



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



VAKUM DESTEKLİ EL YATIRMA YÖNTEMİ  
İLE ÜRETİLEN  $Fe_2O_3$  NANO PARÇACIK  
İLAVELİ TABAKALI KOMPOZİTLERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

MAHMUT ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ-2018  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mahmut ÖZER tarafından hazırlanan "VAKUM DESTEKLİ EL YATIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN  $Fe_2O_3$  NANO PARÇACIK İLAVELİ TABAKALI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 23/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Mesut Uyaner

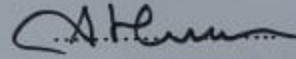
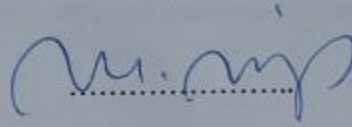
#### Danışman

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan Demirci

### İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARALI  
FBE Müdürü

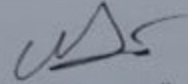
Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 181316001 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Mahmut ÖZER

Tarih: 23.07.2018

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

# VAKUM DESTEKLİ EL YATIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NANO PARÇACIK İLAVELİ TABAKALI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Mahmut ÖZER**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR**

**2018, 86 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Mesut UYANER**

**Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR**

**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ**

Tez çalışmasının ilk aşaması epoksi matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde, en uygun Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül oranının tespiti yapılmak üzere, ağırlıkça farklı oranlarda (%0,5 – 4,0) nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesiyle yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre en uygun ilave oranının %0,5 olduğu görülmüş ve saf epoksiye göre %13,62 artışla en yüksek çekme dayanımı 85,52 MPa olarak elde edilmiştir. Daha yüksek ilave oranlarında ise çekme dayanımı ve statik tokluk değerleri bakımından bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Çekme deneyi sonrası oluşan hasar yüzeyleri incelenmiş ve nanopartiküllerin sebep olduğu mukavemetlendirme mekanizmaları ile yüksek oranlarda meydana gelen kümeleşme durumu tespit edilmiştir. %0,5'den yüksek oranlarda meydana gelen düşüşlerin bu durumdan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Bunların yanı sıra, termal özelliklerin incelenmesi için DSC ve TGA analizleri ve bağ yapılarının incelenmesi için FTIR analizi uygulanmıştır. Partikül ilavesinin epoksinin çapraz bağ yoğunluğunu etkileyerek termal kararlılığı iyileştirdiği ön görülmüştür. Ayrıca nanopartikülün epoksi matrisin jelleşme süresine etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise en uygun ilave oranı kullanılarak Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitler üretilmiş ve nanopartikül ilavesinin epoksi/cam elyaf sistemine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada üretim, uygulama açısından kolay bir işlem olan vakum destekli el yatırma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına göre uygun olarak hazırlanan tabakalı kompozit numuneler çekme ve 3-nokta eğme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme mukavemetinde saf epoksi matrisli tabakalı kompozite göre %21,43, statik tokluk değerinde %23,082 ve çekme uzamasında %6,28 oranında artış sağlanmıştır. Öte yandan çekme modülünde %18,75'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testi sonucu ise saf epoksiye göre eğilme mukavemetinde %24,79 oranında düşüş elde edilirken, eğilme modülü değerinde %2,5 oranında bir artış elde edilmiştir. Son olarak tabakalı kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Epoksi, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nanokompozit, hasar analizi, tabakalı kompozit

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

### **Investigation on Mechanical Properties of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles Reinforced Laminated Composites Produced via Vacuum Assisted Hand Lay Up**

**MAHMUT ÖZER**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR**

**2018, 86 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Mesut UYANER**

**Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR**

**Asst. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRÇİ**

The first stage of thesis study started with determining optimum proportion of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle addition through investigating mechanical properties of nanoparticle reinforced epoxy nanocomposites which was reinforced with different proportions by weight (0.5 – 4.0%). According to tensile test results, optimum reinforcement value was found as 0.5% and maximum tensile stress was found 85.52 MPa with 13.62% increase compared to neat epoxy. In respect to tensile stress and static toughness values of nanocomposites which was reinforced with proportions more than 0,5% nanoparticle, decrements were observed. Fractured surfaces were investigated after tensile tests, nanoparticles' toughness effects was observed and agglomeration situation was predicted to be a reason for decrements at high addition proportions. In addition to this, DSC and TGA analysis to investigate thermal properties of nanocomposites and FTIR analysis to investigate bond characterization of nanocomposites were applied. As a result, particle addition was predicted to cause improvements on thermal stability of nanocomposites through affecting cross-link density. Also, nanoparticle effect on gel time of epoxy is investigated.

In the second stage of study, glass fiber reinforced laminated composites with addition of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> optimum reinforcement value were produced and effect of nanoparticle addition on epoxy/glass fiber system was investigated. Producing of laminated composites at the second stage was made with vacuum assisted hand lay-up method, which is a easy to apply. Laminated composites specimens were prepared according to ASTM standards and following this, tensile tests and 3-point bending tests are applied. As a result of tensile test, there were 21.43% increase at tensile strength, 23.082% increase at static toughness and 6.28% increase at elongation when compared with laminated composite produced with neat epoxy matrix. On the other hand, 18.75% decrement observed at tensile modulus. According to three-point bending test, there were 24.79% decrease at flexural strength and 2.5% increase at flexural modulus when compared with laminated composite produced with neat epoxy matrix. Lastly, fractured surfaces of laminated composite are observed.

**Keywords:** Epoxy, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nanocomposite, damage analysis, laminated composite

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında benimle yakından ilgilenen, çalışmanın genel kurgusunu oluşturan, bilgisi ve tavsiyeleri ile farklı noktalardan çalışmamı incelememde yardımcı olan ve ileride yapacağım çalışmalarımın temelini atan danışmanım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma süresince yardımını esirgemeyen ve numunelerin üretimi ile karakterizasyonu aşamalarında bana yardımcı olan Dr. Öğr. Görevlisi Şakir YAZMAN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Çalışmanın son kısımlarında malzeme tedariği konusunda büyük yardımcı dokunan Doç. Dr. Ahmet SAMANCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen babam Mehmet ÖZER, annem Sevim MUTLU'ya ve abim Metin Kağan ÖZER ile kardeşim Alper ÖZER'e ve geri kalan aile üyelerine de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamın yapılmasında 181316001 nolu proje ile yaptıkları maddi destekten ötürü Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürlerimi sunarım.

Mahmut ÖZER  
KONYA-2018

# İÇİNDEKİLER

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler.....	4
2.2. Partikül İlaveli Polimer Kompozitler.....	15
2.2.1. Partikül İlavesinin Etkisi.....	15
2.2.2. Nanopartiküllerin Mukavemetlendirme Mekanizmaları .....	16
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>24</b>
3.1. Polimer Matrisli Kompozitler .....	25
3.1.1. Matris Malzemeleri .....	28
3.1.2. Takviye Elemanları.....	33
3.1.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	37
<b>4. MATERYAL YÖNTEM</b> .....	<b>46</b>
4.1. Malzemeler ve Özellikleri .....	46
4.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozit Numunelerin Üretilmesi .....	48
4.3. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	51
4.4. Tabakalı Kompozit Numunelerin Üretilmesi .....	51
4.5. Tabakalı Kompozit Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	54
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>55</b>
5.1. Nano Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Partikülünün Epoksi Matris Sistemine Etkisi .....	55
5.1.1. Nanopartikülün kürlenme üzerine etkisi.....	55
5.1.2. Epoksi/Nanopartikül nanokompozitin mekanik özellikleri .....	55
5.1.3. Nanokompozitlerin SEM analizi .....	59
5.1.4. Nanokompozitin TGA analizleri .....	63
5.1.5. Nanokompozitlerin DSC analizleri.....	65
5.1.6. Nanokompozitin FT-IR analizleri.....	66
5.2. Tabakalı Kompozitlerin Yakma Deneyi ve Mekanik Özellikleri .....	67
5.2.1. Tabakalı kompozitlerin yakma deneyi.....	67
5.2.2. Tabakalı kompozitlerin çekme testi .....	68
5.2.3. Tabakalı kompozitlerin üç – nokta eğme testi .....	71
5.2.4. Tabakalı Kompozitlerin SEM Analizleri .....	73
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>79</b>

6.1. Sonuçlar .....	79
6.2. neriler .....	80
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>81</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>87</b>





## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

F0	: Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesi yapılmamış saf epoksi
F1	: Ağırlıkça %0,5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesi yapılmış epoksi
F2	: Ağırlıkça %1,0 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesi yapılmış epoksi
F3	: Ağırlıkça %2,0 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesi yapılmış epoksi
F4	: Ağırlıkça %4,0 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ilavesi yapılmış epoksi

### Kısaltmalar

KNT	: Karbon nanotüp
DGEBA	: Diglisidil Eter Bisfenol A (Diglycidyl Ether of Bisphenol A)
TGA	: Termal Gravimetrik Analiz
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimetry)
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrometre (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama ( Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz (Dynamic Mechanical Analysis)
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy)

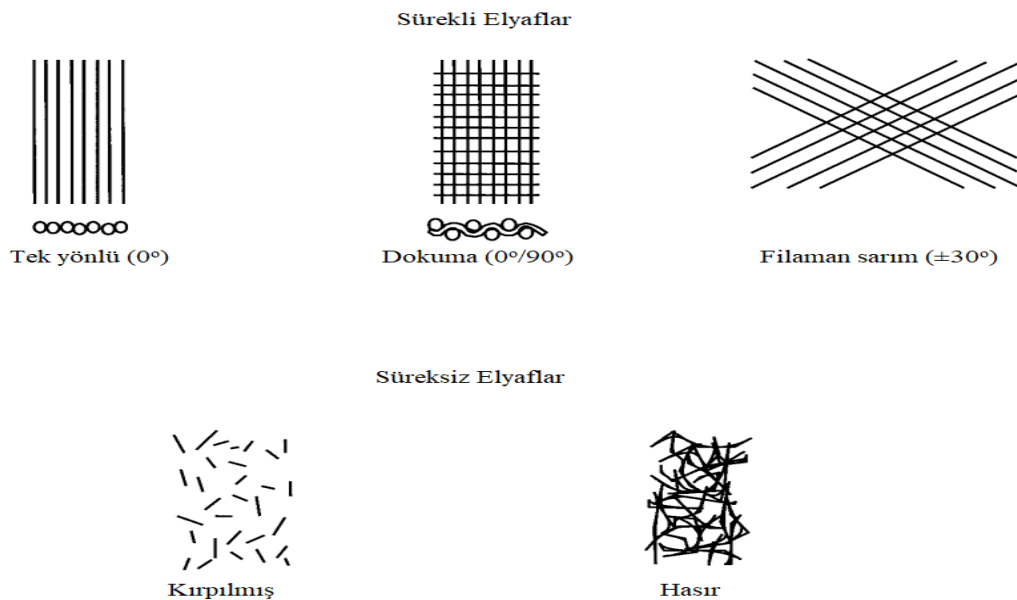
## 1. GİRİŞ

Malzemeler açısından ihtiyaçlar her geçen gün değişmektedir. İstenilen özelliklere uygun malzemeyi elde etmek için farklı yöntemler kullanılarak birçok malzeme türü geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Kompozit malzemeler genel olarak iki ya da daha fazla farklı malzemenin bir araya gelip tek bir yapı oluşturduğu aynı zamanda kendilerine özgü özellikleri kaybetmedikleri bir malzeme türü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajları öncelikle yüksek özgül sertlik (rijitlik) ve mukavemete sahip olmalarıdır. Bunların yanı sıra kullanıldıkları yapılarda ağırlıkta azalma sağlamak ve ayrıca korozyona karşı dirençleri de yüksektir. Örneğin yük taşıyıcı bir sistemde cam elyaf takviyeli kompozit çelik parça yerine kullanılırsa göre dörtte biri kadar hafif olacaktır. Bir başka örnek olarak ise rijitliğin kriter olduğu bir malzeme seçiminde karbon elyaf takviyeli kompozit yapının ağırlığı çelik malzemenin ağırlığının onda biri kadar gelecektir. Kompozit malzemelerin diğer bir avantajı ise hem üretilirken hem de kullanılırken enerji tasarrufu sağlamasıdır. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde yüksek sıcaklıklar gerekmediği için fazla enerji de harcamak gerekmez. Havacılık ve uzay araçları ve otomotiv sektöründe ise özellikle ağırlığı azaltmak bir sorunken kompozitlerin bu konuda sağladığı avantaj ile araçlar hafifleyerek daha az yakıt tüketir duruma getirilmiştir. Bunların yanı sıra elyaf takviyeli kompozitler üretilirken elyaflar yönlendirilerek istenilen yönde mekanik özelliklerin yüksek olması sağlanabilir. Genel olarak polimerlerin metal malzemelere göre hava şartlarına direnci daha yüksektir ki bu da polimer kompozitlerin seçilmesinde başka bir sebeptir. Sonuç olarak kompozit malzemeler uygun bileşenler ve üretim yöntemi seçilirse istenilen özelliklerde malzemeyi ortaya çıkarma imkânı olacaktır. (Balasubramanian, 2013).

Bir kompozit malzemenin yapısını oluşturan iki ana bileşen olarak matris ve takviye elemanları ele alınmıştır. Bunlardan matrisin görevi yapıyı bir arada tutmak, üzerine gelen yükü takviye elemanına aktarmak ve takviye elemanını çevresel etkilerden korumaktır. Matris türü olarak ise metal matris, seramik matris ve polimer matris olmak üzere üç ana başlık bulunmaktadır. Genel olarak metal ve seramik matrisli kompozitler üretim için yüksek sıcaklığın yanı sıra zaman zaman yüksek basınçta

gerektirdiklerinden dolayı polimer matrisli kompozitlere göre daha pahalıdırlar. Ancak, polimerlere göre daha iyi termal kararlılıkları olduğundan yüksek sıcaklıktaki uygulamalar için daha uygundur. Takviye elemanları ise matris malzemesinin özelliklerinin daha iyi hale getirilebilmesi için kullanılan ikincil bileşenlerdir ve genel olarak elyaflar, parçacıklar, viskerler gibi elemanlar bulunmaktadır. Takviye fazları ise matrise mukavemet ve rijitlik sağlamaktadır. Çoğu durumda takviye matristen daha sert, daha güçlü ve daha rijittir. Parçacıklar neredeyse her yönde eşit olan boyutlara sahip iken küresel, levhacık ya da herhangi bir düzenli veya düzensiz şekillerde olabilirler. Parçacık kompozitler sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre daha zayıf ve daha az rijit olma eğilimindedirler ancak daha ucuzdur. Parçacık takviyeli kompozitler üretim zorlukları ve kırılmalardan dolayı daha az takviye içerir (hacimce %40-%50'ye kadar). Elyaf uzunluğu çapına göre çok büyük olan bir yapıdır. Uzunluk – çap (l/d) oranı çok farklı değerler alabilir. Sürekli elyafların en-boy oranı süreksizlere göre daha büyüktür. Sürekli elyaflar belli bir düzende kullanılırken süreksizler rastgele olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2010). Sürekli ve süreksiz elyaf örnekleri Şekil 1.1'de verilmiştir. Elyaf türleri olarak ise cam, karbon, aramid ve bazalt gibi seçenekler bulunmaktadır.



**Şekil 1.1.** Elyaf çeşitleri örnekleri

Kompozit malzemelerden özellikle polimer matrisler hafifliğin yanı sıra yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen kırılmalardan bir yapıya sahiptir. Elyaf takviyeli

kompozitlerde matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirmesi bu açıdan önemlidir. Bu bağlamda matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte 1 – 100 nm çapında nanopartiküller ile nanokompozitler üretilmektedir (Kalaitzidou, Fukushima ve Drzal, 2007). Literatürde nanopartikül ilavesi ile mekanik, termal ve diğer özelliklerde de değişimler elde edilmiştir (Chen, Justice, Schaefer ve Baur, 2008; Jalali, Dauterstedt, Michaud ve Wuthrich, 2011; Omrani, Simon ve Rostami, 2009). Ancak bu iyileştirmenin sağlanması matrisle uyumunun iyi sağlanmasına, yani karışımının iyi sağlanması gerekmektedir. Nanopartiküllerin dağılımının iyileştirilmesi üzerine de çalışmalar mevcuttur (Gojny, Wichmann, Fiedler ve Schulte, 2005; Jaisingh, Selvam, Kumar, Thyagarajan ve Centre, 2012).

Bu çalışmada nanopartikül ilavesinin polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozitin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Matris olarak epoksi reçine (Bisfenol A Diglisidil Eter-DGEBA), nanopartikül olarak  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve elyaf takviyesi olarak 0°/90° düzeninde cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında epoksi matris için uygun nanopartikül oran değerinin bulunması amacıyla kütleli (bulk) ağırlıkça farklı oranlarda (%0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0)  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü ilaveli kompozitler ASTM D638 çekme testi standardına göre üretilmiş ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülünün kırılma mekanizmasındaki etkileri de araştırılmış, hasar yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri incelenmiş ve termal özellikleri açısından incelemek için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile termogravimetrik analiz (TGA) ve bağ yapılarını incelemek için fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FTIR) analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada epoksi matris için belirlenen uygun nanopartikül ilave oran değeri ile  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitler, vakum infüzyon yöntemiyle levha şeklinde üretilmiş ve bu levhalardan numuneler çekme testi için ASTM D3039, üç-nokta eğme testi için ASTM D7264 standardına uygun olarak kesilmiş, üretilen kompozitin farklı gerilmeler altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Hasar yüzeyleri ise taramalı elektron mikroskopu görüntüleri alınarak incelenmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışma ile ilgili yayınlar bu bölümde farklı başlıklar altında sunulmuştur. İlk kısımda farklı türde (karbon, aramid, bazalt, doğal ve cam) elyaf takviyeli polimer kompozitler, ikinci bölümde partikül ilaveli polimer kompozitler ve partikül etkisi ile alakalı araştırmalar sunulmuştur.

### 2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

Literatür araştırmasının ilk kısmında sırasıyla karbon, aramid, bazalt, doğal ve cam elyaf içeren kompozitlerin içerdiği çalışmalar incelenmiş olup cam elyaf takviyeli kompozitlerin incelendiği çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Termoplastik (PEEK ve PPS) ve termoset (epoksi) matrislere sahip, tek yönlü ve örgü karbon elyaf kumaşlar ile takviyelendirilmiş kompozitlerde düşük hızlı darbe esnasında direnci incelenmiştir. Bu konu üzerine genel anlamda termosetlerden özellikle epoksi üzerine birçok çalışma varken termoplastik kompozitler üzerine az sayıda çalışma bulunmasından dolayı bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Darbe testinde 2J, 6J, 10,5J, 17J ve 25J ( $V_{\text{çarpıcı}} = 1,4 \text{ m/s}$  –  $V_{\text{çarpıcı}} = 5 \text{ m/s}$ ) darbe enerjileri uygulanmış ve yarı küre şeklinde, 20 mm çapında, 2,077 kg ağırlığında çelik bir çarpıcı (izaçar) kullanılmıştır. Sonuç olarak ise epoksi matrisli kompozitlerde delaminasyon alanının daha fazla olduğunu, termoplastik matrisli kompozitlerin daha tok ve daha iyi bir darbe performansı gösterdiğini belirtmişlerdir (Vieille, Casado ve Bouvet, 2013).

Elyaf hacim oranının etkisinin incelendiği çalışmada tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler kullanılmış ve yorulma davranışı ile hasar mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan testler de yarı durağan çekme ve çekme-çekme (tension-tension) yorulma yüklemeleri  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  açılarında uygulanmıştır. Kırılma yüzeyleri ise taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir. Üretilen kompozitlerin elyaf hacim oranları sırasıyla %30 ve %50'dir. Üretim esnasında en iyi sonucu alabilmek için üç farklı kütleme yolu izlemişlerdir. Bunlar sırasıyla  $23^\circ\text{C}$ 'de 24 saat ve ardından  $80^\circ\text{C}$ 'de ve sadece  $80^\circ\text{C}$  ile  $90^\circ\text{C}$ 'de kütleme şeklindedir. Kullanılan kumaşlar %30 hacim oranı için  $80 \text{ g/m}^2$  ve %55 hacim oranı için  $250 \text{ g/m}^2$  olarak seçilmiştir. Bunlara ek olarak ise deneylerden önce yapılan temperleme işleminin de etkisini

görebilmek için temperlenmemiş ve çekme testinden önce 24 saat boyunca 105 °C’de temperlenmiş numuneler hazırlanmıştır. Üretim yöntemi olarak ise vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Yarı durağan çekme testlerinde her açıda young modülü ve maksimum çekme dayanımı %55 hacim oranına sahip kompozitlerde daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Ancak 90° açısındaki testlerde Young modülü hariç, maksimum çekme mukavemeti ve maksimum çekme mukavemetinde birim şekil değiştirme değerleri saf epoksi için daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yorulma testlerinde de 90° açısında yarı durağan çekme testinde olduğu gibi epoksi daha iyi olarak sonuç vermiştir. Diğer açılarda ise hacim oranı yüksek kompozit daha yüksek çevrim sayılarında hasara uğramıştır. 90° açısı için düşük yorulma gerilimi değerlerinde farklı elyaf hacim oranları özelliklerin üzerinde daha baskın olduğu gözlemlenmiştir (Brunbauer, Stadler ve Pinter, 2015).

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mikro yapısının ve kırılma performansının incelendiği bir çalışmada, anhidrid katılaştırıcı ile kürlenmiş epoksi bir matris içinde silika nanopartikülleri ve/veya çekirdek-kabuk kauçuk (core-shell rubber) ilavesi kullanılmıştır. Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin kırılma enerjilerini değerlendirmek için çift ankastre kiriş testi (double cantilever beam test) uygulanırken, kütleli (bulk) kompozitler için tek kenarı çentikli eğilme numuneleri kırılma enerjilerini incelemek üzere hazırlanmıştır. Deneysel oda sıcaklığında ve -80°C’de yapılmıştır. Tokluğun kütleli polimerden elyaf kompozite aktarılabilirliği tokluk mekanizmaları üzerinden değerlendirilmiştir. Çekme modülü üzerine ilave nanopartikül ve kauçuğun fazla bir etkisinin olmadığını, bası yükünde akma sınırında da kauçuk ilaveli kompozitin değeri düşürdüğünü ve silika nanopartikülünün herhangi bir etki göstermediğini belirtmişlerdir. Kırılma enerjilerini incelenmesi sonucu ise silika nanopartikülü ilaveli kompozitlerde oda sıcaklığında yapılan testlerde gelişme kaydedilmezken, -80°C’de yapılan testlerde hem kütleli hem de karbon elyaf takviyeli kompozite göre gelişme gözlemlenmiştir. Kauçuk ilavesinde ise hem oda hem -80°C’de %4 ilave oranında sade epoksi ve karbon elyaf takviyeli kompozite göre gelişme kaydedilmiştir. Hem kauçuk hem silikanın hibrit ilave olarak kullanıldığı durumda ise sade kauçuk ilave edilmiş kütleli kompozitlere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, karbon elyaflı kompozitlerde bu durum aynı olmamıştır, bunun sebebi olarak elyaf takviyesinin bu tür kompozitlerde debonding (arayüz ayrılması), köprüleme ve pull-out (elyaf matris ayrılması) gibi tokluk kazandırma mekanizmaları ile daha baskın

bir etkisinin olması şeklinde açıklamış ve SEM fotoğraflarında ise açık bir şekilde bu mekanizmaları göstermişlerdir. Bunlara ek olarak ise SEM fotoğraflarında nanopartiküllerin etrafında boşluk büyümeleri (void growth) net olarak gözlemlenmiştir (Carolan, Kinloch, Ivankovic, Sprenger ve Taylor, 2016).

Karbon nanotüp (KNT) ilaveli karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemet ve kırılma davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelendiği çalışmada kısa kiriş kayma testi uygulanmış ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle kompozitlerdeki hasar gelişimleri incelenmiştir. Bunlara ek olarak ise karbon elyaf/epoksi kompozitte farklı oranlarda KNT etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar modeli geliştirip incelemiştir. Ağırlıkça %0,5 KNT ilaveli ve ilavesiz, kalıplanmış (KNT'nin %50 ve %25 oranlarında) ve kalıplanmamış (haşılama işlemi görmüş ve görmemiş) karbon elyaf takviyeli kompozitler şeklinde 6 farklı tür numune bulunmaktadır. Haşılama işlemi çözgü ipliklerinin mukavemetini artırmak üzere viskoz bir sıvı ile kaplanması şeklindedir. Malzemeler yoğunluğu  $1.18 \text{ g/cm}^3$ , camsı geçiş sıcaklığı  $110^\circ\text{C}$  ve young modülü  $2,7 \text{ GPa}$  olan epoksi diglisidiler bisfenol A (DGEBA), ortalama çapı  $9.5 \text{ nm}$ , ortalama uzunluğu  $1.5 \text{ }\mu\text{m}$  ve özgül yüzey alanı  $250 - 300 \text{ m}^2/\text{g}$  olan karbon nanotüpler ve çekme mukavemeti  $3920 \text{ MPa}$ , çekme modülü  $234 \text{ MPa}$  ve hasar birim şekil değiştirmesi %1.7 olan karbon elyaflardır. Kullanılan kalıp malzemesi ise epoksi uyumlu fenoksi tabanlı bir malzemedir. Numuneler önce  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  ve  $2.5-3.5 \text{ mm}$  kalınlığında ve %50 – 55 hacim elyaf oranlı olarak üretilen plakalardan su jeti yardımıyla kesilip alınmıştır. Kısa kiriş kayma testi ASTM D2344 standardına göre uygulanmıştır. Deneylerden kuvvet – yer değiştirme eğrileri elde etmişlerdir. KNT ilavesiz numunelerde oluşan eğride tepe noktasına geldiğinde çatlama başlangıcı olduğu ve sonrasında dalgalanma yapıp kademeli olarak aşağı inerken, KNT ilaveli numunelerde ise başlangıç eğrinin düzenli olmadığı bölgeye ulaştığında gözlemlenmiş ve bu bölgenin KNT ilaveli kompozitlerde daha uzun olduğu belirtilmiştir. Haşılama oranının %50 oranında olduğu numunelerde bu bölgenin tepe noktasından sonra daha da uzun süre devam ettiğini ve %25'lik oranda ise bu durumun gözlemlenmediğini belirtmiş ve bu durumun kompozitin delaminasyon direncinde pozitif etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Kalıplama işlemi olmadan KNT ilaveli kompozitte tabakalar arası kayma mukavemetinde (ILSS) %77 artış elde ederken, yalnız kalıplama ile %36 - %53'lük artış ve ikisinin bir arada olduğu durumda ise %42 - %88'lik artış elde etmiş ve ILSS değerinin matris baskın bir özellik olduğunu ve ikincil

takviye olanın KNT etkisinin kırılma direncinde etkili olduğunu belirtmişlerdir (H. W. Zhou ve diğerleri, 2016).

Epoksi olarak butil glisidil eterin kullanıldığı bir çalışmada, matris ağırlıkça %0,5 fonksiyonelleştirilmiş çift cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ilavesi yapılmış ardından bu karışım karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit üretiminde kullanılmış ve hem elektriksel hem de mekanik özelliklerde iyileştirme yapılmak amaçlanmıştır. Saf epoksi/karbon elyaf takviyeli kompozite göre kalınlık boyunca elektrik iletkenliği %283 arttığı gözlemlenirken, tabakalar arası kayma mukavemetinde de %21'lik bir artış gözlemlenmiştir. Karbon nanotüp ilaveli matrisin bulunduğu kompozitlerde böyle bir farkın olmasını saf epoksi kullanıldığında ki arayüz bağının daha zayıf kalması, karbon nanotüp varlığında bölgesel arayüzlerin köprüleme ve debonding etkisinin sonucu olarak değerlendirmişlerdir (J. Guo ve diğerleri, 2017).

Tek yönlü T-300, T-700 12k karbon elyaf ve E-Cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada matris olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kompozit plakalar tabaka sarım şeklinde filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiş ve elyaf yönü ile buna dik olacak şekilde kesilip ASTM standartlarına göre çekme, basma, eğilme mukavemeti ve modülü ile ek olarak tabakalar arası kayma mukavemeti incelenmiştir. Sonuç olarak T – 300 12k karbon elyaf takviyeli kompozitin diğer iki türe göre daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. Üretim önce elyafların bir reçine/katılaştırıcı banyosundan geçerek bir dikdörtgen mandrelin üzerine sarılması şeklinde yapılmıştır. Elyaf hacim oranının %65 olarak sağlanması amacıyla reçinenin viskozitesini 1000 – 1500 cP civarında tutmak için sıcaklık karbon elyaf için 60°C ve cam elyaf için 40°C'ye yakın tutulmuştur. Sonrasında ise fırında kürlenmeye bırakılmışlardır. Çekme testi, basma testi, 3-nokta eğme testi ve kısa kiriş kayma testi sırasıyla ASTM D3039, ASTM D3410, ASTM D790 ve ASTM 2344 standartlarına göre yapılmış ve her bir parametre için beşer adet numune kullanılmıştır. Çekme testinde elyaf yönünde özelliklerin daha iyi olduğunu ve çekme mukavemeti, çekme modülü ve bası modülünde T-300 12K (1270MPa, 137.88 GPa ve 153.72 GPa) diğerlerine üstün iken, bası mukavemetinde E-Cam (721.79 MPa) en iyi sonucu vermiştir. Eğme özelliklerinde mukavemet ve modülde yine T-300 12k sırasıyla 1465.58 MPa ve 140.74 GPa ile en iyi sonucu vermiştir. Tabakalar arası kayma mukavemetinde ise 74.44 MPa ile yine en iyi sonucu T-300 12k karbon elyaf takviyeli



kompozitin verdiğini gözlemlemişlerdir (Venkateshwar Reddy, Ramesh Babu, Ramnarayanan ve Das, 2017).

Çekme, eğilme ve darbe mekanik özelliklerin incelendiği çalışmada düz kevlar elyaf ve düz kevlar/cam elyaf kompozitler ve epoksi (DGEBA) reçinesi matris olarak kullanılmıştır. Deneylem çözüğü yönüne paralel, çözüğünün dolgu yönünde ve 90° yönünde uygulanmıştır. Kevlar/cam elyaf hibrit yapısına sahip olan kompozitin incelemeler sonucunda bütün mekanik özelliklerde daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Kullanılan elyaflar Kevlar 49 ve S-Cam elyafıdır. Çekme testi ASTM D 3039 standardına göre 2 x 25 x 150 mm ölçülerinde üretilen kompozitlere 5 mm/dk hızında kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Her grup için üçer adet kompozit numune kullanılmıştır. Izod darbe testi ASTM D4812 standardına göre 12.4 x 75 x 2 mm ölçülerinde olan beş adet numuneye 5,5 J enerjisindeki çekicinin düşürülmesi şeklinde uygulanmış ve mekanik davranış analiz edilmiştir. Eğilme testi için ise ASTM D790 standardına göre 2 x 12.4 x 75 mm ölçülerindeki tabakalı kompozit numunelerden beş adet kullanılmış ve yük 1 mm/dk hızında uygulanmıştır. Araştırmacılar bu çalışmada kullanılan elyaf yapılarının kombinasyonunun atkı ve çözüğülerin üçlü ipliklerinin en az tekrarını bulundurdıkları için seçildiğini ve bu yapının kompozite esneklik ile geri tepme mekanizması kazandırıp mekanik özelliklere etki edeceğini vurgulamışlardır (Valencia, Griza, De Oliveira, Sussuchi ve De Cunha, 2015).

Aramid (Kevlar) elyafın kullanıldığı çalışmada matris olarak termoplastik polipropilen kullanılmış ve NIJ-STD 0106.01 Type IIIA standardına göre balistik darbe tepkisine bakılmıştır. Düz 2D örgü, 3D ortogonal ve 3D açılı kilitli örgü kumaşlar kullanılmıştır. 2D kumaşın diğer kumaşlara göre balistik darbeye %2,4 – 7 aralığında daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. 3D kompozitler 9mm'lik kurşunu karşılamada başarılı iken 2D kompozitler başarısız olmuştur. Ayrıca ANSYS AUTODYN v. 14.0 yazılımı ile kompozitlerin balistik limitleri incelenmiş ve 2D düz örgü tabakalı kompozitlerinden 3D ortogonal ve 3D açılı kilitli tabakalı kompozitlere balistik limitin artışı sırasıyla %16,44 ve %20 olmuştur (Bandaru, Chavan, Ahmad, Alagirusamy ve Bhatnagar, 2016a)

Farklı yapılarda olan aramid elyafların kullanıldığı çalışmada matris olarak polipropilen kullanılmış ve düşük hızlı darbe direnci incelenmiştir. Düz örgü kumaş

(2D), ortogonal örgü kumaş (3D-O) ve üç boyutlu açılı kilitli (3D-A) kumaş olmak üzere üç farklı mimaride olan kevlar kumaşlar kullanılmıştır. Deney esnasında çarpıcı 4 m/s ve 6 m/s hızları ile kompozitlere darbe uygulanmıştır. Farklı mimari yapılaraya sahip kompozitlerin darbe sonrası davranışı da incelenmiştir. Sonuç olarak ise darbe tepkisinin genel olarak tabakaların düzlemler arası rijitliğine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Enerji absorbe kabiliyetinin ağırlıklı olarak kalınlık yönünde elyaf topluluklarının bulunması ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. 3D kompozitlerin 2D kompozitlere göre %14-26 daha fazla enerji soğurduğunu ve özellikle açılı kilitli örgü kumaşa sahip kompozitin 3D-O ve 2D tabakalı kompozitleriyle karşılaştırıldığında daha çok enerji soğurduğunu (%12,7 - 26,2) ve kompozitlerin darbe görünmeyen yüzünde koni şeklinde alan oluşumunun daha ufak olduğunu (%25 -39) belirtmişlerdir (Bandaru, Chavan, Ahmad, Alagirusamy ve Bhatnagar, 2016b)

Reçine filmi infüzyon üretimi ile ağırlıkça %0,1 ve %0,3 karbon nanotüp içeren ve içermeyen reçine filmlerin kullanıldığı çalışmada darbe sonrası bası ve elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Kullanılan reçine filminin camsı geçiş sıcaklığı 200°C ve yoğunluğu 1.15 g/cm<sup>3</sup>, karbon nanotüpün ortalama çapı 13-16 nm ve uzunluğu 1-10 µm şeklinde belirtilmiştir. Kullanılan elyaf 538 g/m<sup>2</sup> özelliğinde bir karbon elyaf olup çift yönlüdür. Ayrıca, epoksi matris içinde KNT dağılımının iyi sağlanması için KNT epoksi matrise uyumlu olacak şekilde bir fonksiyonelleştirilme işlemine tabi tutulmuştur. Darbe sonrası bası mukavemeti ASTM D7136 ile ASTM D7137 standartlarına uygun olan numuneler ile ölçülmüştür. KNT'lerin dağılımının kontrolünde, reçine viskozitesinin sıcaklık artarken düştüğünü, bekleme sıcaklığına (dwell temperature) gelindikten sonra ise çapraz bağ oluşumu nedeniyle tekrar yükseldiğini belirtmişler ve reçine viskozitesinin beklenildiği şekilde KNT ilavesi ile arttığını gözlemlemişlerdir. KNT dağılımını iyi şekilde yapabilmek için ise üretim esnasında iki farklı strateji kullanmışlardır, ancak bir yöntemde iyi bir dağılım elde ederken, diğesinde KNT'ler karbon elyaf tarafından filtrelemeye uğramıştır. KNT ilavesi ile tabakalı kompozitin bası mukavemetinde yine aynı yöntemle üretilen kompozitlerde saf epoksili kompozite göre %14 artış gözlemlenmiştir (Yourdkhani, Liu, Baril-Gosselin, Robitaille ve Hubert, 2018)

Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin termomekanik özelliklerini geliştirmek amaçlı bazalt tozu matris sistemine ilave edilmiştir. Kullanılan malzemeler

epoksi reçine (bisfenol A – BPA) ve kürleştiricisi (trietilentetraamin), düz örgülü bazalt kumaş ( $210 \text{ g/m}^2$ ) ve bazalt tozudur. Epoksi reçine ile ağırlıkça farklı oranlarda bazalt tozu (%2,5 – 5 – 10) önce mekanik karıştırıcı ile karıştırılmış, ardından kürleştirici eklenmiştir. Sonrasında tabakalı kompozitlerin üretimi için el yatırma yöntemi kullanılmış ve hazırlanan kompozitler 24 saat oda sıcaklığında kurlenmeye ardından ise  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 3 saat post kür işlemine tabi tutulmuştur. Tabakalı kompozitler için 6 kat bazalt elyaf kumaşı kullanılmıştır. SEM görüntülerine göre elyaf matris arayüz ayrılması (pull out) olayının görülmediğini ve bununda matris ile elyaf arası bağlantının iyi sağlanması sonucu olabileceğine değinmişlerdir. Bütün numunelerde kırılma yapıda bir kırılma yüzey olduğunu belirtmişlerdir. Dinamik-mekanik termal analizi sonucu ise en yüksek saklama modülü ( $G'$ ) ve camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) değerlerine %2,5 bazalt tozu ilaveli kompozitlerde ulaşıldığını ve bu kompozitlerde termal kararlılığın saf epoksi kompozite göre daha iyi olabileceğini belirtmişlerdir. Mekanik özellikler için yapılan testler sonucunda da yine %2,5 oranında bazalt tozu ilaveli tabakalı kompozitler çekme mukavemetinde daha iyi sonuç vermiştir. Ancak, bazalt tozunun epoksi matristen daha rijit olması nedeniyle elastiklik modülünün artarken kırılma noktasına kadar olan uzamanın azalmasının sebebi olabileceğini belirtmişlerdir. Daha yüksek oranlarda ilavenin olduğu kompozitlerde ise topaklanma gibi sebepler nedeniyle düşüşlerin olabileceğini belirtmişlerdir (Matykiewicz, Barczewski, Knapski ve Skórczewska, 2017).

E-cam elyaf ve bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik açıdan karşılaştırıldığı çalışmada üretim yöntemi olarak ise vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan elyaf takviyeleri  $200 \text{ gr/m}^2$ 'lik düz örgülü bazalt elyaf ve  $290 \text{ gr/m}^2$ 'lik E-Cam elyaf kumaşlarıdır Mekanik özellikleri belirleme amacıyla çekme, basma, kayma ve düşük hızda darbe testi uygulamışlardır. Testler ASTM standartlarına uygun olarak yapılmış ve her bir standarda uygun olmak üzere farklı kalınlıklarda numuneler üretilmiştir. Çekme, eğme ve kayma testleri için üretilen numunelerin elyaf hacim oranları %51-46 iken, basma ve darbe testi için üretilen numunelerde elyaf hacim oranı %47-40 olarak bulunmuştur. Her bir test için beşer adet numune kullanılmıştır. Deneylerin sonucunda Young modulünde %35-42 oranında artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Çekme deneylerinde cam elyaf takviyeli kompozitler daha iyi sonuç verirken literatürde belirli bir farkın olmadığını belirtmişlerdir. Eğme ve darbe deneyleri için ise bazalt elyafın daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca elyafların farklı

hasar mekanizmaları gösterdiğini, cam elyafın basma ve bazalt elyafın çekme hasar moduna göre eğilme yükü altında hasara uğradığını belirtmişlerdir. Darbe deneyleri sonucu olarak ise bazalt elyaf takviyeli kompozit daha yüksek enerji soğururken cam elyaf takviyeli kompozit daha iyi en yüksek kuvvet değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Lopresto, Leone ve De Iorio, 2011).

Bazalt elyaf takviyeli kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirme amaçlı çalışmada epoksi matrise ağırlıkça %0,1 – 0,2 – 0,3 oranlarında grafen oksit nanotaneceğinin ilave edilmiştir. Grafen oksit nanotaneceğinin tabakalı kompozitin mekanik özelliklerine etkisini görmek amaçlı çekme, eğme ve darbe deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar nanotanecek ilavesiz kompozit numuneler ile karşılaştırılmıştır. En iyi sonuç ise ağırlıkça %0,1 oranında grafen oksit ilavesi ile alındığı belirtilmiştir. Deneyler sonucunda ise genel manada epoksi ile takviye elemanları arası olan ara yüzün daha iyi olması nedeniyle özelliklerin iyileştiği ve bazalt nanotaneceklerinin kırılma yapısı sonucu kompozit malzemenin daha kırılma davranış göstermiş olabileceğini belirtmişlerdir (Bulut, 2017).

Plastik kompozitlerin takviye elemanı olarak karbon, cam, aramid ve bazalt elyaflar çoğunlukla kullanılmaktadır. Ancak bunların yanı sıra, çevreyle uyumlu, geri dönüşümü olan doğal elyaflarda kullanılabilir. Bu bağlamda keten, kenevir, manila keneveri, hint keneveri ve sisal gibi birçok doğal türde elyaf kullanılmaktadır. Örnek olarak, manila keneviri çürümeye karşı dirençli, özgül eğilme mukavemeti de cam elyafın mukavemetiyle kıyaslanabilecek düzeyde olduğu belirtilmiş ve hali hazırda otomobiller de taş sıçraması ve rutubete gösterdiği direnç sebebiyle araçların dış bileşenlerinde kullanılmakta olduğu bilinmektedir (Elanchezhian ve diğerleri, 2018).

Cam elyaflar yüksek mukavemet, esneklik, rijitlik ve kimyasal hasara karşı dirençlidirler. Kırpılmış (chopped strand), belirli bir sayıda düz bir şekilde demet olarak (roving), halat gibi (yarn) bir yapıda veya örgü kumaş (woven fabric) hallerinde bulunabilirler (Sathishkumar, Satheeshkumar ve Naveen, 2014). Temel olarak elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları elyaf mukavemeti ve modülü, kimyasal kararlılığı, matris mukavemeti ve matris/elyaf arası arayüz bağının gerilimin taşınmasında yeterli olması gibi sebeplere bağlıdır (Erden, Sever, Seki ve Sarikanat, 2010). Uygun kombinasyonda cam elyaflı kompozit üretildiği vakit, cam elyaf takviyeli

kompozitin fonksiyonel karakteristikleri çeliğinkine eşdeğer, alüminyumdan daha rijit ve özgül ağırlığı çeliğinkinin dörtte biri kadar olabilmektedir.

Cam elyaflar üzerine yapılan çalışmalar için yapılan araştırmada (Sathishkumar ve diğerleri, 2014), üretim yöntemlerinin farklı uygulanmasının sonucunda farklı elyaf hacimleri elde edilmektedir. Yalnız el yatırma olarak üretim yapılması ile el yatırma sonrası basınç uygulanmış olarak üretim yapılması sonucu elyaf hacim oranı farklı olabilir. Mekanik özellikler açısından incelendiğinde ise çekme gerilmesi ve eğilme gerilmesi altındaki özelliklerde elyaf hacim oranının yüksek olduğu durumlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Darbe direnci açısından ise elyaf diziliş açılarının artmasıyla direncin düştüğü belirtilmiştir.

Polyester reçine, kırılmış ve örgü kumaş E-Cam elyafının kullanıldığı çalışmada, daha iyi bir elyaf matris etkileşimi sağlamak amacıyla polyester reçine matrisi farklı kimyasallar (Polialken-poli-maleik-anhidrid-ester/amid) ile modifiye edilmiştir. En iyi sonuçlar ise polialken-poli-maleik-anhidrid-ester-amid ile modifiye edilen kompozitlerde elde edilmiştir. Buna ek olarak ise kırılmış elyaf takviyeli kompozitlerde daha olumlu sonuçlar, çekme özelliklerinde %38,8 ve eğilme özelliklerinde ise %21,9 artış ile elde edilirken, örgü kumaşlı cam elyaf [0°/90°] takviyeli kompozitte bu değerler %18,0 ve %40,1 olarak gözlemlenmiştir. Hasarlı yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesi sonucu ise istenmeyen sonuçların elyafın polyester matrisden sıyrılması sonucu meydana geldiğini ve modifiye için kullanılan katışkının elyaf matris arası yapışmayı geliştirdiğini belirtmişlerdir (Varga, Miskolczi, Bartha ve Lipóczi, 2010).

Elyaf diziliş açısı ve elyaf hacim oranının çekme mukavemetine etkisinin incelendiği çalışmada, 0° düzeninde elyaf hacim oranı ve elyaf oryantasyonu fonksiyonu arttıkça çekme özellikleri artarken izotrop yapıdan anizotrop bir yapıya geçiş olduğu belirtilmiştir. 90° düzeninde ise elyafların genişliği yönünde çekme kuvveti uygulandığında çekme mukavemetinde düşüşler gözlemlenmiştir (Kim, Kim ve Lee, 2012).

Polyester ve vinil ester termoset reçinelerinin tabakalı kompozit numunelerin darbe davranışı üzerine yapılan çalışmada, E-cam elyafı takviye elemanı olarak

kullanılırken örgü ve çok eksenli kumaşlar şeklinde tabakalı kompozitler üretilmiştir. Penetrasyon enerjisinin genel olarak takviye elemanından etkilendiğini, öte yandan ise tekrarlanan darbe esnasında hasar gelişimi güçlü bir şekilde hem elyaf mimarisi hem de reçine tarafından etkilendiğini belirtmişlerdir. Darbe yorulması üzerine ise etki eden önemli bir parametre gözlemleyememişlerdir. Özellikle penetrasyon enerjisine bağlı olarak tekrarlanan darbe enerjisi normalleştirildiğinde bütün tabakalı kompozitlerin benzer davranış sergilediğini belirtmişlerdir (Schrauwen ve Peijs, 2002).

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda ise artık cam elyaf takviyeli kompozitlerin matris malzemesini modifiye etme amaçlı nanopartikül ilavelerinden destek alınmaktadır.

Epoksi matrisli cam elyaf takviyeli kompozitlere ikinci bir takviye elemanı olarak grafen oksit nanopartikülün ağırlıkça farklı oranlarla (%0,05 – 0,1 – 0,2) ilave edildiği çalışmada, grafen oksit ilavesinin kürlenme davranışını nasıl etkilediğini ve vakum infüzyon yöntemiyle üretime etkisinin neler olduğunu, buna ek olarak ise eğilme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak ise grafen oksit ilavesi ile reçine viskozitesinin arttığını ve jelleşme süresini azaltarak üretim işlemini kısalttığını, ancak erken jelleşmenin vakum infüzyon sırasında reçinenin tüm elyaflara ulaşmasında sorun olabileceğini belirtmişlerdir. Eğilme özellikleri açısından ise en iyi sonucu ağırlıkça %0,2 grafen oksit ilaveli cam elyaf takviyeli tabakalı kompozit numunelerde, saf epoksi/cam elyaf kompozitlere göre eğilme mukavemetinde %30 ve eğilme modülünde %21’lik bir artış gözlemlemişlerdir (Umer, Li, Dong, Haroosh ve Liao, 2015).

Cam elyaf takviyeli epoksi matrisli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme amaçlı yapılan çalışmada, epoksi matrise ağırlıkça farklı oranlarda (%1,0 – 2,0 – 3,0) TiO<sub>2</sub> ve ZnS ilave edilmiştir. Mekanik özellikler açısından incelemek için kompozit numunelere çekme, üç nokta eğme ve darbe deneylerini uygulamışlardır. Sonuç olarak ise ilave oranı arttıkça mekanik özelliklerden eğilme mukavemetinde artış gözlemlemişlerdir. TiO<sub>2</sub> ilavesinin cam elyaf/epoksi sistemine göre daha sert olması sonucu ve ZnS ilavesinin sünek olması sonucu eğilme mukavemetinin artmış olabileceğini vurgulamışlardır. Darbe direncinde ise ilave oranı arttıkça düşüşler olduğunu belirtmişlerdir (Deogonda ve Chalwa, 2013).

Mekanik özelliklerden çekme mukavemeti ve sertlik gibi değerlerin incelendiği çalışmada reçine olarak polyester, takviye elemanı olarak cam elyaf ve nanopartikül ilavesi olarak ise ZnO kullanılmıştır. Çalışmada hem farklı polimer/cam elyaf ağırlık oranlarında (%50/50 - %60/40 - %70/30) kompozitler üretilmiş hem de farklı ağırlık oranlarında (%1,0 - 2,0 - 4,0 - 6,0) ZnO nanopartikülü cam elyaf/polyester reçineye ilave edilmiştir. En iyi sonuçların cam elyaf ağırlık oranı %50/50 olan ve ZnO ilave oranı %2,0 olan nanokompozitlerde elde edildiğini belirtmişlerdir. Kullanılan ZnO nanopartikülleri matrisle daha uyumlu ve homojen karışım sağlamak amaçlı fonksiyonelleştirilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda her polimer/cam elyaf oranında %2,0 nanopartikül ilave oranlı olan kompozit numuneler en iyi sonucu verirken çekme mukavemeti açısından en iyi sonuç saf polyesterli kompozitte 120,2 MPa olan değer 165,45 MPa yükseldiği %50/50 polimer/cam elyaf oranı olan tabakalı kompozitlerde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yine sertlik açısından ise en iyi sonuçlar %1,0 ve %2,0 nanopartikül ilaveli ve polimer/cam elyaf oranı %50/50 olan numunelerden elde edildiğini belirtmişlerdir (Naga Raju, Ramji ve Prasad, 2015).

E-cam elyaf takviyeli ve demir (III) oksit (hematit) nanopartikül ilaveli tabakalı kompozitler termo-mekanik açıdan incelenmiştir. İyi bir dağılım sağlamak amacıyla hem nanopartikül hem de cam elyaf fonksiyonelleştirilmiştir. Elyaf hacim oranı %15 olarak sabitlenmiş olup hacimce %0,5 ile %1,0 demir oksit ilave edilerek tabakalı kompozitler üretilmiştir. Sonrasında ise termal davranışları incelemek amaçlı TGA ve DSC ile mekanik özelliklerden çekme, eğilme, darbe ve tabakalar arası kayma mukavemet ve sertlik açısından incelenmiştir. Sonuç olarak ise amin fonksiyonel grubu ile modifiye edilmiş cam elyaf ve nanopartiküller epoksi matris ile daha iyi bir bağlantı kurması nedeniyle mekanik özelliklere olumlu etkiler yapmıştır. Çalışmayı yapan araştırmacılar yüzeyi fonksiyonelleştirilmiş demir oksit nanopartiküllerinin epoksi ile etkileşiminin geliştirilmiş olması nedeni ile uygulanan yükü matrisle daha iyi paylaşmış ve bunun sonucu olan düşük gerilme yığılmaları çatlak ilerlemesininin yavaşlamasına neden olmuştur şeklinde bir sonuca varmışlardır. Yalnız tabakalar arası kayma mukavemetinde hem modifiyeli hem de modifiyesiz demir oksit nanopartikülleri düşüşe neden olmuştur ve bunun demir oksit nanopartikülü ile epoksi arasında olan yakınlığın silan kaplanmış cam elyaf ile epoksi arasındaki yakınlıktan daha az olması nedeniyle meydana geldiğini belirtmişlerdir (Prakash ve Rajadurai, 2016).

## 2.2. Partikül İlaveli Polimer Kompozitler

Kaynak araştırmasının ikinci kısmında matrise ilave edilen partiküllerin öncelikle genel manada etkisi ve nanopartiküllerin matrisi mukavemetlendirme mekanizmaları, sonrasında nanopartiküllerin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Nanopartiküllerden en çok demir oksit üzerinde durulmuştur.

### 2.2.1. Partikül İlavesinin Etkisi

Polimer matrisli partikül ilaveli kompozitlere partikül boyutunun, partikül/matris arayüz bağlantısının ve partikül yüklemenin rijitlik, mukavemet ve tokluk üzerine etkileri yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Rijitlik ve Young modülü gibi değerlerin mikro ya da nano boyuttaki partikül ilavesi ile partiküllerin matristen daha rijit olması sayesinde geliştirilebildiğini ancak mukavemetin matristen partiküle kuvvet transferine bağlı olduğunu ve matrisi iyileştirme partikül/matris arayüzünün kuvvetli bir bağlantı üzerine kurulması üzerine gerçekleşirken aksi durumda olumsuz etkilerin ortaya çıktığı ifade edilmiştir (Fu, Feng, Lauke ve Mai, 2008)

Partikül ilaveli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada, mekanik özelliklerin yoğunlukla partikül boyutu, partikül/matris arayüz bağlantısına ve partikül ilave oranına bağlı olduğu literatürde bulunan çalışmalara dayandırılarak belirtilmiştir. Rijitlik parçacık boyutuna kritik bir değere kadar ve parçacık ilave oranına ise ilave miktarı arttıkça rijitliğin artması yönünde bağlıyken, partikül/matris arayüz bağlantısının bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Mukavemet açısından ise, partikül boyutu düşerken mukavemetin arttığı, partikül/matris arayüzünün gerilmenin taşınmasını etkilediği için iyi bağlantının mukavemeti olumlu etkilediğini ve partikül ilave oranının ise bu üç etkenin arasındaki ilişkiye göre farklı çeşitlerde mukavemete etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Kırılma tokluğu açısından ise, mikron boyutundaki partikül ilavelerinde ilave oranı arttıkça artış görünürken nano boyutlarında belirli bir orandan sonra düşüşlerin gerçekleştiği belirtilmiştir. Yine kırılma tokluğu için partikül/matris arayüzünün etkisini incelediklerinde termoplastik matrisler için önemli etkilerin olduğunu ancak termosetlerde meydana gelen farklı hasar mekanizmaları nedeniyle bir öneminin olmadığını gözlemlemişlerdir. Partikül ilave miktarının kırılma tokluğu



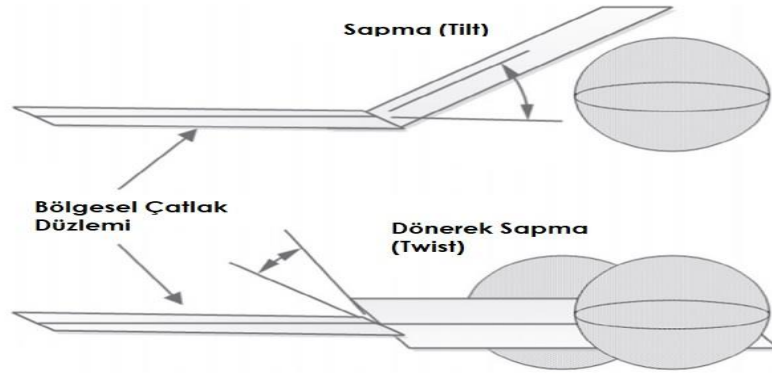
üzerine etkisi için ise termosetler için artış gözlemlerken daha sünek olan termoplastikler için düşüşler olduğu yorumunu yapmışlardır (Fu ve diğerleri, 2008).

Silika nanopartikülleri ile modifiye edilmiş epoksi matrisin termal ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada elde edilen sonuçlar teorik modeller ile karşılaştırılmıştır. Camsı geçiş sıcaklığının değişmediği ancak modul ve tokluğun arttığı belirtilmiştir. Bu bağlamda epoksi matriste meydana gelen toklaştırma mekanizmaları incelendiğinde, debonding ve plastik boşluk büyümesinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde geçen tokluk kazandırma mekanizmalarından, çatlak pimleme (crack pinning) ve çatlak eğilmesi (crack bowing) mekanizmalarının yapılan çalışmada ortaya çıkmadığını ve bunun sebebi olarak ise partiküllerin boyutunun çatlak ucundaki plastik bölgeden daha küçük olduğu şeklinde ifade etmişlerdir. Yine aynı şekilde çatlak saptırma (crack deflection) mekanizmasında da benzer bir durumun söz konusu olduğunu ve yapılan çalışmada tokluğu iyileştirme yönünde bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Plastik deformasyon (Plastik boşluk büyümesi) mekanizmasının (plastic void growth) ise öncesinde az enerji absorbe ettiği bilinen partikül ayrılması (debonding) meydana gelerek çatlak ucunda sınırları kısıtlayarak matrisin boşluk büyüme mekanizması ile plastik olarak deforme olmasına sebebiyet verdiğini ifade etmişlerdir. Sonrasında ise SEM görüntüleri ve test sonuçları ile teorik olarak yaptıkları hesaplamaları karşılaştırarak, partikül ayrılması ve plastik boşluk büyümesi mekanizmalarının iki durum için uyduğunu gözlemlemişlerdir (Johnsen, Kinloch, Mohammed, Taylor ve Sprenger, 2007).

### **2.2.2. Nanopartiküllerin Mukavemetlendirme Mekanizmaları**

Kırılgan olan termoset epoksi matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmede kullanılan nanopartiküllerin, literatürde çeşitli mekanizmaları meydana getirerek kompozitin mukavemetine etki ettiği düşünülmektedir. Bu mekanizmalar, çatlak saptırma (crack deflection), çatlak ucu pimleme ve çatlak eğme (crack pinning, crack bowing), partikül ayrılması ve plastik deformasyon (debonding and plastic void growth), partikül köprülemesi (particle bridging) ve mikro çatlama (micro-cracking) şeklindedir.

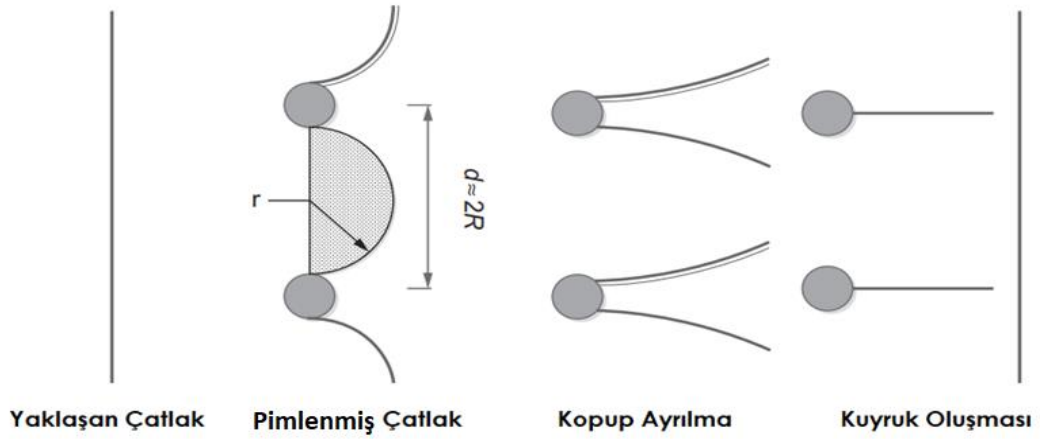
Çatlak saptırma teorisi, çatlağın bir engelle karşılaşması durumunda başlangıç düzleminden eğrilerek sapma (tilting) veya dönerek sapma (twisting) şeklinde bu düzlemden saparak ilerlemesi olarak ifade edilmektedir. Sapmanın şekline göre gerilme durumunun değiştiği belirtilmekte olup, eğer eğrilerek sapma olursa çatlak Mod-I durumundan Mod – I/II (çekme/düzlem içi kayma) karma moduna, eğer dönerek sapma olursa gerilme durumu Mod – I/III (çekme/düzlem dışı kayma) karma moduna dönüşmektedir. Karma mod şartlarında ilerleyen çatlak için daha yüksek kuvvetler gerekmektedir ve bunun sonucu olarak kırılma tokluğu artacaktır. Eğrilme ve dönerek sapma işlemi her partikülde tekrar ederek devam eder eğer çatlak üç boyutlu bir yol izliyorsa. Bunun sonucu olarak ise toplam kırılma yüzey alanı artar ve saf epoksi matrisine göre daha fazla enerji soğrulur. Kırılma toklukları ise yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması ile tahmin edilebilir. Ortalama pürüzlülük (Ra) üzerinden yüzeyler arası karşılaştırılma yapılabilir. Bunlara ek olarak ise kuvvetli partikül/matris arayüzüne sahip kompozitlerde çatlak partikülün kutuplarına yönelerek daha fazla enerji absorbe edilmesini sağlamaktadır (Goyat, Suresh, Bahl, Halder ve Ghosh, 2015a; Zhao, Schadler, Duncan, Hillborg ve Auletta, 2008a).



**Şekil 2.1.** Çatlak saptırma mekanizmasının şematik bir gösterimi (Faber ve Evans, 1983a, 1983b)

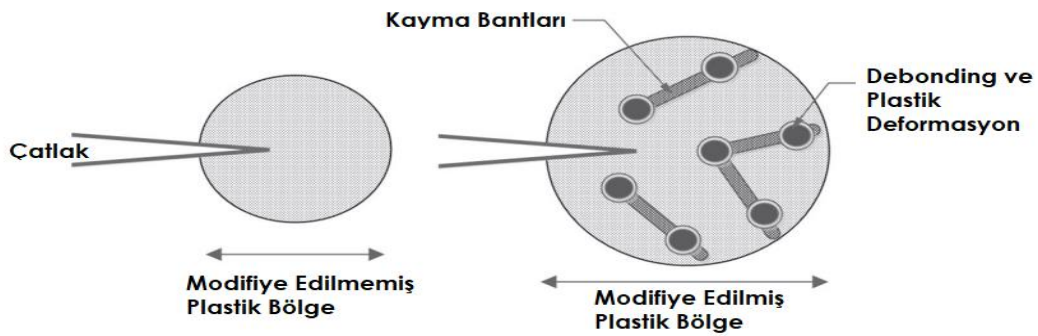
Çatlak ucu pimleme teorisine göre çatlak epoksi matrisinde ilerlediği sırada küresel rijit partiküller pimleme etkisi yapmaktadır. Çatlak ilerlediği sırada rijit partiküller arasında çatlağın ön kısmı eğrilir bu sırada çatlak ise karşılaştığı nanopartikülün konumunda pimlenmiş gibi kalmaktadır. Çatlak ilerlemesinin ilk safhalarında, çatlağın uzunluğu bu pimlenme konumları arasında şekil değişimiyle birlikte uzamış olur. İkincil

çatlakların yanında yeni kırılma yüzeyleri meydana gelebilir. İkincil çatlaklar partikül engelini atlattıktan sonra birleşir ve kuyruk şeklinde bir iz oluştururlar. Bu işlem sırasında ise soğrulan enerji artar ve tokluk artırılmış olur (Goyat ve diğerleri, 2015a; Zhao, Schadler, Duncan, Hillborg ve Auletta, 2008b)



Şekil 2.2. Çatlak pimleme mekanizmasının şematik bir gösterimi (Lange, 1970)

Partikül ayrılması (debonding) nanopartikül/matris arayüzünde oluşan kopma ile gerçekleşir ve sonuç olarak kırılma yüzeyinde yarı küre şeklinde boşlukları bırakır. Genellikle ayna ya da çentik bölgesinde gerçekleşir ve çatlak ilerlemesine karşı direnci artırması beklenir. Zayıf arayüzde meydana geldiği düşünülmekte olup çatlak hızının yavaş olduğu bölge olan ayna bölgesinde partikül ayrılması olarak meydana gelir (Goyat ve diğerleri, 2015a; Zhao ve diğerleri, 2008b).



Şekil 2.3. Debonding ve Plastik Deformasyon mekanizmalarının şematik bir gösterimi (Dittanet ve Pearson, 2013)

Rijit parçaların varlığı epoksi matrisin plastik deformasyona uğramasını sağlayabilir. Küresel partiküller epoksi matris içinde kauçuk parçacıklar kadar çekme gerilmesi yığılması oluşturabilirler. Ancak, kuvvetli arayüze sahip partiküller de bu yığılmalar kutuplarda iken zayıf arayüze sahip olanlarda partiküllerin ekvatorlarında olmaktadır. Partiküllerin etrafındaki gerilme yığılmaları epoksi matristeki partikül miktarının artmasıyla birlikte artan kayma plastik deformasyonuna neden olurlar (Goyat ve diğerleri, 2015a)

Köprüleme mekanizmasına göre rijit nanopartikül içeren epoksi matriste çatlak ilerlerken nanopartikül çatlak yolunu kaplar ve yüzey gerilimine neden olur ve bu durumda çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörünü azaltarak tokluğun artmasını sağlamaktadır. Köprüleme mekanizması sadece kuvvetli bir nanopartikül/matris arayüzüne sahip kompozitlerde olmaktadır, çünkü kuvvetli arayüz ilerleyen çatlağı köprüleyip etrafındaki bölgeye yönelmesini engelleyebilir (Goyat ve diğerleri, 2015a).

Nanopartiküllerin epoksi matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmesinde etkili olan mekanizmaları incelemek amaçlı yapılan çalışmada, ortalama 13 nm çapında ve özgül yüzey alanı 100 m<sup>2</sup>/g olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü ile çapı 200 nm – 500 nm arası değişen ve özgül yüzey alanı 5 m<sup>2</sup>/g olan TiO<sub>2</sub> nanopartikülleri kullanılmıştır. Homojen bir karışım sağlamak amaçlı ise nanopartiküller epoksi matris ile bilyalı öğütücü ile karıştırılmıştır. Mekanik özellikleri ölçme amaçlı statik ve dinamik yöntemler kullanmışlardır. Eğilme gerilmesindeki davranışı ölçmek için üç-mokta eğme testi, Young modülü dinamik bir yöntem olan DMA ile ölçülürken, yine DMA ile camı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) ölçülmüştür. Statik kırılma tokluğu ise kompakt çekme (compact tension) testleri ile çentikli numune üzerinden ölçmüşlerdir. Ayrıca kırılma yüzeylerini inceleme amaçlı SEM ve AFM analizleri ile mikro yapı ile nanopartikül dağılımını incelemek için TEM analizi yapmışlardır. İki nanopartikül türünün de eğilme rijitliğini, mukavemetini ve tokluğunu artırdığını ve özellikle tokluk artışının K<sub>IC</sub>, G<sub>IC</sub> ve kritik çatlak ucu yer değiştirmesi (CTOD – Crack Tip Opening Displacement) değerleri ile doğrulanabildiğini ifade etmişlerdir. Çatlak ucu düzleştirme mekanizmasının CTOD ile açıklanabildiğini, kırılma yüzeylerindeki ortalama pürüzlülüğün kritik enerji salınım değeri G<sub>IC</sub> ile uyumlu olması nedeni ile de çatlak saptırma (crack deflection) mekanizmasının tokluğun artışında etkisi olabileceğini vurgulamışlardır. Çatlak pimleme (crack pinning) mekanizmasını SEM görüntülerinde her iki türden

nanopartikül içeren numunelerde de görüldüğünü ve arayüz ayrılması (debonding) mekanizmasının alumina kullanılan numunelerde partiküllerin çapının küçük olmasından dolayı mümkün olmayacağını gözlemlemişlerdir (Wetzel, Rosso, Hauptert ve Friedrich, 2006).

Kurahattia ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada 100nm boyutlarında, ağırlıkça %0,5-1-5-10 oranlarını kullanarak nano  $Al_2O_3$  takviyeli epoksi matrisli kompozitler üretmiş ve mekanik ile sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Eğilme ve darbe mukavemetlerinde %0,5 nano alumina ilaveli kompozitlerde, eğilmede 36,9MPa'dan 94,7MPa değerine, darbe mukavemetinde ise 18,68MPa'dan 31,87MPa değeriyle en iyi artışları elde etmişlerdir (Kurahatti ve diğerleri, 2014).

Omrani ve ark. (2009) yüzey alanı 35-43  $m^2/g$  ve ortalama boyutu 50nm olan nano alumina partiküllerinden epoksi reçine matris sistemine %0,5; %2,0 ve %5 oranlarında ilave ederek çekme ve eğilme özelliklerine bakmışlardır. Eğilme modulünde saf epoksi 2120 MPa iken %2 ilaveli epoksinin ki 3526 MPa değerine yükselmiştir. Ancak %5'lik oranda düşüş görülmüştür (Omrani ve diğerleri, 2009).

Zhao ve ark. (2008) nano alumina partikülü ile yaptıkları çalışmada epoksi matrisli kompozitler üretip farklı oranlarda (ağırlıkça yüz gram epoksidede 5-10-15-20 gr), 45nm boyutunda, silan kaplanmış nanopartiküller ve işlem görmemiş nanopartiküllerin saf epoksi polimer matrise göre mekanik özelliklere etkisini ve hangi mekanizmalar ile bu etkileri sağladığını incelemişlerdir. Çekme özelliklerinden kırılmaya kadar birim şekil değiştirmede, %10 silan kaplı nanopartikül ilaveli kompozitte %39 ve %15 silan kaplı nanopartikül ilaveli kompozitte %31 artış elde etmişlerdir (Zhao ve diğerleri, 2008a).

Hsieh ve ark. (2011) Yaptıkları çalışmada 140  $\mu m$  uzunluğunda ve 120 nm çapında olan MWCNT (çok cidarlı karbon nano tüp) nano partiküller kullanarak epoksi matrisi modifiye etmiş ve mekanik özelliklerden kırılma tokluğu ve yorulma performansı açılarından inceleme yapmışlardır. %0,5 oranında takviyelendirme yaptıkları epoksi matrisin kırılma enerjisi 133  $J/m^2$ 'den 223  $J/m^2$ 'ye yükseldiğini gözlemlemişlerdir (Hsieh, Kinloch, Taylor ve Kinloch, 2011).

Kanagaraj ve ark. (2007), hacimce %0,11- %0,22- %0,33- %0,44 olarak karbon nano tüp ilave edilmiş, yüksek yoğunluklu polietilen matrise sahip olan kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En iyi sonuçları ise %0,44 ilaveli kompozitlerde gözlemlemişlerdir. Young modulünde %22, birim şekil değiştirmede %23,2 ve tokluk değerinde %32,7 artış tespit etmişlerdir (Kanagaraj, Varanda, Zhil'tsova, Oliveira ve Simões, 2007)

Conradi ve ark. (2013) küresel, 30 nm ve 130 nm çaplarındaki nano silika partikülleri ile epoksi matrise hacimce %0,5 ilave ederek kompozitler üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üç noktadan eğme testi sonucu elde ettikleri değerlerde elastislik modülünde %10-20 aralığında ve kırılma tokluğunda %25-30 civarında artış tespit etmişlerdir. Darbe enerjisinde ise sonuçların nanopartikül boyutuna olarak değiştiğini ve 30 nm çaplı nanopartikülde artışın %60 ve 130 nm çapındaki nano silika partikül ilavesinde artışın %30 olduğunu ifade etmişlerdir (Conradi, Zorko, Kocijan ve Verpoest, 2013)

Zhang ve ark. (2006) sikloalifatik epoksi reçine matrisi modifiye edilmiş ve modifiyesiz SiO<sub>2</sub> (silika) nanopartikülleri ile farklı oranlarda takviyelendirmişlerdir. Saf epoksi kompozite göre karşılaştırma yaptıklarında en iyi sonucu ağırlıkça %3 modifiye edilmiş nano silika ilaveli kompozitte çatlama enerjisinin iki katına çıktığını gözlemlemişlerdir (Zhang, Xu, Xia, Zhang ve Yu, 2006)

Zheng ve ark. (2005) epoksi matrisli nano silika ilaveli ve epoksi matrisli cam elyaf takviyeli nano silika ilaveli kompozitler üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kullandıkları nano silika partiküller ortalama 15nm çapında olup matris içinde dağılımının iyi sağlanması için modifiye edilmişlerdir. İlk olarak nanopartiküllerin epoksi matrise etkilerini incelemişler ve ağırlıkça farklı oranlarda hazırladıkları kompozitlerde (%1-%2-%3-%4-%5), en iyi artışı %3 nanopartikül ilavesi ile çekme mukavemeti, çekme modülü ve darbe mukavemetinde sırasıyla %115, %13 ve %60 olarak elde etmişlerdir. Tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise eğilme mukavemetinde %69,4 artış, çekme modülü ve mukavemetinde sırasıyla %21 ile %23 artış gözlemlemişlerdir (Zheng, Ning ve Zheng, 2005).

Balguri K. ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada çiçek (nanoflower) benzeri şekilde ürettikleri  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülünü ağırlıkça epoksi matrise %0,1 ilave ederek çentiksiz darbe, çentikli darbe, eğilme ve çekme özelliklerinde saf epoksiye göre sırasıyla %109, %59, %13 ve %15 artış gösterdiğini belirtmişlerdir (PK Balguri, DGH Samuel, 2017)

Kumar G. ve ark. (2017) epoksi ve polyester reçineleri karıştırmışlar ve bu karışıma ağırlıkça %1, %2, %3, %4, %5, %7 oranlarında çapı 10-15 nm olan ve spesifik yüzey alanı 45 m<sup>2</sup>/g olan nano demiroksit partikülleri ilave etmişlerdir. Ürettikleri kompozitleri çekme ve 3 noktadan eğme testi uygulamışlardır. Sonuç olarak ise ilave oranlarından %4'e kadar mekanik özelliklerde iyileşme sağlarken sonrasında bu noktadan sonra düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, nanopartikül ilave oranlarından %4 ile çekme mukavemetinde %23 artış olduğunu belirtmişlerdir (Kumar, 2017)

Sun T. ve ark. (2015) fonksiyonelleştirdikleri kübik  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve 40 nm çapında olan nanopartiküller ile epoksi matrisi takviyelendirmişlerdir. Mekanik özellikler açısından yaptıkları incelemelerde, %4 nanopartikül ilave oranı ile en iyi sonuçlara ulaşarak, çekme mukavemetinde %50,2 ve kırılma tokluğunda %106 artış tespit etmişlerdir (T. Sun, Fan, Wang, Liu ve Wu, 2015).

Pour Z. ve Ghaemy M. (2014) yaptıkları çalışmada  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülünü sade olarak ve silan kaplanmış olarak epoksi matrise ağırlıkça farklı oranlarda (%2, %5, %8 ve %11) ilave ederek termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İki nanopartikül tipi de mekanik özellikler açısından artış sağlarken en iyi artışlar silan kaplı nanopartiküllerde sağlandığını gözlemlemişlerdir. Buna sebep olarak ise işlem görmüş nanopartiküllerin epoksi matris içinde topaklanma olmadan dağılmasının sağlanması ve epoksi matrisle daha iyi uyum sağlamalarına bağlamışlardır. Çekme, eğilme ve darbe testleri sonucunda; saf epoksinin çekme mukavemeti 49 MPa, çekme modülü 183 MPa, eğilme mukavemeti 88 MPa, eğilme modülü 2153 MPa ve darbe mukavemeti 18.7 kJ/m<sup>2</sup> iken silan ile fonksiyonelleştirilmiş demir oksit nanopartiküllerininin ağırlıkça %8 ilavesi sonucu eğilme mukavemeti 97 MPa, darbe mukavemeti 27.5 kJ/m<sup>2</sup> ve ağırlıkça %11 ilavede çekme mukavemeti 67 MPa, çekme modülü 825 MPa ve eğilme modülü 5081 MPa değerleri ile en iyi sonuçlar elde

edilmiştir. Yani çekme mukavemeti %36.7, çekme modülü %350.8, eğilme mukavemeti %10.2, eğilme modülü %136 ve darbe mukavemeti %47, 06 artış göstermiştir (Pour ve Ghaemy, 2014)

Zabihi ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada epoksi matris içinde çapları 50 nm'den küçük olan demir oksit partiküllerini ağırlıkça farklı oranlarda (%1, %5, %10, %15) kullanarak nanokompozitler üretmişler ve mekanik özellikleri ve kür davranışını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Mekanik özelliklerden çekme mukavemeti 45MPa olan saf epoksida %1, %5, %10 ve %15 oranlarındaki ilavelerin sonucunda sırasıyla 48 MPa, 52 MPa, 66 MPa ve 44 MPa değerlerine ulaşmışlardır. Ayrıca çekme modülün 2,7 Gpa olan saf epoksiye göre en iyi sonucu %10 ilave oranında çekme modülünün 3 GPa artmasıyla elde etmişlerdir (Zabihi, Khodabandeh ve Ghasemlou, 2012).

Guo Z. ve ark. (2008) nanopartikül ilavesi olarak demir oksiti kullandıkları çalışmalarında matriks olarak ise vinil ester reçine kullanmışlardır. Kullandıkları reçinenin viskozitesi 1.045 g/cm<sup>3</sup> ve viskozitesi 350 cP iken kullanılan nanopartikülün çapı 23 nm ve spesifik yüzey alanı 45 m<sup>2</sup>/g şeklindedir. İlave oranları ise ağırlıkça %10 ve %25 olarak saf ve fonksiyonelleştirilmiş nano demiroksit partikülleri ilave etmişlerdir. Fonksiyonelleştirilmiş partiküllerin young modülü üzerinde saf reçineye göre biraz iyileştirme sağladığını belirtmişlerdir (Z. Guo ve diğerleri, 2008).



### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Yapısal malzemeler metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler olmak üzere dört ana başlığa ayrılabilirler. Kompozitler tek bir yapı içinde iki veya daha fazla malzemenin bir arada bulunduğu bir malzeme türüdür ve genel olarak diğer üç malzemenin kombinasyonları şeklindedir. Kompozitler genelde içeriğindeki malzemenin tek başına istenilen özellikleri vermede başarısız olduğu durumlarda kullanılmıştır. İnsanlığın kompozitle tanışma zamanı bilinmemekle birlikte doğa bize birçok elyafli kompozit örneği sunmaktadır. Ahşap malzemeler linyin matris içinde elyafli selülozdan oluşmakta iken çoğu memeli canlının kemikleri protein-kalsiyum fosfat matrisi içinde sıralanmış düzenli kollajen liflerinden oluşmaktadır. İlk insan yapımı kompozitler ise saman içeren tuğlalar veya çömlerde kullanılan bitki lifleridir. Buralardaki liflerin kullanılması amacı yapısal takviyeden ziyade kilin kururken çatlamasını engellemektir. Daha sonraları insanlar çelik takviyeli beton, cam ve karbon elyaf gibi elyaflarla takviyelendirilmiş polimer kompozitler gibi birçok başka yapısal kompozit geliştirmişlerdir (Gibson, 2016).

Kompozit malzemeler matris sistemine göre üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitlerdir.

Metal matrisli kompozitler rijit takviye elemanlarının sünek metal veya alaşım matrisi içine ilave edilmesiyle oluşturulan bir tür kompozit malzemedir. Takviye elemanları parçacık, kırılmış elyaf ya da sürekli elyaf olabilmektedir. Metal matrisli kompozitler metallerin mukavemet ve rijitlik özelliklerini seramik malzemelere özgü karakterlerden yüksek sertlik ve modül ile birleştirerek kayma ve basma mukavemeti daha yüksek, yüksek ısılarda çalışma kabiliyetine sahip kompozitler ortaya koymaktadır. Fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay, otomotiv endüstrilerinin yanı sıra diğer yapı uygulamalarında da kullanımı son 30 yılda giderek artmıştır (Balasubramanian, 2013)

Seramik malzemeler genellikle yüksek sertlik ve modül, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruma ve düşük yoğunluk gibi çok çekici özelliklere sahiptirler. Bütün bunlara rağmen düşük toklukları nedeniyle mühendislik uygulamaları için metalik

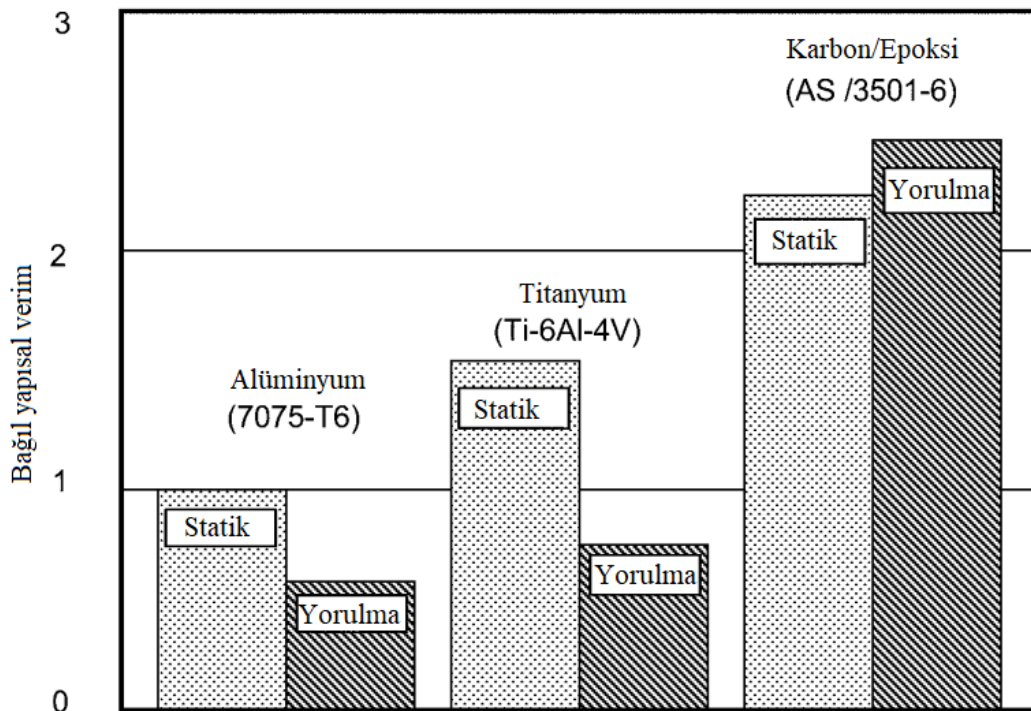
malzemeler kadar yaygın değildirler. Bu tip kırılğan malzemeler ciddi hasarlara uğramaya yatkındırlar. Seramikler termal şoklara ileri derecede duyarlıdırlar ki bu nedenle yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedirler. Polimer ve metal matrisli kompozitlerin aksine, seramik matrisli kompozitlerde asıl amaç tokluğun artırılmasıdır. Sonuç olarak seramiklerin çekici özellikleri korunurken mekanik açıdan güvenilirlikleri de geliştirilmelidir (Balasubramanian, 2013).

### 3.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler) yapısal mühendislik malzemeleri arasında en önemlilerin arasına girmiştir. Bu durum sadece yüksek performanslı karbon, aramid gibi elyafların geliştirilmesinden değil aynı zamanda geliştirilmiş yeni polimer matrislerin sayesinde. Polimerlerin mekanik özellikleri genelde mühendislik uygulamaları için yetersizdir. Özellikle mukavemet ve rijitlikleri metaller ve seramiklerinkinden daha düşüktür. Bu nedenle, polimer malzemelerin mekanik özellikleri takviye elemanları ile iyileştirilmesi hususunda geniş bir alan vardır. Sonuç olarak ortaya geliştirilmiş özellikleriyle birlikte kolay üretilebilen polimer matrisli kompozitler çıkmıştır. PMK'ler, metaller ve seramik matrisli kompozitlere göre daha yaygın olarak bulunmaktadır. Polimer matrisli kompozitleri üretmek için yüksek sıcaklıklar ve basınç gerekmediğinden, karmaşık şekildeki parçaların üretimi de kolay olmaktadır. Üretim sırasında takviye elemanın bozulması ile alakalı sorunlar, polimer kompozitler düşük sıcaklıklarda üretildiği için sorun teşkil etmezler. Buna ek olarak, bu tür kompozitlerin üretimi için gerekli ekipmanlar daha basittir. Sonuç olarak, PMK'lerin üretimi ve geliştirilmesi hızlı şekilde gerçekleşmiş ve çoğu yapısal uygulamalar için tercih haline gelmişlerdir (Balasubramanian, 2013)

Polimer matrisli kompozitlerin hafiflik, en uygun mukavemet ve rijitlik için elyaf kombinasyonlarının yapılabilmesi, geliştirilmiş yorulma ömrü, yüksek korozyon direnci, daha az parça ve bağlantı elemanı kullanılması sonucu düşük montaj maliyeti gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Yüksek mukavemetli elyafların (özellikler karbon) özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve özgül modül (modül/yoğunluk) değerleri uzay ve havacılıkta kullanılan eşdeğer metalik alaşımlara göre oldukça yüksektir. Bu durum iyi derecede ağırlık kazanımı ki bunun sonucu olarak performansta gelişim, daha yüksek taşıma kapasitesi, daha uzun menzil ve yakıt tasarrufu olarak geri dönüşüm

sağlanabilmektedir. Korozyon direnci ise hava araçlarında önemlidir, bu açıdan da kompozitler tasarruf sağlayabilmektedir. Örneğin karbon elyafların doğrudan metal yüzeye temas ettiği bir durumda, alüminyum da galvanik korozyon meydana gelmektedir, ancak ara yüzeye eklenen elektrik yalıtım katmanı cam elyaflar bu sorunu ortadan kaldırmaktadır. Öte yandan kompozit malzemelerin yorulma ömrü eşdeğer metal malzemelere göre daha iyidir. Şekil 3.1.'de karbon/epoksi malzemenin yüksek mukavemetli metallere verimlilikleri açısından karşılaştırılması verilmiştir (Campbell, 2010)



Şekil 3.1. Uzay havacılık malzemelerinin karşılaştırılması (Campbell, 2010)

Bu avantajların yanı sıra, polimer kompozitler tek seferde üretilebildiğinden veya detay parçaları ikincil bir yapıştırma bağlantısı ile yapılabildiğinden, daha az işçilik ve daha az bağlantı elemanı gerektirdiğinden, montaj miktarını da düşürmektedir (Campbell, 2010).

Polimer matrisli kompozitlerin dezavantajları ise, yüksek ham madde maliyeti, sıklıkla yüksek üretim ve montaj maliyeti, sıcaklık ve nem olumsuz etkileri, matrisin ana yükleri taşıdığı yerlerde düzlem dışı yüklenme durumunda zayıf mukavemet (bu nedenle yüklenme yolunun karmaşık olduğu durumlarda kullanılmamalıdır), darbe

hasarına, delaminasyon veya tabaka ayrılmalarına duyarlılık ve metallere göre tamirlerinin çok daha zor olması sıralanabilir. Bir polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ), camın rijit, camsı katı bir yapıdan daha yumuşak bir yapıya dönüştüğü sıcaklıktır. Bu noktada, polimer yapı hala bozulmamıştır ama çapraz bağlar artık kilitli pozisyonda değildir. Bu nedenle, camsı geçiş sıcaklığı bir kompozit veya yapıştırıcı için en üst çalışma sıcaklığı olarak tanımlanabilir ve bu sıcaklığın üstünde malzeme ciddi anlamda düşük mekanik özellikler gösterecektir. Termoset polimerler camsı geçiş sıcaklığını aşırı derecede düşüren nemi daha çok absorbe ettikleri için gerçek kullanım sıcaklıkları ıslak ya da doymuş  $T_g$  değerinden 30 °C daha düşük olmalıdır. Yapıya giren nem matris tabanlı mekanik özellikleri düşürmektedir ve matrisin kabarmasına neden olmaktadır. Bu kabarmalar yüksek sıcaklıktaki küremelerde yapıda kitli olan termal gerilmeleri ortaya çıkarır. Bu gerilmeler büyük olabilir ve köşelerinden sabitlenmiş büyük paneller kabarma sonucu ortaya çıkan gerilmeler ile bükülebilir. Soğuk tavlama çevrimi sırasında bu nem kabarmaları matrisi çatlatılabilir ve ani ısı yükselmelerinde buharla dönüşebilir. İç buhar basıncı kompozitin yatay çekme (kalınlık boyunca) mukavemetini aştığı anda tabaka delaminasyon olacaktır (Campbell, 2010)

Polimer matrisli kompozitlerin otomotiv, havacılık ve uzay, inşaat endüstrilerinden spor aletlerine kadar birçok alanda kullanımı mevcuttur. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin kullanım alanı oldukça geniştir. Kimya endüstrisinde tanklar, reaksiyon kapları (basıncılı – basınçsız), atık madde ve proses boruları çoğunlukla cam elya takviyeli polyster reçine kompozitlerden yapılmaktadır. Cam elyaflı kompozitlerden oluşan yürüyüş yolları ve birçok deniz üzerindeki yapılar pultruzyon tekniği ile üretilmektedir. Cam ve aramid elyaf takviyeli PMK'ler, sivil havacılık uçaklarının zeminlerinde ve depolarında kullanılmaktadır. Ayrıca, uçağın kapılarında, kaplamalarında ve burun kısmında polimer matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Helikopterlerin ve küçük uçakların bazı önemli parçaları ise aramid elyaf takviyeli kompozitlerden yapılmaktadır. Aramid elyaflar birçok uygulamada cam elyafların yerini alabilir ancak maliyeti daha yüksektir. Yarış botları ve özel botlar gibi performansın maliyetten daha önemli olduğu yerlerde cam yerine aramid elyaf kullanılabilir. Bagetler (davul sopası) pultruzyon ile üretilmiş aramid dolgu (core) içeren enjeksiyondöküm ile termoplastik kaplı olarak üretilmektedir. Bu bagetler ahşap olanlara göre daha az yamulan, daha hafif, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlüdür. Askeri alanda polimer matrisli kompozitlerin kullanımı miğferlerden roket kılıflarına kadar

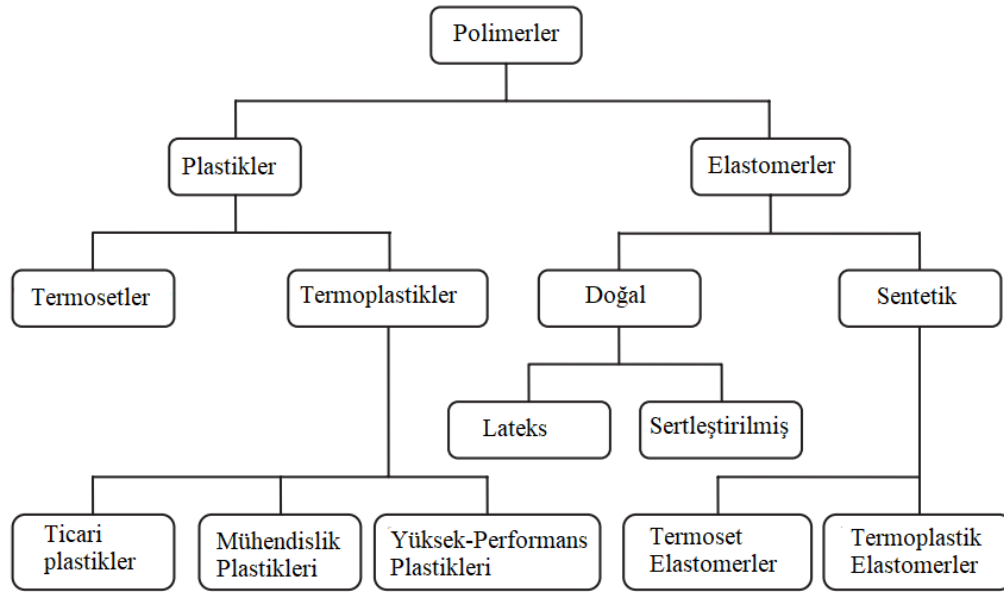
yayılmaktadır. Basma, kayma ya da enine çekme yüklemeleri içeren bileşenlerde aramid elyafların kullanılmasına dikkat edilmelidir, bu tür bileşenlerde aramidin yanında başka bir elyafında kullanılması önerilmektedir. Polimer kompozitler yaygınlıkla askeri ve ticari helikopterlerde ağırlığın azaltılması amaçlı kullanılmaktadırlar (Balasubramanian, 2013).

### 3.1.1. Matris Malzemeleri

Elyafların bir arada düzenli şekilde tutulması, çevresel etkilerden korunması matrisin görevlerindedir. Ayrıca matris gelen yükü elyaflara iletir ve bası yüklemesinde elyafların mikro düzeyde kıvrılması sonucu oluşan gelişmemiş hasarların engellenmesi içinde önemlidir. Matris kompozit malzemeye tokluk, hasar toleransı, darbe ve aşınma direnci de sağlar. Matrisin özellikleri kompozitin en yüksek kullanılabilceği sıcaklığı, neme ve akışkanlara olan direnci ve termal ve oksidatif kararlılığı belirler (Campbell, 2010)

Polimer güçlü kovalent bağlarıyla bir araya getirilmiş bir ya da daha fazla atom birimlerinin tekrarını içeren uzun molekül zincirleri olarak tanımlanmaktadır. Bir polimer malzeme çok sayıda benzer kimyasal yapının, eşit uzunlukta olmasının gerekmediği polimer moleküllerinin toplanmasıdır (Balasubramanian, 2013)

Organik polimerler geniş olarak plastiklere ve elastomerler olarak sınıflandırılabilirler. Plastik malzemeler genelde hasardan önce yüksek miktarda plastik deformasyona uğrarken, elastomerler çok miktarda elastik deformasyona uğrarlar. Polimerlerin sınıflandırılması Şekil 3.2.'de verilmiştir (Balasubramanian, 2013)



**Şekil 3.2.** Polimerlerin sınıflandırılması (Balasubramanian, 2013).

İleri düzey kompozitler için polimer matrisler termosetler ve termoplastikler olarak sınıflandırılmışlardır. Termosetler düşük molekül ağırlıklı, kürleşme esnasında üç boyutlu çapraz bağlara dönüşen, erimeyen ve çözülmeyen düşük viskozite monomerlerdir (yaklaşık 2000 cp). Çapraz bağlar ısı yayan veya ısı gerektiren kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Kürleşme işlemi ilerledikçe reaksiyon hız kazanır ve moleküllerin düzene girebileceği hacim azalır ve bunun sonucu olarak moleküllerin hareketinde azalma olur viskozite ise artar. Sonrasında reçine jeli katılaştır ve tekrar eritilemez. Sonrasında yapılacak bir ısıl işlem ile daha fazla çapraz bağ oluşturulup reçine tam anlamıyla kürlenir. Termoplastiklerde ise bu kimyasal reaksiyonlar gerekmez ve çapraz bağlar oluşmaz. Bu nedenle termosetlerin üretim süresi daha uzundur. Termoplastikler yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir ve eritilip, birleştirilip tekrar soğutulabilirler. Ancak yapıları gereği yüksek olan viskoziteleri ve yüksek erime noktaları nedeniyle işlem görebilmeleri için yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmektedir (Campbell, 2010).

Termoset polimerlerde polimer molekülleri güçlü kovalent bağları ile çapraz-bağları oluşturduğundan moleküler hareketler çok zordur ve bu nedenle termosetleri plastik deformasyona uğratmak zordur. Çapraz bağ yoğunluğunun (birim uzunluktaki çapraz bağ sayısı) az olduğu malzemelerde plastik deformasyon mümkün

olabilmektedir. Düşük çapraz bağ yoğunluğu bazı segmentlerin (bölümlerin) yüksek sıcaklıkta yük altında hareketine izin vermektedir. Zincirlerin düzenli olarak sıralanması termoset polimerlerde mümkün değildir bu nedenle bu malzemeler doğada amorf halde bulunurlar. Termoplastik malzemelerde, polimer molekülleri zayıf van der Waals bağları ve hidrojen bağları ile bir arada tutulmaktadır. Bir polimer molekülünde her bir gevşekçe bağlanmış segmanlar rastgele uyarılmış olabilirler. Frekans, genlik ve segmansal hareketlerin sayısı yükselen sıcaklıkla artar. Bu nedenle polimerlerin özellikleri ortam sıcaklığına oldukça bağlıdır. Sıcaklık artırıldığında, segmansal hareketlerin genliği artar ve polimer molekülleri bir arada tutan bağlar daha da zayıflar. Camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) olarak bilinen sıcaklıkta camsı bir malzeme esnek deriye benzer bir malzemeye dönüşür. Bu noktada deformasyon etmek için oldukça ufak bir kuvvet yeterli olacaktır. Sıcaklık geri düşürüldüğünde ise moleküller yeni yerlerinde donacaktır. Bu nedenle teorik olarak termoplastikler istendiği kadar şekil verdirilebilir. Bazı depolimerizasyonlar ve bozunmalar gerçekleşebileceği için her çevrim sonrası kalite düşebilir (Balasubramanian, 2013).

Bir termoplastik polimer malzemedeki, polimer molekülleri boşlukta rastgele olarak veya rastgele ile düzenlinin karışımı bir şekilde donmuş haldedir. Moleküller rastgele sıralandıysa amorf polimer olarak adlandırılır, eğer rastgele ve düzenli dizilim oluşturmuş moleküllerin karışımı şekilnelerse yarı kristalli polimer olarak adlandırılır. Amorf termoplastik malzemeler birbirine dolanmış olarak rastgele dizilmiş moleküller içerir. Zincirdeki kimyasal gruplar güçlü kovalent bağlar ile bir arada tutulurken moleküller zincirler arasında ikincil daha zayıf bağlar bulunmaktadır. İşlenme sıcaklığında bu ikincil bağlar kırılır ve zincirlerin birbirleri üzerinden kayıp geçmesine izin verir. Amorf termoplastikler iyi yüzde uzama, tokluk ve darbe direnci gösterirler. Moleküller ağırlığın artmasıyla birlikte erime sıcaklığı, erime viskozitesi ve mekanik özelliklerde artış görülür. Yarı kristal termoplastikler sıkıca katlanmış zincirler (kristalitler) ve amorf bölgeler içerir. Amorf termoplastikler ısıtıldıklarında kademe kademe yumuşarken, semikristalin olanlar ani bir yumuşama gösterir. Genel olarak, polimerin camsı geçiş sıcaklığı ve erime noktası zincirin uzunluğundaki, zincirler arası çekim kuvvetlerindeki, moleküller rijitlikteki ve kristallilikteki artış ile artmaktadır. Termoset polimer içinse camsı geçiş sıcaklığı çapraz bağ yoğunluğu artışı ile artar (Balasubramanian, 2013)

Yüzde yüz oranda kristalli yapıda olan polimer üretmek mümkün değildir ve en yüksek elde edilebilecek kristallilik %98 civarındadır. Kristalli olmak yoğunluğu ve çözücüye karşı direncini artırır. Ayrıca, mukavemeti, rijitliği, sürünme direncini ve yüksek sıcaklık direncini de artırabilir ancak genellikle tokluğu düşürmektedir. Yarı kristal malzemeler opak veya yarı saydam iken amorf polimerler daima şeffaftır. Kompozit matrisi olarak termoplastikler %20-%35 civarında kristalliğe sahiplerdir. Bütün termoset reçineler ise amorfur ve bu tür polimerlerde çapraz bağlar mukavemete, rijitliğe ve termal kararlılığa katkı sağlamaktadır. Termoplastiklerde, kristalitler erime sonucundaki çekirdeklenme ve büyüme işlemi sonucu oluşmaktadır. Kristallilik soğuma oranına bağlıdır. Amorf bir yapı öncelikli olarak yüksek soğutma oranlarında meydana gelmektedir. Yavaş soğutma oranları kristalitlerin çekirdeklenip büyümesi için gerekli olan zamanı sağlar. Eğer amorf yapı hızlı bir soğutma oranıyla oluşturulursa, ihtiyaç olunan kristallilik uygun bir tavlama işlemi sonucu elde edilebilir. Kristalizasyon oranı tavlama sıcaklığına bağlıdır ve en üst sıcaklık oranı camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı arasında bulunmaktadır (Balasubramanian, 2013).

Termosetlerin ve termoplastiklerin birbirine göre bazı üstünlükleri vardır. Termosetler yüksek çapraz bağ yoğunluğu içerdikleri için daha kırılğandır ve toklukları daha düşüktür. Ancak bazı geliştirmeler sonucu günümüzde termoplastiklere yakın tokluk gösterebilmektedirler. Termoplastikler yüksek molekül ağırlıklı olduklarından imal esnasında viskozitesi termosetlere göre çok yüksektir ve ayrıca termoplastikler üretilirken yüksek sıcaklık ve basınç gerektirebilirken termosetler oda sıcaklığında dahi üretilebilirler ve fazla enerji gerektirmezler. Ancak termoplastiklerin üretimi termosetlere göre daha hızlıdır. Termoplastikler yapısında çapraz bağlar bulundurmadığı için geri dönüşüme uğrayabilir, eritilip tekrar işlem görebilirler fakat malzeme kalitesi her işlem sonrası düşebilir ve kimyasal reaksiyon sonucu oluşmadıkları için sağlık açısından zararlı bir durum teşkil etmezler. Öte yandan termosetler elyaf takviyeli kompozitlerde daha çok tercih edilir çünkü termoplastiklere göre elyafları ıslatabilme kabiliyetleri daha iyidir. Termosetler daha yüksek mukavemet, daha yüksek modül, daha iyi termal ve kimyasal kararlılık sahipken termoplastikler daha tok, daha az kırılğan ve daha iyi çekme uzamasına sahiptir. Termoplastiklerin raf ömürleri sınırsız olabilir ve tamir edilebilirlerken termosetlerin ömrü sınırlıdır ve tamirleri çok zordur (Balasubramanian, 2013).



Matris malzemesi olarak kullanılan termoset reçineler epoksiler, polyesterler, vinil esterler, bismalemidler, siyanat esterler, poliimidler ve fenolikler olarak sıralanabilir. Bunlardan kompozit malzeme üretiminde en yaygın olarak kullanılanı ise epoksi reçinelerdir. Polyester ve vinil ester reçinelerde tercih edilir ancak epoksiye göre düşük mekanik özellikleri ve kısmen düşük çevresel dirençleri olduğu için ileri düzey kompozit yapılarda tercih edilmezler. Termoset reçinelerin karşılaştırılması çizelge 3.1’de verilmiştir (Campbell, 2010)

**Çizelge 3.1.** Termoset reçinelerin genel özellikleri açısından karşılaştırılması (Campbell, 2010)

Polyesterler	Yoğunlukla ticari uygulamalarda kullanılırlar. Oldukça ucuzdurlar ve işlenmeleri esnektir. Sürekli ve süreksiz elyafli kompozitlerde kullanılırlar.
Epoksiler	Öncelikli olarak sürekli elyafli kompozitlerde kullanılan yüksek performanslı matristir. 120 – 135 °C’ye kadar olan uygulamalarda kullanılırlar. Polyester ve vinil ester reçinelere göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans verirler.
Vinil esterler	Polyester reçinelere benzerler ancak daha tok ve daha iyi nem direncine sahiptirler.
Polyamidler	290 – 315 °C’ye kadar olan uygulamalarda kullanılırlar. İmalleri çok zordur.
Bismalemidler	135 – 175 °C aralığında kullanılan yüksek sıcaklık matrisidir ve epoksi gibi imal edilir. Yüksek sıcaklıkta post-kür gerektirir.
Siyanat esterler	135 – 175 °C aralığında kullanılan yüksek sıcaklık matrisidir ve epoksi gibi imal edilir. Yüksek sıcaklıkta post-kür gerektirir.
Fenolikler	Duman ve alev direnci yüksek olan yüksek sıcaklık reçine sistemidir. Çoğunlukla hava taşıtlarının iç kısımlarında kullanılırlar. Üretimleri zor olabilir.

Epoksi reçineler yüksek performanslı kompozitler ve yapıştırıcı olarak kullanılan en yaygın reçinelerdir. Epoksiler mukavemetin, yapışmanın, düşük seviyede büzülmenin ve üretimde çok yönlülüğün mükemmel bir kombinasyonudur. Genel olarak kullanılan epoksi matrisler bir reçine ve bir sertleştirici (kürleştirici veya katalizör) bileşenlerinden oluşur. Ancak bazıları ana epoksi bileşenin yanı sıra viskozite kontrolü, yüksek sıcaklıktaki özelliklere katkı sağlamak, düşük nem emilimi sağlamak veya tokluğu artırmak amaçlı sebeplerden yan bileşen olarak katılır ve bir ya da iki sertleştirici içerebilirler (Campbell, 2010)

Termoplastik reçineler birçok üstün özelliği olmasına rağmen yüksek sıcaklıkta ve basınç altında işlem görme, yüksek viskoziteli olma ve sonucunda elyaf takviyeli kompozitlerde üretim zorluğu, amorf olan bazı termoplastiklerin çözücülere karşı hassas

olması gibi sebeplerden dolayı termosetler kadar kompozit üretiminde kullanılmamaktadır.

### 3.1.2. Takviye Elemanları

Polimer matrisli kompozitlerin matris kısmını oluşturan reçinelerin özellikleri ileri düzeyde olsalar da kırılğan oldukları için tek başlarına yetersiz kalabilmektedirler. Bu kapsamda, kompozit yapının özelliklerini iyileştirmek amaçlı elyaf, partikül, visker vb. takviye elemanları kullanılmaktadır.

Uygulamalarda takviye elemanı olarak birçok elyaf türü kullanılmaktadır. Elyaf lar uzunluklarının kısa, uzun veya sürekli olmasına göre, mukavemet ve rijitliklerinin düşük, orta ve yüksek olmasına göre, çok yüksek modüllerine göre veya organik ya da inorganik olan kimyasal bileşenlerine göre sınıflandırılabilirler. İnorganik elyaflardan en çok bilinenleri cam, karbon, aramid, boron, seramik, mineral ve metaliktir. Elyaf seçimi mekanik ve çevresel özelliklerin uygulamadaki etkinliğine göre ve maliyetine göre yapılabilir (Barbero, 2010).

Cam elyaflar kütleli şekilde camdan üretilir. Kütleli cam yapı amorf bir yapı olup kum, kireç taşı ve diğer oksidik bileşenler içerir. Bu nedenle cam elyafların ana kimyasal bileşeni silikadır ( $\text{SiO}_2$ ) ve yapıda %46-75 oranında bulunur. Kimyasal bileşeni ve üretim sürecini kontrol olarak farklı cam elyaf türleri elde edilse de genel anlamda cam elyaf özellikleri sertlik, korozyon direnci ve rijitliktir. Bunların yanı sıra esnek, hafif ve ucuzdurlar. Bu özellikleri gereği cam elyaflar düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Barbero, 2010). Cam elyaflar düşük maliyet, genel kullanım (E) ve özel amaçlı kullanım (M, C, S, Z, D, ECR) olarak farklı türlere sınıflandırılabilirler. E-cam kompozit endüstrisinde üretimdeki ve maliyetindeki avantajlarından dolayı en çok kullanılan cam elyaf türlerinden biridir. Özel amaçlı kullanılan cam elyaf türlerinden ECR-cam uzun süreli asit direnci ve kısa süreli alkali direnci sağlamaktadır. C-cam, E-cam elyafına göre asitlere karşı daha iyi korozyon direnci vermektedir ve genel olarak kimyasal uygulamalarda kullanılır. Yüksek mukavemetli S-cam gibi elyaflar E-cam elyafa göre %10-15 daha iyi mukavemete sahiptir, ancak asıl önemli yanları yüksek sıcaklıklardaki kararlılıklarıdır. Baskılı devre kartlarında kullanılan D-cam elyafları ise E-cam elyafa

göre daha düşük dielektrik sabitine sahiptir, ancak özel amaçlı üretildiklerinden daha pahalıdır (Balasubramanian, 2013).

Karbon elyaflar grafit elyaf olarak da adlandırılır ve mükemmel kimyasal dirençli, hafif ve dayanımlı elyaflardır. Havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Karbon elyafların mekanik özellikleri, grafit kristal yapısına benzeyen, karbon zincirlerinin dizilimi ve bağlantıları tarafından belirlenir. Karbon elyafların mukavemeti karbon elyaf yönü boyunca olan güçlü atomik bağlantılı olan karbon atomik yapısının düzeni tarafından kontrol edilir (Barbero, 2010). Karbon elyaflar yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, yüksek tokluk ve hafiflikleri nedeniyle mühendislik uygulamaları için ideal bir malzemedir. Bazı olumsuzlukları ise kırılma, düşük darbe direnci, düşük kırılma uzaması, bası direncinin çekmeden düşük olması ve cam elyaflara göre pahalı olması olarak sıralanabilir (Campbell, 2010).

Aramid elyaflar organik olup rijitlikleri ve mukavemetleri cam ile karbon elyaf arasındadır. Bu aromatik poliamitler naylon türünün bir parçasıdır. Aramid elyaflar karboksilik asit ve amin grubu arasındaki reaksiyon sonucu oluşan amit bağlantısına dayanmaktadır. Kevlar (Dupont) elyaf bu türün en yaygın olanıdır. Aramid elyafların yapısı bölgelere ayrılmış yüksek kristalli sıralanmış polimer zincirleri içerir. Aromatik halka termal kararlılık sağlarken ve kristalli rijit ve çubuk gibi bir yapı güçlü kovalent bağlar ile bir arada tutulmaktadır. Ancak, zincirler arası zayıf hidrojen bağları bulunduğu için gerilmede defibrilasyon hasarına uğrar, basınç altında ise bükülme şeritleri oluşturabilir. Bası gerilmesi altında kırılma uzaması çekme gerilmesindeki %25'i civarındadır, bu nedenle bası gerilmesi veya eğilme yükü içeren uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Ancak, basınç altındaki bükülme karakteristiği darbe dayanımının geliştirilmesine imkân vermiştir. Üst düzey toklukları nedeniyle aramid elyaflar balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Aramid elyafların en büyük avantajı yüksek kırılma uzaması ve bası gerilmesi altında plastik deformasyona uğrayabilmelerinden kaynaklı kırılma esnasında yüksek miktarda enerji absorbe etmeleridir. Kevlar elyafların yapısı ve bası gerilmesindeki davranışı kompozitlerin çentik hassasiyetini azaltmakta ve cam ve karbon elyafların aksine hasar durumunda kırılma ve ani bir davranış sergilememesidir (Campbell, 2010).

Tabakalı halde üretilecek kompozitlerde ise elyafların örgü kumaş halleri kullanılmaktadır. Örgü kumaşlardaki elyaf açıları ise  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  şeklinde olabilir. Tek yönlü ( $0^\circ$ ) tabakalar  $0^\circ$  yönünde oldukça güçlü ve rijittir. Ancak  $90^\circ$  (enine) yönünde ise yük daha zayıf olan matris tarafından karşılanacağı için zayıf kalmaktadırlar. Sıradan bir yüksek mukavemetli elyaf 3500 MPa çekme mukavemetine sahipken polimer matris ise 35-70 MPa arası bir çekme mukavemetine sahiptir. Uzunlamasına yükler ve bası yükleri elyaflar tarafından taşınırken, matris gelen yükü elyaflar arasında dağıtır, elyafları sabitler ve bükülmelerini engeller. Matris, tabakalar arası kayma gerilmesi (interlaminar shear tension) ve enine ( $90^\circ$ ) gerilmelerin taşınmasından da sorumludur. Bu rollerin uygun dağıtılması kompozitin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Matris ve elyaflara göre mekanik özelliklerden hangisinde baskın olduğu Çizelge 3.2’de verilmiştir (Campbell, 2010).

**Çizelge 3.2.** Mekanik özelliklere elyaf ve matrisin etkisi (Campbell, 2010)

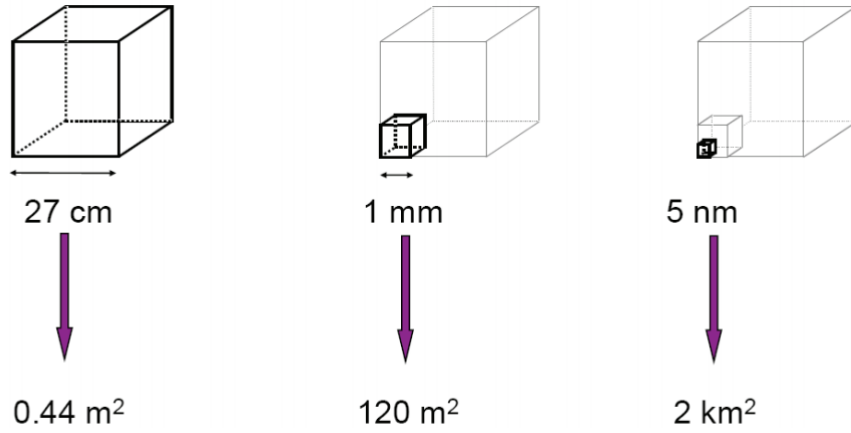
Mekanik özellik	Baskın olan takviye elemanı
<b>Tek yönlü kompozit</b>	
$0^\circ$	Elyaf
$0^\circ$	Elyaf, Matris
Kayma	Matris
$90^\circ$	Matris
<b>Tabakalı kompozit</b>	
Çekme	Elyaf
Basma	Elyaf, Matris
Düzlem içi kayma	Elyaf, Matris
Tabakalar arası kayma	Matris

Elyaf düzeninin mekanik özellikleri doğrudan etkilemesinden ötürü, kumaşları belirli bir düzene göre yerleştirmek mantıklı olmaktadır ve bu nedenle tabakalı kompozitlerde kumaşlar taşınması gereken yüke bağlı olarak sıralanır (Campbell, 2010).

Tabakalı kompozitlerde elyaflar kompozitin mekanik özelliklerine önemli ölçüde katkı yaparken, gelen yükler matris tarafından elyaflara dağıtıldığı için matrisin iyileştirilmesi de önemlidir. Bu kapsamda kütleli kompozitlerin de özelliklerini iyileştirme amaçlı partiküller ilave elemanı olarak kullanılmaktadır.

Önceleri partiküller mikro seviyelerde kullanılırken, gelişen teknolojiyle beraber nanopartiküller piyasaya çıkmıştır. Mikro seviyede takviye edilen partiküller ile elde edilen özellikler ile nano seviyelerine inildiğinde fark göstermektedir. Bunun sebeplerin

başında ise nanopartiküllerin yüzey alanı ve yüzey özellikleri olarak verilmektedir. Nanopartikülün yüzey özellikleri ise boyutlarıyla ilişkili olmaktadır. Örneğin elektriksel, optik ve manyetik özellik iyileştirilmesi amaçlı kullanılan partiküllerin boyutu 10-20 nm boyutlarında iken, mekanik özellikler için takviye edilen partiküllerin boyutu daha yüksek olabilmektedir. Buradan anlaşılabilir ki partikül boyutuna bir bağımlılık vardır. Bu kapsamda, şunun farkına varılmalıdır ki, örneğin 5 nm boyutunda bir partikül yapısında birkaç bin atom ya da birim hücre bulundurmaktadır ve yaklaşık bunların %40'ı yüzeyinde bulunmaktadır. Öte yandan 0.1 $\mu$ m boyutundaki partikül 10<sup>7</sup> atom ya da birim hücre içermektedir ve yalnızca %0,1'i kadarı yüzeyinde bulunmaktadır. Bu nedenle, parçacık boyutu küçüldükçe yüzey özellikleri ve bundan kaynaklı ara yüz özellikleri, agglomera (topaklanma) davranışı ve fiziksel özellikler de etkilendiğinden, parçacık boyutu daha da önemli hale gelmektedir. Partikül yüzey alanı 100 m<sup>2</sup>/g gibi değerler civarında seyrettiği zaman üretimden kaynaklanan kalıntılar yüzey özelliklerini etkileyebilmektedir. Boyuta göre yüzey alanı değişimi örneğinin şematik olarak anlatımı Şekil 3.3'de verilmiştir (Hanemann ve Szabó, 2010).



Şekil 3.3. Boyuta göre yüzey alanı değişimi (Hanemann ve Szabó, 2010)

Polimer matrisli kompozitlerin özelliklerini iyileştirmede kullanılan başlıca nanopartiküller ise nano kil, karbon nanotüp (CNT), silika (SiO<sub>2</sub>), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) olmak üzere, demir oksit, grafen oksit, titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) gibi birçok farklı partikülde bulunmaktadır.

Karbon nanotüpler, polimer matrisli kompozitlerin elektriksel ve mekanik özelliklerini geliştirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek elektrik iletkenliği sebebiyle iletken polimerlerin üretilmesine imkân sağlamaktadır. Karbon nanotüp nanopartikülleri elektrostatik boşalma ve elektromanyetik parazit koruması gibi uygulamalarda geleneksel takviye elemanlarının yerini almakta ve istenilen özellikler çok az miktarda karbon nanotüp kullanılarak sağlanabilmektedir. Mekanik anlamda ise, eğer karbon nanotüp ile matris arası ara yüz yeterince iyi bağlı olursa karbon nanotüpün yüksek çekme mukavemetinden faydalanılabilmektedir (Bal ve Samal, 2007). Silika nanopartikülleri de mekanik özelliklerden çekme mukavemeti, çekme modülünü, eğilme rijitliğini, tokluğu çizilmeye karşı direnci artırıcı etki gösterebilmektedir (Sprenger, 2015). Karbon nanotüpün aksine silika elektriği iletmemektedir. Silika nanopartikülleri yüksek elastik modülleri, yüksek yüzey alanları, düşük yoğunlukları, düşük ısıl genleşme katsayıları ve ucuz olmaları nedeniyle polimer matrislerin takviyelendirilmesinde tercih sebebidir (Jumahat, Soutis, Abdullah ve Kasolang, 2012). Alumina nanopartikülleri polimer kompozitlerde camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) gibi termomekanikal, çekme mukavemeti, aşınma direnci, eğilme mukavemeti gibi mekanik, ışık yayma gibi optik özellikleri iyileştirmede kullanılmaktadırlar (Hanemann ve Szabó, 2010). Demir oksit nanopartikülleri de diğer partiküller gibi mekanik özellikleri iyileştirmede kullanılabilirken, manyetik özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin manyetik özelliklerini geliştirme amaçlı manyetik rezonans görüntüleme (MRI), ilaç taşıyıcı sistemler gibi tıbbi, elektromanyetik kalkanlama (EMS) gibi havacılık ve uzay, elektronik cihazlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak manyetik alanlar kullanılarak kompozit malzemelerde mekanik özellikleri düşüren baloncukları imha etme amaçlı veya şekil hafızalı metaller diye adlandırılan malzemelerde ısıtıldığında deforme olduğu halden ilk haline dönebilen malzemelerde yine indüksiyon yardımıyla etki etmesi öngörülen nanopartiküllerdir (Rafique, Kandare ve Sprenger, 2017).

### **3.1.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**

Üretim yönteminin seçiminin nasıl yapılacağı kullanılacak olan matris ve elyafın türüne, parçayı oluşturmak ve matrisi kürelemek için gerekli sıcaklığa ve maliyete bağlı olarak yapılır. Genelde, imal edilecek olan kompozit malzeme için üretim yöntemini belirlemek ilk adımlardan biridir. Bunun sebebi, maliyet, üretim oranı ve hacmi ve

istenilen yapının üretimi için seçilecek üretim yönteminin yeterliliğinin önemli olmasıdır. Çünkü her bir üretim yöntemi kendine göre sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, üretilecek yapıya göre bir seçim yapılması dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Polimer matrisli tabakalı kompozitlerin üretimi elyafların istendiği düzende yerleştirilmesi, elyafların reçine ile doyurulması, artan reçine, baloncuk ve uçucu maddelerden arındırılması, polimerin kürlenmesi veya katılaştırılması, kalıptan çıkarılması ve üretim sonrası artan parçaların kesimi gibi son işlemlerin yapılması işlemlerinin sırasıyla uygulanması şeklinde olmaktadır (Barbero, 2010). Tabakalı kompozitler için kullanılan üretim yöntemleri el yatırma, torba kalıplama, filaman sarım, pultrüzyon, otoklav, pres kalıplama, reçine infüzyon yöntemleri olarak sıralanabilir

El yatırma yöntemi en basit ve en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Öncelikle kalıba elyaf kumaşları serilir ve ardından reçine kumaşlara emdirilmek üzere fırça yardımıyla yayılır ve istenilen kalınlık elde edilene kadar bu işleme devam edilir. El yatırma yöntemi kalıbın hazırlanması, pürüzsüz yüzey elde etmek için jel kaplamanın yapılması, kumaşların yerleştirilmesi ve kürlenme olmak üzere dört basit adıma bölünebilir. Kalıp hazırlama işlemi bu yöntemin en kritik bölümüdür. Kalıp malzemesi üretilecek parça sayısına ve kürlenme sıcaklığı, basınç gibi üretim koşullarına bağlı olarak ahşap, plastik, alçı, kompozit veya metal olabilir. Uzun süreli üretim yapılacak kalıplar genelde metalden yapılmakta olup kompozit kalıplar buna pek uygun değildir. Bu yöntemin avantajları; karmaşık geometriye sahip büyük parçaların üretilebilmesi, ekipman maliyetinin az olması, kompozit yapıda %1'in altında boşluk oluşması, takviye elemanlarının basit şekilde uygulanabilmesi, pürüzsüz yüzey istenen parçaların oluşturulabilmesi ve kürlenme için fırına ihtiyaç olmaması şeklinde sıralanabilir. Dezavantajları ise parçanın tek bir tarafının pürüzsüz üretilebilmesi, kalitenin işlemi yapan kişiye bağlı olması, dikkatli yapılması gereken bir işlem olması, üretim miktarının az olması, üretim esnasında zararlı madde salınımının olması, parçanın yekpare şekilde üretilmesinin zorluğu ve oda sıcaklığında uzun kürlenme süreleri olarak verilebilir. Bu yöntemin uygulandığı alanlar ise havacılık ve deniz araçları parçaları, inşaat yapı parçaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Barbero, 2010)

El yatırma yönteminin bir alternatifi olan torba kalıplama yönteminde ise, kalıba elyaf kumaşlar yerleştirilip reçine yayıldıktan sonra üzeri esnek bir vakum torbası ile

kapatılır. Torba ile parçanın birbirine yapışmaması için araya soyma kumaşı ve reçinenin düzenli dağılımı sağlamak amaçlı dağıtıcı kumaş da konur. Parça torba ile iyice kapatıldıktan sonra vakum basıncı yardımıyla düz bir yüzey elde etme amaçlanır. Ayrıca vakum basıncı sayesinde, zararlı uçucu gazlar ve yapı içinde sıkışmış hava da sistem dışına alınır. Vakum torbalama büyük, yüksek kaliteli, düşük maliyetli kompozitlerin üretilmesine imkân sağlar. Başlıca avantajı ise vakumlamanın ve kütleme ekipmanının farklı parçalarda kullanılabilir olmasıdır. Ancak parça kalitesi işlemi yapanın becerisine bağlıdır. Termoplastik ve termosetler aynı şekilde üretilmekle beraber termoplastikler için kullanılacak olan torbanın yüksek sıcaklıklara dayanması gerekmektedir. Ayrıca termoplastiklerin yüksek viskoziteleri ve yüksek basınç gerektirmeleri de işlemi karmaşıktır. Üstün kaliteli termoplastik matrisli kompozitler genelde maliyetin fazla önemli olmadığı havacılık ve uzay ile tıbbi ekipmanlar gibi alanlarda kullanılır (Barbero, 2010).

Filaman sarım yüksek hızlı bir üretim yöntemi olup sürekli elyafların dönen bir mil etrafına sarılması şeklindedir. Tekrarlanabilir bir yöntem olup kalın cidarlı yapılar üretilmektedir. 1940'lardan beri kullanılan bir yöntem olup olgunlaşmış bir yöntemdir. Silindir, mil, küresel ve koni gibi yapıların üretimi kolay bir şekilde yapılabilir. Filaman sarım yöntemiyle golf sopası gibi çapı 25.4 mm altında olan veya 6 m'ye kadar olan yapılar üretilmektedir. Bu üretim yöntemi için en büyük kısıtlama iç bükey yapıların örülebilmesidir, çünkü elyaflar gerilim altındadır ve elyaflar kontur boyunca köprüleme yapacaklardır. Filaman sarım için en bilindik uygulamalar silindirler, basınç kapları, roket motoru gömleği ve motor kapağıdır. Ayrıca, geçme bağlantıları da sıklıkla yapıyla örülmektedir ve güçlü sağlam bağlantılar üretilmektedir. Üretim ise şöyle gerçekleşmektedir; kuru elyaf demetleri reçine banyosundan geçirilip bir bantta hizalanır ve ardından dönen bir silindir üzerine sarılır. Elyafları gerdirmek için düşük gerilmeler uygulanır. Bunun nedeni elyaflar da aşınma gerilmesinin azaltılması ve demette kırılmaların olmasının önüne geçmektir. Filaman sarım ekipmanlarının maliyeti parçanın boyutuna, sarıcı tipine ve kullanılan otomatik kontrol cihazlarına bağlı olarak değişmektedir (Campbell, 2010).

Pultruzyon yönteminde ise sürekli elyafların matrisin içinden geçirilmesi ve kalıp yardımıyla istenilen katı haline getirilmesi ile işlem yapılmaktadır. Takviye elemanı genellikle cam elyaf demetleri olup bunlar çözümlenmiş makinelemlerinde açılıp reçine



banyosu içine çekilir. Sonrasında bir ön kalıba alınıp bu demetler parça şekline yakınlaştırılır ve devamında ısıtılmış olan parçanın nihai şekline alacağı kalıba gönderilir. Kürlenme işlemi parçanın dışından içine doğrudur. Nihai kalıp içinden geçerken ısıtılan parça matrisin sertleştiricisi ile ekzotermik reaksiyonu ile de ısı alır. Bu ekzotermik reaksiyon sonucu oluşan ısı kalıbın sınırlarında meydana gelir ve kompozitin çıkışa doğru kalıptan ayrılmasını sağlar. Kompozit parça nihai kalıptan tamamen kürlenmiş olarak çıkar ve çekme mekanizması tarafından çekilirken soğur. Son olarak testere ile istenilen boyutta kesilir. Pultruzyon yönteminin avantajları sürekli üretim sebebiyle maliyetin düşmesi, düşük hammadde maliyeti ve az miktarda artık, karmaşık olmayan imalat ve ileri düzey otomasyondur. Öte yandan bu yöntemin dezavantajları da vardır ve bunlar yöntemin sadece sabit kesitte uygulanabilmesi, kurulumun ve başlama zamanının işçilik orantılı olması, bazı yapı parçaları imalatında istenenden daha büyük boşluklar oluşması, takviyelerin yoğunlukla uzunlamasına kullanılabilmesi, kullanılan reçinenin düşük yoğunlukta ve uzun ömürlü olması gerekliliği, polyester kullanımında sağlığa zararlı salınımların olması olarak sıralanabilir. İşlemin kritik noktaları ise kalıp tasarımı, reçine formulasyonu, reçineye daldırılmadan önce ve sonrası için malzemenin yönlendirilmesi ve kalıp içi sıcaklığın kontrolüdür (Campbell, 2010)

Otoklavlar işlem sırası basınçlı gaz sağlayan basınç tanklarıdır. Yüksek kalite ve karmaşık parçaların üretiminde kullanılırlar. Bu yöntem büyük parçalar ve orta miktarda üretim için uygundur. Otoklav işlemi vakum torbalama tekniğinin genişletilmiş halidir ve yüksek basınç verilerek boşlukların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Kompozit parça serilir ve etrafı vakum torbası ile çok iyi şekilde kapatılır. Torba içine tamamen veya kısmen vakum basıncı uygulanır ve dışına ise atmosferik basınçtan yüksek bir basınç uygulanır. Parçanın sıcaklığı reçinenin kürlenmesi ile artar. Yüksek sıcaklık viskoziteyi düşürüp takviye elemanların ıslatılabilmesini sağlar ve kompozitin güçlendirilmesine de yardımcı olur. Artırılmış basınç tamamlanmamış kompozit parçaya mekanik kuvvetler uygular ve vakum çıkışına salınım maddelerinin iletimini verimli hale getirir ve bunun sonucunda ıslatılma ile reçine akışı da artar. Otoklav işlemi yüksek miktarda enerji ve endüstriyel gazlar ve vakum torbaları dahil olmak üzere çok miktarda malzeme gerektirir. Ayrıca, işçilik hassasiyeti ve çok zaman isteyen bir süreçtir. Üretim miktarı kullanılan aletler, parçanın miktarı ve elyaf kumaş katmanlarının sayısına bağlı olarak değişmektedir (Barbero, 2010).

Presli kalıplama yöntemi, metal olan erkek ve dişi olan kalıpların arasına belirli bir miktar elyaf ve reçine konulup, bir hidrolik pres yardımıyla, elyaf ve reçineyi kürelemek için ısı ve oldukça yüksek basınç kullanarak erkek ve dişi kalıpların kapatılması ile gerçekleşir. Parça küreledikten sonra basınç kaldırılır ve kalıptan ayrılır. Sonrasında kalıplama sonrası işlemler uygulanır. Bu yöntem basit ve iyi yapılandırılmış bir yöntemdir. Parça hazırlama maliyetini düşürür, atık malzeme neredeyse yok denecek kadar azdır, ikincil kalıplama sonrası işlemleri azaltır ve az miktarda işçilik gerektirir. Kolayca otomasyon uygulanabilir, parçadan parçaya kalitenin iyi derecede korunduğu yüksek hacimli üretim yapılabilir. Otomobil tamponları gibi ufak parçalar dakikada 15 tane üretilirken, büyük parçalar ise saatte 24 tane üretilmektedir. Öte yandan, pres kalıplama yönteminde kullanılan araç gereçler oldukça pahalı olup yüksek elyaf içerikli kompozitler üretilmediğinden ikincil yapılarda kullanılacak parçaların üretimi yapılmaktadır (Barbero, 2010)

Tabakalı kompozitlerin üretim yöntemlerinden biriside reçine infüzyon yöntemleridir. Bu yöntemler, reçine transfer kalıplama (RTM veya reçine infüzyon), vakum destekli reçine transferi kalıplama (VARTM veya vakum infüzyon) ve bunların türevleri SCRIMP (Seaman Composite Resin Infusion Molding Process), SRIM (Structural Reaction Injection Molding) ve RFIM (Resin Film Infusion Molding) gibi temeli aynı olup işleyişi farklı olan yöntemlerde mevcuttur (Hoa, 2009).

Reçine infüzyon yöntemlerinin temel aşamaları ise, ön şekillendirme, kumaşların kalıba yerleştirme, reçine infüzyonu, küreleme ve kalıptan ayırmadır. Ön şekillendirme aşamasında, kuru elyaflar üretilecek parçaya uygun konfigürasyona getirilir. Başlangıç malzemesi, elyaf demetleri, düzensiz elyaflar veya dokuma kumaştır. Ön şekillendirilmiş malzeme genelde dokuma, presle kalıplanmış veya örgülü şekildedir. Çok az miktarda yapıştırıcı veya küçük çaptaki dikişler ile ön şekilli malzemenin yekpare olarak kalması sağlanır. Daha sonra ön şekillendirilmiş malzeme kalıba serilir. Genelde kalıp iki taraflıdır. Kalıbın her iki tarafı da rijit bir malzeme olabilirken, bir tarafı rijit diğer tarafı ise esnek bir malzemedir. Nihai ürünün yüzeyinin kalitesi kalıbın yüzey kalitesine bağlıdır. Ayrıca, iki tarafı da rijit olan malzemedir yapılmış kalıplarda yüksek basınçta uygulanabilir. Reçinenin elyaflar arası boşluklara geçme kabiliyetine bağlı olarak son üründe boşluklar kalabilmektedir ve

reçinenin bu boşluklara girebilmesi için yüksek basınçlar gerekebilmektedir. Sonuç olarak, istenilen kaliteye göre kullanılan kalıp ekipmanın türü de değişmektedir. Reçine infüzyon aşamasında ise, elyaflar kalıba yerleştirildikten sonra, kalıbın iki tarafı da sıkıca kapatılır ve kalıba reçine verilir. İnfüzyon işleminin amacı ise, elyafları ıslatmak ve aralarındaki boşlukları doldurmaktır. Reçine sisteme SRIM yönteminde olduğu gibi yüksek basıncın onlarca MPa olduğu veya RTM yönteminde olduğu gibi 6,89 MPa civarında orta düzey bir yüksek basınç ile enjekte edildiği gibi VARTM ve SCRIMP yöntemlerinde olduğu üzere vakum basıncı kullanılarak da sisteme verilebilmektedir. İnfüzyon için gerekli süre parça boyutuna ve reçine sisteminin reaktivitesine bağlıdır. Örneğin, SRIM yönteminde kullanılan siyanat gibi hızlı tepkimeye giren reçine için süreç saniyeler içinde gerçekleşirken, RTM yönteminde kullanılan epoksi sistemlerde ise yavaş tepkime gerçekleştiğinden dakikalar hatta saatler sürebilmektedir. Devamında ise kürlenme evresi gerçekleşmektedir. Bu noktada önemli olan reçinenin infüzyon işlemi sırasında jelleşmemesidir, aksi takdirde homojen dağılım sağlanamaz ve parça istenildiği gibi üretilemez. Kürlenme evresi ısı ile hızlandırılabilir. Son aşamada ise parça kalıptan ayrılır (Hoa, 2009). Rijit kalıpların kullanıldığı durumlarda kalıptan ayrılma, kalıp ayırıcı vakımlar ile yapılabilirken, vakum infüzyon yöntemindeki gibi esnek bir torba kalıbı içeren üretimlerde kompozit parçanın torbaya yapışmaması için bir soyma kumaşı kullanılır.

Reçine infüzyon yöntemlerinin avantajlarından biri önceden reçinelendirilmiş prepreglerin aksine elyaflar kuru olarak kullanılmaktadır ve bu nedenle elyafların farklı düzenlerde olduğu önşekillendirilmiş kumaşlar üretilmektedir. Farklı düzenler kullanılarak üretilmiş bu ön şekilli kumaşlardan yapılan kompozitlerde düzlem içine ek olarak kalınlık doğrultusunda da takviye yapılmış olur. Ön şekillendirilmiş kumaşlar için farklı örgü teknikleri kullanılmaktadır. Diğer bir avantaj ise kuru olan kumaşlar kullanıldığı için raf ömürleri kısıtlı değildir ve kapalı kalıplar içinde yapıldığı için polyester ve vinil ester reçineleri içeren üretimlerde zararlı madde salınımı çok ciddi bir sorun değildir. Öte yandan üretim hacmi açısından 20,000 – 60,000 üretim miktarı civarında otoklav yöntemine göre daha uygun maliyetli üretim yapılabilir. Ayrıca, kullanılan kalıplar da geleneksel pres ile kalıplama ve metal şekillendirme yöntemlerindeki gibi daha hafif ve ucuz olduğundan maliyeti düşürmektedir. Öte yandan bu üretim yöntemlerinin dezavantajları da bulunmaktadır. Bazı önceden şekillendirilmiş elyaflar bir yapıştırıcı madde ile bir arada tutulduğundan üretim

esnasında reçine akışını bozabilir ve ayrıca, bu maddelerin, elyafların yığılmaması için reçinede çözünebilmesi gerekmektedir ve bu durumda mekanik özellikleri etkileyebilir. Ön şekilli elyafların kalıba tam anlamıyla oturtulması gerekmektedir. Aksi takdirde, ön şekilli malzemenin kenarlarında gevşeklikler olur ve bu bölgeler fazla reçineli bölgeler durumuna gelirler. Kumaş tarzı bir hale getirilmiş ön şekillendirilmiş elyafların geçirgenliği elyafların hacimsel oranı ve elyaflara uygulanan basınç gibi birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Elyaf kumaşların geçirgenliğinin farklı farklı olmasından dolayı sıvı reçinenin akış hızının tahmini zor olmaktadır. Bu durum, elyafların iyi ıslatılamaması, boşlukların kalması ve katmanlar arası kayma mukavemeti gibi mekanik özelliklerin düşmesine sebebiyet verebilir. Parçanın kalitesi boşlukların olması, reçine açısından zengin ve kuru bölgelerin bulunması durumundan etkilenebilir (Hoa, 2009).

Reçine transferi kalıplama yöntemi (RTM) iki rijit kalıp bulduran bir sistem olup, öncelikle kalıbın içine elyaf kumaşları serilir ve sonrasında kalıplar kapatılıp sisteme basınç ile reçine verilir. Bu yöntemin farklı bir versiyonu olan vakum infüzyon yönteminde ise, kalıplardan biri esnek bir torbadan meydana gelmektedir. Rijit kısma önce vaks sürülür sonra sırasıyla elyaf, ayırıcı kumaş ve dağıtıcı kumaşlar serilip kalıbın üst kısmını oluşturan torba vakumun sağlıklı bir şekilde sağlanabilmesi için hiçbir açıklık kalmayacak şekilde yerleştirilir ve ardından sisteme reçine verilir. En son aşamada ise parça kürlenmeye bırakılır. Vakum infüzyon yönteminin farklı bir versiyonu olan SCRIMP yönteminde ise, özel bir dağıtıcı file kullanılarak reçine akışının kalınlık boyunca olması sağlanır ve bu sayede hızlı bir üretim gerçekleşir. Reçine filmi infüzyonu yöntemi de yine vakum infüzyon yöntemine benzer olup reçine sisteme dışardan basınç ile verilmez. Reçine ince bir tabaka halinde elyaf katmanının üstüne konur, sonrasında ısı ve basınç uygulandığında elyaf kumaşa geçer.

VARTM yöntemi hem infüzyon hem de kürlenme için sadece vakum basıncı kullandığı için en büyük avantajı geleneksel RTM yöntemine göre ekipmanların daha ucuz ve daha basit bir tasarıma sahip olmasıdır. Ayrıca, kürlenme için bir otoklav gerektirmediğinden rüzgâr türbini kanadı ve bot gövdesi gibi çok büyük parçalar üretilmektedir. Bunlara ek olarak ise daha düşük basınç kullanıldığından köpükten hafif çekirdek malzemeler rahatlıkla kullanılabilir. VARTM türü üretim yöntemleri cam elyafı tekne gövdesi yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır ve havacılık sektöründe de kullanılmaya başlamıştır (Campbell, 2010).

Vakum infüzyon yöntemi bir tarafı kalıptan bir tarafı vakum torbasından oluşmaktadır. Bu yöntem, genelde elyaf katmanının üzerinde, elyaf kumaşı boyunca reçinenin akışını ve kumaşın kalınlığı doğrultusunda absorbe edilmesini sağlayan gözenekli bir dağıtıcı file bulundurmaktadır. Dağıtıcı file oldukça geçirgen olup reçinenin akışını kolaylaştırır. Bu malzeme kullanıldığında reçine önce kumaş boyunca ilerler ve sonrasında kumaşın kalınlığı boyunca aşağısına doğru iner. Klasik bir dağıtıcı file naylon veya polipropilen örgüden olabilir. Reçine nüfuziyeti kalınlık doğrultusunda olduğu için reçinenin bir bölgede diğerine göre hızlı akması ve kumaşın etrafından reçine sızması gibi sorunlar yüksek oranda çözülmüştür. Sadece vakum basıncı kullanıldığı için otoklav gerektirmez ve büyük parçalar üretilebilir. Fırınlar veya ısıtma ekipmanları genelde kullanılır ve basınç düşük olduğundan (101.4 kPa'dan az veya eşittir) düşük maliyetli, hafif malzemeler kullanılabilir. Çift vakum torbası uygulaması yapılan üretimlerde amaç ilk konulan torbadan herhangi bir potansiyel sızıntıya karşı koruma sağlamak ve uygulanan basınç farklılıklarını en düşük seviyeye çekmektir. Ayrıca, sızıntı bölgelerindeki havayı ortadan kaldırmak amaçlı havalandırıcı bir filede kullanılabilir. Bazı uygulamalarda karmaşık parçalarının sürekli üretimini kolaylaştırmak için tekrar kullanılabilen vakum torbalarından faydalanılır. Yöntemin anahtar noktalarından biri ise tüm süreç boyunca vakumun çok iyi uygulanmasıdır (Campbell, 2010).

Vakum infüzyon yönteminde kullanılan reçinenin viskozitesi reçine transfer kalıplama yönteminde kullanılan reçinelerinkinden bile düşük olmalıdır. Vakum altında elyaf kumaşın reçineye doyurulabilmesi ve istenen akışın sağlanabilmesi için önerilen viskozite 100 cps civarındadır. İnfüzyon öncesi vakumla gaz giderme işlemi reçine/sertleştirici karışımındaki sıkışmış havanın giderilmesi için kullanılabilir. Bazı reçineler oda sıcaklığında sisteme verilebilirken, bazıları için ısıtma gerekmektedir. Reçine tankının ve kaçış tankının ısıtma ekipmanından uzakta durması önerilmektedir. Bu durum, reçinenin sıcaklığını kontrol altında tutmayı ve kaçış tankında ısı açığa çıkma olasılığını düşürmeyi kolaylaştırmaktadır. Büyük boyutlu parçalar için birden fazla besleme noktası ve vakum çıkış noktası kurulmalıdır. Temel bir kural olarak reçine besleme hattı ve vakum hattı birbirinden 45 cm uzağa kurulmalıdır. Kalın kumaşların kullanılması durumunda yüksek elyaf oranı elde etmek zordur. Elyaf kumaş haline getirildiğinde birbirlerine geçmeleri mükemmel olarak sağlanamadığından, her eklenen

katmanda serbest hacim artar ve kalın parçalarda elyaf oranı düşer. Kullanılan basınç reçine transfer kalıplama veya otoklav yöntemlerine göre oldukça düşük olduğundan, yüksek elyaf oranı elde edilemeyebilir. Ancak, bu dezavantaj, kesin biçime yakın kumaşlar kullanılarak engellenebilir. Bunlara ek olarak, vakum infüzyon yöntemi reçine transfer kalıplama yöntemindeki gibi dar toleransları veremez ve vakum torbası tarafında kalan yüzey kalıbın rijit tarafına gelen yüzey kadar düz olmayabilir. Kalınlık kontrolü genel olarak, katman sayısına, elyaf hacim oranına ve üretim esnasında uygulanan vakum basıncının kalitesine bağlı olmaktadır (Campbell, 2010).



## 4. MATERYAL YÖNTEM

Tabakalı kompozit malzemelerde matrisin görevi gelen yükleri elyaflara iletmek, elyafları bir arada tutmak ve elyafları çevresel etkenlerden korumaktır. Bu kapsamda tabakalı kompozit malzemelerin geliştirilmesi için matris malzemesinin özelliklerinin iyileştirilmesi önem taşımaktadır.

Yapılan bu çalışma iki aşamalı gerçekleşmiştir. İlk aşamada matris özelliklerini iyileştirilmede kullanılmış olan demir oksit nanopartikülünün matris için uygun değerini belirlemek amacıyla literatürden de alınan bilgiler doğrultusunda ağırlıkça %0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 oranlarında demir oksit nanopartikülü ilaveli kütleli numuneler, ASTM D638 çekme testi standartlarına uygun olarak üretilip testler uygulanmıştır. Numunelerin hasarlı yüzeyleri SEM ile incelemiş ve termal özellikleri açısından incelemek için DSC ile TGA ve bağ yapılarını incelemek için FTIR analizleri yapılmıştır. Ayrıca, nanopartikül ilavesinin epoksi reçinenin jelleşme süresine etkisi de kontrol edilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise nanopartikül ilavesinin cam elyaf takviyeli tabakalı kompozit numunelerde mekanik özelliklere etkisini görmek amacıyla önce vakum infüzyon yöntemi ile numuneler üretilmiştir. Ardından elyaf hacim oranını bulabilmek için ASTM D3171 standardına göre yakma testi yapılmış ve devamında farklı gerilmeler altında davranışlarını incelemek için ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme, ASTM D7264 standardına uygun olarak üç-nokta eğme testi yapılmıştır. Birinci aşamada olduğu gibi yine hasarlı yüzeyler SEM ile incelenmiştir.

### 4.1. Malzemeler ve Özellikleri

Tez çalışmasında matris olarak kullanılan epoksi Hexion markasına ait MGS L160 laminasyon reçinesi olup viskozitesi 700-900 mPa·s ve kürleştiricisi ise Hexion marka MGS H160 10-50 mPa·s viskoziteli kürleştiricidir. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1.' de verilmiştir. Bu epoksinin seçilmesinde etkin olan unsur elyaf takviyeli kompozitlerde ıslatmasının yüksek olmasıdır.

**Çizelge 4.1.** Epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Hexion, n.d.)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	1,13 – 1,17	g/cm <sup>3</sup>
Çekme mukavemeti	70 – 80	N/mm <sup>2</sup>
Basma mukavemeti	80 – 100	N/mm <sup>2</sup>
Eğilme mukavemeti	100 – 140	N/mm <sup>2</sup>
Darbe mukavemeti	40 – 50	N/mm <sup>2</sup>
Elastislik modülü	3,2 – 3,5	kN/mm <sup>2</sup>
Kopma uzaması	5,0 – 6,5	%

Nanopartikül takviyesi olarak kullanılan  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü "Nanografi" firmasından "NG04SO1401" ürün kodu ile alınmış malzemeye ait olan fiziksel özellikleri Çizelge 4.2.' de sunulmuştur. Çalışmada mekanik özellik açısından inceleme yapılacağı için demir oksitin diğer türleri olan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> veya  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi manyetik özellikli olanlar fiyat açısından da  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> daha uygun olması üzerine seçim bu yönde yapılmıştır.

**Çizelge 4.2.**  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü fiziksel özellikleri (Nanografi n.d.)

Özellik	Değer/Durum
Saflık Yüzdesi	%99,6
Özgül Yüzey Alanı	55 g/m <sup>2</sup>
Kristal Yapısı	Düzensiz (Amorphous)
Morfolojisi	Küresel Gözenekli
Ortalama Partikül boyutu	28nm
Görünüm Rengi	Kızıl Kahve
Yoğunluk	5,4 g/cm <sup>3</sup>

Elyaf seçiminde ise endüstride yaygın olarak kullanılan ve ekonomik olan cam elyaf tercih edilmiştir. Cam elyaf kumaş türlerinden ise dikişli ve elyaf oryantasyonun 0/90° düzeninde olan kumaş tercih edilmiştir. Cam elyaf kumaş "DOST KİMYA" firmasından alınmış olup yoğunluğu 300 g/m<sup>2</sup> olarak tedarik edilmiştir. Elyaf oryantasyonu tercihinde testlere uygunluğuna göre tercih yapılmıştır.



## 4.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozit Numunelerin Üretilmesi

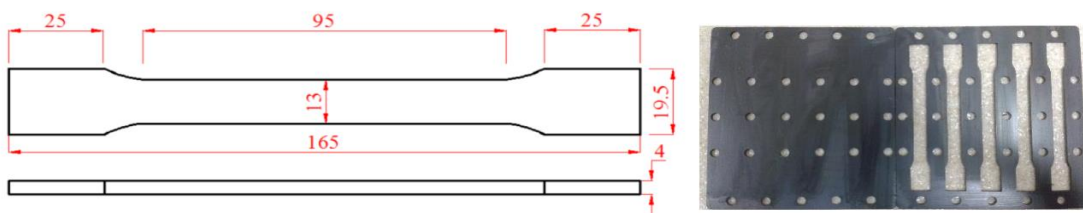
Çalışmanın ilk aşaması matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlı en uygun ilave oranının belirlenmesidir. Bu sebeple, öncelikle ASTM D 638 – 14 çekme testi standartlarına uygun olarak kütleli numuneler üretilmiştir.

Üretimden önce, nanopartikül ilavesinin jelleşme süresine etkisi oda sıcaklığında incelenmiştir. Bu işlemin önemi ise üretim esnasında zaman kısıtlamasının belirlenmesidir. Ayrıca, tabakalı kompozit üretiminde viskozitenin önemi büyüktür, bu sebepten dolayı jelleşmeye başlama süresinin belirlenmesi önemlidir.

Çalışma öncelikle kontrol numunesi olan saf epoksi numunelerin üretilmesiyle başlanmıştır. Epoksi reçine ve sertleştiricisi ağırlıkça 100:25 oranında karıştırılmış ve ardından bu esnada oluşan gaz kabarcıklarının giderilmesi için vakumlu etüvde 22 °C sıcaklık, 0.75 bar vakum şartlarında 10 dakika gaz giderme işlemine tabii tutulduktan sonra standartlara uygun olan çekme numunesi kalıbına (Şekil 4.1) dökülmüş ve 24 saat 22 °C sıcaklıkta kütleme işlemine bırakılmıştır. Bu işlemlerin devamında ise post kür işlemi 15 saat ve 80 °C sıcaklıkta uygulanmıştır.

**Çizelge 4.3.** Epoksi matrise ilave edilen nanopartikül oranları ve numune kodları

Ağırlıkça % Nanopartikül	Numune Kodu
0 – $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F0
0,5 – $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F1
1,0 – $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F2
2,0 – $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F3
4,0 – $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F4



**Şekil 4.1.** ASTM D 638-14 test numunesi ölçüleri ve numune kalıbı

Nanopartikül ilaveli numunelerin üretiminde ise epoksi matrise sırasıyla ağırlıkça %0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 oranlarında nanopartikül ilave edilmiştir. Literatürde daha yüksek oranlar kullanılmıştır (Z. Guo ve diğerleri, 2008; Zabihi ve diğerleri, 2012) ancak çalışmanın ikinci kısmını oluşturan tabakalı kompozit üretimi vakum infüzyonla yapılmıştır yine literatürde bahsedildiği üzere vakum infüzyon yönteminde reçinenin akış kontrolünün sağlanabilmesi için viskozitenin düşük olması istenmektedir (Sánchez, Campo, Jiménez-Suárez ve Ureña, 2013) ve nanopartikül ilaveli tabakalı kompozitlerin incelendiği çalışmalarda ise nanopartikül ilavesi viskozitede artışa sebep olmaktadır (Chandrasekaran, Advani ve Santare, 2010). Matrisin içinde iyi dağıtılmamış nanopartiküller istenmeyen sonuçlar verebilmektedir. Bunlara ek olarak bazı cam elyaf kumaşlar nanopartiküllere filtreleme yapabilmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında belirtilen oranlarda nanopartikül ilaveli kompozitler önce epoksi reçine tartılmış ve buna bağlı olarak nanopartikül miktarı hesaplanıp epoksi reçine ile ultrasonik homojenizatörde 15 dk boyunca buz banyosu içinde karıştırılmıştır. Sonrasında belirtilen oranda sertleştirici ilave edilerek mekanik olarak yine karıştırılmış ardından gaz giderme işlemi uygulanıp çekme standardına uygun kalıplara dökülmüştür. Son aşamada ise önce 24 saat 22°C sıcaklıkta kürlenme işlemi sonra 15 saat boyunca da 80°C sıcaklıkta post-kürlenme işlemi uygulanmıştır. Çekme numunesinin üretim aşamaları Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme numunesi üretim aşamaları

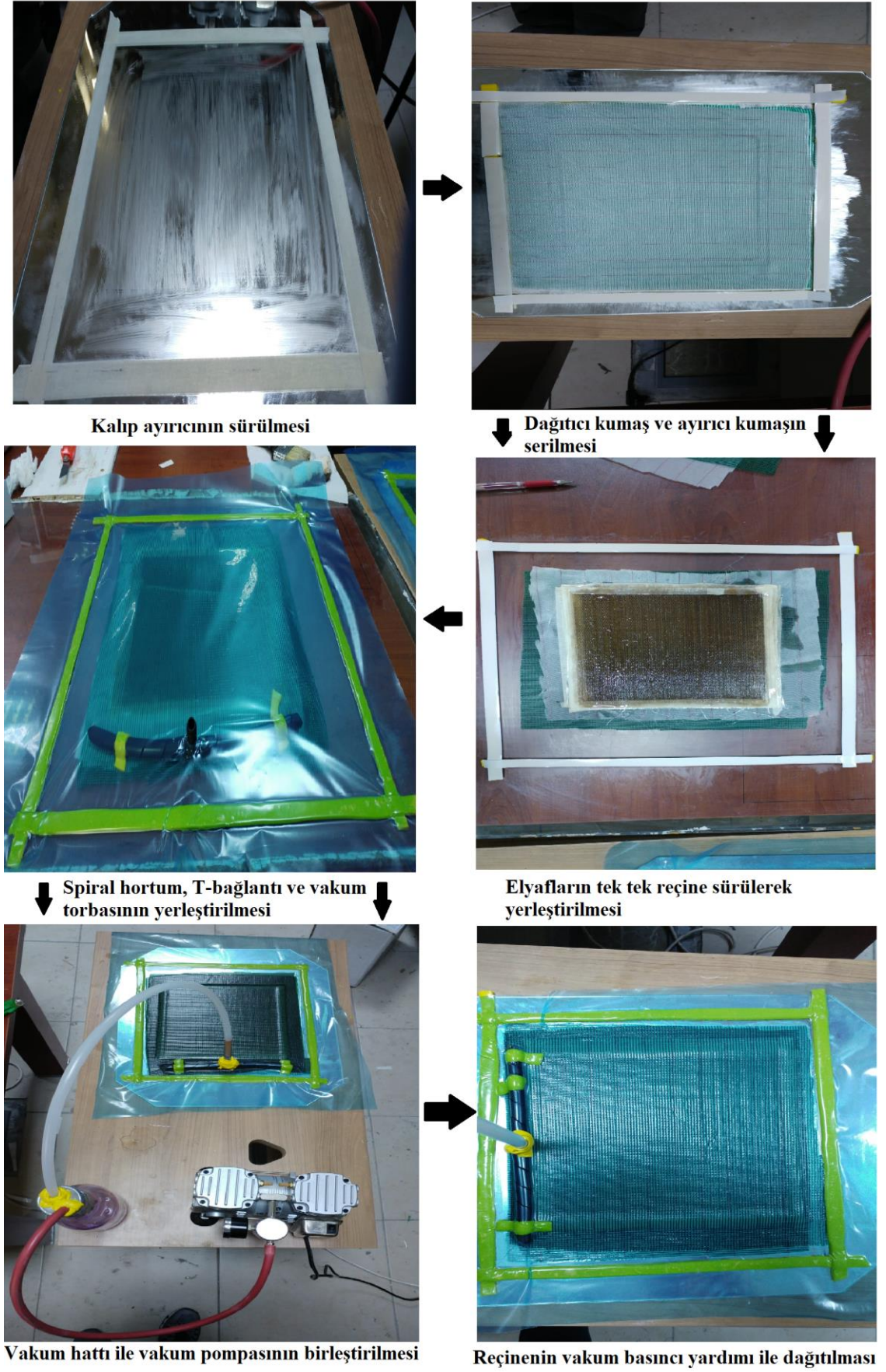
### 4.3. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş olan  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli cam elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılmak amacıyla önce en uygun değer belirlenmelidir. Bu kapsamda, ASTM D638 çekme testi standardına uygun olarak, universal çekme test cihazında (SHIMADZU) 2 mm/dk sabit hızla uygulanmıştır. Deney tekrar sayısı ise beş olarak seçilmiştir. Sonuç olarak nanopartikül ilavesi yapılmış ve saf epoksi polimer kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

### 4.4. Tabakalı Kompozit Numunelerin Üretilmesi

İlk aşamada belirlenmiş uygun oran kullanılarak bu bölümde  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli cam elyaf takviyeli kompozitler üretilmiştir. Tabakalı kompozit numuneler üretilirken önce vakum torbalama yöntemi kullanılarak plakalar üretilmiş ve sonrasında bu plakalardan test numuneleri test standartlarına uygun ölçülerde olacak şekilde çıkarılmıştır.

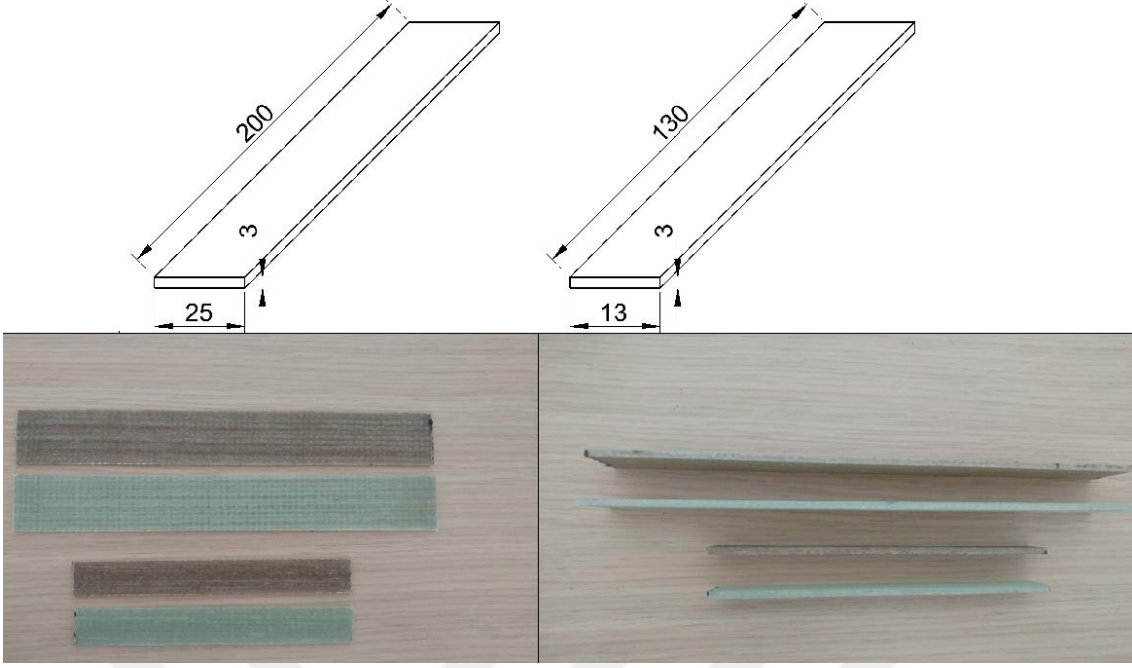
Vakum destekli el yatırma ile üretim, şematik olarak Şekil 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Vakum destekli elyatarıma işlemi şematik anlatımı

Vakum torbalama ile plakalar üretilirken şu aşamalar izlenmiştir; öncelikle kullanılan cam kalıp kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etki edebilecek toz ve kirlere arındırılmıştır. Cam kalıp üretim işlemi sonrası kompozit plakanın rahatça ayrılabilmesi için kalıp ayırıcı vaks sürülmüştür. Ancak sızdırmazlık bandının geleceği yerlere kâğıt bant yapıştırılmıştır. Vaks sürülen bölgeye reçine dağıtımının daha iyi olması için ilk kat olarak dağıtıcı file, üzerine ayırma kumaşı ve üzerine 0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup> düzeninde olan cam elyaflar 3 mm kalınlığını sağlamak üzere 8 kat serilmiştir. Elyaf kumaşların üzerine de tekrar ayırma kumaşı ve dağıtıcı file serilecek şekilde kesilip hazırlanmıştır. Sızdırmazlık bantları yapıştırılmış ve ardından vakum hattı spiral hortumun içine t bağlantı yerleştirilerek elyaf kumaştan biraz uzağa yerleştirilecek şekilde hazırlanmıştır. Vakum torbası sızdırmazlık bantlarından taşacak şekilde kesilmiştir. Sistem vakuma alınmadan önce, bulk numune üretiminde olduğu gibi hazırlanan saf epoksi/sertleştirici ve nanopartikül ilaveli epoksi/sertleştirici karışımları, 0<sup>0</sup>/90<sup>0</sup> düzeninde olan cam elyaf kumaşların her bir katmanına tek tek dağıtılmıştır. Bu işlemden sonra kesilmiş olan ayırıcı kumaş ile dağıtıcı file sırasıyla serilmiştir. Vakum ile çekilecek olan reçinenin vakum pompasına gelmemesi için vakum pompasından gelen hortum bir kaba yerleştirilmiş ve bağlantının etrafı sızdırmazlık macunu ile sıkı bir şekilde kapatılıp vakum kontrol edilmiştir. Ardından vakum hattı ile t bağlantı birleştirilmiş ve hava kaçağı olmaması için bağlantının etrafı sızdırmazlık macunu ile güçlü bir biçimde kapatılıp vakum hortumunun diğer ucu fazla reçinenin alınacağı kaba yerleştirilmiş yine etrafı sızdırmazlık macunu ile sıkı bir şekilde kapatılmıştır. Tüm kumaşlar en son vakum torbası ile tamamen kapatılmış ve torba sızdırmazlık bantları üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak ise vakum pompası çalıştırılıp reçinenin elyaf kumaşın her bölgesine ulaşması sağlanmıştır. Reçinenin tamamen dağıtıldığından emin olduktan sonra vakum altında kürlenmek üzere bırakılması için vakum hortumu kıvrılıp vakumun kaçması engellenerek vakum pompası kapatılmıştır. Önce 24 saat oda sıcaklığında kütleme, ardından kalıptan ayrılarak 15 saat 80°C’de fırında post kütleme işlemi uygulanmıştır.

Üretilen tabakalı levha kompozitlerden çekme ve üç nokta eğme deneyleri için numuneler tezgâh üstü testere yardımı ile kesilerek hazırlanmıştır. ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme testi için 200x25x3 mm ve ASTM D7264 standardına göre eğme testi için 130x13x3 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin fotoğrafları Şekil 4.5.’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Çekme ve Eğme Testlerine Hazır Numuneler

#### 4.5. Tabakalı Kompozit Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Demir oksit nanopartikülünün cam elyaf/epoksi tabakalı kompozitinin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla farklı gerilme davranışları altında testler uygulanmıştır. Universal çekme cihazında (markası) ASTM D3039 standardına göre, 2 mm/dk. hızında çekme testi 5 tekrar olarak yapılmıştır. ASTM D7264 standardına göre yükleme hızı 4 mm/dk. olarak ve destek açıklığı/kalınlık oranı 32:1 olacak şekilde her bir parametre için 10 tekrar yapılmıştır. Sonuç olarak ise nanopartikül ilavesi yapılmış ve yapılmamış tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikülünün Epoksi Matris Sistemine Etkisi

Demir oksit nanopartikülünün epoksi matrise etkisinin incelendiği bu kısımda, öncelikle nanopartikülün kürlenme üzerine etkisi, sonrasında çekme testi sonuçları ve ardından taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınan kırılma yüzeyi görüntüleri incelenerek nanopartikülün epoksi matrisi nasıl modifiye ettiği tartışılmıştır. Ayrıca, termal özelliklere etkisini incelemek için DSC ve TGA analizleri ve bunlara ek olarak ise bağ yapılarını incelemek amaçlı FT-IR analizi yapılmıştır.

#### 5.1.1. Nanopartikülün kürlenme üzerine etkisi

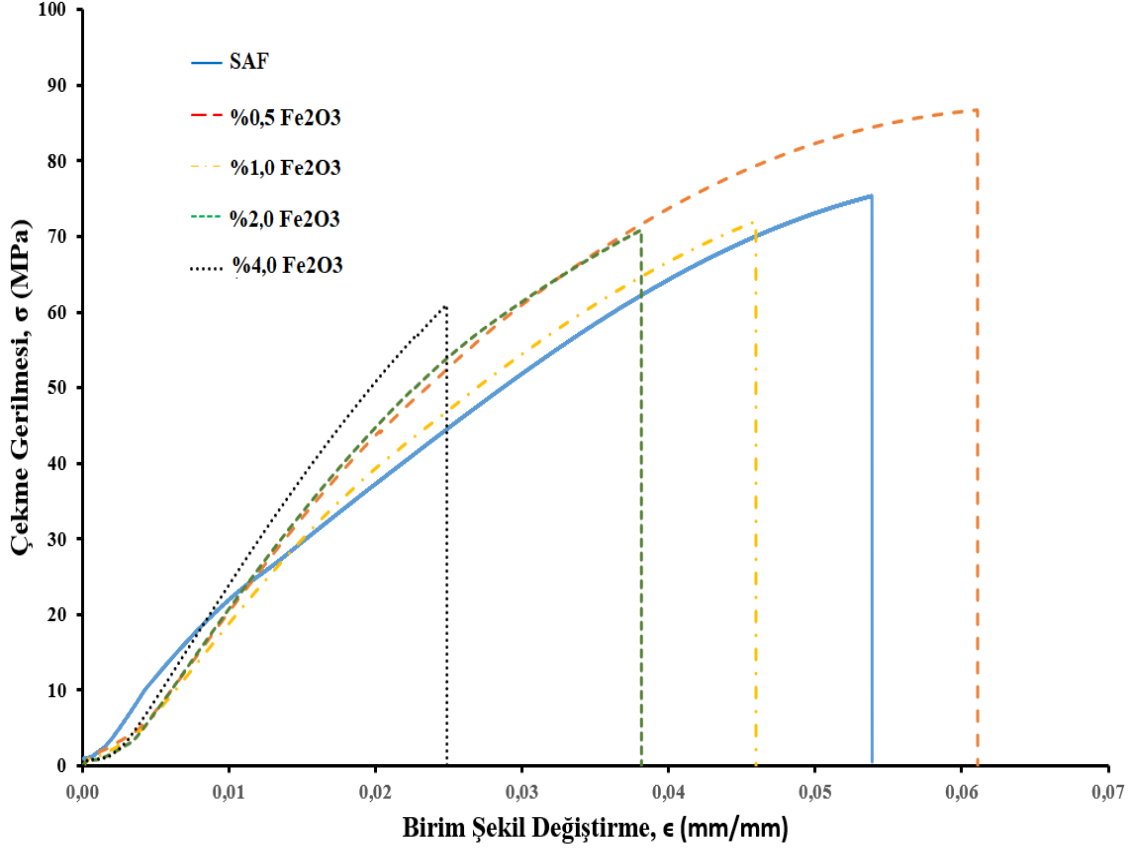
Saf epoksi ve nanopartikül ilaveli hazırlanmış reçineler, oda sıcaklığında her 5 dakikada bir kontrol edilerek jelleşme süreleri kontrol edilmiştir. İlk 50-55 dk sonunda nanopartikül ilaveli epoksi jelleşmeye başlamış ve viskozitesi saf epoksiye göre artmıştır. Nanopartikül ilaveli nanokompozit 65-50 dk sonunda tamamen katılaşmıştır. Saf epoksili karışım ise ancak 1 saat 40 dk sonunda jelleşmeye başlamış ve 3 saat sonunda katılaşmıştır. Üretici firmadan alınan verilere göre de saf epoksi sistem oda sıcaklığında 3-4 saat aralığında katılaşmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de bulunmaktadır (Umer ve diğerleri, 2015). Sonuç olarak ise nanopartikülün kürlenmeyi hızlandırıcı katalitik bir etkisi olduğu ifade edilebilir.

#### 5.1.2. Epoksi/Nanopartikül nanokompozitin mekanik özellikleri

Nanopartikül ilaveli ve saf epoksi olarak üretilen çekme deneyi numunelerinin testleri sonucunda elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.1’ de verilmiştir. Uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen veriler ile çekme mukavemeti, yüzde uzama ve tokluk değerlerinin bulunduğu grafiklere Şekil 5.2’ de yer verilmiştir. Ayrıca, saf epoksiden üretilen kontrol numunesinin özellikleriyle yapılan karşılaştırma Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

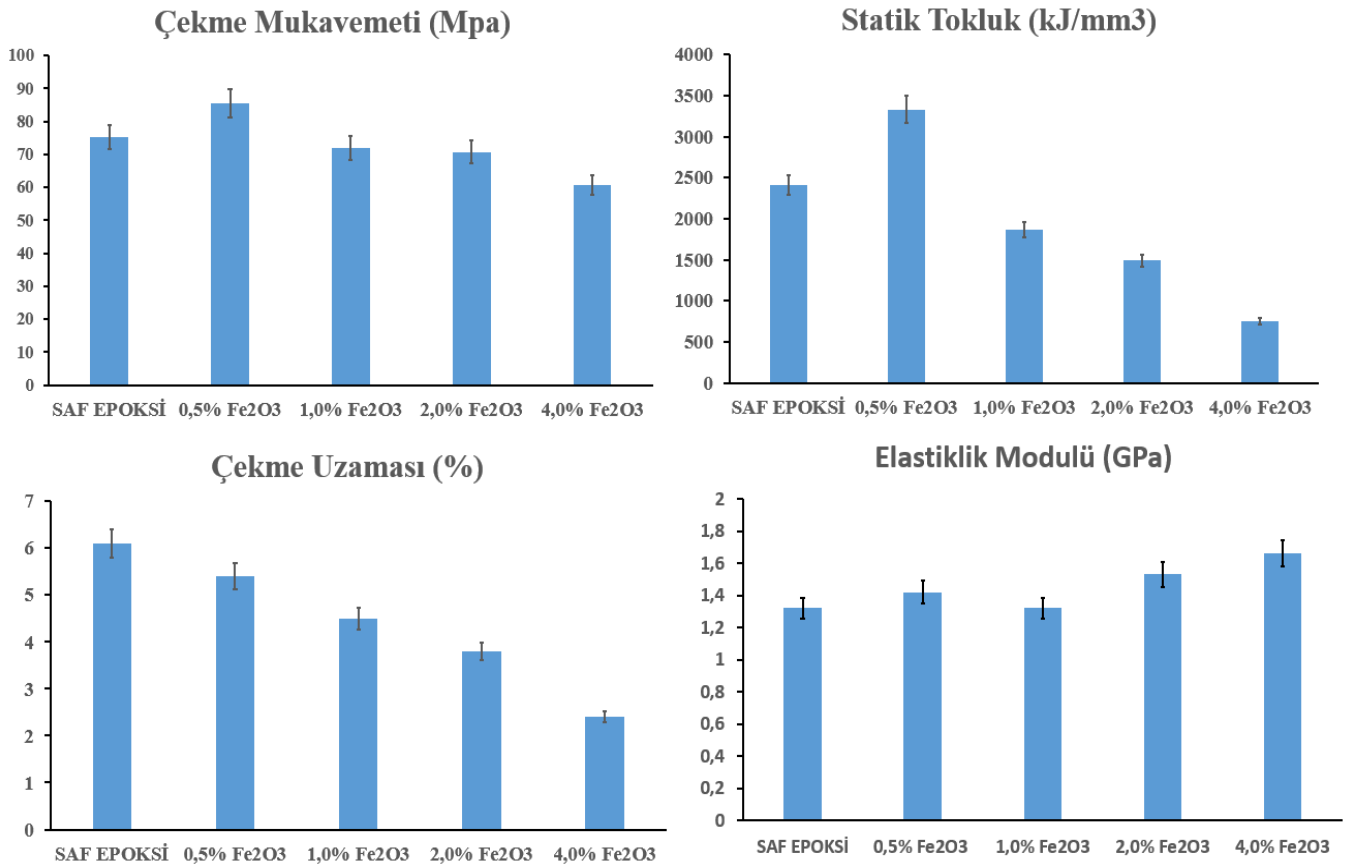


En yüksek çekme mukavemeti açısından incelendiğinde, en iyi sonuç, saf epoksiye göre %13,62 artış ile nano demir oksit ilave oranı %0,5 olan nanokompozit numunesinden elde edilmiştir. Öte yandan, nanopartikül ilave oranı arttıkça net bir düşüş görülmüştür. İlave oranı %1,0 ve %2,0 olan numunelerde düşüş sırasıyla %4,51 ve %5,98 iken en kötü değer %19,40 azalma ile %4,0 nano demir oksit partikülü ilaveli numuneden elde edilmiştir. Kullanılan epoksinin laminasyon türünde olması nedeniyle kürleşme süresinin uzun olması, ilave oranı arttıkça nanopartiküllerin birbirine yaklaşması sonucu Van der Waals kuvvetleri nedeniyle topaklanma (agglomera) yapma ihtimalinin de artması ve demir oksit nanopartikülün yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle çökelme yapmış olması sonucunda ilave oranı artıldıkça çekme dayanımı değerlerinde azalma görüldüğü düşünülebilir. Öte yandan %0,5 nanopartikül ilavesinde, istenilen homojen dağılımın sağlanmış olması ve matris/nanopartikül arayüzünün daha kuvvetli olması ve demir oksit nanopartikülünün çapraz bağ yoğunluğunu artıracak bir etki göstermesi sonucu çekme dayanımında artış görüldüğü söylenebilir. Çünkü çapraz bağ yoğunluğunun artması ile aynı zamanda camsı geçiş sıcaklığı değeri de artmıştır (Şekil 5.9.)



Şekil 5.1. Nano demiroksit ilaveli epoksi kompozitlerin çekme gerilmesi – birim şekil değıştirme grafiği

Statik tokluk değerleri açısından incelendiğinde ise yine saf epoksiye göre en iyi sonuç %37,94 artış ile %0,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir. Ancak, ilave oranı arttıkça tokluk değerlerinde düşüşler grlmştir ve en kötü sonuç yine %4,0 ilaveli kompozitte %68,98 azalma ile grlmştir.



Şekil 5.2. Nanokompozitlerin çekme mukavemeti, statik tokluk ve çekme uzaması değerleri

Çizelge 5.1. Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü ilaveli numunelerin mekanik özelliklerinin saf epoksiye göre değişimi

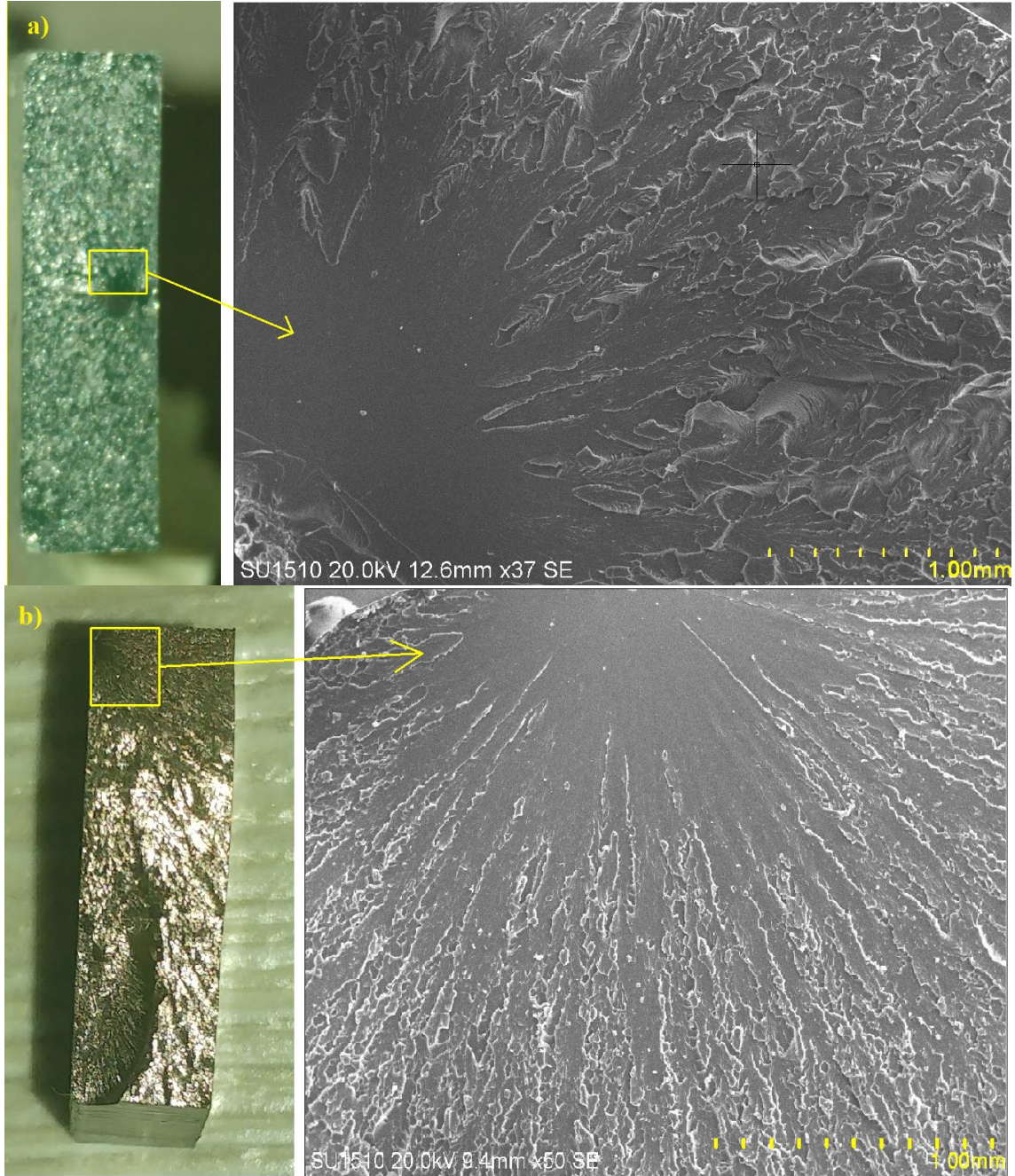
Numune	Maks. Çekme Mukavemeti		Statik Tokluk		Çekme Uzaması	
	(MPa)	% Değişim	(kJ/m <sup>3</sup> )	% Değişim	%	% Değişim
F0	75,30	—	2414,60	—	6,1	—
F1	85,52	+ 13,62	3330,63	+ 37,94	5,4	- 11,47
F2	71,90	- 4,51	1866,54	- 22,69	4,5	- 26,23
F3	70,79	- 5,98	1492,20	- 38,20	3,8	- 37,70
F4	60,69	- 19,40	748,91	- 68,98	2,4	- 60,65

Çalışmada kullanılan DGEBA epoksi reçinesinin mekanik özelliklerinin incelendiği diğer çalışmalarda çekme dayanımı genel olarak 50 – 80 MPa arasındaki değerlerde değişim göstermektedir (Chatterjee ve Islam, 2008; Gemi, Uludağ, Dispınar ve Tiryakioğlu, 2017; Gojny ve diğerleri, 2005; Jiang, Kuila, Kim, Ku ve Lee, 2013; Jumahat ve diğerleri, 2012; Shukla, Kasisomayajula ve Parameswaran, 2008; Zhou, Pervin, Lewis ve Jeelani, 2008) ve buna ek olarak ise üretici firma bu değeri 70 – 80

MPa aralığında verilmiştir. Çalışmada ise çekme deneyleri sonucunda çekme dayanım değeri ortalama 75,30 MPa olarak bulunmuştur. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülünün polimer matris modifiyesinde kullanıldığı çalışmalarda (Guo ve diğerleri, 2008; Kumar, 2017; PK Balguri, DGH Samuel, 2017; Gemi, Uludağ, Dispinar ve Tiryakioğlu, 2017; Pour ve Ghaemy, 2014; Sun, Fan, Wang, Liu ve Wu, 2015; Zabihi ve diğerleri, 2012) ilave oranı olarak çok farklı değerler kullanılmış olsa da çekme dayanımı için en iyi ilave oranı olarak %4 görülmektedir. Ancak, çalışmamızda en iyi ilave oranı olarak %0,5 oranı tespit edilmiştir. Bunun sebepleri olarak ise, birinci olarak farklı reçine, sertleştirici, nanopartikül geometrisi ve ikinci olarak ise üretimden doğan farklılıklar olarak düşünülebilir. Örneğin, benzer bir çalışmada (Zabihi ve diğerleri, 2012) en iyi ilave oranı olarak ağırlıkça %10 bulunmuştur ve çalışmaya bakıldığında kürleştirme aşamasının önce etüv fırında 90°C’de 2 saat ve devamında post kür işleminin 160°C’de 30 dakika olarak uygulandığı görülmektedir ki bu durum çalışmamızdan oldukça farklıdır. Ayrıca bahsedilen çalışmada nanopartikül ilaveli epoksi kompozitin çekme dayanımı 66 MPa civarlarında kalmıştır. Çalışmamızda ise hem ilave oranı %0,5 gibi düşük bir miktarda olup hem de çekme dayanımı diğer çalışmaya göre oldukça yüksektir. Öte yandan yine çalışmamıza benzer olan bir çalışma (Gemi ve diğerleri, 2017) incelendiğinde %0,5 ilave oranı kullanılmış olup çekme dayanımı olarak ise ortalama 85,92 MPa verilmiştir ki çalışmamızdaki değere oldukça yakındır ve iki çalışmada üretim koşulları ve kullanılan nanopartiküller benzerdir.

### **5.1.3. Nanokompozitlerin SEM analizi**

Saf epoksi ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli kompozitlerin çekme testleri sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin SEM aracılığıyla alınmış görüntüleri Şekil 5.3’ de verilmiştir.



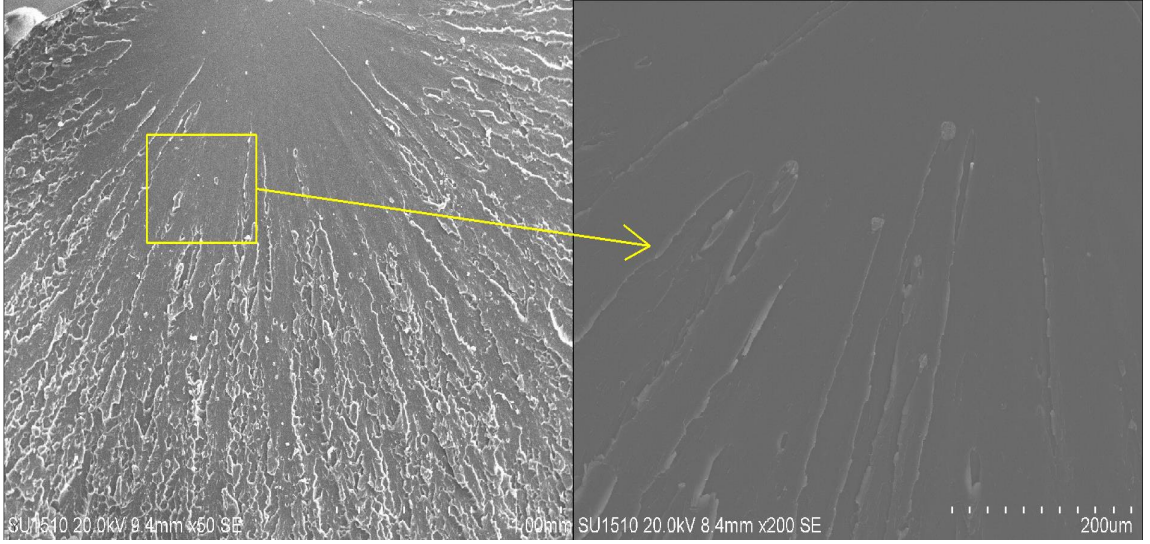
**Şekil 5.3.** Nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri a) Saf epoksi, b) %0,5 nanopartikül ilaveli

Çekme deneyi sonucunda termoset olan polimerlerin kırılma yüzeylerinde genel olarak üç farklı bölge oluşmaktadır. Termoset polimerde kırılma esnasında çatlak önce yavaş olarak büyürken sonrasında hızlanarak pürüzsüz denebilecek "mirror" olarak adlandırılan bir bölge oluşturur ve ardından bir geçiş bölgesi olan ayna bölgesine göre biraz daha pürüzlü olan "mist" denilen kısım meydana gelir ve devamında ise çatlakın ilerleme hızının en üst düzeye ulaştığı, diğer iki bölgeye göre çok daha pürüzlü olan

çatlaklardaki enerji yığılmalarının çatallaşma şeklinde olarak dağıldığı "hackle" bölgesi adı verilen alan mist bölgenin etrafını çevrelemektedir (Goyat ve diğerleri, 2015a; Zhao ve diğerleri, 2008a)

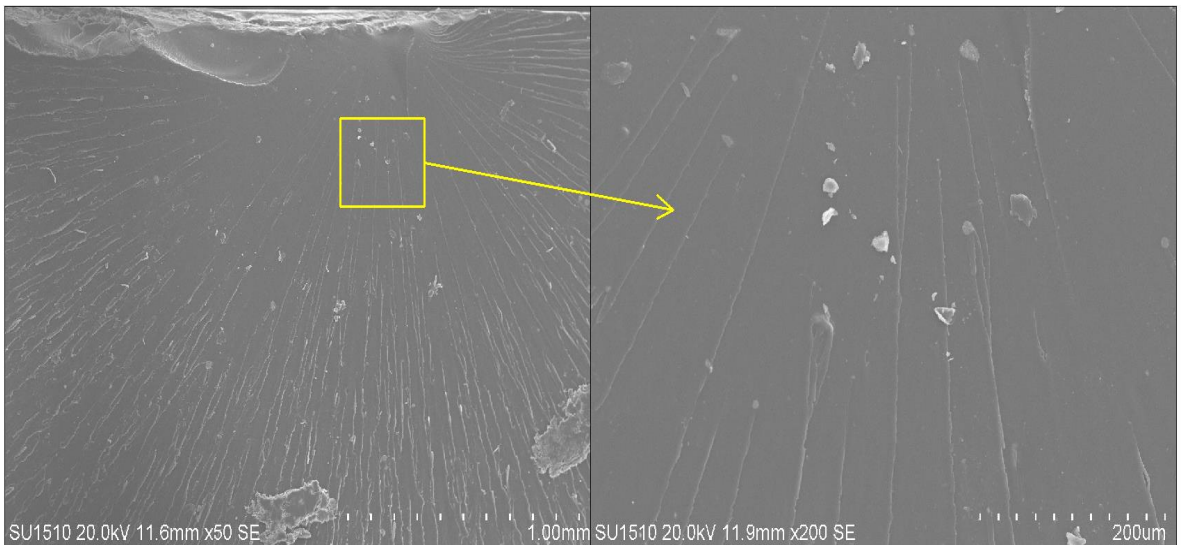
Şekil 5.3 incelendiğinde F0 numunesinde mirror bölgesinin nanopartikül ilaveli numunelere göre genel anlamda daha büyük olduğu görülmektedir. Yalnız F3 numunesinin mirror bölgesi F0 numunesinde bulunana benzemektedir. Mist bölgeler incelendiğinde ise çok net bir ayrım görülmemektedir. Bunlar ek olarak ise F0 ile F1 numunelerinin görüntülerine dikkat edilirse hackle bölgelerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. F0 numunesindeki plastik deformasyon bölgesinde gevrek kırılma yüzeyleri daha genişken, F1 numunesinde bu bölgeler daha ufak, daha sık ve daha yoğun bir şekilde dağılmıştır ve F1 numunesinde bu bölgenin F0'dakine göre daha fazla enerji yuttuğu söylenebilir. Elde edilen bu yüzeyler ve veriler ışığında epoksi polimer matrise ilave edilen nanopartikülün mekanik özelliklere çeşitli mekanizmalar ile etki ettiği söylenebilir (Dittanet ve Pearson, 2012; Hsieh ve diğerleri, 2010; Lauke ve Fu, 2013; Singh, Zhang ve Chan, 2002)

Epoksi matrise ilave edilen nanopartiküller bazı mukavemetlendirme mekanizmaları ile matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Çatlak saptırma, çatlak ucu pimleme, çatlak eğilmesi (bowing) ve çatlak uçlarının dallandırılması gibi çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır (Goyat ve diğerleri, 2015a; Zhao ve diğerleri, 2008b). Bu bağlamda epoksi nanokompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde bu mekanizmalardan bazılarının rastlanıldığı görülmektedir. Ayrıca, SEM görüntüleri bu mekanizmaları inceleyebilme amacı ile "mist" ve "hackle" bölgelerinden alınmıştır. Şekil 5.4'de nanopartiküllerin ilerleyen çatlağı, çatlak eğme mekanizmasıyla yönünü farklılaştırdığı görülmektedir



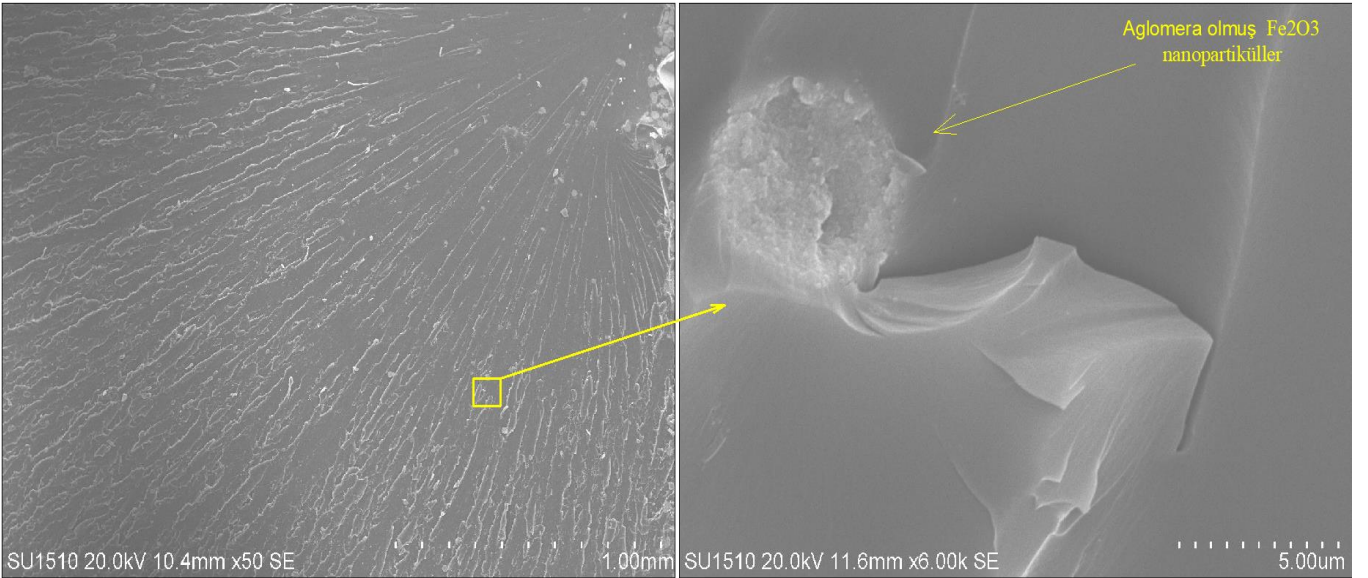
**Şekil 5.4.** Nanopartiküllerin sonucu meydana gelen çatlak eğme mekanizması

Diğer bir görüntüye bakıldığında (Şekil 5.5) ise başka bir mekanizma olan çatlak ucu pimleme (crack pinning) görülmektedir. Bu mekanizmaya göre çatlak ilerlediği sırada rijit partiküller arasında çatlağın ön kısmı eğilir bu sırada çatlak ise karşılaştığı nanopartikülün konumunda pimlenmiş gibi kalır. Çatlak ilerledikçe karşılaştığı nanopartiküller ile birlikte çatlağın boyuda uzamış olmaktadır. Aynı zamanda bu işlem sırasında ikincil çatlaklar meydana gelerek yeni kırılma yüzeyleri oluşur ve bu ikincil çatlaklarda nanopartikül engelini aştıktan sonra birleşip kuyruk şeklinde bir iz oluşturmaktadır. Sonuç olarak soğrulan enerji artar ve tokluk da artmış olur (Goyat, Suresh, Bahl, Halder ve Ghosh, 2015b; Zhao ve diğerleri, 2008b).



**Şekil 5.5.** Nanopartiküllerin sonucu meydana gelen çatlak pimleme mekanizması

Tüm bu mekanizmaların meydana gelmesinde ise partikül ve matris arasındaki ara yüzeyin kuvvetli olması büyük önem taşımaktadır (Dittanet ve Pearson, 2012). Fakat nanopartiküllerin aglomera olması durumunda ise nanopartiküllerin en önemli özelliklerinden biri olan spesifik yüzey alanının değiştiği, bunun sonucunda ise yüzeyinde bulunan atom sayısının azalıp nanopartikülün matris ile olan etkileşiminin zayıfladığı söylenebilir (Hanemann ve Szabó, 2010).  $Fe_2O_3$  nanopartikülü ilavesi arttıkça bu durumun meydana geldiğinin tespiti ise Şekil 5.7’de görülmüştür. %4 ilave oranına sahip olan epoksi matriste meydana gelen aglomera (Şekil 5.7) matris ile partikül ara yüzey bağlantısının zayıflatması sonucu tokluk değerinde düşüşe sebebiyet verdiği söylenebilir (Shi, Zhang, Rong, Wetzel ve Friedrich, 2004).



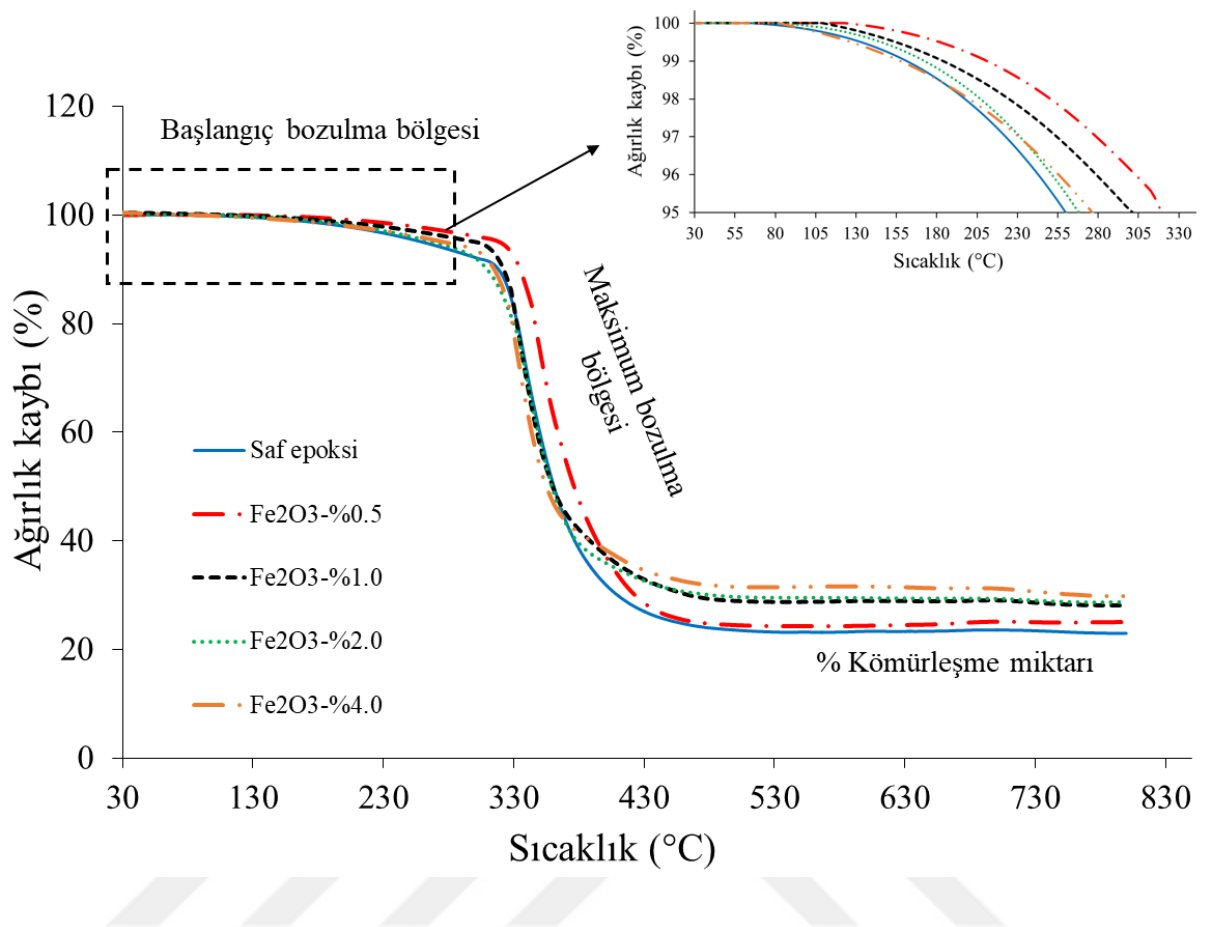
Şekil 5.7. Nanopartiküllerin miktarının artması sonucu meydana gelen aglomera olayı

#### 5.1.4. Nanokompozitin TGA analizleri

TGA analizlerinden termal kararlılık faktörleri, bozulma başlama sıcaklığı ( $T_{onset}$ ), istatistiksel ısı direnç indeks sıcaklığı ( $T_s$ ), yapıda ayrışmanın başladığı sıcaklık olan dekompozisyon başlama sıcaklığı ( $T_{d5}$ ), integral prosedür ayrışma sıcaklığı (IPDT) ve sıcaklık  $800^{\circ}C$  olduğunda kalan kömürleşme miktarı gibi parametreler elde edilebilmektedir (Jin, Ma ve Park, 2011; Jin ve Park, 2012; Park ve Jin, 2004).

Analiz sonucu elde edilen veriler sonucu oluşan grafik Şekil 5.8.’de ve TGA sonucu elde edilen sayısal sonuçlar Çizelge 5.2.’de verilmiştir.





Şekil 5.8. Saf epoksi ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli kompozitlerin TGA grafiği

Çizelge 5.2 Saf epoksi ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilaveli nanokompozitlerin TGA grafiklerinden elde edilen  $T_{onset}$ ,  $T_{d5}$ ,  $T_{d30}$ ,  $T_s$ , ve 800 °C'de kömürleşme miktarları

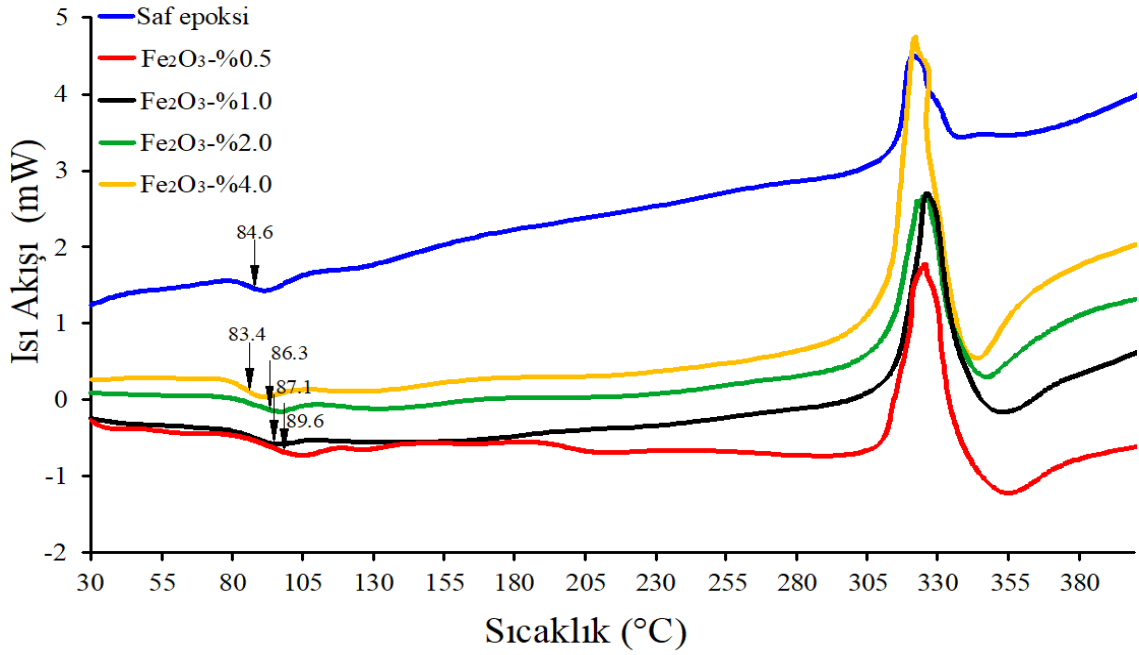
Numune	Deneysel sonuçlar				
	$T_{onset}$ (°C)	$T_{d5}$ (°C)	$T_{d30}$ (°C)	$T_s$ (°C)	800 °C'de kömürleşme miktarı (%)
F0	65.5	259.9	340.9	151.2	22.98
F1	122.4	319.2	353.9	166.6	25.03
F2	108.9	301.2	339.6	158.8	28.08
F3	78.9	267.7	340.1	152.4	28.82
F4	81.6	276.3	335.6	152.8	29.85

Veriler incelendiğinde açıkça görülmektedir ki  $T_{d5}$  değeri saf epoksiye göre bütün demir oksit nanopartikülü ilaveli kompozitlerde artış göstermiştir.  $T_{d5}$  değerinin bu şekilde düzenli bir artış göstermesinin sebepleri arasında matris içinde homojen dağılmış olması ve ayrıca nanopartiküllerin matris içinde meydana gelen ısı akışını yavaşlatıcı bir etki oluşturması olarak ifade edilmektedir (Goyat, Ray ve Ghosh, 2011; Goyat ve diğerleri, 2015a; Razlan, Akil, Helmi, Kudus ve Bisyrul, 2016). En iyi sonuç

ise %0,5 nanopartikül ilaveli nanokompozitte elde edilirken, ilave oranı arttıkça bu değerde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumun ise ilave oranının yükselmesiyle homojen dağılımın bozulması sonucu gerçekleştiği şeklinde düşünülebilir, çünkü matris içinde bulunan nanopartiküller epoksinin yapısında bulunan zincirlerin rastgele ayrılmasını engelleyerek bozulmanın başlangıcını geciktirici bir etki yapmaktadır (Y. Sun, Zhang, Moon ve Wong, 2004).

### 5.1.5. Nanokompozitlerin DSC analizleri

Nanokompozitlerin diferansiyel tarama kalorimetre analizi (DSC, Perkin Elmer Instruments) cihazı ile sıcaklığın 40°C'den 350°C'ye kadar 10°C/dk ısıtma hızında artırıldığı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen DSC eğrileri ise Şekil 5.9.'da verilmiştir.



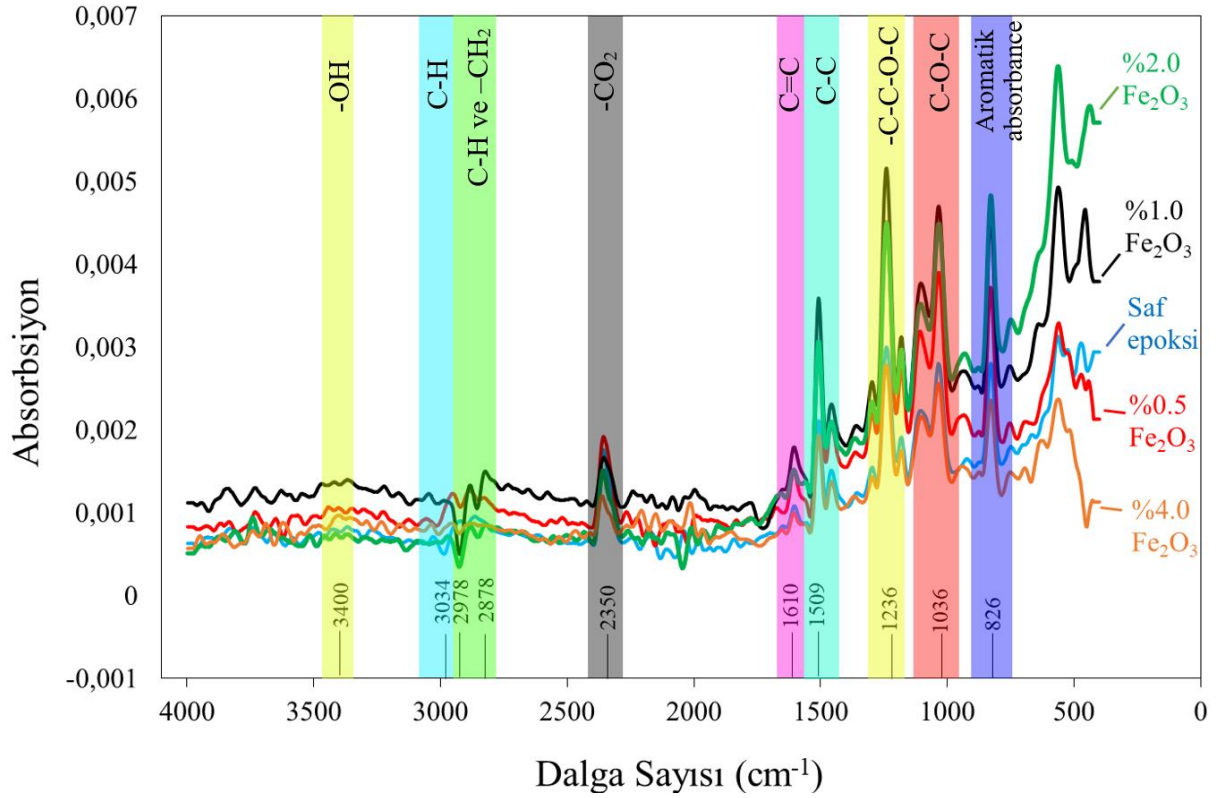
Şekil 5.9. Saf epoksi ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli kompozitlerin DSC eğrileri

Şekil 5.9. incelendiğinde, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü ilavesi azaldıkça camsı geçiş sıcaklığında ( $T_g$ ) da artışın meydana geldiği görülmektedir. Camsı geçiş sıcaklığı değerinin polimerlerdeki serbest boşluğun azalması sonucu artıyor olması öngörülmektedir ve bu durumunda nanopartikül ilavesinin çapraz bağ yoğunluğunu artırmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. Nanopartikül ilavesi ile serbest boşluğun

azalması sonucu nanokompozitlerde epoksi bağ zincirlerinin hareketi kısıtlanmış olacaktır. Mobilitenin azalması ise nanopartiküllerin matris sistemi içinde homojen dağılmış olduğunun bir göstergesi olabilir (Chisholm, Mahfuz, Rangari, Ashfaq ve Jeelani, 2005) Bu nedenle en iyi sonuçlar %0,5 demir oksit ilaveli nanokompozitlerden elde edildiği söylenebilir ve homojen dağılım bozuldukça camı geçiş sıcaklığı da azalmıştır.

### 5.1.6. Nanokompozitin FT-IR analizleri

Numunelerin bağ yapılarını inceleme amaçlı yapılan FT-IR analizi sonucu elde edilen FT-IR spektrumunu Şekil 5.10'de verilmiştir. Buna ek olarak ise IR analizinden elde edilen kimyasal grupların farklı titreşimleri ise Çizelge 5.3'de verilmiştir (Cholake, Mada, Raman, Bai ve Zhao, 2014; González-González, Cabanelas ve Baselga, 2012; Jana ve Zhong, y.y.; Madhup, Shah ve Wadhvani, 2015).



Şekil 5.10. Saf epoksi ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül ilaveli kompozitlerin FT-IR spektrumları

**Çizelge 5.3** Saf epoksi ve epoksi nanokompozitlerin farklı kimyasal grupların gerilim titreşimleri

Dalga sayısı (Bantlar) (cm <sup>-1</sup> )	Karakteristik Grup
3340-3500	Hidroksil (-OH) gerilmesi
3060	Oksiran halkasının C-H simetrik gerilmesi, N-H gerilmesi
2960-2870	-CH <sub>2</sub> ve CH aromatik ve alifatik C-H gerilmesi
2349	-CO <sub>2</sub>
1607	Aromatik halkaların C=C gerilmesi
1509	Aromatik halkaların C-C gerilmesi
1236	-C-C-O-C gerilmesi
1036	Eter grupların C-O-C gerilmesi
828	Aromatik absorbance

FT-IR analizi sonucu oluşan spektrum incelendiğinde, net bir şekilde görülmektedir ki yeni pikler oluşmamıştır. Yeni piklerin oluşmaması, nanopartikül ve epoksi matris arasında kimyasal bir etkileşimden ziyade fiziksel bir etkileşim olduğunun göstergesi olarak belirtilmektedir (Barletta, Vesco, Puopolo ve Tagliaferri, 2016).

Saf epoksi ile nanopartikül ilaveli nanokompozitler karşılaştırıldığında absorpsiyon ve titreşim pik yoğunluklarının farklı olduğu ve bantlarda kaymalar olduğu görülmektedir. Bu durum epoksi matris sistemi ile nanopartiküller arasında bir etkileşim olduğunu ifade eder. Absorpsiyon yoğunluğundaki artış nanopartiküllerin epoksi matris ile olan etkileşimi sonucu meydana gelmektedir (Dhoke, Mangal Sinha ve Khanna, 2009). Bu çalışmada ise nanokompozitlerde absorpsiyon yoğunluğu %0,5 – %1 ve %2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü ilavelilerde artmışken %4 nanopartikül ilaveli nanokompozitlerde bir düşüş olmuştur. Düşüş olması durumu ise ilave oranının artmasıyla meydana gelen aglomeranın kürleşme aşamasında otokatalitik etkiyi azaltmasına bağlanabilir (Rajabi, Marzban ve Derakhshan, 2014).

## 5.2. Tabakalı Kompozitlerin Yakma Deneyi ve Mekanik Özellikleri

### 5.2.1. Tabakalı kompozitlerin yakma deneyi

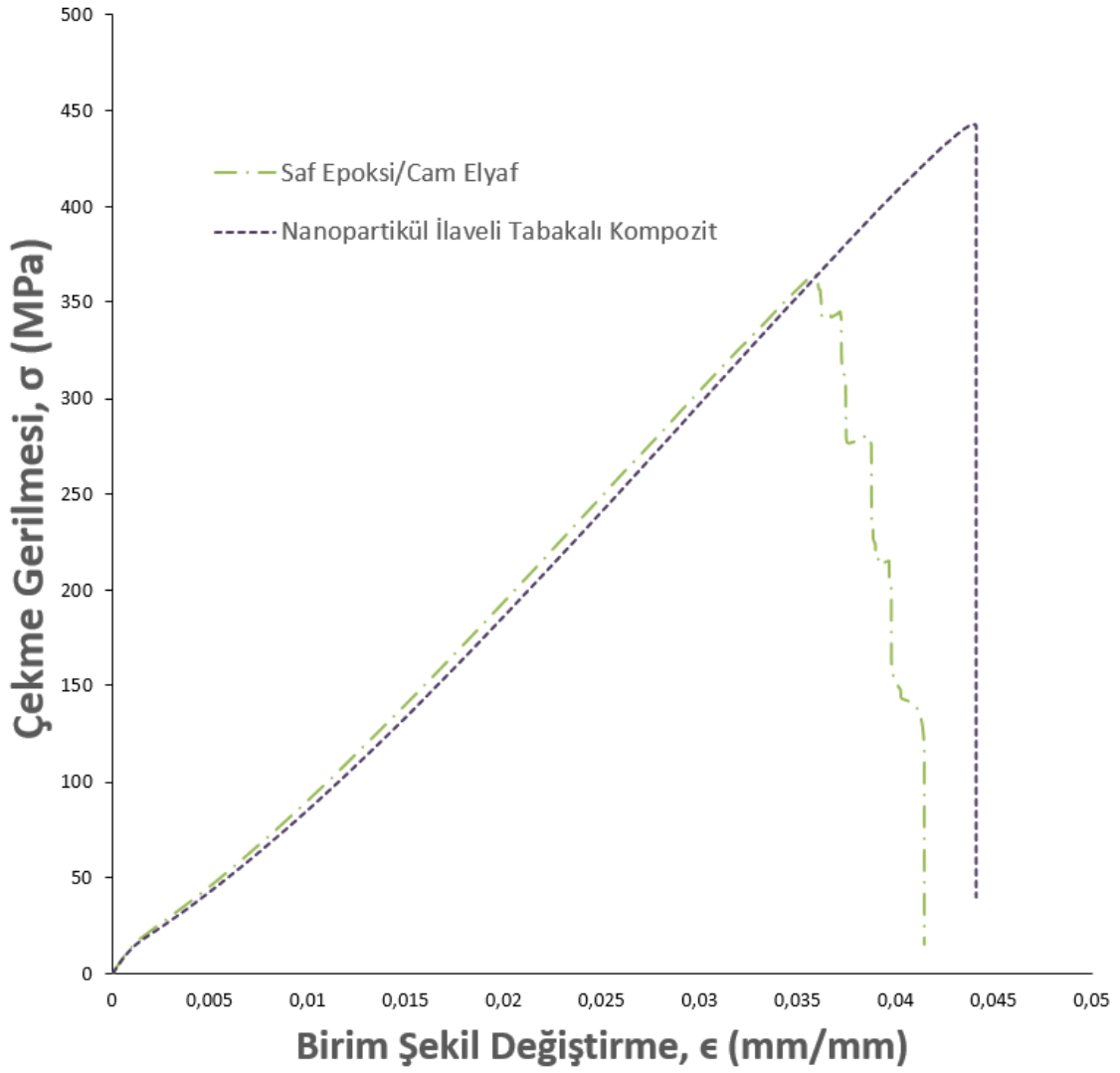
Levha kompozitlerin elyaf hacim oranını belirlemek için ASTM D3171 standardına göre 25mm x 25mm boyutlarında ki numuneler kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Numuneler yakma işleminden önce ve sonrasında tartılmıştır. Buna

göre elde edilen değerler ile elyaf ve kompozitin özkütelleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Elyaf hacim oranı ise %25 olarak tespit edilmiştir.

### 5.2.2. Tabakalı kompozitlerin çekme testi

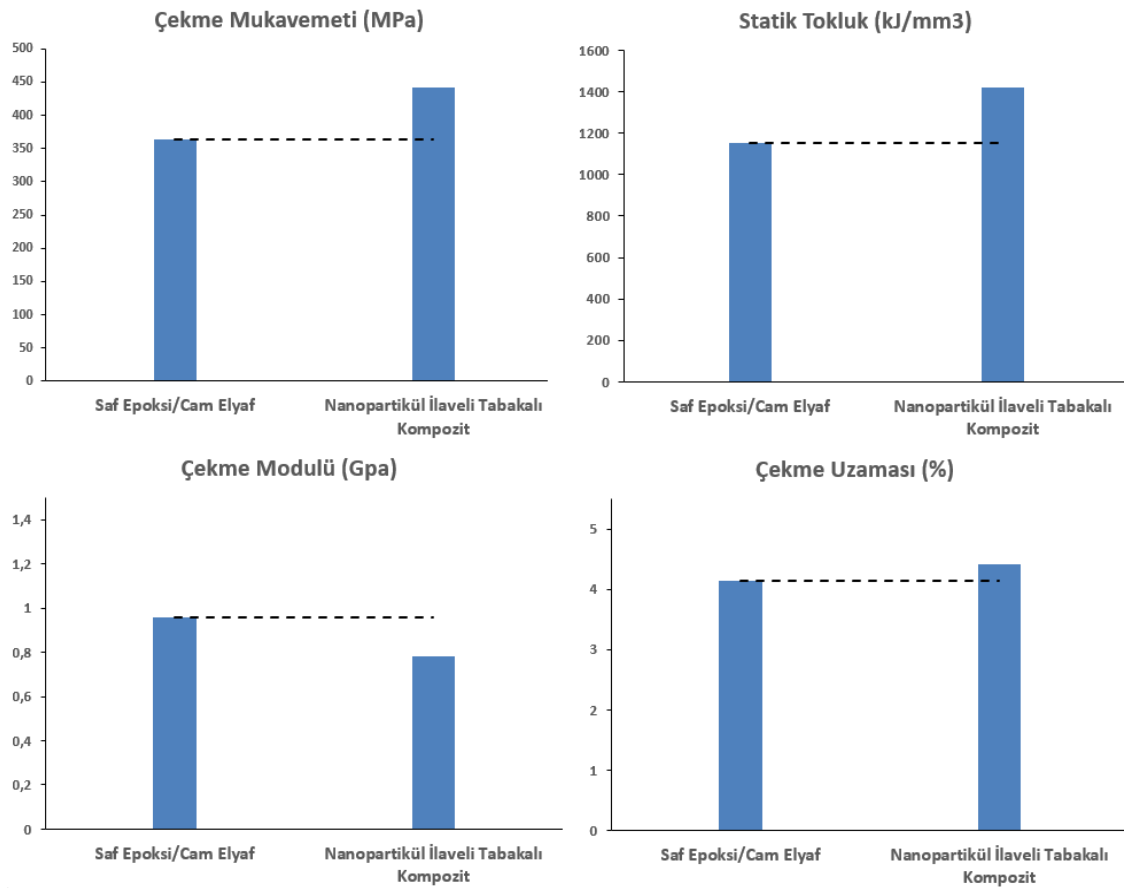
Tabakalı kompozit numunelerin çekme testleri sonucu elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri ve makro görüntüler Şekil 5.11’de verilmiştir. Uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen veriler ile çekme mukavemeti, yüzde uzama ve tokluk değerlerinin bulunduğu grafiklere Şekil 5.12’ de yer verilmiştir. Ayrıca, saf epoksiden üretilen kontrol numunesinin özellikleriyle yapılan karşılaştırma Çizelge 5.4’ de verilmiştir.

En yüksek çekme mukavemeti açısından incelendiğinde, saf epoksiye göre %21,34 oranında bir artış ile elde edilmiştir. Nanopartikülün bu bağlamda matrisi modifiye ederek aynı bulk numunede olduğu gibi cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitin de matrisini iyileştirmiş ve çekme mukavemetinin iyileşmesine yardımcı olmuştur. Çekme mukavemeti açısından elde edilen iyileştirmenin istenilen homojen dağılımın sağlanmış olması, matris/nanopartikül arayüzünün daha kuvvetli olması ve demir oksit nanopartikülünün çapraz bağ yoğunluğunu artıracak bir etki göstermesi ile iyileştirmenin sağlandığı söylenebilir.



**Şekil 5.11.** Nano demiroksit ilaveli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi – birim şekil değişirme grafiği

Statik tokluk ve yüzde uzama değerleri açısından incelendiğinde ise yine saf epoksiye göre sırasıyla %23,082 ve %6,28 oranlarında artışlar elde edilirken, çekme modülü açısından %18,75 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.12.** Tabakalı kompozitlerin çekme mukavemeti, statik tokluk, çekme uzaması ve elastiklik modülü değerleri

**Çizelge 5.4.** Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü ilaveli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi

Numune	Çekme Mukavemeti		Statik Tokluk		Çekme Uzaması		E. Modülü	
	(MPa)	% Değişim	(kJ/m <sup>3</sup> )	% Değişim	%	% Değişim	GPa	% Değişim
Nanopartikül	442,56	+21,43	1419,91	+ 23,082	4,41	+ 6,28	0,78	- 18,75
Saf Epoksi	364,44	-	1153,62	-	4,14	-	0,96	-

Literatürde aynı malzemelerin kullanıldığı benzer çalışmalara fazla rastlanmamıştır. Bir çalışmada yine benzer olarak matris için DGEBA türü epoksi, ilave elemanı olarak nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü ve takviye olarak ise cam elyaf kullanılmıştır (Prakash ve Rajadurai, 2016). Bu çalışmada ise üretilen tabakalı kompozitlerin mekanik, termal ve dielektrik özellikleri incelenmiştir. Mekanik açıdan ise benzer olarak çekme ve üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Ancak, Prakash ve Rajadurai'nin çalışmasında çekme özelliklerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu durumun ise demir oksit nanopartikülünün epoksinin orijinal yapısını etkilemesi ve reçinenin daha kırılğan

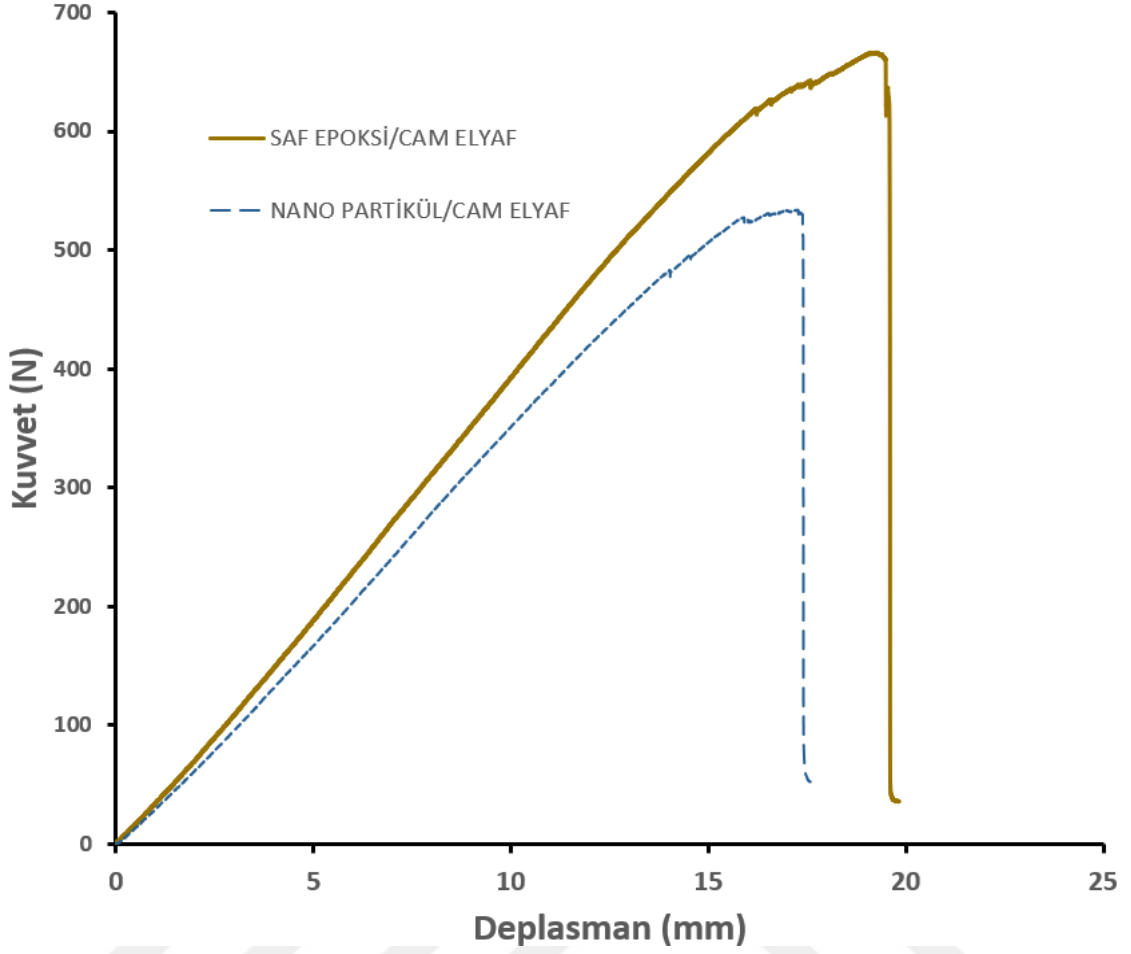
duruma gelmesi şeklinde yorumlamıştır. Bu farklılığın oluşmasının da ise üretim koşullarının farklılığından kaynaklandığı düşünülebilir. Belirtilen çalışmada el yatırma ile kompozitler üretilirken, tez çalışmasında vakum torbalama yardımı ile daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Vakum torbalama yöntemiyle daha homojen bir yapı elde etmek mümkün iken el yatırmada reçinenin iyi dağılımı sağlanamayabilir ve bunun sonucu olarak malzeme içinde hava kabarcıkları kalır ve artık gerilmeler oluşturabilir. Ayrıca kullanılan nanopartikül iyi bir şekilde dağıtılmadı ise, yine topaklanma etkisi ile artık gerilmeler meydana gelebilir. Oluşan bu artık gerilmeler ise malzemenin performansında düşüşe neden olabilir. Öte yandan matris ile fiber arayüzünün zayıf olması durumunda malzemenin dayanımında düşüşe neden olmuş olabilir ve bu durumun oluşmasında nanopartikülün matris içinde iyi dağıtılmaması sonucu ortaya çıkan topaklanma etkili olduğu söylenebilir.

### **5.2.3. Tabakalı kompozitlerin üç – nokta eğme testi**

Tabakalı kompozit numunelerin üç – nokta eğme testleri sonucu elde edilen kuvvet - deplasman grafikleri Şekil 5.13’de verilmiştir. Uygulanan üç – nokta eğme deneyi sonucu elde edilen veriler ile eğme mukavemeti ve eğme modülü değerlerinin bulunduğu grafiklere Şekil 5.14’ de yer verilmiştir. Ayrıca, saf epoksiden üretilen kontrol numunelerin özellikleriyle yapılan karşılaştırma Çizelge 5.5’ de verilmiştir.

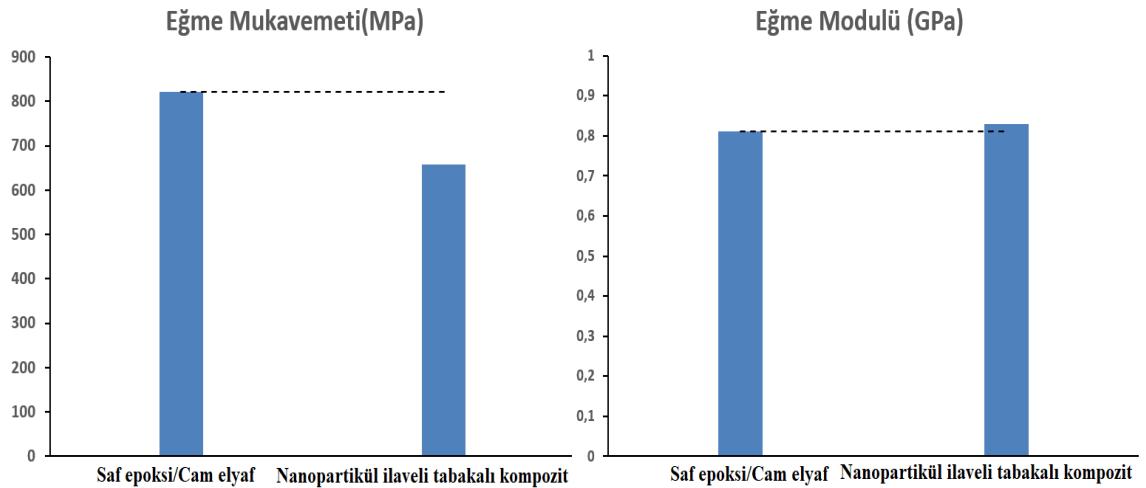
Eğme mukavemeti açısından incelendiğinde, saf epoksiye göre %24,79 oranında bir düşüş elde edilmiştir. Nano demir oksit partikülünün ilave edilmesi sonucu epoksi matris kırılğan bir yapıya bürünmüştür. Eğme testi esnasında ortaya çıkan basma ve çekme gerilmelerinde, nanopartikülün çekmeye etkisi olumlu iken malzemeyi kırılğan hale getirdiği için basma dayanımı yönünden zayıflattığı ve bunun sonucu olarak bu azalmanın gerçekleştiği düşünülebilir.





Şekil 5.13. Nanopartikül ilaveli ve ilave edilmemiş tabakalı kompozitlerin kuvvet – deplasman grafikleri

Nanopartikül ilaveli ve ilavesiz olan tabakalı kompozitler eğme modülü açısından incelendiğinde %2,5 gibi az bir oranda artış görülmüştür. Bu artışın sebebi olarak ise nanopartikülün epoksinin çapraz bağ yoğunluğunu artırarak modifiye etmesi düşünülebilir.



Şekil 5.14. Tabakalı kompozitlerin eğme mukavemeti ve eğme modülü değerleri

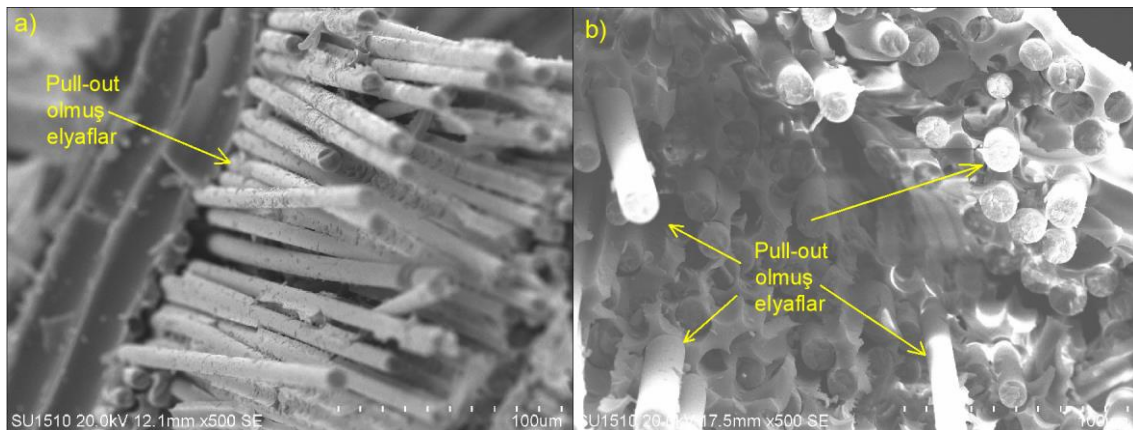
**Çizelge 5.4.** Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü ilaveli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi

Numune	Eğme Mukavemeti		Eğme Modülü	
	(MPa)	% Değişim	GPa	% Değişim
Nanopartikül	657,43	- 24,79	0,83	+2.5
Saf Epoksi	820,41	-	0,81	-

Saf epoksi malzemeye göre meydana gelen bu düşüşlerin ikinci bir sebebi olarak ise üretim hataları dikkate alınmalıdır. Eğme numunelerinin oluşturulması için üretilen levha kompozitte nanopartikülün iyi dağıtılamaması veya elyaf tarafından nanopartiküllere filtreleme uygulanması sonucu aglomera meydana gelmiş olabilir. Bunun sonucunda ise malzeme içinde artık gerilmeler oluşmuş ve malzeme saf epoksi matrisli sisteme göre çok daha kırılğan hale gelmiştir. Ayrıca bu aglomera olmuş nanopartiküller, nano boyuta göre yüzey alanını azaltması ile epoksi/elyaf arayüzünün zayıflamasına neden olarak da dayanımı düşürmüş olduğu söylenebilir (Nayak, Dash ve Ray, 2014).

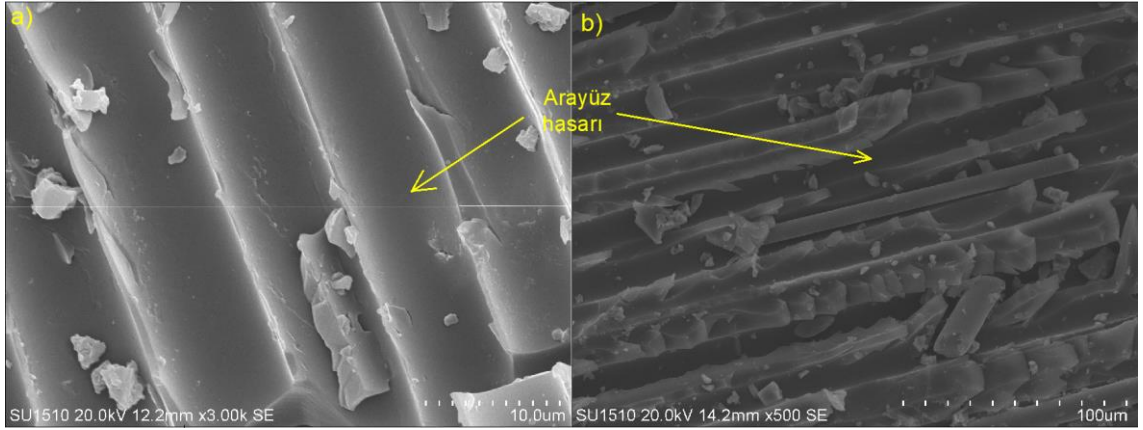
#### 5.2.4. Tabakalı Kompozitlerin SEM Analizleri

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü ilave edilmiş ve saf epoksi matris ile üretilmiş cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin SEM görüntüleri yapılan deneyler sonucu oluşan kırılma yüzeylerinden elde edilmiştir (Şekil 5.15)



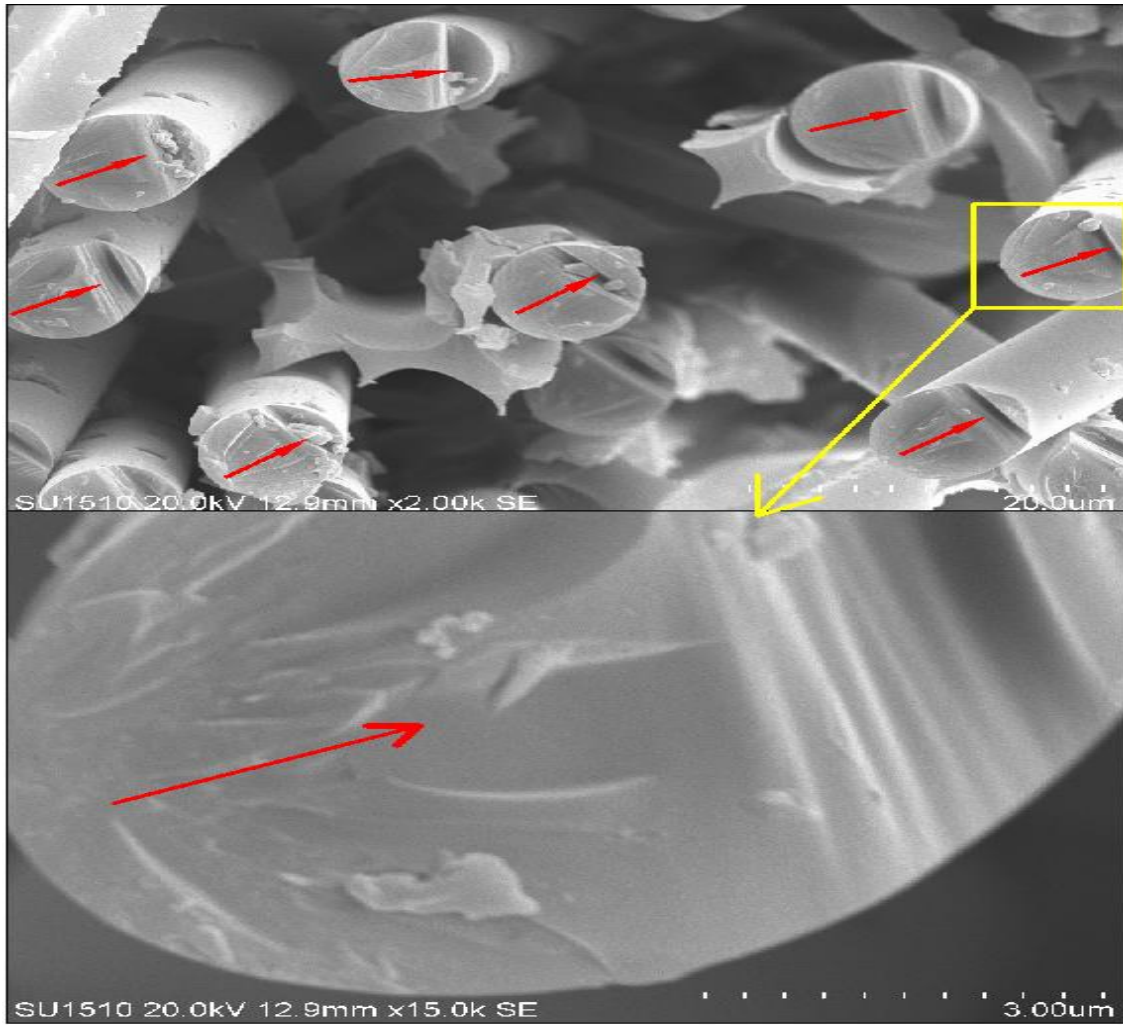
**Şekil 5.15.** Tabakalı kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Nanopartikül ilaveli kompozitler, b) Nanopartikül ilavesi olmayan kompozitler

Elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde meydana gelen delaminasyon, debonding, elyaf matris arayüzü ayrılması (fiber pull-out) veya elyaf kırılması gibi hatalar bulunmaktadır. Bu tür hasar mekanizmalarının meydana gelmesinde elyaf/matris ara yüzeyinin önemi büyüktür. Eğer arayüz yeterince kuvvetliyse debonding zorlaşacak ve elyaf hasarından önce bir miktar kısıtlanacaktır. Uygulanan gerilme elyafın dayanımına ulaştığına hasar meydana gelecektir. Bu nedenle, kuvvetli arayüzde gevrek kırılmaya benzer şekilde düz bir yüzey oluşmaktadır ve elyaflar aynı düzleme yakın olarak hasara uğrayacaklardır (Greenhalgh, 2009).  $Fe_2O_3$  nanopartikül ilaveli tabakalı kompozitlerde (Şekil 5.15 a), pull-out olmuş elyaflar aynı düzleme yakın şekilde hasara uğrarken, saf epoksili kompozitlerde (Şekil 5.15 b) elyaflar arayüzün zayıf olması sonucu farklı hizalardan hasara uğramışlardır.



**Şekil 5.16.** Tabakalı kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Nanopartikül ilaveli kompozitler, b) Nanopartikül ilavesi olmayan kompozitler

Yine görüntülerden Şekil 5.16 a ile b karşılaştırıldığında, nanopartikül ilaveli kompozitlerin matris/elyaf ara yüzeyi daha iyi olduğundan oluşan yüzey düzgün iken, saf epoksi matrisli kompozitte ara yüzeyin zayıf olması sonucu matris gelen yükü elyafa taşıyamamış ve daha pürüzlü bir yüzey oluşarak hasar meydana gelmiştir.

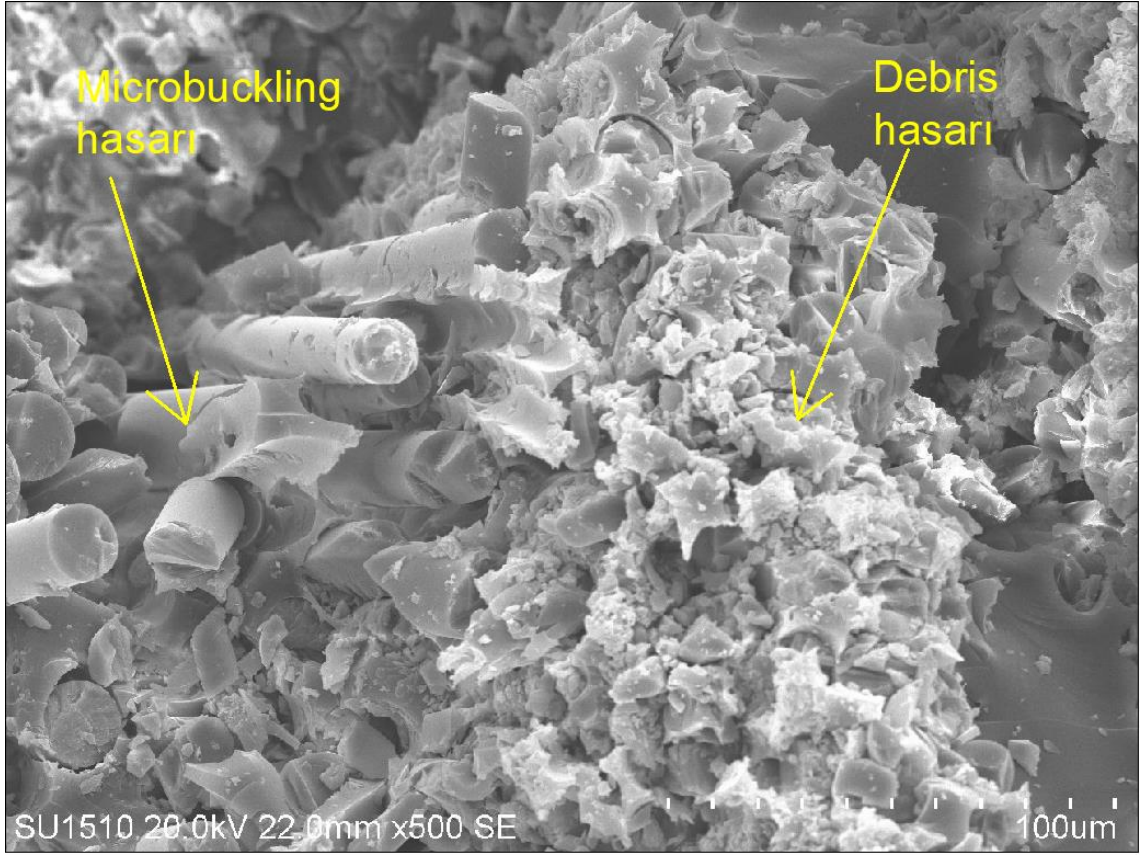


**Şekil 5.17.** Tabakalı kompozitlerde elyaf üzerinde meydana gelen bölgeler (kırmızı oklar çatlak ilerleme yönünü göstermektedir).

Şekil 5.17.' de ise çekme gerilmesi sonucu elyaf takviyeli kompozitlerde meydana gelen "mirror", "mist" ve "hackle" adlı bölgeler net bir şekilde görülmektedirler (Greenhalgh, 2009). Çatlağın elyaf üzerinde başlangıç bölgesi pürüzsüz iken (mirror bölgesi) devamında daha pürüzlü bir yüzey oluşmakta ve elyafların kopması şeklinde sonuçlanmaktadır.

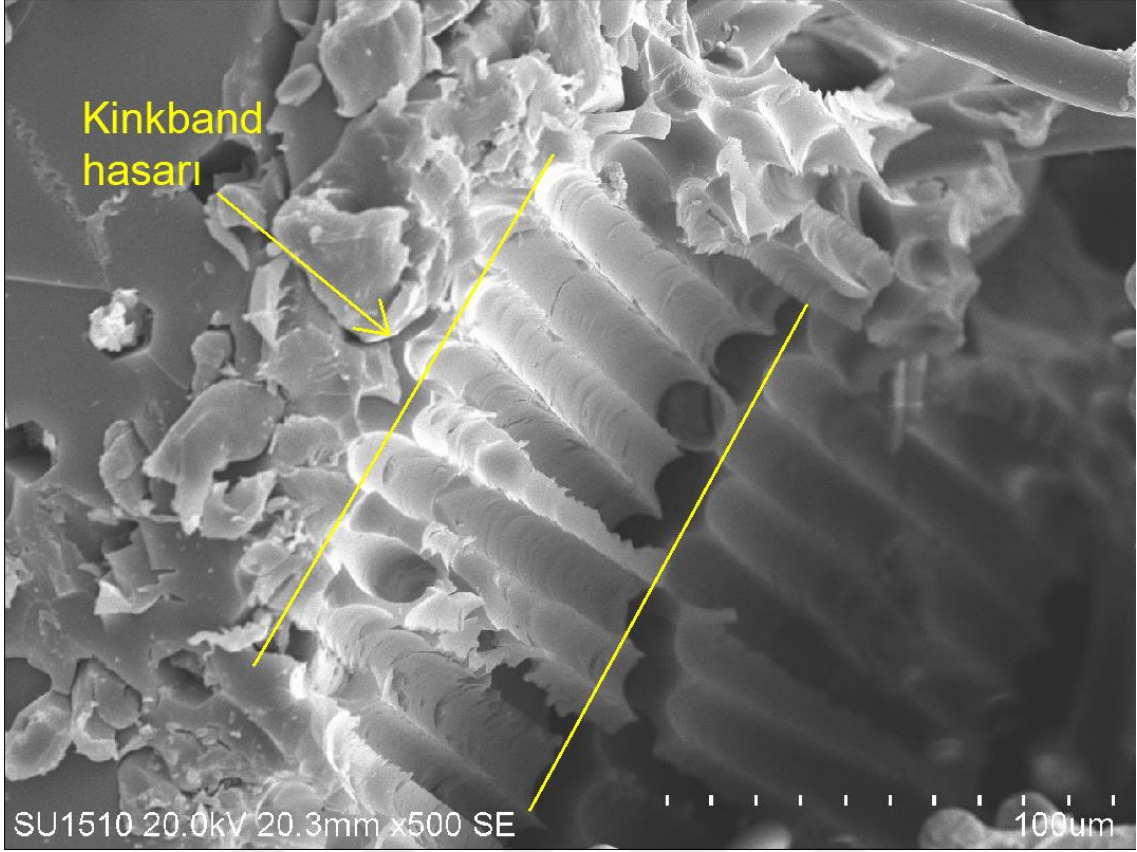
Şekil 5.18'de eğme testi sonucunda meydana gelen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Eğme deneylerinde meydana hem çekme hem de basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu nedenle eğme numunelerinin kırılma yüzeylerinde iki gerilme sonucu oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Eğme deneyi esnasında oluşan bu iki gerilme arasında tarafsız eksen oluşmaktadır ve çekme hasarı eğme

gerilmesine maruz kalmış numunede konveks kısımda oluşurken bası gerilmesi sonucu oluşan hasar ise konkav kısımda kalmaktadır (Greenhalgh, 2009).



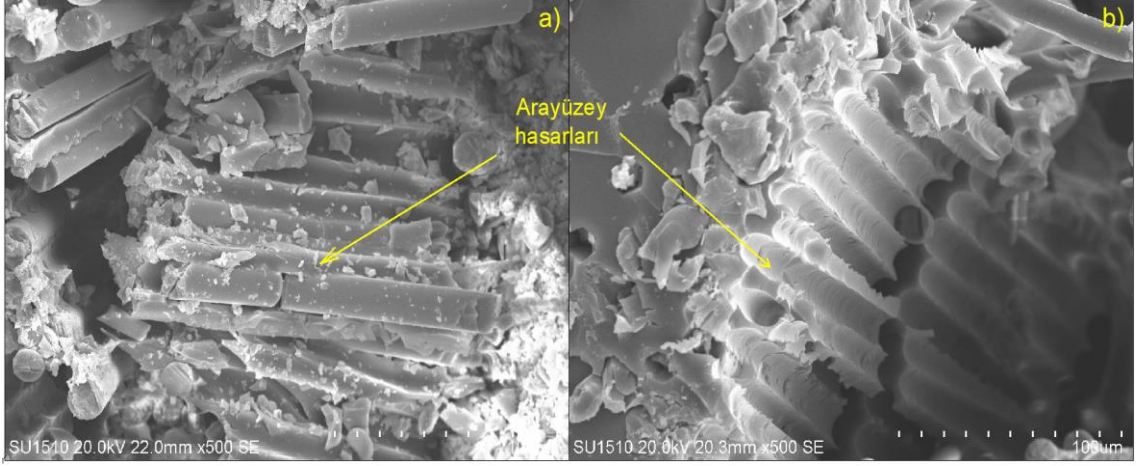
Şekil 5.18. Tabakalı kompozitlerde eğme deneyi sonucu oluşan hasar mekanizmaları

Eğme deneyi esnasında oluşan basma gerilmesi ile "microbuckling" ve "debris" adı verilen hasarlar (Şekil 5.18) nanopartikül ilaveli kompozitlerde, özellikle debris mekanizması, daha çok rastlanmıştır (Greenhalgh, 2009).



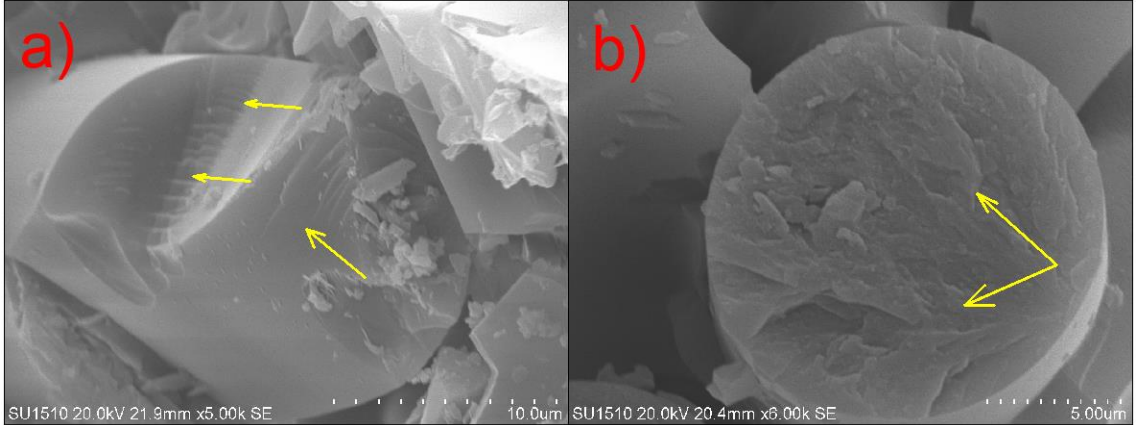
**Şekil 5.19.** Tabakalı kompozitlerde eğme deneyi sonucu oluşan hasar mekanizması

Öte yandan yine bası gerilmesi sonucu oluşan "kinkband" (Şekil 5.19) adı verilen hasara rastlanmıştır (Greenhalgh, 2009). Bası gerilmesi sonucu oluşan hasarların nanopartikül ilaveli kompozitlerde daha fazla meydana gelmesi,  $Fe_2O_3$  nanopartikülünün epoksi matrisi bası gerilmesine karşın zayıflattığı söylenebilir ve bunun sonucu olarak üç nokta eğme testi sonucu saf epoksi matrisli kompozitlerin dayanımının daha yüksek çıkması normal karşılanabilir. Demir oksit kullanıldığı başka bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve demir oksit nanopartikülü ilavesi sonucu eğme dayanımında düşüş görülmüştür (Prakash ve Rajadurai, 2016).



**Şekil 5.18.** Tabakalı kompozitlerde eğme deneyi sonucu oluşan hasar mekanizmaları

Şekil 5.20 a ve b görüntüleri incelendiğinde, iki tür kompozitte de arayüz hasarları görülmektedir. Yine saf epoksi matrisli kompozitin arayüz hasarı daha temiz iken nanopartikül ilave edilmiş kompozitte ileri düzey hasar meydana gelmiş ve yüzey debris ile kaplanmıştır.



**Şekil 5.21.** Tabakalı kompozitlerde eğme deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri, a) Nanopartikül ilaveli tabakalı kompozit, b) Saf epoksi matrisli tabakalı kompozit

Eğme deneyi sonucunda oluşan elyaf kırılma yüzeyleri ise Şekil 5.21’de verilmiştir. Nanopartikül ilaveli kompozitte bulunan elyaf kırılma yüzeyinde ok yönünde ilerleyen çatlak basma gerilmesi etkisi sonucu açılı bir şekilde kırılırken, saf epoksi matrisli kompozitte çekme gerilmesi etkisi ile literatürde belirtilen mirror, mist ve hackle bölgeleri görülmüştür (Greenhalgh, 2009). Ayrıca bası gerilmesinden daha fazla etkilenmiş olan nanopartikül ilaveli kompozitin elyaf kırılma görüntüsünde, yine bası gerilmesi nedeniyle oluşan debris, çatlak başlangıç kısmında görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasının amacı demir oksit nanopartikülünün epoksi/cam elyaf tabakalı kompozitinin mekanik özelliklerine etkisini incelemektir.

Tezin çalışmasının amacı doğrultusunda öncelikle epoksi matrise en uygun demir oksit nanopartikül ilave oranı belirlenmiş ve çekme testi sonuçlarında bu oran ağırlıkça %0,5 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise bu oran kullanılarak cam elyaf takviyeli nanopartikül ilaveli tabakalı kompozitler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Sonrasında epoksi/cam elyaf ve epoksi/nanopartikül/cam elyaf sistemlerinden oluşan tabakalı kompozitler mekanik özellikler açısından karşılaştırılmak üzere çekme ve 3-nokta eğme deneyleri uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar ise maddeler halinde şöyledir;

- %0,5 demir oksit nanopartikül ilavesi epoksi matrisin çekme dayanımını %13,62 ve statik tokluğunu %37,94 artırmıştır.
- Ağırlıkça nanopartikül ilavesi oranı arttıkça çekme dayanımı ve tokluk değerlerinde düşüşler yaşanmıştır. Çekme dayanımı açısından %1,0 ve %2,0 ilave oranlarında düşüşler %4,51 ve %5,98 iken en kötü değer %19,40 azalma ile %4,0 nanopartikül ilaveli kompozitte meydana gelmiştir. Statik tokluk değerinde ise %68,98 azalma ile ağırlıkça %4,0 nanopartikül ilaveli kompozitte gözlemlenmiştir.
- Saf epoksi ile nanopartikül ilaveli epoksi kompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, partikül ilaveli kompozitin kırılma yüzeyinde daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.
- Demir oksit nanopartikül ilavesinin cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi altında mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili iken, eğme gerilmesinde bası gerilmesinin daha ağır basması sonucu saf epoksi matrisli kompozite göre daha zayıf bir dayanım göstermiştir.



- Çekme testi sonucu saf epoksiye göre çekme dayanımında %21,43, statik tokluk değerinde %23,082 ve çekme uzamasında %6,28 oranında artış sağlanmıştır. Öte yandan çekme modülünde %18,75'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.
- Üç nokta eğme testi sonucu ise saf epoksiye göre eğilme mukavemetinde %24,79 oranında düşüş elde edilirken, eğilme modülü değerinde %2,5 oranında bir artış elde edilmiştir. Bu artışın temel sebebi olarak ise nanopartikülün epoksinin çapraz bağ yoğunluğunu artırması olarak düşünülmektedir.

## 6.2. Öneriler

Çalışmanın sonuçları göz önüne alındığında şu önerilerde bulunulabilir;

- Kütlesel numune üretimi esnasında kullanılan epoksinin viskozitesinin laminasyona uygunluğu nedeniyle viskozitesinin çok düşük olması demir oksit nanopartiküllerinin çökmesine neden olmuştur. Bu durum demir oksit nanopartikülünün manyetikliğinden faydalanarak, üretimi manyetik bir alanda gerçekleştirerek iyileştirilebilir.
- Çökme sorununu engellemek için ayrıca daha yüksek viskoziteli ve laminasyona uygun bir reçine belirlenebilir.
- Kullanılan demir oksitin epoksi matrisle daha uyumlu hale gelebilmesi için yüzeyi modifiye edilmiş nanopartiküller kullanılabilir. Matris/elyaf arayüzü bu sayede daha kuvvetlendirilebilir ve eğilme mekanik özelliklerinde de artışlar elde edilebilir.
- Demir oksit nanopartikülü manyetik özellikte olduğu için üretilen tabakalı kompozitlerde elektromanyetik kalkanlama özelliğine de etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Bal, S. ve Samal, S. S. (2007). Carbon nanotube reinforced polymer composites—A state of the art. *Bulletin of Materials Science*, 30(4), 379–386. doi:10.1007/s12034-007-0061-2
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite Materials and Processing* (C. 19). CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.
- Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. ve Bhatnagar, N. (2016a). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89, 1–13. doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.10.014
- Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. ve Bhatnagar, N. (2016b). Low velocity impact response of 2D and 3D Kevlar/polypropylene composites. *International Journal of Impact Engineering*, 93, 136–143. doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.02.016
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to Composite Material Design*. CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.
- Brunbauer, J., Stadler, H. ve Pinter, G. (2015). Mechanical properties, fatigue damage and microstructure of carbon/epoxy laminates depending on fibre volume content. *International Journal of Fatigue*, 70, 85–92. doi:10.1016/j.ijfatigue.2014.08.007
- Bulut, M. (2017). Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets. *Composites Part B: Engineering*, 122, 71–78. doi:10.1016/j.compositesb.2017.04.013
- Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International. ASM international.
- Carolan, D., Kinloch, A. J., Ivankovic, A., Sprenger, S. ve Taylor, A. C. (2016). Mechanical and fracture performance of carbon fibre reinforced composites with nanoparticle modified matrices. *Procedia Structural Integrity*, 2, 96–103. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.013
- Chandrasekaran, V. C. S., Advani, S. G. ve Santare, M. H. (2010). Role of processing on interlaminar shear strength enhancement of epoxy/glass fiber/multi-walled carbon nanotube hybrid composites. *Carbon*, 48(13), 3692–3699. doi:10.1016/j.carbon.2010.06.010
- Chatterjee, A. ve Islam, M. S. (2008). Fabrication and characterization of TiO<sub>2</sub>-epoxy nanocomposite. *Materials Science and Engineering A*, 487(1–2), 574–585. doi:10.1016/j.msea.2007.11.052
- Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W. ve Baur, J. W. (2008). Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*, 49(17), 3805–3815. doi:10.1016/j.polymer.2008.06.023
- Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Ashfaq, A. ve Jeelani, S. (2005). Fabrication and mechanical characterization of carbon / SiC-epoxy nanocomposites, 67, 115–124. doi:10.1016/j.compstruct.2004.01.010
- Cholake, S. T., Mada, M. R., Raman, R. K. S., Bai, Y. ve Zhao, X. L. (2014). Quantitative Analysis of Curing Mechanisms of Epoxy Resin by Mid- and Near-Fourier Transform Infra Red Spectroscopy Quantitative Analysis of Curing Mechanisms of Epoxy Resin by Mid- and Near- Fourier Transform Infra Red Spectroscopy, (June). doi:10.14429/dsj.64.7326
- Conradi, M., Zorko, M., Kocijan, A. ve Verpoest, I. (2013). Mechanical properties of epoxy composites reinforced with a low volume fraction of nanosilica fillers. *Materials Chemistry and Physics*, 137(3), 910–915.

- doi:10.1016/j.matchemphys.2012.11.001
- Deogonda, P. ve Chalwa, V. N. (2013). Mechanical Property of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*, 1(4), 6–9.  
<http://www.ijser.in/archives/v1i4/SjIwMTM2NQ==.pdf> adresinden erişildi.
- Dhoke, S. K., Mangal Sinha, T. J. ve Khanna, A. S. (2009). Effect of nano- $Al_2O_3$  particles on the corrosion behavior of alkyd based waterborne coatings. *Journal of Coatings Technology Research*, 6(3), 353–368. doi:10.1007/s11998-008-9127-3
- Dittanet, P. ve Pearson, R. A. (2012). Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. *Polymer*, 53(9), 1890–1905.  
 doi:10.1016/j.polymer.2012.02.052
- Dittanet, P. ve Pearson, R. A. (2013). Effect of bimodal particle size distributions on the toughening mechanisms in silica nanoparticle filled epoxy resin. *Polymer (United Kingdom)*, 54(7), 1832–1845. doi:10.1016/j.polymer.2012.12.059
- Elanchezhian, C., Ramnath, B. V., Ramakrishnan, G., Rajendrakumar, M., Naveenkumar, V. ve Saravanakumar, M. K. (2018). Review on mechanical properties of natural fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1785–1790. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.276
- Erden, S., Sever, K., Seki, Y. ve Sarikanat, M. (2010). Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and Polymers*, 11(5), 732–737.  
 doi:10.1007/s12221-010-0732-2
- Faber, K. T. ve Evans, A. G. (1983a). Crack deflection processes-I. Theory. *Acta Metallurgica*, 31(4), 565–576. doi:10.1016/0001-6160(83)90046-9
- Faber, K. T. ve Evans, A. G. (1983b). Crack deflection processes-II. Experiment. *Acta Metallurgica*, 31(4), 577–584. doi:10.1016/0001-6160(83)90047-0
- Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B. ve Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.  
 doi:10.1016/j.compositesb.2008.01.002
- Gemi, L., Uludağ, M., Dispinar, D. ve Tiryakioğlu, M. (2017). The effect of 0.5 wt % additions of carbon nanotubes & ceramic nanoparticles on tensile properties of epoxy-matrix composites : a comparative study ., 1(1).
- Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics Fourth Edition*. CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC. doi:10.2214/ajr.159.6.1442392
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Fiedler, B. ve Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites - A comparative study. *Composites Science and Technology*, 65(15–16 SPEC. ISS.), 2300–2313. doi:10.1016/j.compscitech.2005.04.021
- González-González, M., Cabanelas, J. C. ve Baselga, J. (2012). Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. *University Carlos III of Madrid*, 2, 261–284. doi:10.5772/2055
- Goyat, M. S., Ray, S. ve Ghosh, P. K. (2011). Composites : Part A Innovative application of ultrasonic mixing to produce homogeneously mixed nanoparticulate-epoxy composite of improved physical properties. *Composites Part A*, 42(10), 1421–1431. doi:10.1016/j.compositesa.2011.06.006
- Goyat, M. S., Suresh, S., Bahl, S., Halder, S. ve Ghosh, P. K. (2015a). Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead reinforced epoxy composite. *Materials Chemistry and Physics*, 166, 144–152.

- doi:10.1016/j.matchemphys.2015.09.038
- Goyat, M. S., Suresh, S., Bahl, S., Halder, S. ve Ghosh, P. K. (2015b). Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead reinforced epoxy composite. *Materials Chemistry and Physics*, 166, 144–152. doi:10.1016/j.matchemphys.2015.09.038
- Greenhalgh, E. (2009). *Fractography in Failure Analysis of Polymers. Failure analysis and fractography of polymer composites*. Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-323-24272-1.00005-2
- Guo, J., Zhang, Q., Gao, L., Zhong, W., Sui, G. ve Yang, X. (2017). Significantly improved electrical and interlaminar mechanical properties of carbon fiber laminated composites by using special carbon nanotube pre-dispersion mixture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 294–303. doi:10.1016/j.compositesa.2017.01.021
- Guo, Z., Lei, K., Li, Y., Ng, H. W., Prikhodko, S. ve Hahn, H. T. (2008). Fabrication and characterization of iron oxide nanoparticles reinforced vinyl-ester resin nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 68(6), 1513–1520. doi:10.1016/j.compscitech.2007.10.018
- Hanemann, T. ve Szabó, D. V. (2010). *Polymer-nanoparticle composites: From synthesis to modern applications*. *Materials* (C. 3). doi:10.3390/ma3063468
- Hoa, S. V. (2009). *Principle of the Manufacturing of Composite Materials*. *The Journal of Animal Ecology*. doi:10.2307/3000
- Hsieh, T. H., Kinloch, A. J., Masania, K., Sohn Lee, J., Taylor, A. C. ve Sprenger, S. (2010). The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 45(5), 1193–1210. doi:10.1007/s10853-009-4064-9
- Hsieh, T. H., Kinloch, A. J., Taylor, A. C. ve Kinloch, I. A. (2011). The effect of carbon nanotubes on the fracture toughness and fatigue performance of a thermosetting epoxy polym. *Journal of Materials Science*, 46(23), 7525–7535. doi:10.1007/s10853-011-5724-0
- Jaisingh, S. J., Selvam, V., Kumar, M. S. C., Thyagarajan, K. ve Centre, P. N. (2012). Development of Siliconized Iron ( Iii ) Oxide Nanoparticles Reinforced, 2(4), 21–30.
- Jalali, M., Dauterstedt, S., Michaud, A. ve Wuthrich, R. (2011). Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1420–1426. doi:10.1016/j.compositesb.2011.05.018
- Jana, S. ve Zhong, W. (y.y.). FTIR Study of Ageing Epoxy Resin Reinforced by Reactive Graphitic Nanofibers. doi:10.1002/app.26925
- Jiang, T., Kuila, T., Kim, N. H., Ku, B. C. ve Lee, J. H. (2013). Enhanced mechanical properties of silanized silica nanoparticle attached graphene oxide/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 79, 115–125. doi:10.1016/j.compscitech.2013.02.018
- Jin, F. L., Ma, C. J. ve Park, S. J. (2011). Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*, 528(29–30), 8517–8522. doi:10.1016/j.msea.2011.08.054
- Jin, F. L. ve Park, S. J. (2012). Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites. *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), 2148–2153. doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2012.08.015
- Johnsen, B. B., Kinloch, A. J., Mohammed, R. D., Taylor, A. C. ve Sprenger, S. (2007). Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers. *Polymer*, 48(2), 530–541. doi:10.1016/j.polymer.2006.11.038

- Jumahat, A., Soutis, C., Abdullah, S. A. ve Kasolang, S. (2012). Tensile properties of nanosilica/epoxy nanocomposites. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 1634–1640. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.361
- Kalaitzidou, K., Fukushima, H. ve Drzal, L. T. (2007). A new compounding method for exfoliated graphite-polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold. *Composites Science and Technology*, 67(10), 2045–2051. doi:10.1016/j.compscitech.2006.11.014
- Kanagaraj, S., Varanda, F. R., Zhil'tsova, T. V., Oliveira, M. S. A. ve Simões, J. A. O. (2007). Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 67(15–16), 3071–3077. doi:10.1016/j.compscitech.2007.04.024
- Kim, J.-W., Kim, H.-S. ve Lee, D.-G. (2012). Tensile Strength of Glass Fiber-Reinforced Plastic By Fiber Orientation and Fiber Content Variations. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 6, 640–645. doi:10.1142/S201019451200390X
- Kumar, G. N. (2017). MECHANICAL PROPERTIES OF NANOIRON PARTICLES REINFORCED EPOXY / POLYESTER NANOCOMPOSITES, 8(3), 175–184.
- Kurahatti, R. V., Surendranathan, A. O., Ramesh Kumar, A. V., Auradi, V., Wadageri, C. S. ve Kori, S. A. (2014). Mechanical and tribological behaviour of epoxy reinforced with nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles. *Applied Mechanics and Materials*, 592–594, 1320–1324. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1320
- Lange, F. F. (1970). The interaction of a crack front with a second-phase dispersion. *Philosophical Magazine*, 22(179), 983–992. doi:10.1080/14786437008221068
- Lauke, B. ve Fu, S. Y. (2013). Aspects of fracture toughness modelling of particle filled polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1569–1574. doi:10.1016/j.compositesb.2012.07.021
- Lopresto, V., Leone, C. ve De Iorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 717–723. doi:10.1016/j.compositesb.2011.01.030
- Madhup, M. K., Shah, N. K. ve Wadhvani, P. M. (2015). Progress in Organic Coatings Investigation of surface morphology , anti-corrosive and abrasion resistance properties of nickel oxide epoxy nanocomposite ( NiO-ENC ) coating on mild steel substrate. *Progress in Organic Coatings*, 80, 1–10. doi:10.1016/j.porgcoat.2014.11.007
- Matykiewicz, D., Barczewski, M., Knapki, D. ve Skórczewska, K. (2017). Hybrid effects of basalt fibers and basalt powder on thermomechanical properties of epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 125, 157–164. doi:10.1016/j.compositesb.2017.05.060
- Naga Raju, B., Ramji, K. ve Prasad, V. S. R. K. (2015). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester ZnO NanoComposites. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2817–2825. doi:10.1016/j.matpr.2015.07.294
- Nayak, R. K., Dash, A. ve Ray, B. C. (2014). Effect of Epoxy Modifiers (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) on Mechanical Performance of epoxy/glass Fiber Hybrid Composites. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpc), 1359–1364. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.115
- Omriani, A., Simon, L. C. ve Rostami, A. A. (2009). The effects of alumina nanoparticle on the properties of an epoxy resin system. *Materials Chemistry and Physics*, 114(1), 145–150. doi:10.1016/j.matchemphys.2008.08.090
- Park, S. J. ve Jin, F. L. (2004). Thermal stabilities and dynamic mechanical properties

- of sulfone-containing epoxy resin cured with anhydride. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 515–520. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.003
- PK Balguri, DGH Samuel, U. T. (2017). Magnetic Epoxy Nanocomposites Reinforced with Hierarchical  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoflowers A Study of Mechanical Properties, 0–4. doi:https://doi.org/10.1088/1478-3975/aa9768
- Pour, Z. S. ve Ghaemy, M. (2014). Thermo-mechanical behaviors of epoxy resins reinforced with silane-epoxide functionalized  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 77(8), 1316–1324. doi:10.1016/j.porgcoat.2014.04.001
- Prakash, V. R. A. ve Rajadurai, A. (2016). MECHANICAL , THERMAL AND DIELECTRIC CHARACTERIZATION OF IRON OXIDE PARTICLES DISPERSED GLASS FIBER EPOXY, 11(2), 373–380.
- Rafique, M. M. A., Kandare, E. ve Sprenger, S. (2017). Fiber-reinforced magneto-polymer matrix composites (FR-MPMCs) - A review. *Journal of Materials Research*, 32(6), 1020–1046. doi:10.1557/jmr.2017.63
- Rajabi, L., Marzban, M. ve Derakhshan, A. A. (2014). Epoxy/alumoxane and epoxy/boehmite nanocomposites: Cure behavior, thermal stability, hardness and fracture surface morphology. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 23(3), 203–215. doi:10.1007/s13726-013-0216-5
- Razlan, M., Akil, H., Helmi, M., Kudus, A. ve Bisyrul, M. (2016). Compressive properties and thermal stability of hybrid carbon nanotube-alumina filled epoxy nanocomposites, 91, 235–242. doi:10.1016/j.compositesb.2016.01.013
- Sánchez, M., Campo, M., Jiménez-Suárez, A. ve Ureña, A. (2013). Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1613–1619. doi:10.1016/j.compositesb.2012.09.063
- Sathishkumar, T. P., Satheeskumar, S. ve Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275. doi:10.1177/0731684414530790
- Schrauwen, B. ve Peijs, T. (2002). Influence of matrix ductility and fibre architecture on the repeated impact response of glass-fibre-reinforced laminated composites. *Applied Composite Materials*, 9(6), 331–352. doi:10.1023/A:1020267013414
- Shi, G., Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Wetzel, B. ve Friedrich, K. (2004). Sliding wear behavior of epoxy containing nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles with different pretreatments. *Wear*, 256(11–12), 1072–1081. doi:10.1016/S0043-1648(03)00533-7
- Shukla, D. K., Kasisomayajula, S. V. ve Parameswaran, V. (2008). Epoxy composites using functionalized alumina platelets as reinforcements. *Composites Science and Technology*, 68(14), 3055–3063. doi:10.1016/j.compscitech.2008.06.025
- Singh, R. P., Zhang, M. ve Chan, D. (2002). Toughening of a brittle thermosetting polymer: Effects of reinforcement particle size and volume fraction. *Journal of Materials Science*, 37(4), 781–788. doi:10.1023/A:1013844015493
- Sprenger, S. (2015). Improving mechanical properties of fiber-reinforced composites based on epoxy resins containing industrial surface-modified silica nanoparticles: Review and outlook. *Journal of Composite Materials*, 49(1), 53–63. doi:10.1177/0021998313514260
- Sun, T., Fan, H., Wang, Z., Liu, X. ve Wu, Z. (2015). Modified nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-epoxy composite with enhanced mechanical properties. *Materials and Design*, 87, 10–16. doi:10.1016/j.matdes.2015.07.177
- Sun, Y., Zhang, Z., Moon, K. ve Wong, C. P. (2004). Glass Transition and Relaxation Behavior of, (July), 3849–3858. doi:10.1002/polb.20251
- Umer, R., Li, Y., Dong, Y., Haroosh, H. J. ve Liao, K. (2015). The effect of graphene

- oxide (GO) nanoparticles on the processing of epoxy/glass fiber composites using resin infusion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9–12), 2183–2192. doi:10.1007/s00170-015-7427-1
- Valenc¸a, S. L., Griza, S., De Oliveira, V. G., Sussuchi, E. M. ve De Cunha, F. G. C. (2015). Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with Kevlar plain fabric and glass/Kevlar hybrid fabric. *Composites Part B: Engineering*, 70, 1–8. doi:10.1016/j.compositesb.2014.09.040
- Varga, C., Miskolczi, N., Bartha, L. ve Lip¸czi, G. (2010). Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface. *Materials and Design*, 31(1), 185–193. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.034
- Venkateshwar Reddy, C., Ramesh Babu, P., Ramnarayanan, R. ve Das, D. (2017). Mechanical Characterization of Unidirectional Carbon and Glass/Epoxy Reinforced Composites for High Strength Applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3166–3172. doi:10.1016/j.matpr.2017.02.201
- Vieille, B., Casado, V. M. ve Bouvet, C. (2013). About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study. *Composite Structures*, 101, 9–21. doi:10.1016/j.compstruct.2013.01.025
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F. ve Friedrich, K. (2006). Epoxy nanocomposites - fracture and toughening mechanisms. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2375–2398. doi:10.1016/j.engfracmech.2006.05.018
- Yourdkhani, M., Liu, W., Baril-Gosselin, S., Robitaille, F. ve Hubert, P. (2018). Carbon nanotube-reinforced carbon fibre-epoxy composites manufactured by resin film infusion. *Composites Science and Technology*, 1–7. doi:10.1016/j.compscitech.2018.01.006
- Zabihi, O., Khodabandeh, A. ve Ghasemlou, S. (2012). Investigation of mechanical properties and cure behavior of DGEBA/nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with polyamine dendrimer. *Polymer Degradation and Stability*, 97(9), 1730–1736. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.013
- Zhang, X., Xu, W., Xia, X., Zhang, Z. ve Yu, R. (2006). Toughening of cycloaliphatic epoxy resin by nanosize silicon dioxide. *Materials Letters*, 60(28), 3319–3323. doi:10.1016/j.matlet.2006.04.023
- Zhao, S., Schadler, L. S., Duncan, R., Hillborg, H. ve Auletta, T. (2008a). Mechanisms leading to improved mechanical performance in nanoscale alumina filled epoxy. *Composites Science and Technology*, 68(14), 2965–2975. doi:10.1016/j.compscitech.2008.01.009
- Zhao, S., Schadler, L. S., Duncan, R., Hillborg, H. ve Auletta, T. (2008b). Mechanisms leading to improved mechanical performance in nanoscale alumina filled epoxy. *Composites Science and Technology*, 68(14), 2965–2975. doi:10.1016/j.compscitech.2008.01.009
- Zheng, Y., Ning, R. ve Zheng, Y. (2005). Study of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles on the Improved Performance of Epoxy and Fiber Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(3), 223–233. doi:10.1177/0731684405043552
- Zhou, H. W., Mishnaevsky, L., Yi, H. Y., Liu, Y. Q., Hu, X., Warrior, A. ve Dai, G. M. (2016). Carbon fiber/carbon nanotube reinforced hierarchical composites: Effect of CNT distribution on shearing strength. *Composites Part B: Engineering*, 88, 201–211. doi:10.1016/j.compositesb.2015.10.035
- Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L. ve Jeelani, S. (2008). Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*, 475(1–2), 157–165. doi:10.1016/j.msea.2007.04.043

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : MAHMUT ÖZER  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : SELÇUKLU – 12/02/1991  
**Telefon** : +90 505 709 4995  
**Faks** :  
**e-mail** : mahmut.ozer@amasya.edu.tr

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konya Anadolu lisesi, Meram, Konya	2009
Üniversite	: Pamukkale Üniversitesi, Denizli	2014
Yüksek Lisans	: N. Erbakan Üni., Fen Bil. Enst. Meram, Konya	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	ER-DEMTAŞ	PROJE MÜHENDİSİ

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Özer M., L. Gemi, Ş. Yazman, A. Akdemir, " Investigation on Mechanical and Physical Properties Of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> And CNT Reinforced Epoxy/Hybrid Nanocomposites, " 16th International Materials Symposium IMSP'2016, Denizli, 2016 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Özer M., Ş. Yazman, A. Akdemir, " Effect of Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Reinforcement on Tensile Strength of Epoxy Polymer Composite, "1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), Karabük, 2018 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)