



**ALÜMİNYUM MATRİSLİ FARKLI ORANLARDA  
GRAFEN İÇEREN B<sub>4</sub>C TAKVİYESİ İLE  
ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Satiye Burcu KELEZ**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK**

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ FARKLI ORANLARDA GRAFEN İÇEREN B<sub>4</sub>C  
TAKVİYESİ İLE ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Satiye Burcu KELEZ**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK**

**KARABÜK  
Ocak 2021**

Satiye Burcu KELEZ tarafından hazırlanan “ALÜMİNYUM MATRİSLİ FARKLI ORANLARDA GRAFEN İÇEREN B<sub>4</sub>C TAKVİYESİ İLE ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 07/01/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Emre Turan (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Satiye Burcu KELEZ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ALÜMİNYUM MATRİSLİ FARKLI ORANLARDA GRAFEN İÇEREN B<sub>4</sub>C TAKVİYESİ İLE ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Satiye Burcu KELEZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK

Ocak 2021, 62 sayfa

Bu çalışmada, %50 AA1050 matrisli farklı oranlarda grafen içeren B<sub>4</sub>C partikül takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Vakum destilasyon ünitesi ile mikro boyuttaki B<sub>4</sub>C seramik takviyenin yüzeyine %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında homojen dağılım sağlanacak şekilde grafen katkılama işlemi uygulanmıştır. Ø7x50 ölçülerinde 48µm ortalama tane boyutuna sahip B<sub>4</sub>C tozları kullanılarak preformlar hazırlanmıştır. Oluşturulan preformlara, 800 °C’de basınçlı infiltrasyon tekniği ile 8 bar basınç uygulanarak AA1050 matris infiltre edilmiştir. Üretilen kompozit numunelerin karakterizasyonları için XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik dayanımlarını belirlemek için ise sertlik, basma testleri gerçekleştirilirken son olarak aşınma testleri uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre B<sub>4</sub>C takviyesinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ancak grafen oranı %1'e çıktığında matriste porozitelerin oluştuğu dikkat çekmiştir. Bu durumun artan grafen oranına bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. En yüksek sertlik %50 AA1050 matris+%49,50 B<sub>4</sub>C+%0,50 GNP olan numunede görülürken en düşük sertlik %50 AA1050 matris+%50 B<sub>4</sub>C olan numunede gözlenmiştir. Bu sebeple grafen katkılama oranının %0,50 oranına kadar kompozitlerin sertliğinin artış göstermesini sağlarken daha yüksek grafen katkılama oranında artan porozitenin etkisiyle kompozitlerin sertlik değerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Basma testi sonuçları ise sertlik testi ile paralellik içerisinde. Aşınma testi sonuçlarına göre en yüksek aşınma %50 AA1050 matris+%49 B<sub>4</sub>C+%1 GNP görülürken en düşük aşınma ise %50 AA1050 matris+%49,5 B<sub>4</sub>C+ %0,50 GNP olan numunelerde gözlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Alüminyum matris, bor karbür, grafen, kompozit, basınçlı infiltrasyon.

**Bilim Kodu :** 91512

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITES PRODUCED BY BORON CARBIDE REINFORCEMENT CONTAINING DIFFERENT PROPORTIONS OF GRAPHENE WITH ALUMINIUM MATRIX**

**Satiye Burcu KELEZ**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgy and Material Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Engin ÇEVİK**

**January 2021, 62 pages**

In this study, the mechanical and tribological properties of B<sub>4</sub>C particle reinforced composites containing %50 AA1050 matrix and different ratios of graphene were investigated.

With the vacuum distillation unit, graphene doping was applied to the surface of the micro-sized B<sub>4</sub>C ceramic reinforcement in a homogeneous distribution of 0,25%, 0,50% and 1% preforms were prepared by using B<sub>4</sub>C powders with an average particle size of 48µm in dimensions of Ø7x50. Aluminium matrix was infiltrated to the preforms by applying 8 bar pressure with the pressure infiltration technique at 800 °C. XRD and SEM analyzes were performed for the characterization of the produced composite samples. In order to determine their mechanical strength, hardness and

compression tests were carried out, finally abrasion tests were applied.

According to the results, it was noticed that the  $B_4C$  reinforcement was homogeneously distributed in the structure, but when the graphene ratio increased to %1, porosities were formed in the matrix. It was observed that this situation increased depending on the graphene rate. The highest hardness was observed in the sample with 50% AA1050 matrix + 49.50%  $B_4C$  + 0.50% GNP, while the lowest hardness was observed in the sample with 50% AA1050 matrix + 50%  $B_4$ . For this reason, it has been determined that the graphene doping increases the hardness of the composites up to 0.50%, while the higher graphene doping reduces the hardness value of the composites with the effect of the increased porosity. Compression test results are in parallel with the hardness test. According to the abrasion test results, the highest wear was observed in samples with 50% AA1050 matrix + 49%  $B_4C$  + 1% GNP, while the lowest wear was observed in samples with 50% AA1050 matrix + 49.5%  $B_4C$  + 0.50% GNP.

**Key Word** : Aluminium matrix, boron carbide, graphene, composite, pressure inflation.

**Science Code** : 91512

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başlangıcından sonuna kadar her aşamasında çalışmayı yönlendiren, destek ve yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen çok kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi. Engin ÇEVİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisini ve fikirlerini esirgemeyen, tecrübeleri ile bana yol gösteren tüm hocalarıma, çalışmalar süresince tüm laboratuvar imkanlardan faydalanmamı sağlayan Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili anne ve babama bu zorlu süreçte yanımda oldukları ve bugünlere gelmem de büyük emekleri olduğu için, değerli eşim Barış KELEZ'e bu süreçte her zaman yanımda olduğu ve verdiği destekten dolayı tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                              | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| KABUL .....                                                  | ii           |
| ÖZET.....                                                    | iv           |
| ABSTRACT .....                                               | vi           |
| TEŞEKKÜR.....                                                | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                            | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                         | xii          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                      | xiv          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                         | xv           |
| <br>                                                         |              |
| BÖLÜM 1 .....                                                | 1            |
| GİRİŞ .....                                                  | 1            |
| <br>                                                         |              |
| BÖLÜM 2 .....                                                | 3            |
| KOMPOZİT MALZEMELER.....                                     | 3            |
| 2.1. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER .....                      | 4            |
| 2.2. SERAMİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....                       | 5            |
| 2.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER .....                        | 5            |
| <br>                                                         |              |
| BÖLÜM 3 .....                                                | 8            |
| METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....                              | 8            |
| 3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER İÇİN MATRİS MALZEMELERİ .... | 8            |
| 3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....     | 15           |
| 3.3.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....                       | 16           |
| 3.3.1.1. Karıştırılmalı Döküm .....                          | 17           |
| 3.3.1.2. Sıkıştırılmalı Döküm.....                           | 18           |
| 3.3.1.3. Santrifüj Döküm.....                                | 18           |
| 3.3.1.4. Basınçsız İnfiltrasyon.....                         | 21           |
| 3.3.1.5 Basıncılı İnfiltrasyon.....                          | 21           |

|                                                   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------|---------------------|
| 3.3.2. Katı Faz Üretim Yöntemleri .....           | 23                  |
| 3.3.2.1. Difüzyonla Bağlanma .....                | 23                  |
| 3.3.2.2. Toz Metalurjisi.....                     | 24                  |
| 3.3.3. Biriktirme Yöntemleri .....                | 25                  |
| 3.3.4. Çift-Faz Üretim Yöntemleri .....           | 25                  |
| 3.3.5. In-Situ Üretim Yöntemi.....                | 25                  |
| <br>BÖLÜM 4 .....                                 | <br>26              |
| ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER .....              | 26                  |
| 4.1. MEKANİK ÖZELLİKLER.....                      | 26                  |
| 4.2. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER .....                  | 30                  |
| <br>BÖLÜM 5 .....                                 | <br>35              |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                         | 35                  |
| 5.1. DENEYSEL MALZEMELER.....                     | 35                  |
| 5.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ.....                   | 37                  |
| 5.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU .....             | 39                  |
| 5.3.1. Metalografik İncelemeler.....              | 39                  |
| 5.3.2. XRD İncelemeleri.....                      | 40                  |
| 5.4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU .....  | 40                  |
| 5.4.1. Sertlik Deneyi .....                       | 41                  |
| 5.4.2. Basma Deneyi.....                          | 41                  |
| 5.5. AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU ..... | 42                  |
| <br>BÖLÜM 6 .....                                 | <br>44              |
| DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....                | 44                  |
| 6.1. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI .....        | 44                  |
| 6.2. XRD SONUÇLARI.....                           | 46                  |
| 6.3. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI .....                | 47                  |
| 6.3. BASMA DENEYİ SONUÇLARI.....                  | 48                  |
| 6.4. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI .....                | 49                  |

|                                        | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------|---------------------|
| BÖLÜM 7 .....                          | 52                  |
| SONUÇLAR .....                         | 52                  |
| KAYNAKLAR .....                        | 53                  |
| EK AÇIKLAMALAR A. EDX ANALİZLERİ ..... | 58                  |
| ÖZGEÇMİŞ .....                         | 62                  |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|             |                                                                                                                                                         |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Takviye elemanı şekline göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması<br>a) Kısa fiber takviyeli, b) Sürekli fiber takviyeli, c) Partikül takviyeli..... | 4  |
| Şekil 3.1.  | Temas açısını ve arayüzey enerjilerini gösteren sıvı damlacığı yöntemine göre ıslatma durumunun şematik gösterimi .....                                 | 9  |
| Şekil 3.2.  | Karıştırma döküm tekniğinin üretim aşamaları.....                                                                                                       | 17 |
| Şekil 3.3.  | Sıkıştırılmalı döküm tekniğinin üretim aşamaları .....                                                                                                  | 18 |
| Şekil 3.4.  | Yatay gerçek santrifüj döküm yönteminin şematik gösterimi .....                                                                                         | 19 |
| Şekil 3.5.  | Dikey gerçek santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi .....                                                                                         | 19 |
| Şekil 3.6.  | Yarı santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi.....                                                                                                  | 20 |
| Şekil 3.7.  | Santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi .....                                                                                                      | 20 |
| Şekil 3.8.  | Basınçsız infiltrasyon yöntemi .....                                                                                                                    | 21 |
| Şekil 3.9.  | Basınçlı infiltrasyon prosesleri için a) Üstten doldurma, b) Alttan doldurma, c) Üstten döküm yöntemlerinin şematik gösterimi.....                      | 22 |
| Şekil 3.10. | Difüzyonla bağlanma .....                                                                                                                               | 24 |
| Şekil 3.11. | Toz metalurjisi yöntemi şematik gösterimi .....                                                                                                         | 24 |
| Şekil 4.1.  | Farklı matris elemanlarına sahip Al kompozitlerin kütle kaybı.....                                                                                      | 31 |
| Şekil 4.2.  | Al6061 ve Al6061 + %1 KNT takviyeli kompozitin aşınma hızı.....                                                                                         | 33 |
| Şekil 5.1.  | Kullanılan takviyelerin a) B <sub>4</sub> C partikülleri, b) Grafen nanopartikülleri SEM görüntüleri.....                                               | 36 |
| Şekil 5.2.  | %1 grafen içeren nanopartiküllerin ve B <sub>4</sub> C partiküllerinin XRD analizi. ....                                                                | 37 |
| Şekil 5.3.  | Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan infiltrasyon ünitesine ait a) Makro ve b) Şematik görünüm. ....                                             | 38 |
| Şekil 5.4.  | Üretilen alüminyum matrisli kompozit malzeme.....                                                                                                       | 38 |
| Şekil 5.5.  | SEM cihazının görüntüsü. ....                                                                                                                           | 39 |
| Şekil 5.6.  | XRD cihazının görüntüsü.....                                                                                                                            | 40 |
| Şekil 5.7.  | Sertlik cihazının görüntüsü.....                                                                                                                        | 41 |
| Şekil 5.8.  | Basma cihazının görüntüsü. ....                                                                                                                         | 42 |
| Şekil 5.9.  | Aşınma deney cihazının görüntüsü. ....                                                                                                                  | 43 |
| Şekil 6.1.  | B <sub>4</sub> C ile grafen nanopartikülleri katkılanması a) %0, b) %0,25, c) %0,5, d) %1.....                                                          | 44 |
| Şekil 6.2.  | Üretilen kompozit malzemelere ait SEM görüntüleri. ....                                                                                                 | 45 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.3. a) Grafen içermeyen kompozit, b) %1 Grafen içeren kompozit görüntüleri.....      | 46 |
| Şekil 6.4. Kompozit malzemelere ait XRD analiz sonuçları. ....                              | 47 |
| Şekil 6.5. Kompozit malzemelerin sertlik değerleri. ....                                    | 48 |
| Şekil 6.6. Kompozit malzemelerin basma dayanımları. ....                                    | 49 |
| Şekil 6.7. Aşınma deneyi sonuçları.....                                                     | 50 |
| Şekil 6.8. N3 ve N4 kodlu numuneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....                  | 51 |
| Şekil Ek A.1. N3 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra SEM görüntüsü.....            | 59 |
| Şekil Ek A.2. N3 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX grafiği. ....             | 59 |
| Şekil Ek A.3. N4 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra SEM görüntüsü.....            | 60 |
| Şekil Ek A.4. N4 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra 3. noktanın EDX grafiği. .... | 61 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Endüstri de kullanılan metal matris kompozit sistemleri.....            | 6  |
| Çizelge 3.1. Alüminyumun özellikleri .....                                           | 11 |
| Çizelge 3.2. Alüminyum alaşımlarının simgeleme dizisi .....                          | 11 |
| Çizelge 3.3. Grafinin özellikleri .....                                              | 15 |
| Çizelge 5.1. İmalatı gerçekleştirilen numunelerin hacimce bileşimleri. ....          | 35 |
| Çizelge 5.2. Matris elemanının kimyasal bileşimi. ....                               | 36 |
| Çizelge Ek A.1. N3 kodlu numuneye ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX analizi..... | 60 |
| Çizelge Ek A.2. N4 kodlu numuneye ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX analizi..... | 61 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| Al                             | : alüminyum         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : alüminyum oksit   |
| Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> | : alüminyum karbür  |
| AlN                            | : alüminyum nitrit  |
| B <sub>4</sub> C               | : bor karbür        |
| Cu                             | : bakır             |
| Mg                             | : magnezyum         |
| Mg <sub>2</sub> Si             | : magnezyum silisit |
| Mn                             | : mangan            |
| Sc                             | : skandiyum         |
| Si                             | : silis             |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | : silika nitrit     |
| SiC                            | : silisyum karbür   |
| SiO <sub>2</sub>               | : silikon dioksit   |
| Ti                             | : titanyum          |
| TiC                            | : titanyum karbür   |
| Zr                             | : zirkonyum         |
| Zn                             | : çinko             |

### KISALTMALAR

|      |                                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| ASA  | : American Standards Association (Amerikan Standartlar Birliği) |
| CLSM | : Konfokal Lazer Tarama Mikroskobu                              |
| EDX  | : Energy Dispersive X-ray                                       |
| GDC  | : Gravite Kalıplama                                             |
| GNP  | : Grafen Nanopartikül                                           |

HPDC : Vakum Destekli Yüksek Basıncılı Döküm  
MMK : Metal Matrisli Kompozit  
PMK : Polimer Matrisli Kompozit  
SMK : Seramik Matrisli Kompozit  
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)  
XRD : X-Ray Diffractometer (X-ışını Difraktometresi)



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Tarihi çağlara bakıldığında malzemenin insanlık için ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Günümüzde de yaşanan teknolojik gelişmeler malzemenin gelişimi ile paralel olarak ilerlemektedir. Geleneksel malzemeler ile teknolojinin ve sanayileşmenin hızına yetişebilmek pek de mümkün olmadığından bu malzemelerden daha üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler dikkat çekmektedir.

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin üstün özelliklerini bir araya getirmek veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak için makro seviyede birleştirilme ile elde edilen malzemeler olarak tanımlanır. Kompozit malzemeler, matris malzemelerine göre seramik matrisli, polimer matrisli ve metal matrisli kompozitler olarak sınıflandırılırlar. Son zamanlarda metal matrisli kompozitler üzerinde yapılan çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir.

Matris elemanı metal olan ve genellikle takviye elemanı olarak seramik malzeme seçilen kompozitlere metal matrisli kompozitler denir. Takviye içermeyen metal malzemelere göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanıma, aşınma dayanımı, ısı iletkenlik ve özgül dayanımı artırma gibi bir çok üstün özellikleri bulunmaktadır. Kullanım alanlarından birine örnek verilecek olursa, aşınmaya ve ısı çarpılmaya dirençli oldukları için otomotiv sektöründe karbon elyaf ile dayanımı artırılmış alüminyum alaşımlı matrise sahip motor parçaları verilebilir.

Metal matrisli kompozit malzeme üretimi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Sıvı faz üretim yöntemlerinden basınçlı infiltrasyon, yüksek üretim kapasitesi ve son şekle yakınlığından dolayı tercih edilen üretim teknikleri arasında yer almaktadır. Basınçlı infiltrasyon tekniğinde matris elemanı olarak genellikle, titanyum, magnezyum, bakır

alüminyum tercih edilmektedir. Bu matris malzemeleri arasında alüminyum ve alaşımları, hafiflik, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, kolay işlenebilme ve düşük maliyetli olması gibi avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Bu üstün özellikleri ile inşaat, otomotiv, havacılık, elektrik elektronik sektörlerinde ve bilimsel çalışmalarda alüminyum ve alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanılarak alüminyum matrisli farklı oranlarda grafen nanopartikülleri içeren B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

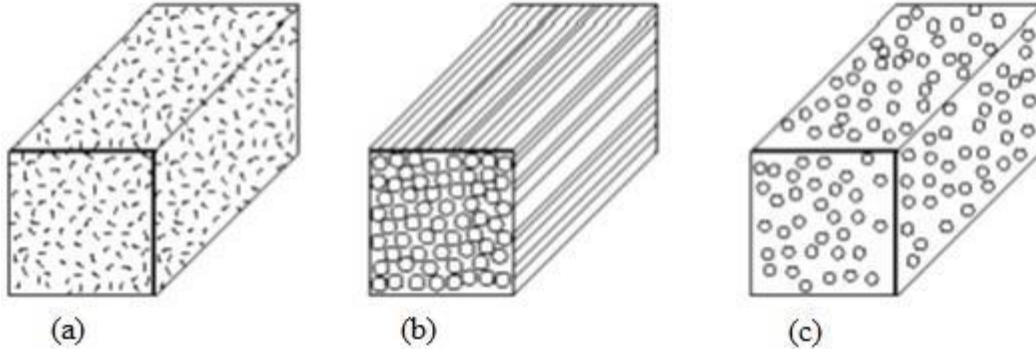


## BÖLÜM 2

### KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit, farklı kimyasal yapıdaki iki ya da daha çok malzemenin, kendi özelliklerini koruyarak, makro seviyede birleşmeleri ile oluşan çok fazlı malzeme olarak tanımlanabilir [1]. Bir araya gelen bu malzemeler, birbirlerinin zayıf yönünü tamamlayarak üstün özellikler sağladığı için mükemmel mekanik ve fiziksel özellikler sergilemektedir. Kompozit malzemeler matris ve takviye elamanı olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Matris bağlayıcı madde olup takviye adı verilen diğer ana bileşeni bir arada tutmayı sağlar. Takviyenin görevi ise matrisi güçlendirerek kompozit yapıya mukavemet ve dayanım kazandırmaktır. Kompozit üretim yöntemi, üretim şartları ve takviye-matris arasındaki bağ kuvveti kompozit malzemenin niteliklerini belirleyen temel faktörlerdir. Bu sebeple üstün performans gösteren bir kompozitin üretiminde ilk olarak matrise uyum sağlayacak uygun takviyelerin seçimi, sonra ise en uygun kompozit üretim yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus da herhangi bir takviye bileşeninin herhangi bir matris bileşeni üzerine ilave edilmesi durumunda beklenen kompozit özelliklerini göstermeyecek olmasıdır. Şayet takviye-matris arasındaki bağ yeteri kadar kuvvetli değil ise matris bileşeni fiberleri kavrayamamaktadır. Böyle bir durum söz konusuysa üretilen bir kompozit malzemeye yük uygulandığında takviye bileşenleri matris malzemesinden hızlı bir şekilde ayrılacaktır. Bu durumda kompozit malzeme uygulanan yüke karşı direnç gösteremeyecektir [2].

Kompozit malzemeler matris malzemesine ve takviye şekline göre farklı başlıklar altında sınıflandırılabilir. Takviye fazının şekline göre whisker veya kısa fiber takviyeli kompozitler, tabakalı veya sürekli fiber takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.1’de takviye elemanı şekline göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.1. Takviye elemanı şekline göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması  
a) Kısa fiber takviyeli, b) Sürekli fiber takviyeli, c) Partikül takviyeli [3].

Matris malzemesine göre kompozitler polimer matris, seramik matris ve metal matris olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

## 2.1. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimerler, bir çok molekülün kimyasal bağlarla düzenli olacak şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimer malzemelerinin mekanik özellikleri, yapı malzemesi olarak kullanmak için uygun değildir. Bu sebeple polimer malzemelerin özelliklerini iyileştirme ihtiyacı doğmuştur. Polimer matrisli kompozitler (PMK) ise, matris fazı olarak polimer reçinenin takviye elemanı olarak da çoğunlukla sürekli fiberlerin kullanıldığı kompozitler olarak tanımlanabilir. Matris malzemesi termoplastik, termoset ya da elastomer olabilmektedir. En çok tercih edilen ve en ucuz polimer matris reçineleri vinil ester ve polyesterlerdir. Polimerlerde farklı reçine formülasyonları, kompozit malzemenin çok geniş aralıkta ve istenilen performansta üretilmesini olağan kılmıştır. Bu matrislerle en çok kullanılan takviyeler aramid, elyaf cam ve karbondur [4]. PMK'ler çok düşük sıcaklıklarda üretildiğinden sadece bazı özel polimerler 250 °C'nin üstünde kullanılabilmekte fakat 350 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarında kullanımlarına imkân tanımamaktadır [5]. Polimer malzemelerin, hammadeleri seramik ve metallere göre daha ucuzdur, ayrıca polimer malzemelerin ergime sıcaklıkları düşük olduğundan harcanan enerji de azdır bu iki temel sebep düşük üretim maliyeti sağlarken, karmaşık ve büyük parçaların kolay imal

edilmeleri gibi avantajları ile kompozit malzemeler arasında en çok uygulama çeşitliliğine ve miktarına sahiptir [4]. Kullanım alanlarına inşaat, elektrik-elektronik, denizcilik, havacılık ve otomotiv sektörü örnek gösterilebilmektedir.

## **2.2. SERAMİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER**

Seramikler, metal veya yarı metallerin metal olmayan elementlerle yaptıkları inorganik bileşiklerdir. Kuvvetli iyonik ya da kovalent bağa sahip oldukları için oldukça kararlıdır. Bu durum gevrek, çok sert ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalarını sağlar. Yüksek sıcaklık ve mukavemete dayanabilen malzemelere duyulan gereksinim arttığı için seramik matrisli fiber takviyeli kompozitlere duyulan ilgi de artmıştır. Seramik matrisli kompozitler (SMK),  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , SiC gibi seramik matris üzerine seramik ya da metal parçacık takviyesiyle oluşan yüksek mukavemete ve ısı dayanıma sahip malzemeler olarak tanımlanabilir [6]. 1970'li yıllarda gerçekleşen çalışmalarda kırılgan nitelikteki bir malzemenin yüksek mukavemete sahip bir fiber ile takviye edilmesi sonucunda kırılma tokluğunda yükselme görülmüştür. İlk zamanlar karbon fiberler ile cam ve cam-seramik malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların sonucunda camlar karbon fiberlerle takviye edildiklerinde tokluk değerinde dikkate değer bir artış göstermesinin yanı sıra kırılma enerjileri 1000, kırılma gerinimlerinin ise 10 kat arttığı gözlenmiştir. Son zamanlarda farklı kimyasal bileşimlerle üretilen seramik fiberler sayesinde değişik kimyasal kompozisyon ve kombinasyonlarda seramik matrisli kompozitler üretilmiştir. Üstün özelliklerinden dolayı SMK'ler savaş uçakları, füze başlıkları, zırhlı araçlar ve savunma sanayisinde gerekli araç gereçlerin yapımında kullanılmaktadır [2].

## **2.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER**

Metaller oda sıcaklığında katı durumda olan kristal yapılardır. Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda çalışabilecek ve daha yüksek mukavemet özelliklerindeki malzemelere duyulan ihtiyaç sebebiyle 1960'lı yıllarda günümüzde önemli bir yere sahip olan metal matrisli kompozit malzemeler geliştirilmiştir [7]. Metal matrisli kompozitler (MMK), sünek bir metalin mekanik özelliklerini geliştirmek için sert, güçlü ve kırılgan takviye malzemesinin, metalin

içerisine farklı yöntemlerle yerleştirilmesiyle üretilen malzemeler olarak tanımlanabilir [8]. Matris malzemesi olarak başta alüminyum olmak üzere, magnezyum, titanyum, nikel, bakır yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle takviye malzemesi olarak da  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , SiC, TiC ve AlN kullanılır. Bu takviyeler dışında karbon ve silisyum gibi elementsel malzemeler de takviye olarak kullanılabilir. Endüstri de en çok tercih edilen metal matris kompozit sistemleri çizelge 2.1 'de verilmiştir [9].

Çizelge 2.1. Endüstri de kullanılan metal matris kompozit sistemleri [9].

| <b>Takviye</b>                      | <b>Matrisler</b> |
|-------------------------------------|------------------|
| Boron Lifi                          | Al, Ti           |
| Grafit Lifi                         | Al, Mg, Cu       |
| Alümina Lifi                        | Al, Mg           |
| Silisyum Karbür Lifi                | Al, Ti           |
| Silisyum Karbür Kedi Bıyığı         | Al, Ti           |
| Silisyum Karbür ve Alümina Parçacık | Al, Mg, Ti       |

Metal matrisli kompozitlerin önemli avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar [7];

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek mukavemet,
- Yüksek elastikiyet modülü,
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Yüksek elektriksel ve termal iletkenlik,
- Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına düşük hassasiyet,
- Sıcaklık değişikliklerine ya da ısıl şoklara karşı düşük hassasiyet.

MMK'ler sağladığı bu avantajlar ile birçok kullanım alanına sahiptir. Aşınma direnci, ağırlıktan tasarruf, sertlik ve mukavemetlerinden dolayı yüksek dayanım elde edilmesi gibi özellikleri ile otomotiv sektöründe kullanılmaları için tercih sebebi olmuştur. Dizel pistonlarının üretiminde alışlagelmiş nikel alaşımlı dökme demir malzeme

yerine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerden yararlanılmaktadır. Bu durum, çalışma ömrünü  $150 \times 10^6$  saatten  $1000 \times 10^6$  saate yükseltmiştir.

Havacılıkta düşük yoğunluk ve ısı genleşme, yüksek ısı iletkenlik, sertlik ve mukavemetleri ile sağladığı avantajlardan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; US Trident Roketi'nde, hafif ancak toksik olan berilyum parçalar Al/SiC kompozit malzemelerle değiştirilmiştir.



## BÖLÜM 3

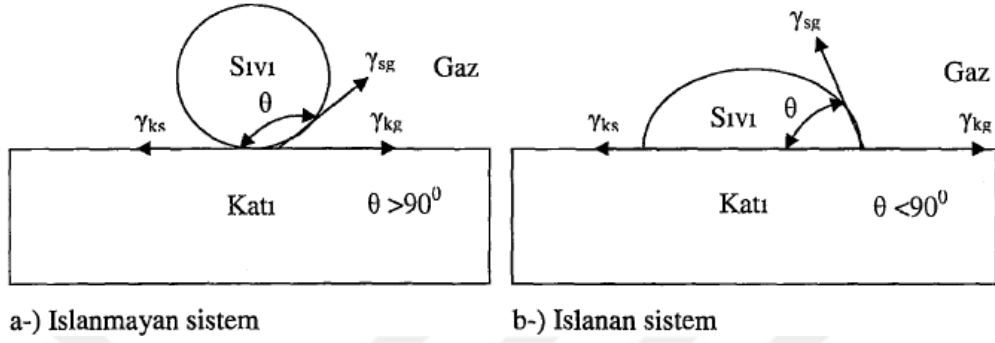
### METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Son zamanlarda teknolojik gelişmeler sonucu endüstride meydana gelen gelişmeler üstün özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda bilimadamları yeni ve nitelikli malzeme üretimi için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Yapılan bu çalışmalarda yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet ve düşük ısı genleşme gibi birçok avantajı sebebi ile metal matrisli kompozitler ön plana çıkmaktadır. MMK'ler üretilirken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar arasında üretim yöntemi, matris malzemesinin ve takviye malzemesinin seçimleri yer almaktadır. Bu bölüm içerisinde üretim yöntemleri, matris malzemeleri ve takviye malzemeleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

#### 3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER İÇİN MATRİS MALZEMELERİ

Matris, yapısal gerilimleri, takviye bileşenlerine iletebilmek için iyi derecede mukavemet ve sünekliğe sahip olmalıdır. Bu sebeptendir ki kompozit malzemelerin üstün özellikler sergileyebilmeleri için kompoziti oluşturan fazların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin uyumlu olması gerekmektedir. Bileşenlerin fiziksel uyumlulukları ısı genleşme ve gerilim ile bağlantılıdır. Kimyasal uyumlulukları ise, arayüzey bağı, arayüzdeki kimyasal reaksiyonlar ve ergiyen matris malzemesinin ıslatma özelliği ile ilgilidir. Seramik fazın sıvı metal tarafından iyi ıslatılamaması durumunda fazlar arasında bağ oluşumu oldukça güçtür. Seramik malzemelerin kovalent ve iyonik bağa, metal malzemelerin ise metalik bağa sahip olmalarından dolayı seramiklerin çoğu sıvı metal aracılığıyla iyi ıslatılamazlar. Katı bir fazın sıvı bir faz tarafından ıslatılması, iki faz arasındaki temas açısı ifade edilir. Metalin matris malzemesini ıslatması, arayüzey bağ mukavemetinin sıvının yüzey gerilimini yenmesiyle oluşur. Şekil 3.1'deki gibi temas açısı  $\theta$  ile gösterilebilir. Kusursuz bir ıslanma için  $\theta$ 'nın sıfır olması yani yüzeyin tamamını kaplaması gerekmektedir. İyi bir

ıslanma için  $\theta < 90^\circ$  olması, sıvı-katı arayüzey enerjisinin düşük olması ve sıvı metal yüzey geriliminin düşük olması gerekmektedir.  $\theta$ 'nın  $180^\circ$  olması durumunda ıslatma gerçekleşmez [11].



Şekil 3.1. Temas açısını ve arayüzey enerjilerini gösteren sıvı damlacığı yöntemine göre ıslatma durumunun şematik gösterimi [11].

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında MMK'ler de matris malzemesi olarak magnezyum, titanyum, bakır ve alüminyum yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Magnezyum  $1,7 \text{ g/cm}^3$  'lük düşük yoğunluğa sahipken, çeliğin yoğunluğu  $7,8 \text{ g/cm}^3$ , alüminyumun yoğunluğu ise  $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu durum da magnezyumun ağırlık olarak demirden %78, alüminyumdan ise %36 daha hafif olmasını sağlar. Magnezyum ve alaşımları hafif konstrüksiyonlar için önem arz eden malzemeler arasında yer almaktadır. Magnezyum matrisli kompozitler, ticari saflıktaki magnezyum ve alaşımlarından daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu için bu malzemelerin geniş kullanım alanına ulaşmasını sağlamıştır. Magnezyumun düşük elastite modülü ve yükselen sıcaklıkla dayanımının düşmesi kullanımını olumsuz etkilerken,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{SiC}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  gibi çeşitli partiküllerin takviyesi ile bu özellikler düzeltilmektedir [12]. Magnezyum matrisli kompozitlere bakıldığında, bilhassa ağırlık tasarrufuna ihtiyaç duyulan havacılık ve otomotiv sektöründe tercih sebebi olmaktadır [13].

Titanyumun yoğunluğu  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , ergime derecesi  $1672^\circ\text{C}$  ve elastise modülü  $115 \text{ GPA}$ 'dır. Titanyum ve titanyum alaşımları, düşük yoğunluklu, yüksek ergime dereceli, yüksek mukavemetli, çok iyi korozyon direncine sahip genellikle mekanik özellikleri

iyi olan malzemeler olarak tanınmaktadırlar. Titanyum alaşımlarının sahip oldukları sertliği, düşük aşınma direnci ve düşük akma dayanımı kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Bu dezavantajların ortadan kaldırılmasında titanyum matrisli kompozit malzemelerin tercih edildiği görülmektedir [14]. Titanyum ve titanyum alaşımlarının yaygın olarak, biyomalzemeler, otomotiv, uzay ve savunma sanayisinde kullanımı bulunmaktadır.

Bakır, gümüşten sonra en iyi iletken metal olarak bilinir. Gümüş ile karşılaştırıldığında daha kolay şekillendirilebilir olması, daha düşük maliyetli olması ve yüksek korozyon direncine sahip olması elektrik iletim malzemesi olarak kullanımını yaygınlaştırmıştır. Saf bakırın yaklaşık 100 °C da yeniden kristalleşme sebebiyle mukavemet ve sertliğinde hızlı bir şekilde azalma meydana gelmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi için daha iyi mekanik özellikler sergilemeli ayrıca bu yüksek sıcaklıklarda mukavemetini ve elektriksel özelliklerini muhafaza etmelidir. Bu olumsuz durumları ortadan kaldırmak için bilimadamları bakıra çeşitli takviyeler ekleyerek yüksek çalışma sıcaklıklarında mukavemetini ve elektriksel özelliklerini artırma konusu üzerine çalışmışlardır. Bakır ve alaşımlarının kullanımlarının %75'i iletkenliğinden dolayı olup elektrik santralleri, otomotiv, gemi ve makina parçalarında oldukça fazla tercih edildiği bilinmektedir [15].

Alüminyumun, doğada oksit cevheri formunda var olduğu bilinmektedir. Dünyada en fazla bulunan elementlerden biri olup yerkürenin %8'ini kaplamaktadır. Ayrıca demir ve çelikten sonra dünyada en çok kullanıma sahip olan metaldir. Alüminyumun 2,7 g/cm<sup>3</sup>'lük düşük yoğunluğu hafif bir metal olmasına imkan tanımıştır. Üstünde oluşan oksit tabakası ise iyi derecede korozyon direncine sahip olmasını sağlamıştır. Ayrıca yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekillendirilebilmesi ve geri dönüşümün kolay olması sağladığı diğer avantajlarıdır. Saf alüminyum oksijene karşı olan hassasiyetinden dolayı iyi bir döküm özelliği sergileyememekle birlikte ayrıca düşük çekme mukavemeti başta olmak üzere mekanik özelliklerinin kötü olduğu için alaşımlama yapılarak olumsuz durumlarının ortadan kaldırılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Saf alüminyum çekme mukavemeti 49 Mpa'ken alaşımlandırıldığında 700 Mpa'a çıkmaktadır [16]. Alüminyumun detaylı özellikleri Çizelge 3.1'de ele alınmıştır.

Çizelge 3.1. Alüminyumun özellikleri [17].

| Özellikler              | Alüminyum                |
|-------------------------|--------------------------|
| Kristal Kafes Yapısı    | YMK                      |
| Yoğunluk                | 2,7 g/cm <sup>3</sup>    |
| Ergime Sıcaklığı        | 660 °C                   |
| Özgül Isısı             | 930 J/KgK                |
| Isıl İletkenliği        | 235 W/mK                 |
| Isıl Genleşme Katsayısı | 23,1µm/m.K               |
| Elektrik Direnci        | 26,50 nΩ.m (20 °C’de)    |
| Elastise Modülü         | 6,7x10 n/mm <sup>2</sup> |
| Max. Çekme Mukavemeti   | 65                       |

İşlenmiş alüminyum ve alüminyum alaşımları için dünya çapında en çok tercih edilen simgeleme dizisi, Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından oluşturulmuştur. Bu gösterime göre dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu ifade etmektedir. Çizelge 3.2’de bu simgeleme dizisi gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Alüminyum alaşımlarının simgeleme dizisi [16].

| Simge | Temel Alaşım Elementi |
|-------|-----------------------|
| 1xxx  | ----                  |
| 2xxx  | Bakır (Cu)            |
| 3xxx  | Mangan (Mn)           |
| 4xxx  | Silis (Si)            |
| 5xxx  | Magnezyum (Mg)        |
| 6xxx  | Magnezyum+Silis       |
| 7xxx  | Çinko (Zn)            |
| 8xxx  | Diğer elementler      |
| 9xxx  | Kullanılmayan dizi    |

Alüminyum ve alüminyum alaşımları üstün özellikler elde etmek için en yaygın kullanılan metal matrislerden biridir. Bu sebeple inşaat, ulaşım, ambalaj, elektrik elektronik ve mühendislik dallarında kullanılmaktadır.

### 3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER İÇİN TAKVİYE ELEMANLARI

Takviye elemanları matris malzemesi ile uyum içinde olmalı ve matris malzemesi tarafından kolay ıslatılabilmelidir. Kompozit malzemelerde takviye malzemesinin temel görevi yükü taşıyarak matris elemanının dayanımının artış göstermesini sağlamaktır. Metal matrisli kompozitlerde çoğunlukla seramik esaslı takviye elemanları tercih edilmektedir [18]. Takviye malzemesi olarak seramik malzemelerinin tercih edilmesinin temel sebepleri arasında aşağıdaki özellikler gösterilmektedir [19].

- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık
- Yüksek sertlik
- Yüksek kimyasal kararlılık
- Yüksek çekme ve basma dayanımı
- Yüksek oksitlenme direnci
- Düşük yoğunluk
- Düşük sürtünme katsayısı
- Ham maddelerinin bol ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması
- Aşınma ve erozyona karşı dayanıklılık

Metal matrisli kompozitlerde  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ ,  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $TiC$ , Grafen en çok kullanılan takviye elemanlarıdır.

Alümina, oksit malzemelerden biridir. Farklı formları olan alüminanın  $\alpha-Al_2O_3$  ticari kullanım alanına sahip olan formudur. Alüminanın ilk ticari kullanım alanı buji ve laboratuvar malzemeleridir. Ergime derecesi yaklaşık  $2000 \pm 30$  °C olan alüminyum oksit düşük sıcaklıklarda kimyasallara ve mekanik uygulamalara karşı dayanımı oldukça yüksek olan bir malzemedir. Alüminanın oksitleyici ve indirgeyici bir ortamda 1900 °C' ye kadar kullanımı mümkündür. Alüminyum oksitten, yoğun ve

oldukça gözenekli ürünler elde edilir. Gözenekli ürünler çoğunlukla ergimiş alüminadan yapılır ve bu ürünler 1900 °C' ye kadar çıkan, yüksek sıcaklık fırınlarında astar malzemesi olarak kullanılır. Fazlasıyla ince toz boyutuna sahip, tamamen saf alüminanın, Sol-Jel yöntemi olarak adlandırılan imalat metodu ile üretimi gerçekleştirilmektedir. Alümina ürünler enjeksiyon kalıbı, soğuk ve sıcak pres, slip-döküm ve ekstrüzyonla şekillendirilebilir. Kullanım alanlarına bakılırsa yüksek sıcaklık fırınlarında, kesici takımlarda, zırh yapımında, yatak malzemesinde, protez ve implantlar da kullanılmaktadır [20].

Bor karbür, elmas ve bor nitrürden sonra Mohs sertlik skalasında bilinen sertliği en yüksek olan üçüncü malzemedir.  $B_4C$ , kovalent bağa sahip olan, darbe dayanımı, nötron soğurması, sürünme direnci gerektiren uygulamalar için üstün özellikler gösteren bir seramik yapıdır.  $2,5 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğundan dolayı oldukça hafif ve 2500 °C gibi yüksek ergime derecesine sahip olan bir takviyedir. Düşük yoğunluklu olması kompozitin ağırlığını yükseltmeden mekanik özelliklerini iyileştirmede kullanılmasını sağlamaktadır.  $B_4C$ 'nin yüksek sertliğe sahip olması kompozitin ekstrüzyon yapabilme kabiliyetinin sınırlandırılmasına sebep olduğundan  $B_4C$ 'ün en önemli dezavantajı olarak gösterilebilir. Bir diğer dezavantajı ise gevrek kırılmaya karşı  $B_4C$ 'ün aşırı hassasiyete sahip olmasıdır [21]. Rulman yataklarında, kumlama makinalarının ve su jeti kesicilerinin nozüllerinde, nükleer kontrol çubukları, radyasyondan koruyucu kalkanlarda, balistik zırh uygulamalarında oldukça fazla kullanım alanına sahiptir [22].

Silisyum dioksit, tabiatta kum ve kuvars formlarında yer almaktadır. Oksijen ve silisyum dünyada en fazla bulunan elementlerdendir. Bu elementler bir araya gelerek silikayı oluşturur. Silika, en çok mineral kuvars formunda bulunurken aynı zamanda kristobolit ve tridimit olmak üzere 3 ana kristal şeklinde yer alır. Bu cevherler sıcaklığa ve kimyasal etkilere karşı oldukça dayanıklıdır. Kuvars, saf silisyum dioksit kristallerine verilen isimdir. Doğada kristal ya da amorf şeklinde yer almaktadır. İçinde bulunan yabancı maddelerin türüne ve miktarına göre, renkli, yarı saydam veya saydam olarak görülebilmektedir. Kullanım alanlarına döküm, cam, seramik, plastik, kimya ve inşaat uygulamaları gösterilebilir. Kristobalit, silikanın yüksek sıcaklıktaki bir poliformudur.  $SiO_2$ 'nin kalsine edilmesiyle oluşan oldukça yüksek saflıkta ve

beyazlıkta inert ürünlere denir. Kullanım alanlarına boyalar, plastikler, hassas dökümlerde dolgu maddesi olmaları gösterilebilmektedir [23].

Silisyum karbürün, en belirgin özellikleri yüksek sertliğe ve aşındırıcılığa sahip olmasıdır. Ayrıca yüksek aşınma direnci, yüksek ısıl şok mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı, iyi seviyede ısıl genleşme ve iletkenlik katsayısı gibi nitelikli özellikleri bulunmaktadır. Silisyum karbür olarak bilinen ve doğada direkt bulunmayan SiC Acheson adı verilen proses ile “3.1.” no’lu eşitlikte belirtilen tepkime sonucunda elde edilir.



Silisyum karbürün saflık derecesi, elde edilen SiC’in renginde değişikliğe sebep olmaktadır. Saflık; 99,8’ün üzerinde olursa açık yeşil, % 99’da koyu yeşil, % 98,5’un altında olursa siyah rengini almaktadır. SiC, matris elemanına sağladığı oldukça iyi fiziksel ve mekanik özellikleri sebebiyle, alüminyum ve alüminyum alaşımlı MMK malzemelerin imalatında çok tercih edilen seramik bir takviye malzemesidir. Gaz tribünlerinde ve aşınmaya maruz kalan otomobil parçalarında kullanımı söz konusudur [24].

Titanyum karbür, IV. grup elementi olan titanyuma karbonun arayer atomu olarak yerleşmesiyle meydana gelmektedir. TiC diğer IV. grup karbürlerinde olduğu gibi düşük karbon/titanyum atomik yarıçap oranına sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda hacim merkezli kübik ve düşük sıcaklıklarda hekzagonal sıkı paket olan titanyum yapı içerisine karbonlar girdiğinde yüzey merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Titanyum karbür, metalik, iyonik ve kovalent bağlar içermektedir. Metalik bağa sahip olduğu için yüksek derecede elektrik iletkenliğine ve yüksek derecede termal iletkenliğe sahiptir. Kovalent bağa sahip olması titanyum karbürün yüksek bağ enerjisi, yüksek sertlik, ve yüksek ergime derecesine sahip olmasını sağlamaktadır. İyonik bağa sahip olması ise yüksek elektron enerji seviyesine çıkmasını imkan tanımıştır. Kullanım alanlarına kesme ve freze aletleri, bilya ve rulman kaplamaları, uzay araçlarında vakum altında katı veya sıvı yağlayıcı olarak kullanılması örnek gösterilebilir [25].

Grafen, iki boyutta  $sp^2$  hibritleşmesi ile balpeteği görünümünde bir kristal yapıya sahip olan sıradışı malzemedir. 2004 senesinde ilk kez üretilmiş olup bilinen en hafif ve en ince malzeme olmasına karşın, çelikten daha kuvvetli ve elmaştan daha sağlam bir yapıya sahiptir. İki boyutlu olan grafen katmanları üst üste olacak şekilde dizildiğinde grafiti oluşturmaktadır [26]. Grafenin kendine has termal, elektronik ve mekanik özellikleri, kompozit malzemelerin imalatında önemli bir yere sahip olmasını sağlamıştır. Grafen takviyesinin diğer kompozitlere göre oldukça az miktarda olması ve grafenin sahip olduğu bu sıra dışı özellikler en önemli tercih nedenlerindendir. Grafenin, son dönemlerdeki kullanım alanlarına bakıldığında, yüksek yağlayıcılığa sahip olduğu için sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan bir malzeme olarak tercih edildiği görülmektedir [27]. Çizelge 3.3’de grafene ait özellikler gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Grafenin özellikleri [26].

| ÖZELLİKLER           | GRAFEN                 |
|----------------------|------------------------|
| Kristal Kafes Yapısı | Hekzagonal             |
| Gerçek Yoğunluk      | 2,25 g/cm <sup>3</sup> |
| Tabaka Sayısı        | Tek                    |
| Boyut                | İki                    |
| Hibrit Şekli         | $sp^2$                 |
| Saflık Derecesi      | %99                    |
| Kalınlık             | ~1-2 nm                |
| Termal İletkenliği   | 4840-5300 W/mK         |
| Elastise Modülü      | ~1 TPa                 |

### 3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal matrisli kompozit malzemeler, tradisyonel imalat yöntemleri ile kolaylıkla elde edilemediğinden kompozit malzemelerin özelliklerini optimize etmek için farklı imalat yöntemleri geliştirilmiştir [28]. İmalat yöntemlerinin seçiminde etkili olan faktörler aşağıdaki gibidir;

- Takviyenin ve matris malzemesinin türü,

- Takviye malzemesini deformasyona uğratmadan matris malzemesine ilave edilip uygunluğun sağlanması,
- Takviye elemanın matris içerisinde homojen dağılması,
- Matris malzemesi ve takviyenin arasında sağlam bir bağ oluşumunun gerçekleşmesi,
- Kompoziti oluşturan malzemelerin kendi özelliklerini maksimum seviyede bulundurması,
- İmalatın ekonomik olması [29].

Metal matisli kompozit malzeme üretim yöntemleri imalat sırasındaki matris malzemesinin sıcaklığına bağlı olarak beş temel grupta sınıflandırılmaktadır [30].

- Sıvı faz üretim yöntemleri
- Katı faz üretim yöntemleri
- Biriktirme yöntemleri
- Çift-faz üretim yöntemleri
- In-Situ üretim yöntemi

### 3.3.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

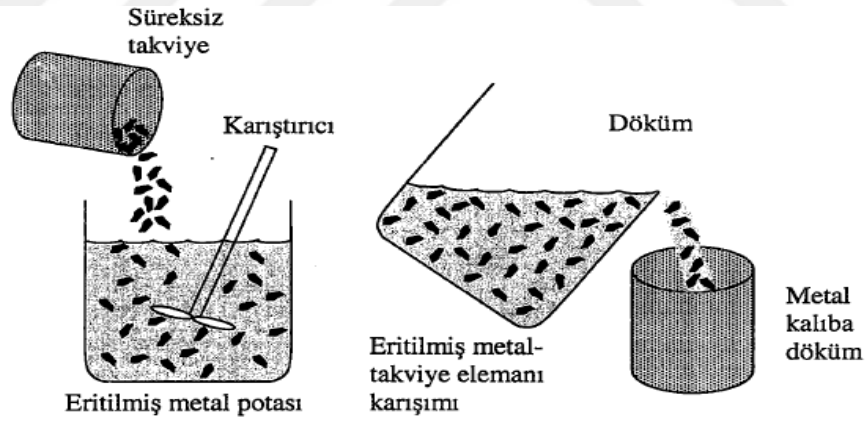
Sıvı faz üretim yöntemleri, üretimin sıvı fazda gerçekleştiği imalat methodlarına denir. Kompozit üretiminde nitelikli mekanik özelliklerin olması için takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında iyi bir bağ kurulması gerekir. Takviye malzemesinin kaplanması ile ıslatabilme kabiliyeti arttırılabilir. Doğru yapılan bir kaplama arayüzey enerjisini düşmesini sağlarken takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında oluşabilecek kimyasal etkileşimleri önler [30]. Sıvı faz üretim yöntemleri, ucuz ve basit olması, çeşitli metal matris elamanları ve takviye elemanları için uygun olması, son şekle yakın üretim yapılması, kompleks parçaların üretim kolaylığı gibi oldukça fazla avantajı olduğu için tercih edilen üretim yöntemleri arasında yer almaktadır [11]. Sıvı faz üretim yöntemlerini kendi içerisinde beş temel grupta incelemek mümkündür.

Bu yöntemler aşağıdaki gibidir;

- Karıştırırmalı döküm,
- Sıkıştırırmalı döküm,
- Santrifüj döküm,
- Basıncsız infiltrasyon,
- Basıncılı infiltrasyon,

### 3.3.1.1. Karıştırırmalı Döküm

Karıştırırmalı döküm, sıvı matrisin mekanik olarak karıştırılması ve takviye elemanının eriyik metale ilave edilmesi temeline dayanır. Bu yöntem, daha çok partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin imalatında tercih edilirken whisker veya kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerin imalatında da kullanılabilen bir yöntemdir [11]. Şekil 3.2’de karıştırırmalı dökümün aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.

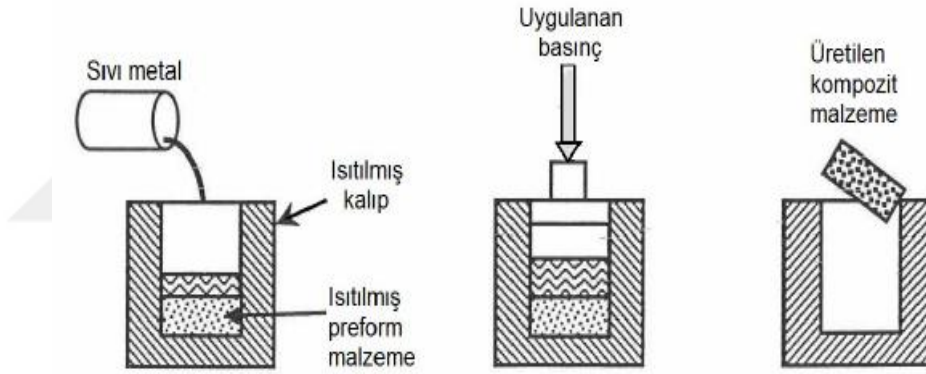


Şekil 3.2. Karıştırma döküm tekniğinin üretim aşamaları [11].

Bu üretim methodunda homojen dağılmış bir yapı elde edilirken, malzemede gözenek ve boşluklar sık rastlanan sorunlardır. Üretim esnasında yapılan karıştırma işlemi atmosfere açık ortamda yapıldığından ergimiş metalin atmosferden gaz almasına neden olduğu için, karıştırmanın koruyucu gaz ya da vakum altında yapılması tavsiye edilmektedir. Ucuz ve basit bir yöntem olduğu bilinmesine rağmen araştırmalara göre, topaklanma, ara yüzey reaksiyonlarının oluşumu, karıştırma sırasında takviye elemanının zarar görmesi gibi olumsuzlukların meydana geldiği görülmüştür [18].

### 3.3.1.2. Sıkıştırılmalı Döküm

Sıkıştırılmalı döküm yönteminde partikül veya fiber formda hazırlanmış preformun üstüne yüksek basınç yardımıyla sıvı metalin katılaştırma işlemi gerçekleştirilmektedir [30]. Bu yöntemde yüksek basınç ve katılaşmaya bağlı oluşan malzemelerde gaz boşlukları, gözenek ve çekme gibi döküm hataları minimum seviyede görülmektedir. Yüksek basınç gerektirmesi ve parça boyutunda sınırlamalara neden olması bu yöntemin en büyük dezavantajı olmakla birlikte bu yöntem, zamandan tasarruf ederek karmaşık şekilli metal matrisli kompozit malzeme imalatı için en verimli yöntemlerden biridir. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi, yüksek hassasiyetli mühendislik parçalarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Şekil 3.3’de sıkıştırılmalı dökümün aşamaları şematik olarak gösterilmiştir [18].



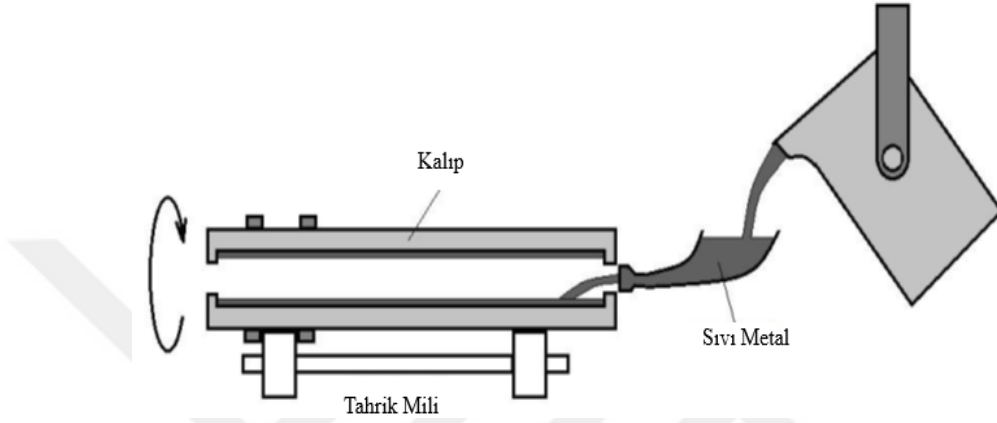
Şekil 3.3. Sıkıştırılmalı döküm tekniğinin üretim aşamaları [18].

### 3.3.1.3. Santrifüj Döküm

Santrifüj döküm yönteminde takviye malzemesinin en uygun yerleşimi döküm sırasında santrifüj kuvveti tarafından uyarılması vasıtasıyla yapılmaktadır [29]. Bu yöntem ile genellikle içi boş silindirler ve boruların imalatı yapılmaktadır. Bu durumun temel sebebi merkezde maçıya gerek olmadığından et kalınlığının sıvı metal hacmi ile ayarlanabilmesi ve dökülen sıvı metalin büyük çoğunluğu oluşturulacak parça için kullanılabilmesidir [31]. Bu döküm yöntemi ile imal edilen parçalar silindir şekilleri ile sınırlı kalmamaktadır. Farklı santrifüj döküm yöntemleri ile değişik şekillerin üretimine imkan tanımaktadır. Bu yöntemler, yatay gerçek santrifüj döküm, dikey

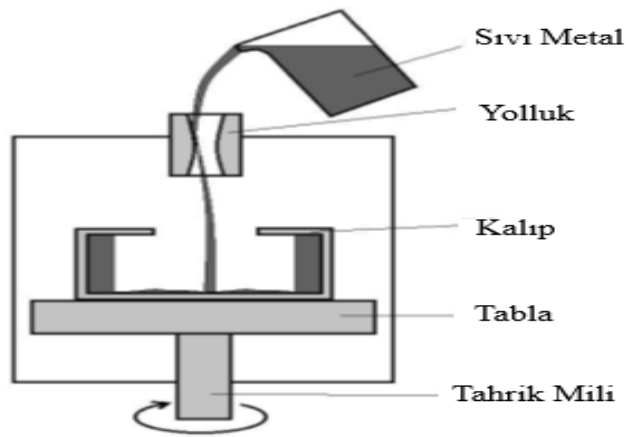
gerçek santrifüj döküm, yarı santrifüj döküm, santrifüj döküm olmak üzere dört temel grupta sınıflandırılabilir [32].

Yatay gerçek santrifüj döküm yöntemi, santrifüj ile üretimin başlangıcı sayılmaktadır. Boyu çapına göre büyük olan silindirik malzemelerin üretiminde kullanılır [32].



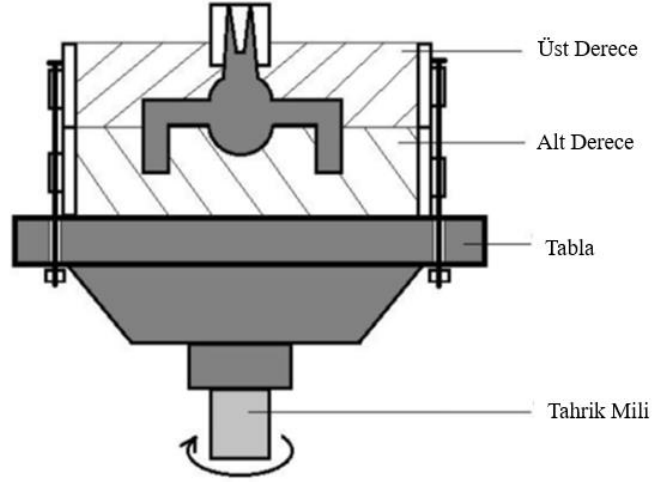
Şekil 3.4. Yatay gerçek santrifüj döküm yönteminin şematik gösterimi [32].

Dikey gerçek santrifüj döküm yönteminde, dönme eksenini dikey olan imal edilecek malzemenin çapı boyundan çok daha büyük olabilen üretimlerin yapılması söz konusudur. Çalışma prosesi yatay gerçek santrifüj döküm ile paraleldir [32].



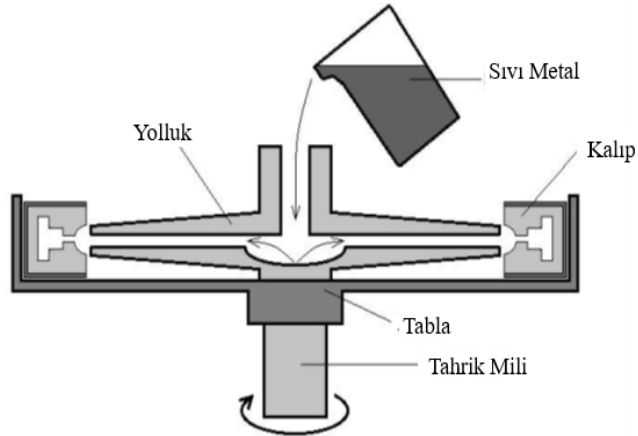
Şekil 3.5. Dikey gerçek santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi [32].

Yarı santrifüj döküm yönteminde, üretilecek parça dönme eksenine göre simetrik olmalıdır. Elverişli kalıp dizaynı ile kompleks şekilli malzemelerin üretimine imkan tanımaktadır [32].



Şekil 3.6. Yarı santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi [32].

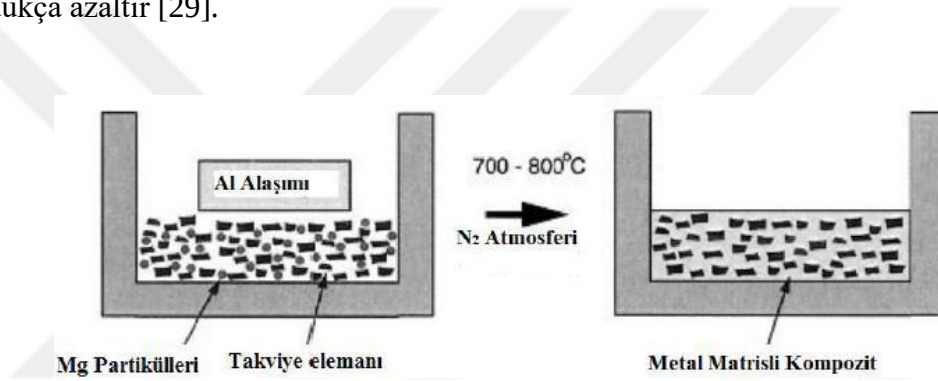
Santrifüj döküm yöntemi, söz konusu yöntemler içinde en gelişmiş olan tekniktir. Bu yöntemde imalatın gerçekleştirileceği makinenin ebatları ile sınırlandırılan kalıp boyutları dışında üretilecek malzemenin şeklinde herhangi bir sınırlama yoktur [32].



Şekil 3.7. Santrifüj döküm tekniğinin şematik gösterimi [32].

#### 3.3.1.4. Basıncsız İnfiltrasyon

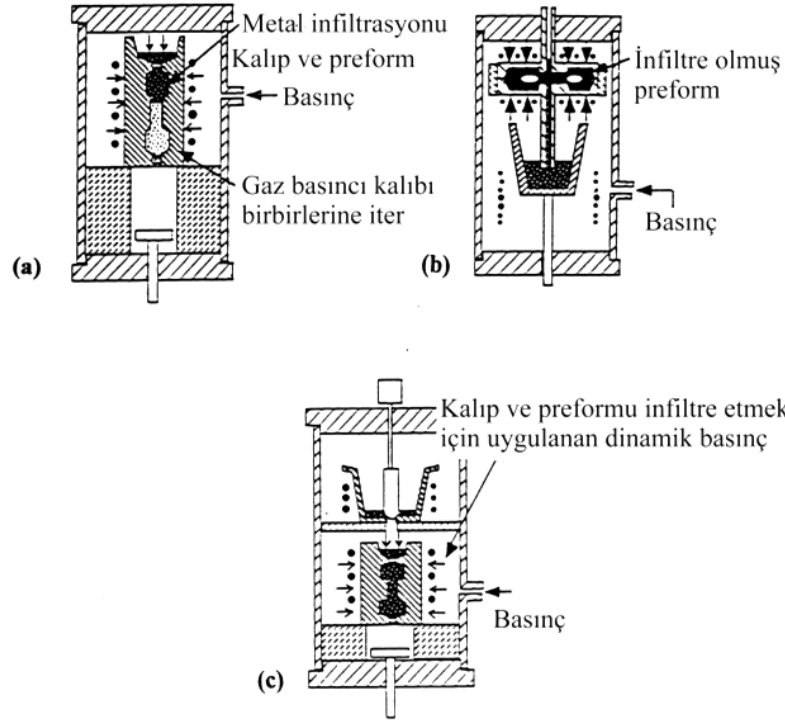
Basıncsız infiltrasyon yöntemi ya da lanxide yöntemi olarak da bilinen bu üretim methodunda ergimiş metal, parçacık takviye içerisine herhangi bir basınç uygulanmadan kendiliğinden infiltre olmaktadır. Bu yöntemde sıvı matrise magnezyum ilavesi ve azot atmosferi infiltrasyonun daha kolay gerçekleşmesine imkân tanımaktadır. Magnezyum, sıvı alüminyumun seramik parçacıkları ıslatmasını artırarak infiltrasyona yardımcı olur [33 ve 34]. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi saf alüminyum kullanıldığında Al-Mg gibi alaşımlar oluşturabilmek için Mg partikülleri takviye partiküllerinin içerisine yerleştirilir. N<sub>2</sub> atmosferi ise arayüzey reaksiyonlarını oldukça azaltır [29].



Şekil 3.8. Basıncsız infiltrasyon yöntemi [29].

#### 3.3.1.5 Basıncılı İnfiltrasyon

Basıncılı infiltrasyon yönteminde, sıvı halde olan matris malzemesi ön şekillendirilmiş blok ya da preformun içerisine inert bir gaz ile sağlanan basınç aracılığıyla iletilerek kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmektedir [21]. Bu yöntem basıncsız infiltrasyon yöntemi ile karşılaştırıldığında daha kısa sürede infiltrasyonun tamamlanmasını sağlamasının yanı sıra seramik partikülleri sıvı metali ıslatamaması gibi sorunları ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle basıncılı infiltrasyon yöntemi uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir [35]. Sıvı metal ve preform arasında tam olarak ıslatmanın gerçekleşmediği durumlarda dış basınca ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı metale inert gaz basıncı üstten ve alttan olacak şekilde uygulanarak üretimin gerçekleştiği Şekil 3.9’da gösterilmektedir [29].



Şekil 3.9. Basınçlı infiltrasyon prosesleri için a) Üstten doldurma, b) Alttan doldurma, c) Üstten döküm yöntemlerinin şematik gösterimi [29].

Trandisyonel döküm yöntemleri ile karşılaştırıldığında basınçlı infiltrasyon yöntemi yüksek maliyetli olması dezavantaj oluştururken aynı zamanda oldukça fazla avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar aşağıdaki gibidir [35];

- Hızlı bir üretim yöntemi olması
- Son şekle yakın imalat sağlaması
- Katı faz üretim methotlarına göre daha düşük maliyetli olması
- Uygulanan basınç, infiltrasyonun hızlanmasına sebep olduğu için kısa imalat süresi sağlamaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda infiltrasyon imkanı sağladığından matris ve takviye malzemesi arasındaki kimyasal etkileşimi minimuma indirmektedir.
- Yüksek takviyeli kompozit malzemelerin imalatında topaklanma ve porozite gibi mekanik davranışları etkileyebilecek olan sorunların azalmasını sağlamaktadır.

İnfiltrasyon işlemini etkileyen unsurlar dört temel başlıkta toplanabilmektedir [29].

Bu unsunlar;

- Partikül (ortalama çapı, boyut dağılımı, şekli ve hacim oranı),
- Sıvı metal (bileşimi, yüzey gerilimi ve viskozitesi),
- Sıvı/katı arayüzeyi (arayüzey reaksiyonları, temas açısı vb.),
- Deney şartları (uygulanan basınç, sabit basınç altında geçen süre ve infiltrasyonun ortamı)

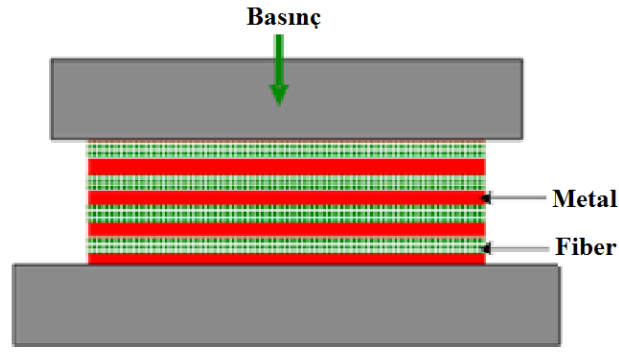
### 3.3.2. Katı Faz Üretim Yöntemleri

Katı faz üretim yöntemleri, matris malzemesinin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp matris ile takviye metalinin katı faz halinde birbirine difüzyonu olarak tanımlanmaktadır. En çok tercih edilen yöntemler olarak iki başlık altında bu yöntemleri incelemek mümkündür. Bu yöntemler;

- Difüzyonla bağlama
- Toz metalurjisi yöntemi

#### 3.3.2.1. Difüzyonla Bağlanma

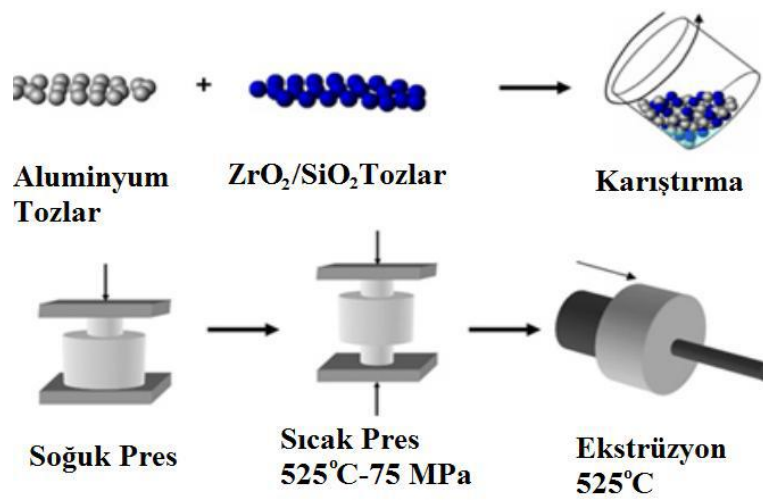
Difüzyonla bağlanma yöntemi, aynı ya da farklı temiz yüzeye sahip metallerin yüksek sıcaklıkta atomlar arası difüzyonudur. Bu yöntem, çok farklı metal matrislerin kullanımına imkan tanınması, fiber yönünün ayarlanması ve takviye oranının belirlenmesi gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Uygulama sıcaklığının yüksekliği ve uzun süren uygulama süresi ise difüzyonla bağlanma yöntemin sınırlarını oluşturmaktadır [30]. Difüzyonla bağlama yöntemi Şekil 3.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Difüzyonla bağlanma [30].

### 3.3.2.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi, en çok tercih edilen kompozit malzeme üretim yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Bu yöntem, toz halindeki matris ve takviye malzemeleri harmanlanıp daha sonra sıcak veya soğuk pres yardımıyla preslendikten sonra sinterleme aşamalarını kapsamaktadır. İlk etap da homojen olacak şekilde matris ve takviye tozları karıştırılır ve mekanik alaşımla yapılır. Daha sonra %80 oranında yoğun ham ürünün üretilmesi için soğuk presleme yapılır. Son aşamada ise tam yoğun kompozit imalatı sinterleme işlemi ile gerçekleştirilir. İmalattan sonra arzu edilen özelliklere göre ekstrüzyon gibi metalurjik uygulamalar yapılabilmektedir [30]. Şekil 3.11’de toz metalurjisi yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Toz metalurjisi yöntemi şematik gösterimi [30].

### **3.3.3. Biriktirme Yöntemleri**

Biriktirme yöntemleri, kompozit malzemeyi oluşturmak için takviyelerin matris malzemesi ile kaplanması ve yapısal şeklini elde etmek için difüzyon bağlama işlemidir. Elektro kaplama, daldırılmalı kaplama, kimyasal buhar biriktirme, sprey biriktirme, sprey şekillendirme ve fiziksel buhar biriktirme gibi oldukça fazla biriktirme yöntemi bulunmaktadır [30].

### **3.3.4. Çift-Faz Üretim Yöntemleri**

Çift fazlı üretim yöntemlerinden olan yarı-katı döküm ve o-sprey biriktirme tekniklerinde seramik ve faz diyagramında katı - sıvı fazın bir arada bulunduğu bölgede yeralan matris elemanının karıştırılmasıdır [30].

### **3.3.5. In-Situ Üretim Yöntemi**

In – situ üretim yönteminde, malzeme içerisinde farklı fazların oluşturulması ve bu fazlardan birinin veya bazılarının matris, bazılarında takviye elemanı olarak davranması ile kompozit imalatı gerçekleştirilir. Bu adımlar için farklı birkaç teknik kullanılır [36].

- Ötektiklerin yönlü katılaşdırılması
- Tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonu
- Ekzotermik reaksiyon işlemi

## BÖLÜM 4

### ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

#### 4.1. MEKANİK ÖZELLİKLER

Kompozit malzeme, makro seviyede birbirinden farklı özellikler taşıyan iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan yeni malzemeye denir. Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye olarak 2 temel bileşen mevcuttur. Genellikle matris bileşeni kompozite tokluk ve süneklik sağlarken, dayanımlarını sert ve gevrek olan takviye bileşenleri tarafından kazandırılır. Kompozitlerin deformasyonunda ana mekanizma matristen takviyeye yük geçişinin sağlanabilmesidir. Daha sağlam bir bağlanma daha iyi bir yük geçişi sağlayacak bu da mekanik özelliklerinin gelişmesine imkan tanıyacaktır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine oldukça fazla araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda genel olarak imalat yöntemleri, matris ve takviyelerin cinsi, miktarı ve takviyelerin matris bağlantısı gibi değişkenler ele alınmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda matris malzemesi olarak genellikle Al, Mg, Cu, Fe, Ti elementleri ve alaşımları tercih edilmiştir. Bu matrisler içerisinde alüminyum ve alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğu, üretim kolaylığı, kolay şekillendirilebilirliği ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri ile daha çok tercih edilmiştir. Alüminyum matrisli partikül takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri hakkındaki araştırmalar aşağıda ele alınmıştır.

WenshuYang ve arkadaşları, Al 5083 alaşımına ağırlıkça %3 oranında grafen oksit ve grafen nano partiküller ilave edilen ve basınçlı infiltrasyon tekniği ile üretilen kompozitin mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimleri üzerine çalışmıştır. Alüminyum ile grafen nanopartiküllerin reaksiyona girerek  $Al_4C_3$  fazını meydana getirmediği ancak grafen oksit ile reaksiyonunda çok az miktarda meydana geldiğini belirlemişlerdir. Mikroyapı incelemesinde ise malzemede alaşım elementi olarak bulunan Mg'nin matristen ayrılarak grafen nanopartikül yüzeylerinde toplandığını

gözlemlemişlerdir. Mekanik açıdan ele alındığında Al 5083 alaşımının maksimum kopma dayanımı grafen nanopartikül ilavesi ile %14 oranında artarken akma dayanımını her iki takviyenin de minimum düzeyde etkilediğini tespit etmişlerdir. [37].

İbrahim ve arkadaşları, saf Al ve AA 6063 alüminyum alaşımına %15 oranında B<sub>4</sub>C partikülleri takviye ederek matris bileşeninin üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üstündeki etkilerini görmek için iki farklı matris bileşeni ile çalışmışlardır. Matrise düşük miktarlarda Zr, Ti ve Sc takviye etmişlerdir. Yapılan deneylerin sonucunda bileşimlerin tamamında alüminyum matrisli kompozit malzemelerin AA6063 serisi alüminyum alaşımlı kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında darbe tokluğunun daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. AA6063 alüminyum matrisli kompozit malzemelerde tokluğun imalat sırasında ve ısıtılma işleminden hemen sonra oluşan fazlar tarafından kontrol altına alındığını, Mg<sub>2</sub>Si fazının Al<sub>3</sub>Zr ve Al<sub>3</sub>Sc fazlarına göre daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [38].

Wenshu Yang ve arkadaşları, Al-20Si matrisli grafen nanoflake takviyeli kompozitleri basınçlı infiltrasyon tekniği kullanarak imal edip bu konu üzerinde çalışmışlardır. Diğer üretim yöntemlerindeki ıslatabilirlik sorunu ve yüksek oranda intermetalik bileşik meydana getirdikleri için bu imalat yöntemini tercih etmişlerdir. Al-20Si matrisini ise Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> bileşiğinin oluşumunu engellemek amacıyla seçtiklerini belirtmişlerdir. Deney sonuçlarına göre matris malzemesi ile takviye malzemesinin arasındaki bağlanmanın intermetalik bileşik oluşmadan meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Gerilme mukavemeti ve eğilme mukavemetinin en yüksek, ağırlıkça %1,5 grafen nanoflake eklenmesinden sonra sırasıyla %130 ve %230 arttığını belirlemişlerdir. Bu deneydeki sonuçları önceki yıllarda yapılmış olan incelemelerle karşılaştırarak alüminyumun mekanik özelliklerini geliştirmek için tercih edilebilecek en iyi takviyenin grafen olduğunu ifade etmişlerdir [37].

Mahmut Can ve arkadaşları, tarafından toz metalürjisi yoluyla alüminyum matrise ağırlıkça %0-30 arasında değişen oranlarda SiC katkısı yapılmış olup takviye oranının mekanik özelliklere etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. İmalatı gerçekleştirilen kompozitlerin karakterizasyon çalışmalarında SiC partiküllerin homojen şekilde

dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca testler sonucunda üretilen saf alüminyumun sertliği 30 HV ve basma dayanımı 112 MPa ölçülmüşken, ağırlıkça %30 SiC takviyesi ile sertliği 79 HV'ye ve basma dayanımı 221 MPa çıktığı belirlenmiştir. Bu durumda SiC takviyesinin kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirici olarak katkı yaptığı görülmüştür [39].

Hakan ve arkadaşları, AA 2014 alüminyum alaşımı ve B<sub>4</sub>C-SiC seramik parçacık takviyeli hibrit metal matrisli kompozit malzemeleri toz metalurjisi tekniği ile imalatı ve mekanik özellikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. %5, %10, %15 B<sub>4</sub>C, %5, %10, %15 SiC ve %10-%10 B<sub>4</sub>C-SiC takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Matris ve takviye tozlarının karışımları, argon atmosferinde, tek yönlü 700 MPa altında preslenerek 600 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca sinterlenmiştir. B<sub>4</sub>C ve SiC takviyelerinin hacim oranı arttıkça matris yapısının homojen bir şekilde dağıldığı mikro yapı incelemelerinde görülmüştür. AA 2014 alüminyum alaşımına göre, SiC ve B<sub>4</sub>C takviye miktarına bağlı olarak sertlik değerinin attığı belirlenmiştir. B<sub>4</sub>C-SiC birlikte içeren hibrit kompozit malzemelerde, %15 B<sub>4</sub>C ve %15 SiC içeren tek seramik faz takviyesine göre mikro sertlik değerinin azalış gösterdiği belirlenmiştir [40].

Qiyao Hu ve arkadaşları, vakum destekli yüksek basınçlı döküm (HPDC) tekniği ile A356-SiC ve AA6061-SiC kompozit malzemelerin imalatını gerçekleştirmişlerdir. SiC partiküllerinin kompozit içerisindeki dağılımını, partikül-matris arayüzey arasındaki etkileşimini, mevcut olan gözeneklerin 3D karakteristiklerini ve kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde çalışmışlar ve bu kompozit malzemeleri gravite kalıplama (GDC) ile hazırlanan kompozit malzemeler ile karşılaştırılmışlardır. HPDC tekniği ile üretilen kompozitlerde, matris malzemesinde bulunan takviye miktarına bağlı olarak kalıp dolum sırasında meydana gelen yüksek sıvı kesme etkisi ile SiC takviyelerinin homojen dağılım gösterdiği, gözeneklerin hacmi küçülme gösterirken küreselleştiği, boyutlarının ise azaldığı tespit edilmiştir. A356-SiC kompozitin gerilme mukavemeti 286 MPa ve uzaması %4,3 iken, AA6061-SiC kompozitlerin ise gerilme mukavemeti 246 MPa ve uzaması %6,1 olduğu tespit edilmiştir. Her iki özelliğin de grafit kalıplama ile üretilen kompozitlere göre önemli derecede geliştirilmiş olduğunu belirlemişlerdir [41].

Muharrem, Al 7075 matris malzemesine SiC, B<sub>4</sub>C ve TiB<sub>2</sub> takviye elemanlarını sırası ile %5, %10 ve %20 oranlarında toz metalurjisi yöntemi kullanarak imalatını gerçekleştirip takviye oranlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi üzerinde çalışmıştır. Bütün kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri optik mikroskop aracılığıyla alınmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre, %94,5 ile en yüksek yoğunluk, 1418 N ile kırılma dayanımı ve 0,164 g ile en düşük aşınma miktarı SiC takviyeli kompozit numunelerde olduğu gözlemlenirken, 72,14 HBW ile en yüksek sertlik ölçümü TiB<sub>2</sub> takviyeli kompozit numunelerde görülmüştür. Mekanik özellikleri etkileyen en temel unsurların, takviye oranlarının artma miktarına göre yükselen gözenek miktarları olduğu saptanmıştır [42].

Abdollahi ve arkadaşları, atomizasyon yöntemi ile üretilen 60 µm tane boyutuna sahip Al2024 alüminyum alaşımı ve ortalama 20 µm tane boyutuna sahip B<sub>4</sub>C parçacıkları atritör değirmen aracılığıyla ürettikleri kompozit malzemelere ekstrüzyon işlemi tatbik etmişler ve bunun üzerinde çalışmalar yapmışlar. Deney sonuçlarına göre B<sub>4</sub>C ilavesinin dayanımı yükselttiği fakat sünekliği düşürdüğünü saptamışlardır. B<sub>4</sub>C partiküllerinin bariyer vazifesi görerek dislokasyon hareketlerini sınırlandırdığını belirlemişlerdir. B<sub>4</sub>C ilavesi ile dayanımında meydana gelen bu artış Orowan pekleşme mekanizması ile tanımlanmıştır [43].

Krasnowski ve arkadaşları, mekanik alaşımlama methoduyla FeAl matrise %50, %30 ve %10 TiC ilave edilmiş karışım tozlarını, sıcak presleme tekniğiyle birleştirilmiş ve TiC takviyeli nanokompozitler üretilip bu kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu tozlara 1000°C sıcaklıkta ve 7.7 GPa basınçta presleme işlemi uygulanmıştır. Presleme işlemi sırasında basıncın ve sıcaklığın yüksek değerlerde tane büyümesine engel olduğu tespit edilmiştir. Serlik değerlerine bakıldığında TiC takviye oranına bağlı olarak 1363 ve 1608 HV0.2 değerleri arasında yükseldiği belirlenmiştir. Kompozit numunelerin yoğunluğu olması gereken değere %100 olarak ulaşmış ve gözeneklilik sıfır olarak belirlenmiştir [44].

Sinan, grafen nanolevhaların AlSi10Mg alaşımına ilavesinin mekanik özellikler üzerine etkisini belirlemek için çalışmalar yapmıştır. Yarı-katı mekanik karıştırma ile grafen nanolevhaların sıvı alüminyum alaşımına geçişi sağlanırken matris içerisindeki

dağılımı ultrasonik proses ile sağlanmıştır. Yüksek yoğunluktaki ultrasonik dalgalar ile grafen nanolevhaların aglomere olmasını engelleyerek matris içinde kısmi olarak homojen dağıldığı ve matris-grafen nanolevhaların arasında iyi derecede tutunma yüzeyi elde edilmiştir. Çekme deneylerinde, ağırlıkça %0.25 grafen nanolevhaların takviyesinin alaşımın mukavemetini oldukça fazla arttırdığı belirlenmiştir. Grafen nanolevhaların dislokasyonların ilerlemesinde bariyer görevi görmesinden dolayı mukavemette iyileşme meydana gelmiştir [45].

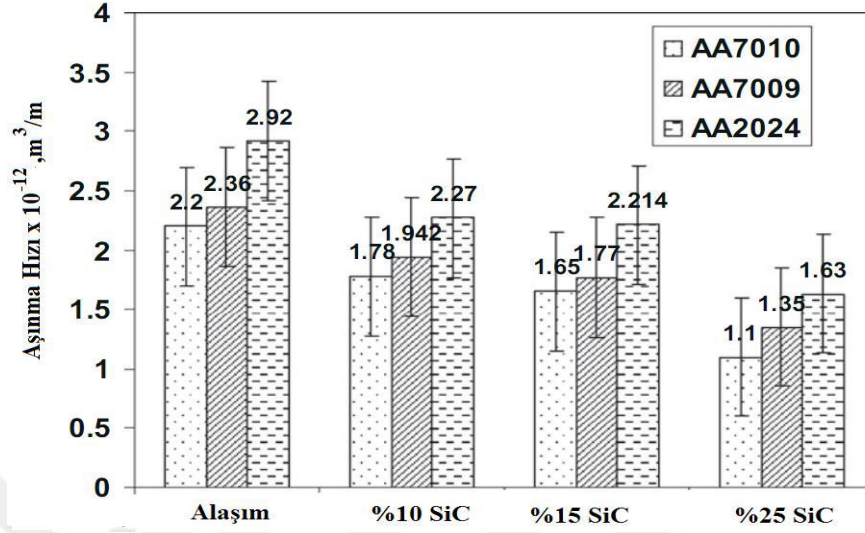
#### 4.2. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER

Alüminyum matrisli kompozitler genellikle saf alüminyum ve alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek aşınma direnci gösterirken yüksek aşınma yükleri veya yüksek porozite gibi sorunlar nedeni ile matrise yakın veya daha yüksek oranda aşınma hızı gösterebilmektedirler. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin aşınma hızı takviye şekline, boyutuna, tipine, yönüne, hacim oranına ve matris elemanına direkt olarak bağlıyken sıcaklık, yük, kayma hızı, kayma mesafesi ve karşı malzemenin türü gibi parametrelerde aşınma hızı üzerinde etkilidir. Bu bölümde alüminyum matrisli kompozit malzemelerin aşınma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

Das ve arkadaşları, Al-%4.5 Cu alaşımını %15 oranında farklı tane boyutuna sahip alümina ve zirkon partiküller ile takviyelendirdikleri kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Alümina partiküller ile zirkon partiküller karşılaştırıldığında alümina partiküllerin matris ile daha sağlam bir bağlanma gerçekleştirdiğini bu durumda aşınma dayanımlarını olumlu yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Küçük partiküllerin daha keskin uçlara sahip olduğunu ve karşı malzeme olarak SiC zımparadaki SiC tozlarını kopardığı için partikül boyutunun azalmasına sebep olduğu için aşınma hızının düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir [46].

Rao ve Das, yapmış oldukları çalışmada AA7010-AA7009-AA2024 olmak üzere alüminyum alaşımlarına farklı oranlarda SiC ilave etmişlerdir. En düşük aşınma hızını AA7010 serisi alüminyum matrisli kompozitlerde görüldüğünü tespit etmişlerdir. Bu durumun nedeni ise AA7010 alaşımında diğer alaşımlara göre daha çok

intermetaliklerin meydana geldiğini ve en yüksek sertliğin ve aşınma dayanımının elde edildiğini belirlemişlerdir. Şekil 4.1’de kütle kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı matris elemanlarına sahip Al kompozitlerin kütle kaybı [47].

Ahlatçı ve arkadaşları, %1-2-4-8 oranlarında silisyumu saf alüminyum matrise ilave etmişler ve elde edilen matris alaşımlarına %60 oranında SiC takviyelendirip bu kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. %1 Si ilavesinde aşınma dayanımında artışa yol açtığı gözlemlenirken bu orandan sonra düşüşe neden olduğu belirlemişlerdir. Si ilavesi %1 oranına kadar kompozitin dayanımında artış sağlarken %1’den sonra ise iğnesel silisyumun matrisin tokluğunu düşürdüğünden dolayı gevrekleşmeye neden olduğunu saptamışlardır [48].

Haitao Chi ve arkadaşları, alüminyum matrisli TiB<sub>2</sub> takviyeli kompozitleri basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen bu kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını belirlemek için bir takım çalışmaları yapmışlar. Sabit ve hareketli stage ile ball-on-disk geometrili çelik aşındırıcılardan yararlanılarak 1 N ve 3 N yüklerinde malzeme yüzeyinin aşındırılması sağlanmıştır. Konfokal lazer tarama mikroskobu (CLSM) aracılığıyla aşınan malzeme yüzeylerin üç boyutlu topoğrafyası ve ortalama yüzey pürüzlülükleri belirlenmiştir. 1 N yük uygulamasında sürtünme katsayısı 0,16 ölçülmüş olup oldukça düşük kabul edilebilecek bu sonucun nedeni olarak borik asit ve transfer filmi oluşumunu göstermişlerdir. 3 N yük altında ise abrasif aşınmanın baskın olduğu, TiB<sub>2</sub> partiküllerin yüzeylerden ayrılırken oyuklar oluşturduğunu ve

bunun bir sonucu olarak sürtünme katsayısının arttığını tespit etmişlerdir. Sabit stage ile gerçekleştirilen testlerde 0,6 olarak tespit ettikleri sürtünme katsayısının, üç boyutlu abrasif ve oksidatif aşınma kaynaklı olduğunu saptamışlardır. Nihai olarak, üç boyutlu yüzey topoğrafyası, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısı arasında paralel olduğu tespit edilmiştir [49].

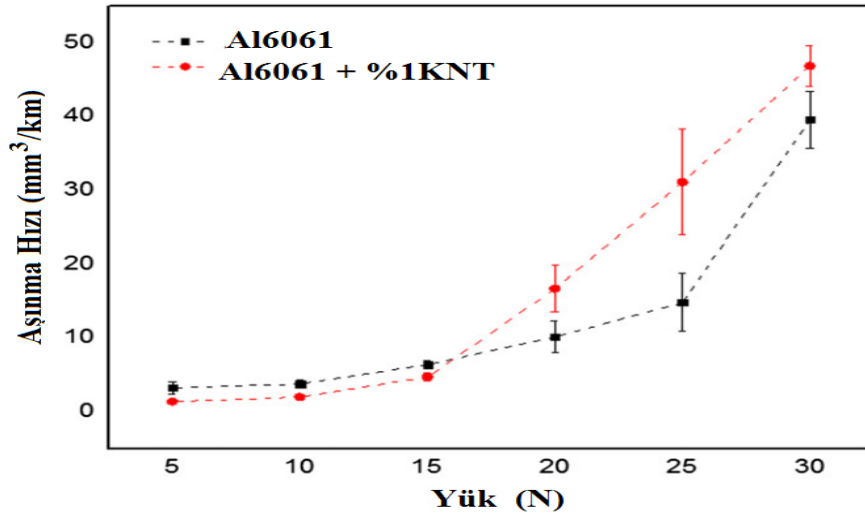
Şahin ve arkadaşları, SiCp takviyeli Al esaslı kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile imalatını gerçekleştirip bu kompozitler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. SiCp takviye oranları ağırlıkça %5, %10, %15, %20 olarak ilave edilmiştir. Elde edilen karışımlar, 500 MPa ve 350 MPa basınç altında preslenerek ve argon gazı atmosferinde 600 °C 30 dakika sinterlendikten sonra kompozitlerin imalatını gerçekleştirmişlerdir. Aşınma testleri pim-on-disk sisteminde uygulanmış olup karşı aşındırıcı olarak 600 nolu SiC zımpara tercih edilmiştir. Sonuçlara göre presleme basıncı ve takviye oranının artışının kompozitlerin aşınma direncini iyi yönde etkilediğini belirlemişlerdir [50].

İnci ve Savaş, AlB<sub>2</sub> takviyeli metal matrisli kompozitlerin farklı test koşulları altında abrasif aşınma davranışlarını araştırmışlardır. İmalatı gerçekleştirilen kompozit malzemelere aşınma testleri uygulanırken Taguchi deneysel yönteminden yararlanılmıştır. Aşınma testleri için matris tipi, takviye oranı, aşındırıcı zımpara tipi, yük ve kayma hızı faktörleri ele alınmış ve deney reçeteleri L8 (25) ortogonal serisi baz alınarak hazırlanmıştır. Sonuç olarak, aşındırıcı zımpara cinsinin aşınma üzerinde etkisi en fazla olan faktör olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan yük ile aşınma miktarlarının yükseldiği ve matrise ilave edilen AlB<sub>2</sub> parçacıklarının artışıyla birlikte aşınma miktarının düştüğü tespit edilmiştir [51].

Halil, alüminyum matrisli  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilen takviye elemanı oranının kompozitin aşınma davranışını nasıl etkilediğini belirlemek için çalışmalar yapmıştır. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> içeren toz karışımlar 500 MPa basınçta preslenerek 10 mm çapında ve 15 mm boyunda blok numunelerin imalatı sağlanmıştır. Bu numunelerin 650 °C sıcaklıkta, atmosfer kontrollü fırında, 2 saat boyunca sinterlemesi yapılmıştır. Yoğunluk ve sertlik deneyinden sonra pin-on-disk yöntemiyle kuru kayma aşınma

testleri uygulanmıştır. 1,41 m/s kayma hızı ve 2000 m mesafede 5 N, 10 N ve 15 N olmak üzere farklı yüklerde aşındırma testleri yinelenmiştir. Sonuçlara göre aynı şartlarda imalatı yapılan matris malzemesine kıyasla farklı oranlarda  $\alpha\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozitlerin daha iyi aşınma direnci gösterdiği saptanmıştır. En yüksek aşınma direnci ve sertliğin % 15  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  içeren kompozit malzemedeki görüldüğü tespit edilmiştir [52].

Al-Qutub ve arkadaşları, Al6061 matrise %1 oranında karbon nanotüp takviye edip bu kompozitin aşınma karakteristiği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Pin-on-disc aşınma testleri farklı yüklerde yapılmış olup 5-15 N gibi düşük yükler altında kompozit malzeme yüksek aşınma dayanımı gösterirken, 15-20 N gibi yüksek yüklerde matrisin daha da yüksek aşınma dayanımı sergilediğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak, Al6061 alüminyum alaşımlarında 25 N'da düşük bir aşınma davranışı gözlenirken 30 N'da aşınma hızını oldukça yükseldiğini tespit etmişlerdir. Kompozit malzemelerde ise 15 N'dan sonra şiddetli aşınma karakteristiğinin meydana geldiği bu durumun nedeni olarak ise alüminyum-karbon nanotüp kompozitlerin yapısında bulunan porozitelerden ve takviyenin toplanmasından dolayı olduğunu saptamışlardır. Şekil 4.2'de kompozitin aşınma hızına ait görüntü mevcuttur [53].



Şekil 4.2. Al6061 ve Al6061 + %1 KNT takviyeli kompozitin aşınma hızı [53].

Hasan ve Ferhat, Al matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitleri toz metalurjisi tekniğiyle üretip kompozitlerin kuru kayma Őartlarındaki aşınma karakteristliklerini araştırmışlardır. 25 m boyutundaki Al ve B<sub>4</sub>C tozları karıŐtırıcı içerisinde 2 saat boyunca karıŐtırılmıŐtır. Bu karıŐımın 700 MPa basınçta preslenmesinden sonra silindirik kompozit numunelerin imalatı gerekleŐtirilmiŐtır. Preslenen numunelere 570  C sıcaklıkta atmosferere açık ortamda 12 saat boyunca sinterleme işlemi yapılmıştır. Üretilen bu numuneler üzerinde sertlik ölçümü, mikroyapı incelemesi ve abrasif aşınma deneyleri yapılmıştır. Abrasif aşınma testleri, 180 ve 400 Mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zımpara ile 10 N ve 20 N yüklerinde 0,2 m s<sup>-1</sup> kayma hızında uygulanmıştır. Sonuçlara göre, sertlik B<sub>4</sub>C takviyesi ile orantılı olarak artış göstermiştir. % 10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit en yüksek aşınma direncini gösterirken, % 20 B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozit en yüksek sertlik değerine ulaŐmıŐtır [54].

Harun ve Sabri, sıkıŐtırma döküm tekniğiyle imalatı gerçekleştirilen %50 SiC partikül takviyeli döküm halindeki ve yaŐlandırılmıŐ formdaki 2618 alüminyum matrisli kompozit malzemenin kuru kayma aşınma davranışlarını incelemek üzere çalışmalar yapmışlardır. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri darbe deneyleri ve sertlik ölçümleri aracılığıyla tespit edilmiştir. Yapısında %50 SiC bulunduran 2618 alüminyum matrisli kompozitin sertliği yaŐlandırma işleminden dolayı %5 artış gösterirken darbe direnci ise takribi %12 azalış göstermiştir. İleri-geri aşınma deneyleri 0,02 m/s ve 0,09 m/s olacak Şekilde iki farklı kayma hızında, 1.5-6.0 N yük aralığında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilyanın sürtünmesi ile gerekleŐtirilmiŐtır. Bu deney sonunda, SiC ile takviye edilmiş 2618 alüminyum matrisli kompozitin döküm formu ile karŐılaŐtırıldıklarında, yaŐlandırma ısıl işlemi ile aşınma direncinin düşük test yüklerinde ve yüksek kayma hızlarında stabil kaldığı fakat yüksek test yüklerinde ve düşük kayma hızlarında ise artış gösterdiği saptanmıştır [55].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, mikro boyuttaki B<sub>4</sub>C seramik takviyenin yüzeyine %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında homojen dağılım sağlanacak şekilde grafen katkılama işlemi yapılmıştır. Bu işlemin hemen ardından farklı oranlarda grafen içeren B<sub>4</sub>C partikülleri, 7 mm çapındaki paslanmaz tüplerin içerisinde hacimce %50 oranında preform olarak hazırlanmıştır. Sonrasında %50 AA1050 matris basınçlı infiltrasyon tekniği kullanılarak preform üzerine infiltre edilmiştir. Çizelge 5.1’de imalatı gerçekleştirilen kompozit numunelerin hacimce bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. İmalatı gerçekleştirilen numunelerin hacimce bileşimleri.

| Kompozitler | Hacimce Bileşim (%) |      |        |
|-------------|---------------------|------|--------|
|             | B <sub>4</sub> C    | GNP  | AA1050 |
| N1          | 50                  | 0    | 50     |
| N2          | 49,75               | 0,25 | 50     |
| N3          | 49,50               | 0,50 | 50     |
| N4          | 49                  | 1    | 50     |

Üretilen 4 farklı kompozit malzemenin ilk olarak mikroyapı karakterizasyonu ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise kompozit malzemeler üzerinde sertlik, basma, aşınma incelemeleri yapılmıştır.

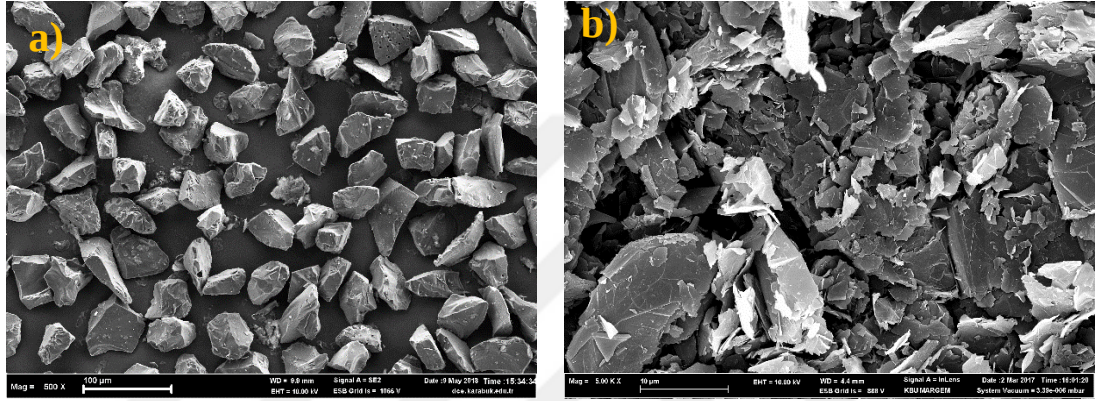
#### 5.1. DENEYSEL MALZEMELER

Matris elemanı olarak kullandığımız AA1050 kimyasal bileşimi çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Matris elemanın kimyasal bileşimi.

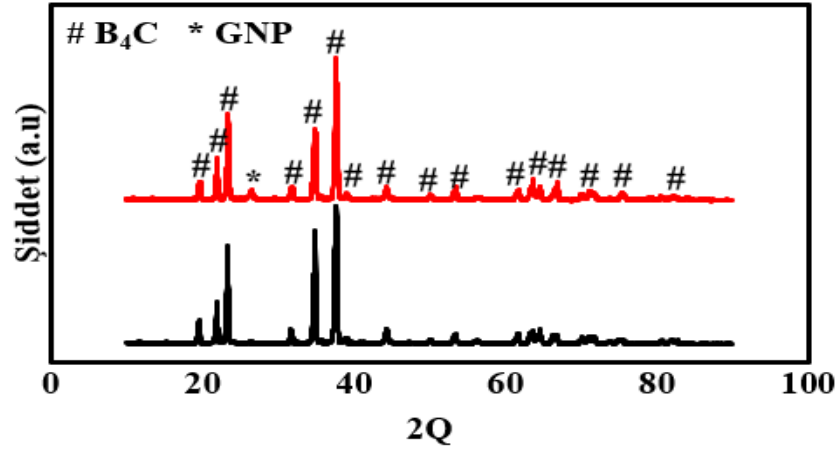
| Matris | Pb  | Mg    | Al     | Zn    | Cu    | Fe    | Mn  | Ni  | Si    | Sn  | Ti    |
|--------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-------|
| AA1050 | 0,1 | 0,002 | 99,588 | 0,011 | 0,011 | 0,215 | --- | --- | 0,116 | --- | 0,020 |

Kompozit imalatında kullanılan  $B_4C$  partikülleri ortalama 48 mikron tane boyutundadır. Takviyelerin SEM görüntüleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kullanılan takviyelerin a)  $B_4C$  partikülleri, b) Grafen nanopartikülleri SEM görüntüleri.

Şekil 5.2’de vakum destilasyon yöntemiyle %1 oranında grafen ilave edilen ve herhangi bir grafen ilavesinde bulunmayan  $B_4C$  partiküllerine ait XRD analizi yer almaktadır.  $B_4C$  partiküllerine yapılan XRD analizlerinde yapının tamamı  $B_4C$  den oluştuğu ve herhangi bir empürite içermediği tespit edilmiştir. %1 grafen içeren takviye elemanına yapılan analiz sonucunda 26 gözlemlediğimiz pikin grafenin (002) düzlemine ait olduğu söylenebilir [56].



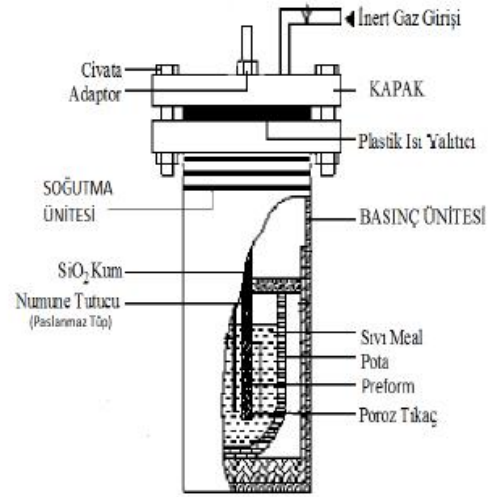
Şekil 5.2. %1 grafen içeren nanopartiküllerin ve B<sub>4</sub>C partiküllerinin XRD analizi.

## 5.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Şekil 5.3’de gösterilen basınçlı infiltrasyon ünitesinde kompozit malzemelerin imalatı gerçekleştirilmiştir. İnfiltrasyon ünitesi 230 mm boyuna, 70 mm çapına sahiptir. Malzemenin üretiminde 10 mm dış çapında, 7 mm iç çapında ve 400 mm boyunda 316 L paslanmaz tüpler kullanılmıştır. %85 poroziteye sahip olan alümina filtre ile paslanmaz tüpün ucu örtülmüştür. Paslanmaz tüplerin içerisi Ø7x45 mm uzunluğunda preformlar elle vibrasyon sağlanarak doldurulmuştur. Üretimin aşamasında preformların homojenliğinin bozulmaması için preformun üstü alümina filtre ile örtülmüştür ve tüp içinde boş kalan kısım silis kumu ile doldurulmuştur. Alüminyum matris potanın içerisine yerleştirildikten sonra infiltrasyon düzeneği elektrik resistanslı fırın içerisine koyulup düzeneğin kapağı kapatılmıştır. Gereken infiltrasyon basıncının sağlanabilmesi için ünite ile kapak arasına plastik conta yerleştirilmiştir. İnfiltrasyon düzeneği hazırlandıktan sonra AA1050 matrisin ergimesinin sağlanması için 750 °C’ye çıkarılmış ve ergimenin tamamının gerçekleşmesi için bu sıcaklıkta 1,5 saat tutulmuştur. İnfiltrasyon düzeneği içerisinde inert gaz ortamının sağlanabilmesi için üretim süresince argon gazı kullanılmıştır. Hazırlanan preformlar pota içinde bulunan ergimiş metalin içerisine daldırılarak 8 bar infiltrasyon basıncı altında, 2 dakika boyunca argon gazı uygulanmış olup ardından argon gazı infiltrasyon ünitesinden serbest bırakılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.3. Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan infiltrasyon ünitesine ait a) Makro ve b) Şematik görünüm.

Oda sıcaklığına ulaşan paslanmaz tüplerin yüzeyleri torna ile temizlenmiş ve kompozit malzemeler elde edilmiştir. Şekil 5.4’de üretilen kompozitlere ait makro fotoğraflar gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Üretilen alüminyum matrisli kompozit malzeme.

### 5.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

Mikroyapı karakterizasyonu, EDS donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X ışınları kırınımı (XRD) kullanılarak yapılmıştır.

#### 5.3.1. Metalografik İncelemeler

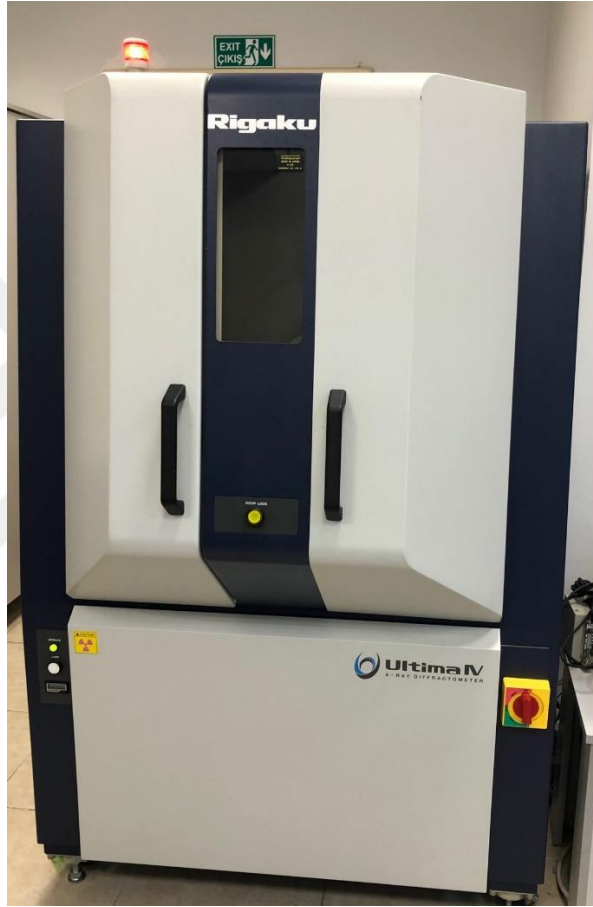
Mikroyapı incelemelerinde kullanılmak için imalatı gerçekleştirilen kompozit numuneler elmas diskli kesme cihazı ile istenilen boyutlarda kesildikten sonra Stuers markalı cihaz ile sıcak bakalite alma işlemi yapılmıştır. Struers marka olan otomatik zımparalama-parlatma cihazında sırası ile kabadan inceye (240-2000 mesh SiC) zımpara işlemi yapılmış olup ardından 3  $\mu\text{m}$  ve 0,3  $\mu\text{m}$  alümina ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kompozit numunelerin mikroyapı incelemeleri EDS donanımlı Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’de SEM cihazının görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.5. SEM cihazının görüntüsü.

### 5.3.2. XRD İncelemeleri

Hazırlanan kompozit numunelerin analizleri Rigaku Ultra IV marka XRD cihazı, 40 kv jeneratör gerilimi, 30 mA akım ile 20°-90° aralığında ve 0,02 adım tarama boyutlu 2 derece/dk. hızda kullanılarak veriler elde edilmiştir. Şekil 5.6'da kullanılan XRD cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.6. XRD cihazının görüntüsü.

### 5.4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU

İmalatı gerçekleştirilen kompozit numunelerin oda sıcaklığında mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde sertlik ve basma deneylerinden faydalanılmıştır.

#### 5.4.1. Sertlik Deneyi

Sertlik değerleri, Brinnel sertlik lme cihazı kullanılarak ölçülmüştür. lm Qness/Q250M niversal sertlik cihazında, 2,5 mm çapında elik bilye ucu ile 31,25 kg yük altında, 15 saniye boyunca kompozit numunelere uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneye 10 adet ölçüm yapılmış olup bu değerlerin ortalaması alınarak sertlik sonuçları belirlenmiştir. şekil 5.7’de kullanılan sertlik cihazının grntş yer almaktadır.



şekil 5.7. Sertlik cihazının grntş.

#### 5.4.2. Basma Deneyi

Basma deneyinde kullanılan numuneler 7 mm çapa ve 14 mm yüksekliğe sahiptir. Zwick/Roell markalı 600 KN yük uygulama kapasitesine sahip olan çekme cihazının basma aparatı kullanılarak 20 N n yük altında 0,5 mm/dk basma hızında deney yapılarak sonuçlar belirlenmiştir. şekil 5.8’de kullanılan basma cihazının grntş verilmiştir.



Şekil 5.8. Basma cihazının görüntüsü.

### 5.5. AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Aşınma deneyi, pim üzeri disk tipi aşınma cihazında yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin karşı tarafına 5 mm çapında AISI 52100 çelik bilye kullanılırken 7 mm çapında 20 mm yüksekliğinde deney numuneleri ile proses tamamlanmıştır. Her bir numune için 10 N, 20 N ve 40 N yük altında, 100 m kayma mesafesinde, 3 mm strok uzunluğunda 0,18 m/sn kayma hızı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi öncesinde yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisini ortadan kaldırmak amacıyla aşınmaya maruz bırakılacak numunelerin tamamı standart metalografik prosedür

kullanılarak hazırlanmıştır. Her bir aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerin iki boyutlu alanı Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük cihazı ile ortalama 5 ölçüm sonucunda hesaplanmıştır. Şekil 5.9’da kullanılan aşınma cihazının görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.9. Aşınma deney cihazının görüntüsü.

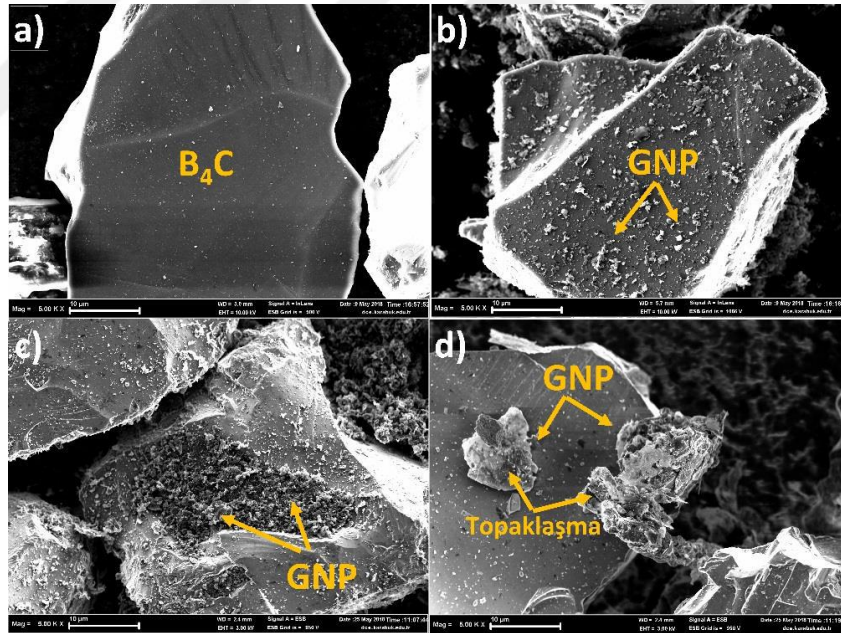
Aşınma deneyleri sonrasında aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla aşınan yüzeyler SEM cihazı ile incelenmiştir. Aşınan yüzeyde bulunan oksit tabakasını belirlemek için ise numune yüzeylerinden EDS analizleri alınmıştır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI

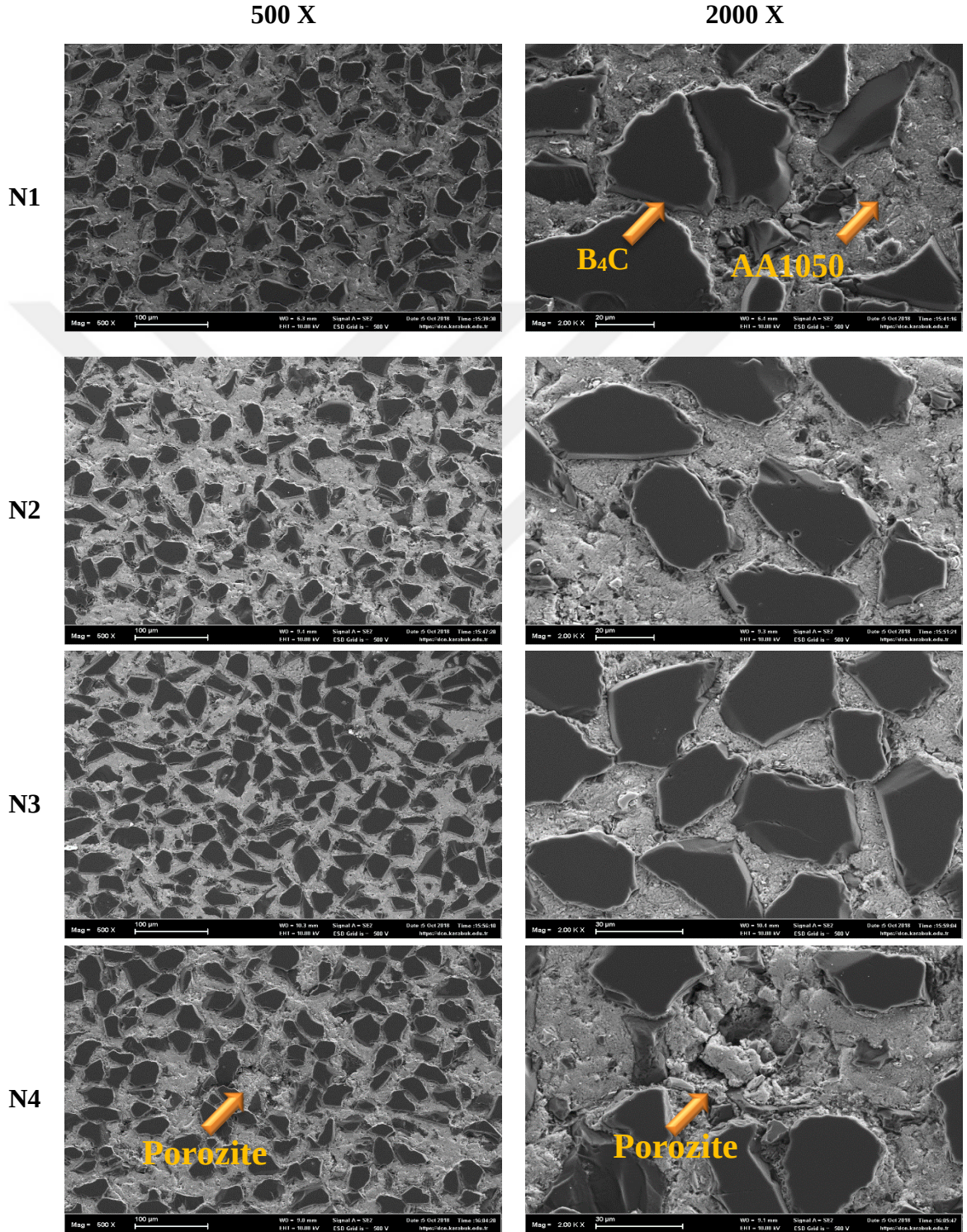
Bu çalışmada numunelerin imalatı iki temel aşamada sınıflandırılmaktadır. İlk etapta vakum destilasyon yöntemi ile takviye edilecek  $B_4C$  partiküllerine farklı oranlarda grafen nanopartiküllerinin katkılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1’de grafen katkısı bulunmayan ve belli oranlarda grafen katkılanması yapılmış  $B_4C$  partiküllerine ait görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 6.1.  $B_4C$  ile grafen nanopartikülleri katkılaması a) %0, b) %0,25, c) %0,5, d) %1 [56].

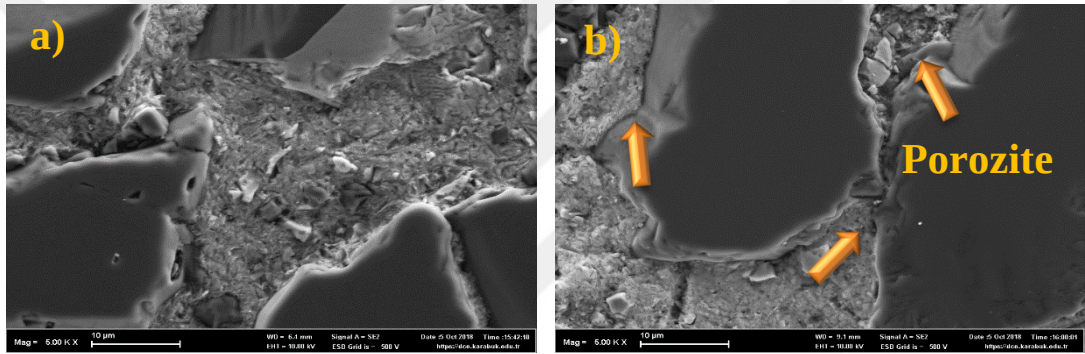
7 mm çapında 50 mm uzunluğunda silindirik preformlar halinde hazırlanmıştır. Sonrasında AA1050 alaşımı hazırlanan preformlara basınçlı infiltrasyon yöntemi ile

infiltr edilmiştir. Son olarak torna ile yüzeyden kalıp olarak kullandığımız paslanmaz tüp kaldırılmıştır. Üretilen kompozit malzemelere ait SEM görüntüleri Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Üretilen kompozit malzemelere ait SEM görüntüleri.

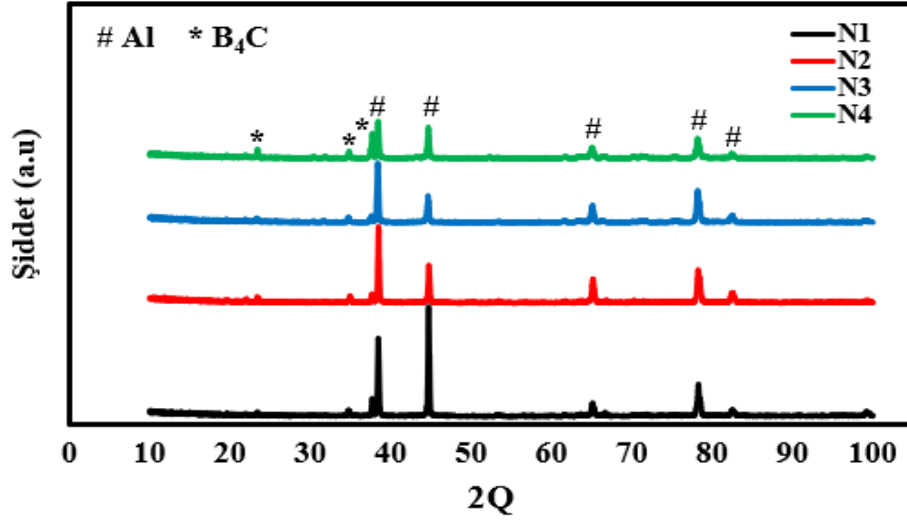
Yukarıda gösterilen hibrit kompozitlerin mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında bütün kompozitlerde takviye elemanının yapı içerisinde homojen olarak dağılım gösterdiği görülmektedir. Fakat %1 grafen ilavesi ile üretilen kompozitlerde matriste boşluk olarak tanımlanan porozitelerin meydana geldiği gözlenmektedir. Porozite miktarındaki artışa dikkat edildiğinde grafen oranına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan mikroyapısal analizlerde yapıda intermetalik vb. farklı bir faz oluşumu gözlenmemiştir. Şekil 6.3'de grafen içermeyen ve %1 GNP içeren kompozitlerden 5000 X büyütmede alınan mikroyapı fotoğrafları yer almaktadır. Bunun dışında GNP miktarı %1'e ulaştığında Şekil 6.3b'de de oklarla gösterildiği üzere matris ve takviye arayüzeyinde bağlanmanın zayıfladığı saptanmıştır.



Şekil 6.3. a) Grafen içermeyen kompozit, b) %1 Grafen içeren kompozit görüntüleri.

## 6.2. XRD SONUÇLARI

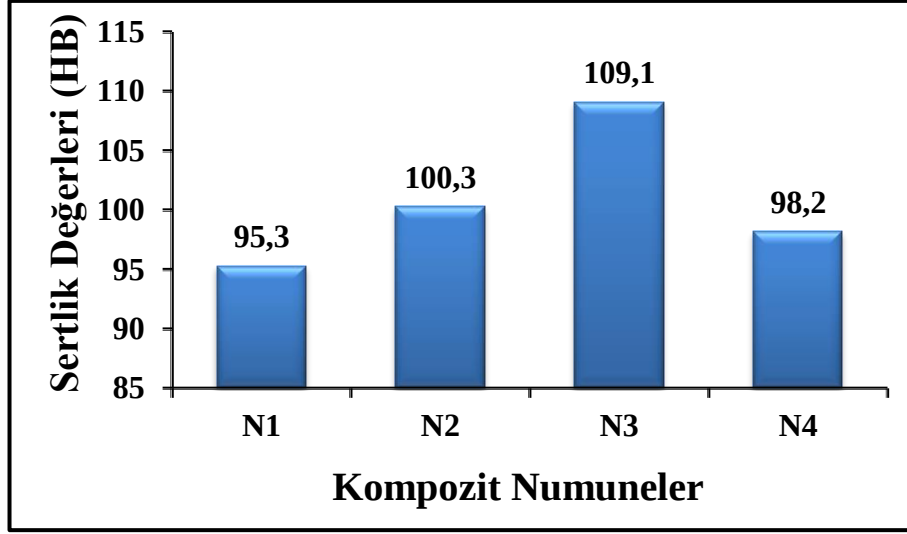
X-ışını kırınımı (XRD) methodu kullanılarak takviye elemanlarının ve kompozitlerin kristalografik özellikleri üzerinde çalışılmıştır. Şekil 6.4'de alüminyum matrisli farklı oranlarda grafen içeren  $B_4C$  takviyeli kompozit numunelerin XRD analizleri yer almaktadır. Bütün grafiklere bakıldığında yaklaşık olarak  $38^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  ve  $82^\circ$  de yüksek ve düşük şiddetlerde alüminyum piki görülmektedir. Yaklaşık olarak  $23^\circ$ ,  $37^\circ$  ve  $39^\circ$  piklerinde ise  $B_4C$  görülmektedir. Kompozit numunelerde yalnızca alüminyum ve  $B_4C$  fazı görüldüğü için farklı herhangi bir pik oluşumunun varlığı söz konusu değildir. Basınçlı infiltrasyon tekniği ile kompozitlerin üretimini oldukça kısa sürede gerçekleştirmemizin ikincil fazların oluşumunun önüne geçtiği düşünülmektedir. Bu sebeple takviye ile matris etkileşiminden kaynaklanan bir faz oluşumunun olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.4. Kompozit malzemelere ait XRD analiz sonuçları.

### 6.3. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

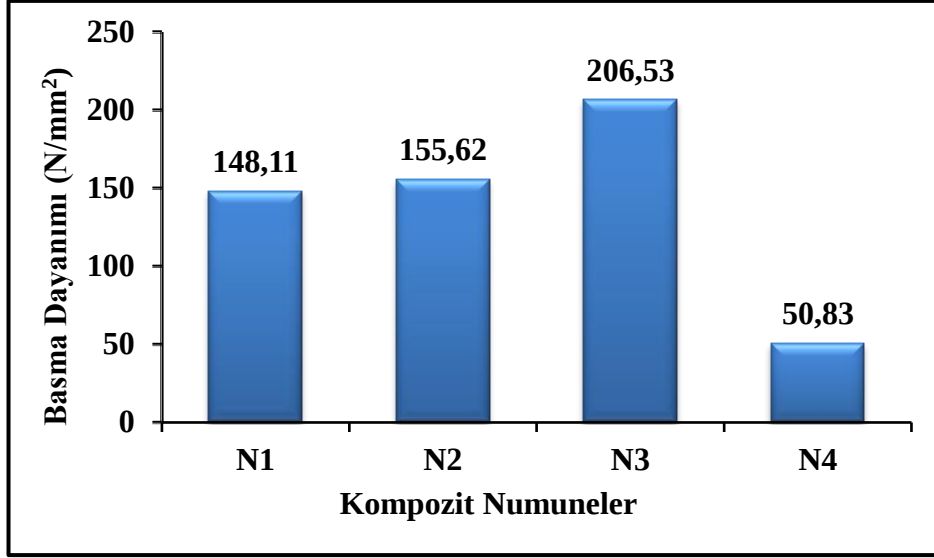
Kompozit malzemelere ait Brinnel sertlik ölçümleri Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Uygulanan sertlik testinin sonuçlarına bakıldığında % 0,50’ e kadar yapılan grafen nanopartikül takviyesinin malzemenin sertliğini N1 kodlu numune ile kıyasladığımızda %15 oranında artırdığı gözlenirken % 1 grafen takviyesi içeren kompozit numunenin sertliğinin önemli derecede azalmasına sebep olduğu saptanmıştır. Bu durumda en yüksek sertlik değeri N3 kodlu numunede görülürken en düşük sertlik değeri ise N1 kodlu numunede gözlenmiştir. Yapılan grafen katkılmasının %0,50 oranına kadar kompozitlerin sertlik değerinin yükselmesini sağlarken bu orandan sonra artan grafen ilavesi sertlik değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Sertlik değerlerindeki bu düşüşün mikroyapı fotoğraflarında da görüldüğü üzere artan porozite miktarına bağlı olduğu düşünülmektedir [56]. Sertlik sonuçları değerlendirildiğinde AA1050/B<sub>4</sub>C kompozitlerde optimum grafen ilavesinin %0,5 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.5. Kompozit malzemelerin sertlik değerleri.

### 6.3. BASMA DENEYİ SONUÇLARI

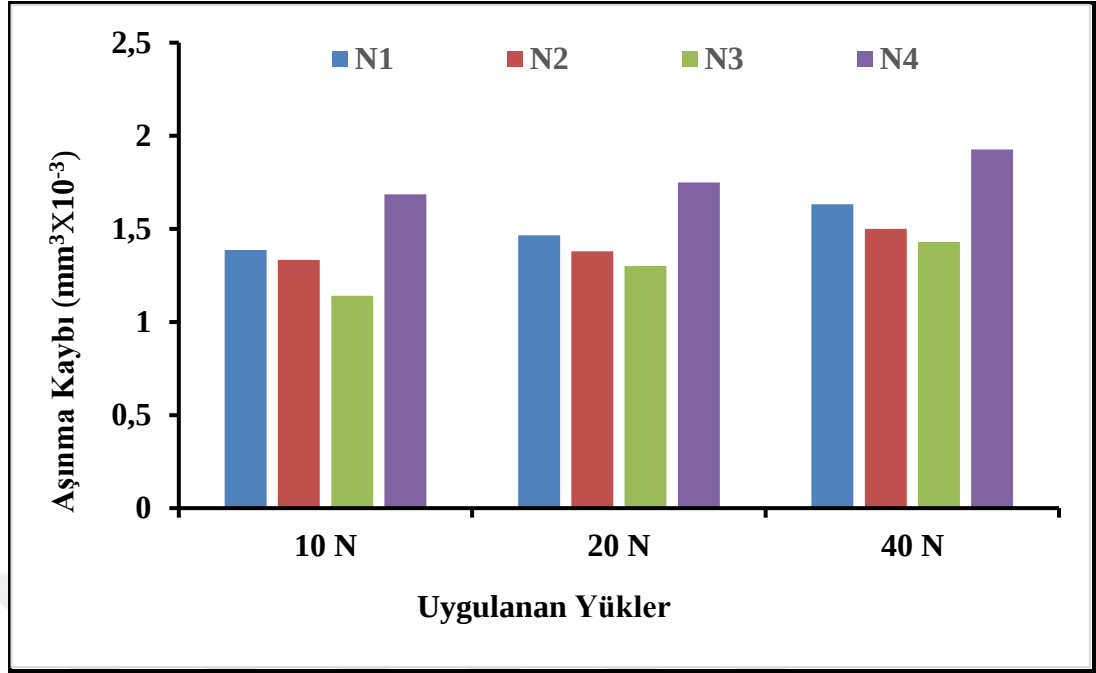
Kompozit malzemelere ait basma deneyi ölçümleri Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar sertlik deneyi sonuçları ile paralellik içerisinde. Basma deneylerinden elde edilen sonuçlara baktığımızda en yüksek basma dayanımının 206,53 N/mm<sup>2</sup> ile %0,50 grafen nanoparikülü takviyeli numune de elde edildiği en düşük basma dayanımının ise 50,83 N/mm<sup>2</sup> ile %1 grafen nanopartikül takviyeli numunede gerçekleştiği görülmüştür. Grafen ilavesi ile basma dayanımında meydana gelen artışın sebebi olarak oldukça geniş yüzey alanına sahip grafen nanopartiküllerinin kompozit yapı içerisinde tane sınırlarına yerleşip dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımı artırdığı ön görülmektedir [56]. Bununla beraber ilave edilen grafen nanopartiküllerinin katılma esnasında uygun arayüzey sağlayıcı olarak davrandığı ve yapıda daha ince taneli bir yapı oluşumunu sağlayarak dayanım artışını desteklediği düşünülmektedir [56]. Ancak %1 oranında grafen ilave edildiğinde matris takviye arayüzeyi etkileşiminin ıslatabilirliğin olumsuz etkilenmesi sebebi ile zayıfladığı bu nedenle gerek takviye matris arayüzeyinde gerekse yapı içerisinde porozitelerin arttığı (bknz. Şekil 6.3.) bununda kompozit dayanımını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Kompozit malzemelerin basma dayanımları.

#### 6.4. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI

Şekil 6.7’de incelenen kompozitlerin sırası ile 10 N, 20 N ve 40 N yükleri altındaki aşınma sonuçları verilmiştir. %0,50 oranında grafenin içeren kompozit numunelerde aşınma hızı en düşükken, grafen ilavesi % 1 e çıktığında aşınma hızının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla beraber aşınma hızının bütün kompozit numunelerde arttığı görülmektedir. Aşınma sonuçları değerlendirildiğinde %0,50 grafen ilavesine kadar grafenin yağlayıcı etkisiyle kompozitlerin aşınma dayanımı artarken bu oranın üstündeki grafen takviyesi porozite oluşumunu artırdığı için aşınma dayanımının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Bu duruma göre aşınma sonuçları sertlik ve basma sonuçları ile paralellik içerisinde.



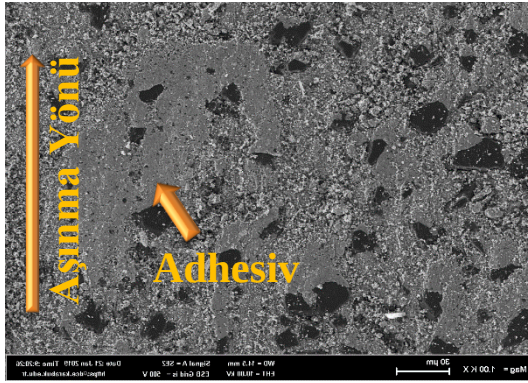
Şekil 6.7. Aşınma deneyi sonuçları.

Şekil 6.8’ de en yüksek (N3) ve en düşük (N4) aşınma dayanımı gösteren numunelere ait aşınma sonrası SEM görüntülerine yer verilmiştir. N3 kodlu numuneye baktığımızda düşük yüklerde yapıya adhesiv aşınma hakimken yüksek yüklerde kısmen abresiv aşınma görülmektedir. N4 kodlu numuneye baktığımızda ise hem düşük yüklerde hem de yüksek yüklerde abresiv aşınmanın hakim olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yük düşük olduğunda matris ve partikül bağının sağlamlığını koruduğu görülmüştür. %0,5 oranına kadar artan grafen nanopartikül ilavesinin aşınmaya karşı direnç sağladığı saptanmıştır. Uygulanan yük arttığında ise yapıda bu bağın zayıfladığı belirlenmiştir. Aynı zamanda artan yük ile birlikte malzemede deformasyonların olduğu gözlenmiştir. Diğer kompozit numuneler ile karşılaştırma yapıldığında en fazla aşınma kaybının %1 grafen nanopartikül takviyeli numunede olduğu tespit edilmiştir. Artan porozite aşınmanın şiddetli bir şekilde görülmesine neden olmuştur. %1 grafen ilavesi sonrası matris ve partikül ara yüzey etkileşiminin bozulmuştur. Şekil Ek A.4 de görüldüğü üzere EDX analizleri sonucunda karşı malzemeden kompozit numunelere oldukça fazla oranlarda transfer olduğu gözlenmiştir.

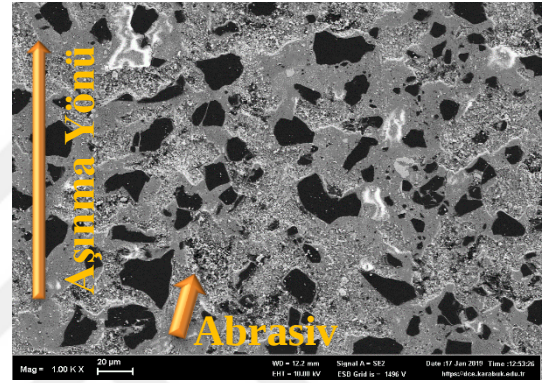
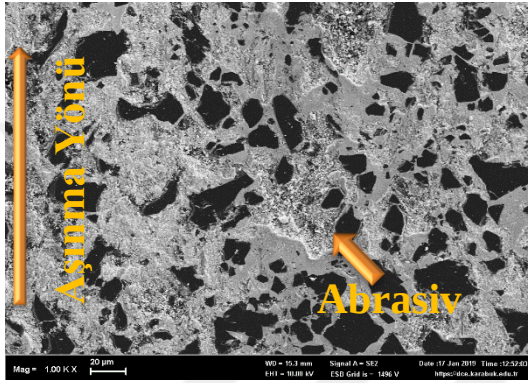
10 N

40 N

N3



N4



Şekil 6.8. N3 ve N4 kodlu numuneye ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, alüminyum matrisli farklı oranlarda grafen ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemeler basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen bütün kompozit numuneler için mikroyapı incelemeleri, sertlik, basma ve aşınma deneyleri yapılmış olup aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Metalografik inceleme sonuçlarına göre, kompozit takviye elemanlarında B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin homojen olarak dağıldığı fakat artan grafen oranının ıslatabilirliği olumsuz yönde etkilediği ve poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir.
- En yüksek sertlik değeri %0,50 grafen nanopartikül içeren N3 kodlu numunede görülürken, en düşük sertlik değeri ise grafen nanopartikül ilavesi bulunmayan N1 kodlu numune olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek basma dayanımı %0,50 grafen nanopartikül içeren kompozit numunede görülürken, en düşük basma dayanımı ise %1 grafen nanopartikül içeren kompozit numunede olduğu gözlenmiştir. Bu durum sertlik ve basma deneylerinin paralellik içerisinde olduğunu göstermiştir.
- Üretilen kompozitlerin aşınma davranışları incelendiğinde tüm yükler altında en iyi aşınma dayanımı %50 AA1050+%49,5 B<sub>4</sub>C+ %0,5 GNP içeren N3 kodlu kompozit numunede olduğu gözlenirken, en kötü aşınma dayanımının ise %50 AA1050+%49 B<sub>4</sub>C+%1 GNP içeren N4 kodlu kompozit numunede olduğu görülmüştür. Aşınma mekanizmaları olarak değişen yüklere bağlı olarak adhesif ve abrasif aşınma mekanizmaları gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Gümüşderelioğlu, M., “Geleceğin Malzemeleri” *Bilim ve Teknik*, 2 (2004).
2. Öztürk, A., “Seramik Matrisli Kompozitlerin Üretimi” *TÜBİTAK*, 2-5 (1995).
3. Kaburcuk, M., “Düşük hızlı darbe yükleri altında Al/SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 5-6 (2014).
4. Callister, W., Rethwisch D., “Materials science and engineering”, Genel, K., *Nobel*, Ankara, 647-650 (2013).
5. Balasubramanian, M., “Composite materials and processing”, CRC Press, New York, 1-7 (2014).
6. Deniz, M.E., “Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıtma işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 41 (2005).
7. Kalemtaş, A., “Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış”, *Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi*, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi: 18-19 (2014).
8. Miracle, D., "Metal matrix composites – from science to technological significance", *Composites Science and Technology*, 65: 2526-2540 (2005).
9. Uygur, İ., Saruhan H., “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri” *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1): 167-168 (2004).
10. Okur, O., “Partikül takviyeli AA2014 metal matrisli kompozit malzemenin infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-9 (2016).
11. Ekici, R., “Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 24-42 (2004).
12. Kerti, I., “B<sub>4</sub>C takviyeli magnezyum (AZ91) matrisli kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu” *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11 (1): 19 (2018).

13. Atalay, O., “Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı” Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 13 (2016).
14. Özyürek, D., Özbilen S., Çetinkaya C., “Mekanik alaşımlama/öğütme yöntemiyle  $ZrO_2$  takviyeli titanyum bazlı (ex-situ) metal matris kompozit malzemelerin üretilmesi ve karakterizasyonu” **Teknoloji**, 7(3): 517-522 (2004).
15. Efe, G., “SiC takviyeli iletken bakır kompozitlerinin geliştirilmesi” Doktora Tezi, **Fen Bilimleri Enstitüsü Sakarya Üniversitesi**, Sakarya 1-17 2010.
16. Özkaya, S., “Alüminyum- $B_4C$  parçacık takviyeli metal matrisli nanokompozitlerin üretimi, iç yapı, fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 10 (2014).
17. Ağacan, B., “Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitlerde atık Al talaşlarının değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 4 (2013).
18. Pul. M., “Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 55-63 (2010).
19. Çanakçı, A., “AA2024 matrisli  $B_4C$  parçacık takviyeli kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, (2006).
20. Yılmaz, T.A., “AA 2014/ $Al_2O_3$  Metal matrisli kompozitin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve yaşlandırılabilirlik özelliklerinin araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 28-29, (2013).
21. Taşcı, U., “AA2014- $B_4C$  metal matrisli kompozitin toz metalurjisi ve infiltrasyon yöntemiyle üretilebilirliği, karakterizasyonu ve aşınma özelliklerinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-34 (2012).
22. Thevenot, F., “Boron Carbide-A comprehensive review”, **Journal Of the European Ceramic Society**, 6: 205-225 (1990).
23. Karademir, İ., “ $SiO_2$  takviyeli etial 21 esaslı kompozit malzemelerin basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bartın, 13-14 (2013).
24. Yıldırım İ., Arpacı, A., “Basınçsız sinterlenmiş silisyum karbürde iç yapının kırılma tokluğuna etkisi”, **İTÜ Dergisi/D Mühendislik**, 3 (1): 98-104 (2004).

25. Karaduman, B., “Titanyum matrisli titanyum karbür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 27-28 (2010).
26. Dengiz, Ö.E., “Grafen takviyeli magnezyum kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, **Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Samsun, 25-26 (2018).
27. Şenel, M.C., Gürbüz, M., Koç, E., “Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler” **Mühendis ve Makina**, 56 (669): 44 (2015).
28. Ahlatçı, H., “Alüminyum-silisyum karbür kompozitlerin mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına takviye boyutunun ve matris bileşiminin etkisi”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 26 (2003).
29. Çevik, E., “B<sub>4</sub>C takviye elemanı ile üretilen farklı Mg içerikli Al ve Al-Si matrisli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi” Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 12-16 (2015).
30. Kandpal, B. C., Kumar, J. And Singh, H., “Production technologies of metal matrix composite, a review”, **IJRMET**, 4: 27-32 (2014).
31. Campbell, J. “*Complete Casting Handbook*”, Oxford: Elsevier Ltd., 979-985 (2011).
32. Ağca, S., “Alüminyum alaşımlarından santrifüj döküm yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 18-22 (2016).
33. Parras- Medecigo, E., M., Pech-Canul, M. I., Rodrigez-Reyes, Gorokhovskiy, A., “Effect of processing parameters on the production of blayer-graded Al//SiC composites by pressureless infiltration”, **Materials Letters**, 56: 460-464 (2002).
34. Watari, T., Et Al., “Reactive infiltration of magnesium vapor into alumina powder compacts”, **J. Of European Ceramic Society**, 19: 1889-1893 (1999).
35. Mortensen, A., Michaud, V. J. And Flemings, M. C., “Pressure-infiltration processing of reinforced aluminium”, **JOM**, 45: 36-43 (1993).
36. Ateş, S., “SiC takviyeli etial 21 esaslı kompozit malzemelerin basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretim ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kırıkkale, 45-46 (2011).
37. Yang, W., Chen, G., Qiao, J., Liu, S., Xiao, R., Dong, R., Hussain, M., And Wu, G., “Graphene nanoflakes reinforced Al-20Si matrix composites prepared by pressure infiltration method”, **Materials Science and Engineering: A**, 700: 351–357 (2017).

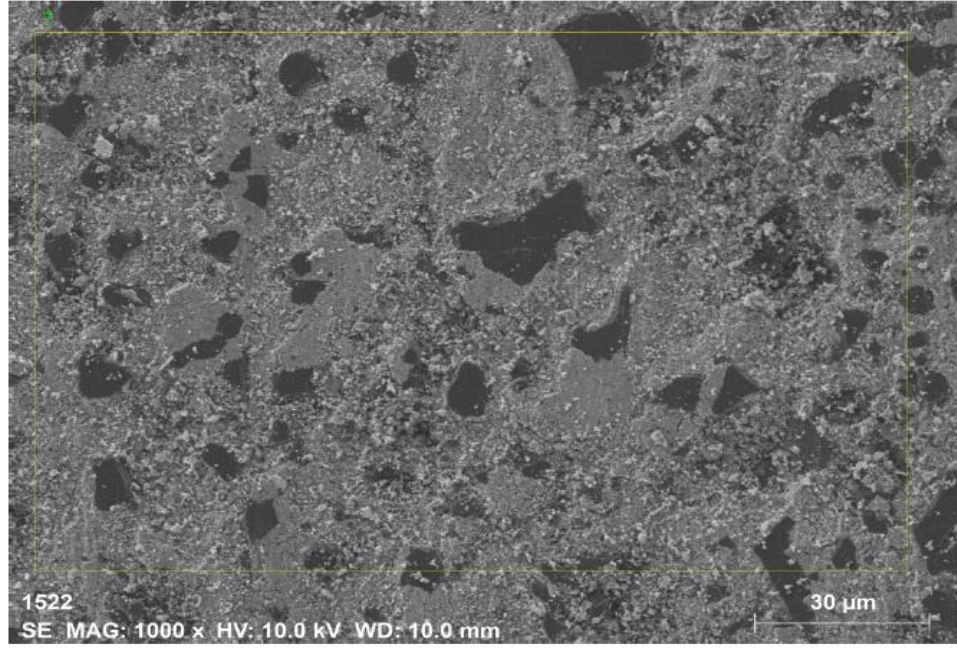
38. İbrahim, M. F., Ammar, H. R., Samuel, A. M., Soliman, M. S. And Samuel, F. H., "On the impact toughness of Al-15 vol.% B<sub>4</sub>C metal matrix composites", **Composites Part B**, 79: 83-94 (2015).
39. Şenel, M.C., Gürbüz, M. Ve Koç, E., "SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının incelenmesi", **Technological Applied Sciences (NWSATAS)**, 2A0142,13(2):122-133 2018.
40. Gökmeşe, H., Karadağ, H, M., "Toz metal AA 2014-SiC-B<sub>4</sub>C Kompozit/Hibrit malzemelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi" **GU J Sci, Part C**, 6(2):385-398 (2018).
41. Hu, Q., Zhao, H., And Li, F., "Microstructures and properties of SiC particles reinforced aluminum-matrix composites fabricated by vacuum-assisted high pressure die casting", **Materials Science and Engineering: A**, 680: 270–277 (2017).
42. Pul, M., "Alüminyum 7075 Matrisli Kompozitlerde SiC, B<sub>4</sub>C Ve TiB<sub>2</sub> takviye elemanlarının mekanik özelliklere etkilerinin karşılaştırılması" **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 7: 180-193 (2019).
43. Abdollahi, A., Alizadeh, A. and Baharvandi, H. R., "Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al2024–5 Wt.%B<sub>4</sub>C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion", **Materials and Design**, 55: 471–481 (2014).
44. Krasnowski, M., Kulik, T., "Nanocrystalline feal matrix composites reinforced with tic obtained by hot-pressing consolidation of mechanically alloyed powders", **Intermetallics**, 1377-1383 (2007).
45. Kandemir, S., "Grafen nanolevha takviyesinin AlSi10Mg alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi" **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 6 (1): 177-187 (2018).
46. Das, S., Das, S. And Das, K., "Abrasive wear of zircon sand and alumina reinforced Al–4.5 wt%Cu alloy matrix composites – a comparative study", **Composites Science and Technology**, 67: 746–751 (2007).
47. Rao, R. N. And Das, S., "Effect of matrix alloy and influence of SiC particle on the sliding wear characteristics of aluminium alloy composites", **Materials And Design**, 31: 1200–1207 (2010).
48. Ahlatçı, H., Candan, E., And Çimenoglu, H., "Abrasive wear behavior and mechanical properties of Al–Si/Sic composites", **Wear**, 257 (5–6): 625–632 (2004).
49. Chi, H., Jiang, L., Chen, G., Qiao, J., Lin, X., And Wu, G., "the tribological behavior evolution of TiB<sub>2</sub>/Al composites from running-in stage to steady stage", **Wear**, 368: 304–313 (2016).

50. Şahin, S., Özdemir., ve Ünlü, B. S., “T/M yöntemi ile üretilmiş Al-SiCp kompozitlerde üretim parametrelerinin aşınma davranışına etkisi”, 3<sup>rd</sup> **International Powder Metallurgy Conference**, Gazi Üniversitesi, Ankara, 951-957 (2002).
51. İnci, E., Savaş, Ö., “AlB<sub>2</sub> Borür takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin abrasif aşınma özelliklerinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma” **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**,19: 873-880 (2020).
52. Arık, H., “Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması” **GU J Sci, Part C**, 7 (4): 776-787 (2019).
53. Al-Qutuba, A. M., Khalil, A., Saheb, N. And Hakeem, A. S., “Wear and friction behavior of Al6061 alloy reinforced with carbonnanotubes”, **Wear**, 297: 752–761 (2013).
54. Hasırcı, H., Gül, F., “B<sub>4</sub>C /Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi” **SDU International Journal of Technologic Sciences**, 2(1): 15-21 (2010).
55. Mindivan, H., Kayalı, E.S., “SiC takviyeli 2618 Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışı” **İtüdergisi/D Mühendislik**, 6(2): 63-70 (2007).
56. Polat, S., “Alüminyum matrisli farklı seramik takviyeli kompozitlere grafen ilavesinin termal ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi” Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük, 57-68 (2020).

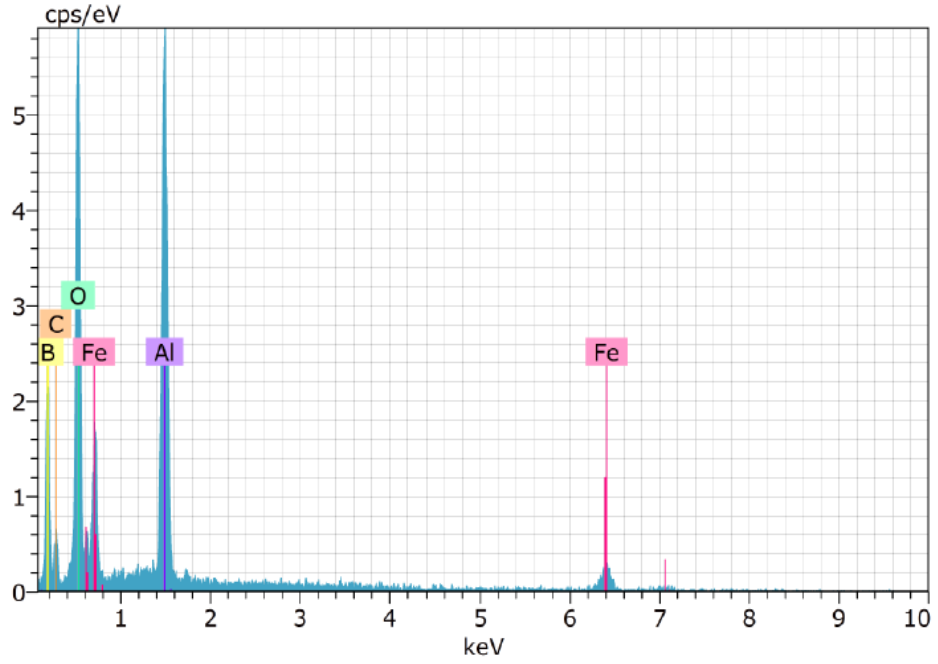


**EK AÇIKLAMALAR A.**

**EDX ANALİZLERİ**



Şekil Ek A.1. N3 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra SEM görüntüsü.

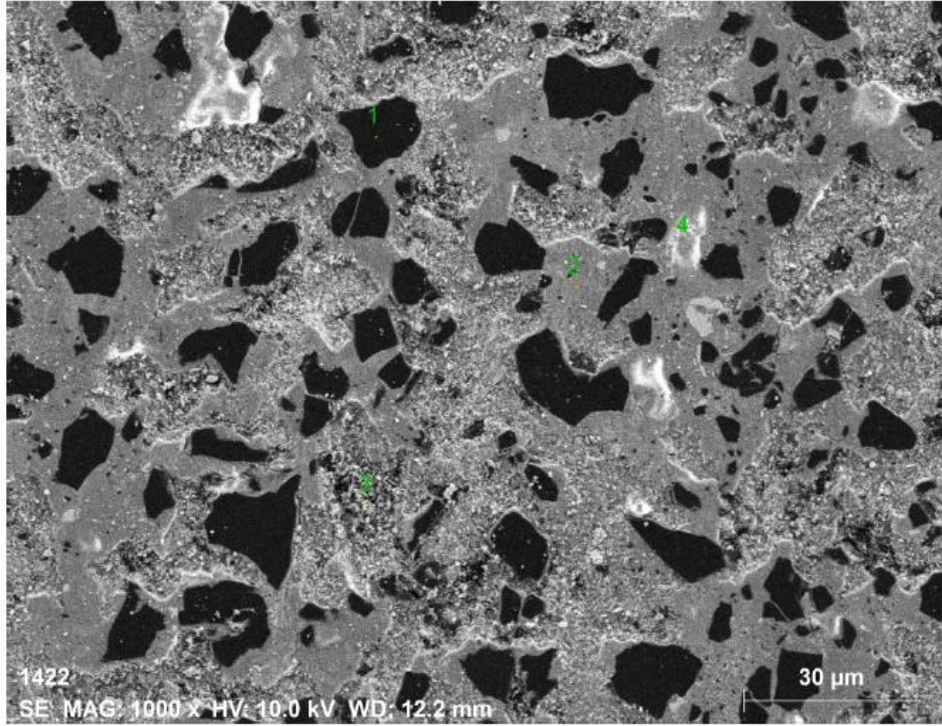


Şekil Ek A.2. N3 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX grafiği.

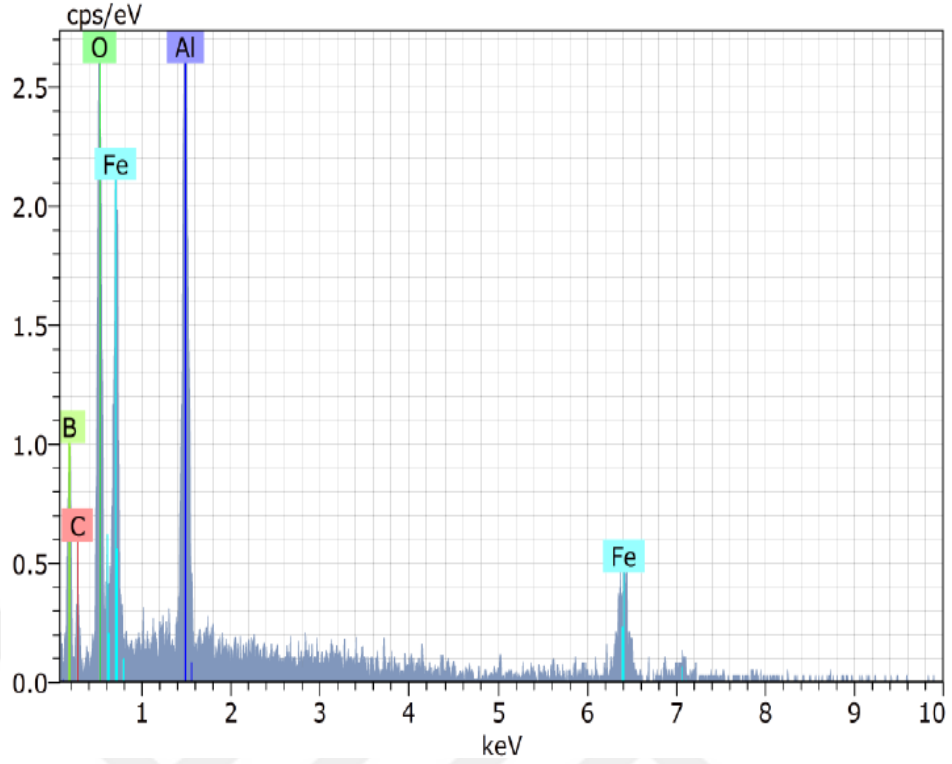
Çizelge Ek A.1. N3 kodlu numuneye ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX analizi.

Spectrum: 1

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| B      | 5  | K-series | 71.07            | 46.19             | 63.97             | 14.24                     |
| C      | 6  | K-series | 9.69             | 6.30              | 7.85              | 2.81                      |
| O      | 8  | K-series | 29.70            | 19.30             | 18.07             | 4.65                      |
| Al     | 13 | K-series | 13.67            | 8.88              | 4.93              | 0.68                      |
| Fe     | 26 | K-series | 29.74            | 19.33             | 5.18              | 2.06                      |
| Total: |    |          | 153.88           | 100.00            | 100.00            |                           |



Şekil Ek A.3. N4 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra SEM görüntüsü.



Şekil Ek A.4. N4 numunesine ait 40 N yük uygulamasından sonra 3. noktanın EDX grafiği.

Çizelge Ek A.2. N4 kodlu numuneye ait 40 N yük uygulamasından sonra EDX analizi.

Mass percent (%)

| Spectrum    | B     | C     | O     | Al   | Fe    |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1           | 83.05 | 16.89 | 0.06  | 0.00 | 0.00  |
| 2           | 8.29  | 2.81  | 41.64 | 2.97 | 44.29 |
| 3           | 33.39 | 4.55  | 11.32 | 6.52 | 44.22 |
| 4           | 9.70  | 2.81  | 47.40 | 3.27 | 36.82 |
| Mean value: | 33.61 | 6.76  | 25.11 | 3.19 | 31.33 |
| Sigma:      | 34.92 | 6.80  | 23.00 | 2.67 | 21.18 |
| Sigma mean: | 17.46 | 3.40  | 11.50 | 1.33 | 10.59 |

## ÖZGEÇMİŞ

Satiye Burcu KELEZ 1993 yılında Karabük’de doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2017 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2018 yılı Eylül ayında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans programında eğitime başladı. 2018 yılında Gedikoğlu Döküm Limited Şirketinde çalışmaya başlamış olup halen burada görev yapmaktadır.

---