



**T.C.**

**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ ESASLI POLİMER MATRİSLİ  
KOMPOZİT MALZEMELERİN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**MERT ARICI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. İLYAS UYGUR**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ ESASLI POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT**  
**MALZEMELERİN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mert ARICI tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS**  
**TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. İlyas UYGUR  
Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. İlyas UYGUR  
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Arif ÖZKAN  
Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Ü. Mert KILINÇEL  
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 06/10/2022

## **BEYAN**

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

09 Mayıs 2022

Mert ARICI



## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. İlyas UYGUR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL'e ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Nano ve mikron boyutlardaki partiküllerin kompozit malzemelerin üretimi ve birleştirilmesine etkilerinin araştırılması adlı, Düzce Üniversitesi BAP-2020.06.05.1057 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

**09 Mayıs 2022**

**Mert ARICI**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                                      |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ŞEKİL LİSTESİ.....</b>                                                            | <b>vii</b>  |
| <b>ÇİZELGE LİSTESİ.....</b>                                                          | <b>x</b>    |
| <b>KISALTMALAR.....</b>                                                              | <b>xi</b>   |
| <b>SİMGELER.....</b>                                                                 | <b>xii</b>  |
| <b>ÖZET.....</b>                                                                     | <b>xiii</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                 | <b>xiv</b>  |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                 | <b>1</b>    |
| <b>1.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE BİRLEŞTİRİLMESİ.....</b>                              | <b>1</b>    |
| <b>1.2. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ.....</b>                                    | <b>3</b>    |
| <b>1.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....</b>                             | <b>4</b>    |
| <b>1.3.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....</b> | <b>5</b>    |
| <i>1.3.1.1. Polimer Matrisli Malzemeler.....</i>                                     | <i>5</i>    |
| <i>1.3.1.2. Metal Matrisli Malzemeler.....</i>                                       | <i>6</i>    |
| <i>1.3.1.3. Seramik Matrisli Malzemeler.....</i>                                     | <i>7</i>    |
| <i>1.3.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....</i> | <i>8</i>    |
| <i>1.3.2.1. Lif (elyaf) Takviyeli Kompozitler.....</i>                               | <i>8</i>    |
| <i>1.3.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....</i>                                  | <i>9</i>    |
| <i>1.3.2.3. Tabakalı Kompozitler.....</i>                                            | <i>10</i>   |
| <i>1.3.2.4. Karma (Hibrid) Kompozitler.....</i>                                      | <i>11</i>   |
| <b>1.4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ.....</b>                      | <b>11</b>   |
| <b>1.4.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up) Yöntemi.....</b>                                | <b>12</b>   |
| <b>1.4.2. Püskürtme (Spray-up) Yöntemi.....</b>                                      | <b>12</b>   |
| <b>1.4.3. İplik (Filament) Sarma Yöntemi.....</b>                                    | <b>13</b>   |
| <b>1.4.4. Vakum Torbalama Yöntemi.....</b>                                           | <b>13</b>   |
| <b>1.4.5. Vakum İnfüzyon Yöntemi.....</b>                                            | <b>14</b>   |
| <b>1.4.6. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi.....</b>                           | <b>14</b>   |
| <b>1.4.7. Pultrüzyon Yöntemi.....</b>                                                | <b>15</b>   |
| <b>1.4.8. Otoklav Yöntemi.....</b>                                                   | <b>16</b>   |
| <b>1.4.9. Sıcak Presleme (Sıkıştırma Kalıplama) Yöntemi.....</b>                     | <b>16</b>   |
| <b>1.4.10. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi.....</b>                                     | <b>17</b>   |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.5. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ....</b> | <b>18</b> |
| <b>1.5.1. Mekanik Birleştirmeler.....</b>                              | <b>18</b> |
| <b>1.5.2.Yapıştırıcı Kullanılan Birleştirmeler.....</b>                | <b>18</b> |
| <b>1.6. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....</b>                                   | <b>19</b> |
| <b>1.7. TEZİN AMACI.....</b>                                           | <b>24</b> |
| <b>2. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>                                       | <b>25</b> |
| <b>2.1. SİLİKON NUMUNE KALIBIN HAZIRLANMASI.....</b>                   | <b>25</b> |
| <b>2.2. KATKILI VE KATKISIZ TEST NUMUNELERİNİN ÜRETİLMESİ.....</b>     | <b>27</b> |
| <b>2.3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY YÖNTEMİ.....</b>                       | <b>31</b> |
| <b>3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                             | <b>34</b> |
| <b>3.1. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                     | <b>34</b> |
| <b>3.2.KESME TESTİ SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                      | <b>39</b> |
| <b>3.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU ANALİZİ SONUÇLARI.....</b>        | <b>43</b> |
| <b>3.4. ENERJİ DAĞILIMLI X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ.....</b>               | <b>49</b> |
| <b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                    | <b>54</b> |
| <b>5. KAYNAKLAR.....</b>                                               | <b>55</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                   | <b>60</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Matris malzemelerine göre kompozitlerin avantaj ve dezavantajları.....            | 7  |
| Şekil 1.2. Elyaf takviyeli kompozit.....                                                     | 8  |
| Şekil 1.3. Parçacık takviyeli kompozit.....                                                  | 10 |
| Şekil 1.4. Tabakalı kompozitlerin yapısal dizilişi ve sandviç panellerin yapısı.....         | 10 |
| Şekil 1.5. Farklı hibrid konfigürasyonlar ve tipik tek-yönlü ve iki yönlü örnekler.....      | 11 |
| Şekil 1.6. Elle yatırma tekniği.....                                                         | 12 |
| Şekil 1.7. Püskürtme tekniği.....                                                            | 13 |
| Şekil 1.8. İplik sarma yöntemi.....                                                          | 13 |
| Şekil 1.9. Vakum torbalama yöntemi.....                                                      | 14 |
| Şekil 1.10. Vakum infüzyon yöntemi.....                                                      | 14 |
| Şekil 1.11. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....                                           | 15 |
| Şekil 1.12. Pultrüzyon üretim hattı.....                                                     | 15 |
| Şekil 1.13. Otoklav cihazı.....                                                              | 16 |
| Şekil 1.14. SMC kalıplama.....                                                               | 17 |
| Şekil 1.15. Enjeksiyon kalıplama.....                                                        | 17 |
| Şekil 1.16. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları..... | 18 |
| Şekil 2.1. Numune kalıp imalatında kullanılan kalıp silikonu ve katalizörü.....              | 26 |
| Şekil 2.2. Kullanılan kalıp ayırıcı malzeme.....                                             | 26 |
| Şekil 2.3. Silikon kalıbın hazırlanması.....                                                 | 27 |
| Şekil 2.4. Hazır hale gelen silikon kalıp.....                                               | 27 |
| Şekil 2.5. Çalışmada kullanılan epoksi reçine ve epoksi sertleştirici.....                   | 28 |
| Şekil 2.6. Mekanik karıştırma işlemi.....                                                    | 28 |
| Şekil 2.7. Mekanik karıştırma cihazı.....                                                    | 29 |
| Şekil 2.8. Hazırlanan katkılı ve katkısız test numuneleri.....                               | 29 |
| Şekil 2.9. Çalışmada yapılan vakum infüzyon yöntemi.....                                     | 30 |
| Şekil 2.10. Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit plaka.....                       | 31 |
| Şekil 2.11. Kompozit plakaların kesimi için kullanılan testere cihazı.....                   | 31 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.12. Bindirmeli bağlantılı test numune ölçüleri.....                                                                                                                                                                                                                                                              | 31 |
| Şekil 2.13. Çalışma sırasında yapılan tek bindirmeli bağlantı numuneleri.....                                                                                                                                                                                                                                            | 33 |
| Şekil 3.1. Çekme testi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 33 |
| Şekil 3.2. Mikro Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                               | 34 |
| Şekil 3.3. Nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                                | 35 |
| Şekil 3.4. Mikro bor parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                                                          | 35 |
| Şekil 3.5. Nano bor parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                                                           | 36 |
| Şekil 3.6. Mikro TiO <sub>2</sub> parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                                             | 37 |
| Şekil 3.7. Nano TiO <sub>2</sub> parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.....                                                                                                                                                                                                                              | 37 |
| Şekil 3.8. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı numunelerinin ortalama bindirme kopma yükleri.....                                                                                                                                                                                                                     | 39 |
| Şekil 3.9. Bor katkılı numunelerinin ortalama kopma yükleri.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 40 |
| Şekil 3.10. TiO <sub>2</sub> katkılı numunelerin ortalama kopma yükleri.....                                                                                                                                                                                                                                             | 41 |
| Şekil 3.11. a) Takviyesiz tek bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri b) %2 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri c) %4 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri d) %6 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri..... | 43 |
| Şekil 3.12. Katkisız epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 44 |
| Şekil 3.13. Mikro %2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                              | 44 |
| Şekil 3.14. Nano %2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                               | 45 |
| Şekil 3.15. Mikro %2 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| Şekil 3.16. Mikro %6 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                                            | 47 |
| Şekil 3.17. Nano %2 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeyleri.....                                                                                                                                                                                                                             | 48 |
| Şekil 3.18. Katkisız epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 49 |
| Şekil 3.19. Mikro %2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                         | 50 |
| Şekil 3.20. Nano %2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                          | 50 |
| Şekil 3.21. Mikro %2 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                                       | 51 |
| Şekil 3.22. Mikro %6 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                                       | 51 |
| Şekil 3.23. Nano %2 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.....                                                                                                                                                                                                                                        | 52 |



|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.24. Nano %6 TiO <sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi..... | 53 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                       | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Tablo 1.1. Bazı metal ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....          | 4               |
| Tablo 1.2. Bazı yaygın kullanılan polimerik reçinelerin mekanik özellikleri.....                      | 6               |
| Tablo 2.1. Numunelerde kullanılan parçacık cinsi, boyutu ve kütlece derişim oranı.....                | 32              |
| Tablo 3.1. Takviyesiz ve takviyeli tek bindirmeli bağlantı numunelerinin % deformasyon değerleri..... | 38              |

## KISALTMALAR

|                                                 |                                                                            |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| B                                               | Bor                                                                        |
| TiO <sub>2</sub>                                | Titanyum Oksit                                                             |
| SiC                                             | Silisyum Karbür                                                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | Alüminyum Oksit                                                            |
| ASTM                                            | Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu                       |
| CTP                                             | Cam Takviyeli Polyester                                                    |
| MPa                                             | Mega Pascal                                                                |
| GPa                                             | Giga Pascal                                                                |
| g                                               | Gram                                                                       |
| cm <sup>3</sup>                                 | Santimetreküp                                                              |
| TiC                                             | Titanyum Karbür                                                            |
| ZrO <sub>2</sub>                                | Zirkonyum Oksit                                                            |
| ZrB <sub>2</sub>                                | Zirkonuyum Diborid                                                         |
| ZrC                                             | Zirkonyum Karbür                                                           |
| AlO <sub>2</sub>                                | Alümina Oksit                                                              |
| SiO <sub>2</sub>                                | Silisyum Oksit                                                             |
| UV                                              | Ultraviyole                                                                |
| PMK                                             | Polimer Matrisli Kompozitler                                               |
| SMK                                             | Seramik Matrisli Kompozitler                                               |
| MMK                                             | Metal Matrisli Kompozitler                                                 |
| FML                                             | Fiber Metal Plakalar                                                       |
| AT                                              | NaOH ile işlem görmüş alüminyum                                            |
| CT                                              | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ile işlem görmüş alüminyum   |
| FT                                              | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ile işlem görmüş alüminyum |
| UT                                              | İşlem görmemiş alüminyum                                                   |
| SNP                                             | Silika Nanoparçacık                                                        |
| MWCNT                                           | Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp                                                |
| CFRP                                            | Karbon Fiber Takviyeli Polimer                                             |
| PVA                                             | Polivinil Alkol                                                            |
| Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | Demir (III) Sülfat                                                         |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>                   | Sülfat                                                                     |
| TiO <sub>2</sub>                                | Titanyum Dioksit                                                           |
| ILSS                                            | Katmanlar Arası Kesme Mukavemeti                                           |
| GRFP                                            | Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit                                       |
| K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | Potasyum Dikromat                                                          |
| SLJ                                             | Tek Bindirmeli Bağlantı                                                    |
| kN                                              | Kilo Newton                                                                |
| rpm                                             | Dakikadaki Devir Sayısı                                                    |
| nm                                              | Nano Metre                                                                 |
| µm                                              | Mikro Metre                                                                |

## SİMGELER

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| $\sigma_{\varphi}$        | Çekme mukavemeti       |
| $E / \rho$                | Özgül elastite modülü  |
| $\rho$                    | Yoğunluk               |
| $\sigma_{\varphi} / \rho$ | Özgül çekme mukavemeti |
| $E$                       | Elastite modülü        |
| $^{\circ}\text{C}$        | Celsius                |
| $\%$                      | Yüzde                  |



## ÖZET

### PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ ESASLI POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mert ARICI

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlyas UYGUR

Haziran 2022, 59 sayfa

Yüksek mukavemet ve hafifliğin istendiği birçok uygulamada, farklı iki veya daha fazla malzemelerin üstün özelliklerini birleştirmek için kompozit malzemelerin kullanımı oldukça tercih edilen bir çözümdür. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi sırasında mekanik bağlantıların kullanımı; delik açılması, açılan deliğin çatlak oluşturması ve ağırlık artışı gibi sorunlara sebep olmakta bu yüzden yapıştırıcı kullanımı büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle ticari veya laboratuvar ölçekli yapıştırıcıların mekanik özelliklerini artırmaya yönelik çalışmalar da önem kazanmaktadır. Günümüzde yapışkan malzemelerin mukavemetini artırmak için farklı cinsten mikro ve nano partiküllerin eklenmesi popüler bir konudur. Yapılan literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere, yapışkan malzemelere mikro ve nano boyutlu partiküller eklendiğinde yapışkanın mukavemetinde önemli artışlar sağlandığını görülmüştür. Bu çalışmada, tek bindirmeli bağlantı deneyleri ve çekme deneyinden elde edilen çekme mukavemetine etkileri incelemek için epoksi reçineye nano ve mikro boyutlarda ve farklı kütlece yüzde derişim oranlarında B, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC parçacıklar eklenmiştir. Tek bindirmeli bağlantıların geometrisi ASTM D5868 kesme standardına göre hazırlanıp kesilmiş ve yapıştırılmıştır. Daha sonra test numunelerine yine ASTM D638 standardına göre çekme testleri yapılmıştır. Tek bindirmeli bağlantı numunelerinin ortalama kopma yükleri ve ortalama yer değıştirme değeri çekme ve kesme testlerinden elde edilmiştir. Bu çıkan değere göre tez çalışmasında kullanılan farklı parametrelerin yapışma performansına ve malzemenin bazı mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit malzeme, Yapıştırıcı, Mukavemet, Nano ve mikro parçacık.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF SOME MECHANICAL PROPERTIES OF PARTICLE REINFORCED EPOXY BASED POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS**

Mert ARICI

Duzce University

Graduate School of Education, Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Advisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

June 2022, 59 pages

In many applications where high strength and lightness are desired, the use of composite materials is a highly preferred solution to combine the superior properties of two or more different materials. The use of mechanical connections when joining composite materials; This causes problems such as opening a hole, cracking of the drilled hole and increasing weight, so the use of adhesive is of great importance. For this reason, studies to increase the mechanical properties of commercial or laboratory-scale adhesives are gaining importance. Adding different species of micro and nano particles to increase the strength of adhesive materials is a hot topic nowadays. As can be seen in the literature study, it shows that when micro and nano-sized particles are added to epoxy resin, significant increases in the strength of the adhesive are provided. In this study, B,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and SiC particles were added to the epoxy resin in nano and micro sizes and in different mass percent concentration ratios to examine the effect on the tensile strength of single lap joints. The geometry of single lap joints is prepared, cut and glued according to ASTM D5868 standard. Then, the tensile tests of the test samples were carried out according to the ASTM D638 standard. Average breaking loads and average displacement values of single lap joint specimens were obtained from tensile tests. According to these values, the effects of different parameters used in the thesis on the adhesion performance and mechanical properties of the material were examined and interpreted.

**Keywords:** Composite material, Adhesive, Strength, Nano and micro particle.

# 1. GİRİŞ

## 1.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE BİRLEŞTİRİLMESİ

Geçmişten günümüze insan ihtiyaçları ve hayat şartları gereği kullandığımız malzemeler zaman içerisinde gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. İnsanların her daim birçok açıdan daha iyi özelliklere sahip eşyalar kullanma isteği, o eşyanın yapıldığı malzemenin de gelişmesine sebep olmuştur. Tarihten bugüne taş, demir ve çelik gibi malzemelerin bulunup işlenmesiyle, hemen hemen her alanda birçok kolaylık ve avantaj sağlanmıştır. Kompozit malzemelerin doğuşunda yine bu şekildedir. İnsanoğlu, ilk çağlardan beri kırılğan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılğanlık özelliğini gidermeye çalışmış ve buna en iyi örnek kerpiçtir. Kerpiç üretiminde, killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi saplar ve lifler kerpicingin mukavemetini artırmaktadır. Ayrıca, günümüzde kompozitlerin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın çok yeni olmadığı araştırmalardan da anlaşılmaktadır. Örneğin cam liflerinin üretimi, eski Mısır'a kadar dayanmaktadır. Sanayide cam elyaflar ilk kez 1877 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Sentetik reçineler ise elyaflarla takviye edilerek 1950'li yıllarda endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en çok kullanılan türü cam elyaf takviyeli polyester (CTP)'dir. Türkiye'de ise cam lifler 1960'lı yıllarda sıvı tankları, çatı levhaları, küçük deniz tekneleri gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Türkiye'de seri üretimi yapılmış ilk otomobil olan Anadol marka aracında kaportası da CTP'den üretilmiştir [1]. Öte yandan zamanla sanayinin gelişimiyle birlikte birçok endüstride kullanılan demir ve çeliğin yol açtığı karbon salınımı gibi benzer olumsuz çevresel faktörlerde kompozit malzemelere ihtiyaç duyulmasını artırmıştır.

Mühendislik malzemeleri; metaller, seramikler, polimerler, kompozitler olarak sınıflandırılır. Bunun yanı sıra kompozit malzemeler olarak adlandırılan bir malzeme türü de ortaya koyulmuş olup bu malzeme belirtilen diğer malzemelere göre birçok üstün özelliğe ve performansa sahiptir. Kompozit malzemelerin özellikle hafif ve yüksek dayanım özelliğine sahip olması, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Motor sporları alanında en ileri ve profesyonel Formula 1 yarış araçlarının şasi kısmında, otomobillerin kaporta ve ön konsol aksamalarında, elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Uçakların uçuş sırasında ani sıcaklık değişimlerine kompozit malzemeler olumlu açıdan katkı sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımının yaygın olması başta hafiflik ve mukavemet özellikleri sayesinde. Titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi özellikleri ile de uzay ve havacılık sanayinde değişilmez bir malzeme haline gelmiştir [2].

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı türüne göre sınıflandırılabilir. Matris türüne göre metal, seramik ve polimer matrisli kompozit malzemeler olmak üzere üçe ayrılmaktadır [3]. Yapılan çalışmada yapışkan bağlantılı polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Polimer matrisli kompozitlerin birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Üretim yöntemlerinin tercihinde; üründe istenilen başlıca özellikler ve performans, maliyet ve ürünün çalışma alanı etkilidir. Havacılık sektöründe uçakların gövde kanatlarında kullanılan yüksek dayanım istenen kompozitler, pultrüzyon veya otoklav yöntemleriyle üretilmektedir. Mekanik dayanımın havacılık sektöründeki kadar yüksek istenmediği veya daha düşük maliyetle üretim yapmak istendiğinde elle yatırma veya vakum infüzyon gibi yöntemler tercih edilmektedir. Ancak karmaşık veya büyük parçaların üretimi sırasında çıkabilecek bazı zorluklar ve kompozitin, metal veya diğer tür malzemeler ile birleştirilmesi ihtiyacından dolayı kompozit sektöründe yapıştırma ile bağlantıya başvurulması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Birleştirme bağlantıları özellikle kompozit malzemelerin birleştirilmesi için önemli bir konudur. Bu birleştirme, mekanik veya yapıştırıcı kullanarak yapılabilir. Mekanik birleştirme polimer matrisli kompozitlerde pek mümkün olmadığı için yapıştırıcıyla birleştirme tercih edilmektedir. Ayrıca polimer matrislere, mekanik birleştirme işlemleri uygulandığında delme sırasında oluşan gerilmeler sonucu delaminasyon problemleri, kompozit malzeme ile bağlantı elemanı arasında korozyon oluşması ve malzemede meydana gelen deformasyon istenmeyen özelliklerdir. Özellikle havacılık sektöründe yoğun şekilde kullanılan yapıştırıcı ile birleştirme son zamanlarda oldukça önem kazanmıştır. Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda, kullanılacak yapıştırıcı en önemli parametre olup yapıştırıcının türü ve özelliklerine dikkat etmek gerekmektedir [4].

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda yapıştırıcı özelliği, ürünün geometrik özellikleri, ürünün bulunduğu çevresel şartlar, yapıştırmada kullanılacak teknik, yapışma yüzeyinin hazırlanması gibi konular üzerinde çalışmalara devam edilmekte olup güncelliğini korumaktadır. Kompozit malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde, birleştirilecek iki ürün arasında iç gerilmeler, çatlak oluşumu sonrasında oluşabilecek kırılmaların önceden ön görülebilmesi önemli olup bu konu üzerine ar-ge çalışmaları devam etmektedir. Kullanılacak yapıştırıcının, üretilecek kompozitin sonrasında kullanılacağı çevresel şartlara en iyi şekilde dayanabilmesi önem taşımaktadır. Bundan dolayı yapıştırıcı özelliklerinin, çeşitli mekanik ve kimyasal testlerle belirlenmesi farklı çalışma konuları olabilmektedir.



## 1.2. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ

En az iki veya daha fazla sayıdaki farklı malzemelerin uygun kombinasyonlar sonucunda bir araya getirilmesiyle oluşan ve kullanım alanına uygun daha iyi özelliklerin sağlandığı malzeme türüne kompozit malzemeler denir [5]. Yüksek mekanik dayanım, yüksek elektriksel ve ısı özellikler kompozit malzemelerin belirgin özellikleridir. Kompozit malzemeler matris malzeme ve takviye elemanı (fiber, elyaf) adı verilen malzemedan oluşmaktadır [6]. Takviye malzemesi, kompozit malzemeye dayanım sağlamakta, yükün taşınması için kullanılmakta ve matris malzemenin rijitliğini artırmaktadır. Matris malzeme ise, takviye elemanını dış etkilere korumakta olup takviye elemanını bir arada tuttuğundan plastik deformasyona geçiş sırasında oluşabilecek çatlak ilerlemelerini engellemeye çalışmakta ve kompozit malzemenin kopma ömrünü artırmaktadır. Kompozit malzemeleri oluşturan bu iki bileşen birbirleri içinde çözünmezler veya karışmazlar.

Kompozit malzemelerin avantajları; yüksek mukavemet, yüksek kırılma direnci, hafiflik, yüksek yorulma dayanımı, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve elektrik iletkenliği şeklinde sıralanabilir. Dezavantaj olarak ise; yüksek maliyet, düşük süneklik, sıcaklık limitleri, genellikle geri dönüşümünün mümkün olmaması, bazı kompozitler için üretim zorluğu ve kırılma uzamasının az olması şeklinde sıralanabilir [7].

Kompozit malzeme alanında yaşanan gelişmeler sonucunda, kompozitler sanayi ve teknoloji uygulamalarında gittikçe daha fazla tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler yapıları ve birçok özelliğinden dolayı birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Her bir sektörün farklı ihtiyaçları ve istekleri sebebiyle, kompozit malzemelerdeki ürün çeşitliliği bu konuda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemeler uzay ve havacılık sanayi, denizcilik sektörü, tıp, robot teknolojisi, kimya sanayi, müzik aletleri, yapı ve inşaat sektörü, otomotiv sanayi, savunma sanayi, tarım ve gıda sektörü, spor malzemeleri (tenis raketleri, kano ve Formula 1 araçları) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelere neden ihtiyaç duyulduğunu aşağıdaki tablo açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bazı metal ve kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri çizelge 1.1.'de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi malzeme seçiminde sıkça kullanılan özgül çekme ve elastik modül değerleri her tür kompozit malzemedaki saf metal ve alaşımlarından çok fazladır. Bu yüzden günümüzde kompozitler yoğun olarak birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [8].

**Tablo 1.1.** Bazı metal ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [8].

| Malzeme                                   | Yoğunluk<br>( $\rho$ ) gr/cm <sup>3</sup> | Çekme<br>mukavemeti<br>( $\sigma_c$ ) MPa | Elastisite<br>modülü<br>GPa | Özgül çekme<br>mukavemeti<br>( $\sigma_c/\rho$ ) | Özgül<br>elastisite<br>modülü<br>(E/ $\rho$ ) |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Alaşımsız<br>Çelik                        | 7.9                                       | 459                                       | 203                         | 58                                               | 26                                            |
| Alüminyum                                 | 2.8                                       | 84                                        | 71                          | 30                                               | 25                                            |
| Karbon elyaf+<br>1.epoksi reçine          | 1.6                                       | 1260                                      | 218                         | 788                                              | 136                                           |
| Karbon<br>elyaf+2.epoksi<br>reçine        | 1.5                                       | 1650                                      | 140                         | 1110                                             | 93                                            |
| E tipi cam<br>elyaf+epoksi<br>reçine      | 1.8                                       | 1400                                      | 56                          | 824                                              | 33                                            |
| S tipi cam<br>elyaf+epoksi<br>reçine      | 1.8                                       | 1150                                      | 42                          | 639                                              | 23                                            |
| Aramid elyaf<br>(kevlar)+epoksi<br>reçine | 1.4                                       | 1400                                      | 77                          | 1000                                             | 55                                            |
| Bor<br>elyaf+epoksi<br>reçine             | 1.8                                       | 1600                                      | 224                         | 889                                              | 124                                           |

### 1.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemelerin yapısında çok sayıda farklı malzeme kullanıldığından kompozitlerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamaktadır. Bu yüzden kompozit malzemeler birçok özelliğine göre sınıflandırılabilir. Örneğin; kullanılan matris malzemesine göre, fiber malzemesine göre, fiber yönüne göre farklı şekillerde olabilir. Kompozit malzemeler genellikle matris malzemesine göre ve yapıdaki malzemelerin formuna göre iki şekilde sınıflandırılmaktadır [8]. Matris malzemesine göre; polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Takviye elemanlarına göre ise; parçacık takviyeli, lif (elyaf) takviyeli, tabakalı ve karma (hibrit) kompozitler olmak üzere dörde ayrılmaktadır.

### 1.3.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris malzeme, kompozit malzemenin yapısındaki ana elemandır. Takviye elemanının bir arada ve istenilen formda durmasını sağlamaktadır. Kompozit malzemelerde fiberlerin yükü iyi bir şekilde taşıyabilmesi için matris elemanın mekanik özelliklerinin rolü bu konuda önemlidir. Ayrıca matris malzeme, çevresel faktörlere karşı kompozit malzemeyi korumaktadır. Çalışma alanına uygun matris türü seçilmesi gerekmekte seçim yapılırken özellikle ürünün çalışma sıcaklığı önemli bir parametredir. Örneğin yüksek çalışma sıcaklıklarında kullanılacak bir kompozit malzeme için, polimerik reçineler olan polyester veya vinilester reçine kullanmak yerine daha pahalı olan epoksi reçine kullanmak gereklidir. Ancak üretim kolaylığı, düşük maliyet ve yüksek işlenebilirliği ile polimer malzemeler kompozit sektöründe geniş bir yelpazeye sahiptir. Polimer matrisli kompozitler tez çalışmamda da kullanılmıştır ve ileriki bölümde ayrıntılı olarak işlenecektir.

#### 1.3.1.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimerler, monomer olarak adlandırılan birimlerin kimyasal bağlarla bağlanması sonucu oluşan uzun zincirli ve yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimer sözcüğü iki Latince kelimesinin birleşiminden oluşur. Poli çok, meros ise birim anlamına gelmektedir. Polimerler; termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır.

Termoplastik granüller ısıtıldığında yumuşamakta, daha da fazla ısı uygulandığında akışkan hale geçmekte ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşmektedir. Hiçbir kimyasal bağlanma olmadığından kütleme işlemi %100 geri dönüşümlü olup plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik gerçekleşmemektedir. Çalışma sıcaklığı çoğunlukla 5-50 °C arasındadır. Naylon, polietilen, karbonflorür, akrilikler, selülozikler ve viniller termoplastiklere örnek olarak verilebilir. Termoset plastikler ise ısıtıldıkları zaman sürekli bir katılaşma meydana gelir. Soğutulduktan sonra mikro yapıda oluşan değişimler nedeniyle eski yapıya dönüşüm gerçekleşmemektedir. Polyesterler, epoksi, vinilester ve aminler termosetlere örnek olarak verilebilir. En önemli termoset matrisler sürekli elyaf takviyeli, polyester ve epoksi reçinelerdir.

Polimer matrisli kompozitler (PMK) üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kolay şekillendirebilmelerinden dolayı günümüzde birçok sektörde geniş bir kullanım alanları vardır. PMK'larda kullanılan matris (bağlayıcı) malzeme genellikle polyester ve epoksi reçinedir. Takviye elemanı olarak ise cam, karbon ve aramid lifleri kullanılır. Takviye elemanı olan liflerin miktarı arttıkça kompozit malzemenin dayanımı artar. PMK'ların en önemli özellikleri üretim kolaylığı, yüksek özgül mukavemeti ve yüksek özgül elastisite modülüdür. Bundan

dolayı PMK'lar diğer malzemelere göre daha çok kullanılmaktadır. Örneğin PMK'lar, yüksek özgül mukavemetlerinden dolayı uzay ve havacılık sanayisinde alüminyum alaşımlarının yerini almaktadırlar.

Epoksi matris, kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın termoset reçinedir. Yüksek mekanik özelliklerine ve korozyon direncine sahiptir. Yapışma performansı yüksek olduğundan yapıştırıcı olarak da kullanılmaktadır. Kurlenmedeki sıcaklık aralığı geniştir. Havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin uçaklardaki kompozit sandviç yapılarda kullanılan, honeycomb malzemelerde yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Kompozit üretiminde kullanılan reçineler polimer malzeme olup sıvı haldedir. Pek çok reçine şekli kullanılmakta olup reçine türleri çalışma alanına göre seçilmektedir. Aşağıdaki tablo 1.2'de görüldüğü üzere endüstride yaygın kullanılan matris malzemelerin mekanik özellikleri belirtilmiştir [9].

**Tablo 1.2.** Bazı yaygın kullanılan polimerik reçinelerin mekanik özellikleri [9].

| Reçine adı        | Tipi         | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Young Modülü<br>(GPa) | Gerilme Dayanımı<br>(MPa) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Epoksi            | Termoset     | 1,1-1,4                          | 2100-5500             | 40-85                     |
| Fenol formaldehit | Termoset     | 1,2-1,4                          | 2700-4100             | 35-60                     |
| Polyester         | Termoset     | 1,1-1,4                          | 1300-4100             | 40-85                     |
| Naylon            | Termoplastik | 1,1                              | 1300-3500             | 55-90                     |
| Polikarbonat      | Termoplastik | 1,2                              | 2100-3500             | 55-70                     |
| Polietilen        | Termoplastik | 0,9-1                            | 700-1400              | 20-35                     |

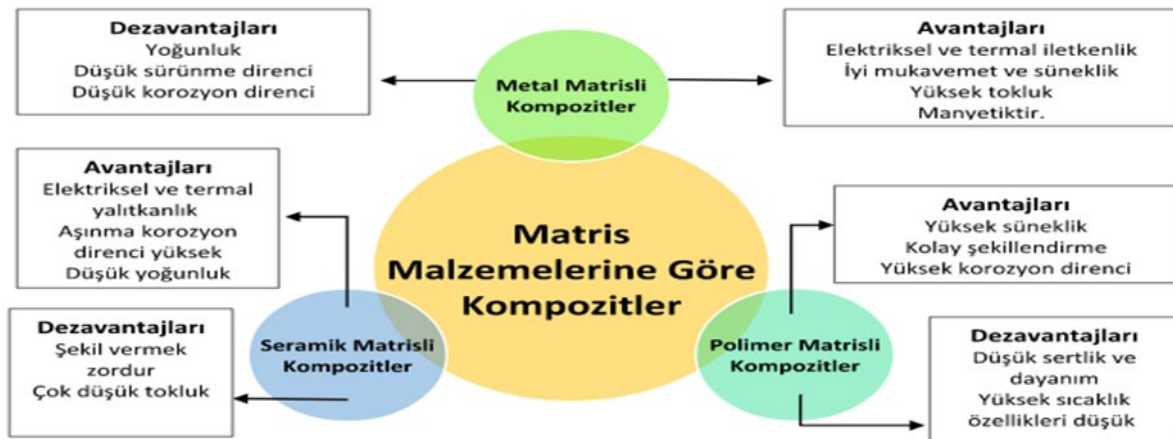
#### 1.3.1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Matris malzeme olarak metal ve takviye elemanı olarak ise en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Genellikle matris olarak; alüminyum, magnezyum, nikel, bakır ve titanyum malzeme kullanılmaktadır. Takviye elemanı, kimyasal içeriklerine göre karbürler, oksitler ve seramikler olmak üzere üç ana grupta; yapısal özelliklerine göre ise partikül, whisker, sürekli lif ve kısa (kırık) fiber olarak dört ana grupta toplanmaktadır. Çalışma alanına uygun şekilde takviye elemanı seçimi yapılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler, (MMK) metallere göre daha sert (rijit) ve mukavemeti yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek aşınma dayanımı ve elektrik iletkenliği özelliklerine

sahiptir. MMK'lar hafif ve aynı zamanda dayanıklı olduğundan özellikle otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Örnek olarak SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitler verilebilir.

### 1.3.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik matrisli kompozitler (SMK) yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif malzemelerdir. Polimer matrisli kompozitler sahip oldukları hidrokarbon yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıkta kullanılamamakta bu yüzden yüksek sıcaklıktaki çalışma alanlarında SMK'lar kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerin kullanım alanlarına; kesici takımlar ( $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  ve  $Al_2O_3$ -TiC), havacılık ve askeri uygulamalar ( $ZrB_2$ -ZrC), motor ve enerji bağlantılı uygulamalar ( $AlO_2$ -SiC) örnek verilebilir. Seramik matrisli kompozitler genellikle sert ve kırılgan olduklarından çok düşük süneklik ve tokluğa sahiptirler ayrıca termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu yüzden çatlaklara karşı oldukça hassas malzemelerdir. Seramiklerin bu kırılgan yapısı; yüksek sıcaklık dayanımı, hafiflik, kimyasal kararlılık ve aşınma direnci gibi birçok önemli özelliğini önemsiz hale getirmekte ve özellikle savunma ve havacılık uygulamalarında kullanım alanlarını azaltmaktadır [10]. Bu sebeple seramik malzemelere uygun katkı malzemeleri eklenerek daha iyi özellikler sağlanarak yüksek sıcaklığın bulunduğu havacılık sektörü, uzay araçları ve otomotiv sektöründe motor kısımlarında kullanılabilmektedir. Şekil 1.1.'de görüleceği üzere kompozitlerde kullanılan matris malzemelerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir [11]. Kullanım alanına uygun olacak şekilde üretim sırasında matris seçimi yapılmaktadır.



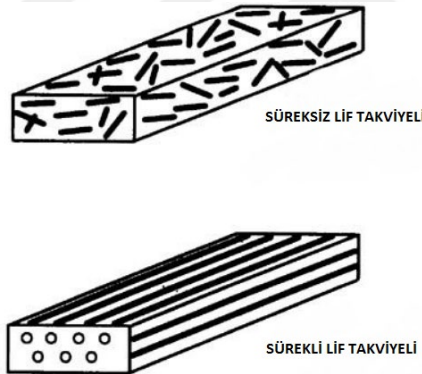
Şekil 1.1. Matris malzemelerine göre kompozitlerin avantaj ve dezavantajları [11].

### 1.3.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kullanılacak elyaf malzemesinin fiziksel özellikleri, kompozit malzemenin özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Takviye elemanları; elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı kompozitler ve karma (hibrit) kompozitler olmak üzere sınıflandırılabilir. Yaygın olarak ise elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

#### 1.3.2.1. Lif (elyaf) Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemelerde çoğunlukla elyaf malzemeler kullanılır. Yüksek dayanıma ve düşük özgül ağırlığa, ısı ve elektrik yalıtımı özelliklerine sahiptirler. Kompozit malzemelerin kullanım alanına göre farklı tür elyaf malzemeler seçilebilir. Elyaf lar kompozit içerisinde farklı tür yapılar da bulunabilirler. Bunlar sürekli ve süreksiz lif takviyeli olmak üzere iki şekilde sınıflandırılabilir. En yaygın kullanılan elyaf malzemelerine; karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf örnek verilebilir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler anizotropik özelliktedirler. Takviye elemanı olan elyaf Şekil 1.2’de görüldüğü gibi sürekli ve süreksiz (kısa) fiberler olmak üzere iki alt grupta incelenmektedir.



Şekil 1.2. Elyaf takviyeli kompozit [12].

**Cam elyaflar:** Camdan üretilen ve içerisinde yüksek oranda silika ( $\text{SiO}_2$ ) bulunduran malzemelerdir. Genelde polimer matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek dayanıma sahip olması, ucuz olması ve yalıtım özellikleri göstermesi yaygın bir şekilde kullanılmasına sebep olmuştur. E tipi, C tipi ve S tipi camlar olmak üzere farklı türlerde cam elyaflar üretilmiştir. Bu cam elyaf türleri farklı kullanım alanlarında tercih edilmektedir. Reçineyi oldukça iyi bir şekilde emebilen cam elyaflar, üretim sırasında kullanımı nispeten kolay elyaflardır.

**Karbon elyaflar:** Ana bileşenleri karbonlaşmış akrilik elyaf, naylon ve katrandır. Karbon fiber, kompozit bir malzeme oluşturmak için genellikle reçine ile kürlenir. Polimer matrisli kompozit

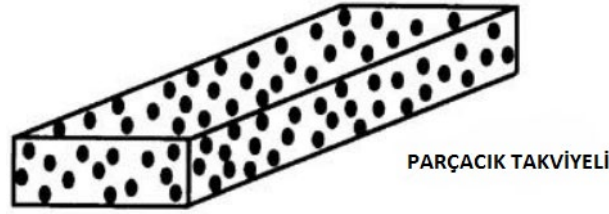
malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Karbon elyafların kullanımında en dikkat çeken nokta yaklaşık çelikten 4,5 kat daha hafif ve 3 kat daha mukavemetli olmasıdır. Havacılık ve uzay uygulamalarında, spor araç-gereçlerinde ve askeri amaçlı malzemelerde kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin üretimi esnasında iki malzeme arasında oluşabilecek boşluklar veya hava kabarcıkları malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve hafiflik en önemli temel özellikleridir.

*Aramid elyaflar:* Aramid; aromatik polyamid'in kısaltması olan polimer malzemelerdir. Kevlar adı verilen ticari ismi ile de bilinir. Çeliğe yakın bir sertliği vardır. Aramid liflerinden oluşan aramid elyaflar; yüksek ısı dayanım, yüksek çekme mukavemeti ve düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Darbe direnci yüksek malzemelerdir. Gevrekliği karbon elyafların yarısıdır. Aramidin mekanik özellikleri karbon elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Uzay uygulamaları ve askeri amaçla yapılan kurşun geçirmez giysilerde, balistik uygulamalarında, gemi halatlarında, itfaiyeci giysilerinde ve bisiklet tekerlerinde asbest yerine kullanılabilir. Aramid ismi, aromatik poliamit kelimelerinin birleşiminden oluşur. Aramid elyafının iki türü mevcut olup meta aramid ve para aramid (keklar) olarak adlandırılırlar. Para aramidler daha yaygın kullanılmaktadır. Kevlar malzemelerinde en çok bilinen çeşitleri Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Kevların kimyevi bileşimi poli para fenilen terepitemid olarak tanımlanır. Aramid elyafların Young modülü 130-179 GPa iken karbon elyafların yaklaşık 300 GPa, cam elyafların ise yaklaşık 81 GPa'dır [13]. Aşınma ve kesilmeye karşı yüksek dirençli, ateşe dayanaklı ve erime noktası oldukça yüksek malzemelerdir. UV ışınları, klor, tuz ve asitlere karşı duyarlı olup yapısı itibariyle nem almaya müsait malzemelerdir

#### *1.3.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler*

Takviye malzemesinin boyutları, takviye malzeme özelliklerinin kompozit malzemeye olan katkısını belirler. Bu boyutlar mikroskobik veya makroskobik boyutta olabilirler. Parçacık takviyeli kompozitler, izotrop yapıdadırlar. Takviye malzemesi istenilen özelliklere göre, büyük ve küçük parçacık şeklinde kullanılabilir. Büyük parçacık takviyeli kompozitlerde yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır. Büyük parçacık takviyeli kompozitlere örnek Agrega verilebilir. Küçük parçacıklar ise, dislokasyonların hareketlerini engelleyerek kompozit malzemenin dayanımını artırır. Buna örnek olarak ise  $Al_2O_3$  ve SiC seramikler verilebilir. Parçacık takviyeli kompozitlerin üretimi elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha düşük maliyetlidir. Fakat parçacık takviyeli kompozitler, elyaf takviyelilere göre daha düşük mekanik

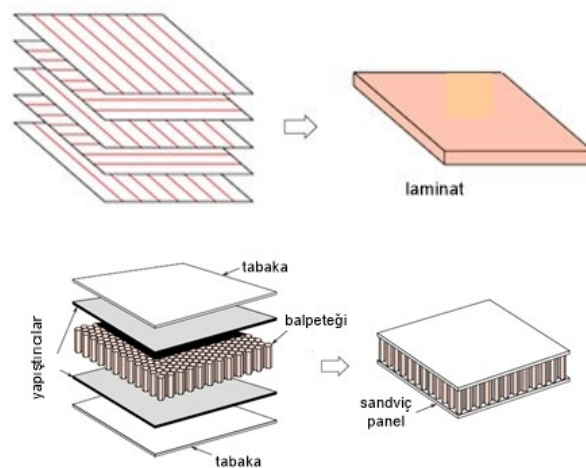
özelliklere sahiptirler. En yaygın kullanılan polimer matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Uçak motorundaki parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler. Şekil 1.3’de görüldüğü üzere parçacık takviyeli kompozitin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Parçacık takviyeli kompozit [14].

#### 1.3.2.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler yapı olarak en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Temel malzeme eksenleri doğrultusunda farklı yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste gelecek bir şekilde yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Tabakalı kompozitler; matris içerisinde rastgele yönlendirilmiş elyaf, tek yönlü elyaf veya farklı türde elyaf takviyeli tabakalardan oluşabilir. Farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda daha mukavemetlidirler. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, uçakların kanat ve kuyruk kısımlarında yüzey kaplama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.4’te görüleceği üzere tabakalı kompozitlerin yapısı ve içeriği gösterilmiştir.

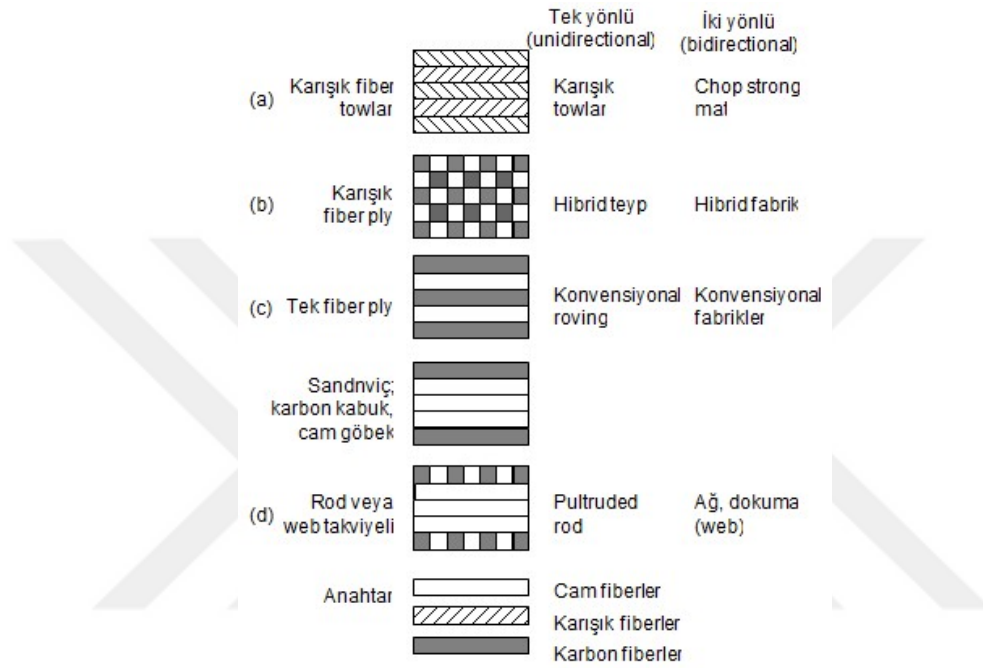


Şekil 1.4. Tabakalı kompozitlerin yapısal dizilişi ve sandviç panellerin yapısı [14].



#### 1.3.2.4. Karma (hibrit) Kompozitler

İki ya da daha fazla takviye elemanının matris ile bir araya getirilmesiyle oluşturulan daha iyi mekanik özelliklere sahip yeni malzemelere hibrit kompozitler denir. En çok bilineni cam ve karbon elyaf takviyeli polimerik reçinelerdir. Hafif kara, su ve hava taşımacılığı ve spor malzemelerinde kullanılmaktadır. Şekil 1.5'te görüleceği üzere farklı hibrit yapıdaki kompozitlerin konfigürasyonları belirtilmiştir.



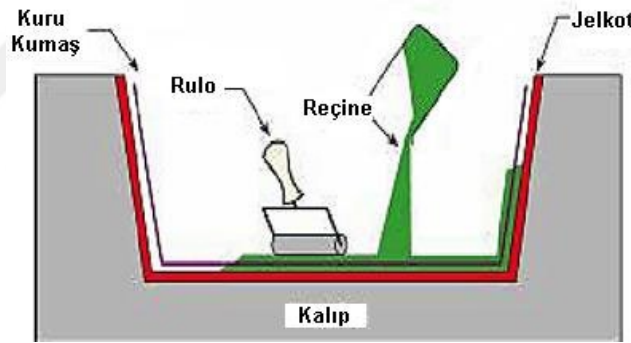
Şekil 1.5. Farklı hibrit konfigürasyonlar ve tipik tek-yönlü ve iki yönlü örnekler [14].

#### 1.4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Önceki bölümlerde kompozit malzemeleri matris ve takviye elemanına göre sınıflandırarak polimer matrisli kompozit malzemeler anlatılmıştır. Bu bölümde ise polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ele alınacaktır. PMK'ların üretilmesinde kullanılacak üretim türü; kompozit malzemenin elyaf türüne, şekline ve kullanılacak matris türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin; üretilecek malzemenin dayanımı çok önemli değilse ve hızlı üretilmesi isteniyorsa el yatırma yöntemi ya da pres yardımıyla üretim gibi yöntemler tercih edilmelidir. Kullanılacak malzemenin yüksek dayanım bekleniyorsa belirli sıcaklık ve basınç altında kürlenmiş matrislerin (epoksi) kullanılması gerekmektedir ve otoklav gibi metotlar tercih edilmelidir. Her bir üretim yönteminin kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Kompozit malzeme tasarımı ve üretimi yapılırken bunlar dikkate alınmalıdır.

#### 1.4.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up) Yöntemi

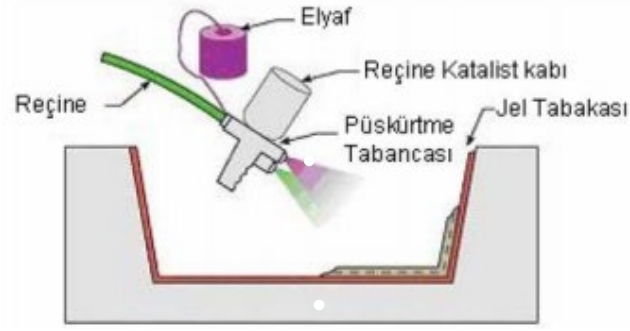
Hazırlanmış olan kalıp üzerine dokuma veya kırpık elyaflar elle yatırılarak üzerine bir rulo veya fırça yardımıyla uygulanan sıvı reçinenin elyaflar içerisine emdirilmesi yöntemidir. Kalıp üzerine elyaf serilmeden önce kalıp temizlenerek jelkot adı malzeme sürülür. Bu malzeme yüzey görünüm kalitesini artırmanın yanında ürünün çevresel etkilere karşı performansını sağlar. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır ve sürülen reçinenin kurlenmesi beklenir. Bu üretim yönteminde elyaf malzemelere reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Bu yüzden bu üretim için viskozite değeri düşük reçineler seçilebilir. Elle yatırma tekniğinde en çok kullanılan reçineler; polyester, epoksi, vinil ester ve fenolik reçinelerdir. Elle yatırma işlemi az üretim yapılacaksa kolaylık sağlar ancak yoğun işçilik gerektirmektedir. Reçinenin emdirilmesi zorluğundan ağır aramid elyaflarda bu yöntem pek tercih edilmemektedir. Rüzgâr türbin kanatları, kompozit plakalar ve tekne üretimlerinde uygulanmaktadır. Şekil 1.6’da görüleceği üzere elle yatırma yönteminde kullanılan malzemeler ve üretimin şematik gösterimi belirtilmiştir.



Şekil 1.6. Elle yatırma tekniği [15].

#### 1.4.2. Püskürtme (Spray-up) Yöntemi

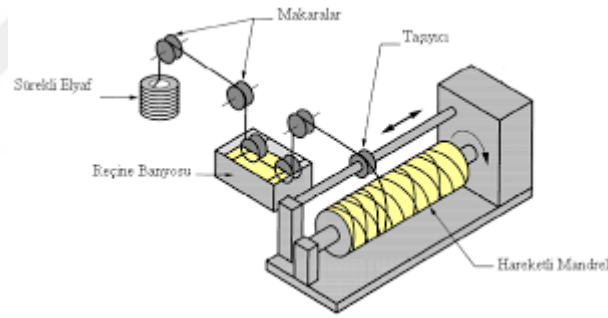
Bir nevi alet yardımıyla yapılan elle yatırma yöntemi olarak görülebilir. Kırpılmış elyaflar ve reçine malzeme, jelkot uygulanan kalıp yüzeyine özel bir tabanca ile püskürtülür. Reçinenin içerisine sertleştirici kimyasal malzeme koyulduktan sonra tabancanın haznesine dökülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan bir kırpıcı sistem yardımıyla yapılır. Püskürtme işleminden sonra yüzeyin bir rulo yardımıyla düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 1.7’de tabanca yardımıyla püskürtme yöntemi görülebilir.



Şekil 1.7. Püskürtme tekniği [16].

#### 1.4.3. İplik (Filament) Sarma Yöntemi

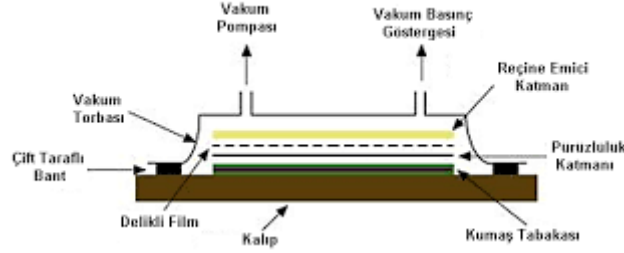
Bobinlere sarılı olan fiberler bir reçine banyosundan geçerek ıslatılır. Ardından bu lifler makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmaktadır. Kalıba farklı açılarla sarılan sürekli lifler farklı mekanik özelliklerde ürünler elde etmemizi sağlar. Kalıba sarılan elyaf katlar arttıkça ürün sertleşir. Çok yüksek fiber oranına sahip, yüksek dayanımlı PMK yapılar üretilebilir. Şekil 1.8’de iplik sarma yöntemi görülebilir.



Şekil 1.8. İplik sarma yöntemi [17].

#### 1.4.4. Vakum Torbalama Yöntemi

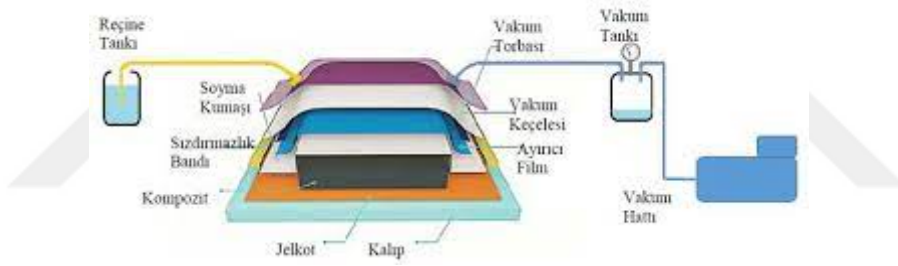
Vakum torbası kullanılarak, reçine ıslatılmış elyafların veya prepreglerin vakum altında kurluşup sertleşmesine dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde amaç; fazla reçinenin ve hava boşluklarının kompozit yapı içerisinde alınmasını sağlamak ve yüksek elyaf oranına sahip ürün elde etmektir. El yatırması yöntemiyle benzer yanları çoktur. Özel ya da performansın kritik olduğu uygulamalarda bu yöntem kullanılır. El yatırması yönteminden farkı içerisindeki havanın alınması için basınç uygulanmasıdır. Şekil 1.9’da vakum torbalama yöntemi ve üretim sırasında kullanılan malzemeler görülebilir.



Şekil 1.9. Vakum torbalama yöntemi [18].

#### 1.4.5. Vakum İnfüzyon Yöntemi

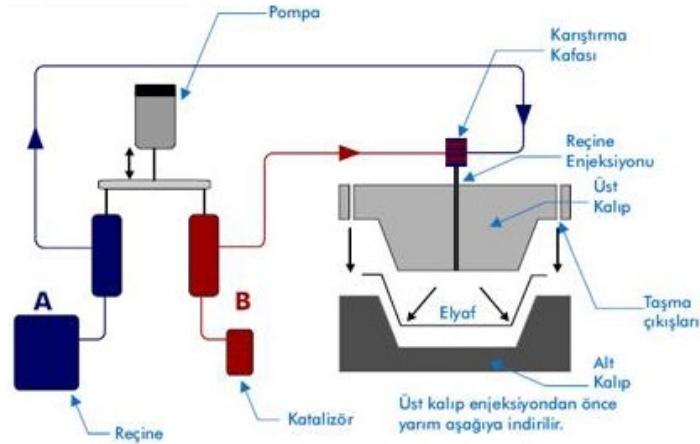
Vakum infüzyon yönteminde elyaf reçine laminasyonu yapılmadan vakum torbası kapatılmaktadır. Sisteme, tank içerisinde bulunan reçine vakum sistemi sayesinde çekilmektedir. Bu yöntemde eğer sistem içerisinde hava sızdırmazlığı iyi derecede sağlanmış ise yüzey kalitesi yüksek ürünler elde edilebilmektedir. Şekil 1.10'da vakum infüzyon yönteminin sistemi görülebilir.



Şekil 1.10. Vakum infüzyon yöntemi [18].

#### 1.4.6. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi

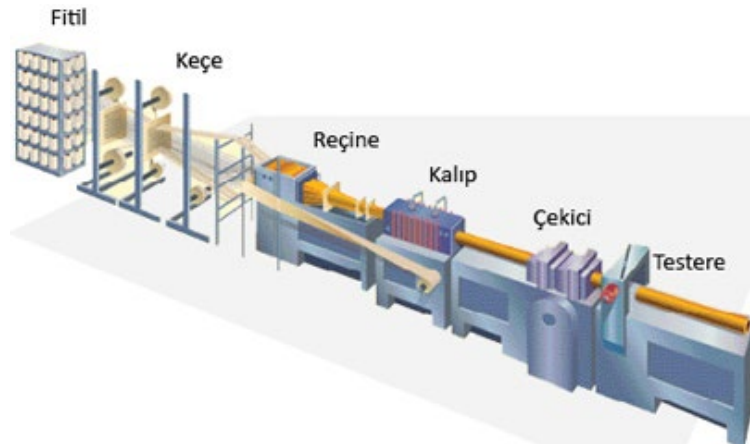
1980' yıllarında kompozit üretim yöntemlerinden biri olan RTM, yüksek elyaf oranı elde edilebilen ve sürekli elyaf takviyeli kompozit üretim yöntemidir. Düşük veya yüksek hacimli büyük veya küçük boyutlu malzemelerin imalat uygulamaları için kullanılır. Üretimin sonucunda karmaşık yapıları bitmiş parçaların üretilebilir olması otomotiv ve havacılık, spor malzemeleri, denizcilik uygulamalarında kullanımını arttırmıştır. Hazır kalıplama (SMC, BMC) uygulamalarında da benzer geometride parçalar üretilebilmesine rağmen bu işlemlerde kısa elyaf kullanılması, istenen dayanıma ulaşılmasını engellemektedir. RTM yönteminde genellikle düşük viskoziteli termoset reçineler tercih edilmektedir. Şekil 1.11'de reçine transfer yöntemi görülebilir.



Şekil 1.11. Reçine transfer kalıplama yöntemi [19].

#### 1.4.7. Pultrüzyon Yöntemi

Bu metot 1950 yılları öncesinde ilk olarak yuvarlak çubuk imalatı yapılarak başlanmış ardından farklı geometrilerde malzeme imalatı ile devam etmiş ve patenti de 1951 yılında alınmıştır. Cam elyaf, karbon vb. takviye malzemelerinin uygun bir reçine matrisi ile birleştirilerek, sıcak kalıptan çekilmesi ile yapı profil imalatına pultrüzyon denir. Pultrüzyon yönteminde termoset reçineler kullanılmaktadır. Pultrüzyon kelime anlamıyla da "Pull" ve "Extrusion" kelimelerinden türemiş sürekli bir profil üretim biçimidir. Uygun kalıp tasarımı ile istenen birçok parça üretimi bu metotla yapılabilir. Endüstride yaygın bir biçimde takviye malzemesi olarak cam elyafı kullanıldığından dolayı CTP profiller pultrüzyon hattında üretilmektedir. Şekil 1.12’de pultrüzyon makinası şematik olarak görülebilir [20].



Şekil 1.12. Pultrüzyon üretim hattı [20].

#### 1.4.8. Otoklav Yöntemi

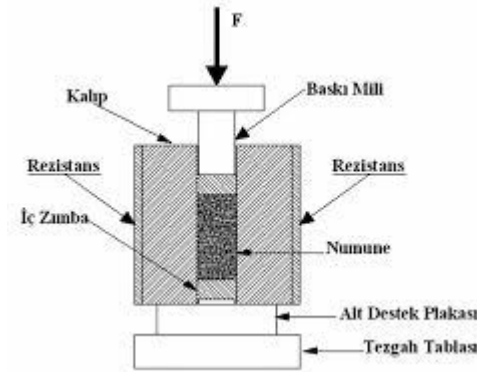
Bu metot ile kompozit malzeme üretiminde, bir reçine yardımı ile bir araya getirilen katmanlar otoklav denilen yüksek ısı ve basınç üreten fırınlarda birleştirilir. Katmanların reçine ile birleşebilmesi için belirli bir süre hem ısı hem de basınç uygulanması gerekmektedir, bu işleme kürleme denilmektedir. Otoklav; basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kap olup yüksek fiber oranına sahip malzeme üretilebilmektedir. Vacuum bagging yöntemi ile benzer olup fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Ancak bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır. Ayrıca otoklav cihazının imalatı basınçlı ekipman yönetmeliğine uygun gerçekleştirilir. Şekil 1.13'te otoklav cihazı (fırını) görülebilir.



Şekil 1.13. Otoklav cihazı [21].

#### 1.4.9. Sıcak Presleme (Sıkıştırma Kalıplama) Yöntemi

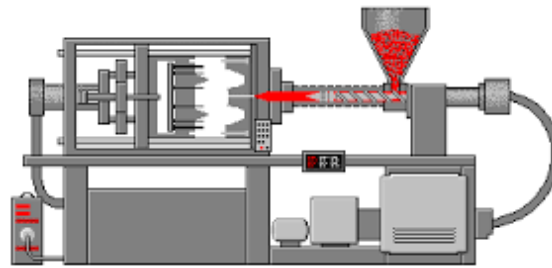
Hazır kalıplama bünyesinde cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzüde kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi komplike şekiller elde edilebilmektedir. Bu yöntemin dezavantajları ise kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır. Şekil 1.14'te sıcak presleme yöntemi görülebilir.



**Şekil 1.14.** SMC Kalıplama [22].

#### 1.4.10. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Yöntemin temel prensibi, termoplastiklerin ısıtıldığında yumuşamasına ve soğutulduğunda sertleşmesine dayalıdır. Yüksek boyutsal kararlılık ve karmaşık şekilli ürünlerin kalıplanmasında yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Yüksek hacimli üretimler için de uygundur. Bazı durumlarda, üretim hızı makina başına saatte binlerce adet parçaya çıkabilmektedir. Bu yöntemde elde edilen ürünlerin çoğu takviyesiz termoplastiklerdir. Termoset uygulamalarında da kısmen başarılıdır. Takviyeli termoplastiklerin kalıplanması için, ekipman ve kalıplama tekniğinde çok küçük değişiklikler yapılması yeterli olmakta hatta bazen hiçbir değişikliğe gerek duyulmamaktadır. Birçok enjeksiyon kalıplamasında granül halindeki termoplastik reçine bir huniden, ısıtılmış metal silindirin bir ucuna beslenir. Silindir içinde enjeksiyon burğu yivleri dönmeye başlar ve reçine sıcak silindir içine alınır. Isıtma süresince reçine yarı akışkan bir duruma gelerek, kalıp içine enjekte edilir. Şekil 1.15'te enjeksiyon kalıplama makinesi görülebilir.



**Şekil 1.15.** Enjeksiyon Kalıplama [23].



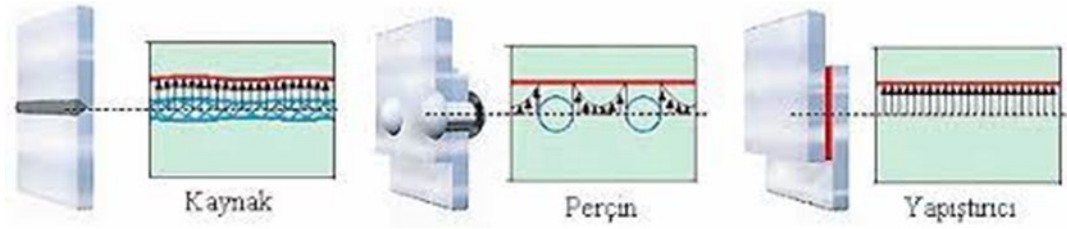
## 1.5. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

### 1.5.1. Mekanik Birleştirmeler

Sökülebilen ve tekrardan birleştirilerek kullanılabilen makine parçaları yardımıyla yapılan bağlantılardır. Bu parçalara örnek; pim, cıvata veya segman verilebilir. Bu bağlantı yöntemleri düşük maliyet, tamir kolaylığı, karmaşık yapılarda birleştirme kolaylığı sağladığından avantajlıdır. Ancak mekanik birleştirme yapabilmek için malzeme üzerine delik açılması, açılan deliğin çatlak oluşturup ilerlemesi ve bağlantı elemanının ağırlık artışına sebep vermesi en önemli dezavantajlar olarak verilebilir. Mekanik bağlantı için oluşturulan delikler geometrik süreksizlik oluşturmakta ve bu süreksizlik malzemede gerilme yığılmalarına yol açmaktadır [24]. Tamir yapılacak malzemede delik açma işlemi sırasında açılan deliğin çevresinde çentik etkisi oluşmaktadır. Bahsedilen bu malzeme yığımları ve çentikler malzemenin mekanik özelliklerine olumsuz etki etmesi sebebiyle yapıştırıcı kullanarak yapılan birleştirmeler kompozit malzemelerde daha avantajlı ve yaygındır.

### 1.5.2. Yapıştırıcı Kullanılan Birleştirmeler

Şekil 1.16’da görüldüğü üzere yapıştırıcı kullanılan birleştirmeler; daha az gerilme yığılması, daha düzgün yük dağılımı, tasarım esnekliği, kolay imalat, hafiflik, sızdırmazlık, korozyon direnci, yüksek ısı ve ses yalıtımı, daha iyi titreşim sönümleme ve daha yüksek yorulma direnci özelliklerine sahip olmaktadır.



**Şekil 1.16.** Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları [25].

Yapıştırıcı kullanılan birleştirmeler genellikle tabakalı kompozit malzemelerin tamirlerinde kullanılır. Bu birleştirmelerin mukavemeti; birleştirilen malzemelerin uzunluğuna, kalınlığına, geometrik yapısına, elastisite modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma bölgesinin yüzey alanına, yapışma bölgesinin büyüklüğüne, yapışacak malzeme yüzeylerinin üretim yöntemine, yapıştırıcı türüne ve yapıştırıcı kullanılan birleştirmeli bağlantının sonrasındaki çevresel şartlara bağlıdır.



Kompozit malzemelerde hafifliğin oldukça önem arz etmesi sebebiyle geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı kompozit yapıları daha hafif hale getirmiştir. Deniz veya hava araçlarındaki kompozit malzemelerin tamir işlemlerinde yapıştırıcı kullanılması hem sistemi ağırlaştırmamakta hem de tamir edilen yüzeyin kesit alanını fazla büyütmekte olup bu durum daha az direnç oluşturmaktadır. Ayrıca bu bağlantılar iyi sızdırmazlık özelliği sayesinde sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilirler.

Yapıştırıcı kullanarak yapılan birleştirmelerde düşük ısıl dayanım olduğundan yüksek ısı bulunan çevre şartlarında yük altında taşıma kapasiteleri zayıflamaktadır. Yapıştırma öncesinde yapışma yüzeyinde detaylı ve iyi bir temizlik işlemi yapılması gerekmektedir. Birleştirilecek bağlantının yapısına göre yapıştırıcının kuruması için gerekli olan bekleme süresi uzayabilmektedir. Yapıştırıcı kullanarak yapılan birleştirmelerin tahribatsız muayenesi zor olmaktadır. Birleştirme sırasında uygun çevre şartları gerekmektedir. Bazı bağlantılarda uygun birleşme için basınç ve ısı kullanılmaktadır. Yapıştırıcı kullanılan birleştirmelerde özellikle köşe bağlantıların tamirlerinde güçlükler yaşanmaktadır.

Bu tez çalışmasında alternatif yapıştırıcının içerisine katılan nano ve mikro boyutlardaki toz partiküller, test yapılacak numunelerin standarda uygun ölçüleri ve yapıştırıcı kalınlığı gözetilerek deney test numuneleri hazırlanmıştır. Cam fiber takviyeli epoksi bazlı tabakalı kompozit levhalar ve katkı malzemeli epoksi yapıştırıcı kullanılarak ıslak yapıştırma yöntemi ile yapıştırıcı kullanılan birleştirmeler (tek bindirmeli bağlantılar) üretilmiştir. Daha sonra test numunelerine çekme testleri yapılarak alternatif yapıştırıcı amacıyla yapılan epoksi reçinenin içerisine katılan toz partiküllerin, bindirmeli bağlantılardaki mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Özellikle yüksek mekanik dayanım ve hafiflik amacıyla tez çalışmasında yapıştırıcı kullanılan birleştirme yöntemi tercih edilmiştir

## **1.6. LİTERATÜR ÇALIŞMASI**

Thirukumaran ve arkadaşları Fiber Metal Plakaların (FMP) arayüzey adezyonun, alüminyum üzerindeki farklı yüzey işlemleriyle geliştirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu yüzey işlemleri; NaOH ile işlem görmüş alüminyum (AT),  $K_2Cr_2O_7$  ile işlem görmüş alüminyum (CT),  $Fe_2(SO_4)_3$  ile işlem görmüş alüminyum (FT) ve işlem görmemiş alüminyum yüzeylerdir (UT). Farklı yüzey işleme yöntemleri, yüzeydeki kret ve olukların oluşumunun doğal, oksit ve alümina katmanları ile reaksiyona girerek gerçekleştiği korozyon işlemini arttırarak yüzey dokusunda önemli bir değişiklik getirmiştir. Uygulanan ön işlemin etkinliği, FMP'nın gerilme

kuvvetini göstermiştir. Sonuçlar, FT koşulunun diğer işlem koşullarına göre daha yüksek çekme dayanımı sağladığını kanıtlamaktadır. Çünkü  $SO_4^{2-}$  iyonlarının, pürüzlülüğü artıran ve aynı zamanda malzemenin yüzeyleri arasında iyi yapışmayı sağlayan çukurlukları oluşturduğunu belirtmişlerdir [26].

Razavi ve arkadaşları tek bindirmeli yapışkan bağlantıların mekanik davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapışkan tabakaya, silika nanoparçacıkları (SNP) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) olmak üzere karışıma iki nanopartikül eklenmesinin etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, karışıma nanoparçacıkların eklenmesi; kopma mukavemeti ve kopma uzaması dâhil mekanik özellikleri geliştirmiştir. Karışıma SNP'lerin ve MWCNT'lerin yapışkan tabakaya dâhil edilmesinin, incelenen üç nanopartikül ağırlık yüzdesinde mekanik özellikler üzerinde bozucu bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [27].

Jairaja ve arkadaşı yaptıkları çalışmada AV138 ve Araldite-2015 yapıştırıcılar gibi iki farklı kırılğan ve esnek yapıştırıcı kullanmış ve daha sonra bu yapıştırıcıların bağlanma kuvveti üzerindeki etkisini deneyler yaparak incelemişlerdir. Bu çalışmada AV138 ve Araldite-2015 yapıştırıcılarının karışımı eşit oranlarda kullanıldığında, iki yapıştırıcının karıştırılmasıyla elde edilen yapışkan bağı güçlendirildiği ve elde edilen en yüksek bağlanma kuvvetinin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kompozit yapının daha iyi performans göstermesi için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve alüminyum yapıştırıcılar arasındaki yapışkan bağı güçlendirmek için iki yapışkan karışımının kullanılmasını tavsiye etmişlerdir [28].

İşcan ve arkadaşları bazı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmada epoxy, Devcon 2 ton epoxy ve Welder olmak üzere üç farklı yapısal yapıştırıcı kullanmışlardır. Welder yapıştırıcının diğer yapıştırıcılara göre mekanik değerleri daha yüksek sonuçlanmıştır. Devcon 2 ton epoksideki şekil değiştirme değerleri diğer iki yapıştırıcıya göre daha düşük değerlerde çıkmıştır. Deney sonucunda yüksek mukavemet istenen birleştirmelerde Welder yapıştırıcısını ve yüksek mukavemet gerektirmeyen birleştirmelerde ise Devcon 2 ton epoxy yapıştırıcının kullanılabilir olduğunu belirlemişlerdir [29].

Ekrem yaptığı çalışmada MWCNT ve polivinil alkol (PVA) nanoelyaf takviyeli epoksi yapıştırıcıların, alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışlarını incelemiştir. Numunelerin çekme testi sonucundaki kırılma yüzeyleri incelendiğinde, %1 MWCNT, PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında MWCNT takviyeli nanokeçe elyaflar, epoksi reçinenin kırılma yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını belirtmiştir. Buna göre, MWCNT

takviyeli PVA nanokeçe elyaflar epoksi reçine içerisine katıldığında epoksi reçinenin gevrek kırılma eğilimini azaltarak yapıştırıcının tokluğunu arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, MWCNT takviyeli PVA nanokeçe elyaflar bölgesel olarak yapıştırıcı bağlantılarında epoksi matris ile yapıştırılan malzemenin ara yüzeyinin kohezyon olarak hasar görmesine sebep olduğunu belirtmiştir [30].

Ghosh ve arkadaşları nanopartikül katkılı kompozit yapıştırıcı kullanarak, yapışkan bağlantılı bakırın üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, ultrasonik çift karıştırma işlemi ile işlem görmüş titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) nanoparçacık takviyeli epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak üretilen, mekanik ve kimyasal işlem görmüş bakır yüzeyin yapışkan bağlantısının özelliklerini incelemektir. Çalışma sonucunda bakır yüzeyin kimyasal olarak işlenmesi, epoksi yapıştırıcı ile temas açısını azaltarak ıslanabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Nanopartikül katkılı kompozit yapıştırıcısının kullanılması, bağlantının kayma dayanımını ve tokluğunu artırmıştır. Kimyasal olarak işlem görmüş bakır yüzeyin olumlu fiziksel ve kimyasal yüzey özellikleri ve iyi ıslanabilirliği, öncelikle yapışkan bağlantının mukavemetini ve tokluğunu artırdığını belirtmişlerdir [31].

Meybodi ve arkadaşları ara yüzeydeki yapışma dikkate alınarak polimer/nanokil kompozitlerin elastik modülünün tahmininde yeni bir yaklaşım üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, polimer/nanokil kompozitlerin elastik modülünün deneysel ve sonlu elemanlar incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar incelemelerinin deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla sonlu elemanlar modellemesinde düşünülen ara yüzey yapışmasının etkinliği de gösterilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar, arayüzey yapışması dikkate alındığında, sonlu elemanlar ve deneysel değerler arasındaki hatanın %27'den yaklaşık %7'ye düşürüldüğünü göstermişlerdir (ağırlıkça %7 nanokilli numuneler için) [32].

Brantseva ve arkadaşları alüminosilikatlar ile doldurulmuş nano kompozitlerin yapışma özellikleri ve bunları etkileyen faktörler üzerine bir çalışma yapmışlardır. En iyi sonuçları elde etmek için yüzeyin uygun organik modifikasyonuna sahip bir kil (toz) seçilerek ve uygun karıştırma teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Ultrasonik karıştırma, tozun pul pul dökülmesini / araya girmesini sağlamak için muhtemelen en iyi yöntemdir. Tozlar, pul gibi dökülebilir ve yapıştırıcının büyük kısmında iyi bir şekilde dağılmışsa, yapıştırıcıların kohezyon mukavemeti ve bunların yanı sıra sertlik değeri de artar. Bu durum genellikle malzemedeki gerilme dağılımındaki değişiklikler ve artık gerilmelerdeki azalmaya bağlıdır. Düşük kil içeriklerindeki yapışmanın artmasının ana nedenleri, yapışma mukavemetinin artması ve birleşme yüzeyinde azalan artık gerilmelerdir. Kil içeriğindeki daha fazla artış,

interfazda kusurlar gibi davranan kil agregalarının oluşumuna neden olur ve bu da yapışma dayanımının bozulmasına neden olur. Kil yüzeyinin organik modifikasyonu genellikle daha iyi kil-matris etkileşimi ve matriste daha düzgün nanopartikül dağılımına yol açar. Cloisite 30B'nin, kil üreticileri tarafından sağlanan mevcut OMMT serilerinden DGEBA bazlı epoksi reçineleri için en iyi sonucu verdiğini tavsiye etmişlerdir [33].

Nayak ve arkadaşları epoksi düzenleyicilerin ( $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ ) epoksi cam elyafı hibrit kompozitlerin mekanik performansına etkisi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada; katmanlar arası kesme mukavemeti (ILSS), eğilme mukavemeti ve eğilme modülü gibi mekanik özellikler,  $SiO_2$  değişimli epoksi bazlı kompozit olması durumunda diğer dolgu maddelerine göre daha yüksektir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, seramik parçacık boyutunun azalmasıyla artmıştır. Alümina değişimli epoksi bazlı kompozit sertliği ve darbe enerjisini diğer değiştiricilere kıyasla artırır. Matristeki  $Al_2O_3$  mikro partiküllerinin yığın oluşturduğu sonuçlarını çıkarmışlardır [34].

Anam ve arkadaşları dolgu maddeleri içeriğinin mekanik özelliklere etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, soyma ve kesme testlerinde en yüksek değerlere sırasıyla silika ve alüminyum tozu ile ulaşılmıştır. Yapıştırıcının mukavemeti, yapışkan özelliklerine ve yapışan ile yapışkan arasındaki bağ yapışmasına bağlıdır. Yakalanan hava nedeniyle boşluk, yapıştırıcı mukavemetini azaltmaya yol açabileceğini belirtmişlerdir [35].

Cho ve arkadaşları yaptıkları çalışmada partikül büyüklüğünün; elastik modülü, gerilme mukavemeti ve partikül / matris bağ kırılma tokluğu partikül kompozitleri üzerindeki etkisini belirlemek için sistematik bir deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Young modülü, partikül kompozitlerde mikron veya daha büyük boyutlarda ise parçacığın boyutundan etkilenmez. Bununla birlikte Young modülü, kompozitteki nano ölçekte parçacık boyutlarının azalmasıyla geliştirilir. Partikül kompozitlerin gerilme mukavemeti, azalan partikül boyutu ile artırılabilir. Bununla birlikte, nanopartiküllerin daha yüksek partikül yüklemesinde muhtemelen zayıf dağılması nedeniyle, hacimce %3 nanoparçacıklara sahip kompozitler, mikropartiküllerden daha düşük bir gerilme mukavemeti ile sonuçlanmıştır. Deneysel gözlem ve sayısal analizlerle birlikte, parçacık büyüklüğünün parçacık / matris ara yüzey kırığı tokluğu üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, daha küçük parçacıklar için arayüzey çatlamasının büyümesi için daha yüksek gerilim uygulamak gerektirir, çünkü uygulanan aynı gerilim için parçacık boyutu azaldıkça enerji salım oranı azaldığı sonuçlarını belirtmişlerdir [36].

Al-Turaif yaptığı çalışmada, sertleştirilmiş epoksi kompozitin mekanik özelliklerini, farklı  $TiO_2$  oranlarında, iki nano boyutlu  $TiO_2$  partikülü ve bir mikron altı partikül kullanarak araştırmıştır. Az miktarda nano ve mikron altı parçacıkların eklenmesi; gerilme stresi, kopma uzaması, tokluk, Young modülü, eğilme stresi, aşınma oranı ve kopma mukavemeti dâhil olmak üzere incelenen tüm mekanik özellikleri geliştirmiştir. Daha küçük partiküller, daha büyük partiküllere kıyasla daha yüksek mekanik özellikler sağlamıştır. Bununla birlikte, ilave miktarda  $TiO_2$  partikülleri mekanik özelliklerde azalmaya neden olur. En yüksek mekanik özelliklerin, partikül büyüklüğü ile ilişkili optimal bir  $TiO_2$  oranında elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Partikül büyüklüğünün fonksiyonu olarak çekme ve eğilme gerilmesi arasında bir korelasyon olduğunu bildirmişlerdir [37].

Kavak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dolgu miktarı ve içeriğinin mekanik performansa etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda farklı zımparalama ile hazırlanan yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü, yapıştırıcıyla bağlı bağlantılar üzerindeki mekanik mukavemeti etkilemiştir. 600 SiC zımpara ile hazırlanan yapıştırıcılar en düşük kesme-gerilme değerini vermiştir. En büyük gelişmeyi sağlayan tozun tipi ve miktarı mekanik özelliğe göre değişir. 63/37 lehim tozu katkılı yapışkan bağlı derzler alüminyum tozu katkılı olanlardan daha fazla mukavemete sahiptir. Her iki toz (lehim ve alüminyum) için ağırlıkça %50 dolgu maddesi ile hazırlanan bağlantılarda mukavemet azalmıştır. Ayrıca, her iki tozun bu miktarlarda eklenmesi, bağlantıların mukavemeti üzerinde aynı etkileri yapmıştır. Deneysel sonuçlar lehim tozunun epoksiye eklenen tozlar içinde alternatif bir dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermekte olduğunu belirtmişlerdir [38].

Pinto ve arkadaşları takviye olarak titanyum dioksit kullanan epoksi nano kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Mekanik özelliklerin iyileşmesinin çoğu,  $TiO_2$  nanoparçacıkların çok düşük dolgu muhtevasında (ağırlıkça %1) bile gözlenmektedir. Gözlenen optimum dolgu muhtevası, mekanik özelliklerin çoğu için de düşüktür (ağırlıkça yaklaşık %3-5). Bu,  $TiO_2$  mikro partiküllerinin büyüklüğü ile karşılaştırıldığında önemli bir avantaj sağladığını belirtmişlerdir [39].

## 1.7. TEZİN AMACI

Kompozit malzemelerin birbirleri arasında ve metallerle yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcılar günümüzde oldukça pahalıdır. Örneğin; 3M tarafından üretilen Scotch-Weld DP460 çift kompenantlı epoksi yapıştırıcının 50 mililitresi yaklaşık 13\$, Henkel tarafından üretilen Loctite 3430 çift kompenantlı epoksi yapıştırıcının 50 mililitresi ise yaklaşık 37\$'dır. Yapılan bu çalışmada belirtilen yapıştırıcıların performansına yakın aynı zamanda daha uygun maliyetlerde alternatif bir kompozit yapıştırıcı elde edilmesi planlanmıştır. Çalışmada kullanılan dört farklı partikül türü, dört farklı kütlece yüzde derişim oranı ve iki farklı partikül boyutu parametreleri ile hangi kombinasyonda hangi malzeme özelliğine optimum seviyede ulaşıldığı belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada belirlediğimiz mekanik özelliklerin değerleri (kesme, çekme kopma kuvveti, % deformasyon), farklı kombinasyon karışımları ile üretilen numunelere yapılacak standart testlerle belirlenmiştir. Çalışma sonucunda yapıştırıcının kullanılacağı yere ve istenilen özelliklere göre uygun yapıştırıcı tercih edilerek kompozit yapıştırıcıların kullanıldığı birçok sektöre fayda sağlanacaktır. Örneğin endüstride yüksek mukavemetin istendiği bir durumda, çekme ve kesme testleri sonucunda çıkan grafikler yorumlanarak en yüksek dayanım değerine ulaşılan numunedeki yapıştırıcıya katılan partikül türü, partikül boyutu ve kütlece yüzde derişim oranı seçilerek endüstride buna uygun bir kompozit yapıştırıcı kullanılabilecektir.

Daha düşük fiyattaki epoksi reçinenin içerisine farklı türlerde nano ve mikro boyutlarda toz parçacık katarak, daha yüksek fiyatlı yapısal yapıştırıcılara alternatif olacak kompozit malzemeler üretmek maksadıyla seramik parçacık takviyeli kompozit numuneler elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm bu parçacıkların gösterdiği etkiler incelenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

Polimer matrisli kompozit malzemelerin, birbirleriyle veya metal malzemeler ile yapıştırılarak birleştirilmesi için ticari olarak üretilen epoksi bazlı yapıştırıcılar yüksek maliyetler ile piyasada yer almaktadır. Bu tez çalışmasının temel amacı ise bu yüksek maliyetli ürünlere alternatif olabilecek nispeten daha düşük maliyetli bir kompozit elde etmektir. Bu amaçla döküm tipi bir epoksi reçine içine literatürde gerçekleştirilen çalışmalar göz önüne alınarak, belirli yüzde derişim oranlarında nano ve mikron boyutlarındaki katkı malzemeleri eklenmiştir. Böylece epoksi reçinenin içerisine farklı katkı malzemeler katarak dayanım özellikleri daha da iyileştirilmiş ve çeşitli uygulamalara yönelik yeni kompozisyonlar geliştirilmiştir.

Tez çalışmasında referans ürün olarak yaygın ticari kullanımı bulunan 3M markasının Scotch Weld DP460 kodlu ürünü kullanılmıştır. Çalışmada uluslararası standartlar referans alınarak test numunesi kalıpları üretilmiştir. Referans numune ve katkı/katkısız epoksi numuneleri bu kalıplar içerisine dökülerek 24 saat kür süresinde kürlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ardından test numunelerin ASTM D638 standardına göre çekme testi, ASTM D5868 standardına göre tek bindirmeli bağlantı numunelerinin kesme testleri gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. SİLİKON NUMUNE KALIBIN HAZIRLANMASI

Yapılan deneysel çalışmaların başlangıcında çekme numunelerini almak için altılı silikon bir kalıp tasarlanmıştır. Çalışmada silikon kalıp tercih edilmesinin sebebi üretilecek çekme numunelerinin kalıptan kolaylıkla ve hasarsız bir şekilde çıkması istenildiğinden dolayıdır. Bahsedilen kalıbı hazırlamak için AK-SİL E-15 kalıp silikonu ve katalizör malzeme kullanılmıştır. İlk olarak çalışmaların yapıldığı laboratuvarında bulunan masanın üzerindeki cam yüzeye, yapılacak silikon kalıbın yüzeyden kolaylıkla çıkabilmesi için Loctite 770-NC Frekote (kalıp ayırıcı) malzeme dökülüp bekletilmiştir. Frekotleme işlemi tasarlanan kalıp silikonun boyutlarındaki cam yüzeye 3 defa uygulanmış ve her birinin arasında frekote malzemenin cam yüzeye tesir etmesi için 5 dakika beklenmiştir. Hacimce uygun plastik bir kap içerisinde Şekil 2.1’de görülebilen 494 gr kalıp silikonu ve ürün reçetesinde belirtilen %5 oranında 24.7 gr katalizör dökülüp 5 dakika boyunca mekanik şekilde karıştırılmıştır. Karışımın ardından Şekil 2.2’de görülebilen Loctite 770-NC adı verilen frekote sıvısı (kalıp ayırıcı) yardımıyla yüzeye frekotleme işlemi uygulanmıştır. Yüzeye sızdırmazlık amacıyla etrafına dik bir şekilde teflon plakalar yerleştirilmiştir. Sonrasında plakalar birbirlerine ve cam yüzeye birleştirilmiştir. Ardından hazırlanan kalıbın içerisine, ASTM D638 (Takviyesiz ve takviyeli plastiklerin çekme

özellikleri için standart test yöntemi) standardına uygun şekilde imalat laboratuvarından alınan alüminyum çekme numuneleri Şekil 2.3'te görüldüğü üzere yanyana ve aralıklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sonrasında hazırlanan karışım bu kalıbın içerisine dökülmüş ve silikon kalıp 12 saat kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlemenin ardından silikon kalıp numune üretimi için hazır hale gelmiştir. Tüm hazırlık işlemleri kalıp silikonu üzerindeki reçetede belirtilen 20 °C oda sıcaklığında yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen silikon kalıptan çalışmanın daha hızlı ilerleyebilmesi amacıyla daha sonrasında Şekil 2.4'te görüldüğü şekilde bir adet daha kalıp üretilmiştir. Bu sayede hazırlanan karışımlar silikon kalıba dökülüp kürlenmeye bırakıldıktan sonra kalıptan çıkartılırken bir kerede 12 adet çekme numunesi alınabilecektir.



**Şekil 2.1.** Numune kalıp imalatında kullanılan kalıp silikonu ve katalizörü.

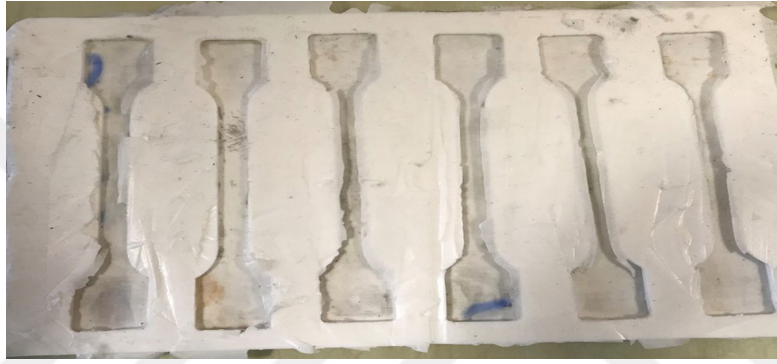


**Şekil 2.2.** Kullanılan kalıp ayırıcı malzeme.





**Şekil 2.3.** Silikon kalıbın hazırlanması.



**Şekil 2.4.** Hazır hale gelen silikon kalıp.

## **2.2. KATKILI VE KATKISIZ TEST NUMUNELERİNİN ÜRETİLMESİ**

Kalıp silikonları hazırlandıktan sonra başta katkısız çekme numuneleri üretilmiştir. Bu üretimler sırasında Şekil 2.5'te de belirtilen Hexion marka MGS Laminasyon Epoksi Seti L285/H285 epoksi reçine ve sertleştiricisi kullanılmıştır. Başlangıçta ASTM D638 standardında belirtilen numune ölçülerinde 6 adet katkısız çekme numunesi üretilmiştir. Reçinenin üzerinde belirtilen oranda 60 gr epoksi reçine ve 24 gr sertleştirici karışımı hazırlanmış ve 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından bu karışım silikon kalıptaki her bir çekme numunesi boşluğuna tek bir noktadan dökülmüştür. Dökülen altı adet numunenin kurlenmesi için 12 saat beklenilmiş ve katkısız epoksi çekme numuneleri kalıptan kolaylıkla çıkarılmıştır.



**Şekil 2.5.** Çalışmada kullanılan epoksi reçine ve epoksi sertleştirici.

Tez çalışmasında alternatif bir kompozit yapıştırıcı elde etmek amacıyla kullanılan epoksi reçinenin içerisine katılacak iki farklı boyutta dört farklı toz partikül tedarik edilmiştir. Bu toz partiküller; ayrı ayrı nano ve mikro boyutlarında Bor,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve SiC malzemelerdir. Takviyeli çekme numunelerini elde etmek için bir çalışma reçetesi hazırlanmıştır. Farklı iki boyutlardaki tüm bu toz partiküller %2, %4, %6 ve %8 olmak üzere dört farklı kütlece yüzde derişim oranında karışıma ilave edilmiştir. Toplamda 96 adet ASTM D638'e uygun katkılı çekme numunesi üretilmiştir. İlk olarak mekanik karıştırıcının ucuna uygun karışımların yapılacağı 1 L'lik plastik bir kap temin edilmiştir. Tüm çekme numunelerinin Şekil 2.6'da görüldüğü üzere mekanik karışım işlemleri kompozit malzeme labortauvarında bulunan Şekil 2.7'de belirtilen mekanik karıştırma cihazında yapılmıştır.



**Şekil 2.6.** Mekanik karıştırma işlemi.



**Şekil 2.7.** Mekanik karıştırma cihazı.

İlk olarak mikro boyuttaki bor tozu kullanarak katkılı çekme numuneleri üretilmiştir. Kabin içerisine 50 gr epoksi, 20 gr sertleştirici ve 1.4 gr (%2) mikro bor tozu katılmıştır. Çalışmadaki tüm karışım işlemlerinde mekanik karıştırıcının hızı 800 rpm ve karıştırma süresi 8 dk. olarak belirlenmiş ve uygulanmıştır. Ardından sırasıyla %4, %6 ve %8 mikro bor tozu katılarak hazırlanan karışımlar karıştırıcıda karıştırılıp silikon kalıba dökülmüştür. Ardından aynı süreç Nano Bor, Mikro ve Nano  $Al_2O_3$ , SiC ve  $TiO_2$  tozları için de uygulanmıştır. Toplamda 96 adet Şekil 2.8’de görüldüğü üzere takviyeli ve katkısız çekme testi numuneleri hazırlanmış ve çekme testi yapılmak üzere kenara ayrılmıştır.

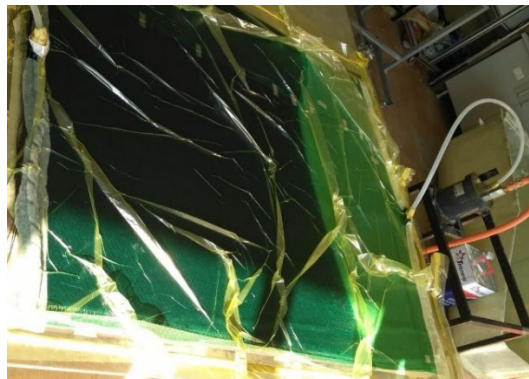


**Şekil 2.8.** Hazırlanan katkılı ve katkısız test numuneleri.

Toplam 96 adet numune laboratuvarında bulunan çekme testi cihazında sırasıyla çekme deneyine tabii tutulmuştur. Ardından alınan her bir parametreden alınan sonuçlar daha sonra yorumlanmak üzere bilgisayarda kaydedilmiştir. Sonuçlardan elde edeceğimiz yorumlar hangi katkı malzemesinin hangi malzemenin mekanik özelliklerine etki edeceğini gösterecektir. Partikül cinsi, türü ve yüzde derişim oranı kompozit malzemeye ne tür katkısı olacağını

(süneklik, gevreklik vb.) ve tez sonunda hangi takviye türünün nerede kullanabileceği, endüstride hangi ihtiyaçlara cevap olabileceği görülecektir.

Ardından tek bindirmeli test numunelerini üretmek için 200 gr/cm<sup>2</sup> düz cam elyaf kumaşlar ve polyester reçine kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemeler kesilerek toplamda 192 adet Şekil 2.12’de verilen numune ölçülerine uygun tek bindirmeli bağlantılar hazırlanmaya başlamıştır. Her bir numune için ayrı ayrı kompozit malzeme üretilmemiş cam elyaf takviyeli polyester reçine kullanarak Şekil 2.9’da görüleceği üzere vakum infüzyon yöntemiyle standarda uygun ölçülerde kompozit plakalar üretilmiştir. Şekil 2.10’da görüleceği üzere üretilen kompozit plakalar laboratuvarında bulunan Şekil 2.11’de görülen testere cihazı ile kesilip standarda uygun ölçülerde numuneler hazırlanmıştır. Kesilen parçalar hazırlandıktan sonra hacimce uygun plastik bir kap içerisinde reçine karışımları hazırlanmıştır. Hexion MGS Laminasyon Epoksi Seti L285/H285 (epoksi reçine ve sertleştirici) kullanılmış ve reçine içerisine hassas terazide ölçümler yapılarak nano ve mikro boyutlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bor, TiO<sub>2</sub> ve SiC katkıları eklenmiştir. Ağırlık oranlarının çekme dayanımına etkisini incelemek için epoksi yapıştırıcıya üç farklı oranda (%2, %4, %6 ve %8) parçacıklar eklenmiştir. Karıştırma işlemini daha homojen bir hale getirmek için test numunelerine karıştırma adımları uygulanmıştır. İlk olarak epoksi reçinelerine belirlenen miktarlarda nanopartiküller eklenmiş ve mekanik bir karıştırıcı ile beş dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışımın homojenliğini sağlamak için işleme on dakika manyetik karıştırıcıda devam edilmiştir. Tüm bu aşamalardan sonra reçine içinde sıkışan hava kabarcıklarını gidermek için karışım beş dakika ultrasonik homojenizatörde tutulmuştur. Hazırlanan karışım kürlendikten sonra tek bindirmeli bağlantıların test standardına göre iki cam elyaf numune arasında yapışkan yüzeyin ölçüsünde uygulanıp yapıştırılır. Elde edilen sonuçlara göre, tek bindirmeli bağlantıların kopma yükünü arttırmada partikül eklenmesi etkili bir yöntem olarak bulunmuştur.



**Şekil 2.9.** Çalışmada yapılan vakum infüzyon yöntemi.



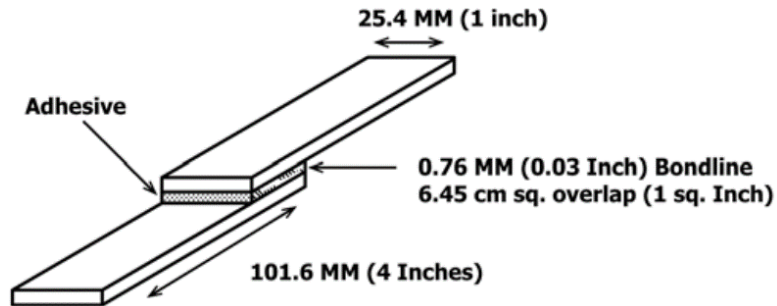
**Şekil 2.10.** Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit plaka.



**Şekil 2.11.** Kompozit plakaların kesimi için kullanılan testere cihazı.

### 2.3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY YÖNTEMİ

Tez çalışması için katkılı ve katkısız test numuneleri alabilmek için silikon kalıp düzeneği hazırlanmıştır. Ayrıca vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozit levhalardan tek bindirmeli bağlantı test düzeneklerini hazırlamak için numuneler kesilip hazırlanmıştır. Tez çalışmasına tek bindirmeli bağlantı (TBB) geometrisi seçilmiştir. Cam elyaf takviyeli plastik kompozit (CETP), vakum infüzyon yöntemiyle üretilen CETP plakalarından kesilerek yapıştırılır ve ardından epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılır. Bu yapıştırma işlemi ve hazırlanacak bağlantı geometrisi, ASTM D 5868–01 standardına göre hazırlanmıştır. Tek bindirmeli bağlantının şematik diyagramı Şekil 2.12’de göstermektedir.



**Şekil 2.12.** Tek bindirmeli bağlantı numunesinin ölçüleri.



Yapıştırma işlemi sırasında yapıştırıcı olarak kullanılan epoksi reçine içerisine farklı derişim oranlarında, farklı partikül cinsleri ve partikül boyutu kullanılmıştır. Tüm bu parametreler önce mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmış ardından ultrasonik karıştırma yardımıyla homojen hale getirilmiştir. Ardından yapıştırıcılar belirli ölçülerde kesilen iki adet kompozit numunelerin arasına plastik bir çubuk yardımıyla sürülerek uygulanmıştır. Kullanılan farklı parametrelerin yapışma performansı incelenmiş ayrıca bu parametrelerin, bindirmeli bağlantı üzerindeki çekme testleri sonucunda malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

**Tablo 2.1.** Numunelerde kullanılan parçacık cinsi, boyutu ve kütlece derişim oranı

| Numune Kodu     | Parçacık tipi                  | Partikül Boyutu | % Takviye Oranı |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| M1-2            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 µm            | %2              |
| M1-4            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 µm            | %4              |
| M1-6            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 µm            | %6              |
| M1-8            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 µm            | %8              |
| N1-2            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30 nm           | %2              |
| N1-4            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30 nm           | %4              |
| N1-6            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30 nm           | %6              |
| N1-8            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30 nm           | %8              |
| M2-2            | TiO <sub>2</sub>               | 3 µm            | %2              |
| M2-4            | TiO <sub>2</sub>               | 3 µm            | %4              |
| M2-6            | TiO <sub>2</sub>               | 3 µm            | %6              |
| M2-8            | TiO <sub>2</sub>               | 3 µm            | %8              |
| N2-2            | TiO <sub>2</sub>               | 60 nm           | %2              |
| N2-4            | TiO <sub>2</sub>               | 60 nm           | %4              |
| N2-6            | TiO <sub>2</sub>               | 60 nm           | %6              |
| N2-8            | TiO <sub>2</sub>               | 60 nm           | %8              |
| M3-2            | B                              | 3 µm            | %2              |
| M3-4            | B                              | 3 µm            | %4              |
| M3-6            | B                              | 3 µm            | %6              |
| M3-8            | B                              | 3 µm            | %8              |
| N3-2            | B                              | 50 nm           | %2              |
| N3-4            | B                              | 50 nm           | %4              |
| N3-6            | B                              | 50 nm           | %6              |
| N3-8            | B                              | 50 nm           | %8              |
| Referans Numune | -                              | -               | -               |

Tablo 2.1. de çeşitli testler için kullanılan kompozit malzeme içerik, oran ve numune kodları verilmiştir. Üretimi bittikten sonra uygun ölçülerde kesilen cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit numunelerin arasına yine standarda uygun ölçülerde hazırlanan takviyeli yapıştırıcılar sırasıyla uygulanmıştır. Birleştirilen tek bindirmeli bağlantılı numuneleri Şekil 2.13'te görülebilir.



**Şekil 2.13.** Çalışma sırasında yapılan tek bindirmeli bağlantı numuneleri.

Düzce Üniversitesi Mühendislik fakültesi bünyesinde bulunan UTest marka çekme testi cihazında toplam 96 adet tek bindirmeli bağlantı numunesi kesme testine tabii tutulmuştur. Ayrıca Şekil 2.8'deki çekme numuneleri ASTM D638 standardına göre çekme testine tabi tutularak sonuçlar, UDyna adı verilen programda toplanarak analiz edilmiştir. Tipik çekme deneyi Şekil 3.1 de gösterilmiştir.

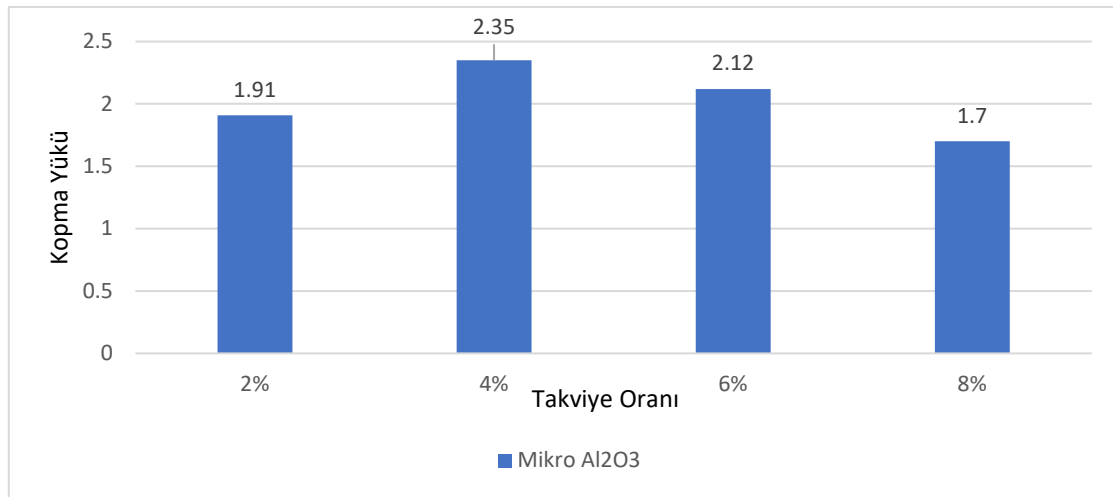


**Şekil 3.1.** Çekme testi.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

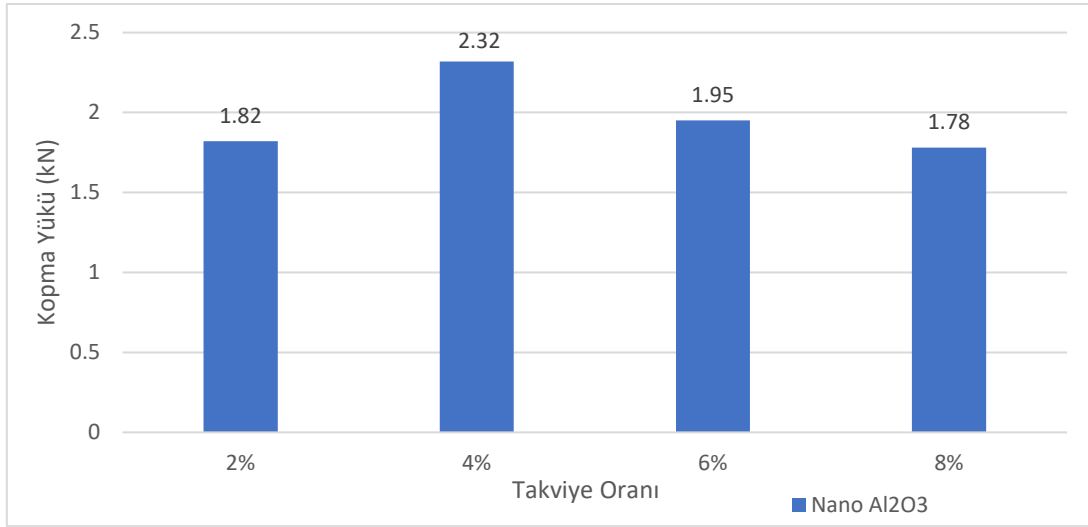
Katkısız epoksi (referans) numunelerin (RN) çekme testi sonucunda ortalama kopma yükü 1.91 kN ve %3,5 deformasyon elde edilmiştir. Şekil 3.2’de  $Al_2O_3$  mikro boyutlu parçacıkların derişim miktarının kopma kuvvetine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere M1-2 numunede kopma kuvveti RN numuneyle aynı sonucu verirken, M1-4 numunede kopma kuvveti 2.35 kN olup en yüksek değerdedir. M1-6 dada referans malzemeye göre artış gözlemlenmiştir. Fakat M1-8 numunede artış durmuş hatta kısmen RN ye göre azalma görülmüştür. Epoksi RN içerisine 3  $\mu m$  boyutundaki  $Al_2O_3$  parçacık ilave edilerek genel olarak kopma kuvvetinin artığı görülmüştür. Optimum derişim oranı bu takviye elamanı için %4’tür. Her ne kadar 3  $\mu m$  boyutlu parçacık takviyeli kompozit literatürde bulunamamış ise de benzer şekilde nano alümina taneciklerin, ağırlıkça %2 katkı oranından sonra topaklanma eğilimine girdiği ve topaklanma etkisiyle nano  $Al_2O_3$  takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin kötüleştiği tespit edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinden, alüminyum matrise ağırlıkça %2,5 nano alümina takviyesi yapıldığında alümina taneciklerin topaklandığı görülmüştür [40]. Bu çalışmada da 3  $\mu m$  boyutlu parçacıkların %6’yı aşan derişim oranından sonra topaklaşması ve reçine tarafından ıslanma problemi olması muhtemeldir.



Şekil 3.2. Mikro  $Al_2O_3$  parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.

Şekil 3.3’te ise yine aynı numuneler için nano boyutlu derişim etkisi görülmektedir. Şekil 3.2’ye benzer bir grafik görülmektedir. Buradan da bu numunelerde parçacık boyutundan ziyade derişim oranı etkin rol oynamıştır.

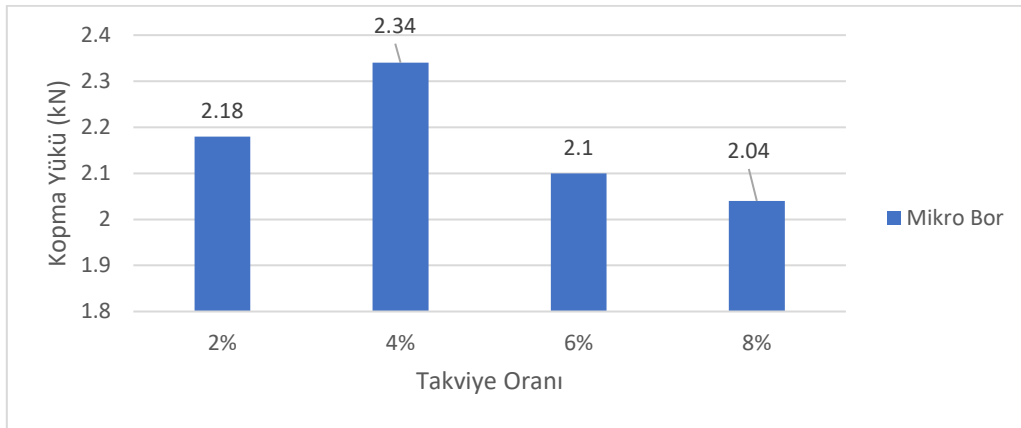




**Şekil 3.3.** Nano  $Al_2O_3$  parçacığının takviye oranının kopma yüğü üzerine etkisi.

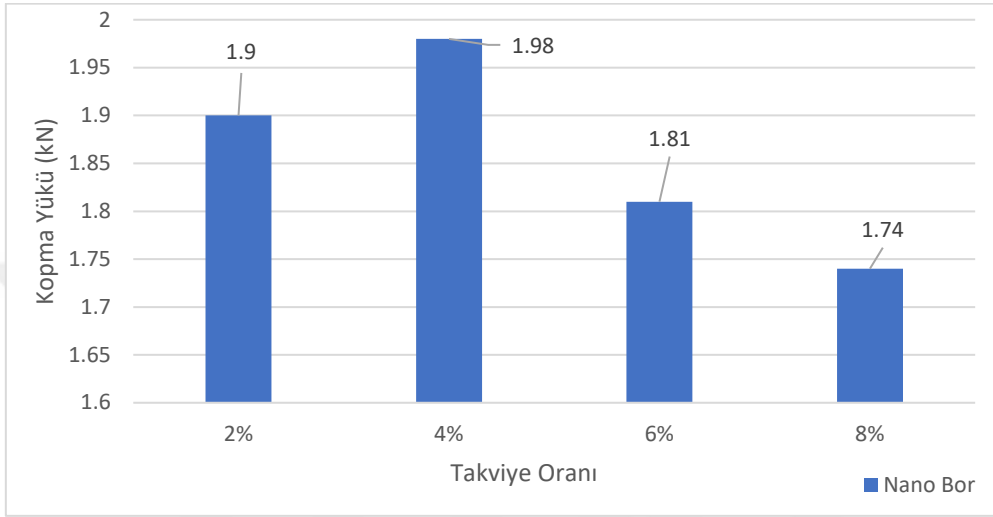
Nano  $Al_2O_3$  parçacık türünde en yüksek kopma yüğü %4 takviye oranında elde edilmiştir. Katkı oranı arttıkça epoksi numunesinin gevrekliğı artmakta buna bağılı olarak kopma yüğü azalmaktadır. Literatürde de benzer şekilde cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerde ilave parçacık olarak  $Al_2O_3$  kullanılmış katkı oranlarına göre çekme dayanımı ve elastisite modülündeki değışimlerde %5 katkı oranından %10 katkı oranına doğıru hızlı bir düşüş gözlenirken %10 katkı oranından %15 katkı oranına doğıru daha yavaş bir düşüş gözlenmektedir [41].

Şekil 3.4'te görüleceğı üzere mikro bor parçacık türünde en yüksek kopma yüğü %4 takviye oranında elde edilmiştir. Ağırlıkça %2, %6 ve %8 oranında bor katkısıyla üretilen yapıştırıcının kopma kuvveti kısmen azalmış, fakat halen RN malzemeden daha yüksek değıer elde edilmiştir. Buda bor esaslı parçacıkların  $Al_2O_3$  parçacığına oranla daha homojen dağıldığı ve reçine içerisinde daha iyi ıslandığını göstermektedir.



**Şekil 3.4.** Mikro bor parçacığının katkı oranının kopma yüğü üzerine etkisi.

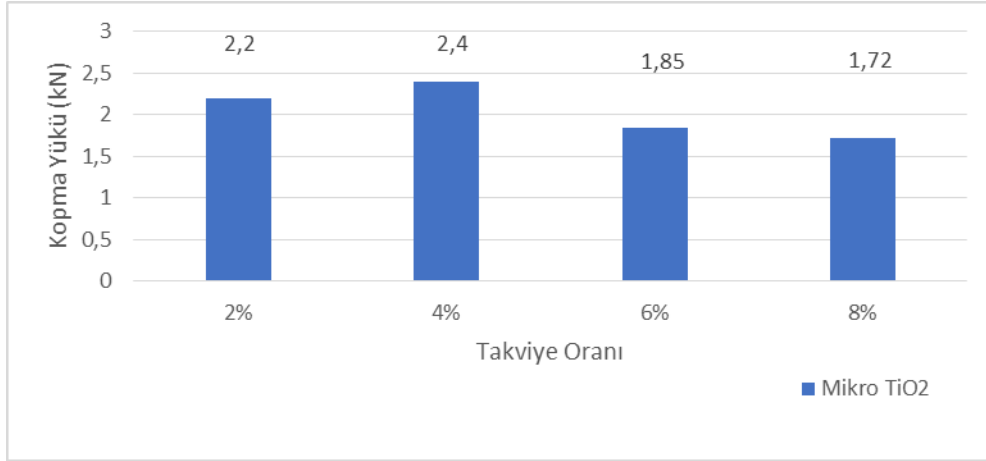
Nano bor parçacık türünde ise Şekil 3.5'te görüleceği üzere en yüksek kopma yükü %4 takviye oranında elde edilmiştir. En düşük kopma yükü ise %8 takviye oranında elde edilmiştir. Nano bor katkılı numunelerin çekme test sonuçlarında da görüldüğü üzere nano partikül katkılı yapıştırıcıların kopma kuvveti genelde RN numuneden daha az olmuştur. Bu durum muhtemelen çok küçük boyutlardaki parçacıkların kompozit içerisinde homojen dağıtılamadığını göstermektedir.



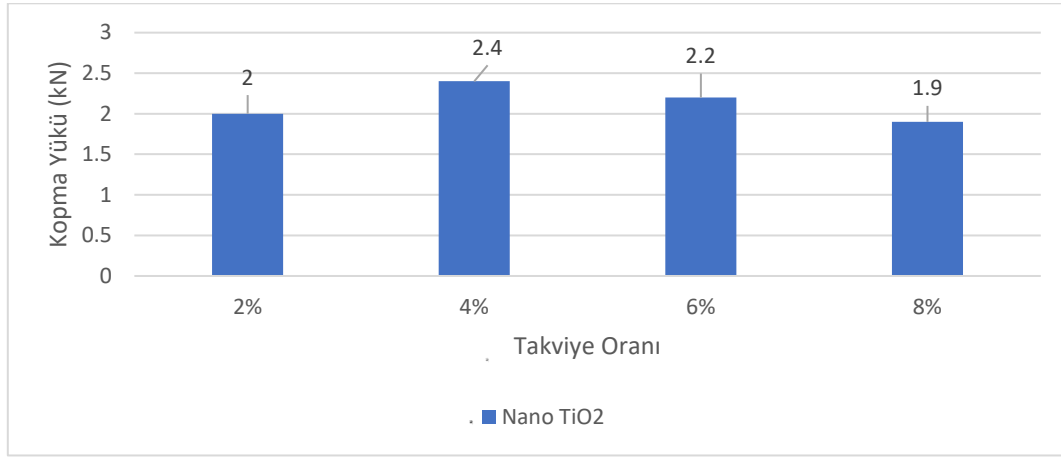
**Şekil 3.5.** Nano bor parçacığının katkı oranının kopma yükü üzerine etkisi.

Literatürde de benzer şekilde katkısız B<sub>4</sub>C katkılı yapıştırıcılarda ise, nanopartiküller ile epoksi matris arasında yeterince etkileşim olmamakta ve nanopartiküller topaklanmaktadır. Yapıştırıcı içerisinde topaklanan nanopartiküller gerilme yığılması oluşturarak mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Yapıştırıcı içerisindeki nanopartikül katkı oranı arttıkça epoksinin viskozitesi artmakta ve epoksi ile nanopartiküller arasında etkileşim azalmaktadır [42].

Derişim miktarının TiO<sub>2</sub> takviyeli polimer kompozitin kopma kuvvetine olan etkisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Mikro TiO<sub>2</sub> parçacık türünde en yüksek kopma yükü yine %4 katkı oranında elde edilmiştir. En düşük kopma yüküne ise yine %8 takviye oranında ulaşılmıştır. Mikro TiO<sub>2</sub> partikül boyutunda da nano TiO<sub>2</sub> takviyeli çekme testi numuneleriyle Şekil 3.7'de de görüleceği üzere benzer sonuçlara varılmıştır.



**Şekil 3.6.** Mikro TiO<sub>2</sub> parçacığının katkı oranının kopma yüğü üzerine etkisi.



**Şekil 3.7.** Nano TiO<sub>2</sub> parçacığının katkı oranının kopma yüğü üzerine etkisi.

Nano TiO<sub>2</sub> parçacık türünde en yüksek kopma yüğü %4 katkı oranında elde edilmiştir. En düşük kopma yüküne ise %8 takviye oranında ulaşılmıştır. Epoksi reçine içerisine farklı takviye oranlarında TiO<sub>2</sub> partikülleri ilave edilmesi çekme numunelerinin kopma yükünü artırmaktadır. Ancak takviye oranı artıkça kopma yükündeki artış oranı azalmaktadır. Fakat halen tüm kopma kuvvetleri RN numuneden yüksektir. Bu katkı türünde de mikron veya nano boyuttaki parçacık boyutu önemli bir etki etmemiştir. Benzer trend deformasyon miktarlarında da görülmüştür. En iyi deformasyon %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mikro takviyeli kompozitte görülmüştür. Ayrıca, parçacık takviyeli tek bindirmeli bağlantı numunelerin kesme testinden elde edilen % deformasyon sonuçları tablo 3.1’de görülebilmektedir.

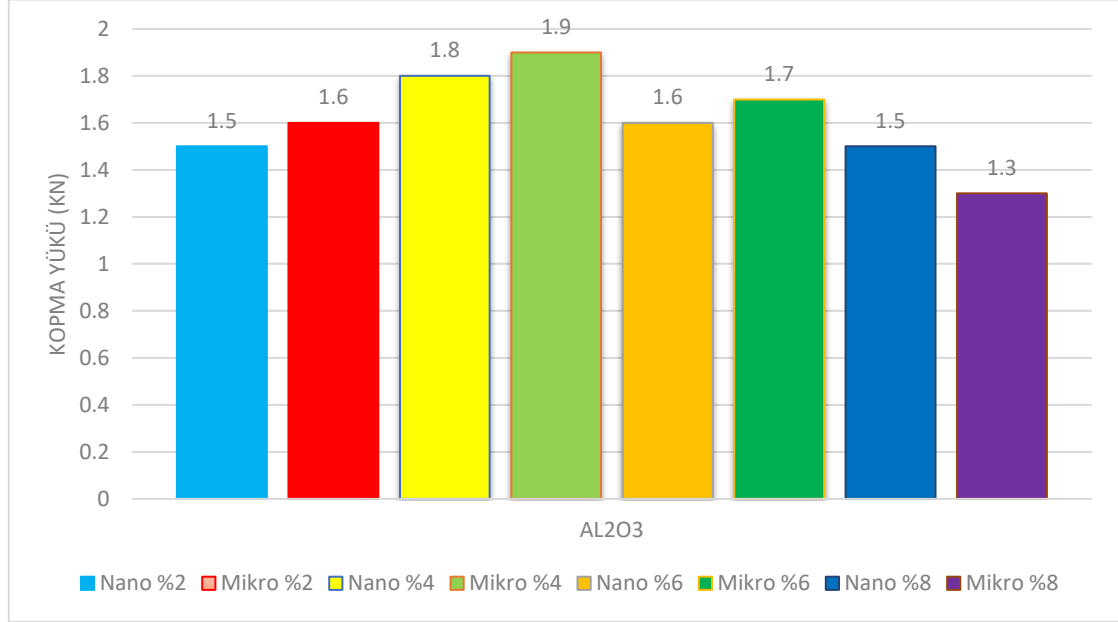
**Tablo 3.1.** Takviyesiz ve takviyeli tek bindirmeli bağlantı numunelerinin % deformasyon değerleri.

| Numune Kodu          | % Deformasyon |
|----------------------|---------------|
| M1-2                 | %3,51         |
| M1-4                 | %3,18         |
| M1-6                 | %3,47         |
| M1-8                 | <b>%3,62</b>  |
| N1-2                 | %3,45         |
| N1-4                 | %3,21         |
| N1-6                 | %3,37         |
| N1-8                 | %3,56         |
| M2-2                 | %3,19         |
| M2-4                 | <b>%3,14</b>  |
| M2-6                 | %3,56         |
| M2-8                 | %3,60         |
| N2-2                 | %3,21         |
| N2-4                 | %3,15         |
| N2-6                 | %3,18         |
| N2-8                 | %3,49         |
| M3-2                 | %3,28         |
| M3-4                 | %3,18         |
| M3-6                 | %3,38         |
| M3-8                 | %3,42         |
| N3-2                 | %3,51         |
| N3-4                 | %3,41         |
| N3-6                 | %3,56         |
| N3-8                 | %3,59         |
| Referans Numune (RN) | %3,44         |

Yukarıdaki tablo incelendiğinde en düşük % deformasyon mikro %4 TiO<sub>2</sub> takviyeli kompozitte en yüksek % deformasyon ise mikro %8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında kopma yükü artıkça %deformasyonda azalma görülmektedir. Tez çalışması sonucunda katkılı test numunelerinde kopma yükü artıkça nispeten % deformasyon değerinde taviz verilmiştir.

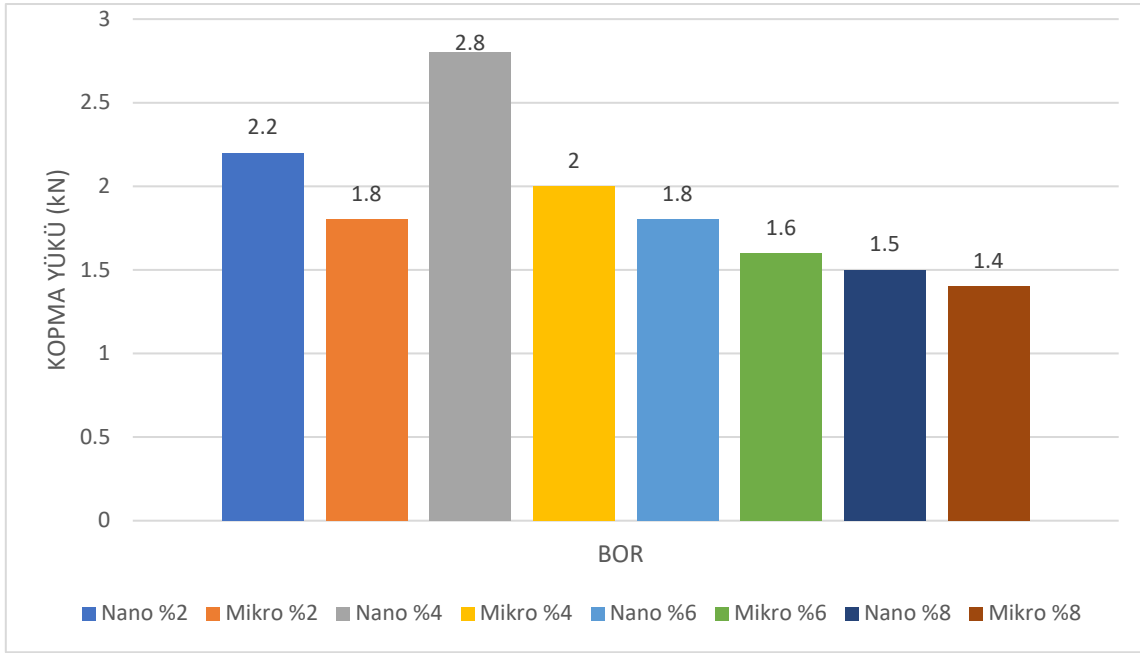
### 3.2. KESME TESTİ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Her bir tek bindirmeli bağlantı numunesinden 5 adet kesme testi yapılmıştır ve ortalama kesme kuvveti değerleri alınmıştır. Katkısız epoksi yapıştırıcının ise ortalama kopma yükü 1.2 kN ölçülmüştür.



**Şekil 3.8.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı numunelerinin ortalama bindirme kopma yükleri.

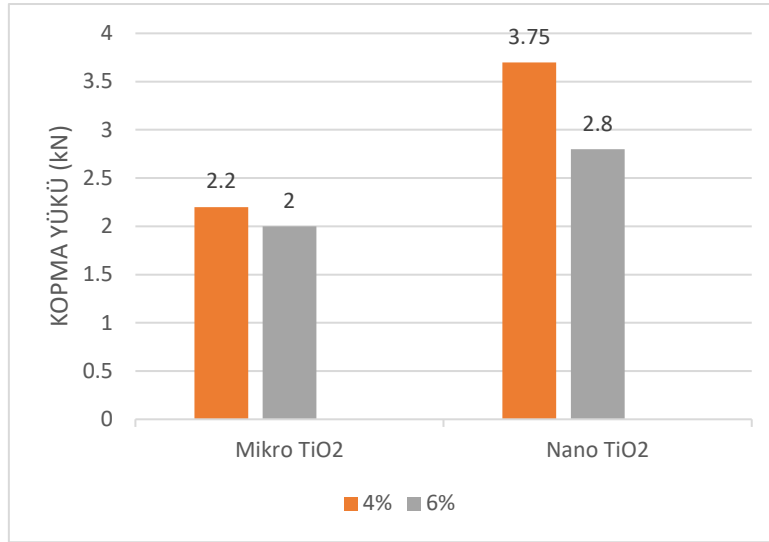
Şekil 3.8’de görüleceği üzere aynı %4 derişim oranına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunda mikro boyutta daha yüksek kopma yükü elde edilmiştir. Yine aynı %6 derişim oranına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunda da mikro boyutta daha yüksek kopma yükü elde edilmiştir. Bu durum Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı epoksi yapıştırıcılarda, mikron boyuttaki tozların daha başarılı yapışma performansı gösterdiği ortaya koyulmuştur. Tüm bindirme kesme kuvvet değerleri RN malzemenin 1.2 kN üzerindedir. Parçacık takviye boyutu bu numunelerde çok önemli bir etki göstermemiştir.



**Şekil 3.9.** Bor katkılı numunelerinin ortalama kopma yükleri.

Şekil 3.9’da görüleceği üzere aynı nano parçacık boyutunda, %4 takviye oranında bor katkılı tek bindirmeli bağlantı numunelerinde en yüksek kopma yükü değerine ulaşılmıştır. Bor tozunda nano parçacıklar mikro parçacıklara göre daha yüksek kopma yükü sağlamıştır. En düşük kopma yüküne ise mikro bor %8 takviye oranında ulaşılmıştır.  $Al_2O_3$  takviye elemanı türüne göre bor tozlarını takviye elemanı olarak kullanmak bindirme kopma kuvvetini artırmıştır.

Şekil 3.10’da görüleceği üzere aynı mikron boyutta partikül boyutuna sahip  $TiO_2$  takviyeli test numunelerinde %6 takviye oranında daha yüksek kopma yükü elde edilmiştir. Bu sonuç ışığında mikro  $TiO_2$  takviyeli test numunelerinde derişim oranı artıkça yapışma performansını olumlu etkilediğini ortaya koyulmuştur. Yukarıdaki bindirme sonuçlarına zıt olarak artan  $TiO_2$  miktarı kesme kopma kuvvetini artırmıştır. Yine yukarıdaki sonuçlara ters olarak nano takviyeli  $TiO_2$  daha üstün performans sergilemiştir. Genelde parçacık boyutu önemli bir etken olarak görünmezken bu sonuçlarda parçacık boyutu da önemli rol oynamıştır. %6 nano katkılı bağlantının kopma direnci RN numunesinin 3 katı kadardır.



**Şekil 3.10.** TiO<sub>2</sub> takviyeli numunelerin ortalama kopma yükleri.

Tüm test çalışmaları sonucunda nano %4 TiO<sub>2</sub> takviyeli yapıştırıcı ile yapıştırılan numuneler daha yüksek ortalama kopma yükü gösterirken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli yapıştırıcı ile bağlanan numuneler en düşük ortalama kopma yüküne sahiptir. En yüksek ortalama kopma yükü nano boyutlu TiO<sub>2</sub> takviyeli numunelerden (3.75 kN) elde edilirken, en düşük ortalama kopma yükü mikro boyutlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunelerden (1.3 kN) elde edilmiştir.

Genelde tüm takviye elemanı türlerinde %4 derişim oranı, %8 derişim oranından daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. %4 nano Bor takviyeli bağlantıların ortalama kopma yükü %6, nano Bor takviyeli bağlantılara göre %40 daha fazla iken, %6 nano boyutlu TiO<sub>2</sub> parçacıklarının eklenmesi ortalama kopma yükünü %300 artırmıştır. Bu deneysel sonuçlara göre, nano ve mikron parçacıkların eklenmesi, çekme kuvveti ve kopma uzaması RN numune ile karşılaştırıldığında seramik toz takviyesi ile artmıştır.

Tek bindirmeli bağlantının kayma dayanımı ve tokluğunun arttırılması için yapılan mekanizmalar, yapıştırıcının içerisine katılan nanopartiküllerin eşit dağılımına ve matris ve nanopartiküller arasındaki yapışmaya büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada yapılan karıştırma işlemi ve kullanılan nano/mikro boyutlardaki parçacık türlerinin yapısı ve ağırlık yüzdesi bu durumu açıkça ortaya koymuştur. Ultrasonik karıştırma işlemi yapmadan hazırlanan test numunelerinin yüzeyinde; özellikle düşük TiO<sub>2</sub> nanoparçacık boyutu, gerilim aktarma mekanizmaları için daha fazla alan sunar ve daha fazla toklaştırma mekanizmaları aracılığıyla kararsız çatlak yayılmasını daha iyi önleyebilir ve bu nedenle genellikle yüzey işlemi olmadan bile mikro TiO<sub>2</sub> daha yüksek kırılma tokluğu ve kayma dayanımı gösterdiği kanaati oluşmuştur. Son olarak tek bindirmeli bağlantı numunelerinin yüzeylerinin düzgün olmayışı, yapıştırıcının

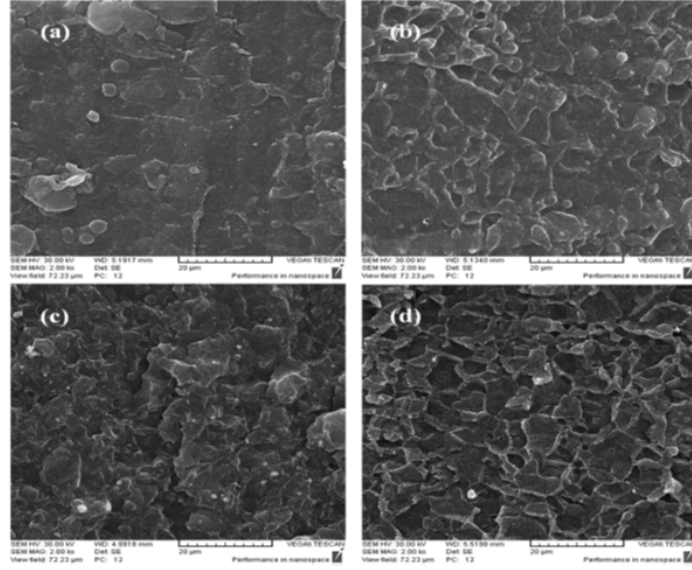
iyi k rlenmemesi de yapışma performansını ve numunelerin kopma yüzeyini olumsuz etkilemektedir. Özellikle hem nano hem de mikro boyutlarda  $TiO_2$  ve bor partiküllerinin eklenmesi ile yapışma mukavemetinin büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir. Literatürde de benzer şekilde tek bindirmeli bağlantıların ortalama hasar yüklerine göre, DP460, DP270, Araldite2015 ve AV138 yapıştırıcısına en iyi  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  partikül ilave oranının %1 olduğu ve ilave oranının artmasıyla hasar yükündeki artış oranının azaldığı tespit edilmiştir [43].

Ayrıca bu çalışma sırasında SiC partikül tozunda homojen karışım sağlanamayan bazı test numunelerinde yapışma dayanımında başarılı ve literatüre uygun test sonuçları alınamamıştır. Ultrasonik homojenizat re tutunamayan karışımlar hava kabarcıkları sayesinde yapıştırıcının homojen yayılmasına bu durumda çekme testi sırasına numunelerin kopma yüzeyini ve kopma süresini olumsuz etkilemektedir. Bu sonuç ışığında test numunelerinin hazırlık aşamasında mekanik ve ultrasonik karıştırma yöntemlerinin etkisi gözlemlenmiştir. Her ne kadar bu çalışmada SiC takviye sonuçları verilmemiş ise de karışımın içerisindeki tozların, yapıştırıcının büyük bir kısmında homojen şekilde dağılması, yapıştırıcının kohezyon mukavemetinin ve sertlik değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Bu durum genellikle malzemedeki gerilme dağılımındaki değişikliklere ve artık gerilmelerdeki azalmaya bağlıdır. Derişim oranı düşük SiC katkılı test numunelerinde kopma yükünün yüksek olmasının ana nedeni, yapışma mukavemetinin artması ve birleşme yüzeyinde azalan artık gerilmelerdir. Karışım içeriğindeki SiC tozunun yüzde derişim artışı, interfazda kusurlar gibi davranan toz agregalarının oluşumuna neden olmuştur ve bu da yapışma dayanımının bozulmasına neden olmuştur. Homojen karışım sağlanmayan özellikle derişim oranı fazla olan SiC katkılı test numunelerinin yüzeyleri, literatür çalışmalarında da görüleceği üzere SEM analizi ile bu durum gösterilmiştir [27]. Bu yüzden bu çalışmada SiC takviyeli kompozit sonuçları verilmemiştir.

şekil 3.11'de g r ld ğu üzere nano boyuttaki farklı derişim oranlarında SiC takviyeli numunelerin kırılma yüzeylerini incelediğimizde SEM analizinden elde edilen sonuçlara göre, derişim miktarını %2'den %8'e çıkararak kırılma yüzeylerini değiştirme eğilimi ve nano SiC tozu katkılı yapıştırıcının oluşturduğu bazı hasar mekanizmaları, tek bindirmeli bağlantılarda malzemenin mekanik özelliklerine ve yapışma performansına etkisi ile ilişkilendirilebilir.

Ongun ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, artan derişim oranıyla tek bindirmeli kesme kuvvetinin artığını fakat %4 derişim oranından fazla oranlarda kesme kuvvetinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca  $TiO_2$  takviyeli kompozitler en yüksek kopma kuvvetine sahip iken, en düşük değerler ise  $Al_2O_3$  takviyeli kompozit numunede elde edilmiştir [44].



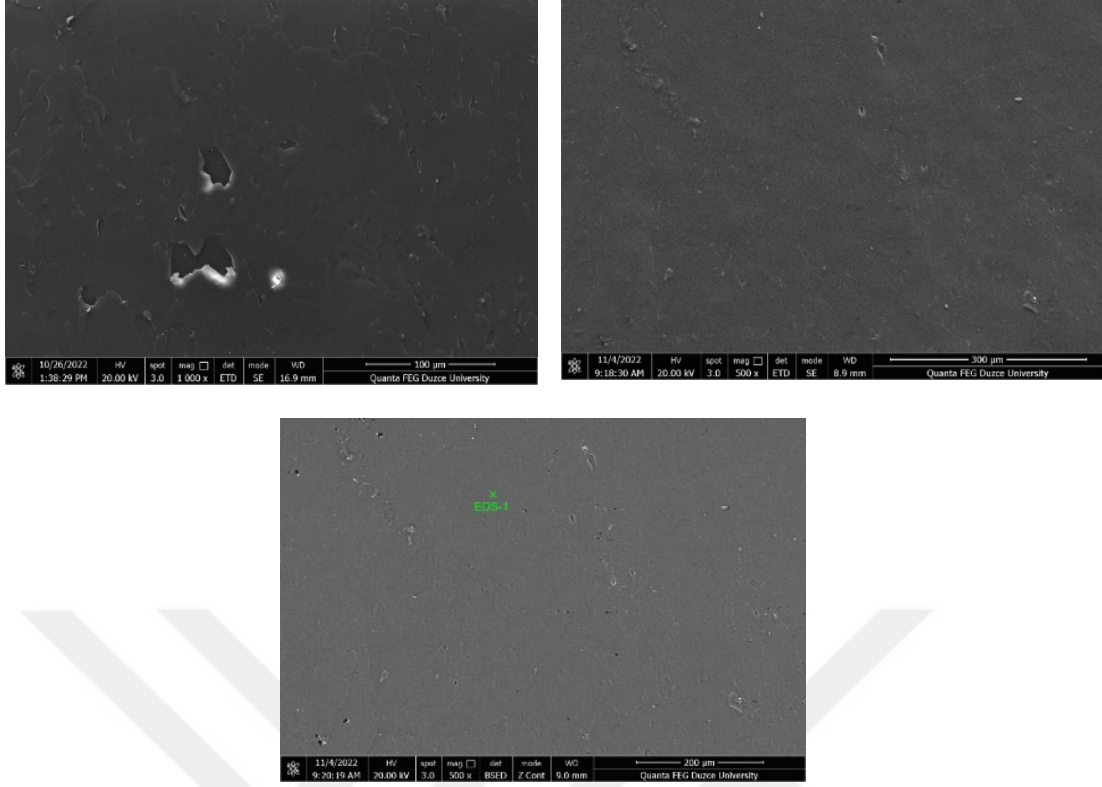


**Şekil 3.11.** a) Takviyesiz tek bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri b) %2 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri c) %4 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri d) %6 nano SiC katkılı numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri [27].

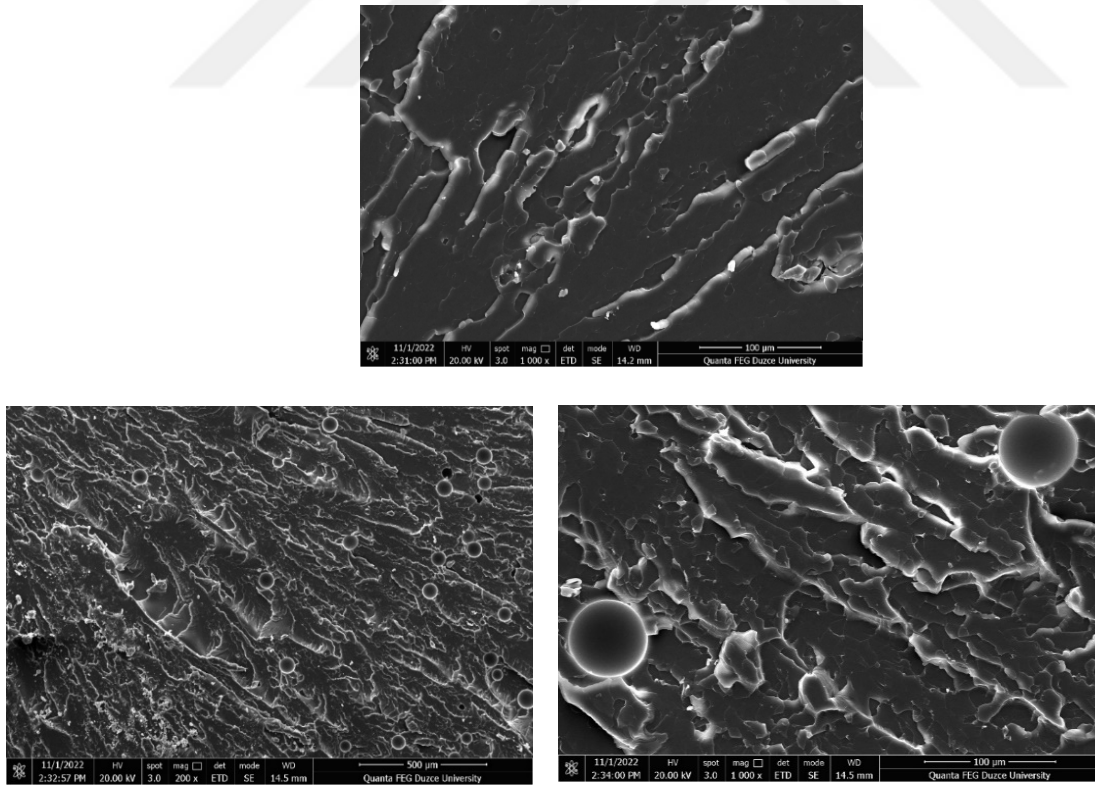
Genel olarak, kompozit malzemelerde, tane boyutu, parçacık boyutu, parçacık türü, % derişim oranı, homojen dağılım malzemelerin sertlik, çekme dayanımları, aşınma ve yorulma dayanımlarını çok önemli derecede etkiler. Matris malzemesin türü ve arayüzey morfolojisindeki olumlu iyileştirmeler yukarıdaki mekanik özelliklerin artmasına yardımcı olur [45-51].

### 3.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU ANALİZİ SONUÇLARI

Tüm SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi çalışmaları Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan SEM mikroskobuyla yapılmıştır. Şekil 3.12'deki SEM görüntülerinde Mikro  $Al_2O_3$  ve Nano  $Al_2O_3$  ve hiç katkısız malzemelerin makro resimleri verilmiştir. Genel olarak epoksi esaslı kompozit malzemede parçacıklar homojen dağılmış ve aglomerasyon (kümelenmeye) rastlanmamıştır.

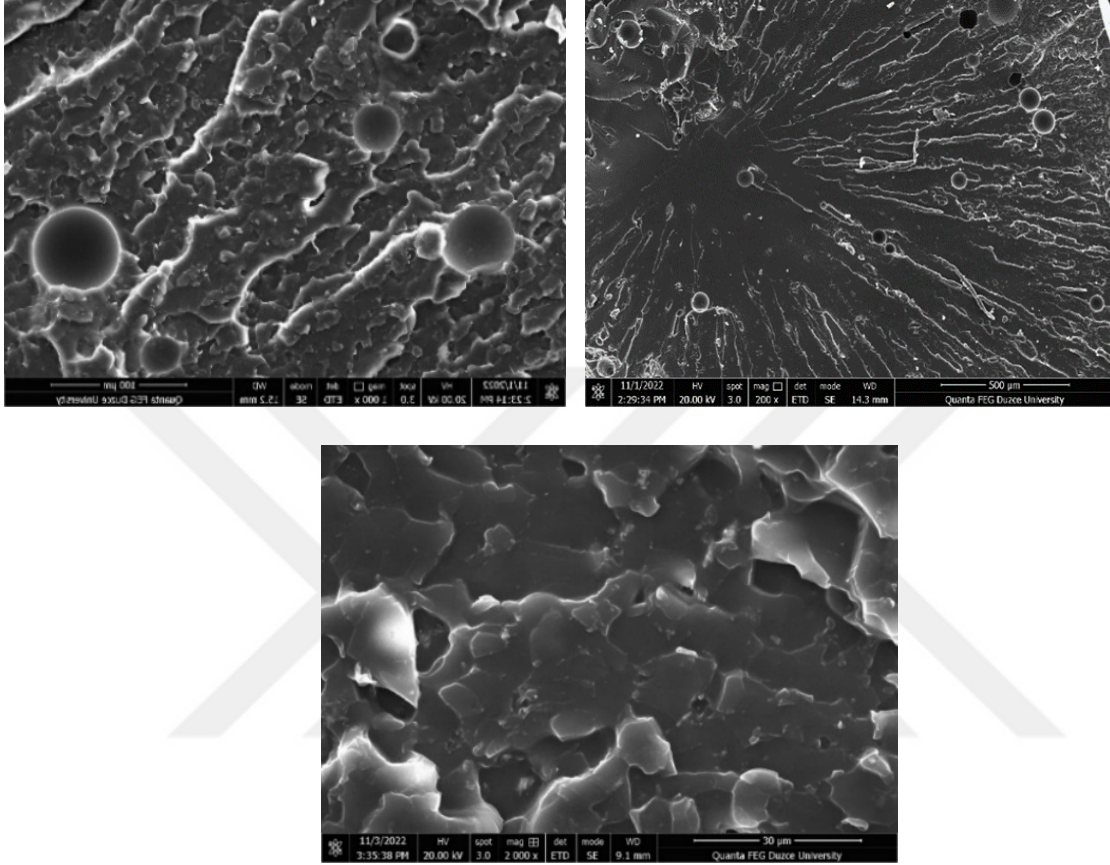


Şekil 3.12. Katkısız malzemelerin makro SEM görüntüleri.



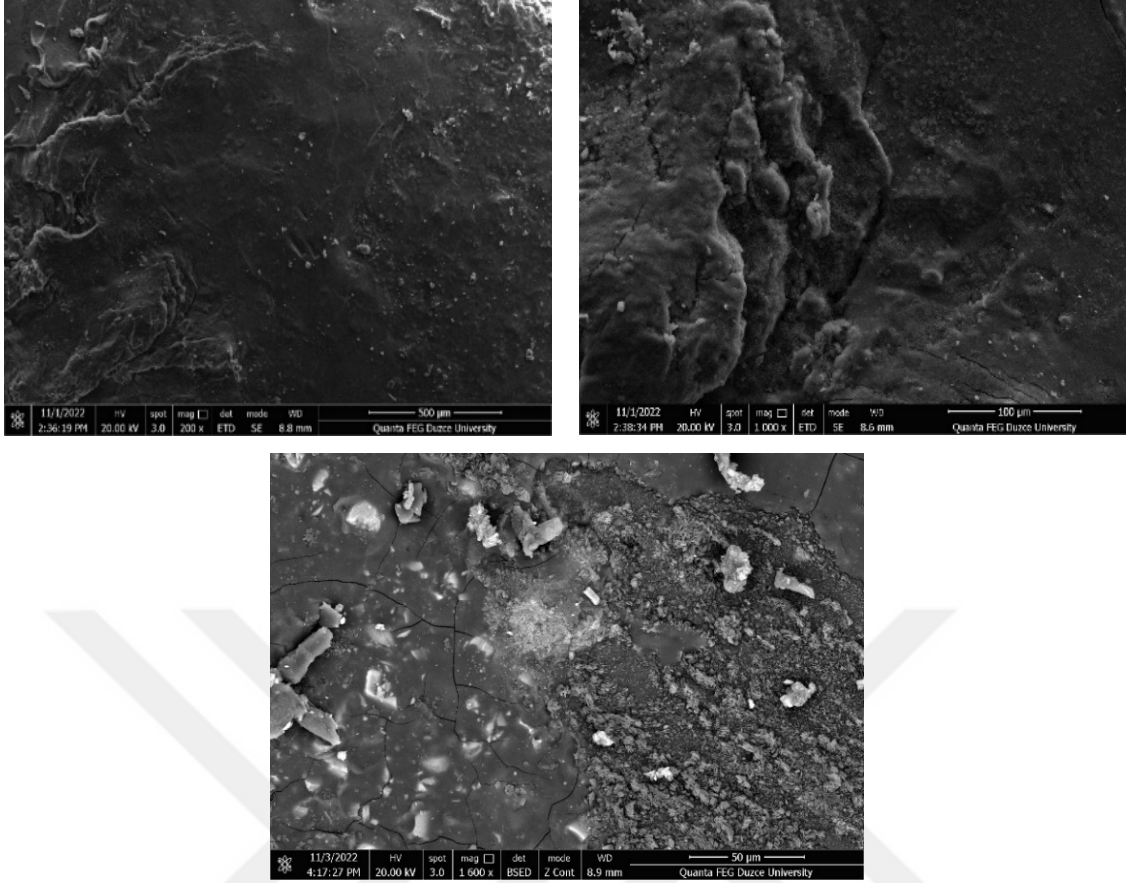
Şekil 3.13. Mikro %2  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri.

Şekil 3.13'deki SEM görüntülerinde görüldüğü üzere karışım içerisine mikro boyutlarda parçacıkların eklenmesi kırılma yüzeylerinin pürüzlülüğünü artırmıştır. Kırılma yüzeylerindeki yüzey pürüzlülüğü, daha yüksek yük kapasitesi ve daha fazla enerji emilimiyle kesme bantları oluşturmakta olup bu durum ise plastik deformasyonu göstermektedir.



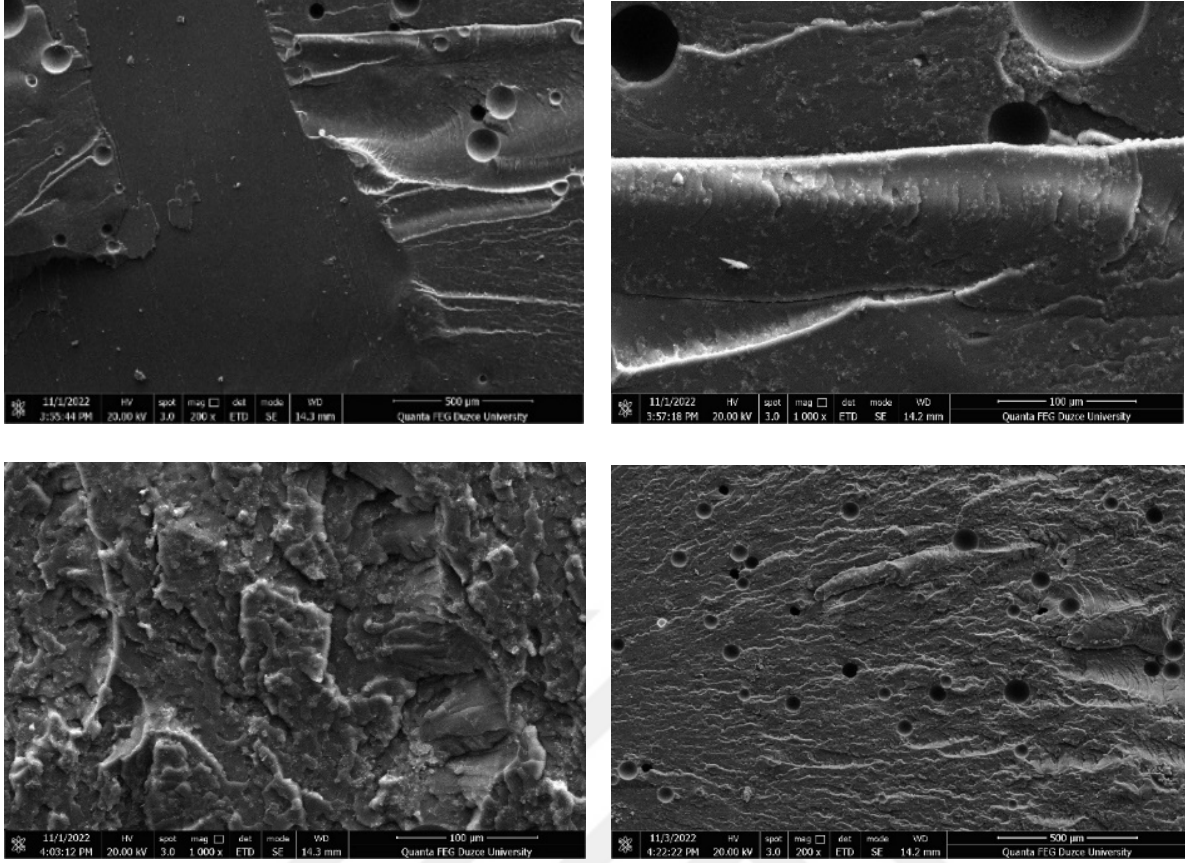
**Şekil 3.14.** Nano %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri.

Şekil 3.14'deki SEM görüntülerinde görüldüğü üzere kırılma sırasında meydana gelen bazı mekanizmaların, tek bindirmeli bağlantının kayma kuvvetinin nispeten iyileşmesine neden olmuştur. Kopma yükü ve deformasyon miktarında çok az da olsa artışa sebep olmuştur. Her iki malzemenin de kırılma yüzey resimleri de birbirine benzer olup, kırılma mekanizmalarının da aynı olduğu gözlemlenmiştir. Buda parçacık boyutunun bu karışımlarda etkili olmadığını göstermiştir.



**Şekil 3.15.** Mikro %2 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri.

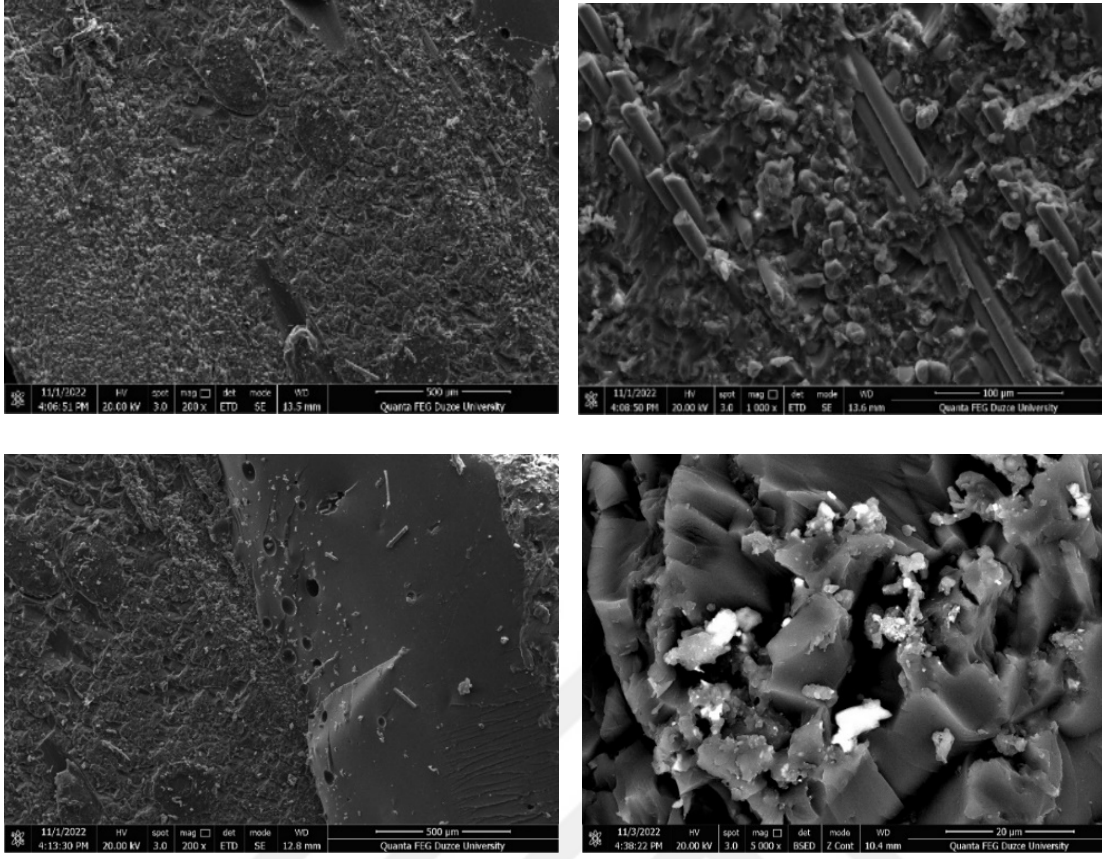
Şekil 3.15'te Mikro %2 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi katkılı malzeme, Şekil 3.16'da ise Mikro %6 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi malzemelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM resimlerinde görüldüğü üzere aynı türdeki parçacık boyutlarındaki birleştirme yüzeylerinde artan TiO<sub>2</sub> katkı oranı malzemenin kısmen daha fazla plastik deformasyona uğramasını sağlayarak daha sünek bir kırılma yüzeyleri oluşturmuştur. Bu durum artan parçacık oranı deformasyon oranını kısmen artırmıştır. Gevrek kırılma türünden kısmi sünek bir kırılmaya doğru geçiş yapmıştır. Bu durum kopmanın gecikmesine ve katkılı yapıştırıcının kesme mukavemeti ve tokluğun artmasına neden olmuştur.



**Şekil 3.16.** Mikro %6 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri.

Şekil 3.17’de Nano %2 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Yine benzer kırılma yüzey topografyasından söz edilebilir. Nano parçacıklar çok önemli bir rol oynamış ve mikro boyutlu SEM görüntülerine benzer görüntüler gözlemlenmiştir.





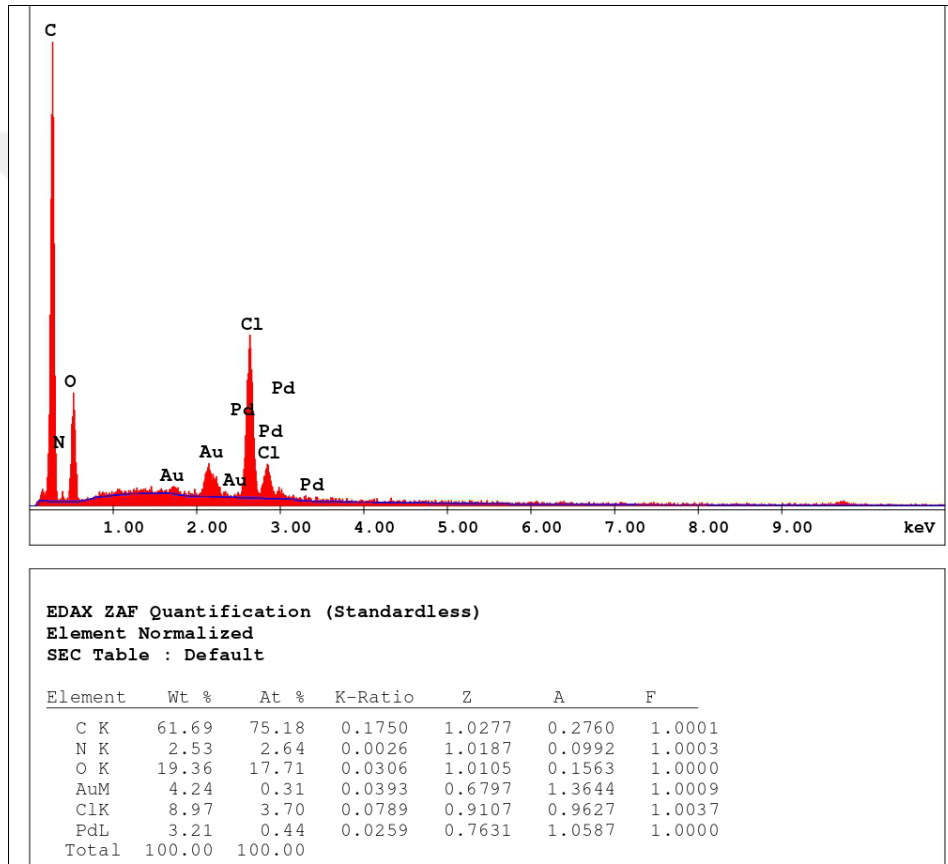
**Şekil 3.17.** Nano %2 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi bindirmeli numunenin kırılma yüzeyleri.

Şekil 3.17'deki SEM görüntülerinde görüldüğü üzere tek bindirmeli bağlantılarda kesme dayanımı ve tokluğun artırılması için bahsedilen mekanizmalar, nano veya mikro parçacıkların karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılmasına, matris ve parçacık arasındaki yapışmaya büyük ölçüde bağlıdır. Tez çalışması sırasında uygulanan karışım dizimi bu sonucu desteklemektedir. Homojen şekilde karıştırılmayan numunelerde numune yüzeyinde topaklanmalar görülmüştür ve çekme testlerinde mekanik özelliklerde düşük sonuçlar alınmıştır.

Topaklanmış nano veya mikro parçacıklar, yapışkan tabakada lokal stres konsantrasyonlarını zorlamış olup bu durum yapışkan tabakadaki çatlakların hızlı bir şekilde ilerlemesine neden olmaktadır. Bu durum yapışkan bağlantının yırtılma mukavemetini ve tokluğunu azaltarak gevrek kırılmaya sebep olmaktadır. Sem görüntülerinde de kırılma yüzeylerinin cam gibi oluşu bu durumu desteklemektedir.

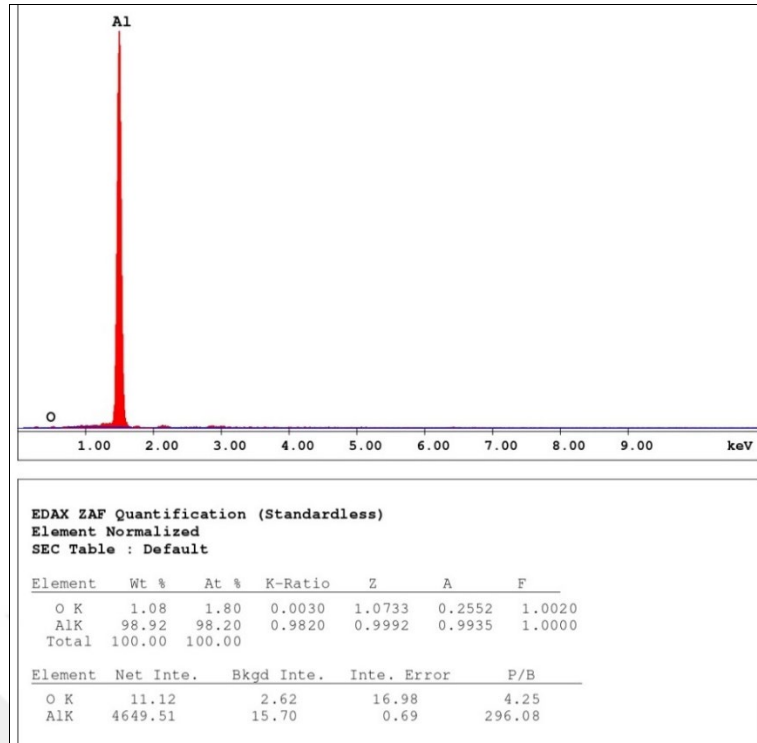
### 3.4. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

Tüm element analizi ve kimyasal karakterizasyon çalışmaları Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan X-ışını spektroskopi cihazında yapılmıştır. Tipik Katkısız epoksi malzemeye ait EDX analiz sonuçları Şekil 3.18.'de gösterilmiştir. Saf Katkısız epoksi numune içerisinde en çok karbon ve klor elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca az miktarda paladyum ve altın piklerinin yanında O<sub>2</sub> ve N pikleri de gözlemlenmiştir. Muhtemel altın ve paladyum piklerinin yalıtkan malzemeyi iletken hale getirmek için yapılan yüzey kaplama yönteminden kaynaklandığı söylenebilir.

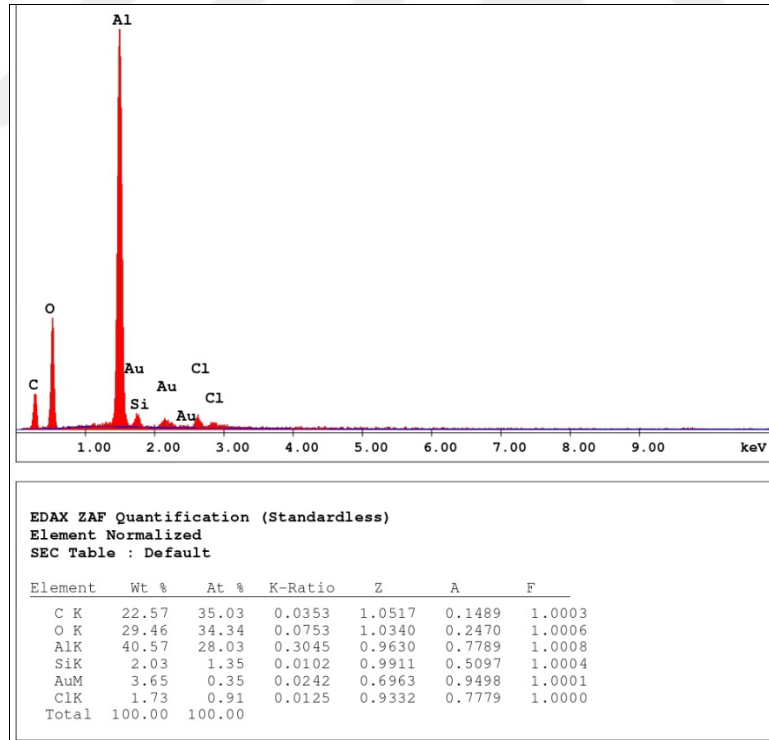


Şekil 3.18. Katkısız epoksi numunesi element analizi.

Şekil 3.19'da mikro katkılı epoksi ve Şekil 3.20'de ise nano katkılı malzemeye ait EDX analiz sonuçları görülmektedir. Mikro katkılı malzemede sadece Al ve O pikleri tespit edilmiş, buda analizin tam Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacığından alındığını göstermektedir. Nano katkılı malzemeden epoksi içerisindeki diğer bileşen pikleri de tespit edilmiştir. Örneğin, Cl, O ve C pikleri gibi (Şek.3.20). Benzer EDX pikleri TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi kompozitlerde de gözlenmiştir (Şek.3.21).

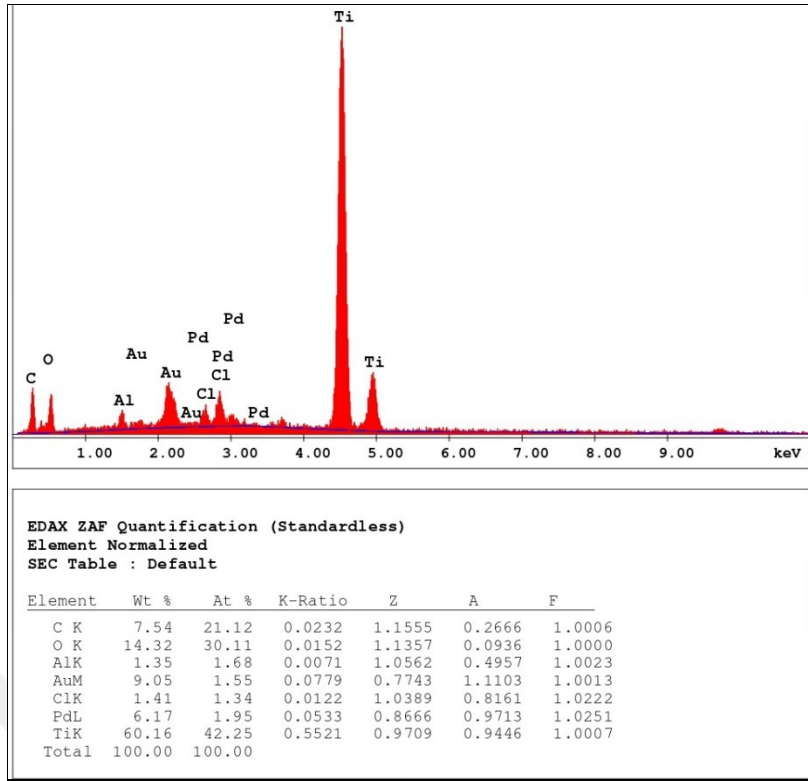


Şekil 3.19. Mikro %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.

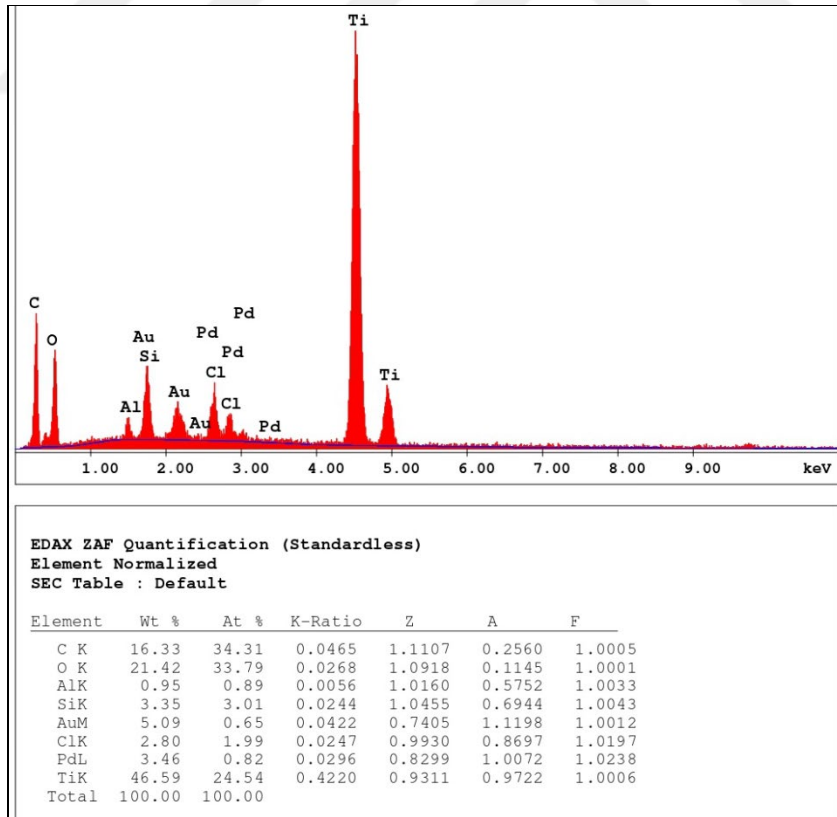


Şekil 3.20. Nano %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.



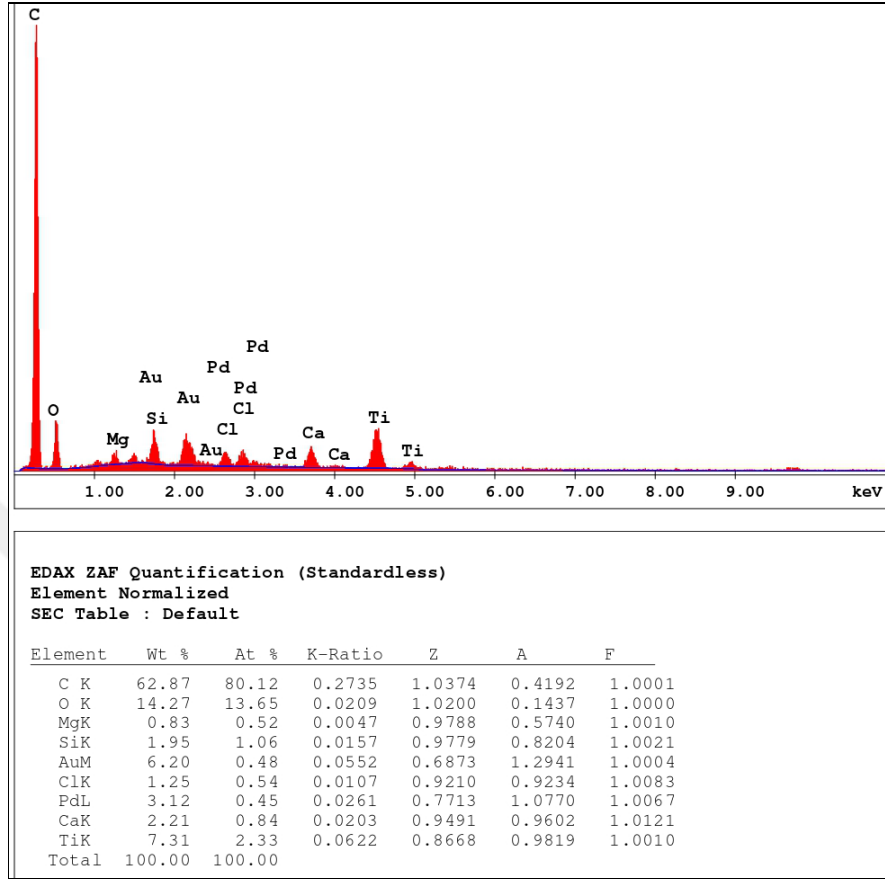


Şekil 3.21. Mikro %2 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.

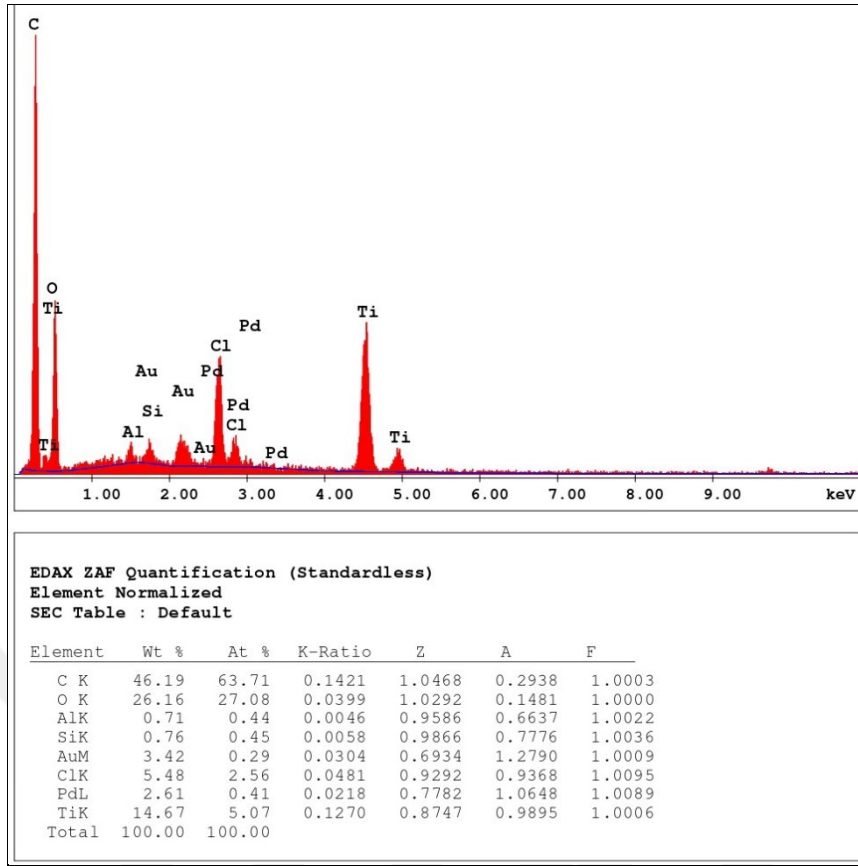


Şekil 3.22. Mikro %6 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.

Spektrometrede yapılan ölçüm sonucu epoksi numune içerisinde mikro boyutlarda  $\text{TiO}_2$  katkısı olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 3.23. Nano %2  $\text{TiO}_2$  katkılı epoksi numunesi element analizi.



**Şekil 3.24.** Nano %6 TiO<sub>2</sub> katkılı epoksi numunesi element analizi.

Spektrometrede yapılan ölçüm sonucu epoksi numune içerisinde nano boyutlarda TiO<sub>2</sub> katkısı olduğu doğrulanmıştır. %6 kütlece derişim oranındaki numunede %2 kütlece derişim oranına göre daha yüksek TiO<sub>2</sub> element olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada polimer esaslı kompozit malzeme birleştirmelerinde kullanılan Hexion MGS Laminasyon Epoksi Seti L285/H285 reçine içerisine  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve Bor esaslı 3  $\mu m$  ve 30,50,60 nm boyutlarındaki seramik esaslı toz parçacıkları katılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. SiC tozları haricindeki tüm tozlar homojen bir şekilde karıştırılarak çekme ve bindirme numuneleri elde edilerek test edilmişlerdir.
2.  $Al_2O_3$  takviyeli kompozit malzemelerin çekme deney sonucunda en iyi sonuç %4 derişim oranında elde edilmiş olup, nano parçacık takviyesi bu sonuçları önemli derecede etkilememiştir.
3. Parçacık türünde en yüksek kopma yükünü  $TiO_2$  tozu sağlamıştır. Kütlece % derişim oranında optimum kopma yükü ise %4'te sağlanmıştır. Parçacık boyutunda ise en yüksek kopma yükü mikro tozlarda sağlanmıştır.
4. Katkılı test numunelerinde kopma yükü artıkça nispeten % deformasyonda taviz verilmiştir.
5. Katkılı test numunelerinde takviye edilen tozun homojen dağılımı sağlanamadığında yapıştırıcının mekanik özelliklerinde düşüşler incelenmiştir.
6. Tek bindirmeli  $TiO_2$  takviyeli numuneler en yüksek kopma yüklerine sahiptir.
7. Tek bindirmeli nano boyutlu parçacıklar, aynı parçacık malzemesi için mikro boyutlu parçacıklardan daha yüksek kopma yüklerine sahiptir.
8.  $Al_2O_3$  takviyeli numuneler en düşük kopma yüklerine sahiptir.
9. Epoksi esaslı kompozitlerin kırılma yüzey morfolojilerinde parçacık boyutunun çok fazla etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Genel kısmen sünek kırılma yüzeylerine rastlanmıştır.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] M. Zor, Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler, *Kompozit Malzeme Mekaniği Ders Notları*, İzmir, 2018.
- [2] O. Ünal, Kompozit malzemeler, *Yapı Malzemesi Ders Notları*, Kocaeli, 2011.
- [3] İ. Uygur, “Environmentally assisted fatigue response of Al-Cu-Mg-Mn with SiC particulate metal matrix composites,” PhD thesis, University of Wales Swansea, Swansea U.K.,1999.
- [4] E. O. Baştekeli, “Havacılık alanında kullanılan birleştirme yöntemleri,” *Mühendis ve Makine*, c. 61, sayı 699, ss. 154-169, 2020.
- [5] Ü.G. Başçı, “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikül Takviyeli Al-Cu Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1999.
- [6] İ. Uygur ve H. Saruhan, “Mechanical behaviour of aluminum based metal matrix composites,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 8, sayı 1, ss. 167-174, 2004.
- [7] A. İ. Kaya, “Kompozit malzemeler ve özellikleri,” *Putech & Composites Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, c. 29, sayı 1, ss. 38-45, 2016.
- [8] M. Sönmez, “Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [9] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 4.baskı, Aksaray, Türkiye: Seçkin Yayınevi, 2006, ss. 28-34.
- [10] A. Kalemtaş, “Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler,” *Putech and Composites*, ss. 20-26, 2015.
- [11] H. İ. İşlek, (2020, Mart 4). [Online]. Erişim: <http://kompozithayalleri.com/matris-nedir/>
- [12] A. A. Kısasöz, “Alüminyum Matrisli Titanyumdiborürin In-situ Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.

- [13] Ö. F. Çiçek, “Aramid Elyaf ve Cam Elyaf ile Oluşturulan Kompozit Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Gerilme Davranışı,” Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2019.
- [14] B. Beşergil, (2016, Mayıs 16). Kompozitler, [Online]. Erişim: [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_97.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_97.html)
- [15] H. Arkaz, Elle Yatırma Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi, *Kompozit Malzemeler Ders Notları*, Kayseri, 2016.
- [16] A. Işık, “Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanın Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [17] C. Var, “Karbon Kumaş Takviyeli Hibrit Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2021.
- [18] H. Dinkçi, “Vakum Torbalamada Basınç Değişkeninin Karbon Elyaf Matrisli Epoksi Yapılarda Estetik ve Mekanik Özelliklere Etkisi,” *Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 1-21, 2020.
- [19] M. Kaplan, “Otomotiv Endüstrisinde Reçine Transfer Kalıplama (RTM): Güncel Gelişmeler ve Başarılı Uygulamalar,” *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 47-53, 2017.
- [20] A. M. Bahar, “Pultrüzyon Yöntemiyle CTP Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Malzeme Nihai Özelliklerine Etkisi,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [21] B. Oğuz, “Prepreg Teknolojisi ile Üretilen Kompozit Malzemelerin Performanslarının Araştırılması,” Yüksek lisans bitirme projesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2017.
- [22] Z. Gülten, “SMC Yöntemi ile Kompozit Üretimi,” Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2003.
- [23] L. Kırkayak, “Yapıştırma Bağlantılı Kompozitlerde Yapıştırma Geometrisinin Gerilme Dağılımına Etkisi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 25, sayı 1, ss. 27-33, 2018.

- [24] B. Okutan, “Lamine Kompozitlerde Pimli Bağlantıların Gerilme ve Kırılma Analizi,” Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [25] A. Razmi, “Kompozit Parçaların Çeşitli Yapıştırılmalı Bağlantı Tasarımlarının Karşılaştırılması,” Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [26] M. Thirukumaran, J.T.W. Jappes, I. Siva, R. Ramanathan ve N. C. Brintha, “On the interfacial adhesion of fiber metal laminates using surface modified aluminum 7475 alloy for aviation industries- a study,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, c. 34, sayı 6, ss. 635-650, 2019.
- [27] S.M.J. Razavi, M.R. Ayatollahi, A.N. Giv ve H. Khoramishad, “Single lap joints bonded with structural adhesives reinforced with a mixture of silica nanoparticles and multi walled carbon nanotubes,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, c. 80, sayı 1, ss. 76-86, 2018.
- [28] R. Jairaja ve G. N. Naik, “Strengthening of the adhesive bond using a mixture of adhesives between dissimilar adherends in a single lap joint,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, c. 34, sayı 6, ss. 579-598, 2020.
- [29] B. İşcan, H. Adin ve A. Turgut, “Bazı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 24, sayı 2, ss. 119-126, 2012.
- [30] M. Ekrem, “Karbon Nanotüp ve Polivinil Alkol Nanoelyafla Güçlendirilmiş Epoksi Yapıştırıcıların Alüminyum Bağlantılar Üzerindeki Kırılma Davranışları,” Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2015.
- [31] P.K. Ghosh, A. Patel ve K. Kumar, “Adhesive joining of copper using nano-filler composite adhesive,” *Polymer*, c. 87, sayı 1, ss. 159-169, 2016.
- [32] M. H. Meybodi, S. S. Samandari ve M. Sadighi, “A new approach for prediction of elastic modulus of polymer/nanoclay composites by considering interfacial debonding: Experimental and numerical investigations,” *Composites Science and Technology*, c. 117, sayı 1, ss. 379-385, 2015.
- [33] T. V. Brantseva, S. V. Antonov ve I. Y. Gorbunova, “Adhesion properties of the nanocomposites filled with aluminosilicates and factors affecting them: A review,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, c. 82, sayı 1, ss. 263-281, 2018.

- [34] R. K. Nayak, A. Dash ve B. C. Ray, “Effect of epoxy modifiers ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ) on mechanical performance of epoxy/glass fiber hybrid composites,” *3rd International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2014)*, c. 6, sayı 1, ss. 1359-1364, 2014.
- [35] K. Anam, A. Purnowidodo ve D. F. Smaradhana, “Effect of fillers content on mechanical strength and failure mode of aluminium bonded with epoxy-based adhesive,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, c. 11, sayı 4, ss. 2746-2750, 2016.
- [36] J. Cho, M. S. Joshi ve C. T. Sun, “Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles,” *Composites Science and Technology*, c. 66, sayı 1, ss. 1941-1952, 2006.
- [37] H. A. Al- Turaif, “Effect of nano  $\text{TiO}_2$  particle size on mechanical properties of cured epoxy resin,” *Progress in Organic Coatings*, c. 69, sayı 1, ss. 241-246, 2010.
- [38] N. Kavak ve E. Altan, “Influence of filler amount and content on the mechanical performance of joints bonded with metal powder filled adhesive,” *Materials Science Forum*, c. 773-774, sayı 1, ss. 226-233, 2014.
- [39] D. Pinto, L. Bernardo, A. Amaro ve S. Lopes, “Mechanical properties of epoxy nanocomposites using titanium dioxide as reinforcement: A review,” *Construction and Building Materials*, c. 95, sayı 1, ss. 506-524, 2015.
- [40] M. C. Şenel ve M. Gürbüz, “ $\text{Al}_2\text{O}_3$  tanecik boyutunun ve katkı oranının alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerine olan etkileri,” *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 9, sayı 1, ss. 565-575, 2020.
- [41] H. Gün ve D. Asi, “ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Seramik Toz Parçacık İlaveli Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi,” *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 33-40, 2017.
- [42] K. Gültekin, “Modifiye Edilmiş ve Modifiye Edilmemiş Bor Karbür ( $\text{B}_4\text{C}$ ) Nanopartiküllerin Yapısal Yapıştırıcıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Karşılaştırılması,” *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 11, sayı 1, ss. 198-206, 2022.



- [43] S. Akpınar, “Alüminyum Oksit ve Titanyum Dioksit Partikül Takviyeli Yapıştırıcılarla Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi,” *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı 2, ss. 244-252, 2016.
- [44] M. Arıcı, R. Ongun, M. Kılınçel, Y. O. Alpay ve İ. Uygur, “Farklı Parçacıkların Yapıştırıcı Birleştirilmiş Tek Bindirmeli Bağlantıların Çekme Dayanımı Üzerine Etkisi,” *Osmaniye Üniversitesi Mühendislik, Doğa ve Uygulamalı Bilimler Uluslararası Konferansı*, ss. 316-321, 2021.
- [45] İ. Uygur, “Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments,” *Industrial Lubrication and Tribology*, c. 58, sayı 6, ss. 303-311, 2006.
- [46] İ. Uygur, “Influence of shoulder diameter on mechanical response and microstructure of FSW welded 1050 Al-alloy,” *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 57, sayı 1, ss. 53-60, 2012.
- [47] A. Kurt, İ. Uygur ve H. Ateş, “Effect of porosity content on the weldability of powder metal parts produced by friction stir welding,” *Materials science forum*, c. 534, sayı 1, ss. 789-792, 2007.
- [48] İ. Uygur, A. Çiçek, E. Toklu, R. Kara ve S. Sarıdemir, “Fatigue life predictions of metal matrix composites using artificial neural networks,” *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 59, sayı 1, ss. 97-103, 2014.
- [49] İ. Uygur, W. J. Evans, M. Bache ve B. Gülenç, “The fatigue behaviour of SiC particulate reinforced 2124 aluminium matrix composites,” *Metallofizika I Noveishie Tekhnologii*, c. 26, sayı 7, ss. 927-939, 2004.
- [50] İ. Uygur, “Tensile behaviour of powder metallurgy processed (Al-Cu-Mg-Mn) / SCIP composites,” *Iranian Journal of Science And Technology Transaction B-Engineering*, c. 28, sayı 2, ss. 239-248, 2004.
- [51] İ. Uygur, “Notch behaviour and fatigue life predictions of discontinuously reinforced MMCs,” *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 56, sayı 1, ss. 109-115, 2011.