

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
ÖZELLİKLERİNE POSS NANODOLGUSUNUN ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cenk KURTULUŞ**

**Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Polimer Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2016**



**YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
ÖZELLİKLERİNE POSS NANODOLGUSUNUN ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cenk KURTULUŞ  
(145101007)**

**Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Polimer Mühendisliği Programı**

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

**HAZİRAN 2016**

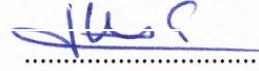


Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 145101007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cenk KURTULUŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE POSS NANODOLGUSUNUN ETKİLERİ**” 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



**Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ**  
Yalova Üniversitesi



**Doç. Dr. Güralp ÖZKOÇ**  
Kocaeli Üniversitesi



**Teslim Tarihi :** 13 Mayıs 2016

**Savunma Tarihi :** 15 Haziran 2016





*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği Anabilim Dalında 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 Mustafa KUYUMCU'ya teşekkür ederim.

Jüri üyelerim sayın Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ ve Doç. Dr. Güralp ÖZKOÇ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince, her zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme, değerli dostlarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK "2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı" tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederim.

Haziran 2016

Cenk KURTULUŞ  
(Polimer Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiiiv
ÖZET.....	xviii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Taraması .....	2
1.2 Tezin Amacı .....	3
<b>2. TEORİK BİLGİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	6
2.1.1 Elyaf özellikleri .....	10
2.1.2 Matris özellikleri.....	12
2.1.3 Elyaf-matris arayüzey özellikleri .....	15
2.2 Tabakalı Kompozitler.....	17
2.2.1 Çok eksenli kumaşlar .....	19
2.3 Nanoparçacık Takviyeli Kompozitler .....	20
2.3.1 Nanodolgular .....	21
2.3.2 POSS/Polimer nanokompozitlerin hazırlanması .....	24
2.3.3 POSS/Polimer nanokompozitlerin fonksiyonel özellikleri .....	26
2.4 Elyaf Takviyeli Nanokompozitler .....	31
2.5 Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	33
2.5.1 Vakum torbalama .....	34
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>37</b>
3.1 Malzemeler.....	37
3.2 Cihazlar .....	38
3.3 POSS Modifiye Epoksi Sistemlerin Hazırlanması .....	39
3.4 Kompozit Test Plakaların Üretimi .....	40
3.5 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi .....	45
3.5.1 Çekme testi .....	47
3.5.2 Düzlem içi kayma testi .....	47
3.5.3 Üç nokta eğme testi .....	48
3.5.4 Tabakalar arası kayma dayanımı testi .....	48
3.6 Isıl Özelliklerin İncelenmesi .....	49
3.6.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre.....	50
3.6.2 Termogravimetrik analiz .....	50
3.7 Mikroyapı Özelliklerin İncelenmesi.....	50
3.7.1 Taramalı elektron mikroskobu .....	50

<b>4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>51</b>
4.1 POSS/Epoksi Oranının Optimizasyonu.....	51
4.1.1 Çekme özellikleri .....	51
4.1.2 Üç nokta eğme özellikleri .....	52
4.1.3 POSS nanodolgununun camsı geçiş sıcaklığına etkisi .....	53
4.1.4 POSS nanodolgununun bozunma sıcaklığına etkisi .....	54
4.2 POSS Nanodolgununun Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	55
4.2.1 Düzlem içi kayma özellikleri.....	55
4.2.2 Üç nokta eğme özellikleri.....	56
4.2.3 Tabakalar arası kayma dayanımı özellikleri.....	58
4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri.....	59
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>69</b>



## KISALTMALAR

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	: Kalsiyum karbonat
<b>CNT</b>	: Karbon nanotüp
<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>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>NCF</b>	: Kıvrımsız kumaş
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>PEO</b>	: Poli(etilen oksit)
<b>PI</b>	: Poliimit
<b>PLA</b>	: Poli(laktik asit)
<b>POSS</b>	: Polihedral oligomerik silseskuokzan
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silika
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>T<sub>d</sub></b>	: Bozunma sıcaklığı
<b>TDS</b>	: Teknik bilgi formu
<b>T<sub>g</sub></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

**Çizelge 4.1:** POSS nanodolgununun kompozitin eğilme özelliklerine etkisi ..... 58







## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1:	Karbon nanotüp içeriğine göre ILSS'nin iyileşmesi grafiği [8].....	3
Şekil 2.1:	Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması [14]...	6
Şekil 2.2:	Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.3:	Elyaf, matris ve kompozit malzeme temsili gerilim-gerinim grafiği [16]	7
Şekil 2.4:	Çekme dayanımının elyaf yönelimine bağlı grafiği [18] .....	8
Şekil 2.5:	Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf formları ve yönlenmeleri [19] .....	9
Şekil 2.6:	PAN hammaddesi kullanılarak karbon elyaf prosesi [24] .....	11
Şekil 2.7:	Termoset polimerlerin çapraz bağ yapısının şematik gösterimi [27].....	12
Şekil 2.8:	DGEBA esaslı epoksi reçinenin üretim reaksiyonu [17] .....	13
Şekil 2.9:	Epoksi reçinelerde kullanılan amin esaslı sertleştiriciler [31] .....	14
Şekil 2.10:	Epoksi reçinenin amin esaslı sertleştirici ile sertleşme reaksiyonu [17].	14
Şekil 2.11:	Elyaf takviyeli kompozit malzemenin mikro yapısı [34].....	16
Şekil 2.12:	Tabakalı kompozit yapıda yönlendirilmiş tabakaların genel görünüşü ..	17
Şekil 2.13:	Dokuma ve tek yönlü kumaşlar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi a) Eşit özellikler b) Eşit olmayan özellikler [38] .....	18
Şekil 2.14:	Çok eksenli kumaşın şematik görünümü [38].....	19
Şekil 2.15:	Dokuma ve kıvrımsız kumaşlarda dalgalanma durumu [19] .....	19
Şekil 2.16:	Farklı boyutlara sahip nanodolgu çeşitleri [48].....	21
Şekil 2.17:	POSS molekülü [42].....	22
Şekil 2.18:	POSS topraklarının çapraz bağlayıcı gibi davranması [42].....	23
Şekil 2.19:	POSS moleküllerine bağlanabilen çeşitli fonksiyonel gruplar [42] .....	23
Şekil 2.20:	Nanodolguların polimerler içerisine etkin şekilde dağıtılmasında kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler [35] .....	24
Şekil 2.21:	Ultrasonikasyon cihazı [60] .....	25
Şekil 2.22:	POSS-metakrilat nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin artan POSS miktarına göre grafikleri [64].....	28
Şekil 2.23:	Stiril-POSS ve 4-metilstirenin kopolimerizasyonu [73] .....	31
Şekil 2.24:	Elyaf takviyeli nanokompozit tasarımı [74].....	32
Şekil 2.25:	Kompozit malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması .....	33
Şekil 2.26:	Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [76].....	35
Şekil 2.27:	Vakum torbalama yönteminde kullanılan temel malzemeler [76] .....	35
Şekil 3.1:	Glisidil-POSS .....	37
Şekil 3.2:	POSS/epoksi nanokompozitlerin ve saf epoksinin hazırlık şeması .....	39
Şekil 3.3:	POSS/epoksi karışımının ultrasonikasyon cihazında karıştırılması.....	39
Şekil 3.4:	Çekme ve eğme testleri için silikon kalıplar .....	40
Şekil 3.5:	Kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulaması .....	41
Şekil 3.6:	Kalıp çevresine sızdırmazlık bandı uygulaması .....	41
Şekil 3.7:	Ayırıcı film ve soyma kumaşı serimi .....	42
Şekil 3.8:	Elyaf ve reçinenin hazırlanması .....	42
Şekil 3.9:	Reçine ve sertleştiricisinin karıştırılması .....	43
Şekil 3.10:	Elyaf katlarının reçine ile ıslatılması.....	43

Şekil 3.11: Soyma kumaşı, ayırıcı film ve emici uygulaması .....	44
Şekil 3.12: Sistemin vakum naylonu ile kapatılması .....	44
Şekil 3.13: Düzeneğin vakum altına alınması .....	45
Şekil 3.14: Üretilen kompozit test plakası .....	45
Şekil 3.15: POSS/epoksi nanokompozitleri için mekanik test numuneleri .....	46
Şekil 3.16: Karbon kompozit test numunelerinin hazırlanması.....	46
Şekil 3.17: POSS/epoksi nanokompozit numunesi çekme testi .....	47
Şekil 3.18: Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numunesi düzlem içi kayma testi.....	47
Şekil 3.19: POSS/epoksi nanokompozit numunesi üç nokta eğme testi .....	48
Şekil 3.20: Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numuneleri üç nokta eğme testi.....	48
Şekil 3.21: Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numunesi tabakalar arası kayma dayanımı testi .....	49
Şekil 3.22: Termal analizlerde kullanılan DSC ve TGA cihazları .....	50
Şekil 4.1: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin çekme modülüne etkisi .....	51
Şekil 4.2: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımına etkisi .....	52
Şekil 4.3: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin eğilme modülüne etkisi .....	52
Şekil 4.4: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımına etkisi .....	53
Şekil 4.5: POSS/epoksi nanokompozitlerin DSC eğrileri .....	54
Şekil 4.6: POSS/epoksi nanokompozitlerin TGA eğrileri.....	54
Şekil 4.7: POSS/epoksi nanokompozitlerin TGA eğrileri ve kalan kül miktarları..	55
Şekil 4.8: Düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri.....	56
Şekil 4.9: Düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri.....	56
Şekil 4.10: Eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri .....	57
Şekil 4.11: Eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri.....	57
Şekil 4.12: Tabakalar arası kayma dayanımının karşılaştırmalı grafiği .....	58
Şekil 4.13: Mekanik testler sonrası hasar alan elyaf takviyeli kompozit yüzeyleri...	59
Şekil 4.14: X9500 ve X30000 büyütmede SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.15: X100000 büyütmede SEM görüntüleri .....	60

## KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE POSS NANODOLGUSUNUN ETKİLERİ

### 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 büyük olmasından dolayı ilave edildiği polimerlerin mekanik ve ısı dayanımlarını saf hallerine göre artırma potansiyeli vardır. Polimer nanokompozit üretimi amacıyla kullanılan malzemelerden biri de üç boyutuda nanometrik ölçüde olan polihedral oligomerik silseskuokzan (POSS) dir. Polimer matris içerisine POSS molekülleri dağıtılarak nanokompozitler elde edilmektedir. Bu polimerik nanokompozitler; sürekli elyaflar ile takviyelendirilerek, özellikleri önemli ölçüde iyileştirilmiş yüksek performanslı elyaf takviyeli kompozitler oluşturulabilmektedir.

Tez çalışmamızda; matris sistemi olarak POSS katkılı epoksi nanokompozit, takviye sistemi olarak iki eksenli ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) kıvrımsız karbon elyaf kumaş kullanılmıştır. Epoksi matris ile uyumlu olması amacıyla epoksi fonksiyonalitesine sahip POSS nanodolgusu tercih edilmiştir. POSS nanoparçacıklarının, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Burada amaç matris sistemi olan epoksi reçinenin dayanımını arttırmak ve elyaf-matris arası arayüzey iyileştirmesi sağlayarak kompozit yapının mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Öncelikle %1, 2, 4 ve 8 oranlarında POSS/epoksi nanokompozitleri hazırlanıp, bunların mekanik ve ısı analizleri sonucu optimum POSS yükleme oranı belirlenmiş. Ardından karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar vakum torbalama yöntemi ile üretilmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu; düzlem içi kayma, tabakalar arası kayma dayanımı ve üç nokta eğme testleri ile yapılmıştır. Sonuçlar; POSS nanodolgunsuz numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmış ve POSS varlığının kompozit özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Epoksi matris için %2 oranında POSS içeriğinin optimum yükleme oranı olduğu belirlenmiştir. Buna göre üretilen %2 POSS/epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapının mekanik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm mekanik testlerde POSS nanodolgusu içeriğine sahip kompozitlerin dayanım ve modül değerlerinde %3,78 ile %20,4 arası değişen oranlarda iyileşmeler tespit edilmiştir. Böylece karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan POSS nanodolgusunun elyaf-matris arayüzey dayanımını arttırdığı görülmüştür. Bu durum nanoyapıların varlığından dolayı arayüzeyde güçlü bağların oluşmasına dayandırılmış ve SEM mikrograflarıyla doğrulanmıştır.



# **IMPROVEMENT PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED EPOXY BASED COMPOSITES WITH POSS NANOPARTICLES**

## **SUMMARY**

High performance composites are daily used materials in marine, automotive, aerospace and defense industries. With the developing technology, their properties should be improved to fulfill the novel application's requirements. 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, nanotubes, or whiskers) and three-dimensional (spherical silica, metal particles, polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS), and semiconductor nanoclusters). Among them, the POSS nanoparticles are three-dimensional oligomeric, organosilicon compounds with cage frameworks surrounded by functional groups on the periphery. The inclusion of nanosized reinforcing materials into a polymer matrix not only dramatically improves the mechanical properties (e.g., strength, modulus, 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 thesis, mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites were improved by addition of glycidyl-POSS as nanosized reinforcing material. The aim of this study is to improve the physical properties of epoxy matrix by addition of glycidyl-POSS, which contains reactive epoxy groups. First of all, to determine the optimum POSS ratio; 1, 2, 4 and 8% glycidyl POSS was added to epoxy resin. The nanocomposites were characterized by mechanical and thermal analysis. 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. The optimum improvement has been observed in the nanocomposites containing 2% glycidyl-POSS. After that, two-dimensional ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) non-crimp carbon fiber reinforcements were chosen in epoxy resin with 2% glycidyl POSS feeding ratio. The composite samples were produced by vacuum bagging method. For these samples, the mechanical properties were investigated in accordance with the standard tests (ISO 14125, ISO 14129 and ISO 14130). The strength and modulus of carbon fiber reinforced nanocomposites have been improved from 3.78 up to 20.4%. Examination of the surface morphology and interfacial debonding of the specimens was also performed via scanning electron microscopy (SEM). In conclusion, the addition of glycidyl-POSS not only enhance the interactions between carbon fiber and epoxy matrix, but also improves the mechanical properties of final composites.



## 1. GİRİŞ

Malzemenin tarih içindeki gelişim sürecine bakıldığında, doğal malzeme kullanımının zamanla azaldığı, buna karşılık gelişen teknolojiyle birlikte, birden fazla malzemenin farklı tekniklerle birleştirildiği, bir anlamda tasarlanmış malzemenin, başka bir ifadeyle kompozit malzeme kullanımının giderek arttığı ve yaygınlaştığı görülmektedir [1].

Polimer kompozit sistemleri uzun yıllardır 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 doğrultuda geliştirilen polimer nanokompozitler bileşenlerin en az birinin boyutunun 100 nm' den daha küçük olduğu nano ölçekli kompozit malzemelerdir. Polimer nanokompozit üretimi amacıyla kullanılan malzemelerden biride üç boyutuda nanometrik seviyede olan polihedral oligomerik silseskuokzan (POSS) malzemesidir. Matris içinde moleküler seviyede dağılan, takviye edici özellikler sağlayan, termal ve kimyasal olarak silikonlardan daha dayanıklı olan POSS parçacıkları nano ölçekli şekil ve boyutları sayesinde polimer zincirinin hareketliliğini moleküler seviyede kontrol ederek polimerlere emsalsiz özellikler sağlar [2].

Çoğu metalik malzemeyle karşılaştırıldığında, yüksek dayanım/ağırlık ve modül/ağırlık oranlarına sahip elyaf takviyeli kompozitler mühendislik malzemeleri sınıfında yer almaktadır. Son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalarda; nano ve mikro boyutta parçacık katılmış polimer matrisin elyaf ile takviyesinin özellik ve performans açısından gelişen potansiyeli farkedilmiştir. Bu açıdan bakıldığında; nanoparçacıklar, elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilir en uygun dolgu malzemeleri olarak görülmektedir. Nanoparçacık eklenmesiyle, malzemedeki tabakalar arası mukavemet, sertlik, eğilme mukavemeti ve termal dayanıklılık gibi matrise bağlı olan özellikler önemli ölçüde etkilenmektedir [3].

## 1.1 Literatür Taraması

Mühendislik malzemesi olarak; performansı, işleme kolaylığı, mükemmel termal ve mekanik özelliklerinden dolayı epoksi reçineler özellikle elyaf takviyeli kompozitlerde en sık kullanılan matris malzemeleri arasındadır. Birçok çalışmada epoksi reçine içerisine nanodolgu ilavesinin elyaf takviyeli kompozit özelliklerini iyileştirildiği bildirilmiştir.

Haque ve arkadaşları [4]; vakum destekli reçine infüzyon metodunu (VARIM) kullanarak S-Glass cam elyaf takviyeli ve çok düşük oranda tabakalı silikat içeren laminatların mekanik özelliklerinde büyük gelişmeler olduğunu saptamıştır. %1'lik nanosilikat ile S-Glass/epoksi-kil nanokompozitlerin tabakalar arası kayma geriliminde, eğilme dayanımında ve kırılma tokluğunda sırasıyla %44, %24 ve %23 iyileştirmelerin olduğu görülmüştür. Benzer şekilde elde edilen nanokompozitin emsallerine göre 26 °C daha yüksek bozunma sıcaklığına sahip olduğu bildirilmiştir.

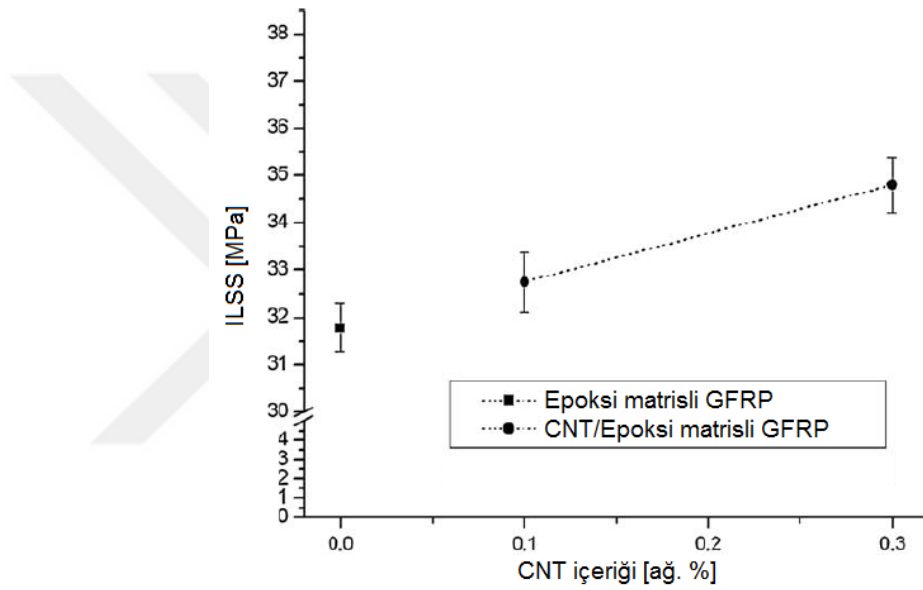
Chowdhury ve arkadaşları da [5]; dokuma karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretmek için VARIM kullanmıştır. Nanokil parçacıklarının eğilme ve termal özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Farklı ağırlık yüzdelerinde yüzey modifiyeli montmorillonite mineralleri SC-15 epoksi içerisine ultrasonikasyon yoluyla dağıtılmıştır. Daha sonra nanofazlı epoksi ile dokuma karbon elyaf kullanılarak VARIM ile karbon/epoksi nanokompozitler üretilmiştir. İlave kürlenme yapılan numuneler eğilme testine tabi tutulmuştur, eğilme dayanımı ve modülünde sırasıyla %14 ve %9'lük iyileştirmeler elde edilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığında ise yaklaşık 13 °C'lik artışın olduğunu ortaya çıkarmıştır. Karbon/SC-15 epoksi kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri açısından ağırlıkça %2'lik nanokil takviyesinin optimum yükleme olduğu görülmüştür. Mikro-yapısal çalışmalar; nanokilin elyaf ve matris arası yapışmayı iyileştirdiğini ortaya çıkarmış ve böylece mekanik özellikler iyileşmiştir.

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



Subramaniyan ve arkadaşları [7]; ağırlıkça %5 nano kil eklenmesi ile basma yüklemesi altında epoksinin elastik modülünü %20 arttırdığını ve el yatırması tekniği kullanarak üretilen nano kil içerikli elyaf takviyeli kompozitin sıkıştırma dayanımının %20-25 arttığını gözlemlemiştir.

Gojny ve arkadaşları [8]; karbon nanotüplerin (CNT), cam elyaf takviyeli kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımına (ILSS) etkisini incelemiştir. Epoksi matris içerisine ağırlıkça %0,3'lük çift duvarlı karbon nanotüp (DWCNT) eklenmesi sonucu tabakalar arası kayma dayanımında %19'luk artış kaydetmiştir. Şekil 1.1'de bu iyileştirme gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Karbon nanotüp içeriğine göre ILSS'nin iyileşmesi grafiği [8]

Kim ve arkadaşları [9]; CNT eklenmiş karbon elyaf/epoksi laminatların özelliklerini incelemiştir. Epoksi sistem içerisine ağırlıkça %0,3'lük CNT katkısının eğilme modülünde ve dayanımında sırasıyla %12'lik ve %18'lik artış sağladığını fark etmiştir. Bu artış; yapı içerisindeki CNT yığınlarının elyaf ve matris çevresinde güçlü bağlar oluşturmasına dayandırılmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Nanokompozit içerikli elyaf takviyeli kompozitler oldukça yeni bir ürün grubudur. Literatürde; çeşitli kompozit malzeme üretim yöntemleri ile üretilen karbon nanotüp, nanokil ve grafen içeren elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve ısıl özelliklerinin tespiti konusunda araştırmalar mevcutken, DGEBA esaslı epoksi reçine, çift yönlü

kıvrımsız karbon elyaf kumaş ve glisidil-POSS nanodolgununun birlikte kullanıldığı ve vakum torbalama yöntemi ile bu malzemelerden kompozit üretiminin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmamız literatür için orijinal bir çalışmadır.

Bu çalışmanın amacı, POSS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine 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 POSS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması, karbon elyaf takviyeli POSS/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.

## 2. TEORİK BİLGİ

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla malzemenin, en iyi özelliklerini bir araya getirmek yada ortaya yeni bir özellik koymak amacıyla, bu malzemelerin belirli şartlar altında ve belirli oranda fiziksel olarak birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Genellikle matris olarak ifade edilen ana faz ile takviye edici olarak kullanılan ikincil fazdan oluşurlar.

Bu iki ana malzeme grubundan takviye malzeme, kompozitin yük taşıma kabiliyetini ve dayanımını sağlar. Matris ise plastik deformasyona geçişte kompozit malzemede oluşabilecek çatlak ilerlemesini önleyici bir rol oynar ve kompozitin kopmasını geciktirici etki yapar [10]. Matris olarak kullanılan malzemenin bir diğer amacı da takviye elemanını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviye elemanına homojen bir şekilde aktarmaktır [11].

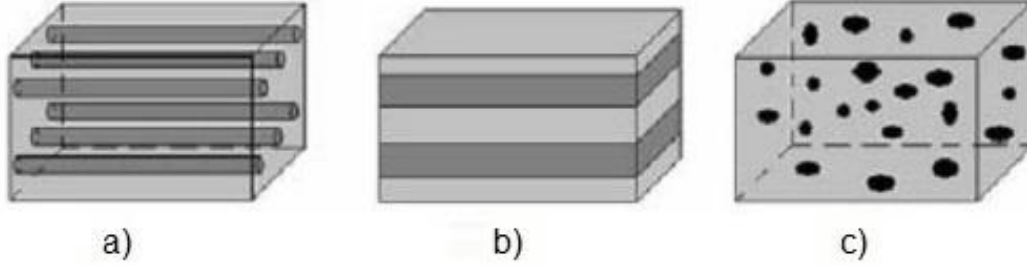
Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, genelde matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırma yapılabilmektedir [12]. Matris malzemesine göre sınıflandırma;

- 1) Polimer matrisli kompozitler,
- 2) Metal matrisli kompozitler,
- 3) Seramik matrisli kompozitler olarak yapılmaktadır.

Polimer matrislerin yanında diğer matrislerinde kullanılmasına rağmen kompozit malzemelerin %90'a yakını polimer esaslı matrislerden oluşmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler genellikle takviye edilmiş polimerler olarakta adlandırılmaktadır. Polimerik kompozitler yüksek mukavemet, boyutsal ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı direnç gibi özellikleriyle pek çok avantaj sunar. Ayrıca sertlik ve mukavemet açısından metallerle yarışabilecek durumda olmasının yanında çok da hafiftir [13].

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

- 1) Elyaf takviyeli kompozitler,
- 2) Tabakalı kompozitler,
- 3) Parçacık takviyeli kompozitlerdir.



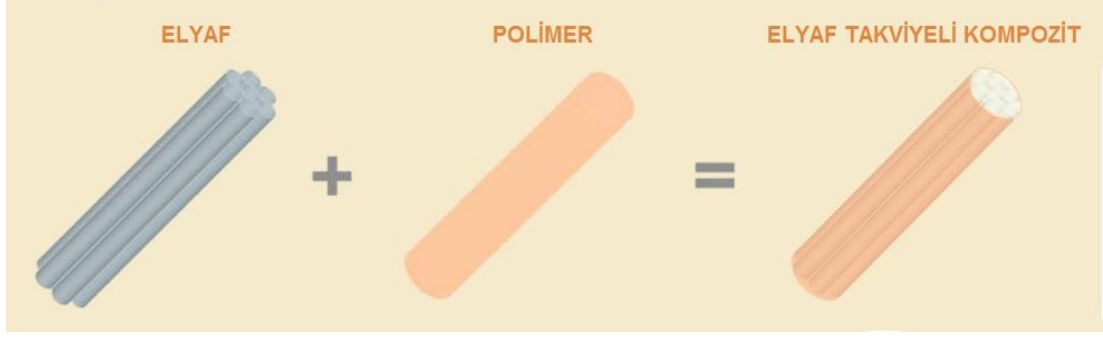
**Şekil 2.1:** Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması; a) elyaf takviyeli kompozit, b) tabakalı kompozit, c) parçacık takviyeli kompozit [14]

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 oldukça yaygınlaşmıştır. Bu özellikteki malzemeler nanokompozit olarak tanımlanmaktadır. Çalışmamızda parçacık takviyeli kompozitler bölümünde nanokompozitler anlatılacaktır.

## 2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

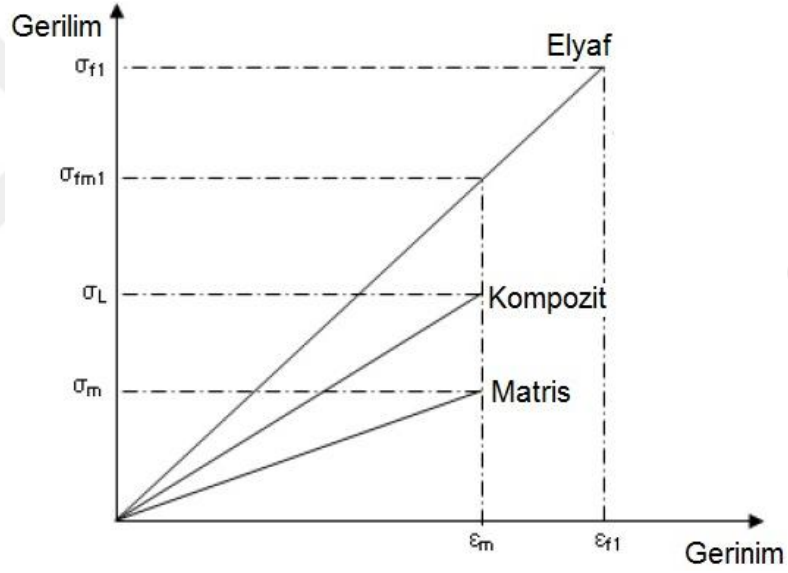
Elyaf takviyeli polimerik kompozitler günümüzde yüksek performanslı mühendislik malzemeleri sınıfında yer almaktadır ve kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Havacılık, savunma sanayi, otomotiv, denizcilik ve spor ekipmanlarının üretimi bunlara örnektir. Dayanımları, üretim esneklikleri ve hafiflikleri gibi özellikleri endüstriyel alanlarda kullanımını arttırmaktadır [15].

Makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı olan esnek malzemeler elyaf olarak tanımlanmaktadır. Farklı türde birçok elyaf kompozitlerde takviye amacıyla kullanılır. Polimerlerin elyaflarla takviyelendirilmesi sonucu üstün özelliklere sahip kompozit malzeme meydana gelir. Şekil 2.2’de elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin şematik gösterimi yer almaktadır.



**Şekil 2.2:** Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi

Elyaf takviyeli kompozitlerde malzeme üzerine gelen yükleri karşılayan bileşen elyaftır, polimer matris ise elyafları belirli formda bir arada tutan ortamı oluşturmaktadır [1]. Bu nedenle kullanılan elyafın mekanik dayanımı matristen önemli ölçüde yüksek olmalıdır [16].



**Şekil 2.3:** Elyaf, matris ve kompozit malzeme temsili gerilim-gerinim grafiği [16]

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

- Elyafın mekanik özellikleri,
- Elyaf miktarı,
- Elyaf kalınlığı,
- Elyafın yönlenme biçimidir [17].

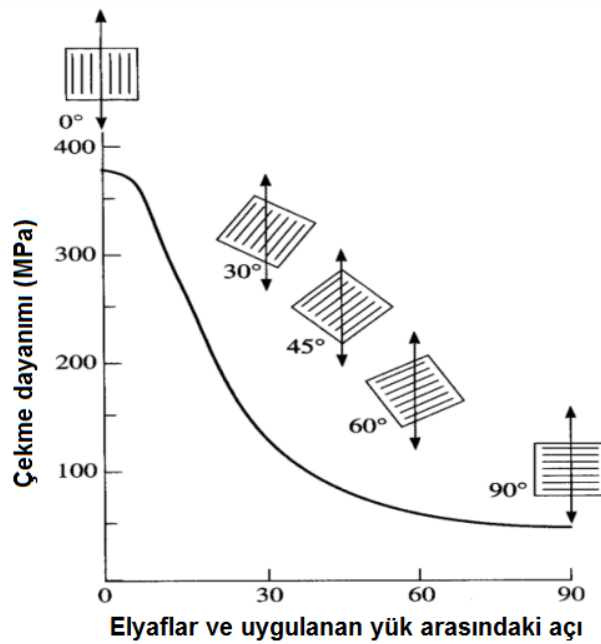
Bu temel noktalar seçilen üretim tekniğiyle birlikte kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemektedir.

Elyafaların dayanımı elde edilecek kompozit yapının dayanımı açısından oldukça önemlidir. Elyafaların uzunluk/çap (aspect) oranı arttıkça matris tarafından elyaflara aktarılan yük miktarı da artmaktadır.

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.

Elyaf kalınlığıda kompozit özelliklerini etkileyen bir diğer önemli parametredir. İnce elyaflarla üretilen kompozitlerde matrisin elyaf ile temas ettiği alan daha büyüktür. Temas yüzeyinin artması, elyaf-polimer etkileşimlerini artırarak kompozit içerisinde yük aktarımını kolaylaştırır. Bu nedenle aynı kütlede ince ve kalın elyaflarla takviye edilen kompozitlerde, ince elyaflarla takviye edileni daha mukavemetli olmaktadır.

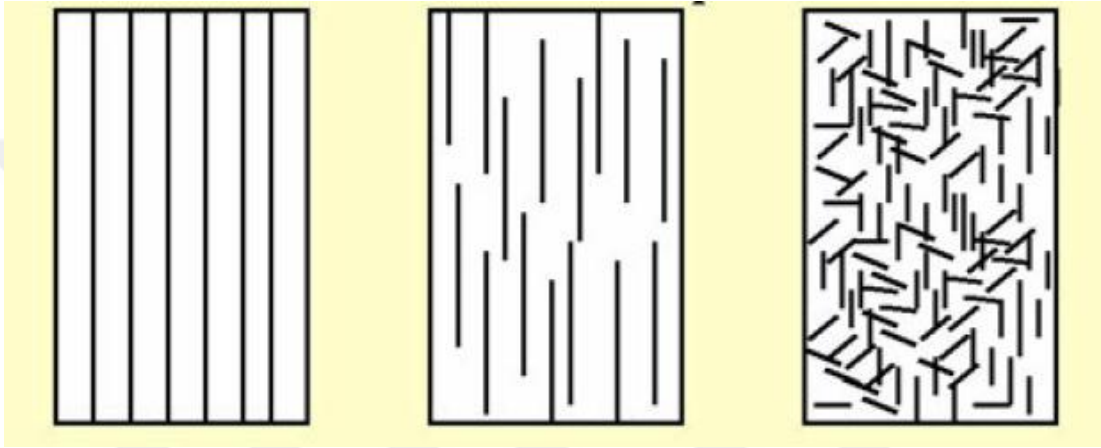
Elyafaların matris içerisindeki yerleşimi kompozit yapının dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Elyafalar matris içerisine uygun geometrilere yerleştirilerek, elde edilecek kompozitin çekme/basma gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır, bu özelliğe anizotropi adı verilir. Örneğin; kompozitin çekme dayanımı, elyafların yönlendirildiği eksene yapılan yüklemelerde en büyük iken elyaf eksenine  $90^\circ$  olan yüklemelerde en düşüktür. Şekil 2.4'te bu etki gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Çekme dayanımının elyaf yönelimine bağlı grafiği [18]

Benzer şekilde darbe dayanımı, ısı iletkenlik, ısı genleşme gibi davranışlar da elyafların yönlenme eksenine açıs al olarak bağıdır. Elyaf larla takviyeli kompozitlerde, elyaf yönlenmesi ayarlanarak sözü edilen özelliklerin yöne bağı kontrolü sağılanır [17].

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri açısından çok önemlidir. Elyaf takviyelerde kendi içlerinde fiziksel biçimlerine göre; sürekli elyaflar, yönlendirilmiş kısa elyaflar ve kırılmış kısa elyaflar olarak ayrılmaktadır [19].



**Şekil 2.5:** Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf formları ve yönlenmeleri  
(a) sürekli ve yönlenmiş, (b) süreksiz ve yönlenmiş,  
(c) süreksiz ve rastgele yönlenmiş [19]

Kullanılacak elyafın tipi; uygulama alanına ve kompozit malzeme üretim yöntemine göre belirlenir. Genellikle yapısal uygulamalar için sürekli elyaflar önerilirken yapısal olmayan uygulamalar için süreksiz ve rastgele yönlenmiş elyaflar tavsiye edilir. Ancak yönlendirilme özelliklerinden dolayı sürekli elyaf takviyeli kompozitler, diğ er takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Bu tip kompozitlerde elyaflar; fitil, iplik, demet veya tel şekillerinde kullanılır [20].

Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen yüklemeler dikkate alındığında; çekme, basma ve eğilme gerilmeleri için istenilen dayanıma sürekli elyaflar sayesinde ulaşılabilir. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgeler, elyaf doğrultusunda ( $0^\circ$ ) maksimum performans gösterirler. Ancak elyaf eksenine dik ( $90^\circ$ ) doğrultuda düşük özellikler elde edilir çünkü bu bölgelerde matris dayanımı esas olmaktadır. Kompozitlerde takviyelendirme amacıyla sadece tekil elyafların/filamentlerin kullanıldığı üretim yöntemleri kısıtlıdır. Birçok 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 istenilen doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [10]. Tabakalı kompozitler bölümünde tekstil takviyelendirmelere yer verilecektir.

### **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 [13].

Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde en sık kullanılan takviye elyaflar; cam, karbon ve aramit elyaflarıdır. Tipik elyaf çapları 5 µm ile 20 µm arasında değişmektedir [10]. Çalışmamızda elyaf takviyesi olarak karbon elyaf kullanılmıştır.

#### **Karbon elyaf**

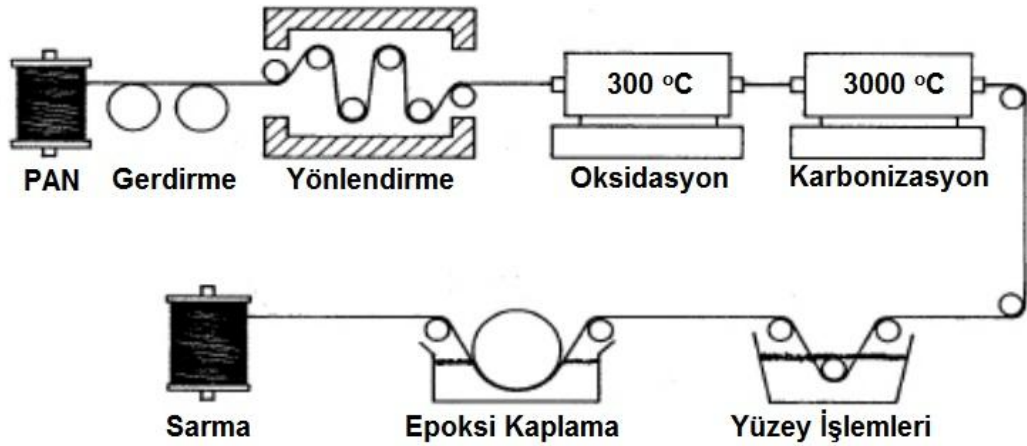
Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ancak kullanımı her geçen gün artan bir elyaf grubudur. Karbon elyafı cam elyafına göre daha güçlü ve hafiftir ancak üretim maliyeti yüksektir. Karbon elyaflar nemden etkilenmezler sürünme, aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Dayanım/ağırlık ve modül/ağırlık oranları oldukça yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık ve yüksek erime noktası karbon elyafının diğer avantajlarıdır. Bu önemli özelliklerinden dolayı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler uzay-uçak sanayiinde, otomotiv sektöründe ve savunma sanayinde yüksek performanslı parçaların yapımında tercih edilmektedir. Ancak düşük ani darbe direnci ve yüksek elektrik iletkenliği karbon elyafının dezavantajlarıdır [21].

Karbon elyafları; poliakrilonitril (PAN), zift (pitch), selüloz (rayon) olmak üzere üç genel hammadde ile üretilmektedir. Günümüzde kullanılan karbon elyaflarının sadece %10'u zift esaslıdır. Hammadde, üretim maliyeti, termal ve mekanik özellikler dikkate alındığında PAN içerikli karbon elyaf en uygun malzemedir [3].

PAN içerikli karbon elyafları kompozit malzemeleri daha mukavemetli ve daha hafif yapabilmek için sürekli geliştirilmektedir. PAN polimerinden karbon elyafına dönüşüm prosesi birbirini takip eden dört aşamada gerçekleşmektedir;



1. *Oksidasyon:* Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300°C’de ısıtılır. Bu işlem, elyaftan hidrojenin ayrılmasını ve daha uçucu olan oksijenin eklenmesini sağlar. Daha sonra karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek grafit teknelerine aktarılır. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem 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 işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.
3. *Yüzey iyileştirmesi:* Karbon yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın matris malzemesine daha iyi bağlanabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılması işlemidir.
4. *Kaplama:* Elyafları kompozit üretiminde kullanana kadar korumak için yapılan bir sonlandırma işlemidir. Bu aşamada; 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 genellikle epoksi kullanılır [23].



**Şekil 2.6:** PAN hammaddesi kullanılarak karbon elyaf prosesi [24]

Karbon elyafları piyasada genellikle sürekli elyaf formunda bulunur. Her biri 6 ile 10 µm arasında değişen çapta, 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, bu nedenle fiyatın ikinci planda olduğu uzay araçları, uçaklar, roketler ve füzeler gibi yüksek teknoloji alanlarında kullanılırlar. Otomobil sektörü için karbon elyaf takviyeli kompozitlerin fiyatları halen metallere rekabet edecek seviyede değildir.

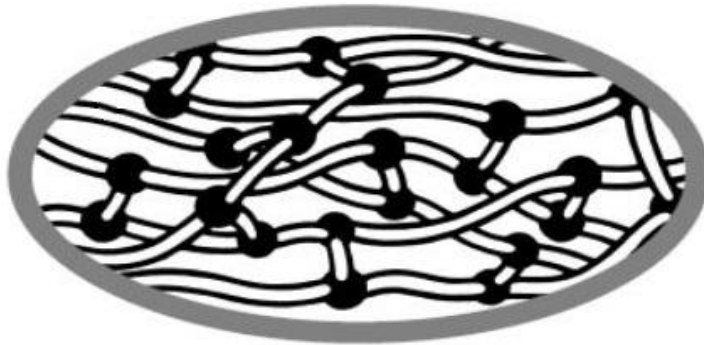
Karbon elyaflar çeşitli polimer matrislerle, en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Karbon elyafı epoksi reçineler ile birleştirildiğinde yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri gösterir [21].

### 2.1.2 Matris özellikleri

Matris malzeme kompozitlerin ikinci temel bileşenidir. Matrisin görevi; içerisindeki takviye elemanlarını bir arada tutmak ve mevcut yerleşimlerini korumaktır. Kompozit malzemenin maruz kaldığı tüm yükler matris üzerinden takviye elemanına aktarılır [25]. Özellikle elyaf yönelimine dik ( $90^\circ$ ) doğrultuda yapılan yüklemelerde, matrisin özellikleri ve elyaf-matris arasındaki bağ kuvvetleri kompozit yapının mukavemetini belirleyici rol oynamaktadır [3].

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 kullanılabilirlerinden 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. Bu nedenle moleküller termoplastikler gibi eritilip tekrar şekil verilemez. Bu durum termoset ile termoplastikleri birbirinden ayıran temel farktır. Malzemenin çapraz bağlanma yoğunluğu ne kadar fazla ise malzeme o kadar rijit ve ısıl stabilitesi yüksek olmaktadır [26].



**Şekil 2.7:** Termoset polimerlerin çapraz bağ yapısının şematik gösterimi [27]

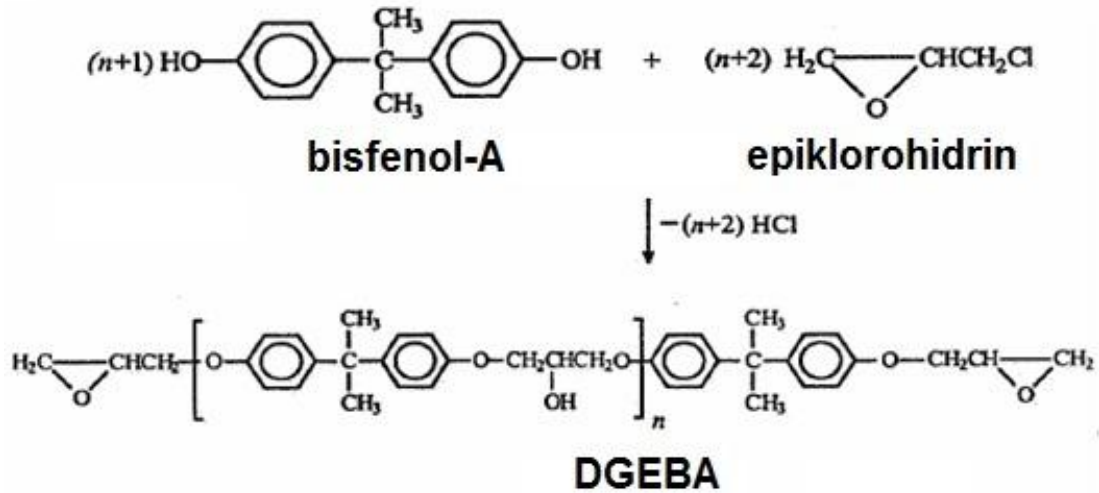
Termoset plastikler, termoplastiklere göre daha rijit ve dayanıklı olmanın yanında daha yüksek ısıl dayanım ve daha az sünek davranışa sahiptir [28]. Termosetler çoğu kimyasal içinde çözülmez ve zorlu hava şartlarında dahi uzun ömürlüdür. Oda sıcaklığında sınırlı çalışma zamanı, sertleşme için geçen uzun proses zamanı, kopma esnasındaki düşük uzama ve kırılmalıkları termosetlerin dezavantajlarıdır [21].

Kompozit malzemelerde sıklıkla kullanılan termoset esaslı matris malzemeleri polyester, vinilester ve epoksi reçinedir. Epoksi reçine yüksek maliyetine rağmen, üstün mekanik özellikleri, korozif sıvılara ve ortamlara karşı dayanımı, üstün elektriksel özellikleri, çeşitli alt katmanlarla mükemmel yapışabilme kabiliyetleri, iyi boyutsal ve ısıl kararlılıkları gibi birçok özelliğinden dolayı yüksek performanslı kompozitler için en çok tercih edilen termoset esaslı matristir [13].

### Epoksi reçine

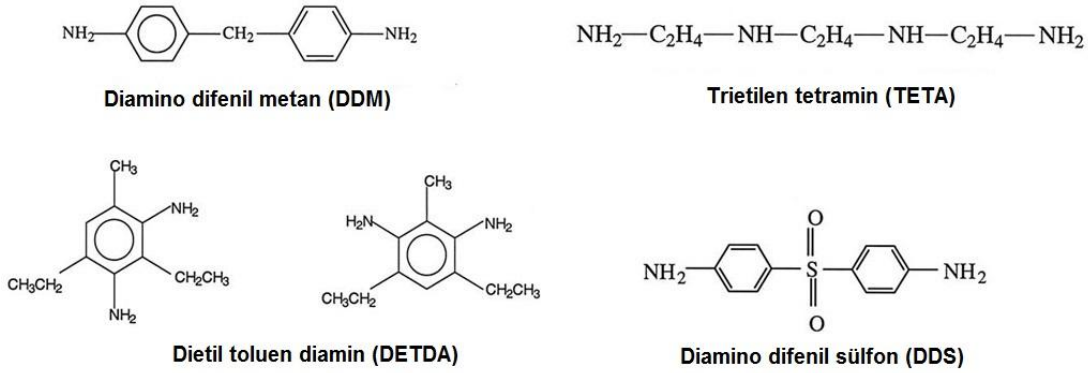
Epoksi reçinelerin birçok malzemeyle kimyasal uyumlu olması ve neredeyse her çeşit elyaf ile kullanılabilmesi onları yapısal ve özel kompozit uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Epoksilerin elyaf takviyeli kompozitlerin yanında kaplamalar, genel amaçlı yapıştırıcılar, transistör ve baskı devre plakaları gibi geniş bir uygulama alanı vardır.

Günümüzde ticari olarak en yaygın kullanılan epoksi reçine, epiklorohidrin ve bisfenol-A arasındaki reaksiyondan oluşturulan DGEBA esaslı epoksi reçinedir [29].



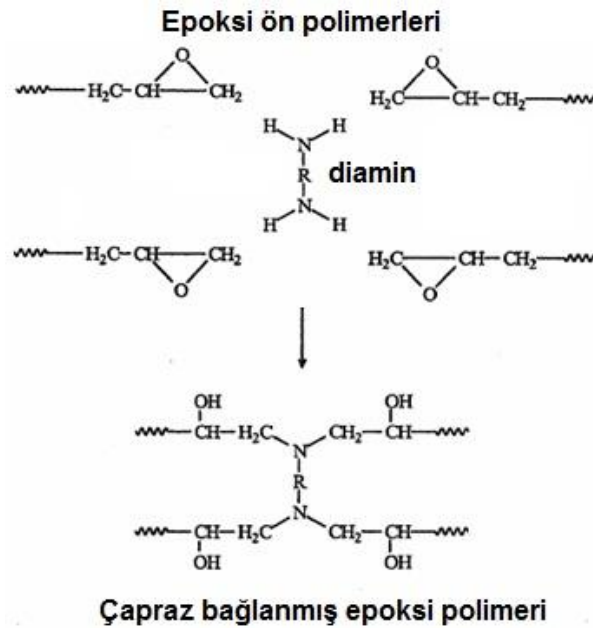
Şekil 2.8: DGEBA esaslı epoksi reçinenin üretim reaksiyonu [17]

Epoksi reçineler kolaylıkla sıvı halden katı hale geçerek sertleşebilirler. Bu sertleşme kimyasal bir katkının (sertleştirici) epoksi içerisine katılması ile gerçekleşir [30]. Sertleştirici seçiminde en az reçine seçimi kadar önem taşımaktadır ve ürünün performansını doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda epoksi reçineler için birçok sertleştirici malzeme geliştirilmiştir. Bunlar içerisinden en sık 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 2.9:** Epoksi reçinelerde kullanılan amin esaslı sertleştiriciler [31]

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 2.10:** Epoksi reçinenin amin esaslı sertleştirici ile sertleşme reaksiyonu [17]

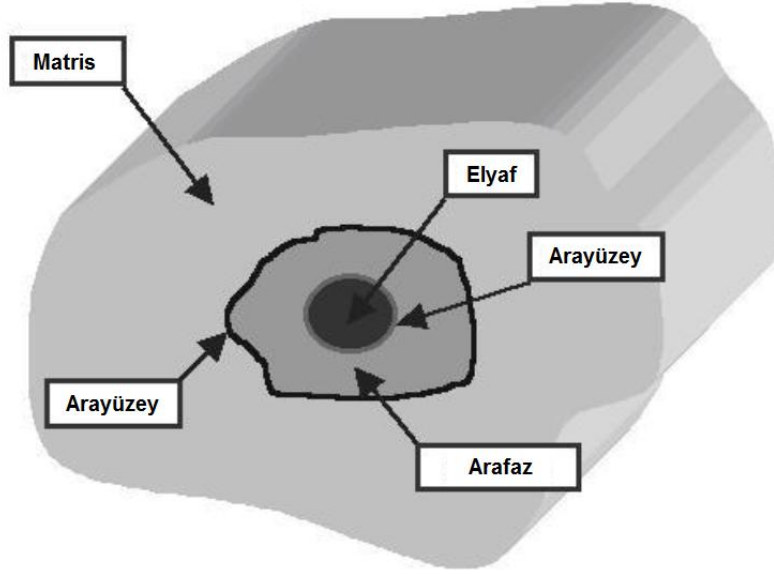
Çapraz bağı yapının dallanmış noktalarını vermek için her birincil amin grubu iki epoksi grubuyla reaksiyona girer [13]. Sertleştirici malzemenin seçimi epoksi kürlendikten sonra istenilen özelliklere ve nihai kullanım hususlarına göre yapılır. Sertleştirici malzeme miktarı bir epoksi grubundaki her reaktif hidrojene göre hesaplanır. Fazla sertleştirici kullanımı, çatlama ve kırılmalara yol açar [29].

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 matrisli kompozitlerin en önemli uygulamaları; sürekli elyaflar ile birlikte kullanıldıkları uzay-havacılık, savunma sanayi ve denizcilik sektörlerinde kullanılan ileri kompozit uygulamalarıdır. Özellikle uçak kanat ve gövdesini içeren askeri havacılık parçalarında epoksi esaslı kompozitler metalik olmayan kompozit dizaynı için gereken beklentileri karşılayabilmektedir. Havacılık uygulamaları için geliştirilen epoksi kimyasının aynısı, günümüzde hafif bisiklet iskeletleri, golf sopası, kayak, yarış arabası ve müzik aletleri üretiminde de kullanılmaktadır [29].

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

Elyaf takviyeli kompozitler genel olarak elyaf ve elyafı saran matris malzemesinden oluşur. Elyaf ile matrisin bir bütün oluşturabilmesi için aralarında mekanik yada kimyasal bir bağ olması gerekmektedir [10]. Kompozit yapıda bağ oluşumu, arayüzey kavramını ortaya çıkarmaktadır. Arayüzey; kompoziti oluşturan matris ve takviye elemanından sonraki üçüncü önemli unsurdur ve bileşenlerin birbirilerine olan sınırır. Ayrıca difüzyonun ve kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği geçiş bölgesi olarak tanımlanır [33]. Şekil 2.10'da elyaf ve matris arası arayüzeyi temsili olarak gösteren kompozit mikro yapısı yer almaktadır.



**Şekil 2.11:** Elyaf takviyeli kompozit malzemenin mikro yapısı [34]

Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf-matris arayüzey özellikleri, iki bileşenin kimyasal ve morfolojik doğası ile fiziksel ve termodinamik uyumuna bağlıdır, bu uyum kompozit yapının performansını doğrudan etkilemektedir [15]. Dolayısıyla, kompozit malzemenin genel performansı üretim parametrelerinden de önce, elyaf-matris uyumuna yani arayüzey bağına bağlıdır. Elyaf-matris arayüzey bağı ise mekanik etkileşim, adsorpsiyon, ıslanma, elektrostatik çekim, kimyasal bağ, hidrojen bağı, van der Waals kuvvetleri ve diğer düşük enerjili ikincil kuvvetlerden etkilenmektedir. İyi bir arayüzey; matristen elyafa olan yük transferini olumlu etkilemektedir [34].

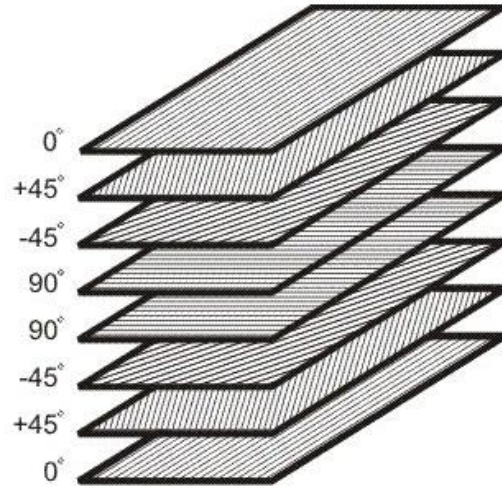
Arayüzeydeki bağlanmada; matris malzemesi elyafları çok iyi sarabilmeli ve ıslatabilmelidir. Islanma iyi olmazsa, zayıf bir arayüzey meydana gelir. Islatılabilirlik ilk şarttır ancak iyi bir arayüzey için yeterli şart değildir. Arayüzey bağlanması normal koşullarda yeterli sağlamlıkta oluşmuyorsa, bir 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 [10].

Uygulama kolaylığı açısından matrisi modifiye etme en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Birçok araştırmaya göre nano boyutlu parçacıkların polimer matrislere ilavesi sonucu elyaf ile matris arası arayüzey özelliklerinin iyileştirildiği görülmüştür. Sonuç olarak; elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik performansı elyaf özelliklerine, miktarına, yönlenme biçimine, matrisin dayanımına, kimyasal kararlılığına ve elyaf-matris arayüzey özelliklerine bağlıdır [35].

## 2.2 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapılar en eski ve en yaygın kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerdir. Tabaka; matris içerisinde örülmüş elyaflar veya tek yönlü elyaf düzlemidir. En az iki tabakanın kombinasyonu ile tabakalı kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların birleşimi ile birçok yönde yüksek mukavemet değerleri elde edilir [21]. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi tabakaların yönlendirilmesi ile tabakalar yığını oluşmaktadır. Tabakalı kompozitler, metallere göre daha hafif ve mukavemetli olmaları nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Tabakalandırılmış elyaf takviyeli kompozitlerin kullanım yerleri; uçak-füze, tekne ve raylı taşıt gövdeleri, tenis raketleri, golf sopaları vb.’dir. Genellikle tabakalarda kullanılan matris malzemesi aynıdır [36].

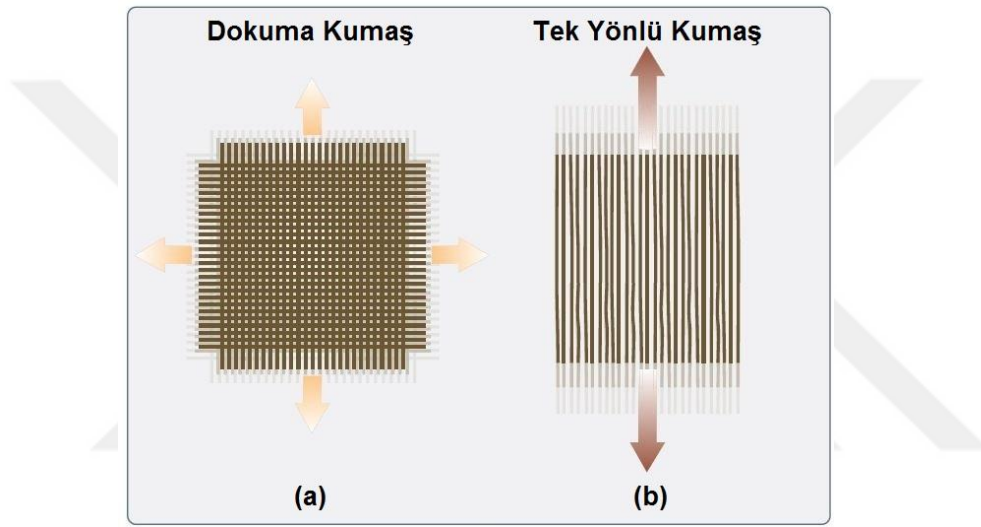


**Şekil 2.12:** Tabakalı kompozit yapıda yönlendirilmiş tabakaların genel görünüşü [37]

Her bir tabakanın komşu tabakadan bağımsız olarak deforme olma eğilimi vardır. Bu durum laminatlarda kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Delaminasyona sebep olan kayma gerilmeleri laminat kenarlarında en büyük olmaktadır. Bunun önlenmesi

için tabakalar arası bölgenin güçlendirilmesi konusu önem kazanmaktadır. Tabakalar arası bölge; matris modifikasyonu sonucu iyileşen arayüzey bağlanması ile güçlendirilebilmektedir.

Yapısal uygulamalarda kullanılan kompozitler genellikle çok katlıdır. Her tabaka tasarım amaçlarına göre değişen elyaf doğrultularında tek katlı kompozitten oluşabilir. Tek yönlü kompozit malzemeler elyaf yönünde daha üstün 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 2.13:** Dokuma ve tek yönlü kumaşlar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi  
a) Eşit özellikler b) Eşit olmayan özellikler [38]

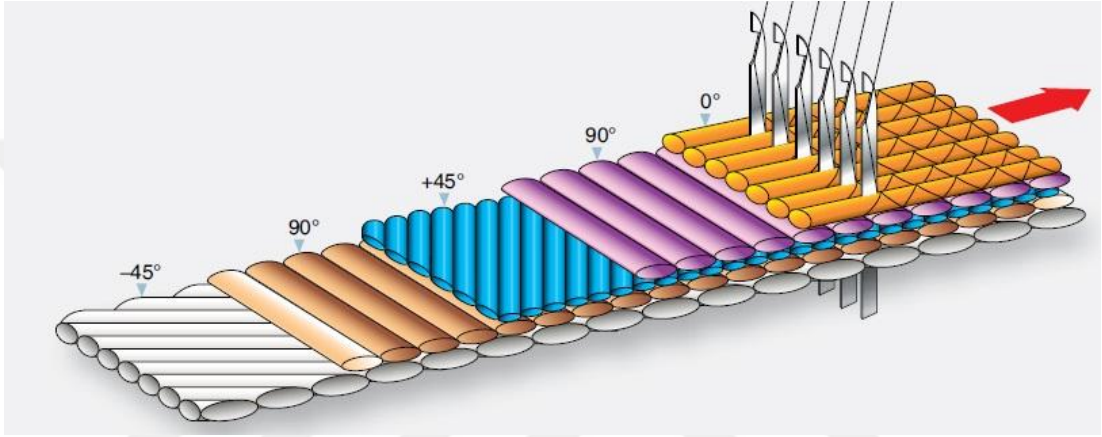
Anizotropik davranış elyaf takviyeli kompozitlerin en büyük dezavantajıdır. Bu nedenle, birkaç yönden yüklemeye karşılaşacak kompozitlerde, yükün geldiği yönlerde eşit mukavemet elde etmek amacıyla elyaflar kumaş formunda üretilirler. Kumaş formu; sürekli elyaf demetlerinin tekstil makinelerinde istenilen şekilde örülmesi veya dokunması ile elde edilir. Kumaş formundaki takviye malzemeleri tekstil takviyeler olarak adlandırılmaktadır [39].

Tekstil takviyelerin; kolay işlenebilme, şekillendirilebilme ve tasarımda esneklik sağlayabilme gibi avantajları bulunmaktadır. Dokuma (woven), örme (knitting), saç örgüsü (braiding), dikim (stiched) ve çok eksen (multiaxial) teknolojileriyle üretilen kumaşlar veya bunların kombinasyonları takviye malzemesi olarak kompozit sektöründe kullanılmaktadır. Çok eksen teknolojisiyle üretilen kumaşlar en sık kullanılan tekstil takviyeleri arasındadır [40].



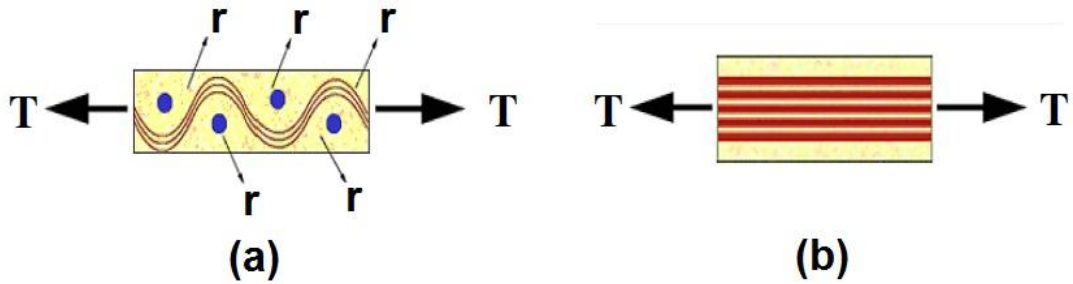
### 2.2.1 Çok eksenli kumaşlar

Son yıllarda kompozit parçaların tasarımında çok eksenli kumaşların kullanımı artmıştır. Bu kumaşların yapısındaki iplik gruplarında herhangi bir kıvrım olmamasından dolayı kıvrımsız kumaşlar (Non-crimp fabric, NCF) olarak adlandırılmaktadırlar [10]. Çok eksenli kumaşlar yada diğer adıyla kıvrımsız kumaşlar; elyaf sürekliliği, elyafların çok katmanlı olarak üretilmesi ve doğrultularının kontrol edilebilmesi nedeniyle yük taşıyan elemanların imalatı için en uygun güçlendirme malzemesi olarak kabul edilmektedirler [41].



Şekil 2.14: Çok eksenli kumaşın şematik görünümü [38]

Dokuma kumaşlarda çekme yüklemeleri altında dalgalanma (crimp) görülmektedir ancak kıvrımsız kumaşların ipliklerinde bu dalgalanma durumu olmadığı için özellikle düzlem içi mekanik özellikleri, aynı elyaf hacim oranına sahip olan dokuma kumaşlara göre oldukça yüksektir. Bunun nedeni dalgalanma durumunda kompozitin birim alanında reçine zengin bölgeler oluşması ve elyaf miktarının az olmasından dolayı mekanik özelliklerin düşmesidir [40]. Şekil 2.15'te dokuma ve kıvrımsız kumaşlardaki dalgalanma durumu gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Dokuma ve kıvrımsız kumaşlarda dalgalanma durumu  
(a) Dokuma kumaş; dalgalanma var, reçine zengin bölgeler "r"  
(b) Kıvrımsız kumaş; dalgalanma yok [19]

Kıvrımsız kumaşlar takviye malzemesi olarak özellikle yüksek performanslı tekneler ve rüzgar türbin kanatlarındaki kompozitlerde kullanılmaktadır. Son yıllarda uzay ve havacılık sanayisindeki kullanımları giderek artmakta ve gelecekte bu alanda kullanılan temel takviye malzemesi olacağı belirtilmektedir. Bu yöntem ile tek seferde farklı kumaş katmanlarına sahip bir yapı oluşturulabildiğinden işçilik maliyetleri düşüktür ve dokuma kumaşlara göre çok daha kolay şekillendirilebilmektedir [40].

### **2.3 Nanoparçacık Takviyeli Kompozitler**

Parçacık takviyeli kompozitlerde takviye elemanı genellikle uzun boyutlara sahip olmayan yapılardır. Matris içerisindeki parçacık takviyenin en az bir boyutunun nanometre ( $10^{-9}$  m) seviyesinde olması durumunda, bu malzeme nanokompozit olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemelerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar hem sanayide hem de bilimsel çevrede büyük ilgi görmektedir [42].

Birçok önemli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin yüzey ve yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği bilindiğine göre, nano yapıdaki bir parçacık aynı bileşime sahip olduğu daha büyük boyutlardaki parçacıklardan farklı özelliklere sahip olacaktır. Parçacıklarda mikro boyuttan nano boyuta geçildiğinde fiziksel özelliklerde etkileyici değişiklikler gözlenir. Nano boyutlu dolgular mikro boyutlu dolgulara göre; gerilim transferi için arayüzey görevi gören çok büyük yüzey alanına sahiptir [43]. Spesifik yüzey alanları  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  değerinden daha fazla olan nano parçacıkların en önemli avantajı malzemeye sağladıkları iyileşmelerin düşük hacim fraksiyonların da bile elde ediliyor olmasıdır [44].

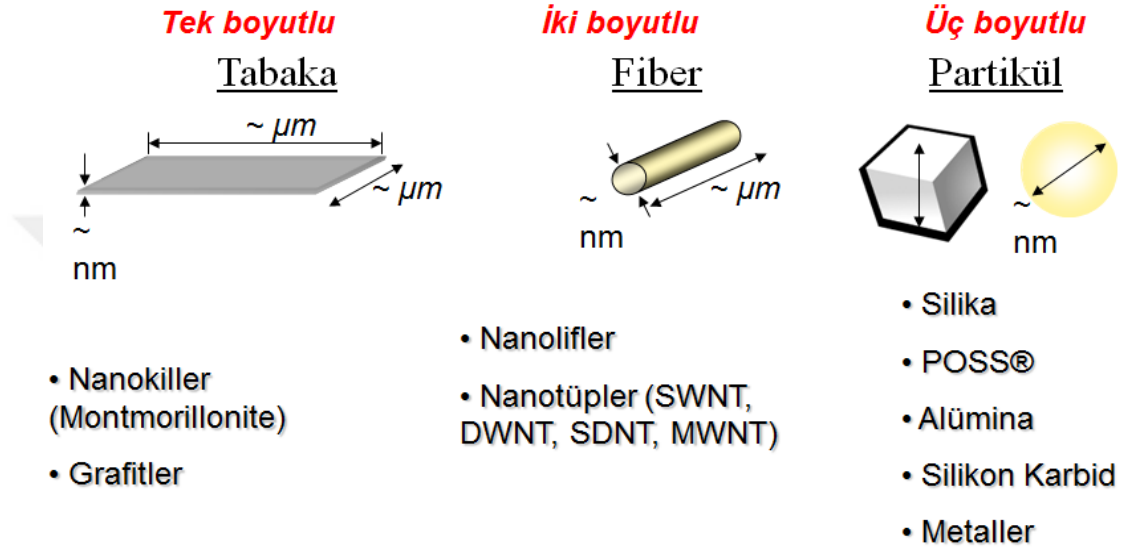
Günümüzde polimer, seramik ve metal malzeme grupları nanokompozitler ile takviye edilmektedir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar polimerler kullanılarak gerçekleştiği için şimdiye kadar en sık kullanılan matris malzemeleri polimerler olmuştur. Son 15 yıldır; polimerik nanokompozitler alanında birçok temel ve uygulamalı araştırmalar yürütülmüştür [45].

Polimer nanokompozitler, polimerlerin içerisine nano boyutlu (1-100 nm) inorganik parçacıkların dağıtılması ile oluşmuş yeni bir hibrit malzeme sınıfıdır [46]. Nanoparçacıklar polimerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerini iyileştirip eşsiz özellikte yeni malzemelerin geliştirilmesine olanak sağladığı için yüksek potansiyele

sahip dolgu malzemeleri olarak görülmektedir. Polimer matris nanoparçacıklarla modifiye edildiğinde; camsı geçiş ve bozunma sıcaklığında artış, düşük dielektrik sabiti, çekme ve eğme gibi mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmaktadır [47].

### 2.3.1 Nanodolgular

Nanokompozitlerin eldesinde kullanılan dolgu malzemeleri nanometre seviyesindeki boyut sayısına göre; tek, iki ve üç boyutlu olarak sınıflandırılmaktadır [48].



Şekil 2.16: Farklı boyutlara sahip nanodolgu çeşitleri [48]

Tek boyutlu nanodolgular; malzemenin sadece 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 [49].

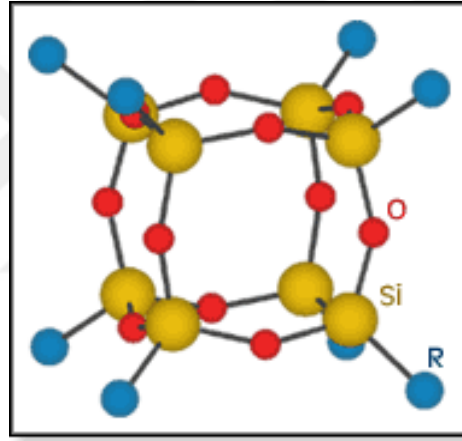
İki boyutlu nanodolgular; iki boyutunun nanometrik diğer boyutunun ise daha büyük ölçekte olduğu malzemelerdir. Bu malzemelere örnek olarak; nanolifler, nanotüpler ya da kil kristalleri verilebilir [50].

Üç boyutlu nanodolgular; genelde izo-boyutsal küresel parçacıklar olarak bilinen ve tüm boyutlarının nanometrik ölçekte olduğu malzemelerdir. Karbon siyahı, silika ( $\text{SiO}_2$ ), çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), polihedral oligomerik silseskuokzan (POSS) gibi üç boyutlu nanodolgular da nanokompozit sentezinde yaygın olarak kullanılmaktadır [51].

Son yıllarda POSS nanodolguları; nanometre boyutu, kolay bir şekilde polimerik malzemeler içersine katılabilme yetenekleri ve polimerleri mekanik ve ısıl özellikler açısından eşsiz takviyelendirme kapasitelerinden dolayı oldukça ilgi çekmektedir [52].

## POSS

POSS molekülleri üç boyutuda nanometre seviyesinde olan kübik şekilli dolgu malzemeleridir. İçersine katıldığı polimer zincirinin hareketliliğini moleküler seviyede kontrol ederek polimerlere emsalsiz özellikler kazandırmaktadır [2]. Silseskuokzan terimi bir buçuk anlamına gelen “sesqui” teriminden türetilmiştir. Genel formülü  $(\text{RSiO}_{1,5})_n$  olup her silikon için  $\frac{1}{2}$  oksijen vardır. “ane”takısı hidrokarbon grubunu simgeler (R= alkil, alkilen, aril veya arilen grupları v.b.) “polihedral” terimi ise çok yüzlü kafes veya kübik yapıyı gösterir [53].



Şekil 2.17: POSS molekülü [42]

POSS yapıların en önemli iki özelliginden ilki, kimyasal bileşiminin hem organik hemde inorganik yapılar içeren hibrit yapıda olmasıdır; iç hücre inorganik silikondan ve oksijenden oluşurken, dış tabaka organik bileşenler içrerir, bunlar hem polar hemde apolar yapılar olabilmektedir. İkincisi ise, POSS moleküllerinin yaklaşık 3-5 nm büyüklük aralığında olmasıdır. Bu büyüklükteki POSS molekülü moleküler boyutta tüm polimerik yapıların zincirlerinin arasına çok rahat girebilmekte ve polimer matrisi buna bağlı olarak güçlendirmektedir [54]. POSS molekülleriyle güçlendirilmiş nanokompozitler malzeme özellikleri bakımından polimer ve seramik bölgenin arasındadır [55]. Ticari olarak POSS moleküllerinin önemli bir kısmı *Amerikan Hava Kuvvetleri Edwards Laboratuvarı* ve *Hybrid Plastics Company* tarafından üretilmektedir.

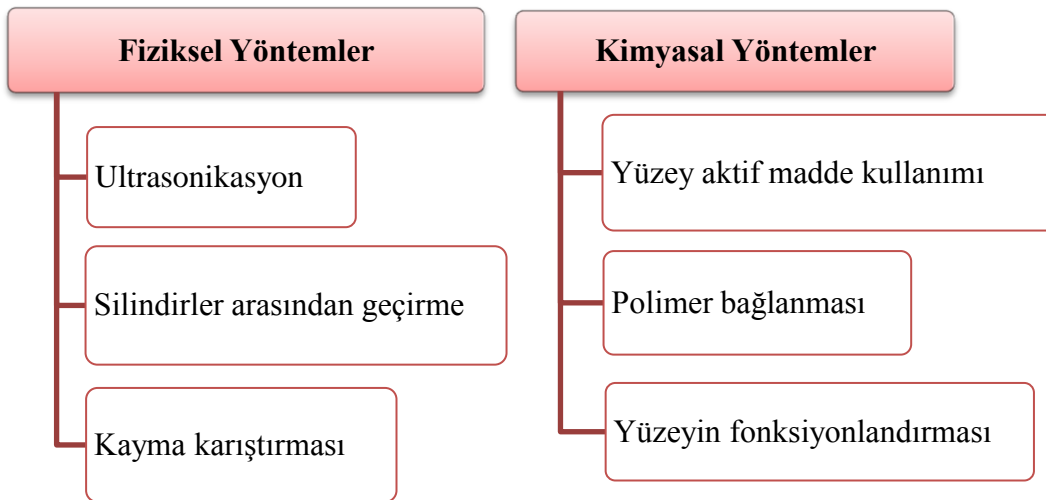


Araştırmacılar, polimer içerisine POSS nanoparçacıklarını dağıtmanın; mekanik dayanımı, modülü, rijitliği, yüzey sertliğini, kullanım sıcaklığını ve oksidasyon direncisi arttırdığını; yanmazlığı, ısı çıkışını ve viskoziteyi ise azalttığını bulmuştur. Bu zellikler elde edilirken hafiflik ve süneklik özellikleri değişmemiştir. İyileştirilen bu özellikler sayesinde POSS nanokompozitler; ilaç taşınımlı, polimer elektrolitler, termoset ve termoplastik polimerler gibi geniş bir yelpazede uygulama olanağı bulmuştur. POSS içeriğinin diğer faydaları olarak; uçucu olmaması, ticari olarak kolay bir şekilde sentezlenebilmesi, kokusuz ve çevreyle dost olması sayılabilir. Hibrit olmayan emsallerine göre; yüksek ticari kullanım potansiyeli ve performans arttırma özelliklerinden dolayı POSS nanokompozitler bir süredir geniş çapta incelenmektedir [52].

### 2.3.2 POSS/Polimer nanokompozitlerin hazırlanması

Nanodolguların sahip oldukları üstün özellikleri ortaya çıkarabilmek için öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken konu, nanodolguları polimer matris içerisine homojen bir şekilde dağıtmaktır. Böylece matris ile nanodolgu arasında etkin bir yük aktarımı ve homojen gerilme dağılımı elde edilirken gerilme konsantrasyonu oluşturan bölgelerin azalması sağlanır [35].

Nanodolguların matris içerisinde topaklaşması ve yetersiz dağılımı, nanokompozitlerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi sonucunu meydana getiren en önemli etkendir [57]. Bu dağılım problemini özlemek için birçok fiziksel ve kimyasal yöntem geliştirilmiştir. şekil 2.20’de bu yöntemler gösterilmiştir.



şekil 2.20: Nanodolguların polimerler içerisine etkin şekilde dağıtılmasında kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler [35]

Nanodolguların polimer matris içerisine dağıtılmasında kullanılacak fiziksel yöntem, polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır. Nanodolguları düşük veya orta düzeyde viskoziteye sahip reçineler içerisinde homojen olarak karıştırmak için en sık kullanılan yöntemlerden biri ultrasonikasyon işlemidir. Örneğin; Lin ve arkadaşları [58]; epoksi reçineyi üç farklı yöntem kullanılarak Cloisite 15 A<sup>®</sup> kil ile modifiye etmiştir. Bu yöntemler; doğrudan karıştırma, çözelti ile karıştırma ve ultrasonikasyon olmuştur. Nanokompozitin mikroyapı incelemeleri; ultrasonikasyon işleminin nanokillerin dağılımı açısından en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir.

Ultrasonikasyon işleminde ses dalgaları sayesinde nanodolgu kümeleri dağılır ve reçine içerisinde homojen bir dağılım sağlanır. Ultrasonikasyon sırasında, basınçlı ses dalgaları sıvı ortam içinde yayılır. Bu 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 yutamazlar ve yüksek basınç bölgesinde sesli bir şekilde patlarlar. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir. Bu patlama ile yüksek sıcaklık ve basınç açığa çıkar. Ayrıca bu baloncuklar patladığında yüksek hızlı sıvı jetlerinin oluşmasına neden olur. Oluşan sıvı jet akımları yeteri kadar enerjiye sahip olabilirse nanodolguları bir arada tutan kuvvetleri yenebilir ve sıvı içerisinde dağılmasını sağlayabilir [59]. Şekil 2.21’de ultrasonikasyon cihazı gösterilmiştir.



**Şekil 2.21:** Ultrasonikasyon cihazı [60]

Ultrasonikasyon, içerisine nanodolgu atılmış reçine kabının ultrasonik banyoya koyulması ile veya ultrasonik dalga yayabilen bir metal çubuğun bu kabın içerisine daldırılması ile sağlanabilir. İlk metot literatürde banyo ultrasonikasyonu olarak adlandırılırken diğer metot uçlu ultrasonikasyon olarak adlandırılmaktadır [61].

POSS nanoparçacıklarında polimer matris içerisine hem kimyasal hemde fiziksel yöntemler ile katılabilmektedir. Kimyasal karıştırma yöntemlerinde; POSS nanoparçacıkları polimer ile kovalent bağlanır ancak bu yöntemler sentetik prosedürler içerir ve elde edilen nanokompozitin ticarileşmesini kısıtlar. Fiziksel karıştırma yöntemleri ile POSS nanoparçacıklarını polimer matris içerisine katmanın birçok avantajı vardır. Bunlar;

- Kolay proses edilişi,
- Çok yönlülüğü,
- Hızlı ve ekonomik oluşudur [56].

Fiziksel karıştırmanın etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi için POSS ile polimer arası uygun yüzey etkileşimleri şarttır. POSS yüzeylerine tutturulan fonksiyonel gruplar polimer ile uyumlu olduğu takdirde polimer ile POSS arası güçlü arayüzey etkileşimi sağlanır. Böylece polimer ile uyumlu yüzey fonksiyonalitesine sahip POSS, polimer matris içerisine homojen bir şekilde dağılabilir [62]. Ayrıca POSS'un polimer matris içerisine homojen dağılımı elde edilen nanokompozit özelliklerinin artırılmasında yardımcı olur.

### **2.3.3 POSS/Polimer nanokompozitlerin fonksiyonel özellikleri**

Polimer nanokompozit özelliklerinin geliştirilmesinde en önemli nokta nanodolgular ile matris arasındaki uyumluluktur. Uyumlu bir matris ile nanodolgu arası arayüzeyde etkin bir yük aktarımı gerçekleşmektedir. Arayüzey bağlanması nanodolgu yüzeylerinin matris ile etkileşecek uygun fonksiyonel gruplarla (amino-, karboksil-, glisidil-, epoksi-) fonksiyonelleştirilmesi ile sağlanabilir. Bu fonksiyonel gruplar sayesinde arayüzeyde oluşan güçlü kimyasal bağlar yükün aktarılmasında köprü görevi görürler. Böylece gerilim transferi daha verimli gerçekleşir. Matristen nanodolgulara yeterli gerilme aktarımı sağlandığı takdirde nanodolgunun sahip olduğu mükemmel özellikler ortaya çıkabilir. Nanodolgu yüzey fonksiyonel grupları ve matris içerisindeki nanodolgu konsantrasyonu elde edilecek nanokompozitin özellikleri açısından oldukça önemlidir [35].



POSS içerikli nanokompozit özelliklerinin kontrolünde de yüzey fonksiyonel grupları önemli rol oynar. POSS'un sahip olduğu yüzey fonksiyonallitesi polimer matrisle uyumlu olmadığı durumda; homojen dağılım sağlanamaz ve POSS bakımından zengin ve polimerce zengin bölgeler oluşarak faz ayrışması meydana gelir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenebilen bu tip faz ayrışmalarında; uygun takviyelendirme etkisi sağlanamaz, hatta geliştirilmesi istenen özelliklerde düşüşler bile görülebilir. Yapılan çalışmalarda; dinamik mekanik analiz (DMA) sonuçları, mikrofaz ayrışmasına uğramış malzemelerin beklenenden daha düşük modül değerleri gösterdiğini ortaya çıkarmıştır [52].

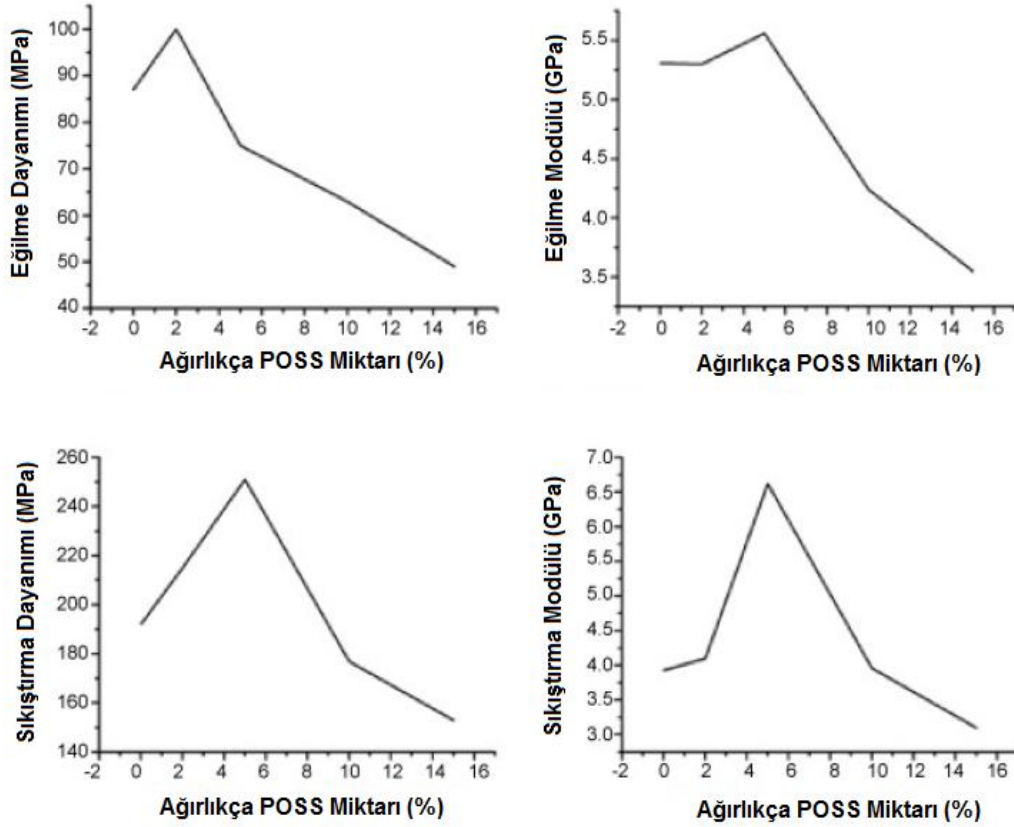
### **Mekanik özellikler**

Polimer matris içerisine POSS nanoparçacıklarının katılması ile elde edilen nanokompozitin mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu özellikler; POSS dağılımının durumuna, POSS yüzeyindeki fonksiyonel gruplara, POSS miktarına, kristaliniteye ve morfolojiye bağlıdır [52].

Wang ve arkadaşları [63]; poli(laktik asit) (PLA) içerisine trisilanolizobütil-POSS katılması ile sünekliğin, saklı modülün ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin iyileştiği bildirilmiştir. Bu özellik iyileşmeleri; PLA ve POSS arası hidrojen bağı etkileşimleri sonucu arayüzey yapışması ile açıklanmıştır. POSS içeren PLA nanokompozitlerin saklı modülünün artan sıcaklıkla birlikte 50° ve 65°C arası bölgede belirgin bir düşüş gösterdiği, bunda camsı geçiş bölgesini ifade ettiği bildirilmiştir.

POSS-polimer kompozitlerde mekanik özellikleri belirlemede POSS miktarı oldukça önemlidir. POSS içerikli metakrilat esaslı nanokompozitler POSS miktarına bağlı olarak iyi yada kötü mekanik özellikler gösterebilir. Wu ve arkadaşları [64]; ağırlıkça %2'lik POSS dağılımı sonucu mekanik özelliklerde sıradışı bir artış tespit etmiştir; nanokompozitin eğilme dayanımı ve sertliği %15 artarken sıkıştırma dayanımı %12 oranında artmıştır ve toklukta ciddi bir artış meydana gelmiştir. POSS konsantrasyonu %5'e çıkarıldığında sıkıştırma dayanımı %31 artarken, sıkıştırma modülü %68 artmıştır. Ancak eğilme dayanımı 87 MPa'dan 75 MPa'a düşmüştür. Ağırlıkça POSS oranı %10 üzerine çıktığında, nanokompozitin mekanik özelliklerinde hızlı bir bozulma olduğu görülmüştür. Bu keskin düşüş; artan POSS miktarı ile birlikte çapraz bağlı polimerik ağ yapının oluşumunun çok hızlı bir

şekilde gerçekleşmesi ve reaktif türlerin hareketinin kısıtlanması ile açıklanmıştır. Dolayısıyla, fazlalık POSS monomerleri polimerleşmeyebilir ve sonucunda kompozitin mekanik özelliklerini düşürücü etki yapan topaklaşmalar meydana gelir. Şekil 2.22’de bu etkiler görülmektedir.



**Şekil 2.22:** POSS-metakrilat nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin artan POSS miktarına göre grafikleri [64]

Zheng ve arkadaşlarının [65] yaptığı çalışmada POSS içeren polietilen (PE), saf polietilene göre üstün mekanik özellikler göstermiştir. PE'nin mekanik özelliklerinin kristalinite derecesine bağlı olduğu bilinmektedir, yüksek kristalinite ile yüksek mekanik özellikler elde edilmektedir. Bu durumda, hacimli POSS yan gruplarının katılması sonucu kristalinitenin bozulmasından dolayı PE'nin elastik modülünün düşmesi beklenir. Ancak bu çalışmada  $-50^{\circ}$   $+50^{\circ}$  C sıcaklık aralığında ağırlıkça %19 POSS içeren PE-POSS'un saklı modülünün saf PE kontrol numunesi ile tamamiyle aynı olduğu bulunmuştur. POSS nanoparçacıklarının varlığından dolayı PE'nin kristalinitesinin olumsuz etkilenerek %56'dan %39'a düşmesine rağmen çekme özelliklerinin korunduğu görülmüştür.

## **Termal kararlılık**

Ekstrem koşullarda polimerik malzemelerin kullanımı polimerlerin düşük termal kararlılıklarından dolayı kısıtlıdır. POSS kafes yapısından dolayı polimer matris içerisine POSS nanoparçacıkları katmak polimerin termal kararlılığını arttırabilir. POSS içerikli kompozitlerin termal kararlılığı; POSS-polimer yüzey etkileşimlerine, POSS miktarına ve çapraz bağlanmaya bağlıdır. Polimerin termal kararlılığını arttırmak için POSS nanodolgusunun polimer matris içerisine homojen bir şekilde dağıtılması gerekmektedir [66].

POSS içerikli epoksi nanokompozitler iyileştirilmiş termal kararlılık gösterir. Epoksi bazlı nanokompozitlerde termal kararlılığın artırılmasında POSS'un yüzey fonksiyonallitesi kritik öneme sahiptir. Örneğin; oktaaminofenil-POSS/epoksi nanokompozitler oktanitrofenil-POSS hibritlerine göre daha belirgin iyileşme göstermiştir [67]. Tam tersi; poli(etilen oksit) (PEO)-POSS katılması durumunda epoksi nanokompozitin bozunma sıcaklığında düşüş meydana gelmiştir [68]. Bu durumun; kullanılan PEO içeriğinin saf epoksiye göre daha düşük termal kararlılığı sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Rashid ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada [69]; epoksi-POSS nanokompozitlerin yüksek sıcaklıklara dayanabildiği dolayısıyla yüksek bozunma sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür. Termo-oksidatif çalışmalarda bu sonucu desteklemiştir. Ayrıca termal genleşme katsayısında arttığı tespit edilmiş olup bu durum içerikteki hacimli POSS yan gruplarından dolayı polimer zincirinde oluşan sterik engelden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

Termal kararlılık, POSS-polimer nanokompozitlerin içeriğinde bulunan POSS miktarından da etkilenmektedir. Zheng ve arkadaşları [65]; PE içerisindeki POSS nanoparçacık miktarının termal kararlılığa etkisi üzerine çalışmıştır. POSS-PE nanokompozitlerinin iyileştirilmiş termal kararlılık sergilediği bozunma sıcaklığının başlangıç değerinin artması ile ortaya koyulmuştur. Bu artış, azot ortamında ayırık PE zincirleri ve POSS silikon çekirdeği arasındaki olası çapraz bağlanmalara dayandırılmıştır. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları; PE-POSS nanokompozitlerin termal oksidatif dayanımında belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu iyileşme polimer eriyiği yüzeyindeki silika tabakasının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Silika tabakası yüzeyde bariyer görevi görüp, saf polimerin

degradasyonunu geciktirici etki yapmıştır. PE-POSS nanokompoziti için %5'lik ağırlık kaybının görüldüğü sıcaklık 368 °C iken PE kontrol numunesi için 298°C ölçülmüştür. Sıcaklıktaki bu belirgin artış, eklenen POSS nanoparçacıklarının polimerin genel termal kararlılığını iyileştirdiği gibi termal bozunma davranışında iyileştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Ancak ağırlıkça %23 POSS konsantrasyonundan sonra düşüşler gözlemlenmiştir.

Huang ve arkadaşları [70]; bir dizi POSS/poliimit (PI) nanokompozitleri ile çalışmalar gerçekleştirmiştir. İyi karıştırılmış POSS parçacıkları ve PI ile POSS arası güçlü kovalent bağlar sonucu çapraz bağlanma yoğunluğundaki artıştan dolayı elde edilen POSS/PI nanokompozitin termal kararlılığında önemli iyileşmeler sağlanmıştır.

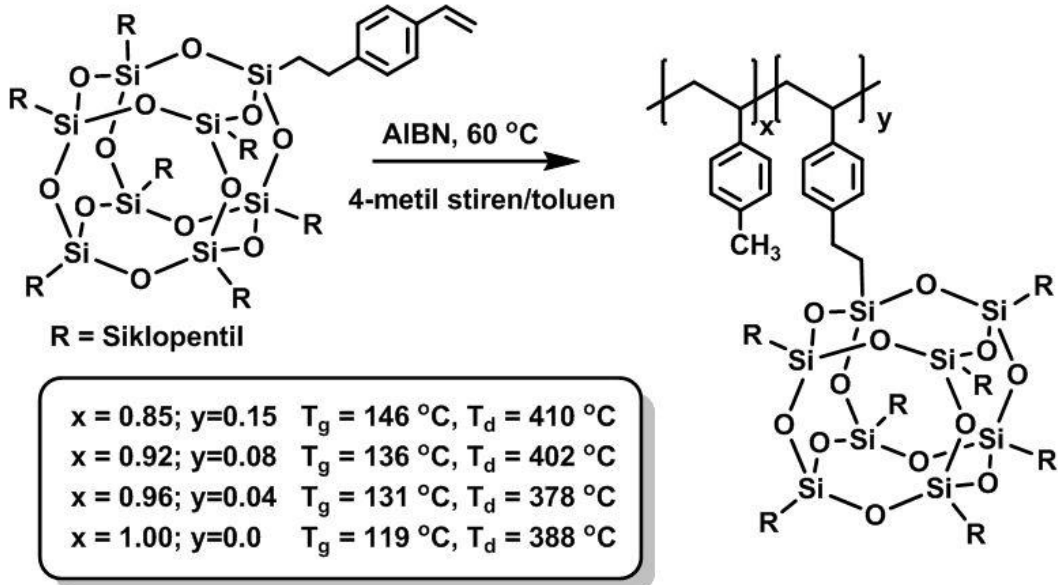
Wu ve arkadaşları [71]; çözelti polimerizasyonu yöntemi ile POSS içerikli PI nanokompozitler sentezlemiştir. Sonuçlar POSS-PI hibrit nanokompozitlerinin termal kararlılığının saf PI'e göre arttığını kanıtlamıştır.

### **Camsı geçiş sıcaklığı**

Polimerik matrise POSS parçacıkları katmak parçacığa komşu polimerin hareketliliğini değiştirebilir. Bu yüzden; POSS içerikli kompozit malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) parçacık-polimer yüzey karakteristikleri, POSS miktarı ve polimerin kristalinitesi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Polimer/POSS nanokompozitlerde camsı geçiş sıcaklığındaki değişkenlik; serbest hacim fraksiyonu, sterik engel, polimer/POSS etkileşimleri gibi çeşitli etkilerin bir sonucudur. POSS nanoparçacıkları polimer matrise başarılı bir şekilde katıldığında polimerik nanokompozitin  $T_g$ 'sini arttırmaktadır [52].

Madbouly ve arkadaşlarının [72] yaptığı çalışmada; diamino-POSS içeren poliüretan nanokompozitlerin  $T_g$  değerlerinde; artan POSS oranıyla birlikte istikrarlı bir biçimde artış tespit edilmiştir.

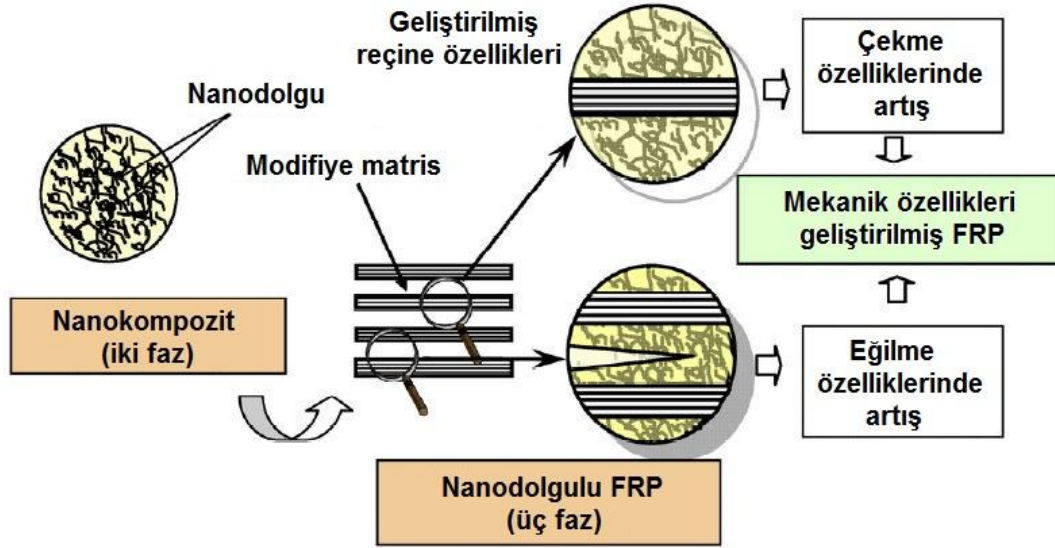
Haddad ve arkadaşları [73] mono stiril fonksiyonlu POSS bileşiğini  $R_7(Si_8O_{12})CH_2CH_2C_6H_4CH=CH_2$  (R=siklopentil) sentezlemiştir. 4-Metilstiren-ko-stiril POSS kopolimeri serbest radikal polimerizasyonu ile termal olarak 60°C'de hazırlanmıştır. Stiril-POSS nanodolgununun poli(4-metilstiren) içerisine katılmasıyla  $T_g$  ve bozunma sıcaklığı " $T_d$ " değerleri saf poli(4-metil stiren)'e göre daha yüksek değerlere ulaşmıştır.



Şekil 2.23: Stiril-POSS ve 4-metilstirenin kopolimerizasyonu [73]

## 2.4 Elyaf Takviyeli Nanokompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerde (FRP), mekanik özellikler açısından yapılan malzeme tasarımlarında elyaf yönelimleri değiştirilerek istenilen doğrultularda yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir. 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 kazanmaktadır. Tabakalar arası bölge elyaf takviyesinin olmadığı matris yoğun bölge olup, kompozit malzemenin servis ömrü sırasında tabaka ayrılması (delaminasyon) veya matris çatlaması gibi çeşitli mekanizmalar ile hasara uğrayarak kompozit malzemenin işlevini yitirmesine neden olabilir [73]. Nispeten zayıf tabakalar arası bölge özellikleri, tabakalı kompozit sistemlerin genel performansını sınırlandırır. Bu bağlamda nanodolgu 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 [35]. Ayrıca POSS gibi içeriğinde inorganik bileşen bulunduran nanodolgu, takviyelendirdikleri matrisin dolayısıyla nihai kompozit yapının ısı özelliklerini de iyileştirmektedir. Şekil 2.24'te elyaf takviyeli nanokompozit tasarımı yer almaktadır [74].



Şekil 2.24: Elyaf takviyeli nanokompozit tasarımı [74]

Elyaf takviyeli kompozit özelliklerinin nanodolgularla iyileştirilmesi birkaç faktör ile ilişkilendirilmektedir. Bunlar;

- Nanodolguların sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı matris özelliklerinin gelişmesi,
- Matris, nanodolgu ve elyaflar arasında sinerjik etki,
- Nanodolgu sayesinde elyaf-matris yapışmasının gelişmesidir [74].

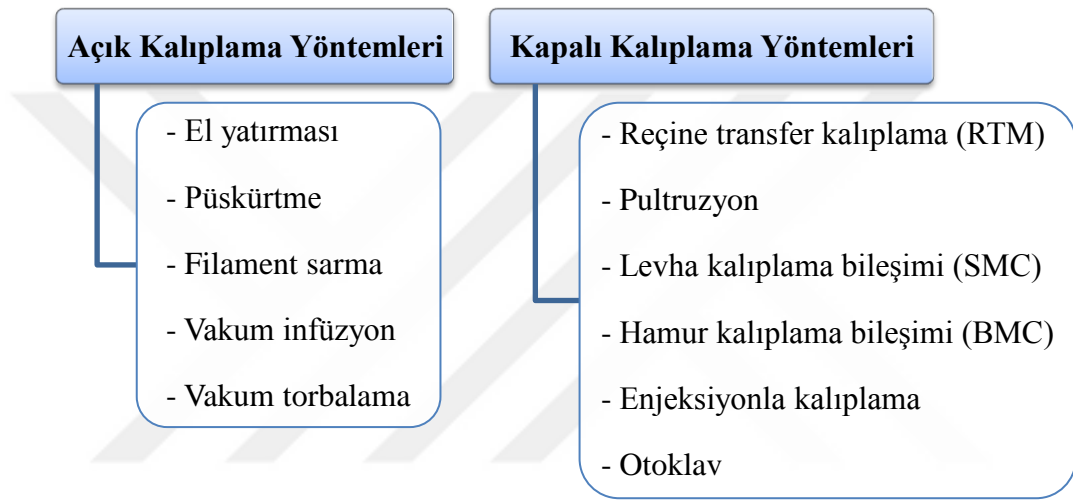
Nanodolgu içeren elyaf takviyeli kompozitlerde, nanodolgular ile polimer matris arasında morfolojik ve diğer özellikler bakımından yeni bir arayüzeyin oluştuğu öngörülür. Bu yeni arayüzey özellikleri çoğunlukla nanodolgular ile polimer matrisin kimyalarına bağlıdır. Nanodolgular ile polimer matris arasında zayıf arayüzey bağlantısı olursa, bu nanodolgular matris içerisindeki süreksiz elyaflar gibi davranırlar. Elyaf takviyeli nanokompozitler için en önemli gereklilik, kompozite yük uygulandığında yükün matris tarafından etkin bir şekilde hem arayüzeye hemde elyaflara aktarılmasıdır [75].

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

## 2.5 Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretim yöntemi; kullanılan elyafın türüne, kısa veya uzun oluşuna, 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 adeti de kullanılacak üretim yöntemini belirleyicidir [35].

Kompozit üretim yöntemleri temelde; açık ve kapalı kalıplama yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemler Şekil 2.30'da şematik olarak sıralanmıştır.



Şekil 2.25: Kompozit malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması

İstenilen özelliklerde ve şekilde elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi için birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ciddi alt yapı yatırımı gerektirmektedir. Örneğin; filament sarma yöntemi ile içi boş silindirik kompozit 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. Ancak bazı kompozit üretim yöntemleri daha 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 [10].

### 2.5.1 Vakum torbalama

Vakum torbalama üretim yöntemi; genellikle kumaş formundaki elyafların kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin elyaflar üzerine fırça rulo vb. ekipmanlar ile dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Bu yöntemde laminasyonu sıkıştırmak için atmosferik basınçtan yararlanılır. Vakum torbalama ile klasik elle yatırma yönteminin dezavantajları ortadan kaldırılarak daha sağlam ve hafif kompozit yapılarının üretimleri mümkündür.

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 anda düzeneğin içindeki ve dışındaki hava basıncı birbirine eşittir. Daha sonra vakum pompası çalıştırılarak düzenek içindeki hava çekilir ve ortamın vakum altında kalması sağlanır. Ortamdaki hava basıncı düştüğü için düzenek yüzeyinde atmosferik basınçtan dolayı bir baskı oluşur. Düzenek içindeki ve dışındaki basınç değerlerinin farkı ise laminasyon yüzeyine uygulanan baskı kuvvetini belirler. Teorik olarak ortamda yaratılabilecek maksimum vakum -1 atm dir. Bu da düzenek içindeki tüm havanın alınması ile sağlanır.

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

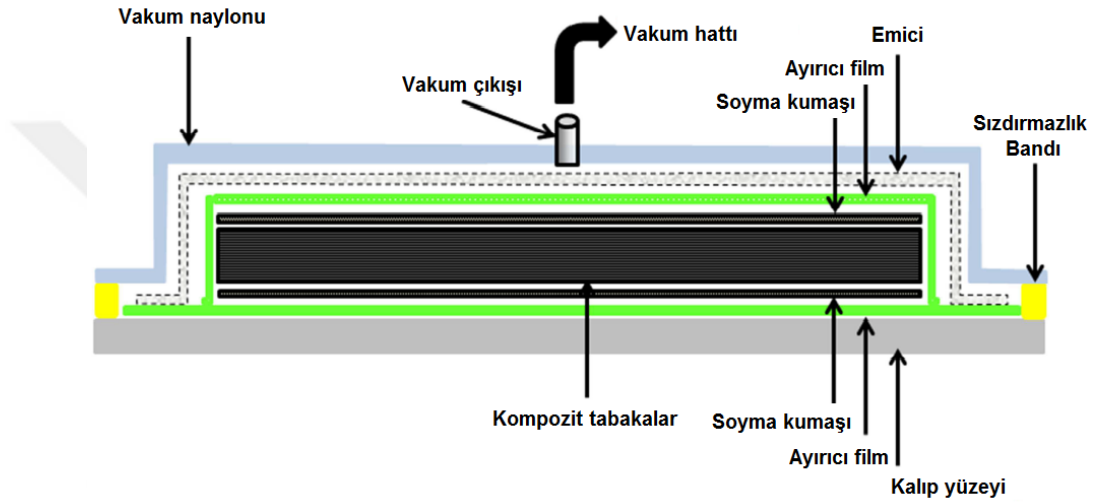
Vakum uygulaması sonunda tabakalı yapı içinde kalan fazla reçine dışarı çekilerek, yapının elyaf/reçine oranının daha yüksek olması sağlanmaktadır. Kompozit yapının sağlam bir şekilde işlevini sürdürebilmesi için elyafların reçine ile tam olarak ıslanması gerekir. Ancak reçine kırılğan bir malzeme olduğu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

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



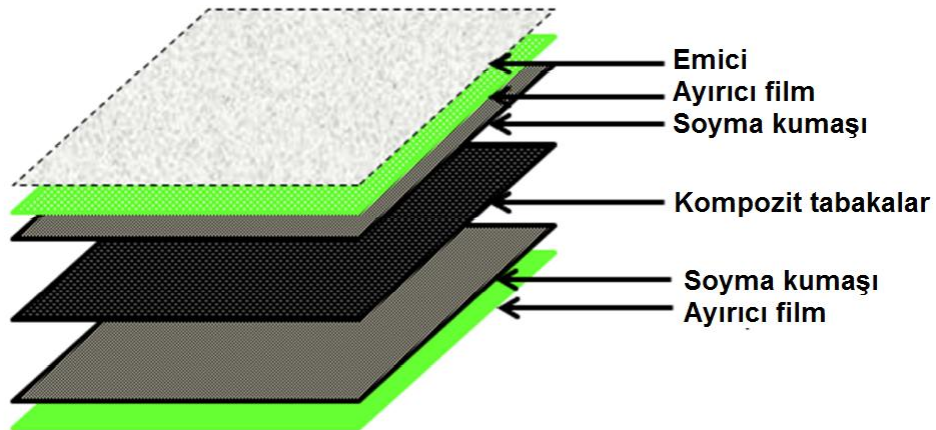
Vakum uygulaması sayesinde reçinenin tüm katmanlar arasında daha iyi yayılması ve bütün katmanlar içine tam olarak nüfuz edebilmesi sağlanmakta, bu sayede bütün bölgelerin reçineyle ıslatılmış olması garanti edilebilmektedir. Böylece daha homojen bir reçine dağılımı elde edilerek kompozit yapının mukavemetinin sayısal veya analitik yöntemler ile daha doğru olarak hesaplanabilmesine imkan tanınmaktadır [10].

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



**Şekil 2.26:** Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [76]

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



**Şekil 2.27:** Vakum torbalama yönteminde kullanılan temel malzemeler [76]





## **3.2 Cihazlar**

### **Manyetik karıştırıcı**

POSS/epoksi nanokompozitlerin hazırlanmasında kullanılmıştır.

### **Ultrasonik homojenizatör (Ultrasonikasyon)**

*BANDELIN UW 2000* uçlu ultrasonik homojenizatör POSS/epoksi karışımlarının hazırlanmasında kullanılmıştır.

### **Etüv fırını**

*ELEKTRO-MAG M420P* etüv fırını epoksi matrisli nanokompozitlerin ve elyaf takviyeli kompozitlerin ilave kürleme (post-cure) işlemlerinin yapılmasında kullanılmıştır. DGEBA esaslı epoksi reçinenin teknik bilgi formunda (TDS) ilave kürleme işlemi 65 °C sıcaklıkta 7 saat şeklinde belirtilmiştir.

### **Elektromekanik test cihazı**

Hazırlanan test numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan çekme, eğme, tabakalar arası kayma dayanımı ve düzlem içi kayma testleri *SHIMADZU AGS-X 50kN* elektromekanik test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

### **Diferansiyel taramalı kalorimetre**

POSS/epoksi nanokompozitlerin ısıl geçişlerinin tespitinde *SEIKO EXSTAR DSC 7020* cihazı kullanılmıştır.

### **Termogravimetrik analiz**

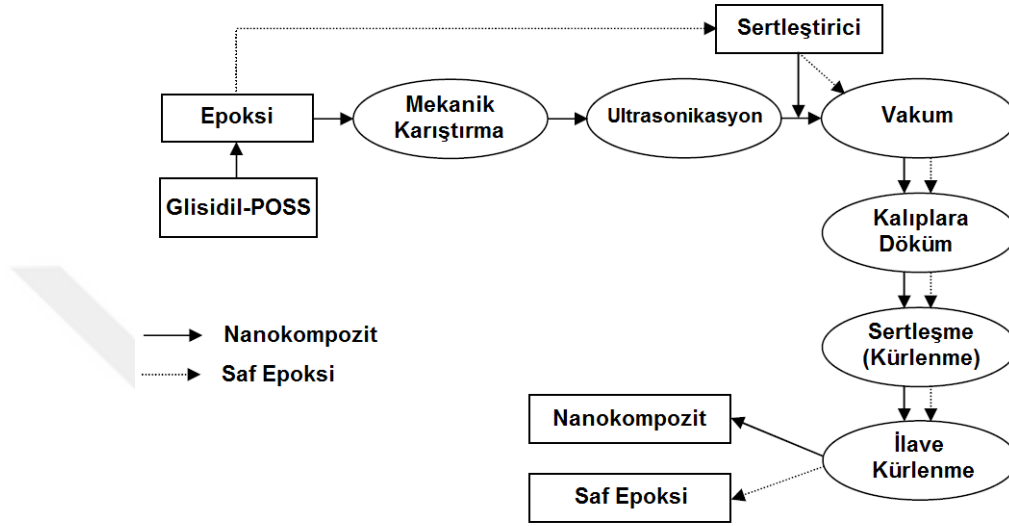
POSS/epoksi nanokompozitlerin bozunma sıcaklıklarının ve kül miktarlarının tespitinde *SEIKO EXSTAR TG/DTA 6300* cihazı kullanılmıştır.

### **Taramalı elektron mikroskobu**

POSS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini daha iyi anlayabilmek adına taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi donanımında bulunan *JEOL JSM 6335F* cihazı kullanılmıştır.

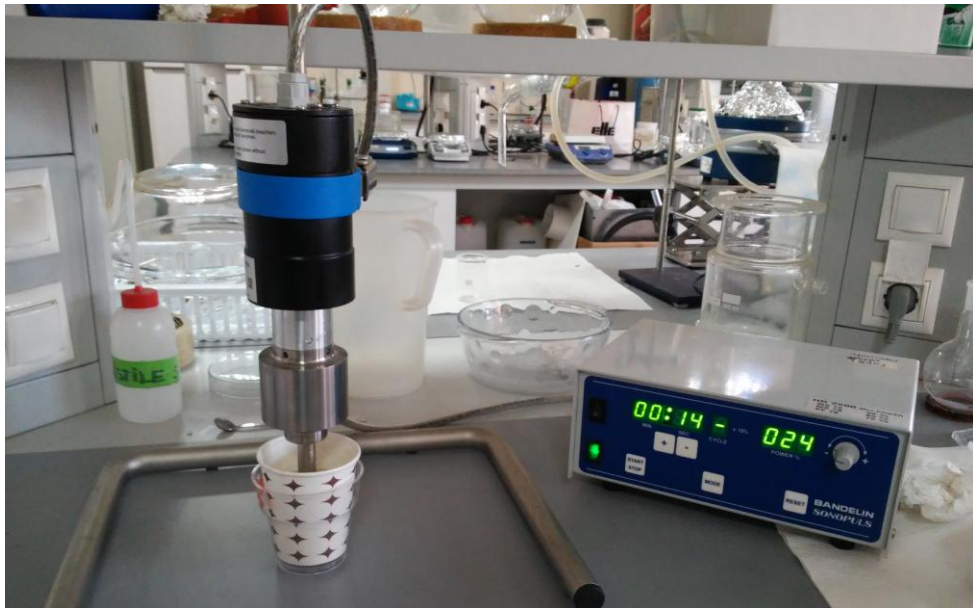
### 3.3 POSS Modifiye Epoksi Sistemlerin Hazırlanması

Karbon elyaf takviyeli nanokompozitler hazırlanmadan önce epoksi matris içerisine katılacak ideal POSS oranının belirlenmesi amacıyla % 1, 2, 4 ve 8 oranlarında POSS/epoksi nanokompozitleri ve şahit numune (saf epoksi) Şekil 3.2'deki prosedüre uygun olarak hazırlanmıştır.



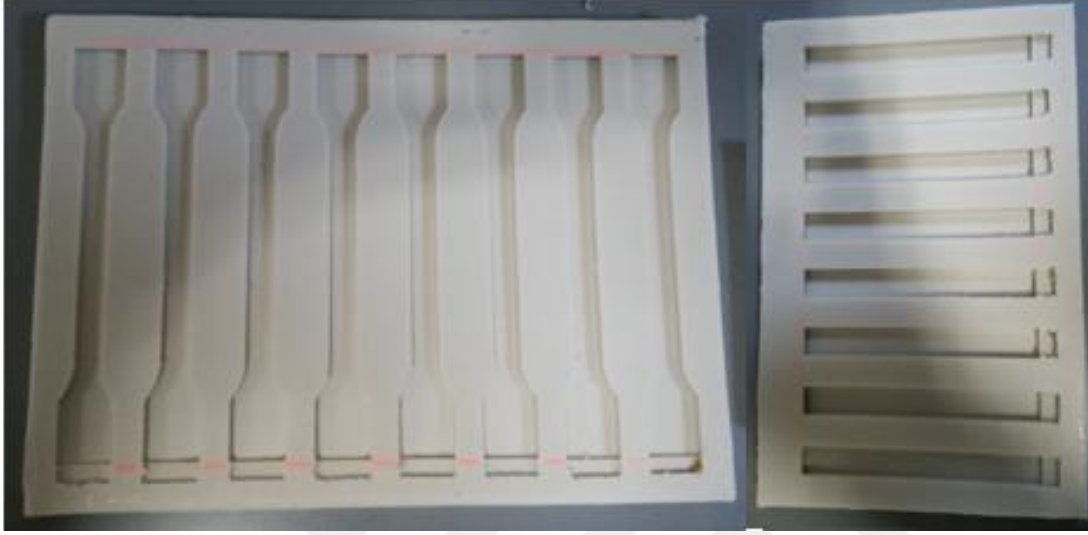
Şekil 3.2: POSS/epoksi nanokompozitlerin ve saf epoksinin hazırlık şeması

Hassas terazide hazırlanan POSS/epoksi karışımı manyetik karıştırıcıda 250 rpm hız ve 50 °C'lik sıcaklıkta 30 dakika süresince karıştırılmıştır. Ardından ultrasonikasyon cihazında 1 dakika süreyle işlem görmüştür.



Şekil 3.3: POSS/epoksi karışımının ultrasonikasyon cihazında karıştırılması

Yüksek hızlı ses dalgaları etkisi sonucu ısınan karışım oda sıcaklığına soğuduktan sonra içerisine sertleştiricisi eklenmiştir. Sertleştiricisi ile karıştırılan epoksida hava kabarcıkları gözlemlendiği için kısa süreli vakum altında tutulmuştur. Hazırlanan POSS/epoksi sistemlerinin mekanik karakterizasyonlarının yapılması amacıyla ISO 527-2 ve ISO 178 standartlara uygun hazırlanan silikon kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3.4: Çekme ve eğme testleri için silikon kalıplar

### 3.4 Kompozit Test Plakaların Üretimi

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

#### 1) Kalıp ayırıcı uygulaması

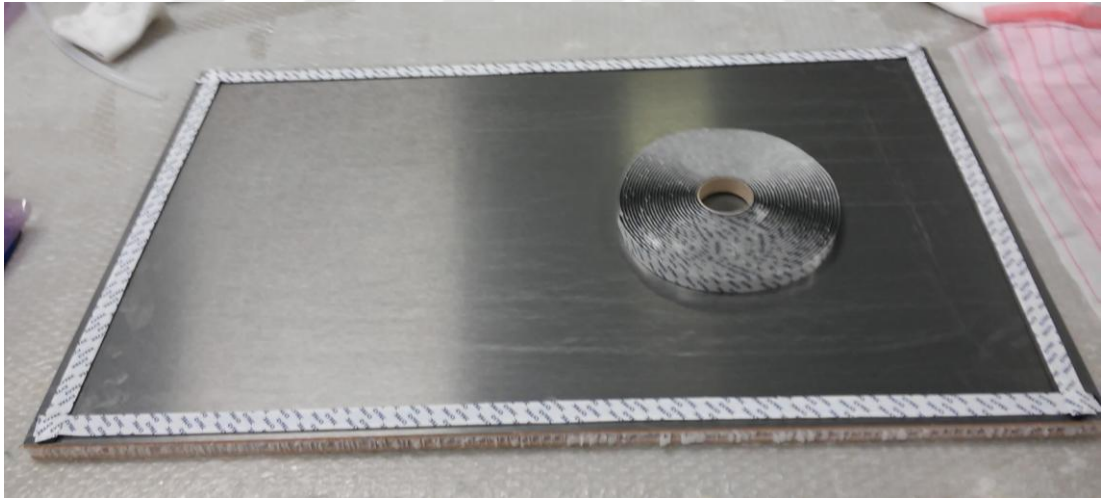
Yüksek yapışma özelliğine sahip epoksi reçinenin kalıp yüzeyine yapışmaması ve proses sonunda üretilen tabakalı kompozit yapının kalıp üzerinden kolayca alınabilmesi için uygulama öncesi kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı sürülür. Bu malzeme sıvı yada katı vaks şeklinde olabilmektedir. Sıvı kalıp ayırıcı pamuklu bez ile birkaç kat şeklinde kalıp yüzeyine uygulanır.



**Şekil 3.5:** Kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulaması

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

Sızdırmazlık bandı; vakumun etki edeceği alanı belirlemek için kalıp kenarlarını çevrelemede kullanılan ve üzerine vakum torbasının yapıştırıldığı ısıya dayanıklı sızdırmazlık sağlayan bir malzemedir.

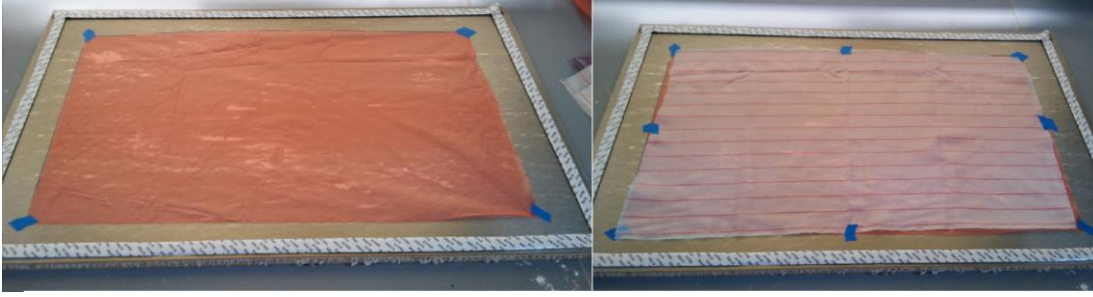


**Şekil 3.6:** Kalıp çevresine sızdırmazlık bandı uygulaması

### **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. Genellikle dokunmuş naylon, polyester veya cam yünü kumaştan üretilirler [36]. Kullanım amacı 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 3.7:** Ayrıcı film ve soyma kumaşı serimi

#### **4) Elyafların ve reçinenin hazırlanması**

Daha önce yapılan ön çalışmalar sonucu test standartlarına uygun 2 mm plaka kalınlığının vakum torbalama yöntemi ile elde edilebilmesi için 5 kat CLT 300 karbon elyaf kumaşın kullanılması gerekliliği tespit edilmiştir. Bu laminasyon planına göre elyaf kesilerek hazır edilmiş ve tartılmıştır. Vakum torbalama yöntemi için elyaf ile reçine oranı 1:1 yada 1:1,5 şeklinde tavsiye edildiğinden bu orana göre Bölüm 3.3'te anlatılan prosedüre uygun POSS/epoksi ve saf epoksi reçine sistemleri hazırlanmıştır.



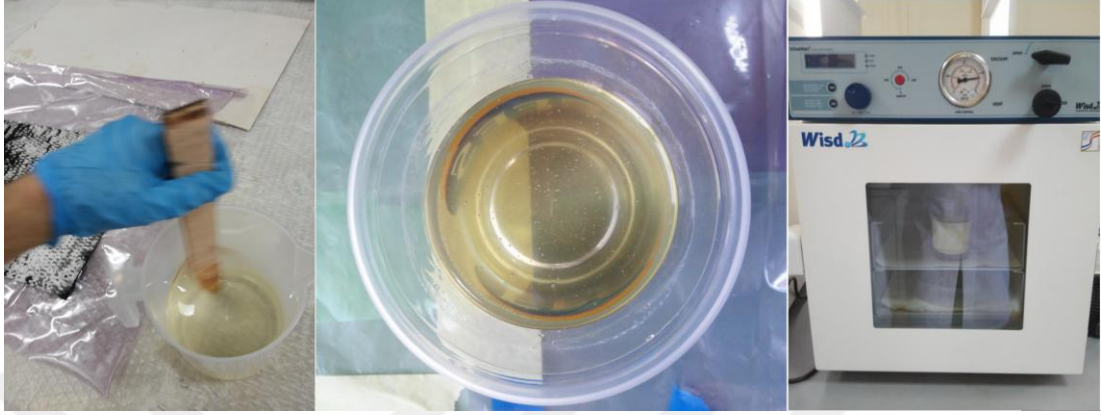
**Şekil 3.8:** Elyaf ve reçinenin hazırlanması

#### **5) El yatırması uygulaması**

Epoksi gibi yüksek sertleştirici oranına (%20-30) sahip reçinelerde karışımı yaklaşık 3-4 dakika karıştırmak gereklidir. Karıştırma etkisi sonucu oluşan hava kabarcıklarının laminat içerisinde kalıp zayıf noktalar oluşturmaması için reçine kısa süreli vakum altında tutulur. Karıştırma işleminden sonra uygulamayı yapmamız için önümüzde belirli bir süre vardır. Bu süre sonunda reçine polimerizasyon

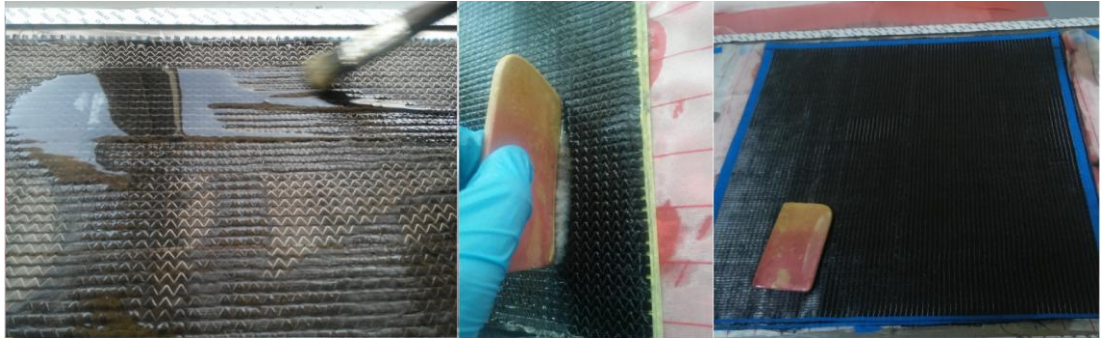


reaksiyonundan dolayı jelleşmeye başlayacak ve elyafları ıslatamayacaktır. Bu nedenle reçine jelleşmeye başlamadan operatörün uygulamayı tamamlayıp düzeneği vakum altına alması gerekmektedir. Kullandığımız *Gurit Prime 20LV* ürününün jel süresi oda sıcaklığında yaklaşık 1 saat olup bu uygulama için yeterli bir süredir.



**Şekil 3.9:** Reçine ve sertleştiricisinin karıştırılması

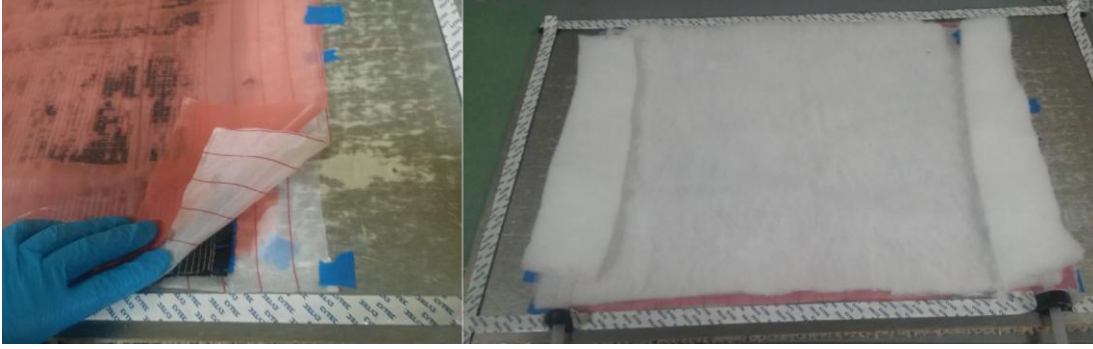
Vakumun ardından hazırlanan reçine bir fırça yardımıyla ilk kat elyafın üzerine sürülür. Burada önemli olan elyafları yeterli miktarda reçine ile ıslatmaktır. Fazla reçine elde edilecek kompozitin mukavemetini olumsuz etkileyecektir. Her kat yeterli miktarda elyaf ile ıslatıldıktan sonra plastik bir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



**Şekil 3.10:** Elyaf katlarının reçine ile ıslatılması

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

3. adımda anlatıldığı gibi elyaf katlarının bu yüzeyine de benzer şekilde önce soyma kumaşı ardından ayırıcı film uygulanır. Daha sonra emici adı verilen tekstil malzemesi en üst kata serilir. Bu malzemenin kullanım amacı; düzenek vakum altına alındıktan sonra tabakalı kompozit yapıdaki fazla reçinenin emilimini sağlamaktır.



**Şekil 3.11:** Soyma kumaşı, ayırıcı film ve emici uygulaması

#### **7) Vakum bağlantılarının yapılması ve vakum naylonunun serilmesi**

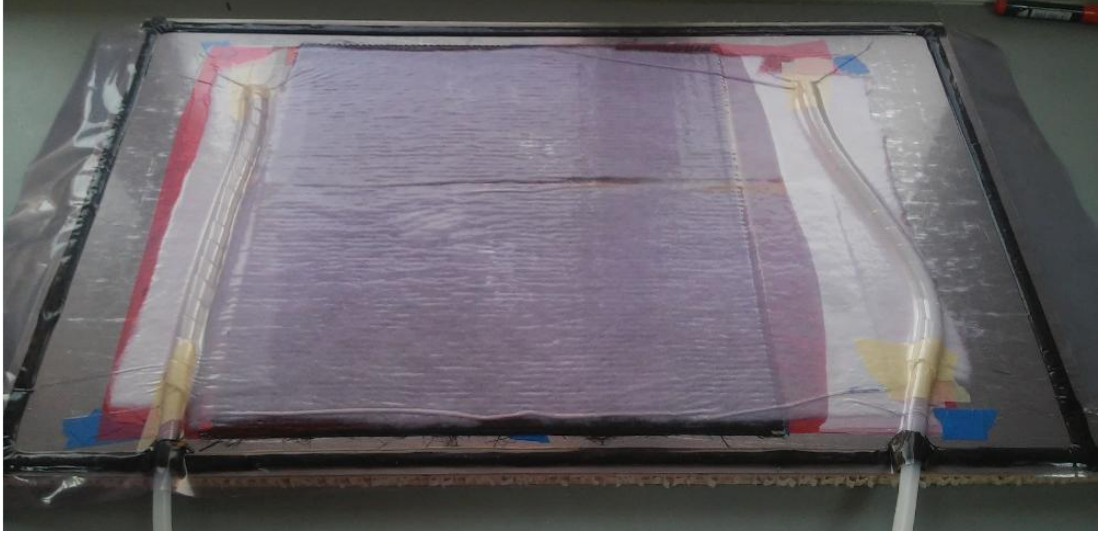
Hazırlanan düzenek üzerinde T bağlantı parçası, hortum ve vana gibi yardımcı ekipmanlar kullanılarak vakum bağlantısı ayarlanır. Vakum bağlantı ayarları tamamlandıktan sonra sızdırmazlık macununun koruyucu kağıtları sökülerek vakum naylonu itinalı bir şekilde düzenek üzerine serilir ve macun ile yapıştırılır. Böylece kompozit parçanın olduğu bölge kapalı bir sistem içerisinde alınmış olur. Burada vakum naylonu bir üst kalıp görevi görmektedir. Macunlar üzerine baskı yapılarak sızdırmazlığın tam olarak sağlandığına emin olunmalıdır.



**Şekil 3.12:** Sistemin vakum naylonu ile kapatılması

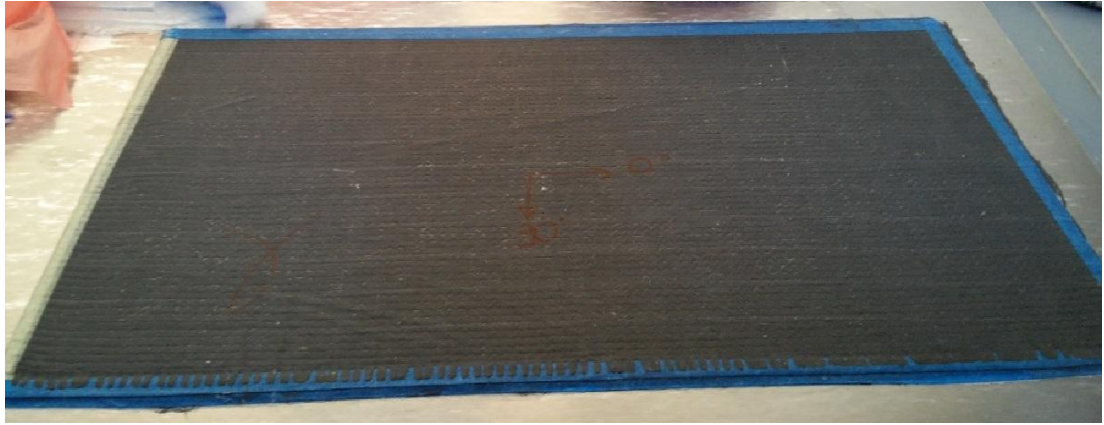
#### **8) Sistemin vakum altına alınması**

Hazırlanan düzenek bir vakum pompasına bağlanarak sistem vakum altına alınır. Böylece 1 atm'lik basınç kuvveti varlığında sistem içerisindeki reçinenin sertleşmesi gerçekleşir. Ayrıca vakum etkisinden dolayı el yatırması uygulaması sırasında kompozit parça içerisinde kalan hava ortamdan uzaklaştırılır ve fazla reçine emici tarafından emilir.



**Şekil 3.13:** Düzeneğin vakum altına alınması

Kullanılan reçinenin TDS'inde kürleşme süresi mevcuttur. Bu süre boyunca sistemin vakum altında kalması tavsiye edilir. Uygulama sonunda elde edilecek ürün yüksek elyaf/reçine oranına sahip ve içeriğinde hava kabarcığı olmaksızın üretilmiş olacaktır. Böylece üretilen kompozit malzeme daha iyi mekanik özellikler gösterecektir. Kürleşmesi tamamlanan sistem vakum düzeneğinden sökülür ve kompozit parça ek bileşenlerinden (soyma kumaşı, ayırıcı film, emici) ayrılarak nihai ürün elde edilmiş olur.

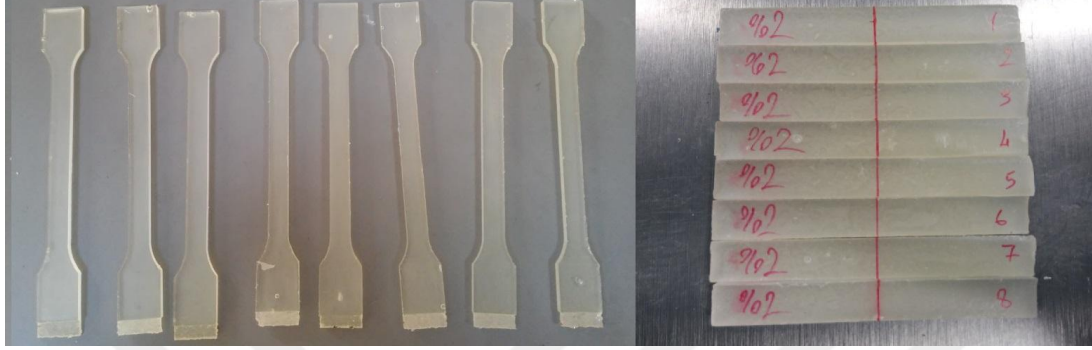


**Şekil 3.14:** Üretilen kompozit test plakası

### **3.5 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi**

POSS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması sırasında ideal POSS yüklemesini tespit etmek ve karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 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. POSS/epoksi nanokompozitleri için yapılan çekme ve üç nokta eğme testleri için numuneler silikon kalıplara reçine dökümü şeklinde elde edilmiştir.



**Şekil 3.15:** POSS/epoksi nanokompozitleri için mekanik test numuneleri

Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi tabakalı kompozitler ve şahit numune için yapılan; düzlem içi kayma, üç nokta eğme ve tabakalar arası kayma dayanımı testlerinde kullanılacak numuneler ise elmas uçlu sulu kesici ile test standartlarına uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır. Testler öncesi tüm numunelerin keskin köşeleri gerilim birikimlerine sebebiyet vermemek adına zımpara ile yumuşatılmıştır.



**Şekil 3.16:** Karbon kompozit test numunelerinin hazırlanması

### 3.5.1 Çekme testi

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



Şekil 3.17: POSS/epoksi nanokompozit numunesi çekme testi

### 3.5.2 Düzlem içi kayma testi

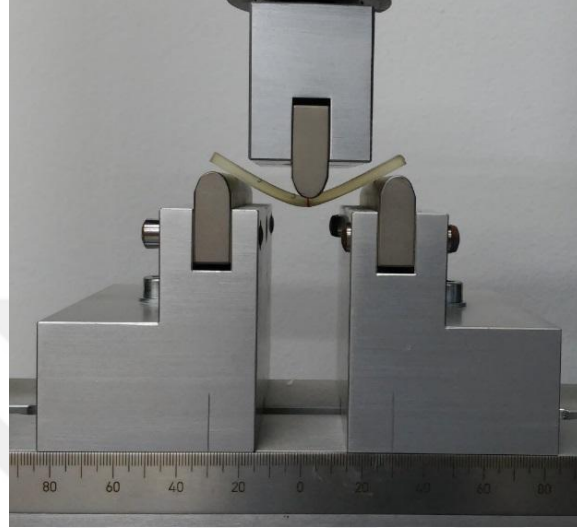
Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozitleri ve şahit numune için düzlem içi kayma testleri, ISO 14129 (Elyaf takviyeli plastik kompozitlerde düzlem içi kayma gerilimi/gerinimi, kayma modülü ve dayanımınının  $\pm 45^\circ$ lik çekme deneyi metodu ile belirlenmesi) standartına uygun gerçekleştirilmiştir.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



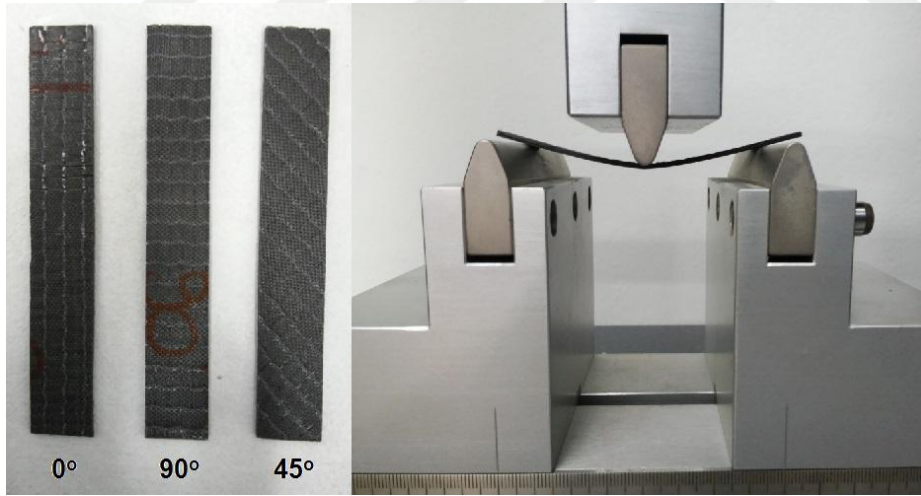
Şekil 3.18: Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numunesi düzlem içi kayma testi

### 3.5.3 Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testleri; POSS/epoksi nanokompozitleri için ISO 178 standartına, karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozitleri için ise ISO 14125 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Elyaf takviyeli kompozitler için elyaf yönelimleri dikkate alınarak;  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $45^\circ$  lik açılarda numunelerin testleri yapılmıştır.



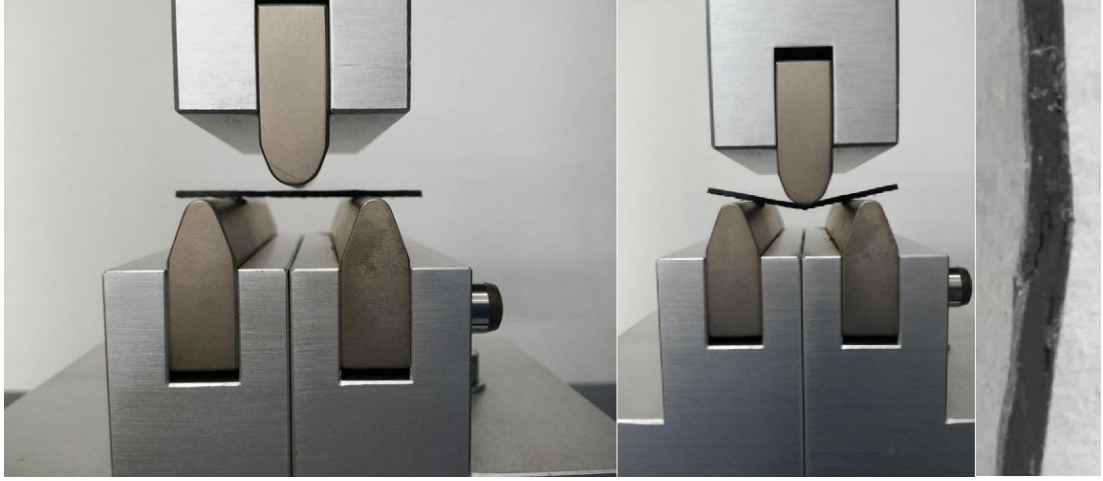
Şekil 3.19: POSS/epoksi nanokompozit numunesi üç nokta eğme testi



Şekil 3.20: Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numuneleri üç nokta eğme testi

### 3.5.4 Tabakalar arası kayma dayanımı testi

Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozitleri için gerçekleştirilen tabakalar arası kayma dayanımı testi, literatürde kısa kiriş metodu (short beam shear test) olarak bilinmektedir. ISO 14130 standartına uygun gerçekleştirilen test sonucu tabakalı kompozit yapının delaminasyona (tabakaların ayrılması) karşı direnci ölçülmektedir.



**Şekil 3.21:** Karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozit numunesi tabakalar arası kayma dayanımı testi

Tabakalar arası kayma dayanımı aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

$$\tau_M = \frac{3}{4} \times \frac{F_M}{b \cdot h}$$

Burada;

$\tau_M$ : Maksimum tabakalar arası kayma dayanımı,

$F_M$ : Newton cinsinden maksimum yük,

$b$ : Milimetre cinsinden numune genişliği,

$h$ : Milimetre cinsinden numune kalınlığı.

### 3.6 Isıl Özelliklerin İncelenmesi

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

Tez çalışmamızda POSS modifiye epoksi sistemlerin hazırlanması sırasında ideal POSS yüklemesini tespit etmek ve POSS içeriğinin ısıl özellikleri ne şekilde etkilediğini görmek amacıyla diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) termal analiz yöntemleri kullanılmıştır.

### 3.6.1 Diferansiyel taramalı kalorimetre

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

### 3.6.2 Termogravimetrik analiz

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



Şekil 3.22: Termal analizlerde kullanılan DSC ve TGA cihazları

## 3.7 Mikroyapı Özelliklerin İncelenmesi

Bazı yapısal elementler çok ince yada çok küçük olduklarından bunları optik mikroskop ile incelemek oldukça zordur. Böyle durumlarda çok yüksek büyütme kabiliyetine sahip olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılır.

### 3.7.1 Taramalı elektron mikroskobu

SEM kompozit malzemelerde kırılma yüzeylerinin incelenmesinde kullanılarak; takviye sistemi ile matris sistemi ara yüzeyindeki etkileşim, matrisin takviye sistemini ıslatabilirliği ve matris içindeki tanecik dağılımı hakkında bilgi verir.

POSS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini tartışabilmek için POSS/epoksi matrisli tabakalı kompozit numunelerin düzlem içi kayma testi sonrası hasar alan yüzeyleri SEM ile incelenmiştir.



## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

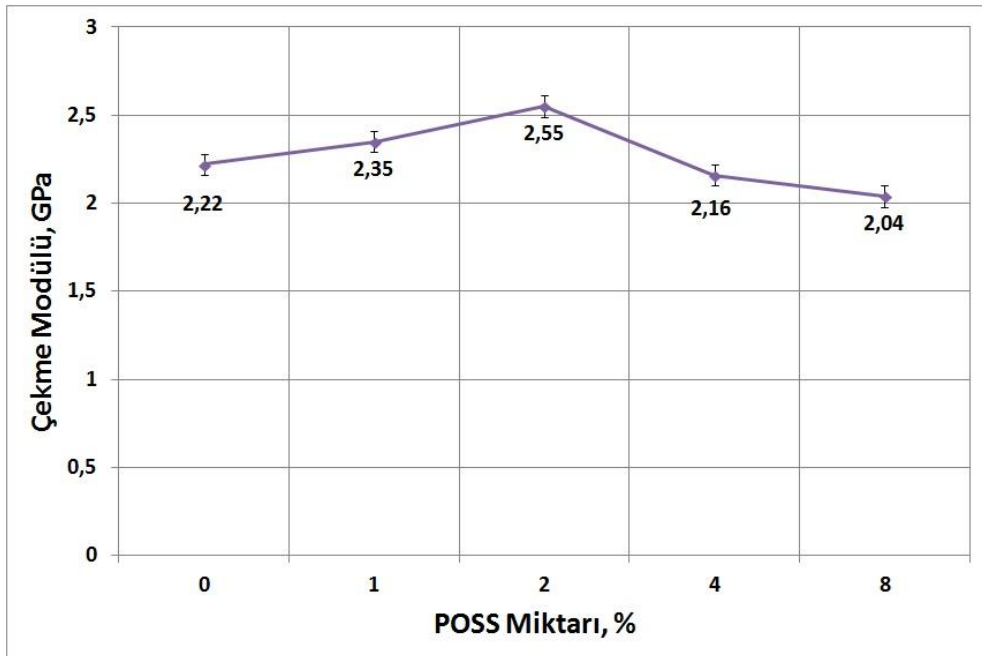
Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler; *POSS/Epoksi oranının optimizasyonu, POSS nanodolgununun kompozitin mekanik özelliklerine etkisi ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri* başlıkları altında incelenmiştir.

### 4.1 POSS/Epoksi Oranının Optimizasyonu

Epoksi matris içerisine katılacak optimum POSS oranını belirlemek amacıyla hazırlanan %1, 2, 4 ve 8'lik POSS/epoksi nanokompozit numunelerin çekme ve üç nokta eğme testleri ile mekanik özellikleri, DSC ve TGA analizleri ile ısıl özellikleri incelenmiştir.

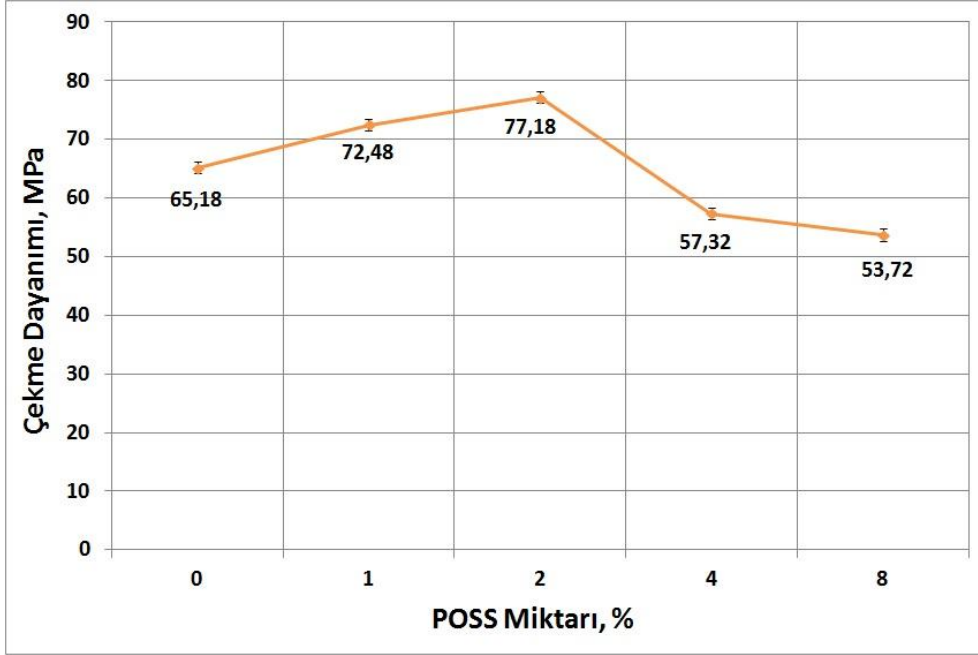
#### 4.1.1 Çekme özellikleri

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



**Şekil 4.1:** POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin çekme modülüne etkisi %1 ve %2'lik POSS yüklemelerinde nanokompozitlerin çekme modülünde sırasıyla %5,8 ve %14,8'lik artış sağlanırken, %2'den daha fazla olan yüklemelerde düşüşler

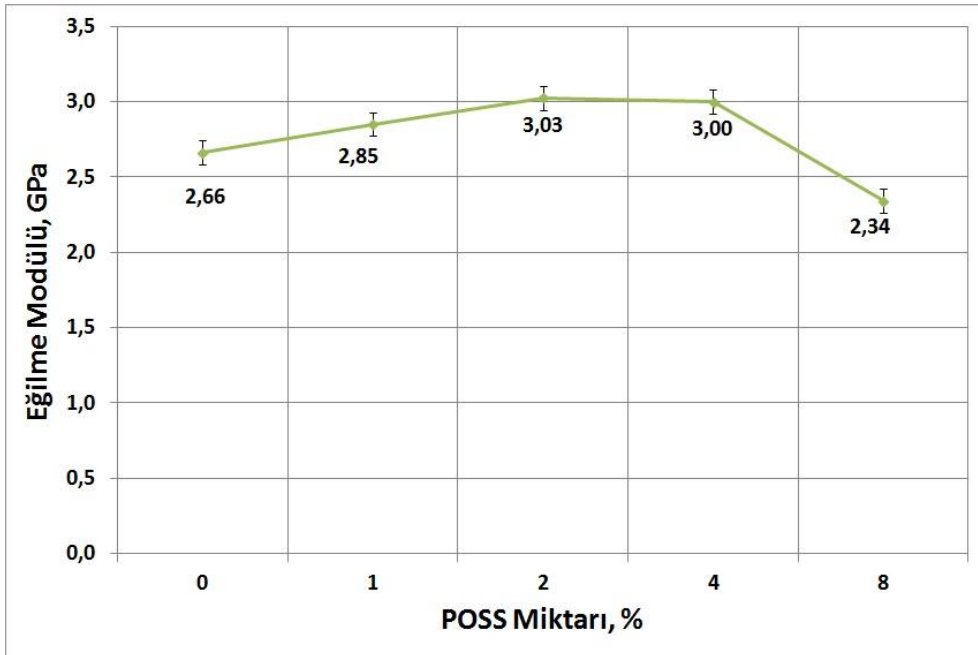
gözlendi. Çekme dayanımında ise benzer şekilde %1'lik ve %2'lik yüklemelerde sırasıyla %11,2 ve %18,4'lük artışlar görülürken %2'den daha fazla olan yüklemelerde çekme dayanımı azalmıştır.



Şekil 4.2: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımına etkisi

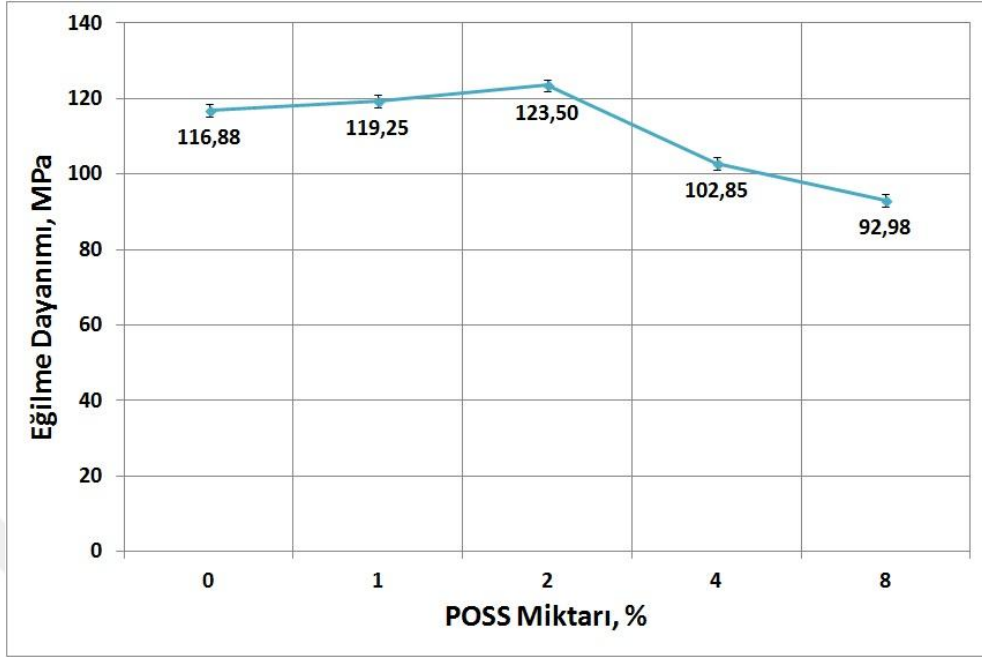
#### 4.1.2 Üç nokta eğme özellikleri

POSS nanodolgu miktarının DGEBA esaslı epoksi reçinenin eğme özelliklerine etkisi Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin eğilme modülüne etkisi

Eğilme modülü için maksimum iyileşme %2'lik POSS yüklemelerinde görülmüştür ve şahit numuneye göre %13,7'lik artış sağlanmıştır.



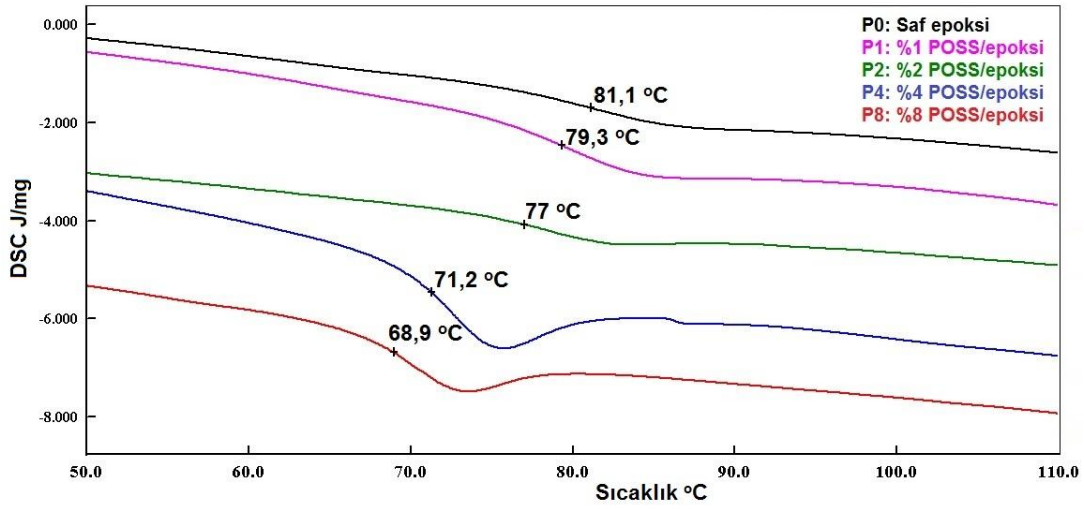
**Şekil 4.4:** POSS miktarının POSS/epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımına etkisi

Eğilme dayanımında ise benzer bir etki yaşanmıştır; %1'lik ve %2'lik yüklemelerde sırasıyla %2 ve %5,6'lık artışlar görülürken %2'den daha fazla olan yüklemelerde eğilme dayanımı azalmıştır.

Sonuç olarak; POSS/epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için ideal POSS yüklemesinin %2 olduğu tespit edilmiştir. Bu iyileşme POSS nanoparçacıklarının epoksinin çapraz bağlanması sırasında çapraz bağ noktaları gibi davranmasına ve gerilim transferine olumlu etki yapmasına dayandırılmıştır. Ancak %2'den yüksek POSS yüklemelerinde, POSS moleküllerinin topaklaşma yaparak matris içerisinde heterojen bölgeler oluşturduğu ve reaktif türlerin hareketini kısıtladığı düşünülmüştür. Topaklaşmadan dolayı oluşan mikron boyutunda POSS bölgeleri malzeme deformasyonu sırasında zayıf noktalar olarak davranmış ve gerilim transferinin engelleyerek malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği varsayımı yapılmıştır.

#### **4.1.3 POSS nanodolgununun camsı geçiş sıcaklığına etkisi**

Yapılan DSC analizleri sonucu; artan POSS oranıyla birlikte camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

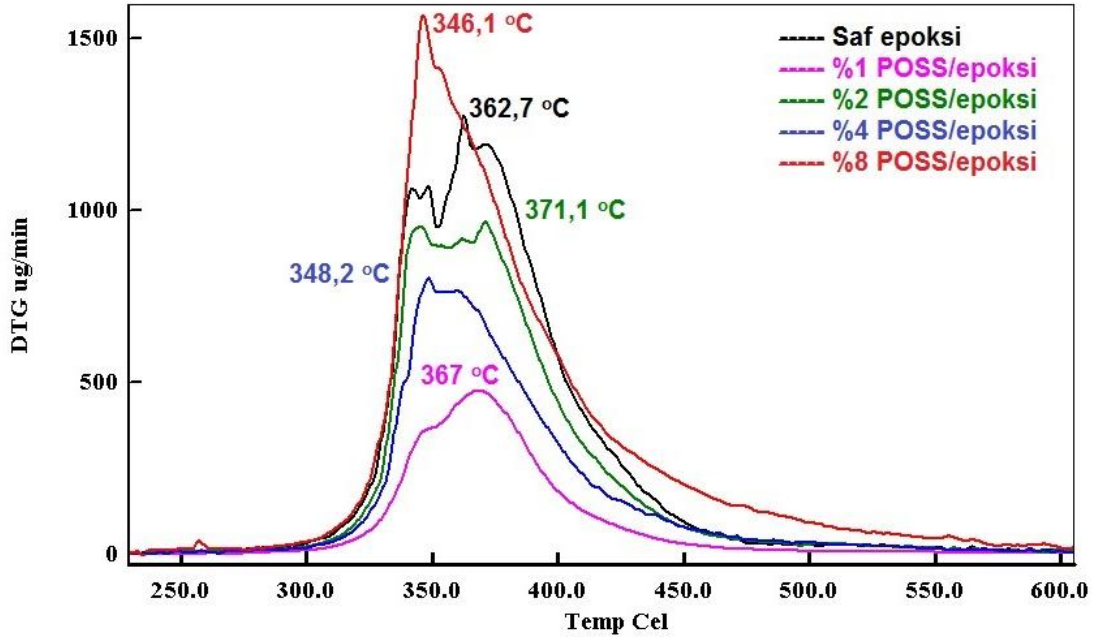


Şekil 4.5: POSS/epoksi nanokompozitlerin DSC eğrileri

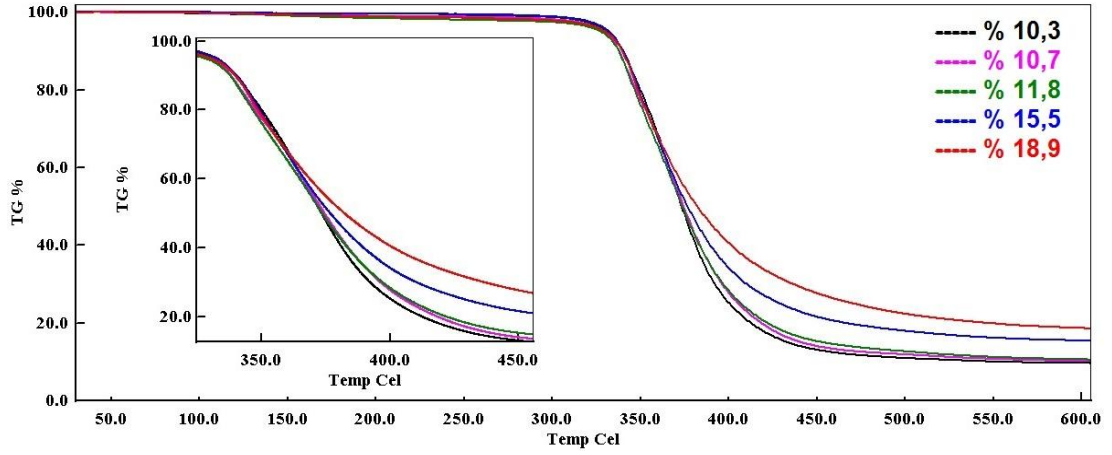
Sonuçlara göre; artan POSS oranıyla birlikte POSS/epoksi nanokompozitlerin T<sub>g</sub>'si düşmüştür. Bu durum; hacimli POSS moleküllerinin polimerizasyon sırasında polimer zincirleri arasında girerek zincirler arası mesafeyi arttırmasına dolayısıyla serbest hacmi arttırmasına dayandırılmıştır.

#### 4.1.4 POSS nanodolgununun bozunma sıcaklığına etkisi

Yapılan TGA analizleri sonucu; POSS/epoksi nanokompozitlerin bozunma sıcaklıkları (T<sub>d</sub>) ile kalan kül miktarları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6: POSS/epoksi nanokompozitlerin TGA eğrileri



**Şekil 4.7:** POSS/epoksi nanokompozitlerin TGA eğrileri ve kalan kül miktarları

Elde edilen verilere göre POSS/epoksi nanokompozitlerin bozunma sıcaklıklarında ( $T_d$ ) %2'ye kadar olan POSS yüklemelerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Bu iyileşme polimer yüzeyindeki inorganik silika tabakasının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Silika tabakasının yüzeyde bariyer görevi görüp, epoksi reçinenin degradasyonunu geciktirici etki yaptığı düşünülmüştür. Ancak %2'den daha yüksek POSS konsantrasyonlarında olası topaklaşmalardan dolayı homojen bir dağılım sağlanamadığı ve bariyer etkinin ortadan kalktığı, bu nedenle keskin düşüşlerin yaşandığı düşünülmüştür.

Kalan kül miktarlarında ise artan POSS oranına paralel artışlar meydana gelmiştir. Bu durum POSS nanoparçacıklarının çekirdek kısmını oluşturan inorganik silikon molekülünün varlığına dayandırılmıştır.

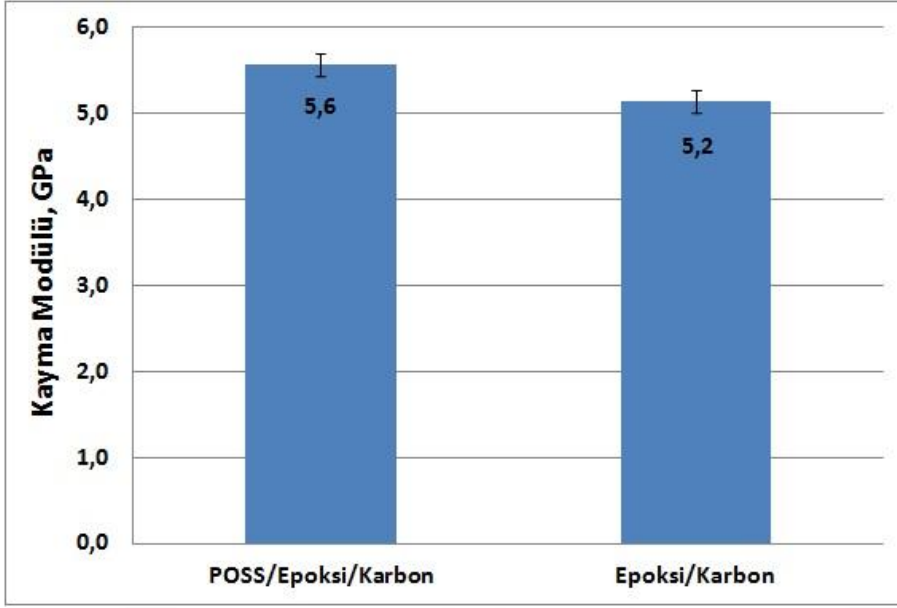
Sonuç olarak; belirli bir orana kadar (%2) POSS yüklemesinin DGEBA esaslı epoksi reçinenin termal dayanımını geliştirdiği tespit edilmiştir.

## 4.2 POSS Nanodolgununun Kompozitin Mekanik Özelliklerine Etkisi

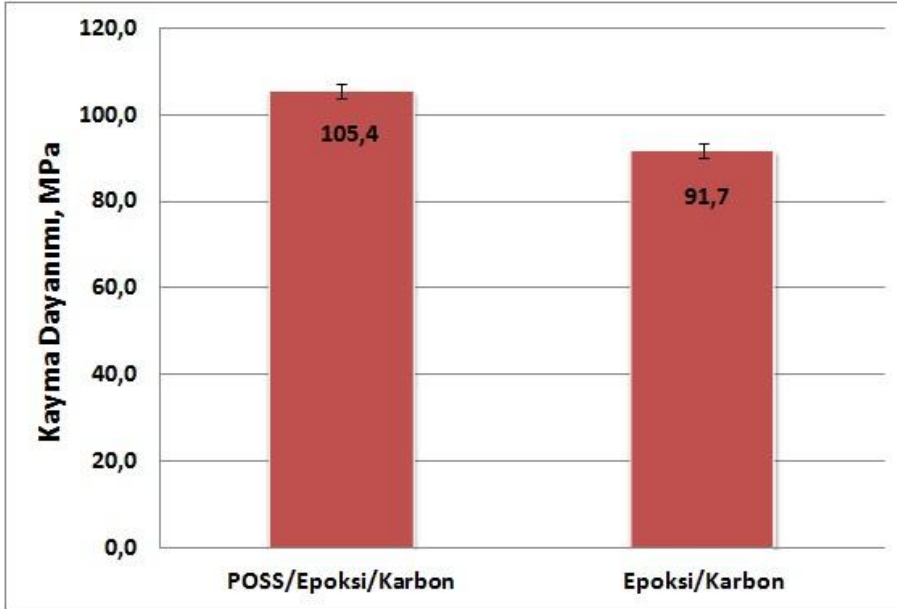
%2 oranında POSS nanodolgunu içeren epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri; düzlem içi kayma, üç nokta eğme ve tabakalar arası kayma dayanımı testleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar POSS nanodolgunu içermeyen şahit numuneye ait veriler ile karşılaştırılmıştır.

### 4.2.1 Düzlem içi kayma özellikleri

Düzlem içi kayma testlerine ait kayma dayanımı ve kayma modülünü gösteren karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da yer almaktadır.



Şekil 4.8: Düzlem içi kayma modülünün karşılaştırmalı grafikleri

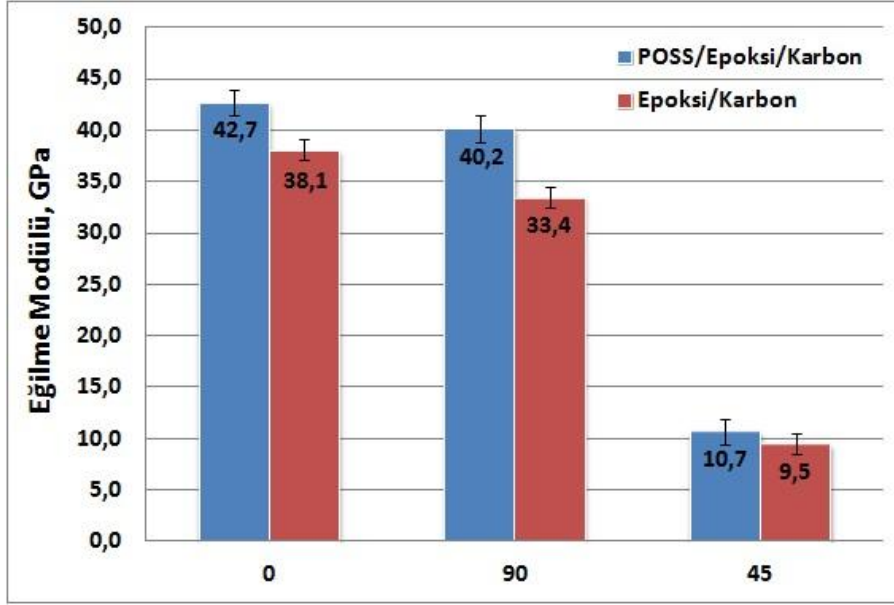


Şekil 4.9: Düzlem içi kayma dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

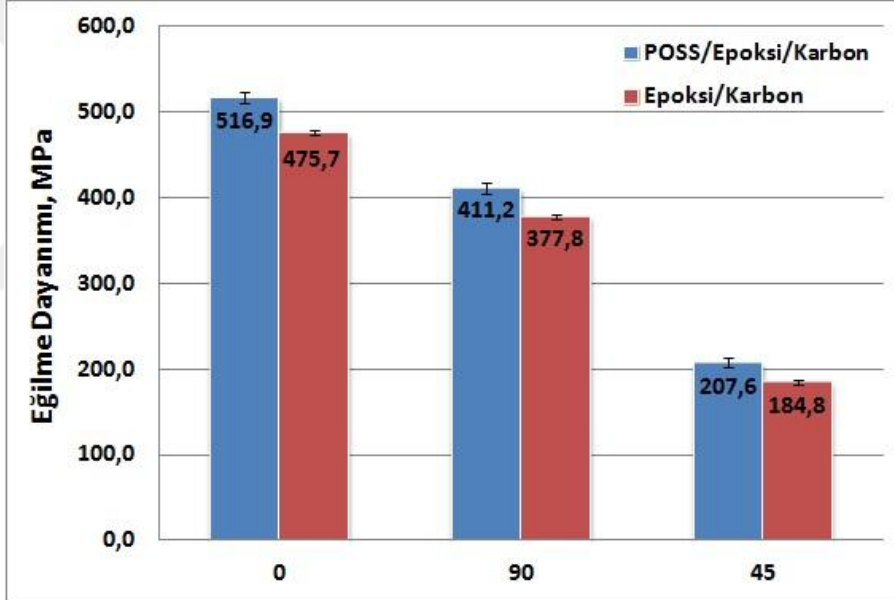
Sonuçlara göre; POSS/epoksi matrisli karbon kompozitin kayma modülünde %7,7'lik, kayma dayanımında ise %14,9'luk iyileşmeler sağlanmıştır.

#### 4.2.2 Üç nokta eğme özellikleri

Elyaf yönelimleri dikkate alınarak ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $45^\circ$ ) gerçekleştirilen üç nokta eğme testlerine ait; eğilme dayanımı ve eğilme modülü sonuçları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Eğilme modülünün karşılaştırmalı grafikleri



Şekil 4.11: Eğilme dayanımının karşılaştırmalı grafikleri

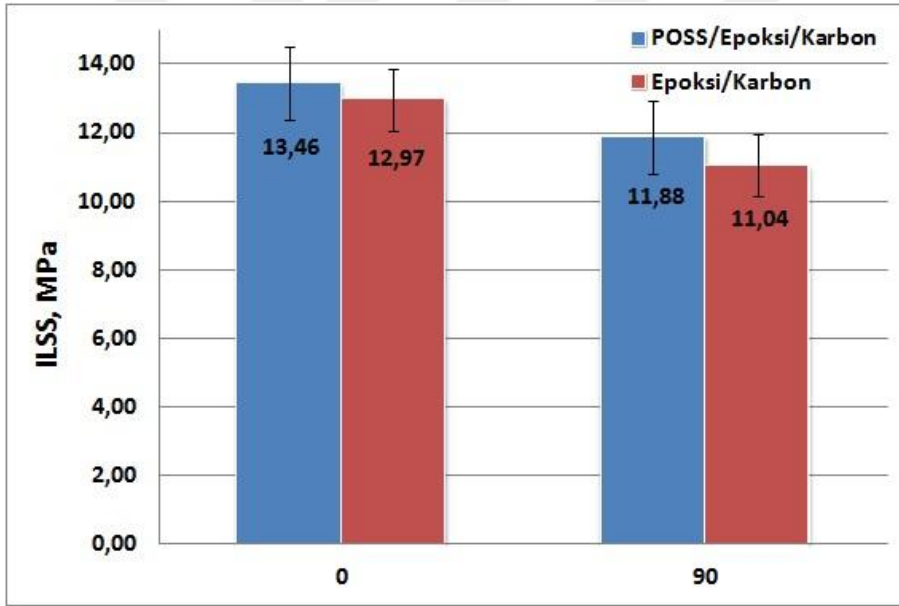
Her üç elyaf yöneliminde de POSS/epoksi matrisli karbon kompozitler daha yüksek sonuçlar vermiştir. POSS nanodolgununun kompozitin eğilme özelliklerine etkisi Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Tüm numuneler için POSS nanodolgununun eğilme özelliklerine etkisi %8,7 ile %20,4 arası değişen oranlarda olmuştur.

**Çizelge 4.1:** POSS nanodolgunusunun kompozitin eğilme özelliklerine etkisi

Numune Adı	Eğilme Modülü GPa	POSS Etkisi %	Eğilme Dayanımı MPa	POSS Etkisi %
POSS/Epoksi/Karbon_0°	42,7	12,1	516,9	8,7
Epoksi/Karbon_0°	38,1		475,7	
POSS/Epoksi/Karbon_90°	40,2	20,4	411,2	8,8
Epoksi/Karbon_90°	33,4		377,8	
POSS/Epoksi/Karbon_45°	10,7	12,6	207,6	12,3
Epoksi/Karbon_45°	9,5		184,8	

#### 4.2.3 Tabakalar arası kayma dayanımı özellikleri

Tabakalar arası kayma dayanımı testleri; ilgili standartta (ISO 14130) belirtildiği şekliyle 0° ve 90°'lik elyaf yönlenmelerine göre gerçekleştirilmiş ve sonuçlar şahit numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.12:** Tabakalar arası kayma dayanımının karşılaştırmalı grafiği

Elde edilen sonuçlara göre; 0° ve 90°'lik elyaf yönelimine sahip numunelerde sırasıyla %3,78 ve %7,63'lük iyileşmeler görülmüştür. POSS nanodolgunusu sayesinde tabakalı kompozit yapının delaminasyona karşı direnci artmıştır.

Yapılan tüm mekanik testler sonucu; epoksi matris içerisindeki POSS nanodolgunusunun karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitin düzlem içi kayma, eğilme ve tabakalar arası kayma dayanımı özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Bu durum; epoksi matris ile uyumlu POSS 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.

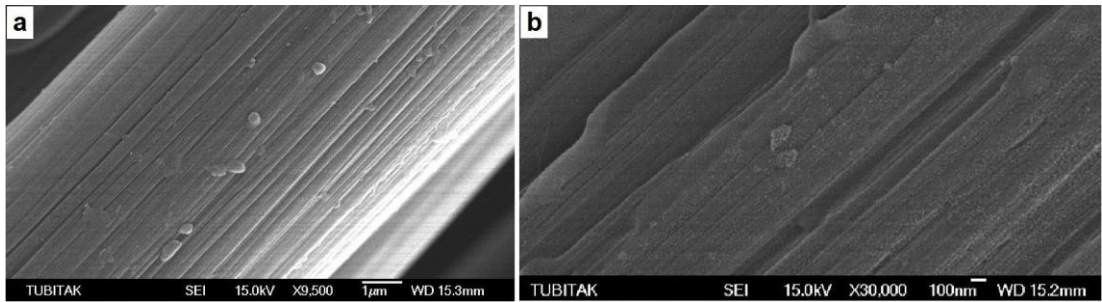
### 4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

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



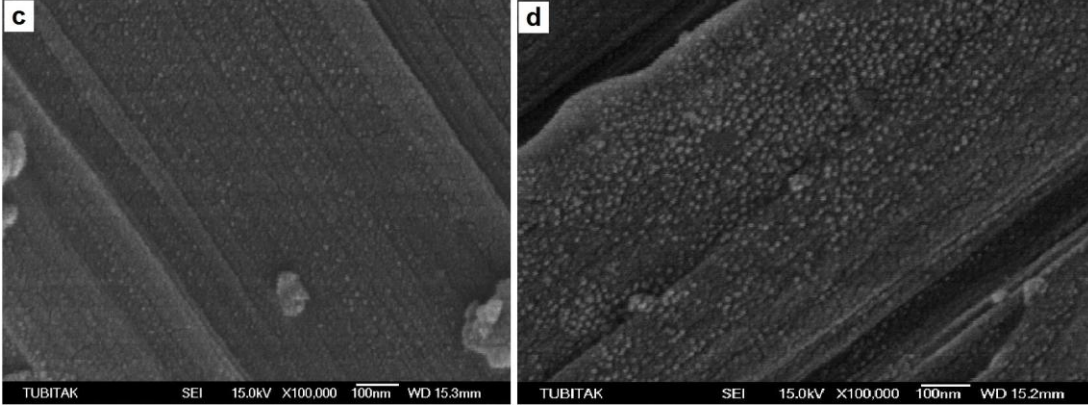
**Şekil 4.13:** Mekanik testler sonrası hasar alan elyaf takviyeli kompozit yüzeyleri

15 kV hızlandırma voltajı ile görüntüsü alınan numunelere iletkenlik kazandırmak amacıyla numune yüzeyleri inceleme öncesinde altın ile kaplanmıştır. Elde edilen SEM mikrografları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Numuneler X9500, X30000 ve X100000 büyütmelerde incelenmiştir.



**Şekil 4.14:** X9500 ve X30000 büyütmede SEM görüntüleri

İlk görüntü (a) X9500 büyütmede olup birçok elyaftan meydana gelen filament yüzeyi görülmektedir. Benzer şekilde X30000 (b) büyütmeye sahip ikinci görüntüde de elyaflar doğrultuları boyunca incelenebilmektedir. Ancak her iki mikrografta POSS moleküllerini görebilmemiz için yeterli yakınlaştırmada değildir.



**Şekil 4.15:** X100000 büyütmede SEM görüntüleri

X100000 (c ve d) büyütmede ki görüntülerde ise POSS nanoparçacıklarının elyaf yüzeyinde homojen bir dağılım sergilediği ve kalıcı yapıştığı net bir şekilde gözlemlenmektedir. Elde edilen görüntülerden; matris sistemi olan POSS/epoksi nanokompozitin, takviye sistemi karbon elyafları ıslatabilirliğinin ve arayüzey yapışmalarının başarılı olduğu düşünülmüştür.

Bu değerlendirme sonucunda POSS nanoparçacıklarının epoksi reçine ve karbon elyaf ile iyi bir etkileşim sağlayarak arayüzey dayanımını iyileştirdiği sonucuna varılabilir. Artan arayüzey dayanımı sayesinde; deformasyon sırasındaki çatlak ilerlemesi zorlaşarak elyaf takviyeli kompozitin mekanik dayanımı artmıştır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

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

Öncelikle epoksi matris içerisine katılacak ideal POSS oranı belirlenmiştir. Matris ile uyumlu olması amacıyla glisidil fonksiyonalitesine sahip POSS nanodolgu kullanılmıştır. Ultrasonikasyon yöntemi ile değişen oranlarda (%1, 2, 4 ve 8) POSS/epoksi nanokompozitler hazırlanmış, bunların mekanik (çekme, eğme) ve ısıl (DSC, TGA) özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucu %2'lik POSS yüklemesinin ideal oran olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra %2 POSS/epoksi matrisli ve saf epoksi matrisli (şahit numune) karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitler vakum torbalama yöntemi ile üretilerek mekanik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada; düzlem içi kayma, tabakalar arası kayma dayanımı ve üç nokta eğme testleri yapılmış ve sonuçlar şahit numuneye ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm mekanik testlerde POSS nanodolgusuna sahip kompozitlerin dayanım ve modül değerlerinde %3,78 ile %20,4 arası değişen oranlarda iyileşmeler tespit edilmiştir. Bu durum; POSS nanodolgunun varlığından dolayı elyaf-matris arası arayüzey dayanımının artmasına, 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. Mikrograflarda POSS nanoparçacıklarının nanokompozit içerisinde homojen bir dağılım sergilediği ve elyaf yüzeylerine kalıcı yapıştığı tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar ışığında; epoksi matris içerisine katılan POSS nanodolgunun karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik dayanımını arttırdığı anlaşılmıştır. Üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler elde etmek için farklı tip ya da daha pahalı malzemeler kullanmadan, kompozitin kendi içinde modifiye edilmesi ile de üstün nitelikli kompozitlerin üretilbileceği görülmüştür.

POSS nanodolgununun karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği açıktır. Bu kompozitlere uygulanan statik yükleme koşullarına ilaveten dinamik yükleme koşullarındaki davranışları da incelenebilir. Ayrıca üretilen hibrit kompozitlerin ısı özellikleri ve kütleme kinetiklerinin mekanik özellikler üzerine etkisi de bir diğer araştırma konusu olabilir. Ek olarak POSS nanodolgununun epoksi matris içerisine ve/veya karbon elyaf yüzeyine kimyasal olarak bağlanması ile hibrit nanokompozitlerin elektriksel özelliklerindeki değişimde araştırılabilir.

Çalışmamızda, POSS nanodolgununun epoksi matrisin ısı özelliklerine olan etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçların elyaf takviyeli nanokompozitler içinde geçerli olduğu düşünülmüştür. Ancak üretilen karbon elyaf takviyeli nanokompozitlere spesifik ısı analizleri yapılmamıştır. Bu sebeple, çalışmamızda üretilen karbon elyaf takviyeli POSS/epoksi nanokompozitlerin ısı özelliklerini içeren çalışmalar yapılması araştırmacılara önerilmektedir.

Nanoparçacık içeren elyaf takviyeli kompozitlerle yapılan çoğu çalışma, nanomalzeme eklenmesinin kompozit özelliklerini nasıl değiştirdiği üzerinedir. 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]Ersoy, H.Y. (2001). Kompozit Malzeme, *Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. ve Tic. Ltd. Şti.*, 11-15, 95-105, 110-116.
- [2]Sirin, H. (2012). Poli(hedral oligomerik silseskuokzan) (POSS) esaslı nanokompozit endüstriyel liflerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- [3]Ghorbani, A. (2014). Karbon iplik dolgulu grafen/epoksi nanokompozitlerin özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- [4]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.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]Subramaniyan, A.K., Bing, Q., Nakima, D., Sun, C.T. (2003). *Proc. of 18th Annual Technical Conference of American Society for Composites*, Gainesville, Paper 194.
- [8]F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, W. Bauhofer, K. Schulte. (2005). *Composites Part A.*, 36, 1525.
- [9]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.
- [10]Yüksek, M. (2011). Cam lifi esaslı poliester reçineli çok eksenli çözümlü örme kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [11]Şahin, Y. (2009). Kompozit malzemelere giriş, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 1-88.
- [12]Eren, Y. (2007). Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
- [13]Bağcı, İ. (2006). Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [14]Sorucu, A. (2007). Orthotropik malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- [15]Kim, J., Mai, Y. (1998). Engineered interfaces in fiber reinforced composites, *Elsevier Science Ltd.*, Amsterdam.

- [16]**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.
- [17]**Saçak, M.** (2002). Polimer kimyası, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 85-89, 221-224,275-297, 393-397.
- [18]<[www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyester-composites](http://www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyester-composites)>, alındığı tarih: 27.04.2016.
- [19]**Bozkurt, E.** (2006). Mechanical and thermal properties of non-crimp glass fiber reinforced composites with silicate nanoparticule modified epoxy matrix, Yüksek Lisans Tezi, *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği*, İzmir.
- [20]**Mazumdar, S.K.** (2002). Composites manufacturing, *CRC Press*, Florida.
- [21]**Demirel, A.** (2007). Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [22]**Donnet, J.B., Bansal, R.C.** (1990). Carbon fibers, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 470.
- [23]**Arıcasoy, O.** (2006). Kompozit sektör raporu, *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul.
- [24]<[www.commonfibers.com/what-is-carbon-fiber](http://www.commonfibers.com/what-is-carbon-fiber)>, alındığı tarih: 20.04.2016.
- [25]**Haris, B.** (1986). Engineering composite materials, *The Institute of Metals*, London, 1-91.
- [26]**Ersoy, M.S.** (2005). Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş.
- [27]<[www.wirebiters.com/lets-learn-polymers-plastic/](http://www.wirebiters.com/lets-learn-polymers-plastic/)>, alındığı tarih: 21.04.2016.
- [28]**Sheikh-Ahmad, J.Y.** (2009). Machining of polymer composites. *New York: Springer Science*, New York.
- [29]**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.
- [30]**Lee H., Neville K.** (1967). Handbook of epoxy resin, *McGraw-Hill Inc.*, USA, 7-17.
- [31]<<http://polymerinnovationblog.com/thermoset-cure-chemistry-part-3-epoxy-curing-agents/>>, alındığı tarih: 23.04.2016.
- [32]**Velde B.** (1992). Introduction to clay minerals, chemistry, origins, uses and environmental significance, *Chapman & Hall Inc.*, London, 10-15.
- [33]**Tang, L. G., Kardos, J.L.** (1987). A Review of methods for improving the interfacial adhesion between carbon fiber and polymer matrix, *Polymer Composites*, 18, 110-113.
- [34]**Erden, S., Yıldız, H.** (2007). Enhancement of interfacial strength in “carbon fiber/thermoplastic matrix composites. *3rd International Technical Textiles Congress*, İstanbul, 426-45.
- [35]**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.

- [36]Özaydın, M. B. (1999). Kompozit malzemelerin balistik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-18.
- [37]<[www.composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/what\\_are\\_composites.htm](http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/what_are_composites.htm)> alındığı tarih: 25.04.2016.
- [38]<[http://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch07.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch07.pdf)>, alındığı tarih: 01.05.2016.
- [39]Demircioğlu, G. (2006). Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyunun etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [40]Armakan, H. D. M. (2010). Örme sandviç tekstillerin kompozit uygulamalarında kullanım olanaklarının araştırılması, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- [41]Eren, Y. (2007). Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
- [42]Arslan, İ. (2016). POSS esaslı nanokompozitlerin foto-"click" tepkimesiyle hazırlanması ve endüstriyel uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yalova.
- [43]Luo, J.J., Daniel, I.M. (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites, *Composite Science and Technology*, 63(11), 1607–1616.
- [44]Njguna, J., Pielichowski, K., Desai, S. (2008). Nanofiller-reinforced polymer nanocomposites, *Polymer for Advanced Technologies*, 19, 947-959.
- [45]Chin I., Thurn-Albrecht T., Kim H., Russel T.P. and Wang J. (2001). On exfoliation of montmorillonite in epoxy, *Polymer*, 42: 5947-5952.
- [46]Winey, K.I., Vaia, R.A. (2007). Polymer nanocomposites. *MRS Bull*, 32, 314–319.
- [47]Lagashetty, A., Venkataraman, A. (2005). Polymer nanocomposites. *Resonance*, 10, 49-57.
- [48]Komarneni, S. (1992). Nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry*, 2, 1219-1230.
- [49]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.
- [50]Moniruzzaman, M. and Winey, K.I. (2006). Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, 39, 5194-5205.
- [51]Sanchez, C., Julian, B., Belleville, P., and Popall, M. (2005). Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry*, 15, 3559-3592.
- [52]Ayandele, E., Sarkar, B., and Alexandridis, P. (2012). Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)-containing polymer nanocomposites, *Nanomaterials*, 2, 445-475.
- [53]Joshi, M. and Butola, B.S. (2004). Polymeric nanocomposites - polyhedral oligomeric silsesquioxanes (poss) as hybrid nanofiller, *Journal of Macromolecular Science-Polymer Reviews*, C44, 389-410.
- [54]Ghanbari, H., Cousins, B.G., and Seifalian, A.M. (2011). A nanocage for nanomedicine: Polyhedral oligomeric silsesquioxane (poss), *Macromolecular Rapid Communications*, 32, 1032-1046.

- [55]Zhao, J.Q., Fu, Y., and Liu, S.M. (2008). Polyhedral oligomeric silsesquioxane (poss)-modified thermoplastic and thermosetting nanocomposites: A review, *Polymers & Polymer Composites*, 16, 483-500.
- [56]Kuo, S.W., Chang, F.C. (2011). POSS related polymer nanocomposites, *Prog. Polym. Sci.*, 36, 1649–1696.
- [57]Andrews, R. and Weisenberger, M. (2004). Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.
- [58]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.
- [59]Suslick, K.S. (1990). Sonochemistry, *Science*, 247, 1439-1445.
- [60]<[http://bandelin.com/produkte/ultrasonic\\_homogenizers/sonopuls-hd-2070-und-hd-2200/?lang=en](http://bandelin.com/produkte/ultrasonic_homogenizers/sonopuls-hd-2070-und-hd-2200/?lang=en)>, alındığı tarih: 31.03.2016.
- [61]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.
- [62]Balazs, A.C., Emrick, T., Russell, T.P. (2006). Nanoparticle polymer composites: Where two small worlds meet, *Science*, 314, 1107–1110.
- [63]Wang, X., Xuan, S., Song, L., Yang, H., Lu, H., Hu, Y. (2011). Synergistic effect of POSS on mechanical properties, flammability, and thermal degradation of intumescent flame retardant polylactide composites, *J. Macromol. Sci. B*, 51, 255–268.
- [64]Wu, X., Sun, Y., Xie, W., Liu, Y., Song, X. (2010). Development of novel dental nanocomposites reinforced with polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS). *Dent. Mater.*, 26, 456–462.
- [65]Zheng, L., Farris, R.J., Coughlin, E.B. (2001). Novel polyolefin nanocomposites: Synthesis and characterizations of metallocene-catalyzed polyolefin polyhedral oligomeric silsesquioxane copolymers, *Macromolecules*, 34, 8034–8039.
- [66]Sánchez-Soto, M., Illescas, S., Milliman, H., Schiraldi, D.A., Arostegui, A. (2010). Morphology and thermomechanical properties of melt-mixed polyoxymethylene/polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.*, 295, 846–858.
- [67]Ni, Y., Zheng, S., Nie, K. (2004). Morphology and thermal properties of inorganic–organic hybrids involving epoxy resin and polyhedral oligomeric silsesquioxanes, *Polymer*, 45, 5557–5568.
- [68]Zeng, K., Zheng, S. (2007). Nanostructures and surface dewettability of epoxy thermosets containing polyhedral oligomeric silsesquioxane-capped poly(ethylene oxide), *J. Phys. Chem. B*, 111, 13919–13928.
- [69]Rashid, E.S.A., Ariffin, K., Kooi, C.C., Akil, H.M. (2009). Preparation and properties of POSS/epoxy composites for electronic packaging applications, *Material Design*, 30, 1–8.
- [70]Huang, J.C., He, C.B., Xiao, Y., Mya, K.Y., Dai, J., Siow, Y.P. (2003). Polyimide/POSS nanocomposites: Interfacial interaction, thermal properties and mechanical properties, *Polymer*, 44, 4491–4499.



- [71]Wu, S., Hayakawa, T., Kakimoto, M.A., Oikawa, H. (2008). Synthesis and characterization of organosoluble aromatic polyimides containing POSS in main chain derived from double-decker-shaped silsesquioxane, *Macromolecules*, 41, 3481–3487.
- [72]Madbouly, S.A., Otaigbe, J.U. (2009). Recent advances in synthesis, characterization and rheological properties of polyurethanes and POSS/polyurethane nanocomposites dispersions and films, *Prog. Polym. Sci.*, 34, 1283–1332.
- [73]Wicks, S.S., Guzman de Villoria, R., Wardle, B.L. (2010). Interlaminar and intralaminar reinforced of composite laminates with aligned carbon nanotubes, *Composite Science and Technology*, 70, 20-28.
- [74]Njuguna, J., Pielichowski, K. and Alcock, J.R. (2007). Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites: Current status, *Advanced Engineering Materials*, 9, 835-847.
- [75]Lourie, O., Wagner, H.D. (1999). Evidence of stress transfer and formation of fracture clusters in carbon nanotube-based composites, *Composites Science and Technology*, 59, 975-977.
- [76]Aboubakr, S.H. (2013). Epoxy-clay nanocomposite for carbon fiber reinforced polymer applications, Yüksek Lisans Tezi, *The University of New Mexico*, Albuquerque.
- [77]<[www.gurit.com/files/documents/prime-20lvpdf.pdf](http://www.gurit.com/files/documents/prime-20lvpdf.pdf)>, alındığı tarih: 13.05.2016.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Cenk KURTULUŞ

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Üsküdar / 06.03.1990

**Adres:** İstasyon Mah. – Fevzi Çakmak Cad. – Park Sit. – Manolya Apt. – K:4 – D:7  
34940 Tuzla/İstanbul

**E-Posta:** cenkkurtulus@msn.com

**Lisans:** Yalova Üniversitesi, Polimer Mühendisliği

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Hexagon Studio Tasarım ve Mühendislik A.Ş. – Proje Mühendisi  
(01.2015-...)

TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Bursu  
(2016)

TÜBİTAK 2238 Üniversiteler Arası Girişimcilik ve Yenilikçilik Yarışması Finali  
(2014)

Yalova Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi, Bölüm&Fakülte Birinciliği  
(2014)

### Yayın ve Patent Listesi:

**C. Kurtuluş**, M. A. Taşdelen, S. Oran (2015). Polimerik malzemelerin özelliklerinin nanodolgularla iyileştirilmesi, *Putech and Composites*, Nisan-Mayıs, 32-46.

**C. Kurtuluş**, M. A. Taşdelen, S. Oran (2015). Atık lastiklerden elde edilen kompozitlerin ses bariyeri olarak kullanılması, *Turkchem*, Ocak-Şubat, 12-18.

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

**C. Kurtuluş**, M. A. Taşdelen (2016). POSS Nanodolgununun DGEBA Esaslı Epoksi Reçinenin Mekanik ve Isıl Özelliklerine Etkisi, *1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı*, Poster Sunumu, 21-22 Nisan, Afyonkarahisar.