magnetik özelliklerdeki inorganik clusterler veya nanopartiküllerin organik polimer matrislerde bir araya getirilmesi gibi.

Hibrid malzemelerin özellikleri moleküler skaladaki kompozisyonun modifikasyonu ile önemli derecede değişir. Örneğin, malzemenin hidrofobik özelliğinin yüksek olması istendiğinde, hidrofobik moleküler komponentlerin miktarı artırılır. Sol-jel malzemelerde bu yöntem oldukça başarılıdır. Kısmen veya tamamen fluorlanmış moleküllerin bulunması durumunda hidrofobik ve litofobik malzemeler elde edilebilir. Dayanıklılık ve çizmeye direnç gibi mekanik özellikler polimer matrise ser inorganik nanopartiküller ilavesiyle sağlanır[19].

### **2.5.1.2 Hibrid nano/mikro kompozitler**

Konvensiyonel yapısal kompozitlerden polimer matris kompozitler, polimerik bir matrisin, örneğin sürekli cam veya karbon fiberlerle takviye edilmesiyle hazırlanır. Performans özellikleri genellikle iyidir; ancak polimerik matris nedeniyle bazı zayıf noktalar vardır. Matrisin etkin olduğu mekanik özellikler (düzlem içi ve interfaminal shear özellikleri ve sıkıştırma kuvveti gibi), fiberlerin etkin olduğu özelliklerden daha düşüktür. Bu özellikler matrise nanopartiküller, nanolevhalar veya nanotüpler ilavesiyle geliştirilebilir. Bu amaçlarla özel proses metotları geliştirilmiştir ve araştırmalar devam edilmektedir.

Hibrid kompozitler, içerdği her bir komponentin avantaj ve dezavantajlarını olumlu yönde dengeleyici bir davranış sergiler. Malzeme tasarımının doğru yapılmasıyla fiberler istenmeyen bir özelliği aralarında giderirler. Hibrid kompozitin özellikleri fiberlerin miktarına, her tip fiberin uzunluğuna, oriyantasyonuna, fiberlerin karışabilmelerine, fiber-matris bağlanmasına bağlıdır. Kuvvetli her fiberin gerinim (strain) çökmesine göre değişir; fiberlerin gerinimlerinin yüksek seviyede uyumlu olması istenir.

İki bileşenden oluşan bir hibrid sistemin özellikleri karışma kuralıyla tarif edilebilir.

$$P_H = P_1V_1 + P_2V_2$$

$P_H$  hibridin,  $P_1$  birinci sistemin,  $P_2$  de ikinci sistemin özellikleridir;  $V_1$  ve  $V_2$  birinci ve ikinci sistemin relatif hibrid hacim fraksiyonlarıdır.

$$V_1 + V_2 = 1$$

Pozitif veya negatif hibrid etki, bazı mekanik özelliklerin karışma kuralından pozitif veya negatif sapması olarak tanımlanır. Hibrid etkisi terimi, iki veya daha fazla tipte fiber içeren bir kompozitin özelliklerindeki görünür sinerjetik gelişmişliği tanımlamak için kullanılmaktadır. Hibrid kompozitlerin dizaynında üretilmesinde en önemli konu uygun fiberlerin seçimi ve bunların özelliklerinin seviyelerini saptanmasıdır. Hibrid kompozitlerin başarısı fiber / matris sisteminin kimyasal, mekanik ve fiziksel kararlılığına bağlıdır.

Cam, karbon ve boron gibi konvansiyonel fiberler oldukça pahalıdır ve genellikle havacılık endüstrisinde kullanılır. Bu nedenle de hibrid fiber bazlı polimer kompozitlerde doğal fiber takviye malzemelerin kullanılmasına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir[19].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1 Malzemeler

Bu tez çalışmamızda takviye elemanı olarak 300 gr/m<sup>2</sup> alansal yoğunluğa sahip çift yönlü (0°-90°) kıvrımsız cam elyaf ve karbon elyaf kumaşları kullanılmıştır. Her bir filament 800 tex-12K olup, kumaşlar Telateks A.Ş.- Metyx Composites firmasından temin edilmiştir..

Matris sistemi olarak kullanılan epoksi reçine Gurit firması ürettiği *Prime 20LV* ticari adlı DGEBA esaslı epoksi reçinedir. Düşük viskoziteli (640-600 cP) olan bu reçine iki bileşenli olup poliamin esaslı sertleştiricisi (kürleştiricisi) ile birlikte kullanılmaktadır. Epoksi reçine ve sertleştirici oranı ağırlıkça 100:24'tür. Sertleşme reaksiyonu oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olur ve jelleşme zamanı yaklaşık 1 saattir.

Reçine sistemini modifiye etmek için kullanılan nanodolgu olarak *Alberta Üniversitesi* tarafından üretilen Nanokristalin selüloz (NKS)dur.

#### 3.2 Cihazlar

##### Manyetik karıştırıcı

Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan Wisd Wister markalı karıştırıcı ile NKS dolguları reçine ile karıştırılmıştır .



Şekil 3.1 : Manyetik karıştırıcı cihazı

### Ultrasonik homojenizatör (Ultrasonikasyon)

Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan *BANDELIN UW 2000* uçlu ultrasonik homojenizatör NKS/epoksi karışımlarının hazırlanmasında kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Ultrasonikasyon cihazı

### Etüv fırını

Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan ELEKTRO-MAG M420P etüv fırını ile epoksi matrisli nanokompozitlerin ve elyaf takviyeli kompozitlerin ilave kürleme (post-cure) işlemlerinde kullanılmıştır. DGEBA esaslı epoksi reçinenin teknik bilgi formunda (TDS) ek kürleme işlemi 50 °C sıcaklıkta 16 saat şeklinde belirtilmiştir.



Şekil 3.3 : Etüv fırın cihazı



### **Elektromekanik test cihazı**

Hazırlanan test numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan çekme, eğme ve düzlem içi kayma testleri Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan *Zwick/Roell Z020 (20kN)* elektromekanik test cihazında yapılmıştır.



**Şekil 3.4 :** Elektromekanik test cihazı

### **İzod darbe cihazı**

Oluşturulan numunelerin darbe dayanımı testleri Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan *INSTRON Ceast 9050* test cihazında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.5 :** İzod darbe test cihazı

### **Diferansiyel taramalı kalorimetre**

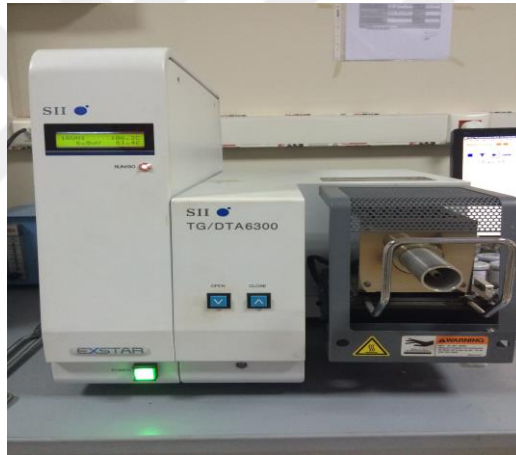
NKS/epoksi nanokompozitlerin ısı geçişlerinin tespitinde Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan *SEIKO EXSTAR DSC 7020* cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.6 : DSC test cihazı

### **Termogravimetrik analiz**

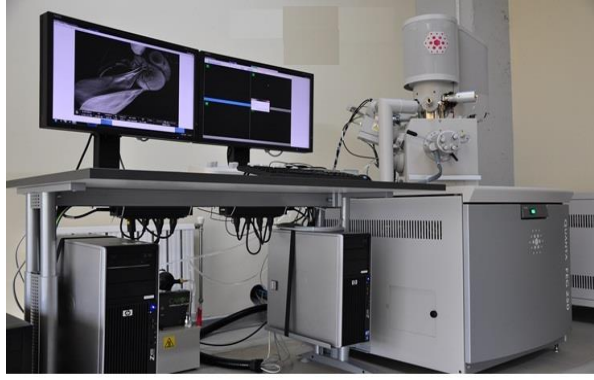
NKS/epoksi nanokompozitlerin ısıl bozunma sıcaklıklarının ve kül miktarlarının tespitinde Yalova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarlarında bulunan *SEIKO EXSTAR TG/DTA 6300* cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.7 : Termogravimetrik analiz cihazı

### **Taramalı elektron mikroskobu**

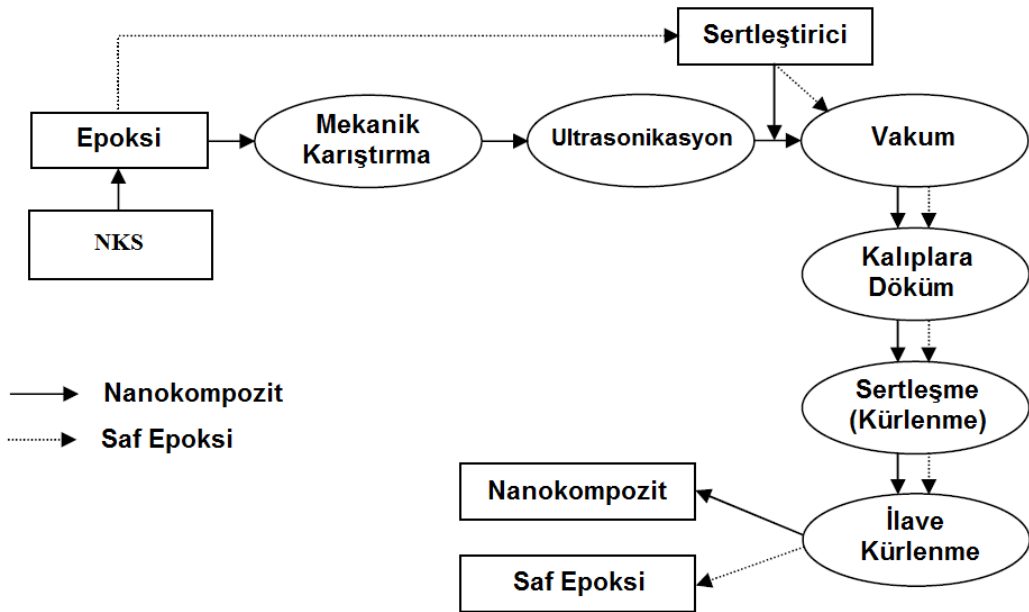
NKS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini daha iyi anlaşılması adına taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Namık Kemal Üniversitesi Merkez laboraturunda bulunan QUANTA FEG 250 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8 : SEM cihazı

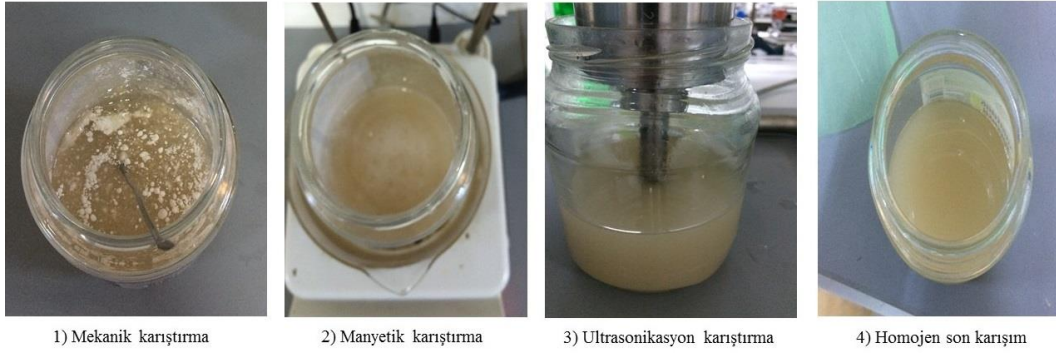
### 3.3 NKS Modifiye Epoksi Sistemlerin Hazırlanması

Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli nanokompozitler hazırlanmadan ilk olarak epoksi matris içerisine katılacak ideal NKS oranının belirlenmesi için % 1, 2, 4 ve 6 oranlarında NKS/epoksi nanokompozitleri ve şahit numune (saf epoksi) Şekil 3.9'daki şemaya göre hazırlanmıştır.



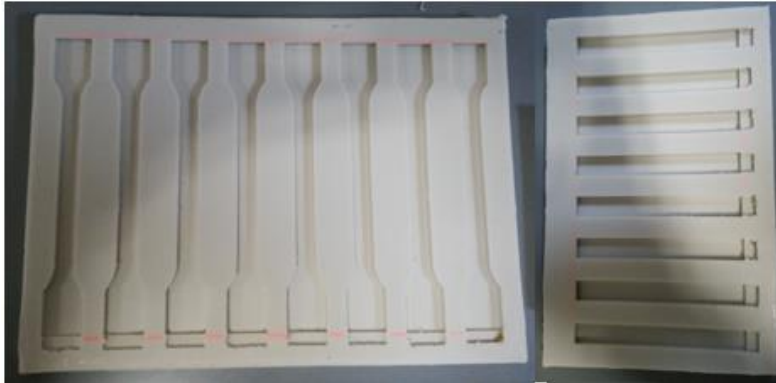
Şekil 3.9 : NKS/epoksi nanokompozitlerin ve saf epoksinin oluşturulma aşamaları

Hassas terazide hazırlanan NKS/epoksi karışımı manyetik karıştırıcıda 500 rpm hız ve 50 °C'lik sıcaklıkta 20 dakika süresince karıştırılmıştır. Ardından ultrasonikasyon cihazıyla 1,5 dakika muamele görmüştür.



**Şekil 3.10 : NKS/epoksi karışımının hazırlama aşamaları**

Yüksek hızlı ses dalgaları etkisi sonucu ısınan karışım oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra içerisine sertleştiricisi ilave edilmiştir. Sertleştiricisi ile karıştırılan epoksidede hava kabarcıkları oluştuğu için kısa bir süreli vakum altında tutulmuştur. Oluşturulan NKS/epoksi sistemlerinin mekanik karakterizasyonlarının yapılması amacıyla ISO 527-2 ve ISO 178 standartlara uygun hazırlanan silikon kalıplara dökülmüştür.



**Şekil 3.11 : Çekme ve eğme testleri için oluşturulan silikon kalıplar**

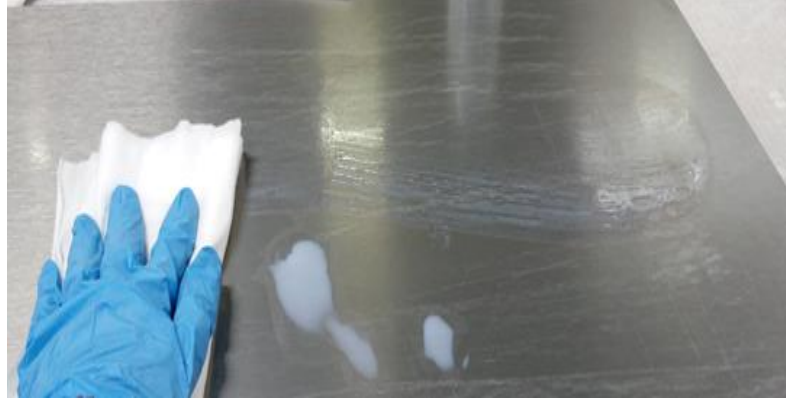
### 3.4 Kompozit Test Plakaların Üretimi

Epoksi matris içerisine katılacak ideal NKS oranı; mekanik ve termal karakterizasyonlar sonucu belirlendikten sonra ayrı ayrı cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli nanokompozitler ve şahit numune olarak NKS nanodolgunu içermeyen kompozitler hazırlanmıştır. Vakum torbalama yöntemi ile üretilen kompozit test plakalarının uygulama aşamaları şu şekildedir.

#### 1) Kalıp ayırıcı uygulaması

Yüksek yapışma özelliğine sahip epoksi reçinenin kalıp yüzeyine yapışmaması ve süreç sonunda üretilen tabakalı kompozit yapının kalıp üzerinden kolayca

alınabilmesi için uygulama öncesi kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı sürülür. Su bazlı sıvı kalıp ayırıcı pamuklu bez ile birkaç kat şeklinde kalıp yüzeyine uygulanır.



**Şekil 3.12** : Kalıp ayırıcının kalıp yüzeyine uygulaması

### **2) Kalıp çevresine sızdırmazlık bandı yapıştırılması**

Sızdırmazlık bandı; vakumun yapılacağı alanı belirlemek için kalıp köşelerini çevrelemede kullanılan ve üzerine vakum torbasının yapıştırıldığı ısıya dayanıklı sızdırmazlık sağlayan yardımcı malzemedir.

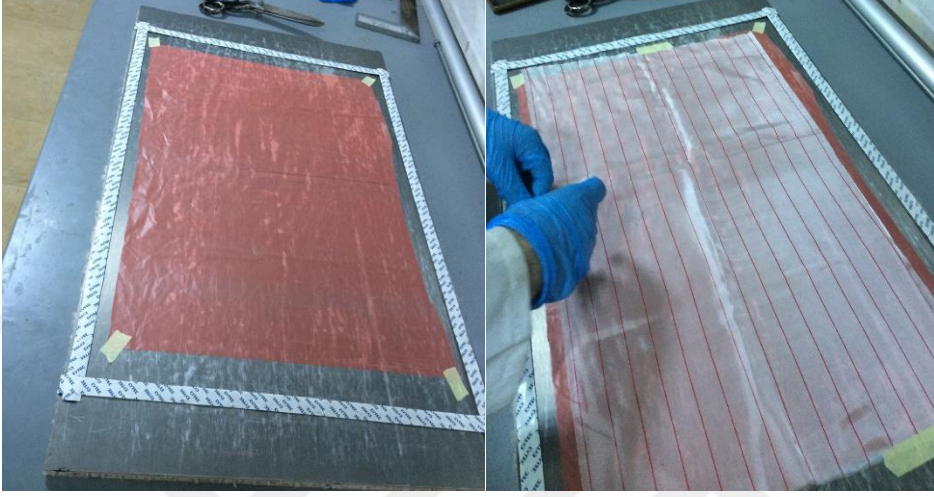


**Şekil 3.13** : Kalıp çevresine sızdırmazlık bandı uygulaması

### **3) Ayırıcı film ve soyma kumaşı serimi**

Ayırıcı film; soyma kumaşından önce kompozit laminatın altına ve üstüne yerleştirilen ince film şeklinde bir malzemedir. Kullanım amacı, kürleşme sırasında uçucu gazların ve fazla reçinenin laminatın yüzeyinden uzaklaştırılıp “emici” ye geçmesini sağlamaktır [36].

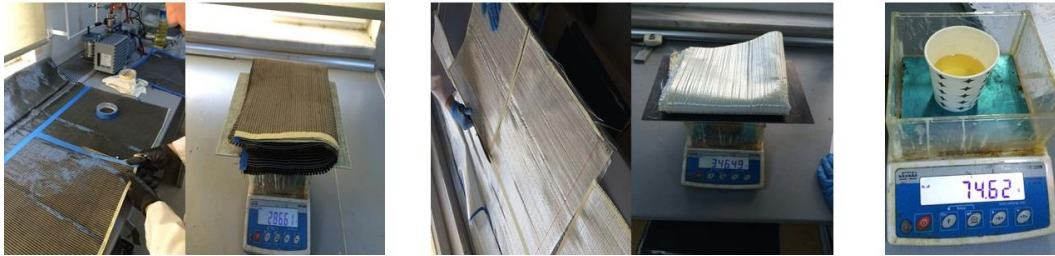
Soyma kumaşı; isteğe bağlı olarak kompozit laminatların üstünde ve/veya altında kullanılır. Genel olarak dokunmuş naylon, polyester veya cam yünü kumaştan üretilirler. Kullanım nedeni elde edilecek kompozit parça üzerinde tekstüre (aşınmış) yüzey oluşturup yapılacak olası bir yüzey işlemi (yapıştırıcı, astar, boya, vernik vb.) öncesi yüzeyin hazır bir şekilde üretilmesidir.



Şekil 3.14 : Ayrıcı film ve soyma kumaşı serim işlemi

#### 4) Elyafların ve reçinenin hazırlanması

Yapılan ön çalışmalar sonucu test standartlarına uygun 2 mm plaka kalınlığının vakum torbalama yöntemi ile elde edilebilmesi için 5 kat CLT 300 karbon elyaf kumaşı ve 6 kat CLT 300 cam elyaf kumaşı kullanılması gerekliliği belirlenmiştir. Bu laminasyon planına göre elyaflar kesilerek hazır edilmiş ve tartılmıştır. Vakum torbalama yöntemi için elyaf ile reçine oranı 1:1 yada 1:1,5 şeklinde önerilen bu orana göre Bölüm 3.3'te anlatılan yöntemeye uygun NKS/epoksi ve saf epoksi reçine sistemleri oluşturulmuştur.

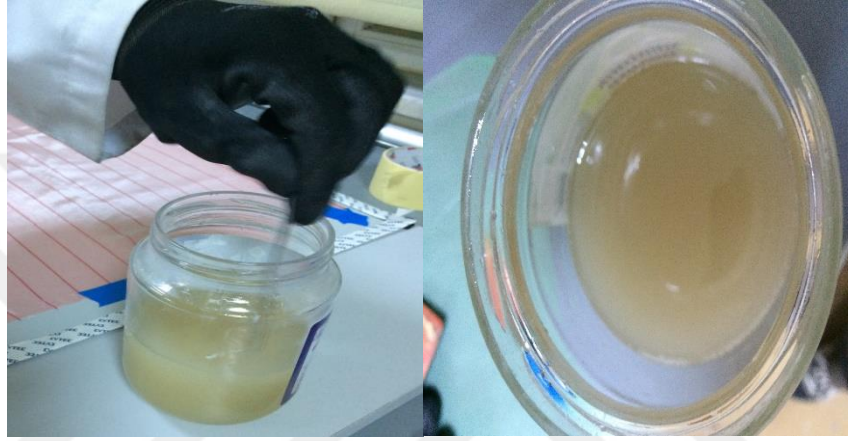


Şekil 3.15 : Cam ve Karbon elyafların ve reçinenin hazırlanması

#### 5) El yatırması uygulaması

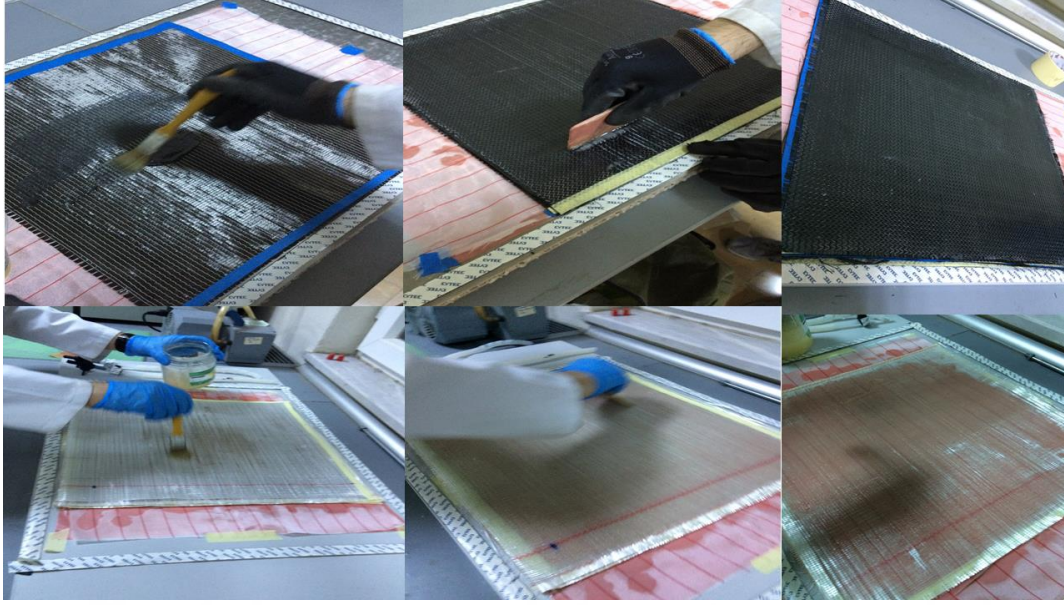
Epoksi gibi yüksek sertleştirici oranına (%20-30) sahip reçinelerde karışımı ortalama 3-4 dakika karıştırmak gerekmektedir. Karıştırma sırasında oluşan hava

kabarcıklarının laminat içerisinde kalıp zayıf kısımlar oluşturmaması için reçine kısa süreli vakum altında bırakılır. Karıştırma işleminden sonra uygulamayı yapmamız için önümüzde belirli bir süre vardır. Bu zamanın sonunda reçine polimerizasyon reaksiyonundan dolayı jelleşmeye başlayacak ve elyafları ıslatamayacaktır. Bu sebeple reçine jelleşmeye başlamadan uygulayıcının uygulamayı tamamlayıp sistemi vakum altına alması zorundadır. Kullandığımız *Gurit Prime 20LV* ürününün jel süresi oda sıcaklığında ortalama 1 saat olup bu uygulama için yeterli kadar bir süre vardır.



**Şekil 3.16 :** Reçine ve sertleştiricisinin karıştırılması

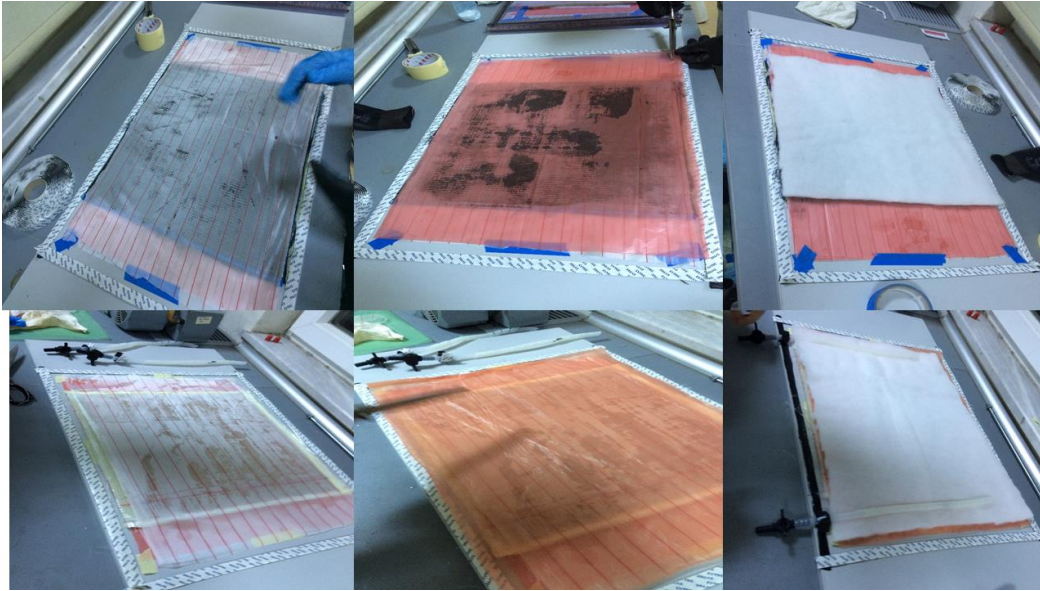
Vakumun ardından hazırlanan reçine bir fırça yardımıyla ilk kat elyafın üzerine sürülür. Bu kısımda önemli olan elyafları yeterli miktarda reçine ile ıslatmaktır. Aşırı reçineli elde edilecek kompozitin mukavemetini olumsuz etkileyecektir. Her kat yeterli miktarda elyaf ile ıslatıldıktan sonra plastik bir kama yardımıyla fazla reçine kenarlara doğru sıyırılmalıdır.



**Şekil 3.17 :** Cam ve karbon elyaf katlarının reçine ile ıslatılması

#### **6) Soyma kumaşı, ayırıcı film ve emici uygulaması**

Elyaf katlarının önce soyma kumaşı ardından ayırıcı film uygulanır. Sonrasında ise emici adı verilen tekstil malzemesi en üst kata serilir. Bu malzemenin kullanılmasının nedeni; düzenek vakum altına alındıktan sonra tabakalı kompozit yapıdaki fazla reçinenin emilimini sağlamaktır.



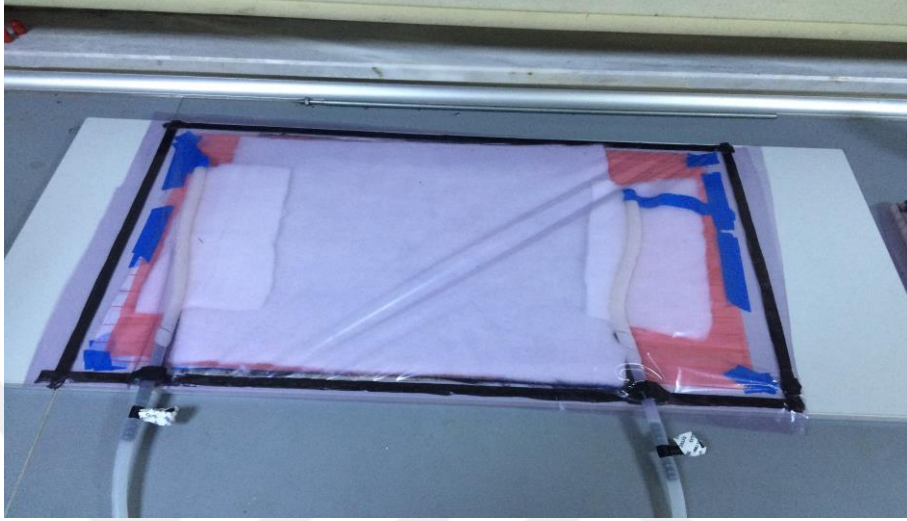
**Şekil 3.18 :** Soyma kumaşı, ayırıcı film ve emici uygulaması

#### **7) Vakum Bağlantılarının Yapılması ve Vakum Naylonunun Serilmesi**

Oluşturulan düzenek üzerinde T bağlantı parçası, hortum ve vana gibi yardımcı ekipmanlar kullanılarak vakum bağlantısı yapılır. Vakum bağlantı ayarları



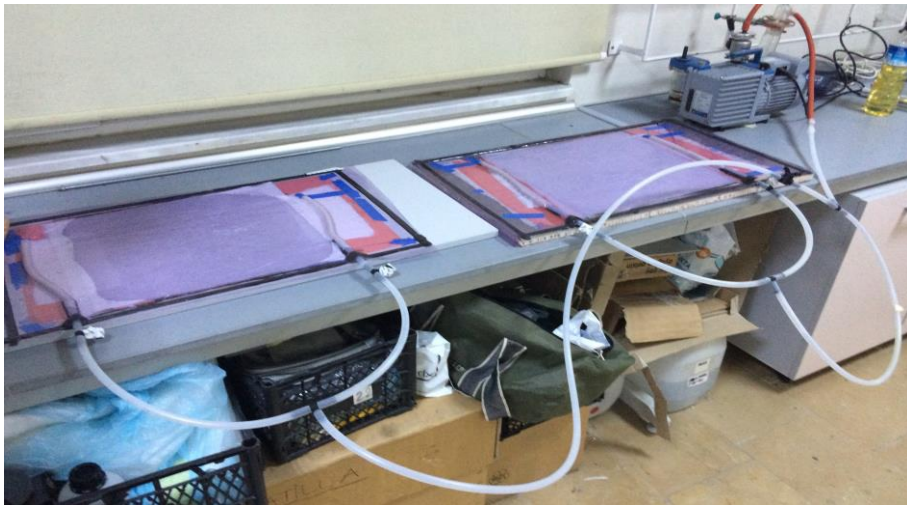
tamamlandıktan sonra sızdırmazlık macununun koruyucu kağıtları sökülerek vakum naylonu titiz bir şekilde sistem üzerine serilir ve macun ile yapıştırılır. Böylelikle kompozit parçanın olduğu bölge kapalı bir alan içerisine alınmış olur. Sistemde vakum naylonu bir üst kalıp görevi görmektedir. Macunlar üzerine baskı yapılarak sızdırmazlığın tam olarak sağlandığına emin olunmalıdır.



**Şekil 3.19** : Sistemin vakum naylonu ile kapatılması

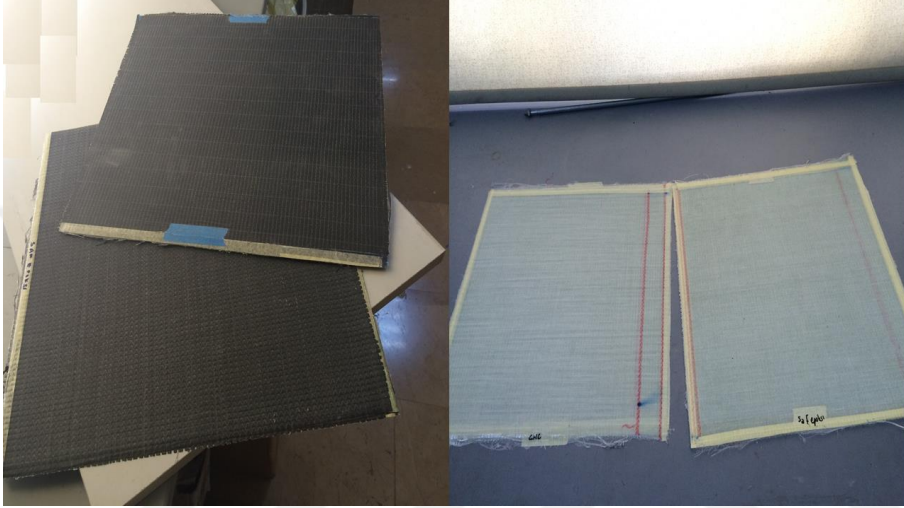
#### **8) Sistemin Vakum Altına Alınması**

Hazırlanan sistem bir vakum pompasına bağlanarak düzenek vakum altına tutulur. Böylelikle 1 atm'lik basınç kuvveti varlığında düzenek içerisindeki reçinenin sertleşmesi gerçekleşir. Ek olarak vakum etkisinden nedeniyle el yatırması uygulaması esnasında kompozit parça içerisinde kalan hava ortamdan uzaklaştırılır ve fazla reçine emici tarafından emilir.



**Şekil 3.20** : Sistemin vakum altına alınması

Kullanılan reçinenin TDS'inde kürleşme süresi verilmektedir. Bu süre esnasında sistemin vakum altında kalması önerilmektedir. Uygulama sonunda oluşacak ürün yüksek elyaf/reçine oranına sahip ve içeriğinde hava kabarcığı bulunmaksızın üretilmiş olacaktır. Böylece oluşturulan kompozit malzeme daha üstün mekanik özellikler sahip olacaktır. Kürleşmesi bittikten sonra sistem vakum düzeneğinden sökülür ve kompozit parça ek bileşenlerinden (soyma kumaşı, ayırıcı film, emici) ayrılarak nihai ürün üretilmiş olur.

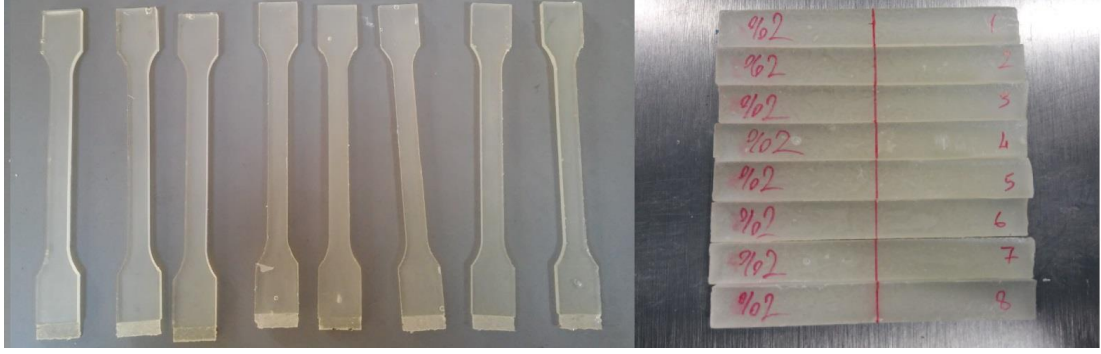


**Şekil 3.21** : Üretilen cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozit test plakası

### **3.4 Mekanik Karakterizasyon**

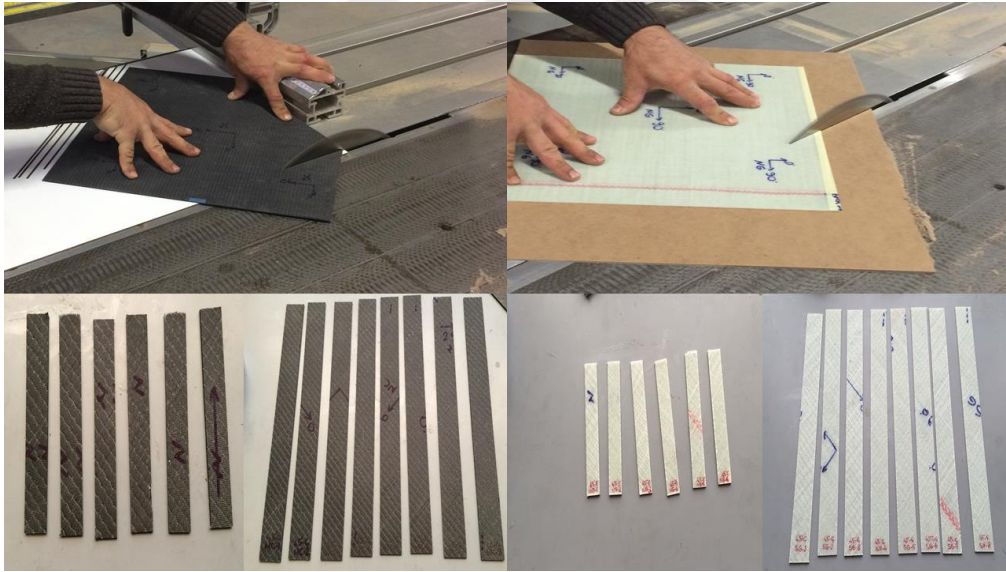
NKS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması sırasında ideal NKS besleme oranı tespit edilmiştir. Cam ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla elektro mekanik karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır.

Tüm mekanik testler için numune boyutları, test hızları ve test ekipmanı ayarları ilgili standartlara bağlı kalınarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her numune grubu için en az 5 numune test edilmiş olup bunların aritmetik ortamları kullanılmıştır. NKS/epoksi nanokompozitleri için yapılan çekme ve üç nokta eğme testleri için numuneler silikon kalıplara reçine dökümü şeklinde elde edilmiştir.



**Şekil 3.22 :** NKS/epoksi nanokompozitleri için mekanik test numuneleri

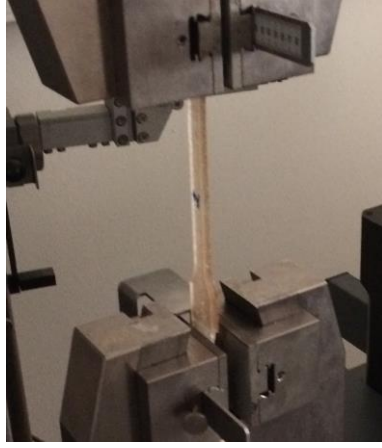
Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi tabakalı kompozitler ve şahit numune için yapılan; düzlem içi kayma, üç nokta eğme ve darbe dayanımı testlerinde kullanılacak numuneler ise elmas uçlu yatar testere ile test standartlarına uygun boyutlarda kesilerek oluşturulmuştur. Testler yapılmadan öncesi tüm numunelerin sivri köşeleri gerilim birikimlerine sebebiyet vermemek adına 150'lik kum zımparasıyla düzeltilmiştir.



**Şekil 3.23 :** Cam ve karbon kompozit test numunelerinin hazırlanması

### 3.4.1 Çekme testi

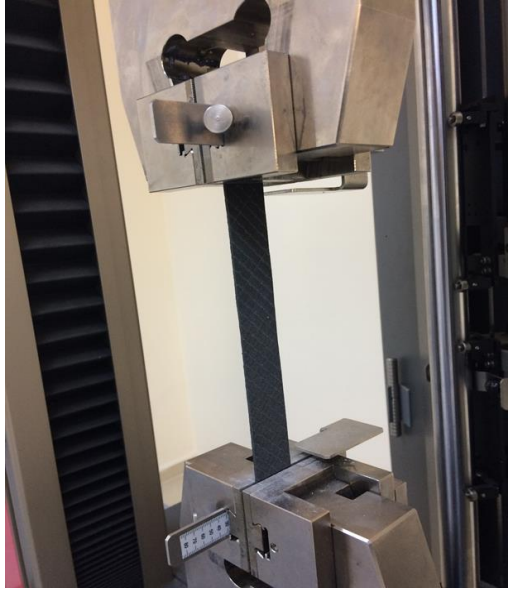
NKS/epoksi nanokompozitlerine yapılan çekme testleri ISO 527-2 standartına uygun gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.24** : NKS/epoksi nanokompozit numunesi çekme testi

### 3.4.2 Düzlem içi kayma testi

Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozitleri ve şahit numune için düzlem içi kayma testleri, ISO 14129 (Elyaf takviyeli plastik kompozitlerde düzlem için kayma gerilimi/gerinimi, kayma modülü ve dayanımının  $\pm 45^\circ$  lik çekme deneyi metodu ile belirlenmesi) standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 250x50 mm olup, elyaf yönlenmesine  $45^\circ$  lik açı oluşturacak şekilde hazırlanmıştır.

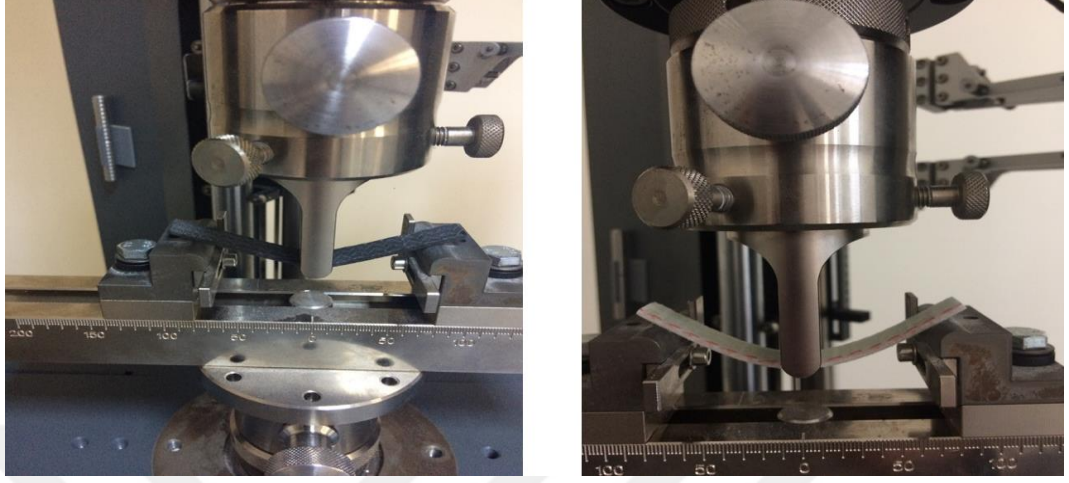


**Şekil 3.25** : Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozit numunesi düzlem içi kayma testi

### 3.4.3 Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testleri; NKS/epoksi nanokompozitleri için ISO 178 standartına, cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozitleri için ise

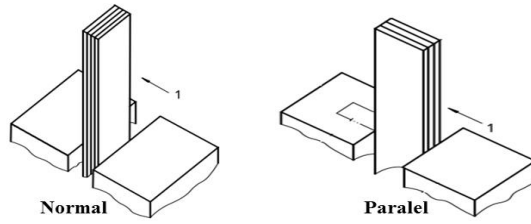
ISO14125 standartına göre yapılmıştır. Elyaf takviyeli kompozitler için elyaf yönelimleri dikkate alınarak; 0°, 90° ve 45°'lik açılarda numunelerin testleri yapılmıştır.



**Şekil 3.26 :** Cam ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozit numuneleri üç nokta eğme testi

#### 3.4.4 İzod darbe dayanım testi

Çentiksiz izod darbe testleri; NKS/epoksi nanokompozitleri için ISO 180 U standartına, cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozitleri için ise ISO 1268 standartına göre yapılmıştır. Standartta gösterildiği gibi çentiksiz izod darbe testi kompozitlere paralel ve normal olarak iki ayrı şekilde uygulanmıştır.



**Şekil 3.27 :** Çentiksiz izod darbe testinde kompozitlere normal ve paralel test uygulaması

### **3.5 Isıl Karakterizasyon**

Isıl karakterizasyon; bir malzemenin kontrollü şekilde ısıtılması ya da soğutulması sırasındaki fiziksel özellik değişimlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldüğü ve yorumlandığı bir grup tekniktir. Termal analiz sisteminde maddenin ağırlık kaybı, dönüşüm sıcaklıkları ve enerjileri, boyut değişimleri ve viskoelastik özellikleri gözlenir [13].

Bu tez çalışmamızda NKS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması sırasında ideal NKS yüklemesini belirlenmiş ve NKS içeriğinin ısıl özellikleri ne şekilde etkilediğini görmek sebebiyle diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) yöntemleri kullanılmıştır.

#### **3.5.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre**

Ağırlıkları 3 ile 5 miligram arasında hazırlanan NKS/epoksi örnekleri, yumuşama sıcaklıklarının belirlenebilmesi için 10 °C/dk ısıtma hızında, oda sıcaklığından 300°C'ye azot akışı (50 cc/dk) altında ısıtılmıştır.

#### **3.5.2 Termogravimetrik analiz**

Bu çalışmamızda NKS/epoksi malzemelerin sabit ısıtma hızında kütle azalışı, TGA yöntemi ile sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak araştırılmıştır. 2-4 miligram arasında hazırlanan NKS/epoksi numuneler, 10 °C/dak, ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 800 °C'ye azot akışı (1,5 cc/dk) altında ısıtılmıştır.

### **3.6 Mikroyapı Karakterizasyonu**

NKS nanodolgununun, cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini tartışabilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

### 3.6.1 Taramalı elektron mikroskobu

Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli (şahit numune) ve NKS/epoksi matrisli tabakalı kompozit numunelerin mekanik testler sonrası hasar alan bölgeler SEM ile araştırılmıştır. 3 kV hızlandırma voltajı ile ikincil elektron görüntüsü alınan numunelere iletkenlik kazandırmak amacıyla numune yüzeyleri inceleme öncesinde *AGAR Sputter Coater* kullanılarak 30 saniye boyunca altın ile kaplanmıştır.







## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

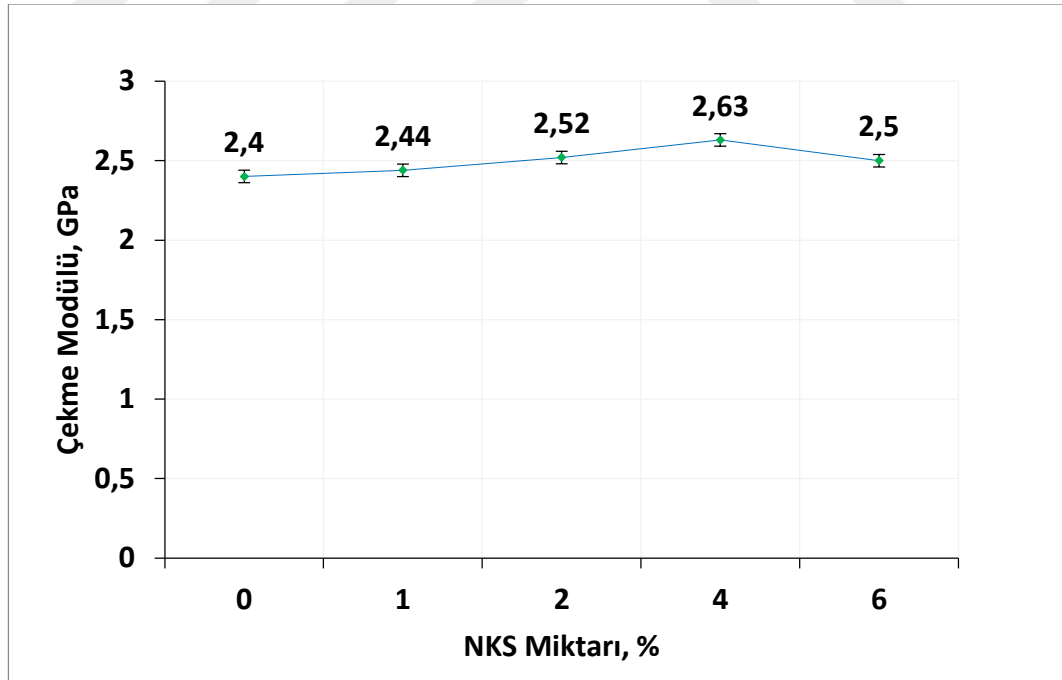
### 4.1 Optimum NKS/Epoksi Oranının Belirlenmesi

Epoksi matris içerisine katılacak optimum NKS oranını belirlemek amacıyla hazırlanan %1, 2, 4 ve 6'lık NKS/epoksi nanokompozit numunelerin çekme, üç nokta eğme ve İzod darbe dayanım testleri ile mekanik özellikleri, DSC ve TGA analizleri ile ısıl özellikleri incelenmiştir.

#### 4.1.1 Çekme özellikleri

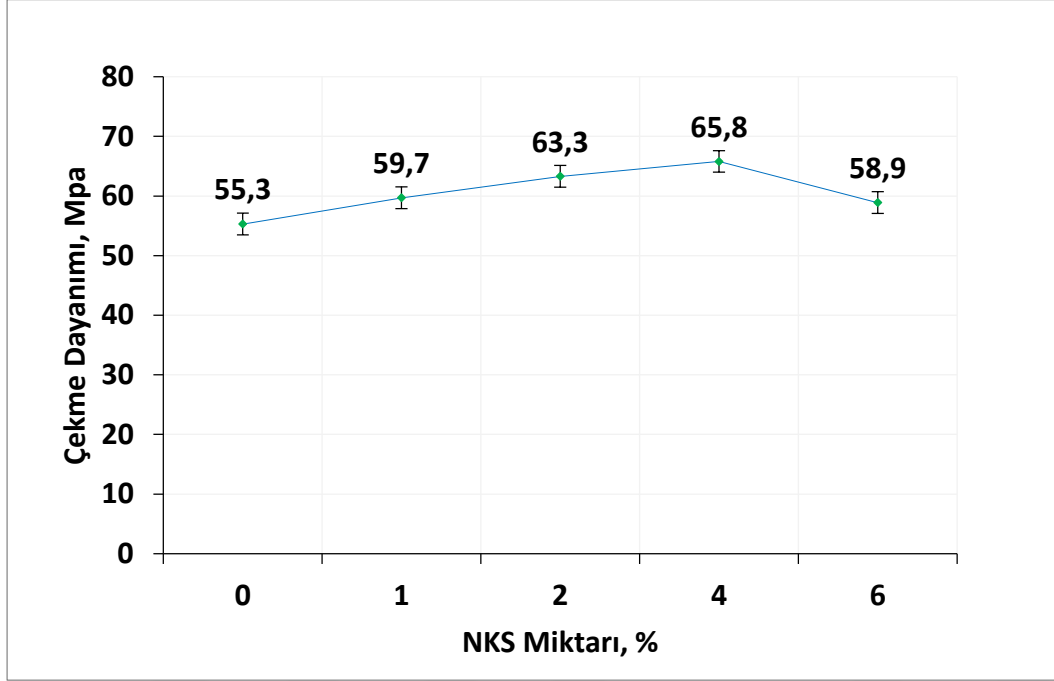
NKS nanodolgu miktarının DGEBA esaslı epoksi reçinenin çekme özelliklerine etkisi Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de gösterilmiştir.

NKS nanodolgu miktarının DGEBA esaslı epoksi reçinenin çekme özelliklerine etkisi Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de gösterilmiştir.



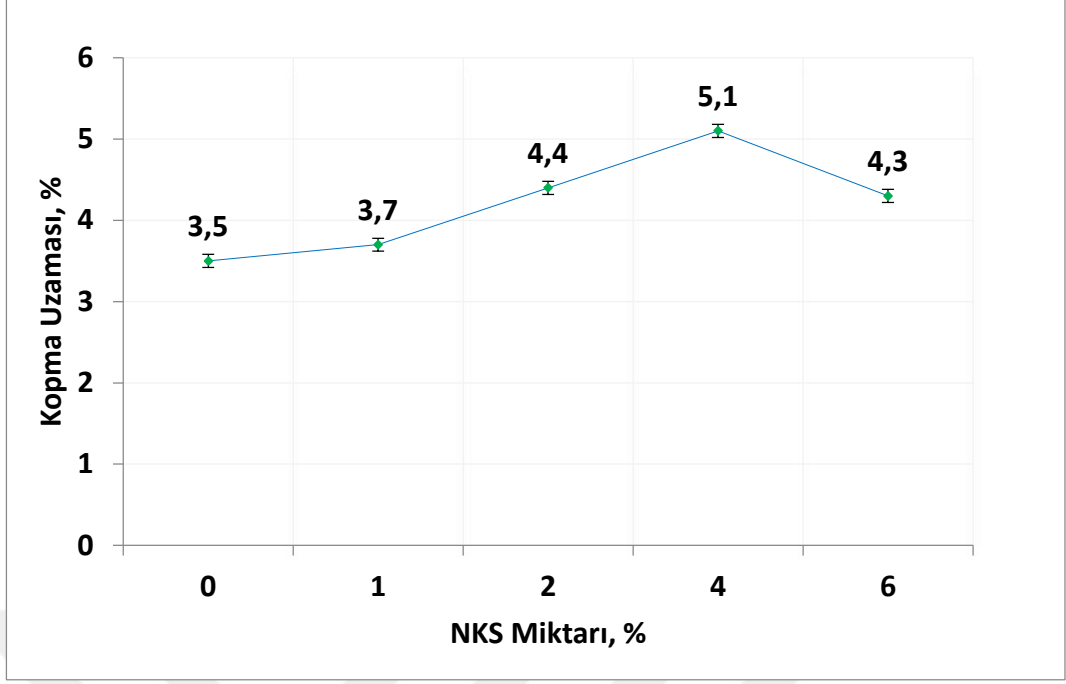
Şekil 4.1 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin çekme modülüne etkisi

%1, 2 ve 4 'lük NKS yüklemelerinde nanokompozitlerin çekme modülünde sırasıyla %1,66, 5 ve 9,6 'lık artış sağlanırken, %4'den daha fazla olan yüklemelerde düşüşler gözlenmiştir. Çekme dayanımında ise benzer şekilde %1'lik, 2'lik ve 4 'lük yüklemelerde sırasıyla %8, 14,5 ve 19'lük artışlar görülürken %4'den daha fazla olan yüklemelerde çekme dayanımı azalmıştır.



**Şekil 4.2 :** NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımına etki

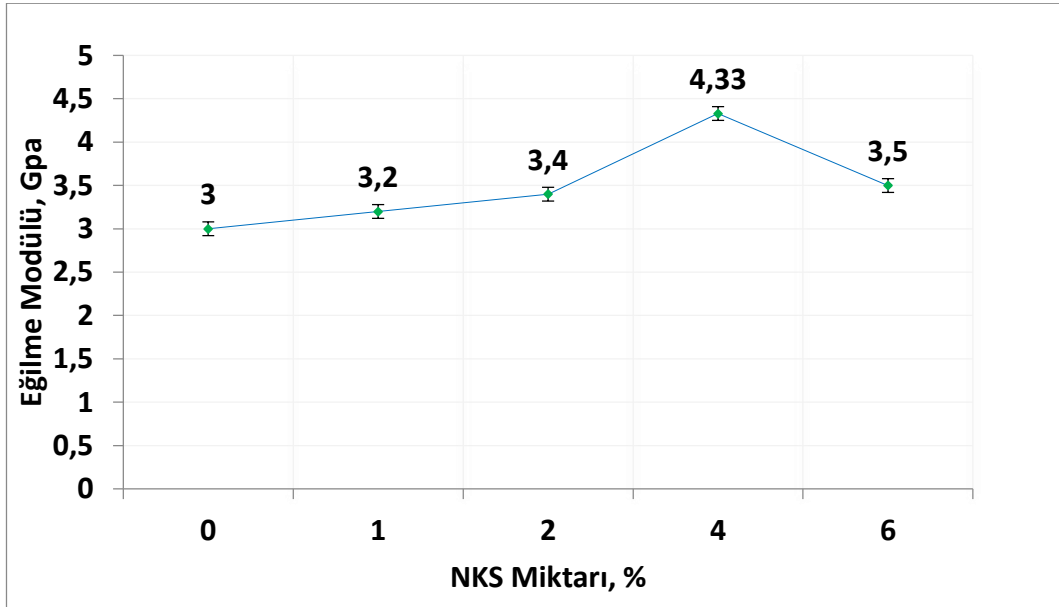
%1, 2, 4 ve 6 'lük NKS yüklemelerinde nanokompozitlerin kopma uzması (%) değeri sırasıyla %5,7, 24,3, 45,7 ve 22,9 'lık artış sağlanırken, %4'den yüklemelerde en yüksek değer elde edilmiştir.



Şekil 4.3 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin kopma uzaması (%) etkisi

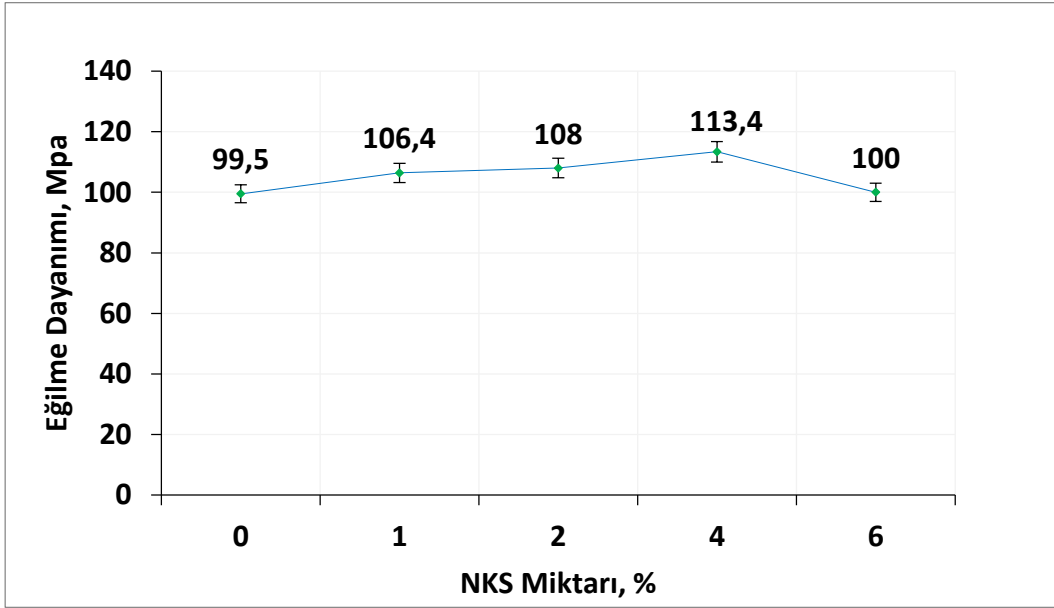
#### 4.1.2 Üç nokta eğme özellikleri

NKS nanodolgu miktarının DGEBA esaslı epoksi reçinenin eğme özelliklerine etkisi Şekil 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin eğilme modülüne etkisi

Eğilme modülü için maksimum iyileşme %4'lik NKS yüklemelerinde görülmüştür ve şahit numuneye göre %44'lük artış sağlanmıştır.

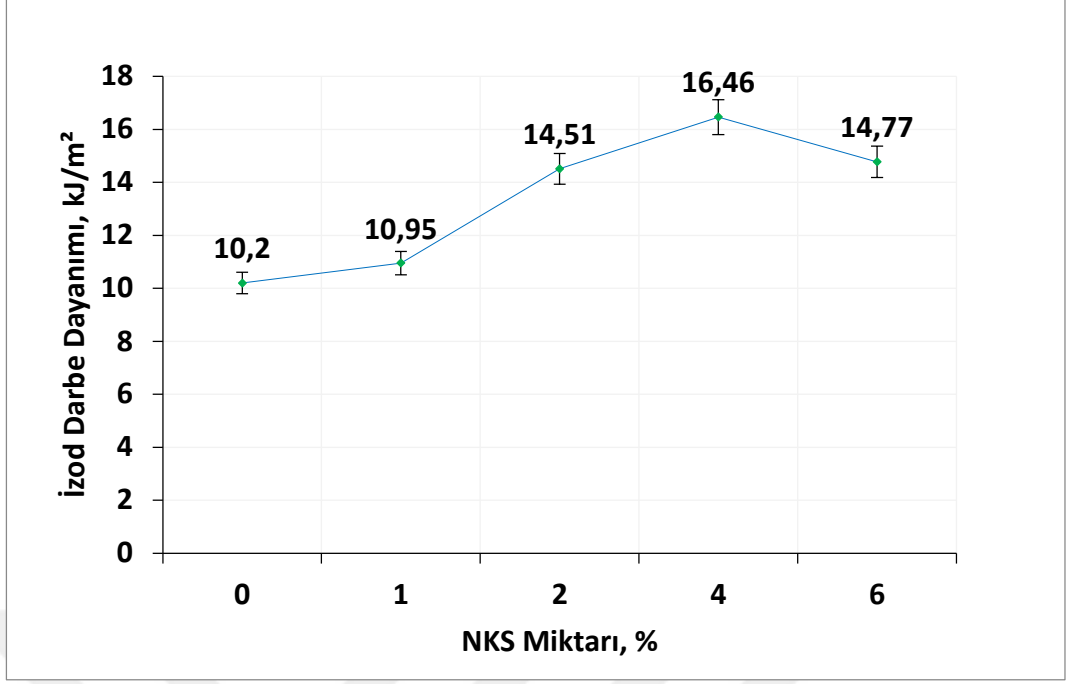


Şekil 4.5 : NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımına etkisi

Eğilme dayanımında ise benzer bir etki yaşanmıştır; %1, 2 ve 4'lük yüklemelerde sırasıyla %6,9, 8,6 ve 14'lük artışlar görülürken %4'den daha fazla olan yüklemelerde eğilme dayanımı düşüş gözlemlenmiştir.

#### 4.1.3 İzod darbe dayanımı özellikleri

NKS nanodolgu miktarının DGEBA esaslı epoksi reçinenin çentiksiz İzod darbe dayanım özelliklerine etkisi Şekil 4.6'te gösterilmiştir.



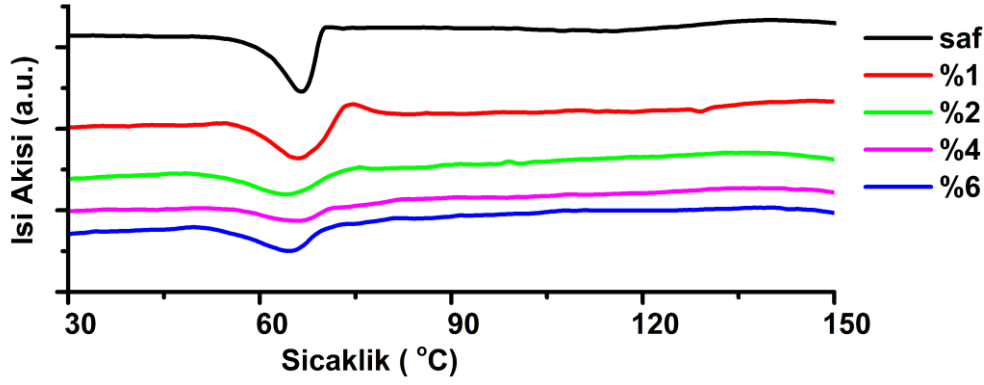
**Şekil 4.6 :** NKS miktarının NKS/epoksi nanokompozitlerin izod darbe dayanımına etkisi

%1, 2, 4 ve 6 'lik NKS yüklemelerinde nanokompozitlerin çentiksiz izod darbe dayanımı sırasıyla %7,4, 42,3, 61 ve 44 'lük artış sağlanırken, %4' den yüklemeye en yüksek değer bulunmuştur.

Sonuç olarak; NKS/epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için ideal NKS yüklemesinin %4 olduğu tespit edilmiştir. Bu iyileşme NKS nanoparçacıklarının epoksinin güçlü ikincil etkileşimler oluşturulduğu ayrıca nanokristalin selüloz üzerinde bulunan grupların epoksi ile kimyasal bir bağlanmaya gitme olasılığı gibi durumlardan dolayı gerilim transferine olumlu etki yapmasına dayandırılmıştır. Ancak %4'den yüksek NKS yüklemelerinde, NKS moleküllerinin topaklaşma yaparak matris içerisinde gözle görülür heterojen bölgeler oluşturduğu ve bu topaklaşmadan dolayı oluşan makro ve mikron boyutunda NKS bölgeleri malzeme deformasyonu sırasında zayıf noktalar olarak davranmış ve gerilim transferinin engelleyerek malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği varsayımı yapılmıştır.

#### **4.1.4 NKS nanodolgununun camısı geçiş sıcaklığına etkisi**

Yapılan DSC analizleri sonucu; artan NKS oranıyla birlikte camısı geçiş sıcaklığının (T<sub>g</sub>) değişimi Şekil 4.7'te gösterilmiştir.

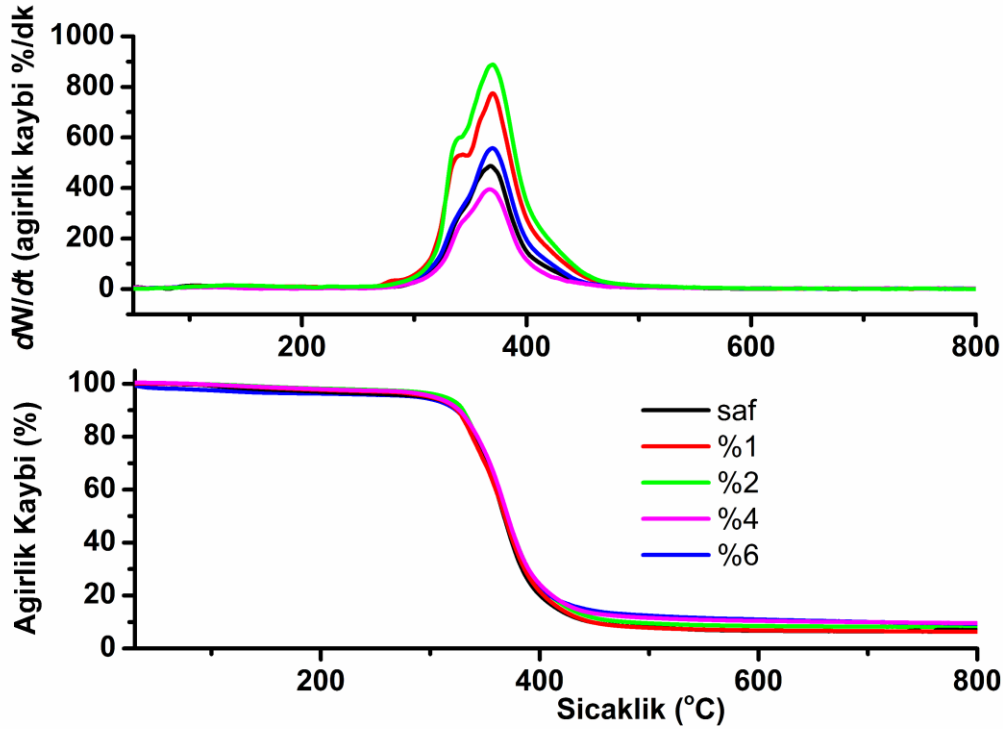


Şekil 4.7 : NKS/epoksi nanokompozitlerin DSC eğrileri

Sonuçlara göre; artan NKS oranıyla birlikte NKS/epoksi nanokompozitlerin camı geçiş sıcaklığında ( $T_g$ ) çok fazla değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu durum NKS ilavesi kompozit malzemelerin serbest hacim ve çapraz-bağ miktarını önemli ölçüde etkilemediği düşünülmektedir.

#### 4.1.5 NKS nanodolgununun bozunma sıcaklığına etkisi

Yapılan TGA/DTG analizleri sonucu; NKS/epoksi nanokompozitlerin bozunma sıcaklıkları ( $T_d$ ) ile kalan kül miktarları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : NKS/epoksi nanokompozitlerin TGA ve DTG eğrileri ve kalan kül miktarları

Elde edilen verilere göre kompozitlerin bozunma sıcaklıklarında (Td) ve kül miktarında NKS yüklemeleriyle çok az bir iyileşme gözlenmiştir. Bu iyileşme NKS ile polimer matrisi arasındaki etkileşim ile ilişkilendirilmiştir. NKS partikülleri yüzeyde bariyer görevi görüp, epoksi reçineni bozunmasına geciktirici etki yaptığı düşünülmüştür. Ancak %4'den daha yüksek NKS konsantrasyonlarında olası topaklaşmalardan dolayı homojen bir dağılım sağlanamadığı ve bariyer etkinin ortadan kalktığı, bu nedenle ısıl özelliklerin de azalmalar gözlemlenmiştir. Kalan kül miktarlarında ise önemli bu artış gözlemlenmemiştir.

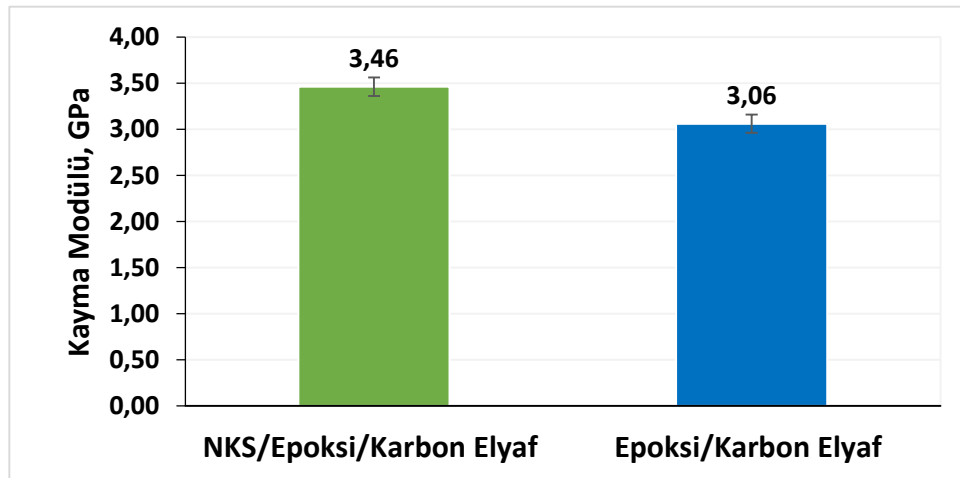
Sonuç olarak; belirli bir orana kadar (%4) NKS yüklemesinin DGEBA esaslı epoksi reçinenin ısıl özelliklerini çok azda olsa iyileşme gözlemlendiği tespit edilmiştir.

#### 4.2 NKS Nanodolgununun Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkisi

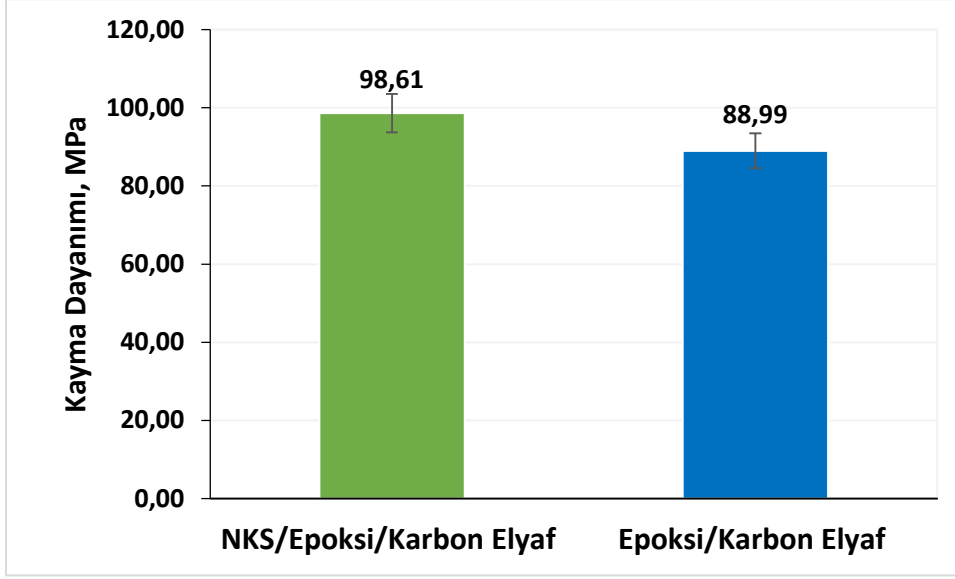
%4 oranında NKS nanodolgunu içeren epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı ve epoksi matrisli cam elyaf tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri; düzlem içi kayma, üç nokta eğme ve çentiksiz İzod darbe dayanımı testleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar NKS nanodolgunu içermeyen şahit numuneye ait veriler ile karşılaştırılmıştır.

##### 4.2.1 Düzlem içi kayma (IPS) özellikleri

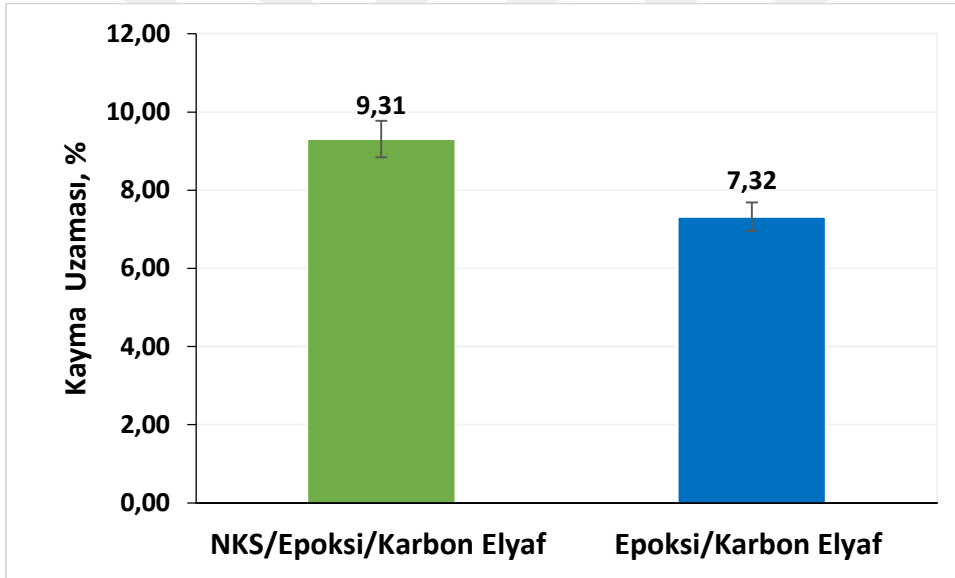
Epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerinin düzlem içi kayma testlerine ait kayma dayanımı, kayma modülü ve kopma uzaması (%) değerlerini gösteren karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de yer almaktadır.



Şekil 4.9 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri



Şekil 4.10 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

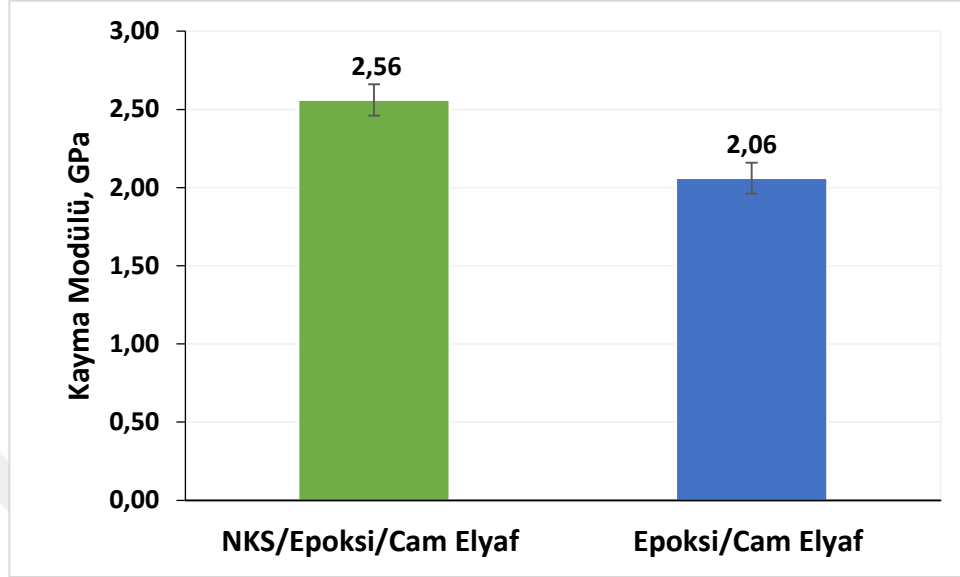


Şekil 4.11 : NKS/epoksi matrisli karbon kompoziti için düzlem içi kayma uzaması (%) değeri karşılaştırmalı grafikleri

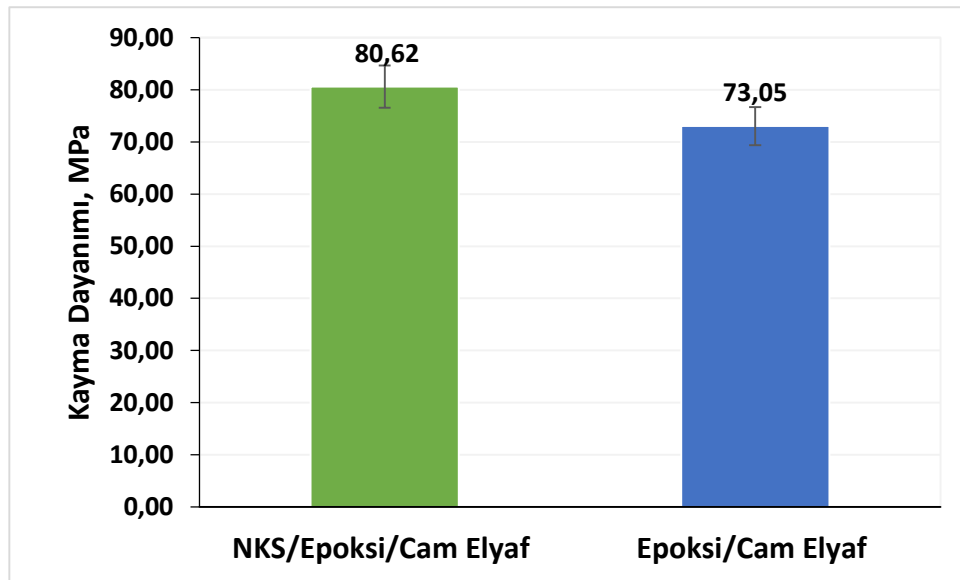
Sonuçlara göre; NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin kayma modülünde %13,07'lik, kayma dayanımı %10,81 ve kopma uzaması(%) değeri % 27,18 'lık iyileşmeler sağlanmıştır.



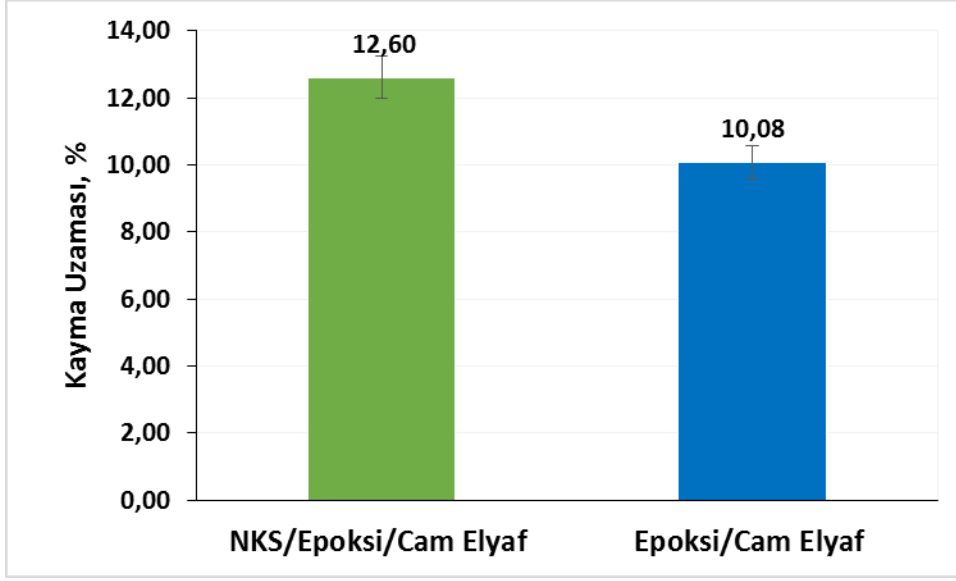
Epoksi matrisli cam elyaf tabakalı kompozitlerinin düzlem içi kayma testlerine ait kayma dayanımı, kayma modülü ve kopma uzaması (%) değerlerini gösteren karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te yer almaktadır.



Şekil 4.12 : NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri



Şekil 4.13 : NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

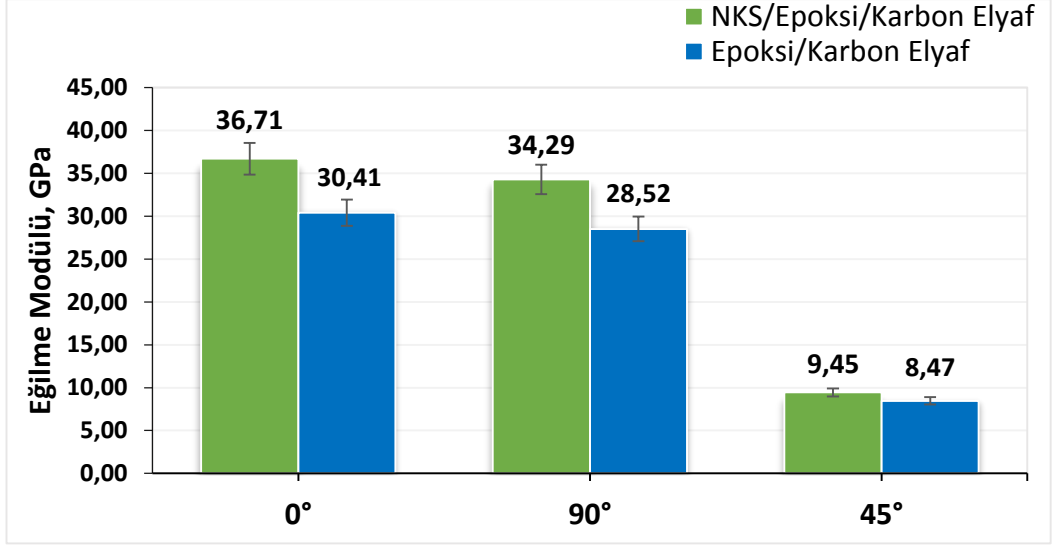


**Şekil 4.14 :** NKS/epoksi matrisli cam kompoziti için düzlem içi kayma uzaması (%) değeri karşılaştırmalı grafikleri

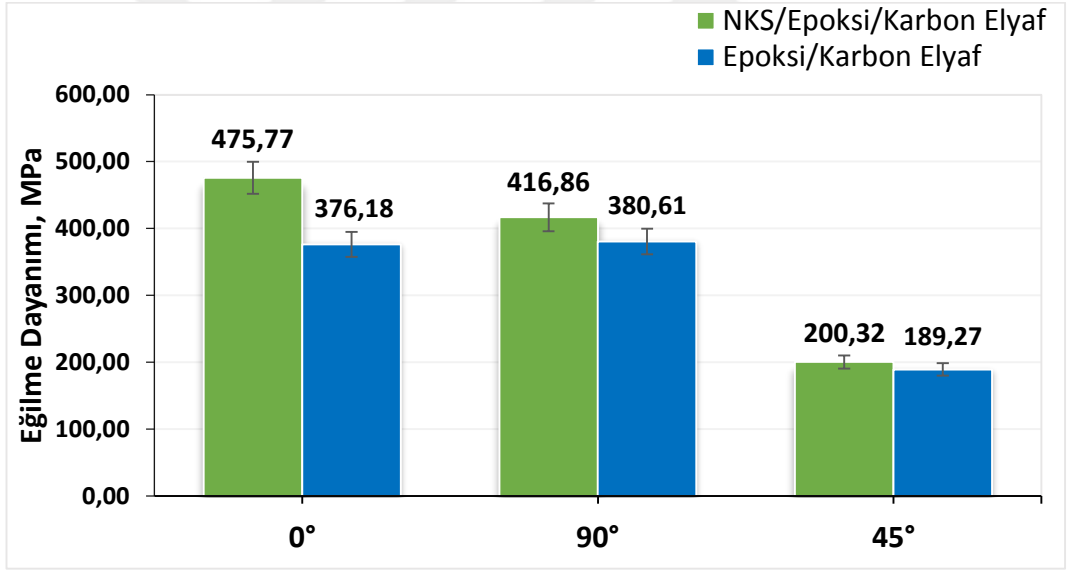
Elde edilen sonuçlara göre; NKS/epoksi matrisli cam kompozitin kayma modülünde %24,27'lik, kayma dayanımı %10,36 ve kopma uzaması(%) değeri % 25 'lık iyileşmeler sağlanmıştır.

#### **4.2.2 Üç nokta eğme özellikleri**

Epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı ve epoksi matrisli cam elyaf tabakalı numunelerine elyaf yönelimleri dikkate alınarak (0°, 90° ve 45°) gerçekleştirilen üç nokta eğme testlerine ait; eğilme dayanımı ve eğilme modülü sonuçları Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri

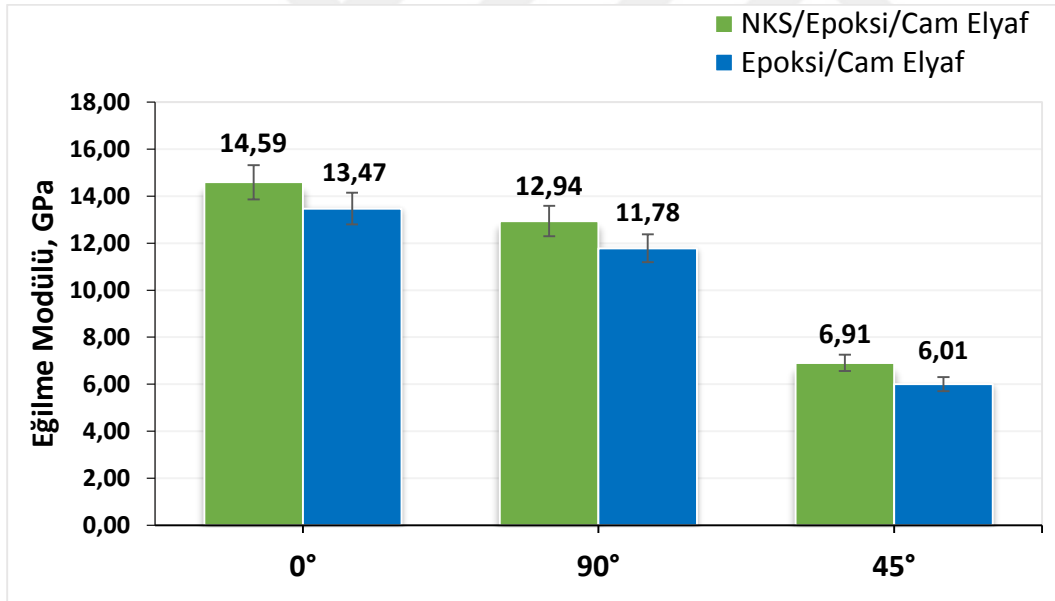


Şekil 4.16 : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

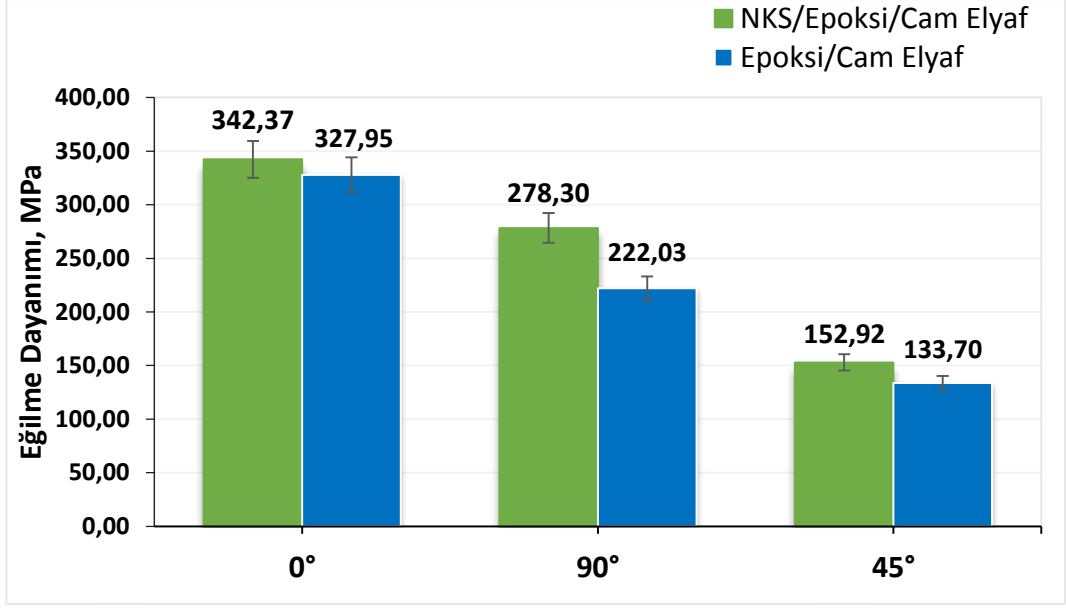
Her üç elyaf yöneliminde de NKS/epoksi matrisli karbon kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. NKS nanodolgununun kompozitin eğilme özelliklerine etkisi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun eğilme özelliklerine etkisi %5,84 ile %26,47 arası değişen oranlarda olmuştur.

**Çizelge 4.1** : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin eğilme özelliklerine etkisi

Numune Adı	Eğilme Modülü (GPa)	NKS Etkisi (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	NKS Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Karbon_0°	36,71	20,71	475,77	26,47
Epoksi/Karbon_0°	30,41		376,18	
NKS/Epoksi/Karbon_90°	34,29	20,20	416,86	9,52
Epoksi/Karbon_90°	28,52		380,61	
NKS/Epoksi/Karbon_45°	9,45	11,51	200,32	5,84
Epoksi/Karbon_45°	8,47		189,27	



**Şekil 4.17** : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri



**Şekil 4.18 :** NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

Her üç elyaf yöneliminde de NKS/epoksi matrisli cam kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. NKS nanodolgununun kompozitin eğilme özelliklerine etkisi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun eğilme özelliklerine etkisi %4,40 ile %25,34 arası değişen oranlarda olmuştur.

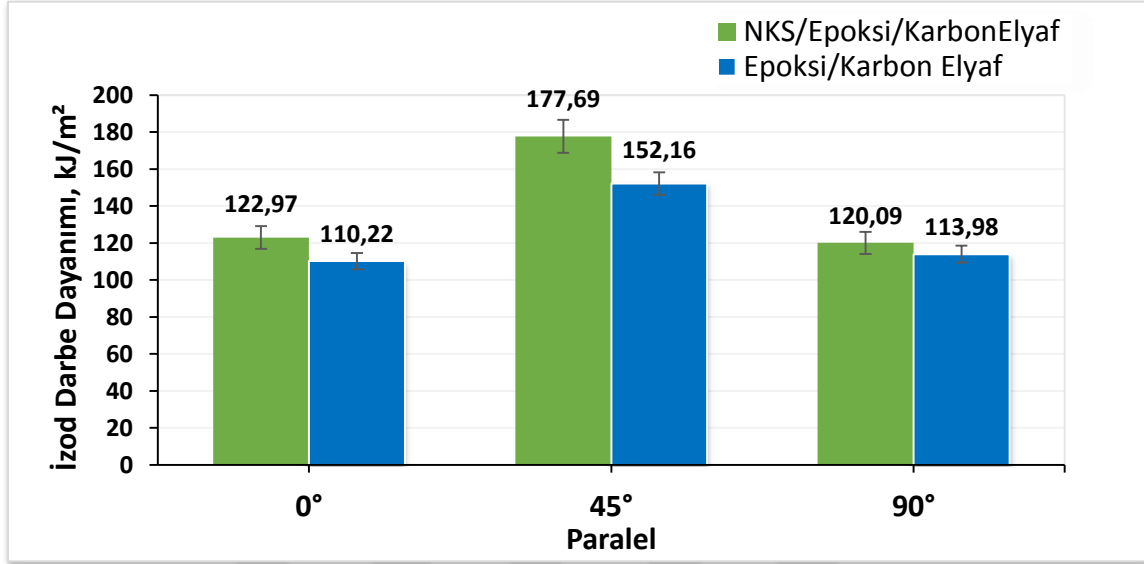
**Çizelge 4.2 :** NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin eğilme özelliklerine etkisi

Numune Adı	Eğilme Modülü (GPa)	NKS Etkisi (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	NK Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Cam_0°	14,59	8,31	342,37	4,40
Epoksi/Cam_0°	13,47		327,95	
NKS/Epoksi/Cam_90°	12,94	9,85	278,30	25,34
Epoksi/Cam_90°	11,78		222,03	
NKS/Epoksi/Cam_45°	6,91	14,98	152,92	14,38
Epoksi/Cam_45°	6,01		133,70	

#### 4.2.3 İzod darbe dayanımı özellikleri

Epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı ve epoksi matrisli cam elyaf tabakalı numunelerine elyaf yönelimleri dikkate alınarak (0°, 90° ve 45°) gerçekleştirilen

çentiksiz izod darbe dayanım testindeki standartta gösterildiği gibi paralel ve normal olarak iki ayrı şekilde uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22’de gösterilmiştir.

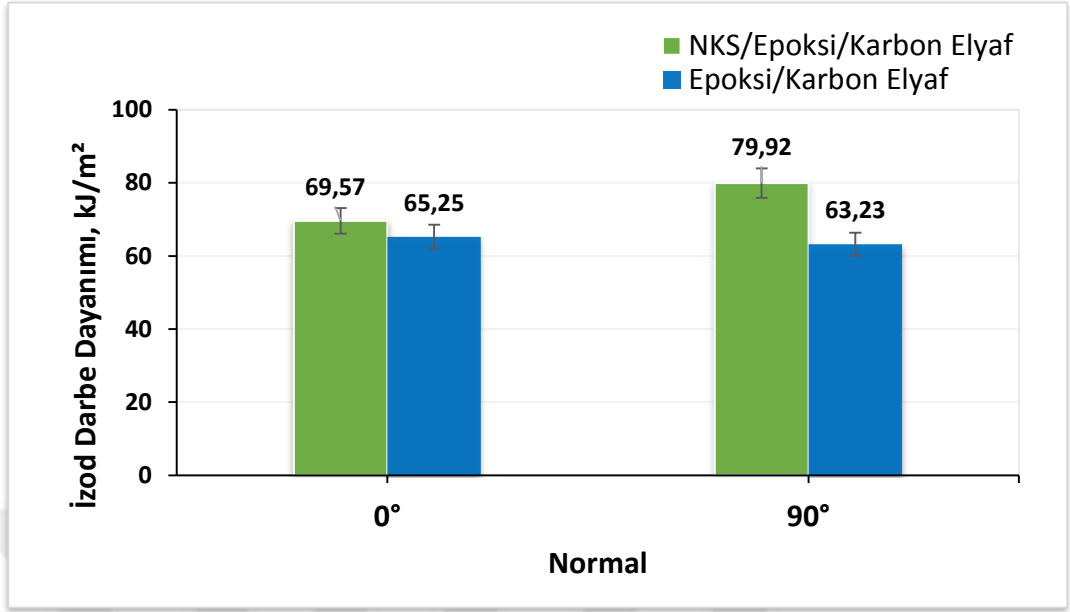


**Şekil 4.19** : NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanım (paralel) testi karşılaştırmalı grafikleri

Her üç elyaf yöneliminde NKS/epoksi matrisli karbon kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. NKS nanodolgununun kompozitin izod darbe dayanımı (paralel) özelliklerine etkisi Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun izod darbe dayanım (paralel) özelliklerine etkisi %5,36 ile %16,77 arası değişen oranlarda olmuştur.

**Çizelge 4.3** : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanımı (paralel) etkisi

Numune Adı	İzod Darbe Dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	NKS Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Karbon_0°_P	122,97	12,72
Epoksi/Karbon_0°_P	110,22	
NKS/Epoksi/Karbon_45°_P	177,69	16,77
Epoksi/Karbon_45°_P	152,16	
NKS/Epoksi/Karbon_90°_P	120,09	5,36
Epoksi/Karbon_90°_P	113,98	



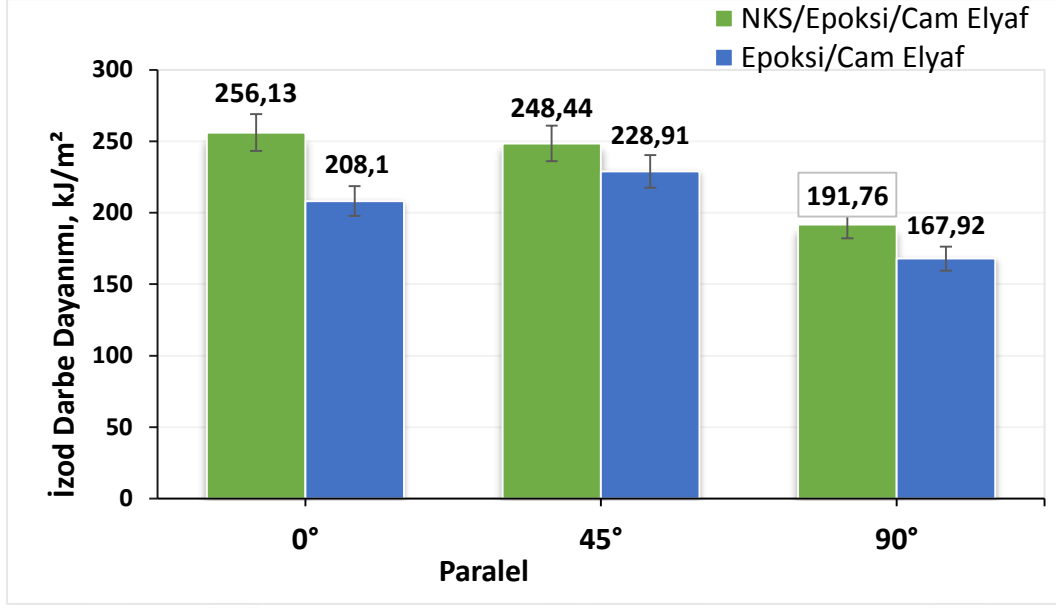
**Şekil 4.20 :** NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanım (normal) testi karşılaştırmalı grafikleri

Her üç elyaf yöneliminde de NKS/epoksi matrisli karbon kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. NKS nanodolgununun kompozitin izod darbe dayanımı (normal) özelliklerine etkisi Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun izod darbe dayanım (normal) özelliklerine etkisi %6,65 ve %26,39’luk artış göstermiştir.

**Çizelge 4.4 :** NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli karbon kompozitin izod darbe dayanımı (normal) etkisi

Numune Adı	İzod Darbe Dayanımı (kJ/m²)	NKS Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Karbon_0°_N	69,57	6,65
Epoksi/Karbon_0°_N	65,25	
NKS/Epoksi/Karbon_90°_N	79,92	26,39
Epoksi/Karbon_90°_N	63,23	

Her üç elyaf yöneliminde de NKS/epoksi matrisli cam kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir.



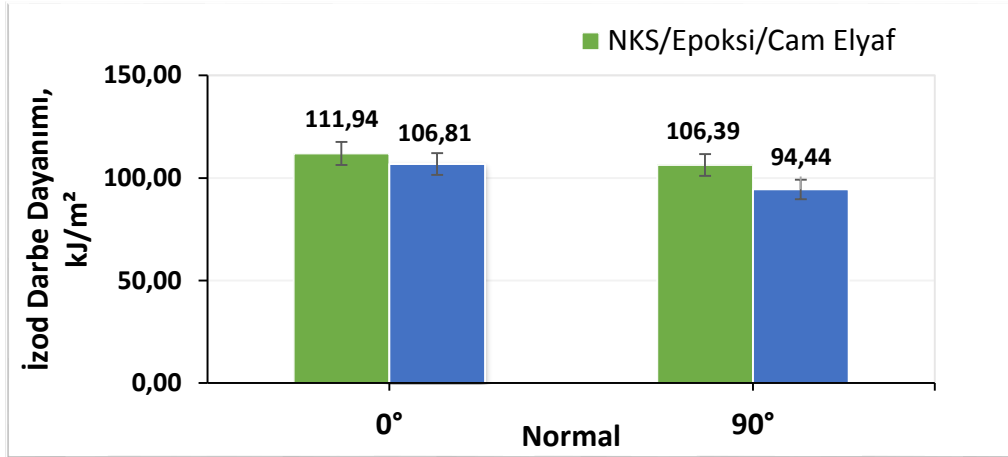
**Şekil 4.21** : NKS/epoksi matrisli cam kompozitin izod darbe dayanım (paralel) testi karşılaştırmalı grafikleri

NKS nanodolgununun kompozitin çentiksiz izod darbe dayanımı (paralel) özelliklerine etkisi Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun çentiksiz izod darbe dayanım (paralel) özelliklerine etkisi %8,53 ile %23,08 arası değişen oranlarda olmuştur.

**Çizelge 4.5** : NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin izod darbe dayanımı (paralel) etkisi

Numune Adı	İzod Darbe Dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	NKS Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Cam_0°_P	256,13	23,08
Epoksi/Cam_0°_P	208,1	
NKS/Epoksi/Cam_45°_P	248,44	8,53
Epoksi/Cam_45°_P	228,91	
NKS/Epoksi/Cam_90°_P	191,76	14,20
Epoksi/Cam_90°_P	167,92	





**Şekil 4.22 :** NKS/epoksi matrisli cam kompozitin normal izod darbe dayanım testi karşılaştırmalı grafikleri

Her üç elyaf yöneliminde de NKS/epoksi matrisli cam kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. NKS nanodolgununun kompozitin izod darbe dayanımı özelliklerine etkisi Çizelge 4.6’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için NKS nanodolgununun normal izod darbe dayanım özelliklerine etkisi %4,80 ve %12,65’luk artış göstermiştir.

**Çizelge 4.6 :** NKS nanodolgununun NKS/epoksi matrisli cam kompozitin normal izod darbe dayanımı (normal) etkisi

Numune Adı	İzod Darbe Dayanımı (kJ/m²)	NKS Etkisi (%)
NKS/Epoksi/Cam_0°_N	111,94	4,80
Epoksi/Cam_0°_N	106,81	
NKS/Epoksi/Cam_90°_N	106,39	12,65
Epoksi/Cam_90°_P	94,44	

Yapılan tüm mekanik testler sonucu; epoksi matris içerisindeki NKS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli tabakalı ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitin düzlem içi kayma, eğilme ve izod darbe dayanım özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Bu durum; epoksi matris ile uyumlu NKS gruplarının matris içerisinde homojen dağılarak elyaf-matris arayüzeyinde güçlü bağlar oluşturmasına ve bu bağların matris ile elyaf arası köprü vazifesi görerek elyaflara daha etkin yük aktarımı sağlamasına dayandırılmıştır. Artan arayüzey dayanımı sayesinde matris kırılması ve/veya elyafların matristen sıyrılması gibi deformasyonların daha yüksek

mekanik yüklemelerde meydana geldiği düşünülmüştür.

Tüm mekanik sonuçları özetlemek gerekirse NKS dolgusu hem cam elyafı hemde karbon elyafı kompozitlerin düzlemiçi kayma özelliklerini %10-27 oranları arasında iyileştirmiştir. Farklı elyaf yönlenme açılarıyla elde edilen kompozitlerin eğilme modül özellikleri incelendiğinde karbon elyafı kompozitlerde yaklaşık %20 cam elyafı kompozitlerde ise %10 oranın da artış gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımlarında ise tüm kompozitlerde %15 oranında bir iyileştirme görülmüştür. Paralel ve normal açılarda uygulanan İzod darbe dayanım değerleride %5-26 oranında artış gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.7 :** NKS nanodolgununun epoksi matrisli cam ve karbon elyafı kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi

Özellikler	E/KE	NKS/ E/KE	Etki (%)	E/CE	NKS/ E/CE	Etki (%)
Düzlem içi kayma modülü (GPa)	3,06	3,46	<b>13,07</b>	2,06	2,56	<b>24,27</b>
Düzlem içi kayma dayanımı (MPa)	88,99	98,61	<b>10,81</b>	73,05	80,62	<b>10,36</b>
Düzlem içi kayma uzaması (%)	7,32	9,31	<b>27,18</b>	10,08	12,6	<b>25,00</b>
Eğilme modülü (GPa)-0°	30,41	36,71	<b>20,71</b>	13,47	14,59	<b>8,31</b>
Eğilme modülü (GPa)-90°	28,52	34,29	<b>20,20</b>	11,78	12,94	<b>9,85</b>
Eğilme modülü (GPa)-45°	8,47	9,45	<b>11,51</b>	6,01	6,91	<b>14,98</b>
Eğilme dayanımı (MPa)-0°	376,18	475,77	<b>26,47</b>	327,95	342,37	<b>4,40</b>
Eğilme dayanımı (MPa)-90°	380,61	416,86	<b>9,52</b>	222,03	278,3	<b>25,34</b>
Eğilme dayanımı (MPa)-45°	189,27	200,32	<b>5,84</b>	133,7	152,92	<b>14,38</b>
İzod darbe dayanım (kJ/m <sup>2</sup> )-P-0°	110,22	122,97	<b>12,72</b>	208,1	256,13	<b>23,08</b>
İzod darbe dayanım (kJ/m <sup>2</sup> )-P-90°	152,16	177,69	<b>16,77</b>	228,91	248,44	<b>8,53</b>
İzod darbe dayanım (kJ/m <sup>2</sup> )-P-45°	113,98	120,09	<b>5,36</b>	167,92	191,76	<b>14,2</b>
İzod darbe dayanım (kJ/m <sup>2</sup> )-N-0°	65,25	69,57	<b>6,65</b>	106,81	111,94	<b>4,80</b>
İzod darbe dayanım (kJ/m <sup>2</sup> )-N-90°	63,23	79,92	<b>26,39</b>	94,44	106,39	<b>12,65</b>

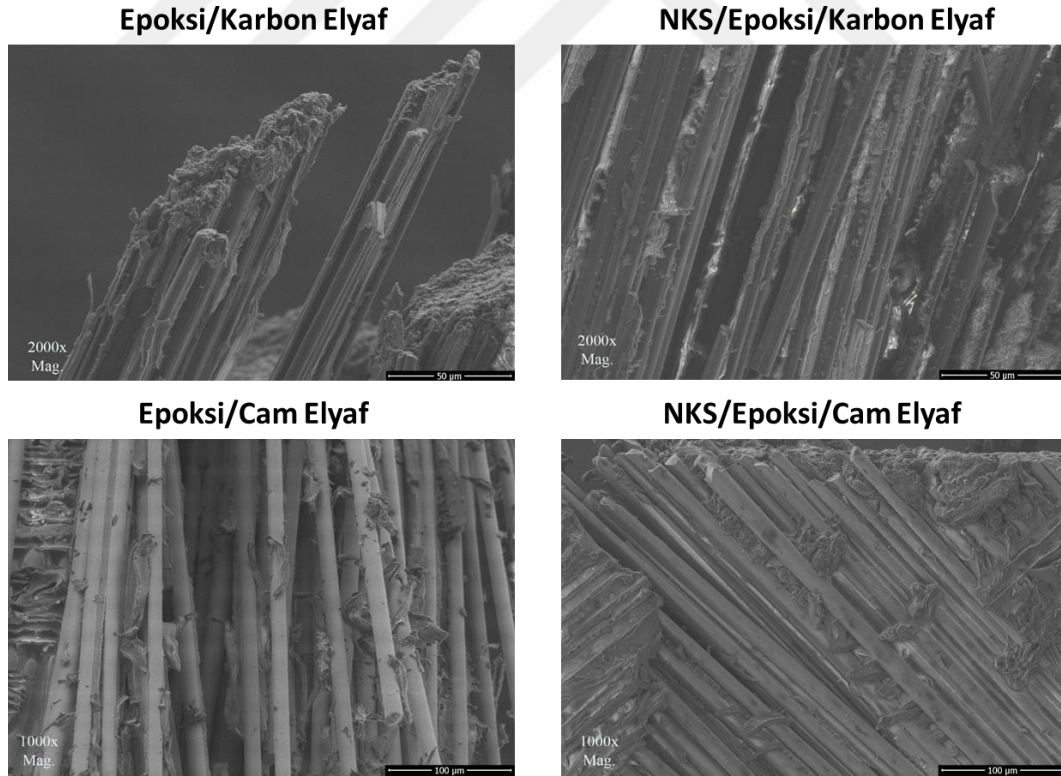
E: epoksi matris, KE: karbon elyaf, CE: cam elyaf, NKS: nanokristalin selüloz

### 4.3 Mikroyapısal İnceleme

NKS nanodolgunu sayesinde iyileştiği varsayılan elyaf-matris arayüzey özelliklerini daha iyi anlayabilmek adına; düzlem içi kayma testleri sonrası hasar alan numune yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

#### 4.3.1 SEM mikrografikleri

Elde edilen NKS bazlı hibrit kompozitlerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. 15 kV hızlandırma voltajı ile görüntüsü alınan numunelere iletkenlik kazandırmak amacıyla numune yüzeyleri inceleme öncesinde altın ile kaplanmıştır. Elde edilen SEM mikrografları Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Numuneler X2000 ve X1000 büyütmelerde incelenmiştir. Her dört mikrografta birçok elyaftan meydana gelen elyaf yüzeyleri görülmektedir. Hem X2000 hemde X1000 büyütmelere sahip elyaflar doğrultuları boyunca incelenebilmektedir. Ancak her iki büyütme de NKS moleküllerini görebilmemiz için yeterli yakınlaştırmaya sahip değildirler.



Şekil 4.23 : NKS/epoksi matrisli cam ve karbon elyaf kompozitlerin SEM görüntüleri



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan DGEBA esaslı epoksi reçine, NKS nanodolguyla modifiye edilip vakum torbalama yöntemi ile ayrı ayrı kıvrımsız cam elyaf ve karbon elyaf kumaşlara nüfuz ettirilmiştir. Bu modifikasyon işleminin yapılmasındaki amaç elde edilen tabakalı kompozit yapının elyaf/reçine mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağlamaktır.

İlk olarak epoksi matris içerisine katılacak ideal NKS oranı belirlenmiştir. Bu oranı belirlemek için ultrasonikasyon yöntemi ile değişen oranlarda (%1,2,4 ve 6) NKS/epoksi nanokompozitler hazırlanmış, bunların mekanik (çekme,eğme,izod darbe) ve ısıl (DSC ve TGA) özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucu %4'lik NKS yüklemesinin ideal oran olduğu saptanmıştır. Daha sonra %4 NKS/epoksi matrisli ve saf epoksi matrisli (şahit numune) karbon elyaf takviyeli tabakalı ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitler vakum torbalama yöntemi ile üretilerek mekanik karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Bu süreçte; düzlem içi kayma, izod darbe dayanımı ve üç nokta eğme testleri yapılmış ve sonuçlar şahit numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen tüm mekanik testlerde NKS nanodolgu içeriğine sahip kompozitlerin dayanım ve modül değerlerinde %4,4 ile %27,18 arası değişen oranlarda iyileşmeler belirlenmiştir. Bu durum; NKS nanodolgunun varlığından dolayı epoksi matrisin mukavemetinin artmasına ve matristen elyaflara daha etkin bir yük aktarımının sağlanmasına dayandırılmıştır. Düzlem içi kayma testleri sonrası hasar alan numune yüzeylerinin SEM mikrografları incelenerek arayüzey özellikleri tartışılmıştır.

Yapılan tüm bu sonuçlar ışığında; epoksi matris içerisine katılan NKS nanodolgunun karbon elyaf takviyeli tabakalı ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik dayanımını arttırdığı anlaşılmıştır. Üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler meydana getirmek için değişik tip ya da daha pahalı malzemeler kullanmadan, kompozitin kendi içinde modifiye edilmesi ile de üstün nitelikli kompozitlerin üretilebileceği görülmüştür.

NKS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli tabakalı ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği açıktır. Bu kompozitlere uygulanan statik yükleme koşullarına ilaveten dinamik yükleme koşullarındaki davranışları incelenebilir. Ayrıca üretilen hibrit kompozitlerin ısı özellikleri ve kütleme kinetiklerinin mekanik özellikler üzerine etkisinde bir diğer araştırma konusu olabilir. Ek olarak NKS nanodolgununun epoksi matris içerisine ve/veya karbon elyaf ve cam elyaf yüzeyine kimyasal olarak bağlanması sağlanırsa değişim araştırılabilir.

Bu tez çalışmasında, NKS nanodolgununun epoksi matrisin ısı özelliklerine olan etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçların elyaf takviyeli nanokompozitler içinde geçerli olduğu düşünülmüştür. Ancak üretilen karbon elyaf takviyeli ve cam elyaf takviyeli nanokompozitlere spesifik ısı analizler yapılmamıştır. Bu nedenle, çalışmamızda üretilen cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli NKS/epoksi nanokompozitlerin ısı özelliklerini içeren çalışmalar yapılması araştırmacılara önerilmektedir.

Nanoparçacık içeren elyaf takviyeli kompozitlerle yapılan çoğu çalışma, nanomalzeme eklenmesinin kompozit özelliklerini nasıl değiştirdiği üzerine yapılmıştır. Değişen ve gelişen malzeme biliminde bu konuya yönelik araştırma ihtiyacının olduğu açıktır. Bu etkinin iyi bir şekilde anlaşılmasıyla; daha karmaşık anizotropik yapıların takviyelendirilmesi ve ileri polimerik kompozit sistemlerinin gelişimi kolaylaşacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Şahin, Y.** (2015) Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin yayınları, Ankara, 31-44.
- [2] **Vatanserver, A.** (2015) Poli(Bütül Akrilat-Metil Metakrilat) Nanokompozitlerin Film Özelliklerinin İncelenmesi Ve Boya Bağlayıcısı Olarak Kullanımı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Ghorbani, A.** (2014). Karbon iplik dolgulu grafen/epoksi nanokompozitlerin özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [4] **Chowdhury, F.H., Hosur, M.V. and Jeelani, S.** (2006). Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminate, *Materials Science and Engineering*, A421, 298-306.
- [5] **Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F., Dean, D.** (2003). S2-Glass/epoxy polymer nanocomposites: Manufacturing, structure, thermal and mechanical properties, *Journal of Composite Materials*, 37, 1821-1837.
- [6] **Kim, M., Park, Y.B., Okoli, O.I., Zhang, C.** (2009). Processing, characterization and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites, *Composites Science and Technology*, 69, 335-342.
- [7] **Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M., Thomann,** (2005). Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 65, 2259-2268.
- [8] **Eren, Y.** (2007). Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [9] **Bağcı, İ.** (2006). Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] <<http://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html>>, alındığı tarih: 05.06.2017
- [11] <<https://papermine.com/pub/5110311/#cover>>, alındığı tarih: 05.10.2017.
- [12] **Çalışkan, S.** (2009). Mechanical properties of non-crimp fabric (NCF) fiberglass reinforced composite materials manufacture by using vacuum infusion process, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Makine Mühendisliği, İstanbul.
- [13] **Callister W., Rethwisch D.**, (2015), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Yayın Evi, Ankara.
- [14] <<https://www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyester-composites>>, alındığı tarih: 05.10.2017.
- [15] **Saçak, M.** (2002). Polimer kimyası, Gazi Kitabevi, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393- 397.
- [16] **Bozkurt, E.** (2006). Mechanical and thermal properties of non-crimp glass fiber reinforced composites with silicate nanoparticle modified epoxy matrix, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İzmir.

- [17]**Mazumdar, S.K.** (2002). Composites manufacturing, CRC Press, Florida.
- [18]**Yüksek, M.** (2011). Cam lifi esaslı poliester reçineli çok eksenli çözgümlü örme kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Beşergül, B.** (2016), Kompozitler Temel İlkeler, Gazi Kitapevi, Ankara, 1-432
- [20]<<https://www.slideshare.net/abiramprince/glass-fiber-manufacture-and-applications>>, alındığı tarih: 05.9.2017.
- [21]<[http://www.sglgroup.com/cms/international/products/lexicon-of-materials/index.html?letter=C&\\_\\_locale=en](http://www.sglgroup.com/cms/international/products/lexicon-of-materials/index.html?letter=C&__locale=en)>, alındığı tarih: 17.9.2017.
- [22]**Aricasoy, O.** (2006). Kompozit sektör raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
- [23]**Demirel, A.** (2007). Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [24]**Ersoy, M.S.** (2005). Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [25]**Tuna, A.** (2015). Membran destekli infüzyon yöntemi ile karbon fabrik/karbonize edilmiş tavuk tüyü lifi modifiyeli epoksi kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [26]**Yüksek, M.** (2011). Cam lifi esaslı poliester reçineli çok eksenli çözgümlü örme kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27]**Demircioğlu, G.** (2006). Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyunun etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [28] **Armakan, H. D. M.** (2010). Örme sandviç tekstillerin kompozit uygulamalarında kullanım olanaklarının araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [29] <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353813001759>>, alındığı tarih: 05.9.2017.
- [30]<[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ultiaxial\\_Fabrics.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ultiaxial_Fabrics.svg)>, alındığı tarih: 05.9.2017.
- [31]**Komarneni, S.** (1992). Nanocomposites, Journal of Materials Chemistry, 2, 1219-1230.
- [32]**Alexandre, M. and Dubois, P.** (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: Preparation, properties and uses of a new class of materials, Materials Science & Engineering Reports, 28, 1-63.
- [33]**Moniruzzaman, M. and Winey, K.I.** (2006). Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, Macromolecules, 39, 5194-5205.
- [34]**Sanchez, C., Julian, B., Belleville, P., and Popall, M.** (2005). Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites, Journal of Materials Chemistry, 15, 3559-3592.
- [35] **Kuduğ, H.** (2013). Mikrobiyal Kaynaklı Selülaz Enziminin E.Coli'de Rekombinant Olarak Üretilmesi (yüksek lisans tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomühendislik Anabilim Dalı, Tokat.
- [36] <Url-3 <[http://www.tapdk.gov.tr/pitoc\\_seluloz\\_lifi.asp](http://www.tapdk.gov.tr/pitoc_seluloz_lifi.asp)>, erişim tarihi:02.02.2017.



- [37] **Deguchi, S., Tsujii, K., Horikoshi, K.** (2006). Cooking cellulose in hot and compressed water. *Chem. Commun.* 31 3293-3299.
- [38]<<http://www.solverkimya.com/site/makaleler/endustriyel-urunler-makaleleri/seluloz-polimerler.html>>, tarihi 01.03.2017.
- [39]**Bogati, D. R.** (2011). Cellulose based biochemicals and their applications (lisans tezi). Saimaa University of Applied Sciences Faculty of Technology, Finladiya.
- [40] <<http://dennisliu-biology.blogspot.com.tr/2011/02/macromolecules-carbohydrates.html>>, tarihi 01.03.2017
- [41]<<https://www.intechopen.com/books/nanocrystals-synthesis-characterization-and-applications/recent-development-in-applications-of-cellulose-nanocrystals-for-advanced-polymer-based-nanocomposit>>, tarihi 01.03.2017.
- [42]**Abdulkhalil, H. P. S., Bhat, A. H., Yusra, A. F. I.** (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydr. Polym.*, 87, 963– 979.
- [43]<<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/nanocellulose-in-thin-films-coatings-and-plyes-for-packaging-applications-a-review/>>, tarihi 01.03.2017.
- [44]**Turbak, A. F., Snyder, F. W., Sandberg, K. R.** (1983). Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential. *J. Appl. Polym. Sci. Appl. Polym. Symp.*, 37, 815-827.
- [45]**Herrick, F. W., Casebier, R. L., Hamilton, J. K., Sandberg, K. R.** (1983). Microfibrillated cellulose: Morphology and accessibility. *J. Appl. Polym. Sci. Appl. Polym. Symp.*, 37, 797-813.
- [46]<[https://www.researchgate.net/figure/265296139\\_fig4\\_Hierarchical-structure-of-cellulose-top-image-from-large-unit-to-small-unit-cellulose](https://www.researchgate.net/figure/265296139_fig4_Hierarchical-structure-of-cellulose-top-image-from-large-unit-to-small-unit-cellulose)>, tarihi 01.03.2017.
- [47]**Rånby, B.G.**, (1949). Aqueous colloidal solutions of cellulose micelles, *Acta Chemica Scandinavica*, 3: 649-50.
- [48]**Battista, O.A.**, (1950). Hydrolysis and crystallization of cellulose, *J. Ind. Eng. Chem.*, 42:502–7.
- [49]**Leitner, J., Hinterstoisser, B., Wastyn, M., Keckes, J., Gindl, W.**, (2007). Sugar beet cellulose nanofibril-reinforced composites, *Cellulose*, 14(5): 419-25.
- [50]**Turbak, A.F., Snyder, F.W., Sandberg, K.R.**, (1982). Suspensions containing microfibrillated cellulose, US Pat. 4452721.
- [51]**Klemm, D., Kramer F., Moritz S., Lindström T., Ankerfors M., Gray D., Dorris, A.** (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 5438-5466.
- [52]**Siqueira G., Bras J., Dufresne, A.** (2010). Cellulosic bionanocomposites: A review of preparation, properties and applications. *Polymers*, 2, 728-765.
- [53]**Habibi, Y., Lucia, L. A., Rojas, O. J.** (2010). Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. *Chem. Rev.*, 110, 3479-500.
- [54]**Araki,J., Wada, M., Kuga, S., Okano, T.** (1998). Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose. *Colloids Surf. A.*, 142, 75-82;

- [55] **Kimura, F., Kimura, T., Tamura, M., Hirai, A., Ikuno, M., Horii, F.** (2005). Magnetic Alignment of Chiral Nematic Phase of Cellulose Microfibril Suspension. *Langmuir*, 21, 2034-2037.
- [56] **Dong, X. M., Kimura, T., Revol, J. F., Gray, D. G.** (1996). Effects of ionic strength on the isotropic-chiral nematic phase transition of suspensions of cellulose crystallites. *Langmuir*, 12, 2076-2082.
- [57] **Capadona, J. R., Shanmuganathan, K., Trittschuh, S., Seidel, S., Rowan, S. J., Weder, C.** (2009). Polymer nanocomposites with nanowhiskers isolated from microcrystalline cellulose. *Biomacromolecules*, 10, 712-716.
- [58] **Çoban, E. P., Bıyık, H. H.** (2008). Asetik asit bakterilerinden elde edilen alternatif selüloz. *Elektronik Mikrobiyoloji Dergisi*, 6, 19-26.
- [59] **Favier, V., Chanzy, H., Cavaille, J. Y.** (1995). Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers. *Macromolecules*, 28, 6365-6367.
- [60] **Nakagaito, A. N. ve Yano, H.** (2004). The effect of morphological changes from pulp fibre towards nanoscale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fibre based composites. *Appl. Phys. A.*, 78, 547-552
- [61] **Nakagaito, A. N., Yano, H.** (2005). Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Appl. Phys. A Mater.*, 80, 155-159.
- [62] **Hayashi, H., Shimo, T.** (2006). Automobile outside plates with good surface smoothness from cellulose fibre prepregs. *Jpn. Kokai Tokkyo Koho*, 2005, 1360, 53-59.
- [63] **Nogi, M. ve Yano, H.** (2009). Optically transparent nanofibre sheets by deposition of transparent materials: a concept for roll- to-roll processing. *Appl. Phys. Lett.*, 94, 1-3.
- [64] **Nogi, M., Iwamoto, S., Nakagaito, A. N.** (2009). Optically transparent nanofibre paper. *Adv. Mater.*, 21, 1595-1598.
- [65] **Nogi, M., Handa, K., Nakagaito, A. N.** (2005). Optically transparent bionanofibre composites with low sensitivity to refractive index of the polymer matrix. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 1-3.
- [66] **Nogi, M., Abe, K., Handa, K.** (2006). Property enhancement of optically transparent bionanofibre composites by acetylation. *Appl. Phys. Lett.*, 89, 1-3.
- [67] **Nogi, M., Ifuku, S., Abe, K.** (2006). Fibre-content dependency of the optical transparency and thermal expansion of bacterial nanofibre reinforced composites. *Appl. Phys. Lett.*, 88, 1-3
- [68] **Eskizeybek, V.** (2012). Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [69] **Andrews, R. and Weisenberger, M.** (2004). Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.
- [70] **Sharma, B., Mahajan, S., Chhibber, R., Mehta, R.** (2012), Glass fiber reinforced polymer-clay nanocomposites: Processing, structure and hygrothermal effects on mechanical properties, *Procedia Chemistry* 4, 39-46.
- [71] **Suslick, K.S.** (1990). Sonochemistry, *Science*, 247, 1439-1445

- [72]Gibson, R.F., Ayorinde, E.O., Wen,Y.F. (2007). Vibrations of carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, 67, 1–28.
- [73]<<https://profilab24.com/BANDELIN-SONOPULS-HD-2070-homogeniser>>,tarihi 01.03.2017.
- [74]Kuo, S.W., Chang, F.C. (2011). POSS related polymer nanocomposites, *Prog. Polym. Sci.*, 36, 1649–1696.
- [75]Wicks, S.S., Guzman deVilloria R., Wardle, B.L. (2010). Interlaminar and intralaminar reinforced of composite laminates with aligned carbon nanotubes, *Composite Science and Technology*, 70, 20-28
- [76]Njuguna, J., Pielichowski, K. and Alcock, J.R. (2007). Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites: Current status, *Advanced Engineering Materials*, 9, 835-847.
- [77]Lourie, O., Wagner, H.D. (1999). Evidence of stres transfer and formation of fracture clusters in carbon nanotube-based composites, *Composites Science and Technology*, 59, 975-977.
- [78]Aboubakr, S.H. (2013). Epoxy-clay nanocomposite for carbon fiber reinforced polymer applications, Yüksek Lisans Tezi, The University of New Mexico, Albuquerque.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Mustafa KUYUMCU

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Çamlıhemşin / 03.11.1987

**Adres:** Yeni Mahalle, Beşlioğlu Küme Evleri, Özlem Apt. No:12/22 Ardeşen/RİZE

**İş Adres:** Görükle Mah. Üniversite 1 Cad. No: 933/B011 Nilüfer/BURSA

**E-Posta:** 53mustafakuyumcu@gmail.com

**Lisans:** Yalova Üniversitesi, Polimer Mühendisliği

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

KOMPORİZE Kompozit Plastik San. ve Tic. Ltd. Şti., Kurucu, (23.08.2017)

Tübitak 1512 BİGG-Teknoloji Sermaye Programı Desteği (15.08.2017- halen).

TÜBİTAK-1003 kodlu Yeni Nesil İleri Osmoz (İO) ve Düşük Basıncılı Ters Osmoz (TO) Desalinasyon Membranların Üretilmesi, Modül Haline Getirilmesi ve İçme Suyu Eldesinde Kullanılması Projesi'nde Bursiyer Öğrenci (14 ay), 2016-2017.

### Yayın ve Patent Listesi:

Membran Uygulamaları İçin Polisülfonun Modifikasyonu: Sülfolanma ve Aminlenme Tepkimeleri, M. A. Tasdelen, H. Erdemi, M. A. Kaya, M. Celebi, R. Ozdogan, S. Oran, **M. Kuyumcu**, Desalinasyon Teknolojileri Çalıştayı, Sabanci Üniversitesi, (2017), İstanbul, Türkiye.

**Kuyumcu M.**, Kurtuluş Ç.,Tasdelen M. A., "Influence of POSS Nanoparticles on the Mechanical and Microstructure Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites", 5<sup>th</sup> International Polymeric Composites Symposium and WorkShops 2-4 Kasım 2017, İzmir, Türkiye.

**Kuyumcu M.**, Tasdelen M. A., Oran S., "Side Chain Primary Amine Functionalized Polysulfones", The International Joint Science Congress of Materials and Polymers 25-28 Ağustos 2017, Ohrid, Makedonya.

**Kuyumcu M.,** Kaşgöz A.,Tasdelen M. A., “Tea Mill Waste as Reinforcing Fillers in Thermoplastic Composites”, 46<sup>th</sup> IUPAC World Polymer Congress 17-21 Temmuz 2016, İstanbul, Türkiye.

#### **TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR**

- **Kuyumcu M.,** Kurtuluş Ç.,Tasdelen M. A., “Improvement of Continuous Fiber Reinforced Epoxy Based Composites with Nanocellulose”, 5<sup>th</sup> International Polymeric Composites Symposium and WorkShops 2-4 Kasım 2017, İzmir, Türkiye.

