

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



İNDÜKSİYONLA SICAK İŞLEMİN GRAFEN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> TAKVİYELİ  
Al<sub>2024</sub> ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE VE MİKROYAPISINA OLAN ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI

Yüksek Lisans Tezi

Ümmet MAHMUTOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

SAMSUN  
2021

## TEZ KABUL VE ONAY

Ümmet MAHMUTOĞLU tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL danışmanlığında hazırlanan “İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 11/06/2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği/oy çokluğu ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Ünvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
	Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye (Danışman)	Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Aydemir Güralp URAL Samsun Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

--/--/----

Prof. Dr. Ali POLAT

Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

İmza

.../.../....

Ümmet MAHMUTOĞLU

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı:** İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisinin Araştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması şahsım tarafından .../.../2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : %...

Tek kaynak oranı : %... çıkmıştır.

İmza

--/--/2021

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

## ÖZET

### İNDÜKSİYONLA SICAK İŞLEMİN GRAFEN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> TAKVİYELİ Al2024 ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE MİKROYAPISINA OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ümmet MAHMUTOĞLU

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL

Bu çalışmada, ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 grafen nanotabaka (GNT) takviyeli Al2024 alüminyum esaslı kompozitler (Al2024-GNT), ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12 silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) takviyeli Al2024 alüminyum esaslı kompozitler (Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ve GNT-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli Al2024 alüminyum kompozitler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem (SSİSİ) uygulanmıştır. Böylece, grafen/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin ve SSİSİ işleminin üretilen numunelerin yoğunluğuna, gözenekliliğine, Vickers sertliğine, basma dayanımına ve mikroyapısına olan etkisi incelenmiştir. Sinterleme işlemi 600 °C sıcaklıkta 60 dk süresince, SSİSİ ise 500 °C sıcaklıkta 60 s süresince gerçekleştirilmiştir.

Grafen takviyeli Al2024 alüminyum esaslı kompozitler için yürütülen fiziksel ve mekanik testler neticesinde; en yüksek deneysel yoğunluk (2,65 g/cm<sup>3</sup>), Vickers sertliği (100,3 HV), basma dayanımı (482,6 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4,6) SSİSİ uygulanmış Al2024-%0,15GNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeler içerisinde en yüksek deneysel yoğunluk (2,71 g/cm<sup>3</sup>), Vickers sertliği (105,2 HV), basma dayanımı (510 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%3,8) SSİSİ uygulanmış Al2024-%9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkı oranı (%9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) esas alınarak Al2024-%9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT (x=ağırlıkça %0,15, 0,30, 0,45) kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Bu kompozitler içerisinde ise; en yüksek deneysel yoğunluk (2,73 g/cm<sup>3</sup>), Vickers sertliği (108,5 HV), basma dayanımı (560 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%3,6) SSİSİ uygulanmış Al2024-%9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-%0,15GNT alüminyum hibrit kompozitlerde elde edilmiştir.

Yürütülen mikroyapı incelemeleri neticesinde; ağırlıkça %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve %0,15 GNT katkı oranından sonra nano boyutlu grafenin ve mikron altı boyutlu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün topaklandığı ve bu sebeple de numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca SSİSİ uygulanan numunelerde, tanelerin daha iyi yönlendiği, mikroyapının daha yoğun olduğu gözlenmiş olup bu durumun numunelerin mekanik özelliklerini de olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, Grafen, Silisyum Nitrür, Toz Metalürjisi, Metal Matrisli Kompozitler

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HOT TREATMENT BY INDUCTION ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF GRAPHENE/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> REINFORCED AL2024 BASED COMPOSITES.

Ümmet MAHMUTOĞLU

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

M.Sc., June/2021

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mahmut Can ŞENEL

In this study, 0,15%, 0,30% and 0,45% by weight of graphene nanoplatelet (GNPs) reinforced Al2024 aluminum-based composites (Al2024-GNPs), 1, 3, 6, 9, 12% by weight of silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) reinforced Al2024 Aluminum based composites (Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) and GNPs-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced Al2024 aluminum composites has been produced by powder metallurgy method. After sintering, hot treatment by induction (HTIAS) was applied to the produced composites. Thus, the effect of graphene/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforcement and HTIAS process on the density, porosity, Vickers hardness, compression strength and microstructure of the samples produced has been investigated. The sintering process was carried out at 600 °C for 60 minutes, while the HTIAS process has been carried out at 500 °C for 60 seconds.

As a result of the physical and mechanical tests carried out for graphene nanoplatelets reinforced Al2024 aluminum-based composites; highest experimental density (2,65 g/cm<sup>3</sup>), Vickers hardness (100,3 HV), compressive strength (482,6 MPa) and lowest porosity rate (4,6%) HTIAS treated Al2024-0,15%GNPs. It have been obtained in a composite structure. Among the Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite materials produced by powder metallurgy method, the highest experimental density (2,71 g/cm<sup>3</sup>), Vickers hardness (105,2 HV), compressive strength (533,2 MPa) and the lowest porosity ratio (3,8%) HTIAS applied Al2024-9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite structure have been obtained. Based on this Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> additive ratio (9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), Al2024-9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNPs (x=0,15% by weight, 0,30, 0,45%) composite materials have been prepared. Among these composites; the highest experimental density (2,73 g/cm<sup>3</sup>), Vickers hardness (108,5 HV), compressive strength (560 MPa) and the lowest porosity rate (3,6%) have been obtained which in the HTIAS applied Al2024-9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15%GNPs aluminum hybrid composites.

As a result of the microstructure studies carried out; It was determined that after 9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and 0,15%GNPs additive ratio by weight, nano-sized graphene and sub-micron-sized Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> have been clumped and therefore the mechanical and physical properties of the samples decreased. In addition, it have been observed that the grains were more oriented and the microstructure was more dense in the HTIAS treated samples, and it have been concluded that this situation positively affected the mechanical properties of the samples.

**Keywords:** Aluminum, Graphene, Silicon Nitride, Powder Metallurgy, Metal Matrix Composites

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma ile beraber arzu ettiğim akademik kariyerde bir adım daha ilerlemenin mutluluğunu yaşamaktayım. Bu vesileyle yapmış olduğum bu çalışmada, çalışmanın her aşamasında benimle pek kıymetli bilgisini paylaşan, zamanını ayıran ve yol gösteren, çalışmama başından sonuna kadar rehberliğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Can ŞENEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca bana yardımcı olan Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e, Arş. Gör. Onur YONTAR'a, Muzaffer Kaan ÜSTÜN'e teşekkür ederim.

Benim bu günlere gelmemde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, maddî ve manevî desteklerini esirgemeyen babam Yaşar MAHMUTOĞLU'na, annem Fatma MAHMUTOĞLU'na ve abim Temel MAHMUTOĞLU'na teşekkür ederim.

Haziran 2021, SAMSUN

Ümmet MAHMUTOĞLU

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Genel Bilgiler.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	3
1.3. Özgün Değer .....	3
1.4. Tez Düzeni .....	4
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	5
2.2. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	10
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>14</b>
3.1. Tanımı ve Genel Özellikleri.....	14
3.2. Sınıflandırma .....	15
3.2.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma .....	15
3.2.2. Takviye Malzemesinin Şekline ve Yapısına Göre Sınıflandırma .....	16
3.3. Metal Matrisli Kompozitler .....	17
3.3.1. Matris Malzemeleri .....	19
3.3.2. Takviye Elemanları .....	21
3.3.3. Üretim Yöntemleri .....	22
<b>4. TOZ METALÜRJİSİ .....</b>	<b>34</b>
4.1. Avantajları ve Dezavantajları .....	34
4.2. Toz Üretim Yöntemleri.....	36
4.2.1. Mekanik Üretim Teknikleri .....	37
4.2.2. Elektroliz ile Üretim Teknikleri.....	37
4.2.3. Kimyasal Üretim Teknikleri .....	38
4.2.4. Atomizasyon Teknikleri.....	38
4.3. Toz Metalürjisi ile Parça Üretimi .....	39
4.3.1. Karıştırma ve Harmanlama .....	40
4.3.2. Sıkıştırma (Presleme).....	41
4.3.3. Sinterleme .....	44
4.4. Toz Metalürjisi ile Üretilen Kompozitlerin Plastik Şekillendirilmesi .....	46
4.4.1. Sıcak Şekillendirme .....	47
4.4.2. Soğuk Şekillendirme .....	47
4.4.3. Plastik Şekil Verme Yöntemleri .....	48
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>50</b>
5.1. Materyal.....	50
5.2. Yöntem .....	52
5.2.1. Toz Metalürjisiyle Kompozit Malzeme Üretimi.....	54

5.2.2. Test Yöntemleri ve Karakterizasyon Teknikleri .....	61
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>71</b>
6.1. Grafen Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi .....	71
6.1.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri .....	71
6.1.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları .....	72
6.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	74
6.1.4. Basma Testi Sonuçları .....	76
6.1.5. XRD Analiz Sonuçları .....	79
6.1.6. FTIR Analiz Sonuçları .....	79
6.1.7. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları.....	80
6.2. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi .....	85
6.2.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri .....	85
6.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları .....	86
6.2.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	88
6.2.4. Basma Testi Sonuçları .....	89
6.2.5. XRD Analiz Sonuçları .....	90
6.2.6. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları.....	91
6.3. Grafen ve Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi .....	95
6.3.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri .....	96
6.3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları .....	98
6.3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	99
6.3.4. Basma Testi Sonuçları .....	100
6.3.5. XRD Analiz Sonuçları .....	102
6.3.6. FTIR Analiz Sonuçları .....	102
6.3.7. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları.....	104
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>109</b>
7.1. Grafen Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi .....	109
7.2. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi .....	111
7.3. Grafen ve Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Takviyeli Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Matrisli Hibrit Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi .....	113
7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler.....	115
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>116</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>123</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

Simge	Açıklama	Birim
Al	Alüminyum	[-]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit	[-]
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	Alüminyum karbür	[-]
AlN	Alüminyum nitrür	[-]
B <sub>4</sub> C	Bor karbür	[-]
b	Burger vektörü	[-]
d	Köşegen uzunluğu	[mm]
E	Elastisite modülü	[GPa]
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	[-]
Mg	Magnezyum	[-]
L	Kayma mesafesi	[m]
m <sub>A</sub>	Suda asılı kütle	[g]
m <sub>D</sub>	Suya doymuş kütle	[g]
m <sub>K</sub>	Kuru kütle	[g]
Ni <sub>3</sub> Al	Nikel-alüminyum alaşımı	[-]
P	Uygulanan yük	[N]
SiC	Silisyum karbür	[-]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum nitrür	[-]
SiO <sub>2</sub>	Silisyum oksit	[-]
T <sub>m</sub>	Ergime sıcaklığı	[°C]
T <sub>s</sub>	Sinterleme sıcaklığı	[°C]
Ti	Titanyum	[-]
TiC	Titanyum karbür	[-]
TiB <sub>2</sub>	Titanyum diborür	[-]
W	Aşınma oranı	[mm <sup>3</sup> /(Nm)]
WC	Wolfram karbür	[-]
ZrB <sub>2</sub>	Zirkonyum borür	[-]
%G	Yüzde gözeneklilik oranı	[-]
%M	Matris malzeme oranı	[-]
%TK	Takviye malzemesi oranı	[-]
ΔL	Boyda meydana gelen değişim	[mm]
γ	Kayma şekil değiştirme oranı	[-]
λ	Tanecikler arası mesafe	[μm]
ε	Birim uzama miktarı	[-]
μ	Sürtünme katsayısı	[-]
ρ	Dislokasyon yoğunluğu	[mm/mm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>D</sub>	DeneySEL yoğunluk	[g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>K</sub>	Karışımın teorik yoğunluğu	[g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>T</sub>	Teorik yoğunluk	[g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>TK</sub>	Takviye malzemesinin yoğunluğu	[g/cm <sup>3</sup> ]
σ <sub>b</sub>	Basma dayanımı	[MPa]
ϑ	Dislokasyon hızı	[mm/s]

## KISALTMALAR

Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
EDX	Enerji Dağıtıcı X-Işını
FSP	Sürtünme Karıştırma İşlemi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kıızıl Ötesi Spektroskopisi
GNT	Grafen Nanotabaka
HB	Brinel Sertliği
HÜBTUAM	Hitit Üniversitesi Bilimsel İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
HV	Vickers Sertliği
ISO	Uluslararası Standart Örgütü
KİTAM	Karadeniz İleri Araştırma Merkezi
KNT	Karbon Nanotüp
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
SSİSİ	Sinterleme Sonrası İndüksiyonla Sıcak İşlem
STEM	Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	Toz Metalürjisi
XRD	X-Işını Kırınımı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. MMK malzemelerin üretim yöntemleri .....	24
Şekil 3.2. Toz metalürjisi yöntemi .....	25
Şekil 3.3. Difüzyon bağı yöntemi .....	26
Şekil 3.4. Sıcak haddeleme .....	27
Şekil 3.5. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi .....	28
Şekil 3.6. Karıştırmalı döküm yöntemi .....	29
Şekil 3.7. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi .....	30
Şekil 3.8. Plazma püskürtme yöntemi .....	31
Şekil 3.9. Basınçlı döküm yöntemi .....	31
Şekil 3.10. Rheocasting döküm tekniği .....	32
Şekil 4.1. Muhtemel parçacık şekilleri .....	36
Şekil 4.2. Bilyeli öğütme cihazıyla mekanik toz üretim tekniği .....	37
Şekil 4.3. Elektroliz ile toz üretimi .....	38
Şekil 4.4. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları .....	39
Şekil 4.5. Toz metalürjisinde ana üretim aşamaları .....	39
Şekil 4.6. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları .....	41
Şekil 4.7. Tek eksenli preslemeyle ham parça üretim aşamaları .....	43
Şekil 4.8. Metal tozlarının haddelenme şekilleri: (a) dikey ve (b) yatay konumda .....	43
Şekil 4.9. İzostatik sıkıştırma prensibi (a) ıslak, (b) kuru .....	44
Şekil 4.10. Sinterleme sırasında boyun oluşumu .....	45
Şekil 4.11. Sinterleme aşamaları .....	46
Şekil 5.1. Toz metalürji yöntemiyle kompozit malzeme üretimine yönelik akış diyagramı .....	53
Şekil 5.2. Hassas terazi .....	54
Şekil 5.3. Mtops MH300HS ısıtıcılı manyetik karıştırıcı .....	55
Şekil 5.4. MTI MSK-SFM-3 marka yüksek enerjili bilyeli değirmen .....	56
Şekil 5.5. (a) Karışımın filtrelenmesi ve (b) kurutulması işlemi .....	56
Şekil 5.6. (a) Tozların dövülmesi ve (b) tozların elenmesi işlemi .....	57
Şekil 5.7. (a) Presleme kalıbı ve (b) manuel el presi .....	58
Şekil 5.8. Tüp fırın ve vakum pompası .....	59

Şekil 5.9. İndüksiyonla sıcak presleme makinesi .....	60
Şekil 5.10. Numune zımparalama ve parlatma cihazı .....	61
Şekil 5.11. Numunelerin suya doyurulması işlemi .....	62
Şekil 5.12. Numunelerin asılı kütlelerin ölçülmesi işlemi .....	63
Şekil 5.13. Vickers sertlik ölçme cihazı .....	65
Şekil 5.14. Çekme/Basma test makinesi .....	66
Şekil 5.15. Malver Mastersizer 3000 tane boyut ölçüm cihazı .....	67
Şekil 5.16. Rigaku marka SmartLab model x-ışını kırınımı (XRD) cihazı .....	68
Şekil 5.17. Jeol JSM7001F taramalı elektron mikroskobu .....	69
Şekil 5.18. Thermo Scientific marka Nicolet IS50 model FTIR spektroskopu .....	70
Şekil 6.1. (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve (b) grafen tozuna ait SEM görüntüleri .....	71
Şekil 6.2. (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve (b) grafen tozlarına ait XRD örgü desenleri .....	72
Şekil 6.3. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al alaşımının tane boyut dağılımı .....	72
Şekil 6.4. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait deneysel yoğunluk değerleri .....	73
Şekil 6.5. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait gözeneklilik oranı değerleri .....	74
Şekil 6.6. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri .....	75
Şekil 6.7. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait basma dayanımı değerleri .....	77
Şekil 6.8. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait basma dayanımı eğrileri .....	77
Şekil 6.9. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait XRD faz analizleri .....	79
Şekil 6.10. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,15GNT kompozit malzemenin FTIR spektrumu analizi .....	80
Şekil 6.11. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (b) Al-0,15GNT, (c) Al-0,30GNT, (d) Al-0,45GNT .....	81
Şekil 6.12. İndüksiyonla sıcak işlem görmüş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -GNT kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ×1000 büyütme, (b) ×5000 büyütme, (c) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,15GNT ×1000 büyütme, (d) ×5000 büyütme, (e) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 0,30GNT ×1000 büyütme, (f) ×5000 büyütme, (g) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,45GNT ×1000 büyütme, (h) ×5000 büyütme .....	83
Şekil 6.13. Al-0,15GNT kompozitinin element dağılım haritası ve çizgi taraması analizi: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c, d, e, f) element dağılım haritaları, (g) çizgi taraması analizi .....	84
Şekil 6.14. (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve (b) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> tozlarına ait SEM görüntüleri .....	85
Şekil 6.15. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> tozlarına ait XRD faz analizi .....	86
Şekil 6.16. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> tozuna ait tane boyut dağılımı .....	86
Şekil 6.17. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al alaşımı ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait deneysel yoğunluk değerleri .....	87

Şekil 6.18. Al <sub>2024</sub> Al alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait gözeneklilik oranı değerleri.....	88
Şekil 6.19. Al <sub>2024</sub> Al alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri .....	89
Şekil 6.20. Al <sub>2024</sub> Al alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait basma dayanımları değerleri .....	90
Şekil 6.21. Al <sub>2024</sub> Al alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait basma dayanımı eğrileri .....	90
Şekil 6.22. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait XRD faz analizleri .....	91
Şekil 6.23. Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2024</sub> -%1Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (b) Al <sub>2024</sub> -%3Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (c) Al <sub>2024</sub> -%6Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (d) Al <sub>2024</sub> -%9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve (e) Al <sub>2024</sub> -%12Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .	92
Şekil 6.24. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem görmüş Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı ve Al <sub>2024</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2024</sub> , (b) Al <sub>2024</sub> -%1Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (c) Al <sub>2024</sub> -%3Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (d) Al <sub>2024</sub> -%6Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (e) Al <sub>2024</sub> -%9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , (f) Al <sub>2024</sub> -%12Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	94
Şekil 6.25. Al <sub>2024</sub> -%9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> kompozitlere ait element dağılım haritası ve çizgi taraması analizi: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c-1) element dağılım haritaları.....	95
Şekil 6.26. Tozların SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı ×1000 büyütme, (b) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ×30000 büyütme ve (c) grafen toz tanecikleri ×4000 büyütme.....	96
Şekil 6.27. Tozların XRD faz analizleri: (a) Al <sub>2024</sub> 'ün XRD örgü deseni, (b) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 'ün XRD örgü deseni ve (c) grafen'in XRD örgü deseni.....	97
Şekil 6.28. Tozların tanecik boyut dağılımı: (a) Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı ve (b) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	97
Şekil 6.29. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı, Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -GNT hibrit alüminyum kompozitlerin deneysel yoğunluk değerleri.....	98
Şekil.6.30. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı, Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -×GNT hibrit alüminyum kompozitlerin gözeneklilik oranları .....	99
Şekil 6.31. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı, Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -×GNT hibrit alüminyum kompozitlerin Vickers sertlik değerleri.....	100
Şekil 6.32. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı, Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -×GNT alüminyum hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri .....	101
Şekil 6.33. Al <sub>2024</sub> alüminyum alaşımı, Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -×GNT alüminyum hibrit kompozitlerin basma dayanımı eğrileri.....	101
Şekil 6.34. Al <sub>2024</sub> , Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ve hibrit kompozitlerin XRD faz analizleri .....	102
Şekil 6.35. Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,15GNT hibrit alüminyum kompozitin FTIR spektrum analizi .....	103
Şekil 6.36. Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -GNT kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,15GNT, (b) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,30GNT, (c) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,45GNT.....	105
Şekil 6.37. (a) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,15GNT, (b) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,30GNT, (c) Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,45GNT alüminyum hibrit kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri .....	106
Şekil 6.38. Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,15GNT alüminyum hibrit kompozit malzemenin element dağılım haritası: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c-1) element dağılım haritaları.....	107
Şekil 6.39. Al <sub>2024</sub> -9Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -0,15GNT alüminyum hibrit kompozit malzemenin çizgi taraması analizi.....	108

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları .....	18
Tablo 3.2. MMK’lerde kullanılan bazı takviye elemanları .....	21
Tablo 3.3. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik esaslı takviye elemanları .....	22
Tablo 3.4. MMK üretim yöntemlerinin maliyet ve uygulama alanları bakımından karşılaştırılması...	23
Tablo 5.1. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon .....	50
Tablo 5.2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alüminyum alaşımına ait genel özellikler.....	51
Tablo 5.3. Grafen nanotabakaya ait genel özellikleri.....	51
Tablo 5.4. Silisyum nitrüre ait genel özellikler .....	52
Tablo 5.5. Vickers sertlik ölçme yöntemleri .....	64

# 1.GİRİŞ

## 1.1. Genel Bilgiler

Günümüzde artan küreselleşme ve sanayileşmeye bağlı olarak, geleneksel yöntemlerle üretilen malzeme, cihaz ve makine parçalarından beklenen performanslar yeterli olmamaktadır. Bu nedenle katma değeri yüksek, fonksiyonel ve yüksek performanslı ileri teknoloji malzemelerinin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri son yıllarda hız kazanmış, özellikle nano teknolojinin insan hayatına girmesiyle savunma sanayi, havacılık ve otomotiv sektörlerinde hafif ve dayanıklı malzeme üretimine yönelik ihtiyaç yeni nesil malzemelerin üretilmesini gerekli kılmıştır. Bu malzemelerden biri de kompozit malzemelerdir (Şenel vd., 2015).

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin ihtiyaç duyulan üstün özelliklerinin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) tek bir malzemede birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Matris malzemesine göre; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler (MMK) şeklinde sınıflandırılabilirler (Gürbüz vd., 2010). Polimer matrisli kompozitler, ana yapısı polimer olan kompozit çeşididir. Bu kompozitler; ekonomik olmaları, yoğunluklarının düşük olması, üretimlerinin kolaylığı, yalıtkanlık ve mekanik özelliklerinin iyi olması gibi özellikleri sebebiyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitler (SMK) ana yapısı seramik olan kompozitler olup yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadırlar. SMK'lerde matris malzemesi olarak  $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$ ,  $B_4C$ , TiC, TiB, TiN, AlN gibi takviye malzemeleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçaların üretimi ile uzay araçlarında, seramik matrisli kompozitler tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapısını (matrisini) metalin oluşturduğu, takviye elamanı olarak da seramiklerin (silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), silisyum karbür (SiC), zirkonya ( $ZrO_2$ ), ve alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ )) veya refrakterlerin tercih edildiği malzemelerdir. MMK'larda matris malzemesi olarak yoğunluğu düşük olan alüminyum (Al), titanyum (Ti), bakır (Cu), magnezyum (Mg), ve çinko (Zn) gibi metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. Matris malzemesinin seçiminde malzemenin karakteri (oksitlenme durumu, korozyon direnci ve mekanik özellikleri) göz önünde bulundurulmalıdır (Baydemir, 2018).

Bu çalışmada, grafen takviyeli, silisyum nitrür ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) takviyeli ve grafen- $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al2024 matrisli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Matris malzemesi olarak kullanılan Al2024 alüminyum alaşımı, mekanik özelliklerinin ve aşınma dirençlerinin yüksek olmasından dolayı havacılık ve otomotiv sektöründe en yaygın tercih edilen malzemelerden biridir. Hafif olmasına karşın sertliği nerdeyse çelik kadar iyidir. Ancak yüksek sıcaklıklarda bu özelliklerini kaybedebilmektedirler. Bünyesinde ana alaşım elemanı olarak %4,3-4,5 oranında bakır bulundurmasının yanı sıra yüksek sayılabilecek miktarda manganez (%0,5-0,65) ve magnezyum (%1,3-1,5) da bulundurmaktadır. Eser miktarda da çinko, nikel, krom ve bizmut da içerebilmektedir (Jagadish, 2015).

Takviye elemanı olarak kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , farklı sıcaklıklardaki termal şok direnci, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı gösterdiği mukavemet, üstün ısı iletkenlik, vücut sıvılarıyla tepki vermeme ve hafiflik gibi üstün özelliklere sahip seramik bir malzemedir. Aşınmanın fazla olduğu rulmanlarda, kesici takımlarda, nozullarda, yüksek sıcaklığın etkili olduğu ateşleme bujilerinde, yüksek performansın arandığı türbin bıçaklarında, biyomalzeme üretiminde, otomotiv ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bağcı, 2007; Bozkurt, 2019).

Diğer bir takviye elemanı olan grafen ise karbon esaslı seramik bir malzemedir. Çok ince bir malzeme olmasına rağmen karbon atomlarının bal peteği desenli hücreler oluşturacak şekilde dizilmeleri grafeni bilinen en güçlü malzeme yapmaktadır. Çok esnek bir malzeme olmasının yanında çok sert bir malzeme olup ayrıca katı yağlayıcı özelliğe sahiptir. Bunun yanı sıra çelikten yaklaşık 300 kat daha dayanımı yüksek bir malzemedir. Esnekliği sayesinde çeşitli yüzeylerde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Otomotiv, havacılık, telekomünikasyon, enerji depolama ve tıp gibi farklı alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Şenel vd., 2015).

## 1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında matris malzemesi olarak seçilen Al2024 alüminyum alaşımı, alüminyum alaşımları içerisinde en sert ve mekanik özellikleri en yüksek olanıdır. Havacılık ve otomotiv sanayinde en çok tercih edilen alüminyum alaşımı olmasından dolayı mekanik dayanımının olabildiğince yüksek olması istenmektedir. Yapılan bu çalışmada, Al2024-Grafen, Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Grafen hibrit kompozitler üretilerek Al2024 alüminyum alaşımına göre mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda matris malzemesi olarak Al2024 alüminyum alaşımı kullanılırken, takviye olarak da seramik esaslı Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve karbon esaslı grafen nanotabaka (GNT) kullanılmıştır. Kompozitlerin üretim yöntemi olarak toz metalürjisi yöntemi, indüksiyonla sıcak işlem ve sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. İmal edilen kompozitlerin karakterizasyonu için deneysel yoğunlukları, Vickers sertlikleri, gözeneklilik oranları, basma dayanımları ve mikroyapıları incelenmiştir. Faz analizleri için X-ışını kırınımı (XRD) cihazından, mikro yapı incelemeleri içinse taramalı elektron mikroskopundan (SEM) faydalanılmıştır.

## 1.3. Özgün Değer

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında; Al2024-grafen ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesine yönelik birtakım çalışmaların olduğu görülmüştür. Buna karşın, Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-grafen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmayı özgün yapan bir diğer husus ise; kompozit malzeme üretim tekniğidir. Üretilen kompozitlere sinterleme işlemi sonrasında indüksiyonla sıcak deformasyon işlemi uygulanmıştır. Al2024-grafen, Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-grafen kompozitlerin sıcak deformasyon işlemi öncesinde ve sonrasında mekanik özellikleri ve mikroyapısı bu çalışmayla ilk kez incelenmiştir.

#### 1.4. Tez Düzeni

Bu çalışmanın birinci bölümünde kompozitlerin üretiminde kullanılan matris malzemesi (Al2024) ve takviye malzemeleri (grafen ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ile alakalı genel bilgilere ve çalışmanın amacına yer verilmiş olup tez düzeni anlatılmıştır. İkinci bölümde, alüminyum matrisli grafen ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, kompozit malzemeler ve genel özelliklerinden, sınıflandırılmasından ve metal matrisli kompozitlerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, kompozit malzeme üretmek için tercih edilen toz metalürjisi yöntemine yer verilmiştir. Toz metalürjisinin avantaj ve dezavantajları, toz metalürjisi ile üretilen parçaların özellikleri, metal tozlarının üretim teknikleri ve toz metalürjisi ile parça üretim yöntemleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde, kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemelerin (Al2024, grafen, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) genel özellikleri ve toz metalürjisi ile kompozit malzeme üretiminin aşamaları anlatılmıştır. Ayrıca üretilen kompozitlerin karakterizasyon yöntemleri izah edilmiştir. Altıncı bölümde, grafen takviyeli, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli ve grafen-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli Al2024 matrisli hibrit kompozitlerin mekanik ve mikroyapı incelemelerine yer verilmiştir. Mekanik özelliklerinin analizinde, yoğunluk, sertlik, gözeneklilik oranı ve basma dayanımı değerleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde ise XRD ve SEM-EDX analizlerine yer verilmiştir. Yedinci bölümde ise yapılan araştırmaya bağlı olarak elde edilen sonuçlar izah edilmiş olup ileride yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitler ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapı incelemelerine yönelik çalışmalar gözden geçirilip aşağıda özetlenmiştir.

### 2.1. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

**AbuShanab vd. (2020)** çalışmalarında, toz metalürjisi yöntemini kullanarak Al2024 alüminyum alaşımına ağırlıkça %2'ye kadar farklı oranlarda grafen takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri numunelere 460 ve 560 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulamışlardır. Elde ettikleri numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleriyle korozyon hızını incelemişlerdir. Sonuç olarak, grafen miktarının artmasıyla yapıda gözeneklilik oranının arttığı tespit edilmiştir. Her iki sinterleme sıcaklığında da yoğunluğun nispeten azaldığını gözlemlemişlerdir. Sinterleme sıcaklığının ve takviye oranının artmasına bağlı olarak mukavemet değerlerinde önemli artışlar gözlenmiş ve mikro sertlik değeri 1051,2 MPa olarak bulunmuştur. Aynı şartlar altında grafen içeriğinin artmasıyla korozyon hızının azaldığını saptamışlar ve en düşük korozyon hızı ağırlıkça %2 grafen takviyesi ile elde edildiğini gözlemlemişlerdir (AbuShanab vd., 2020).

**Chen vd. (2020)** çalışmalarında, toz metalürji yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine ağırlıkça %0,5, %0,8, %1 ve %1,5 oranlarında grafen takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, matris malzemeye yapılan grafen takviyesinin yoğunluk değerlerini düşürdüğünü ve sertlik değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir. En düşük deneysel yoğunluk değerini %1,5 grafen takviyesi yapılmış kompozitte 2,596 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır. En yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla 180,9±1 HV ve 524 MPa olarak %1 grafen takviyesi yapılmış alüminyum esaslı kompozit malzemede elde etmişlerdir. Mikroyapı incelemelerinde ise ağırlıkça %1,5'lik grafen takviyesi sonucu mekanik özelliklerin, grafenin topaklanması sebebiyle önemli oranda düştüğünü tespit etmişlerdir (Chen vd., 2020).

**Gürbüz vd. (2018)** yapmış oldukları çalışmada, grafen takviyesi, sinterleme süresi ve sıcaklığının alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranında

eklenen grafen nanotabaka (GNT) takviyeli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını 550, 600 ve 630 °C sinterleme sıcaklıklarında ve 60, 120, 180 ve 300 dk sinterleme sürelerinde incelemişlerdir. Sonuç olarak, ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinde 630 °C sinterleme sıcaklığı ve 180 dk sinterleme süresinde en iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. Bu koşullar altında elde edilen yoğunluk değeri 2,52 g/cm<sup>3</sup> olurken sertlik değeri ise 57 HV olmuştur. Artan takviye miktarıyla grafen topaklanma eğilimi göstermiş ve mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir (Gürbüz vd., 2018).

**Kaykılarlı (2018)** yapmış olduğu çalışmada, Al-4Cu alaşımına mekanik alaşımlama tekniğiyle (5, 7 ve 9 saatlik sürelerde) ağırlıkça %0,25, 0,5, 1 oranlarında grafen takviyesi yapmış ve elde ettiği kompozitlere 590 °C sıcaklıkta sinterleme işlemi uyguladıktan sonra numuneleri karakterizasyon işlemlerine tâbi tutmuştur. Sonuç olarak, grafen ilavesi yoğunluğu artırmış olsa da en iyi sonuç %0,5 grafen ilavesi ile 2,639 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri (103,29 HV) ise yine %0,5 grafen takviyesi ve 5 saatlik mekanik alaşımlama süresinde elde edilmiştir. Aşınma dirençleri ise artan grafen ilavesiyle beraber artmakta olup en iyi aşınma direnci sonucu 9 saatlik mekanik alaşımlama süresinde elde etmiştir (Kaykılarlı, 2018).

**Kumar vd. (2020)** karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine değişik oranlarda R-cam elyaf ve grafen ilavesi yaparak hibrit kompozit üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin korozyon davranışları ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kompozit malzemeye %1'e kadar olan grafen takviyelerinde basma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Farklı kompozisyonlarda farklı değerler gösterse de en iyi çekme dayanımını %3 R-cam ve %0,5 grafen ilavesi ile elde etmişlerdir. Korozyon hızı incelemelerinde ise bütün kombinasyonlarda artan grafen ilavesiyle korozyon hızının azaldığını gözlemlemişlerdir (Kumar vd., 2020).

**Öztop ve Gürbüz (2017)** yapmış oldukları çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak atık alüminyum içecek kutularından elde ettikleri matris malzemesine ağırlıkça %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında grafen takviyesi yaparak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, ağırlıkça %0,1 oranında grafen takviyesiyle en yüksek sertlik değerine (80,05 HV) ve darbe

dayanımına (30,04 J) ulaşılmıştır. Bu değerden sonra sertlik değerinin ve darbe dayanımının grafenin topaklanmasına bağlı olarak düştüğünü belirlemişlerdir. Kompozit malzemeye yapılan grafen takviyelerinin yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerlerini olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. En yüksek çekme dayanımını (158,96 MPa) ise ağırlıkça %0,3 takviye oranında elde etmişlerdir (Öztop ve Gürbüz 2017).

**Polat (2020)** yaptığı çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine hacimce %50 titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) / %50 bor karbür (B<sub>4</sub>C) ve grafen (%0,25, 0,5, 1) ilavesi yaparak hibrit kompozitler üretmiş olup mekanik ve termal özelliklerini incelemiştir. İnceleme sonucunda, matris malzemeye yapılan grafen takviyesi arttıkça gözeneklilik oranı değeri de artmakta olup en yüksek gözeneklilik oranını hacimce %1 grafen takviyesinde elde edilmiştir. Al2024/TiB<sub>2</sub>/grafen kompozitlerin akma ve basma dayanımları artan grafen içeriği ile artmakta olup en yüksek değerler hacimce %1 grafen takviyesinde sırasıyla 253 MPa ve 260 MPa olarak bulunmuştur. Bu katkı oranında sertlik değeri ise 57 HB olarak bulunmuştur. Al2024/B<sub>4</sub>C/grafen hibrit kompozitler de ise en iyi mekanik özellikler (akma dayanımı: 440 MPa, basma dayanımı: 486 MPa ve sertlik değeri: 196 HB) hacimce %0,25 grafen takviyesinde elde edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda ise en iyi sonucun hacimce %0,25 oranında grafen takviyeli Al2024/TiB<sub>2</sub> kompozitte %50 oranında artış sağlarken Al2024/B<sub>4</sub>C kompozitte ise %40 oranında artış belirlenmiştir (Polat, 2020).

**Pul (2019)** yapmış olduğu çalışmada karbon nanotüp (KNT) ve grafen takviyeli Al2024 matrisli kompozitleri vorteks yöntemiyle üreterek aşınma ve işlenebilirliklerini incelemiştir. Matris malzemesine %0,5, %1, %2 ve %4 oranlarında grafen takviye edilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, vorteks yöntemiyle kompozitlerin üretiminin çok zor olduğu ve homojen bir yapı elde edilemediği belirlenmiştir. Artan takviye miktarıyla beraber sertliğin düştüğü gözlemlenmiş ve en yüksek sertlik değeri %0,5 grafen takviyesinde 45,8 HB olarak ölçmüştür. Aşınma deneyleri sonucunda takviye miktarının artmasının aşınma direncini olumsuz etkilediği belirlenmiştir İşlenebilirlik deneylerinde ise bütün takviye oranlarında yüzey pürüzlülük değerinin takviyesiz malzemeye göre iki kattan fazla arttığı belirlenmiştir (Pul, 2019).

**Shin vd. (2015)** yaptıkları çalışmada, bilyeli öğütme ve sıcak haddeleme tekniklerini içeren toz metalürjisi yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine %0,3, %0,5 ve %0,7 oranlarında grafen takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri numunelerin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemiştirlerdir. Sonuç olarak, takviye miktarının artmasıyla çekme dayanımının da arttığını, en yüksek değerinin ise ağırlıkça %0,7 grafen takviyesinde 700 MPa olarak tespit etmişlerdir. Bu değer Al2024 alüminyum alaşımının çekme dayanımından iki kat büyük olduğu sonucuna varmışlardır (Shin, 2015).

**Singh (2021)** çalışmasında, karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine ağırlıkça %0,5, %1, %1,5, %2, %3 ve %4 oranlarında grafen takviyesi yaparak elde ettiği kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak, matris malzemeye ağırlıkça %3'e kadar yapılan grafen takviyesinde mekanik özelliklerin geliştiğini ve %4 oranındaki grafen takviyesinde ise takviye malzemesinin topaklanmasına bağlı olarak mekanik özelliklerin düştüğünü gözlemlemiştir. Gerçekleştirilen mekanik testler sonucu en yüksek çekme dayanımı ve sertlik değeri sırasıyla 245,53 MPa ve 169,26 HV olarak bulunmuştur (Singh, 2021).

**Şenel vd. (2018)** yaptıkları çalışmada, grafen (ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5) ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik ve aşınma özelliklerini incelemiştirlerdir. Kompozit malzemeleri üretmek için toz metalürjisi yöntemini kullanmışlardır. Üretilen numuneleri 630 °C ve 180 dk sinterleme koşullarında sinterlemiştirlerdir. Sonuç olarak, grafen ilavesiyle alüminyum matrisli kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. En iyi sonuçlar ağırlıkça %0,1 grafen takviyesi ile elde edilmiş olup en yüksek sertlik değeri de  $57 \pm 2,5$  HV olarak bulunmuştur. Yine en düşük aşınma oranı (10 ve 40 N yük için  $12 \times 10^{-5}$  ve  $18 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup> / Nm) ve en düşük kütle kaybı (10 N ve 40 N yük için 1,6 ve 9,7 mg) ağırlıkça %0,1 grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitte elde edilmiştir (Şenel vd., 2018a).

**Şenel vd. (2019)** yapmış oldukları çalışmalarda, ağırlıkça %0,1 ile %0,5 arasında değişen miktarlarda grafen nanopartikülleri Al-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrisine toz metalürjisi tekniğiyle ekleyerek hibrit kompozitler üretmişler ve karakterizasyon işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, en yüksek sertlik değerini  $82 \pm 3$  HV olarak %0,5 grafen takviyesiyle elde etmişlerdir. Bunun yanında en yüksek basma ve

çekme dayanımını ise ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinde sırasıyla 334±9 MPa ve 132 MPa olarak tespit etmişlerdir. Ancak ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğiliminden dolayı hibrit kompozitin mekanik özelliklerinin azaldığını saptamışlardır. SEM analizinde ise Al-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,1 grafen hibrit kompozitte grafen nanopartiküllerin matris içerisinde homojen dağıldığını ve partiküller arasında iyi bir bağlanma olduğunu belirlemişlerdir (Şenel vd., 2019).

**Şenel ve Gürbüz (2020)** yaptıkları çalışmada, bor karbür (B<sub>4</sub>C) ve GNT (ağırlıkça %0,15, 0,30, 0,45) takviyeli Al matrisli hibrit kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Kompozitteki B<sub>4</sub>C içeriğini yapmış oldukları deneysel çalışmayla %30 olarak belirleyip Al-30B<sub>4</sub>C karışımına farklı oranlardaki GNT takviyesinin mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, %0,15 GNT takviyesiyle en yüksek yoğunluk (2,54 g/cm<sup>3</sup>), basma dayanımı (244±5 MPa), sertlik değeri (109,8 HV) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4) elde edilmiştir. Bu değerden sonraki takviyelerde ise grafen topaklanma eğilimi göstermiş olup mekanik ve mikroyapı özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. SEM analizlerinde ise %0,15 GNT ilavesinde topaklanma olmaksızın takviye malzemesinin tane sınırlarına yerleştiğini gözlemlemişlerdir (Şenel ve Gürbüz, 2020a).

**Şenel ve Gürbüz (2020)** yaptıkları başka bir çalışmada, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ağırlıkça %1, 3, 6, 9) ve grafen (%0,1, 0,3, 0,5) takviyeli Al matrisli hibrit kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Matris içerisindeki Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesini yapmış oldukları deneysel çalışmayı esas alarak %9 olarak belirlemişlerdir. Al-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-×GNT kompozit malzemeye farklı oranlardaki GNT takviyesinin mikroyapı ve aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda, %0,1GNT takviyesiyle en yüksek sertlik (66 HV), en yüksek yoğunluk (2.59 g/cm<sup>3</sup>) ve en düşük gözeneklilik oranı elde edilmiştir. Yine %0,1GNT takviyesiyle en düşük kütle kaybı, sürtünme katsayısı ve aşınma oranını elde etmişlerdir. Ancak %0,1 GNT takviyesinden sonra grafenin topaklanma eğilimi gösterdiğini ve kompozitin mekanik özelliklerinin düştüğünü tespit etmişlerdir (Şenel ve Gürbüz, 2020b).

**Şenel ve Gürbüz (2021)** toz metalürjisi yöntemini kullanarak hibrit yapıda Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GNT kompozitleri üreterek mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit yapıdaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarını yapılan çalışma sonucu en yüksek yoğunluk ve sertlik değerini vermesi sebebiyle %30 olarak belirlemişlerdir.

Al-30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-xGNT hibrit kompozitleri üretip farklı grafen takviyelerinin kompozit yapınının mekanik özelliklerine etkisini incelemiştirlerdir. Kompozit yapıya ilave edilen grafen miktarının artmasına bağlı olarak yoğunluğun düştüğünü gözlemlemiştirlerdir. En yüksek sertlik değerini %0,1 grafen ilavesiyle 63,1 HV olarak bulmuşlardır. Yine aynı katkı oranında en yüksek basma dayanımını 188±5 MPa ve yoğunluğu 2,67 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır. %0,1 grafen takviyesinden sonraki katkı oranlarında ise grafen topaklanma eğilimi göstermiş ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemiştir (Şenel ve Gürbüz, 2021).

## 2.2. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

**Karakoç (2020)** toz metalürjisi yöntemini kullandığı çalışmasında, Al7075 matris malzemesine değişik oranlarda (ağırlıkça %5, 10 ve 15) B<sub>4</sub>C takviyesi ve ağırlıkça %2 oranında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapmıştır. Elde ettiği farklı oranlardaki B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlere %2'lik Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu inceleme sonucunda, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin kompozit malzemenin yoğunluk değerlerini düşürdüğünü ve gözenekliliği artırdığını belirlemiştir. Sertlik analizlerinde ise Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi, B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerini arttırdığını tespit etmiştir. En yüksek sertlik değerini %15 B<sub>4</sub>C ve %2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli hibrit kompozitte 110 HB olarak belirlemiştir. Aşınma analizlerinde ise Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin aşınma miktarını azalttığını ancak malzeme yüzeyinde derin çiziklerin oluşmasına neden olduğunu belirlemiştir (Karakoç, 2020).

**Mohanavel vd. (2020)** çalışmalarında, AA6351 matris malzemesine karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak ağırlıkça %1, 2 ve 3 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemelerin mikroyapı ve tribolojik özelliklerini incelemiştirlerdir. Sonuç olarak, artan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesine bağlı olarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir. Kompozit malzemelerin en yüksek sertlik ve gerilme mukavemet değerlerini %3 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış kompozitlerde sırasıyla 94 HV ve 210 MPa olarak bulmuşlardır. Aşınma davranışı incelemelerinde ise takviye miktarının artmasına bağlı olarak aşınma oranlarının azaldığını ve en düşük aşınma oranının %3 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli numunede görüldüğünü belirlemiştirlerdir (Mohanavel vd., 2020).

**Öztop, (2017)** yapmış olduğu çalışmasında, karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak atık alüminyum içecek kutularından elde ettiği alüminyum matrisine ağırlıkça %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında  $Si_3N_4$  ve grafen takviyeleri yaparak kompozit malzemeler üretmiş ve elde ettiği kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile mikroyapılarını incelemiştir. Sonuç olarak; matris malzemeye yapılan  $Si_3N_4$  takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiğini tespit etmiştir. Elde ettiği kompozit malzemelerin en yüksek sertlik, çekme dayanımı, yoğunluk değeri ve darbe dayanımlarını ağırlıkça %1 oranındaki  $Si_3N_4$  takviyesinde sırasıyla 87,9 HV, 105,17 MPa  $2,53.g/cm^3$  ve 13,18 J olarak tespit etmiştir (Öztop, 2017).

**Raghavendra Rao ve Mohan (2020)** çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak saf alüminyum matrisine ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında  $Si_3N_4$  takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemelerin mekanik ve mikroyapılarını incelemiştir. Sonuç olarak, matris malzemesine %8'e kadar yapılan takviyelerde mekanik özellikler iyileşirken %10'luk takviye oranında mekanik özelliklerin düştüğünü belirlemiştir. Yaptıkları analizler sonucu en yüksek sertlik değeri ve çekme dayanımını %8  $Si_3N_4$  takviyeli kompozitlerde sırasıyla 54 HB ve 178,5 MPa olarak bulmuşlardır. Mikroyapı incelemelerinde ise takviye malzemesinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını ancak %10 takviye oranında ise topaklandığını tespit etmişlerdir (Raghavendra Rao ve Mohan, 2020).

**Ramu vd., (2021)** yapmış oldukları çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al6061 matris malzemesine ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4 oranlarında  $Si_3N_4$  takviyesi yapmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemelere 3 geçişli eş kanallı açılmalık presleme işlemi (EKAP) uygulamışlar ve mekanik özellikleri ile tribolojik özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak, matris malzemeye artan oranlarda yapılan  $Si_3N_4$  takviyesinin ve EKAP işleminin kompozit yapının mekanik özelliklerini artırdığını tespit etmişlerdir. En yüksek yoğunluk ve sertlik değerlerini %4  $Si_3N_4$  takviyesi yapılmış ve EKAP işlemi uygulanmış numunelerde sırasıyla  $\sim 2,84 g/cm^3$  ve  $\sim 85 HB$  olarak bulmuşlardır. Aşınma testlerinde ise artan takviye oranına ve uygulanan EKAP işlemine bağlı olarak, EKAP işlemi tekrarlandıkça ve takviye miktarı arttıkça aşınma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir (Ramu vd., 2021).

**Reddy ve Chennakesava Reddy (2012)**, ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemini kullanarak hacimce %10, %20 ve %30 oranında  $Si_3N_4$  takviyeli

Al2024 matrisli kompozitleri üretmek için sertlik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, artan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesiyle beraber elastiklik modülü ve sertliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınma testi incelemelerinden ise artan takviye hacmiyle beraber aşınma oranının da giderek düştüğünü gözlemlemişlerdir (Reddy ve Chennakesava, 2012).

**Sharma vd., (2015)** yılında yapmış oldukları bir çalışmada, AA6082 matris malzemesine karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak ağırlıkça %3, 6, 9 ve 12 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapmışlardır. Elde ettiği kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile mikroyapılarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesine bağlı olarak yoğunluk değerleri arttığını tespit etmişlerdir. En yüksek yoğunluk, mikro sertlik ve gerilme dayanımı değerlerini %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerde sırasıyla 2,75 g/cm<sup>3</sup>, 93,5 HV ve 201 MPa olarak bulmuşlardır. Mikroyapı incelemelerinde ise takviye malzemesinin matris içerisine homojen bir şekilde dağılım gösterdiğini belirlemişlerdir (Sharma vd., 2015).

**Şenel vd., (2018)** yapmış oldukları çalışmalarında, toz metalürjisi yöntemini kullanarak saf alüminyum alaşımına değişik oranlarda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12) takviyesi yapmışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, matris malzemesine %9'a kadar yapılan takviye oranlarında kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştiğini belirlemişlerdir. En yüksek yoğunluk, sertlik ve basma dayanımını %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerde sırasıyla 2,55 g/cm<sup>3</sup>, 57,4 HV ve 268 MPa olarak bulmuşlardır. Mikroyapı incelemelerinde ise %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi sonucu, takviye malzemesinin topraklandığını ve mekanik özelliklerin buna bağlı olarak düştüğünü belirlemişlerdir (Şenel vd., 2018b).

**Vinothkumar vd. (2020)**, Al2024 matris malzemesine uygulanan sürtünmeli karıştırma kaynak işleminde Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve AlN'ü takviye malzemesi olarak kullanmışlar, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kaynak bölgesinde takviye malzemelerinin kaynak boyunca yeniden ve düzgün bir şekilde kristalleştiğini gözlemlemişlerdir. Kaynak bölgesindeki mikro sertliğin ise 58,1 HV değerine yükseldiğini belirlemişlerdir. Takviye miktarının artmasıyla korozyon dirençlerinin arttığını gözlemlemişlerdir (Vinothkumar, 2020).

**Xiu vd. (2009)** yapmış oldukları çalışmada, sıkıştırırmalı döküm yöntemini kullanarak Al2024 matris malzemesine hacimce %36 oranında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi

yapmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemeye ekstrüzyon işlemi uygulamışlar ve bu işlemin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, ekstrüzyon işlemi kompozit malzemenin elastisite modülünü ~%33 oranında ve gerilme mukavemetini ise ~%178 oranında arttırdığını tespit etmişlerdir. Mikroyapı incelemelerinde ise  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesinin matris içerisinde topaklanmış olduğunu ve homojen dağılmadığını tespit etmişlerdir. Kompozit malzemeye yapılan ekstrüzyon işlemi ile topaklanmaların birazda olsa giderildiğini ancak tamamen engellenemediğini belirlemişlerdir (Xiu vd., 2009).

**Xiu vd.,(2011)** yapmış oldukları diğer bir çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemini kullanarak hacimce %45, 50 ve 55 oranlarında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al2024 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozit numunelere T6 ısıtma işlemi uygulamışlar ve ısıtma işleminin mekanik özellikler ile mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kompozit malzemeye yapılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesi ile eğilme mukavemetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Fakat T6 ısıtma işlemiyle beraber eğilme mukavemetleri hacimce %45 takviyeli kompozitlerde ~%40,7 artarak 786,5 MPa'a, %50 takviyeli kompozitlerde ~%35,7 artarak 728,6 MPa'a ve %55 takviyeli numunelerde ~%26,9 artarak 668,8 MPa'a çıkmıştır. Mikroyapı incelemelerinde ise takviye malzemesinin matris içerisine homojen bir şekilde dağıldığını ve herhangi bir döküm hatası oluşmadığını gözlemlemişlerdir (Xiu vd., 2011).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; belli bir  $\text{Si}_3\text{N}_4$  veya grafen katkı oranına kadar toz metalürjisi veya döküm yöntemiyle üretilmiş Al2024 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, sinterleme işleminin toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Al2024-grafen veya Al2024- $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozit yapılarında kompozitin mikroyapısını yoğunlaştırdığı ve gözeneklilik oranını azalttığı görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, toz metalürjisi ve sinterleme sonrası sıcak deformasyon işlemi birlikte uygulanarak yüksek yoğunluğa sahip Al2024-grafen, Al2024- $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve Al2024- $\text{Si}_3\text{N}_4$ -grafen kompozit yapılar ilk kez üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin sinterleme işlemi ve indüksiyonla sıcak deformasyon işlemi sonrasında mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenerek karşılaştırılmıştır. Bu sayede, grafen/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  katkı oranının ve indüksiyonla sıcak deformasyon işleminin Al2024 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi araştırılmıştır.

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Endüstride kullanılan geleneksel mühendislik malzemeleri genel manada üç gruba ayrılmıştır. Bunlar; metaller, seramikler ve polimerlerdir. Bu malzemelerin her biri tek başlarına farklı üstün özelliklere sahip olmalarına rağmen çoğu yerde tek başlarına kullanımı yetersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle hızla gelişen teknolojik gelişmeler sonucunda endüstrinin artan ihtiyaçlarına cevap verebilmek için yeni nesil malzemelere ihtiyaç duyulmuş ve kompozit malzemeler geliştirilmiştir.

Bu bölümde ise kompozit malzemelerin genel özellikleri, sınıflandırılması ve metal matrisli kompozitler hakkında bilgiler verilecektir.

#### 3.1. Tanımı ve Genel Özellikleri

İki veya daha fazla malzemenin istenilen üstün özelliklerinden tek bir yapıda faydalanmak amacıyla malzemelerin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşan, yeni ve tasarlanabilen malzemelere kompozit malzeme denir (Karadeniz, 1989). Kompozit malzemeler göstermiş oldukları üstün özelliklerinden dolayı; otomotivde, savunma ve uzay sanayinde, medikal uygulamalarda, spor donanımlarında, yüksek ve çok düşük sıcaklık uygulamalarında ve denizcilik gibi pek çok alanda yaygın kullanım alanına sahiptir.

Sanayi uygulamalarında kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemelerinin bir veya birkaç özelliğinin iyileştirilmesi amacıyla üretilmektedir. Bu özellikler;

- Çekme, basma, eğme ve sertlik özellikleri
- Korozyon ve aşınma dirençleri
- Elektrik ve ısı iletkenliği
- Yüzey özellikleri
- Ses ve ısı yalıtım özellikleri
- Termal şok dirençleri
- Yoğunluk ve ağırlık
- Maliyet

şeklinde listelenebilir (Pul, 2010).

Kompozit malzemelerin olumlu yanlarının yanında bazı olumsuz yanları da mevcuttur. Bunlar;

- Matris ve takviye malzemelerinin pahalı olması
- Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olması
- İşlenebilirlik ve montaj durumlarının kısıtlı olması
- Üretimlerinin uzun zaman alması ve uğraştırıcı olması
- Ürün kalitesinin üretim yöntemlerine ve insan faktörüne bağlı olması
- Birçok kompozitin geri dönüşümünün olmaması

şeklinde sıralanabilir (Mutlu, 2019).

### **3.2. Sınıflandırma**

Üretilen kompozitler de kullanılan malzemelerin çok çeşitli olması ve kompozit üretim yöntemlerinin çok çeşitlilik göstermesi sınıflandırma işleminin kesin olarak yapılmasını pek mümkün kılmamaktadır. Ancak genel olarak matris malzemesine ve takviye elemanın şekline göre sınıflandırma yapılabilmektedir.

#### **3.2.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma**

Matris malzemesine göre kompozitler aşağıdaki gibi üç grupta sıralanabilir.

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

##### **3.2.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer matrisli kompozitler, endüstride kendisine geniş bir kullanım alanı yer etmiş petrokimya ürünleridir. Ucuz ve işlenebilirlikleri kolaydır. Seramik ve metal matris kompozitlerle kıyaslanacak olursa mekanik özellikleri düşük olup düşük sıcaklıklarda kullanılabilirler. Kullanıldıkları ortamdaki nem ve sıcaklık faktörleri mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir (Ekici, 2004).

Polimer matrisli kompozitlerde iki tür matris malzemesi kullanılır. Bunlar; termoset ve termoplastik matrislerdir. Termoset matrisler, ısı dirençleri yüksek olup lif takviyeli kompozit yapımında daha sık kullanılırlar. Üretimi gerçekleşen kompozitin tekrar ısıtılarak şekillendirilmeleri mümkün değildir. Zayıf yapıdırlar. Geri dönüştürülebilirler ve tekrar şekillendirilebilirler. Geri dönüşüm işlemi yapılırken kimyasal özellikleri değişmez (Kaya, 2016; Ekici, 2004).

Polimer matrisli kompozitler, havacılık sanayii uygulamalarında, yarış arabalarında, su tankı ve tekne yapımında, spor donanımlarında vb. alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şenel, 2018).

### **3.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramik matrisli kompozitler düşük yoğunluğa sahip olduklarından hafiftirler. Oksidasyon dirençleri düşük olmasından dolayı da yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler. Çok sert ve kırılındırlar bu nedenle liflerle takviye edilerek kullanılırlar. Kimyasallara ve aşınmaya kaşı dirençlidirler. Üstün özelliklere sahip bu malzemelerin kırılma toklukları ve anî sıcaklık değişimleri karşısında gösterdikleri dayanımın düşük olması kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu olumsuz iki özelliğinden dolayı kullanımı sırasında herhangi bir plastik deformasyon göstermeden ani bir şekilde hasarlanması faciayla sonuçlanabilmektedir (Hiçyılmaz, 1999).

Seramik matrisli kompozitlerin anî kırılmalarının önüne geçilmesi ve kırılma tokluğunun artırılması amacıyla fiberler ile takviye edilerek dayanımları 20 kat artırılabilir. Yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren otomobil parçaları, türbin kanatları ve rotorlarda, silindir gömlekleri ve silindir başlığında, kendinden yağlamalı yatak yapımında, kesici takım yapımında, yalıtkan malzeme yapımında seramik matrisli kompozitler kullanılmaktadır (Hiçyılmaz, 1999; Bayar, 2009).

### **3.2.1.3. Metal Matrisli Kompozitler**

Metal matrisli kompozitler, ana yapısını metalin veya metal alaşımının oluşturduğu takviye yapısını ise karbürlerin, nitrürlerin, oksitlerin, refrakterlerin veya karbon yapılarının oluşturduğu kompozitlerdir. Sağlamış oldukları üstün mekanik özelliklerinden ve geri dönüştürülebilme olanaklarında dolayı endüstri uygulamalarında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Ekici, 2004).

Metal matris kompozitlere ait diğer bilgiler üçüncü bölümün üçüncü kısmında ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

### **3.2.2. Takviye Malzemesinin Şekline ve Yapısına Göre Sınıflandırma**

Kompozit malzemelerde istenilen özelliklere göre farklı takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları, elyaf (fiber), parçacık (partikül) ve katmanlı (laminer) olanlarıdır.

### **3.2.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Bu yapılar ince fiberlerin takviye elemanı olarak kullanılması sonucu ortaya çıkmıştır. Fiberlerin kompozit içerisindeki konumu ve yönü kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Takviye malzemeleri sürekli ve süreksiz fiberler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Fiber takviyeli kompozitlerde uygulanan yükü fiberler karşılamaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri büyük ölçüde matris ile takviye arasında kurulan bağa bağlıdır. Bu bağ da nem ve matris içerisindeki boşluktan büyük ölçüde etkilenmektedir. Hafif olmaları, mukavemet derecelerinin yüksek olması ve kuvvet karşısında şeklini koruması bu kompozitleri uzay ve havacılık sektörünün aranan malzemesi yapmaktadır (Mutlu, 2019; Bayar, 2009).

### **3.2.2.2. Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozitler**

Parçacık takviyeli kompozitler, takviye malzemesinin mikroskobik ölçekte bir veya iki boyutlu parçacıklar şekilde matris malzemesiyle birleştirilmesiyle elde edilen kompozitlerdir. Kompozitlerin mukavemetini büyük ölçüde eklenen partiküller belirlemektedir. En yaygın kullanılan takviye elemanları;  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$  ve son zamanlarda grafendir (Bayar, 2009).

### **3.2.2.3. Tabakalı (Laminar) Kompozitler**

Tabakalı kompozitler çok eskilerden beri kullanıla gelen ve çokça tercih edilen bir kompozit türüdür. Fiber yapıları kompozit tabakaların fiber yönleri farklı yönlere gelecek şekilde üst üste dizilmesiyle elde edilen yüksek mukavemetli kompozitlerdir. Fiber kompozitlerin aksine ısıya ve neme dayanıklıdırlar. Metallerle kıyaslandıklarında hafif ve mukavemet değerleri yüksektir (Kaya, 2016).

## **3.3. Metal Matrisli Kompozitler**

Teknolojik gelişmeler sonucu endüstride kullanılmakta olan mevcut mühendislik malzemeleri ihtiyaçları karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanması için metal matrisli kompozitlerin (MMK) geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir.

MMK'lar, genelde alüminyum (Al), titanyum (Ti), nikel (Ni), bakır (Cu) ve magnezyum (Mg) gibi sünek bir matris malzemesi ile alümina ( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür (SiC) ve grafen (GR) gibi takviye malzemelerinin karıştırılarak elde edilen

yeni ve üstün özellikli malzemelerdir. MMK'lar matris malzemesinin iyi şekillendirilebilme ve yüksek tokluğu ile takviye elemanının yüksek mukavemet, iyi termal şok direnci ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerini tek bir malzemede toplayabilmektedir (Ekici, 2004; Mutlu, 2019).

MMK'ların tercih edilme sebepleri; yüksek mukavemet değerleri, yüksek termal şok dirençleri, aşınmaya ve korozyona karşı üstün dirençleri, geri dönüştürülebilir olması, üstün yüzey kalitesi sunabilmesi, düşük yoğunluğu, yüksek elektriksel ve yüksek termal iletkenliği vb. gösterilebilir (Ekici, 2004; Mutlu, 2019).

MMK'lar, otomotiv, savunma sanayi, uzay ve uçak sanayi, elektrik-elektronik endüstrisi, ulaşım, spor ekipmanları, biyomedikal uygulamalar dahil bir çok alanda kullanılmaktadır. Tablo 3.1'de MMK'ların kullanıldığı bazı uygulamalar gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları (Gültaş, 1998)

Takviye Elemanı	Matris	Uygulama alanı
Grafit	Alüminyum	Uydu parçaları, güdümlü mermiler
	Magnezyum	Uydu parçaları
	Kurşun	Akümülatör parçaları
	Bakır	Elektrik kontaktörleri, yatak malzemeleri
Bor	Alüminyum	Kompresör kanatları
	Magnezyum	Anten yapıları
	Titanyum	Jet motoru fan kanatları
SiC kaplı bor	Alüminyum	Jet motoru fan kanatları
	Titanyum	Yüksek sıcaklık yapıları ve fan kanatları
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Alüminyum	Füzyon güç reaktörlerinde süper iletken durdurucular
	Kurşun	Akümülatör parçaları
	Magnezyum	Helikopter parçaları
SiC	Alüminyum	Yüksek sıcaklık yapıları motor parçaları
	Titanyum	
	Kobalt esaslı süper alaşım	Yüksek sıcaklıklarda çalışan motor parçaları
Molibden, Tungsten	Süper alaşım	Yüksek sıcaklıklarda çalışan motor parçaları

### **3.3.1. Matris Malzemeleri**

Birçok metal ve metal alaşımları olmasına rağmen kompozit malzeme üretimi için her malzeme matris malzeme olarak tercih edilememektedir. Tercih edilen malzemenin hafif olması, kolay elde edilebilmesi ve maliyet açısından zorlayıcı olmaması gerekir. Matris malzemesi seçerken, malzemenin yoğunluğunun düşük olması, tok bir malzeme olması ve şekillendirilebilir bir malzeme veya türevi olması büyük önem arz eder. MMK'ların üretimi için genellikle; alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, çinko ve nikel ve türevleri matris malzemesi olarak seçilmektedir. Ancak düşük yoğunlukları, düşük ergime sıcaklıkları, maliyetlerinin düşük olması ve geri dönüştürülebilir olması sebebiyle alüminyum ve alaşımları tercih yapılırken genellikle birinci sırayı alır (Güldaş, 1998).

MMK'larda en yaygın kullanılan matris malzemeleri aşağıda kısaca anlatılmıştır.

#### **3.3.1.1. Alüminyum Alaşımları**

Alüminyum günümüz endüstrisinde demir ve alaşımlarından sonra en çok tercih edilen metalik malzemelerden biridir. Yoğunluğunun düşük olması, korozyon dayanımının yüksekliği ve yüksek elektriksel iletkenliği alüminyumu gözde bir malzeme yapmaktadır. Bunların yanında manyetik bir malzeme olmayışı alüminyumu manyetizmanın hâkim olduğu elektronik devrelerde aranan bir malzeme yapmaktadır. Alüminyum diğer metallerin aksine %100 geri dönüştürülebilir olması sebebiyle çevre dostu bir özelliğe de sahiptir (Gökçe vd., 2017).

Alüminyum ve alaşımları üretim yöntemlerine göre iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar; dökme ve dövme alüminyum alaşımlarıdır. İki yöntemde de birbirinden farklı özelliklere sahip alaşımlar üretilebilmektedir. Dövme alaşımları dökme alaşımlara göre hem kimyasal hem de mikro yapı olarak farklı özellikler göstermektedir. Her iki yöntemde üretilen alaşımlara ısıl işlem uygulanabilmektedir. Ancak bunlardan ısıl işlem uygulananları; 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileridir. Diğerlerinin sertleştirilmesi sadece soğuk işlemlerle yapılabilmektedir (Başer, 2012).

Alüminyum alaşımlarına ısıl işlem olarak yaşlandırma prosesi uygulanmaktadır. Yaşlandırma işlemi, alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra korozyon ve elektriksel özelliklerini de iyileştirmektedir (Baydemir, 2018).

### 3.3.1.2. Bakır Alaşımları

Katkısız bakır çok iyi elektrik ve ısı iletimine sahip olsa da mekanik özellikler bakımından zayıftır. Bu nedenle bakır, çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini artırabilmek için kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bakır matrisinin, parçacık takviyesi veya ısıl işlemlerle özellikleri geliştirilebilmektedir (Özay ve Haşçalık, 2004).

100 °C civarında mikro yapısı değiştiği için mekanik özelliklerini ve sertliğini kaybetmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında mekanik ve elektriksel özelliklerini kullanılabilmesi için katkılandırılmalıdır. Yüksek elektriksel iletkenliği nedeniyle elektrik alanındaki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak; bobin yapımında, bakır tel, jeneratör ve transformatör yapımı örnek olarak gösterilebilir (Katmer, 2019).

### 3.3.1.3. Magnezyum Alaşımları

Yoğunluğu  $1,74 \text{ g/cm}^3$ , erime noktası  $650 \text{ °C}$  ve elastisite modülü  $4,5 \times 10^4 \text{ MPa}$  olan en hafif metallere bir tanesidir. Genel olarak tek başına kullanılmaz. Özelliklerin geliştirilmesi amacıyla çeşitli malzemelerle takviyelendirilmektedir. Üretim yöntemi olarak toz metalürjisi ve difüzyon yöntemleri kullanılmaktadır. Mukavemet değerleri alüminyum kadar yüksek değildir. Ancak alaşımlandırıldığında mekanik özelliklerinde iyileşmeler olmaktadır. Yüksek özgül dayanım, yüksek enerji sönümleme özelliğine ve iyi kaynaklanabilme kabiliyetine sahiptir. Genel olarak alüminyum ve çinko ile takviye edilmektedirler. Uzay ve havacılık sanayisinde, haberleşme sistemlerinde, kompresör kanatlarında, türbin kanatlarında, motor bloklarında, piston-biyel mekanizmalarında, akü parçalarında ve biyomedikal malzemelerde sıklıkla kullanılmaktadır (Dengiz, 2018).

### 3.3.1.4. Titanyum alaşımları

Yoğunlukları ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ) düşük, dayanımları yüksek ve yorulmaya karşı dayanıklıdır. Düşük sıcaklık uygulamalarında korozyon dirençleri ve enerji sönümleme kabiliyetleri yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabildikleri için jet motorlarında ve gaz türbinlerinde kullanılmaktadır (Subaşı ve Karataş, 2012). Mevcut durumda titanyum alaşımları yaygın bir şekilde kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları artmaktadır. En yaygın kullanılan titanyum alaşımı ise bünyesinde %6Al, %4V ve %90Ti bulunduran Ti6Al4V

Titanyum Grade 5 alaşımdır. Bu alaşım, yüksek ısı direnci ve tokluk değerine, iyi işlenebilme ve kaynak kabiliyetine, yüksek korozyon direncine ve biyouyumlu bir yapıya sahiptir (Elibol, 2020). Ancak oldukça pahalı alaşımlardır. Gaz türbinlerinde, uçak gövdelerinde, zırh yapımında, hafif ve dayanımlı spor aletleri yapımında, diş medikal uygulamalarda, ortopedik medikal alet ve protez yapımında kullanılmaktadır (Subaşı ve Karataş, 2012).

### 3.3.2. Takviye Elemanları

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından oluşmaktadır. Bu da kompozit malzemelerinin mekanik özelliklerinin büyük ölçüde takviye elemanına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle takviye elemanı seçilirken matris malzemesi ile takviye elemanı arasında oluşacak bağın kuvvetli olması sağlanmalıdır. MMK'larda kullanılan takviye elemanları; kısa elyaflar, sürekli elyaflar, kılcal kristaller ve parçacıklar olarak gruplandırılırlar (Gültaş, 1998; Şenel, 2018). MMK'larda sıklıkla kullanılan bazı takviye elemanları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. MMK'lerde kullanılan bazı takviye elemanları (Chavla ve Chavla, 2006)

<b>Sürekli Elyaf</b>	$Al_2O_3$ , $Al_2O_3+SiO_2$ , B, C, SiC, $Si_3N_4$ , Nb-Ti, $Nb_3Sn$
<b>Süreksiz Elyaf</b>	
<b>whiskers</b>	SiC, $TiB_2$ , $Al_2O_3$
<b>Kısa Elyaf</b>	$Al_2O_3$ , SiC, ( $Al_2O_3+SiO_2$ )
<b>Parçacıklar</b>	SiC, $Si_3N_4$ , $Al_2O_3$ , TiC, $B_4C$ , WC

MMK'larda daha sert, daha üstün aşınma dayanımı ve yüksek tokluk özellikleri gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı seramik takviyeler daha çok tercih edilmektedir. Seramik malzemelerde kendi içerisinde; oksitler, karbürler ve nitrürler olarak gruplandırılır. MMK'larda en yaygın kullanılan seramik takviye elemanları ise Tablo 3.3'de gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik esaslı takviye elemanları (Kılıç, 2007)

Fiber tipi	Çap (µm)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastikiyet modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)
Saffil (δ-Alümina)	3	3300	300	2,0
FP (ú-Alümina)	20	3950	380	1,7
Silikon karbür	13	2500	390	2,0
Boron	100-200	2600	390	3,4
SiC kaplı boron	100-200	2600	400	2,9
Yüksek Modüllü karbon	8	1950	358	2,2
Yüksek Dayanımlı karbon	6,8	1800	235	2,6

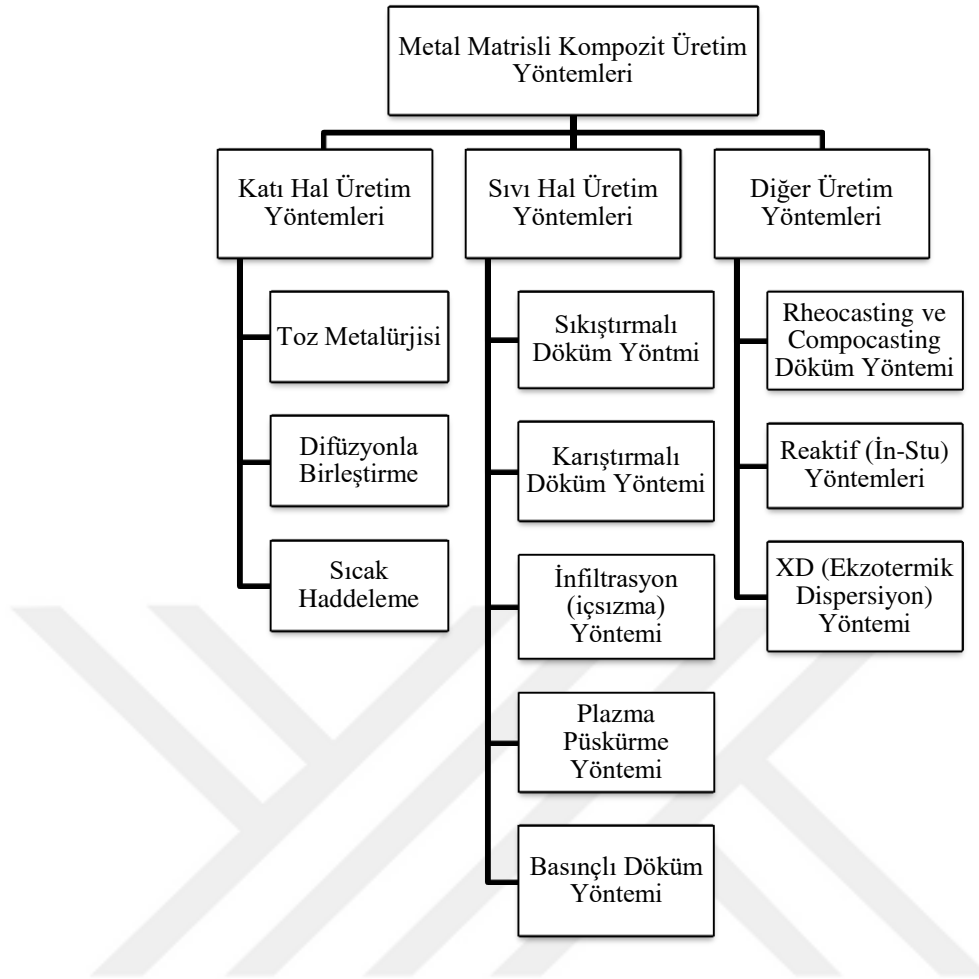
### 3.3.3. Üretim Yöntemleri

Geleneksel malzemeler teknolojinin gelişmesine bağlı olarak endüstrinin ihtiyacı olan daha üstün özellikleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. İhtiyaç duyulan bu açığı kapatmak içinde kompozit malzemeler geliştirilmektedir. Kompozit malzemeler geliştirilirken buna paralel olarak da üretim yöntemleri üzerine yoğunlaşmaktadır. MMK'ların üretim metodu seçilirken üretilecek kompozit malzemenin beklenen özellikler göz önünde bulundurulmalı ve üretim yöntemi bu şartlara göre seçilmelidir. Üretim yönteminin belirlenmesinde; üretilecek malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri, matris ve takviye malzemesi, çalışma sıcaklığı, matris içinde destek malzemesinin homojen dağılıp dağılmaması, elde edilecek malzemenin boyutsal durumu, matris malzemesinin takviye elemanını ıslatma durumu ve maliyeti dikkate alınmalıdır. Tablo 3.4'de üretim yöntemlerinin maliyet ve kullanım alanı olarak kıyaslanması verilmiştir (Kalemtaş, 2014).

Tablo 3.4. MMK üretim yöntemlerinin maliyet ve uygulama alanları bakımından karşılaştırılması (Kalemtaş, 2014)

Yöntem	Maliyet	Uygulama	Açıklama
<b>Difüzyonla Bağlama</b>	Yüksek	Levha, Kanat, Mil ve Yapısal Elemanlar	Matris için takviye fazı için filaman kullanımı
<b>Toz Metalüjisi</b>	Orta	Küçük Dairesel Elemanlar, Cıvata, piston, valf ve yüksek mukavemetli ısıya dayanıklı malzemeler	Matris ve takviye fazları toz halinde ve partikül takviye için uygundur. Ergime olmadığından tepkime bölgesi yoktur ve karma yapı malzemenin mukavemeti yüksektir.
<b>Sıvı Metal Sızdırma</b>	Düşük-Orta	Rot, tüp ve özelliklerin tek ekseninde maksimum olduğu bağlantı elemanları	Filaman takviye fazı kullanılmaktadır.
<b>Sıkıştırılmalı Döküm</b>	Orta	Piston, bağlantı rotları, külbütör kolu, silindir başı gibi otomotiv parçaları	Her tür takviye fazı için uygundur ve üretim yelpazesi genişler.
<b>Püskürtme</b>	Orta	Sürtünme malzemeleri, motor fırçaları, kesme ve taşlama elemanları	Partikül takviye fazı kullanılmalıdır. Yüksek yoğunlukta malzemeler üretilebilmektedir
<b>Kombo-döküm</b>	Düşük	Otomotiv, uzay, endüstriyel ekipmanlar ve spor malzemeleri ve yatak malzemeleri	Özellikle parçacık takviyeli süresiz fiberler için uygundur

Metal matrisli kompozit üretiminde farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; katı faz üretim yöntemleri, sıvı faz üretim yöntemleri ve diğer üretim yöntemleri olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Şekil 3.1’de MMK’ların üretim yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. MMK malzemelerin üretim yöntemleri

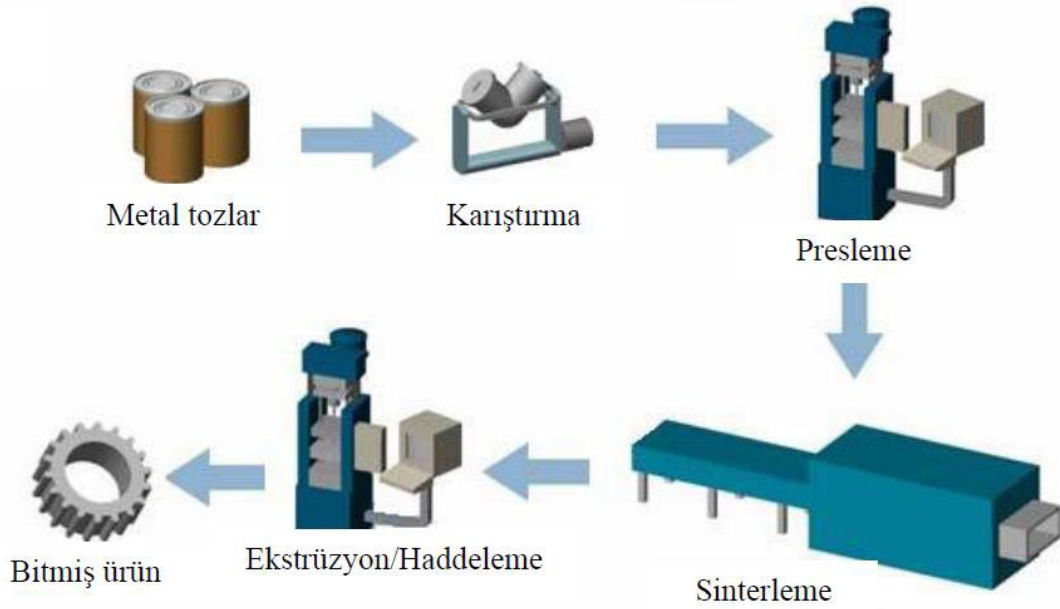
### 3.3.3.1. Katı Hal Üretim Yöntemleri

Katı hal üretim yöntemleri MMK üretiminde en sık kullanılan yöntemler arasında başı çekmektedir. Bu yöntemde kompozit malzeme üretilmesi matris malzemesinin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta ısıtılması esasına dayanmaktadır. Katı hal üretim yöntemleri ile üretilen kompozit malzemeler, sıvı hal yöntemlerine göre daha yüksek mekanik özellikler vermektedir. Ancak bu yöntem diğer yöntemlere göre daha pahalı bir yöntemdir. Katı hal üretim yöntemleri başlıca; toz metalürjisi, difüzyonla bağlanma ve sıcak haddeleme olarak sınıflandırılabilir (Şenel, 2018).

#### Toz metalürjisi

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde bilinen en eski ve modern yöntemlerden biridir. Bu yöntemle ihtiyaç duyulan parçalar istenilen kalitede ve hassasiyette çok az kayıpla ekonomik olarak imal edilebilmektedir.

Toz metalürjisi, matris malzemesi ve takviye elemanlarının bağlayıcılar ve/veya yağlayıcılar ile karıştırılarak ihtiyaç duyulan parçaların bir kalıpta basınç uygulanarak üretilmesi işlemidir. Daha sonra tozlar arasındaki etkileşimi artırmak için toz karışım ergime sıcaklığı altında bir sıcaklıkta sinterleme işlemine tabii tutulur. Sinterleme işleminden sonra parçaya son şeklini vermek amacıyla ikincil işlemler (haddeleme, püskürtme) gerekli olabilir. Şekil 3.2’de toz metalürjisi yöntemine ait görsel verilmiştir. MMK üretiminde toz metalürjisinin sıkça tercih edilme nedenleri arasında; malzemeden tasarruf sağlanması, imal edilen parçaların mikro yapılarının homojen olması, karmaşık geometriye sahip parçaların nispeten ekonomik olarak üretilebilmesi ve üretilen parçaların yüksek dayanım performansı gibi etmenler gösterilebilir (Canaran, 2002).

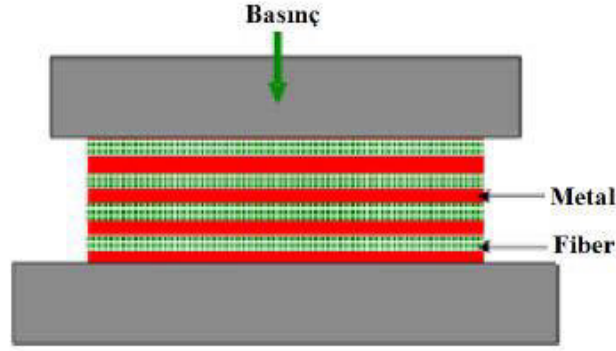


Şekil 3.2. Toz metalürjisi yöntemi (Pul, 2010)

Toz metalürjisi yönteminin uygulama alanlarına bakıldığında çok geniş bir kullanım alanı olduğu görülmektedir. Bu yöntemle; sürtünme elemanları, takım çelikleri, gözenekli malzemeler (filtreler vb.), sert metaller, kendinden yağlamalı yataklar, dişli çarklar, tungsten grafit fırçalar ve mıknatıslar, nükleer güç yakıt elemanları, fren balataları, elektrik kontakları, jet motoru parçaları, ortopedik gereçler ve akü elemanları üretilebilen parçalardır. TM yöntemi, sıcak veya soğuk presleme, geleneksel döküm ve talaş kaldırma yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir (Şenel, 2018).

### Difüzyonla birleştirme yöntemi

Bu yöntemde hem matris hem de takviye elemanı levha veya yaprak şeklinde kullanılmaktadır. Matris malzemesi ve takviye elemanının üst üste dizilerek her ikisinin de ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta basınç uygulanarak difüzyon etkisiyle birleştirilmesi sağlanmaktadır. Matris malzeme ile takviye elemanı arasında difüzyon bağının oluşabilmesi için yüzeylerin temiz, oksitsiz ve düzgün olması gerekmektedir. Difüzyonla birleştirme işlemi atmosfer basıncında, koruyucu gaz altında ve vakum altında yapılabilmektedir. Ancak vakum altında yapılan birleştirme işlemi, diğer iki ortam şartına göre daha verimli ve başarılıdır. Şekil 3.3’de yönteme ait görsel verilmiştir. Ana malzeme olarak Al ve Ti alaşımları, takviye elemanı olarak da B, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC gibi fiberler kullanılmaktadır. Bu yöntemin olumsuz yönleri ise; yüksek sıcaklık ve basınç kullanımına bağlı olarak maliyetlerin yüksek olması, malzeme imal sürecinin uzun bir vakti kapsamasıdır (Sur, 2002).

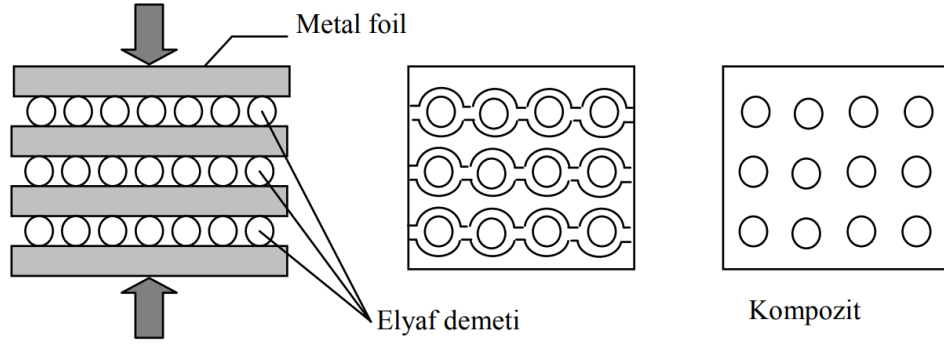


Şekil 3.3. Difüzyon bağı yöntemi (Pul, 2010)

### Sıcak haddeleme

Bu yöntemde yine difüzyonla birleştirme yöntemine benzer şekilde yaprak veya levha şeklindeki matris ve takviye elemanları kullanılır. Takviye malzemesi matris malzeme üzerine yerleştirildikten sonra haddeleme sırasında yapıyı terk eden bir bağlayıcı ile sabitlenirler. Bu şekilde hazırlanan matris-takviye preform kompozitler üst üste dizilerek yüksek basınç ile haddelenerek yüksek sıcaklığa maruz bırakılmaktadır. Daha sonra basınç kaldırılır ve yüksek sıcaktan dolayı meydana gelen kalıcı gerilmelerin etkisini ortadan kaldırmak için parça yavaş şekilde soğumaya bırakılır. Bu yöntemle karmaşık şekilli parçalar üretilememektedir. Sadece plaka halindeki kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Şekil 3.4’de yöntemin şematik görünümü verilmektedir (Deniz, 2005).

Sıcak haddeleme yönteminde plaka halinde parça üretimi diğer katı ve sıvı yöntemlerde parça üretimine kıyasla daha ekonomiktir. Üretilen kompozit malzemeler, yüksek dayanım, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma gibi avantajlara sahiptir (Deniz, 2005).



Şekil 3.4. Sıcak haddeleme (Deniz, 2005)

### 3.3.3.2. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

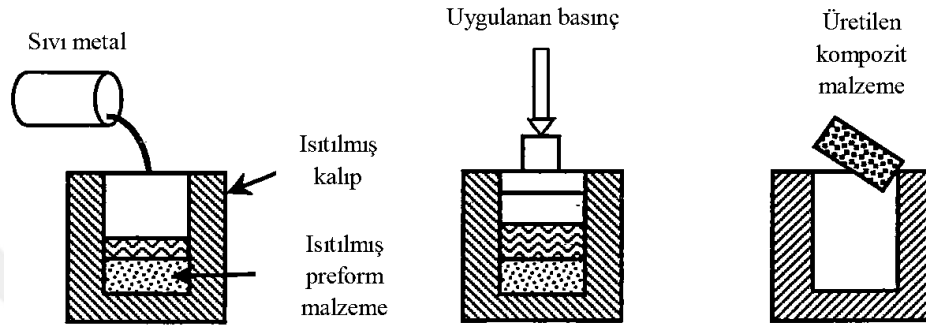
Geleneksel döküm yöntemlerinin kompozit malzemelere uygulanmasıyla gelişen yöntemlerdir. Bu yöntemlerde matris malzemesi kısmen veya tamamen eritildikten sonra matris malzeme içerisine takviye malzemesi eklenir. Bu yöntemlerde matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında iyi bir ara yüzey bağlantısı oluşturulabilmektedir. Ancak sıcaklık ve basınç kontrolü, karıştırma işleminin yapıldığı ortam şartları, karıştırma esnasında takviye malzemesinin zarar görmesi, takviye malzemesinin topaklanması ve ara yüzey reaksiyonları gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşılabilir. Tüm bu olumsuzluklara rağmen MMK üretim yöntemleri arasında en ekonomik üretim yöntemidir. Sıvı hal üretim yöntemleri, karmaşık şekilli parçaların üretilmesine olanak sağlaması, seri ve düşük maliyetli üretim sağlaması nedeniyle MMK'ların üretilmesinde önemli bir yere sahiptir (Kılıçkap, 2003).

Sıvı hal üretim yöntemlerini; sıkıştırırmalı döküm, karıştırırmalı döküm, basınçlı döküm, yarı katı döküm, plazma püskürtme ve infiltrasyon olarak sıralamak mümkündür.

#### Sıkıştırırmalı döküm yöntemi

Sıkıştırırmalı döküm yönteminde, önceden ısıtılmış metal kalıp içerisine yerleştirilen takviye malzemesinden oluşan preform malzemeye, yüksek basınç altında (70-100 MPa) ergiyik metal emdirilmekte ve katılaşma tamamlanana kadar

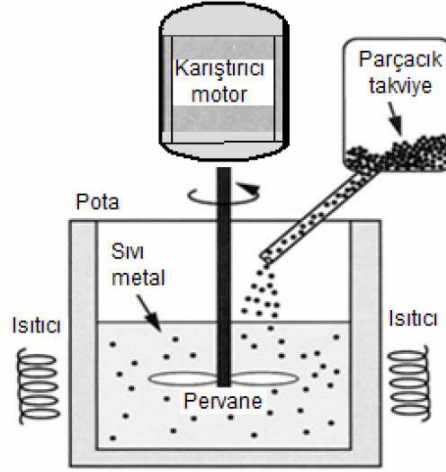
basınç sabit tutulmaktadır. Şekil 3.5'te bu yönteme ait görsel verilmektedir. Bu yöntemde kullanılan yüksek basınçtan dolayı kalıp içerisindeki gaz dışarı atılarak malzemelerdeki gözeneklilik oluşumu önlenmekte, çekme gibi döküm hataları oldukça az ortaya çıkmakta ve ince taneli yapılar elde edilebilmektedir. Ancak yüksek basınçtan dolayı takviye malzemeleri zarar görebilmektedir. Sıkıştırımlı döküm yöntemi, yüksek hassasiyet ve yüksek mukavemet gerektiren otomotiv ve uçak parçaların üretiminde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Deniz, 2005).



Şekil 3.5. Sıkıştırımlı döküm yöntemi (Günay, 2009)

### **Karıştırımlı döküm yöntemi**

Bu yöntemde takviye malzemeleri matris içerisine, matris malzemesinin erimiş olduğu bir durumda eklenmektedir. Gerek takviye malzemesinin eklenmesi esnasında gerekse takviye malzemesi eklendikten sonra karışım, karışımla tepkimeye girmeyen mekanik bir karıştırıcı aracılığıyla belirli bir süre karıştırılır. Homojen bir yapı elde edildiğinde karışım bir kalıba dökülerek katılaştırılır. Sıvı metalin karıştırılmasında kullanılan karıştırıcıların matris ile tepkimeye girmemesi, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması gerekmektedir (Günay, 2009). Şekil 3.6'da bu yönteme ait görsel verilmektedir.



Şekil 3.6. Karıştırmalı döküm yöntemi (Günay, 2009)

Diğer kompozit üretim yöntemlerine kıyasla ekonomik bir yöntemdir. Özellikle yüksek üretim hacimleri için oldukça elverişli bir yöntemdir. Ancak üretilen kompozitlerde gözeneklilik sorunu tam olarak önlenememektedir. Bu durum da mekanik özellikleri etkilemektedir. Kompozit yapı içerisinde oluşacak gözenekleri önlemek için karıştırma işleminin vakum altında veya koruyucu gaz atmosferinde yapılması, üretilen malzemelere plastik şekil verme yöntemleri uygulanması ve yapı içerisine gaz giderici ilavelerinin yapılması tavsiye edilmektedir (Günay, 2009).

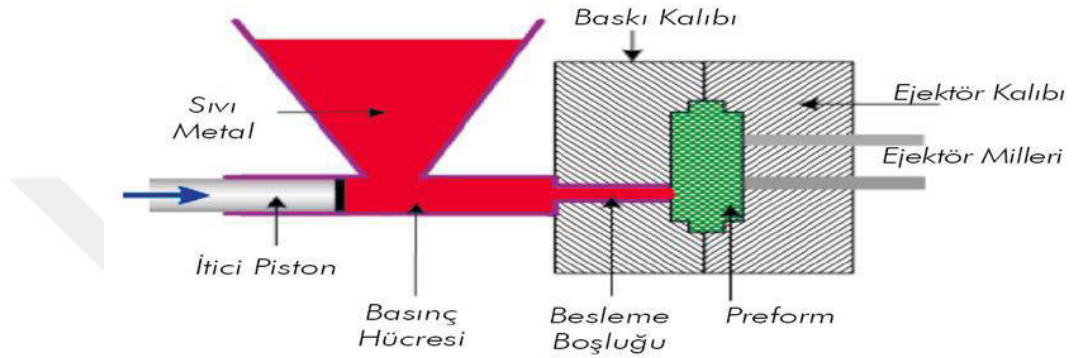
Üretilen metal matrisli kompozitlerin üretiminin kolay olması ve istenilen özelliklere sahip olması birçok parametreye bağlıdır (Öztop ve Gürbüz, 2017). Bu parametreler şu şekilde sıralanabilir.

- Sıvı metalin kimyasal ve fiziksel özellikleri
- Takviye elemanının boyutu, miktarı ve yoğunluğu
- Karıştırıcı özellikleri
- Karıştırma işlem süresi, sıcaklığı ve hızı
- Takviye ilave hızı ve süresi
- Döküm işlemi ve süresi
- Döküm kalıbı malzemesi ve kalıp sıcaklığı

### **İnfiltrasyon (iç sızma) yöntemi**

Metal matrisli kompozit malzeme üretiminde geniş kullanım alanına sahip yöntemlerden biri de infiltrasyon (iç sızma) yöntemidir. Bu yöntem üç şekilde kullanılabilir. Bunlar; basınçlı infiltrasyon, vakumlu infiltrasyon ve basınçsız infiltrasyon yöntemleridir. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, daha önceden hazırlanmış

ve bir kalıp içerisine yerleştirilen takviye elemanına sıvı haldeki matris malzemesinin emdirilmesidir. Şekil 3.7’de bu yönteme ait görsel verilmiştir. Bu emdirme işlemi atmosfere açık ortamda, vakum altında veya basınç uygulanarak yapılabilmektedir. İnfiltrasyonla metal matrisli kompozit malzeme üretiminde mekanik özelliklerin yüksek olması uygun şartların sağlanmasına bağlıdır. Bu yöntemin tercih edilmesinde, seri bir üretim yöntemi olması ve boyut kontrolünün hassa olması etkilidir (Bilir, 2014).

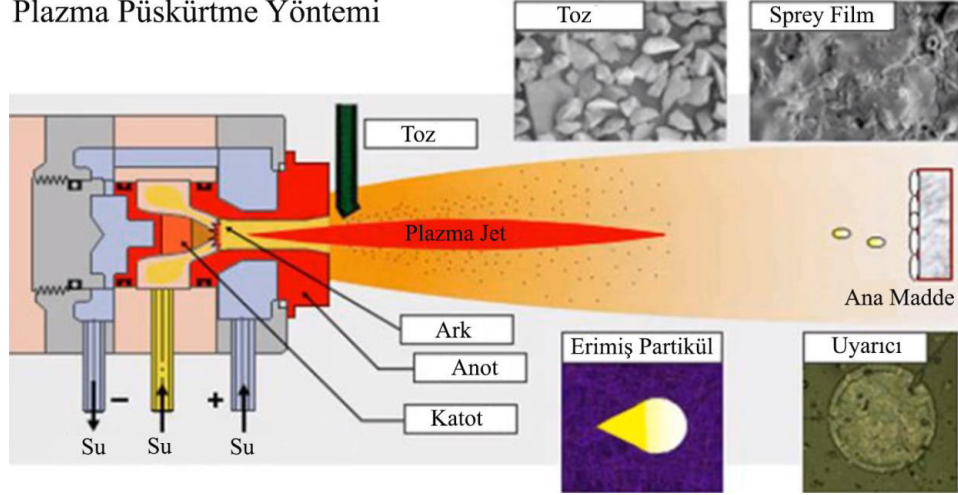


Şekil 3.7. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi (Bilir, 2014)

### **Plazma püskürme yöntemi**

Plazma püskürtme yöntemi, atomize edilmiş eriyik metalin bir nozul içinden basınçla geçirilerek takviye elemanları yüzeyine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. İlk olarak matris malzeme induksiyon fırında sıvı hale getirilir. Sıvı metal potanın tabanında bulunan bir nozuldan geçirilirken basınçla birlikte asal gazlarda enjekte edilerek takviye malzemesi üzerinde bir tabaka oluşturacak şekilde püskürtülür. Püskürtülen eriyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır. Şekil 3.8’de bu yönteme ait görsel verilmektedir. Bu yöntem alüminyum gibi ergime sıcaklığı düşük olan metallerde, parçacık ve sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır (Dengiz, 2018).

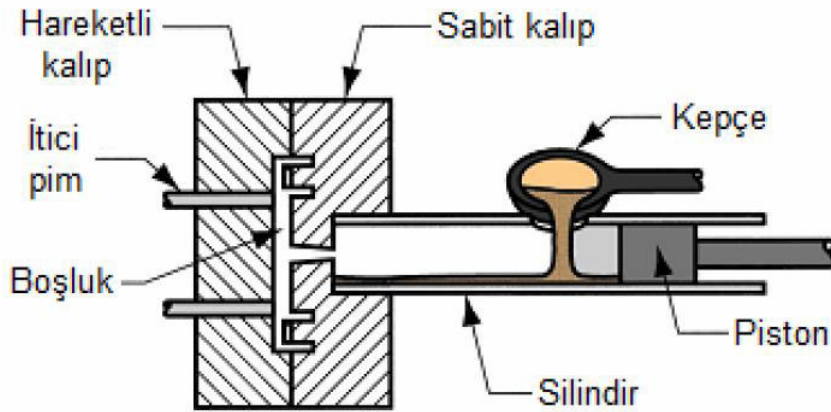
## Plazma Püskürtme Yöntemi



Şekil 3.8. Plazma püskürtme yöntemi (Dengiz, 2018)

## Basınçlı Döküm Yöntemi

Basınçlı döküm yöntemi sıkıştırılmalı döküm yöntemine benzemektedir. Fakat bu yöntemde kullanılan matris malzemelerinin ergime sıcaklıkları düşüktür. Kalıplama için kullanılan yükler 10-15 MPa gibi oldukça düşük basınçlarda olup bu da döküm yöntemi ile imal edilebilecek büyük boyutlu parçaların üretimi için yeterli görülmektedir. Sıvı metalin, metalden yapılmış bir kalıba yüksek basınç vasıtasıyla fazla miktarda ve çok hızlı bir şekilde doldurulması esasına dayanır. Uygulanan basınç katılaşma tamamlanana kadar kaldırılmaz (Yaşar, 2012). Şekil 3.9’da bu yöntem ait görsel verilmektedir.



Şekil 3.9. Basınçlı döküm yöntemi (Pul, 2010)

Bu yöntem karmaşık geometrili parçaların imaline olanak sağlamaktadır. Bu teknikte kullanılan matris malzemesinin erime sıcaklığı 1000 °C'nin altında olup

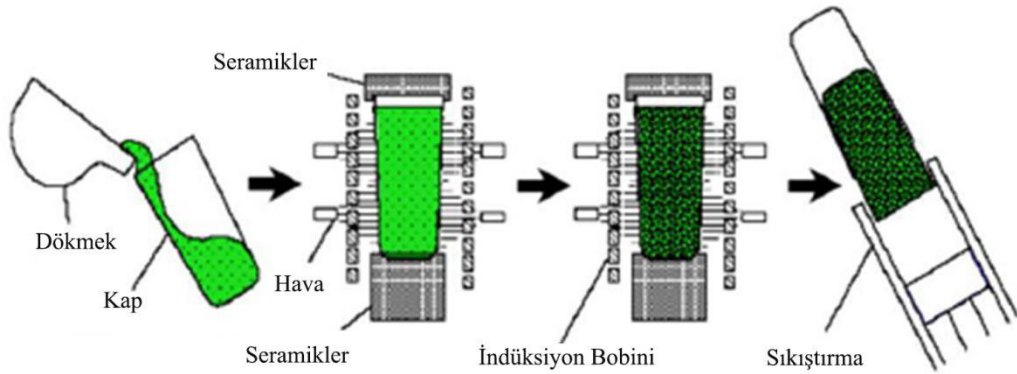
imalat işlemleri tamamen otomasyon olduğundan yüksek imalat hızlarına ulaşılabilir. İmal edilen parçalara genellikle talaş kaldırma işlemleri uygulanmaz. Bu yöntemde kullanılan matris malzemeleri; kurşun, kalay, alüminyum, çinko, çinko ve magnezyumdur (Pul, 2010).

### 3.3.3.3. Diğer Üretim Yöntemleri

Bu bölümde; reocasting ve compocasting, reaktif (in-situ) ve XD (ekzotermik dispersiyon) tekniği yöntemleri anlatılacaktır.

#### Rheocasting ve compocasting döküm tekniği

MMK'ların üretilmesinde kullanılan bu yöntem, yarı katı döküm yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Bu yöntem, sıvı metal karıştırma yöntemindeki ıslanabilirlik problemini ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Rheocasting ve compocasting döküm tekniği, kısa fiber veya parçacık takviyeli MMK ların imalat yöntemlerinden en ekonomik olanlarından biridir. Bu yöntemde matris malzemesi karıştırma fonksiyonlu bir fırında ergime sıcaklığının 40 ila 50 derece üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve kontrollü bir şekilde soğutulmaktadır. Alaşım %50 katı hale geldiğinde takviye elemanı eklenerek karıştırılır. Sıcaklık, matris malzemesinin takviye elemanını iyice ıslatmasına kadar artırılır ve karıştırma işlemine devam edilir (Bilir, 2014). Karışımın %50 oranında katı olması, karışıma parçacık ilavesini kolaylaştırmaktadır. Bu yöntemde nispeten düşük viskoziteli karışımdan döküm yapılırsa yöntemin adı 'Rheocasting' olarak isimlendirilmekte olup eğer ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta döküm işlemi gerçekleştirilirse 'Compocasting' olarak isimlendirilir. Şekil 3.10'da bu yönteme ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.10. Rheocasting döküm tekniği (Bilir, 2014)

### **Reaktif (In-Situ) yöntemleri**

Bu tür imalat tekniklerinde kompozit malzeme içerisinde farklı fazların oluşturulması ve bu fazlardan bir veya birden fazlasının matris malzemesi, diğerlerininde takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozit üretim tekniğidir. İn-situ yöntemlerde; tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonu, ötektiklerin yönlü katılaştırılması ve ekzotermik reaksiyon işlemi gibi teknikler kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak sıklıkla alüminyum, kobalt ve nikel tercih edilmektedir. İyapıları oldukça kararlıdır ve tek aşamada elde edilirler (Cilasun, 2013).

### **XD (ekzotermik dispersiyon) tekniği**

XD (ekzotermik dispersiyon) tekniğinde Martin Marietta tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Matris içerisine takviye ilavesi, bir bileşik katılarak sağlanmaktadır. Bu yöntem ile sıvı matris içerisinde pek çok seramik bileşik oluşturulabilmektedir. Dışardan partikül ilavesi olmayıp da partiküllerin sıvı matris içerisinde oluşturulması tek kristalli ve oksitlenmemiş ara yüzeylerin elde edilmesini sağlamaktadır. Oluşan parçacık boyutları işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Karademir, 2013).

## 4. TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi (TM); farklı boyut ve geometriye sahip metal, seramik ve alaşım tozlarının karıştırılıp, preslenip, sinterlenip daha yüksek mukavemetli, daha hassas ve yüksek performanslı ürünlerin elde edilmesinde kullanılan MMK üretim tekniğidir. Bu teknik; öğütme, karıştırma, şekillendirme veya presleme ve son olarak da sinterleme basamaklarını içermektedir. Sinterleme işleminin ardından ihtiyaç duyulması halinde imal edilen parçaya kaplama, ısıl işlem, yağ emdirme gibi ikincil veya tamamlayıcı son işlemler uygulanabilir (Matik, 2003).

Toz metalürjisinde amaç, ihtiyaç duyulan yüksek mukavemetli MMK'ların matris malzemesini ergitmeden basınç ve sıcaklık yardımıyla elde edilmesini sağlamaktır.

TM tekniğinin tarihi M.Ö. 3000 yılına kadar dayanmaktadır. Eski mısırlılar kullandıkları aletlerin yapımında bu günün sünger demirine benzer toz ve parçacıkları ateşte ısıtmış ve çekiçle döverek son şekilleri elde etmişlerdir (Matik, 2003).

TM yönteminde modern ilerleme I. Dünya savaşı zamanında başlamıştır. Bu yıllarda mıknaş, yağ emdirilmiş demir tozlu parçalar ve gözenekli yapılar üretilmiştir. TM tekniği en büyük etkisini otomotiv sanayii üzerinde göstermiştir. 1940'lı yıllarda en çok kendi kendini yağlayan yataklar üretilirken 1950'lere gelindiğinde dişliler, kamlar ve çeşitli ürünler piyasaya çıkmaya başlamıştır. 1960'larda dövme çelik parçalar, takım çelikleri ve izostatik preslenmiş süper alaşımlar gibi yoğun TM ürünleri üretilmiştir. 1970'lerde yüksek yoğunluklu ve performansa sahip malzemeler geliştirilmiştir. 1980'lere gelindiğinde hem toz özellikleri hem de TM teknikleri büyük bir gelişme göstermiş ki bunlardan bazıları; mekanik alaşımlama, toz enjeksiyon ve hızlı soğutma teknikleridir. Bu gelişmeler neticesinde homojen karışmama, segregasyon ve porozite gibi istenmeyen durumlar önlenebilmiştir (Baydemir, 2018).

### 4.1. Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalürjisini, dövme ve döküm gibi yöntemlere nazaran sağladığı pek çok avantaj endüstrinin vazgeçilmez bir tekniği haline getirmiştir. Bu avantajlar;

- Talaş kaldırma işlemleri kısmen veya tamamen ortadan kaldırılarak malzeme ve zaman kaybını en aza indirecek şekilde seri üretime uygundur.
- Toz matris malzemesinin %99'u kullanılarak malzeme israfı büyük ölçüde önlenir.
- Filtreler, yağ emdirilen yataklar gibi gözenekli yapıların imalatına olanak sağlar.
- İmalat süreci seri üretim için uygundur ve ekonomiktir.
- Malzeme ergitme kayıpları yoktur.
- Karmaşık geometrilerdeki parçaların üretimine olanak tanır.
- Metal olmayan malzemeler metal matrisler içinde homojen bir yapı oluşturacak şekilde üretilebilir.
- İmal edilen parçalardaki gözeneklilik durumu kontrol edilebilir.
- Yoğunlukları ve ergime noktaları farklı olan malzemelerin rahatlıkla üretilmesine olanak tanır.
- Malzemelerin aşınma dayanımını artırmak amacıyla gözeneklere istenilen yağlayıcı maddeler uygulanabilir.
- Yüksek termal dayanıma ve mukavemete sahip yapılar yalnızca bu yöntemle üretilebilmektedir.

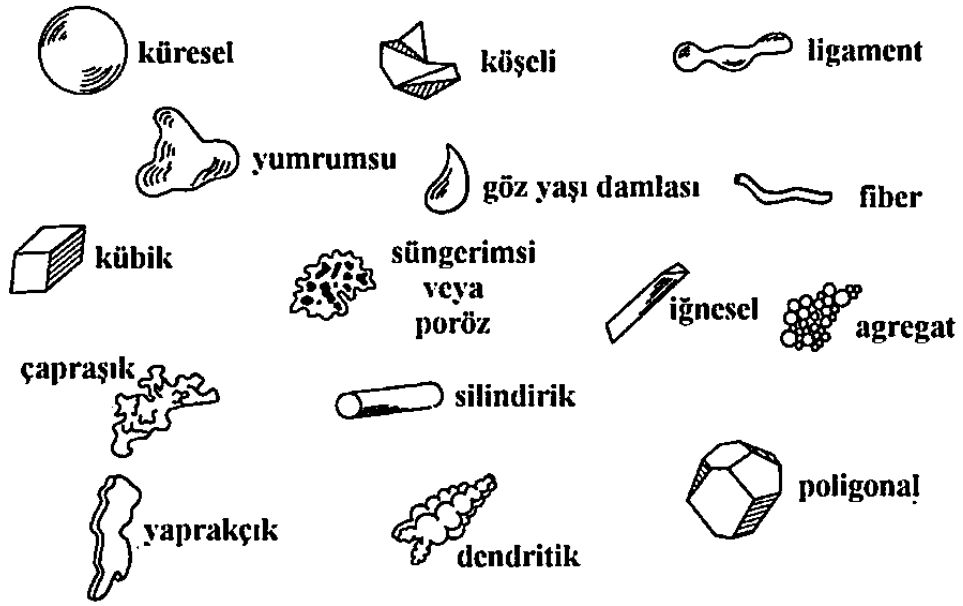
Toz metalürjisinin sağladığı pek çok avantajın yanında bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Sıkıştırma ve sinterleme ünitelerinin ilk kurulum masrafları seri üretim yapılmayacaksa oldukça yüksektir.
- Metal tozların maliyeti külçe halindeki malzemelerden yüksektir.
- Çok büyük geometrilerde parça imalatı yapılamamaktadır.
- Toz metallerin depolanması uzun vadede sorun teşkil eder.
- Karmaşık geometriye sahip parçalarda, parçanın her yerinde aynı yoğunluk değeri elde edilemeyebilir.
- İmal edilen parçalara bazı özel işlemler yapılmadıkça parçaların mekanik özellikleri normalden biraz düşük olabilmektedir.
- Parçaların toleransları talaş kaldırma işlemlerine göre daha kabardır (Çelebi, 2013).

## 4.2. Toz Üretim Yöntemleri

Toz metalürjisi ile elde edilen malzemelerin özellikleri önemli ölçüde başlangıç malzemesine bağlıdır. Bu nedenle parça üretimine başlamadan önce kullanılacak olan tozların saflık oranına, kimyasal bileşimine, boyutuna, şekline, yüzey özelliklerine ve boyut dağılımına dikkat edilmelidir. Bu nedenle toz üretim yönteminin belirlenmesinde; tozun boyutu, şekli, mikro yapısı, maliyeti, ergime noktası, reaktiflik özelliği, kırılabilirliği ve oksit içeriğinin indirgenabilirliği, göz önünde bulundurulmalıdır. Metal tozların üretimi için genellikle 4 teknik kullanılmaktadır. Bunlar; mekanik üretim, elektrolizle üretim, kimyasal üretim ve atomizasyon teknikleridir (Kalaycıoğlu, 2010).

Toz üretim teknikleri parçacık boyutuna ve şekline etki etmektedir (Baydemir, 2018). Şekil 4.1’de muhtemel parçacık şekiller gösterilmektedir



Şekil 4.1. Muhtemel parçacık şekilleri (Çakır, 2007)

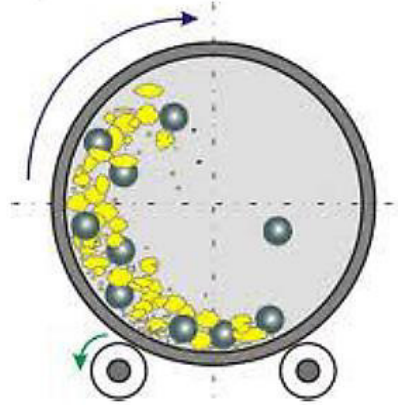
Toz üretimi; mekanik, elektrolizle, kimyasal ve atomizasyon üretim yöntemleri olmak üzere dört yöntemle gerçekleştirilebilir. Geçmişte en yaygın kullanılan toz üretim teknikleri; mekanik, kimyasal ve elektrolitik yöntemlerdir. Ancak günümüzde kullanılan tozların önemli bir kısmı atomizasyon yöntemiyle üretilmektedir (Baydemir, 2018).

#### 4.2.1. Mekanik Üretim Teknikleri

Mekanik yöntemlerle ekonomik olarak toz elde etmek için; aralarında zayıf kimyasal bağ olan, elastisite modülü yüksek, bünyesinde fazlaca kayma düzlemi barındırmayan, çok sert ve gevrek metaller ile seramikler de kullanılır. Sünek malzemeler bu teknikte toz haline getirilmeye çalışıldığında topaklanma eğilimi göstermektedir. Darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma olmak üzere başlıca dört ana yöntem toz üretiminde kullanılmaktadır (Şenel, 2018).

Aşındırma işlemi, aşındırıcıların hareketinden kaynaklanan sürtünme etkisiyle malzemelerin parçalanması işlemidir. Kesme, malzemeyi keserek parçalama işlemidir. Basma ise, basma kuvvetleri ile malzemenin deformasyona uğratılmasıdır (Ayata, 2014).

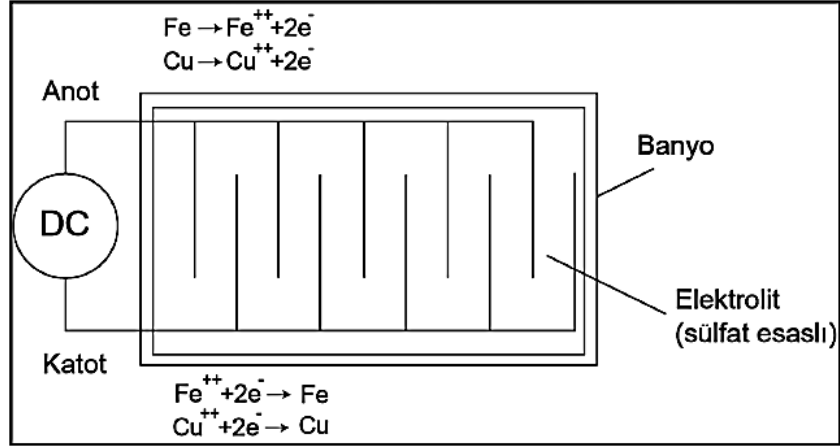
Mekanik üretim yöntemlerinin basit ve düşük maliyetli olması en önemli avantajlarından biridir. Buna karşın öğütme tertibatından kaynaklanan fazla malzeme sarfiyatı ise temel dezavantajlarından biridir. Mekanik yöntemlerle üretilen tozlar, gevrek malzemelerde düzensiz şekilli ve köşeli, yumuşak metallerde ise yassı şekillerdedir (Ayata, 2014).



Şekil 4.2. Bilyeli öğütme cihazıyla mekanik toz üretim tekniği (Ayata, 2014)

#### 4.2.2. Elektroliz ile Üretim Teknikleri

Bu yöntemin esası bir hücrenin içerisinde anot ve katot tepkimelerinin gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. İletken oranı yüksek olan metal tozlar hücre içerisinde katot çubuklarda biriktirilir. Biriktirilen tozlar metal çubuktan sıyrılıp yıkanır. Kurutulduktan sonra öğütülerek toz haline getirilir. Şekil 4.3'de elektrolizle toz üretim tekniğine ait görsel verilmiştir (Altınışik, 2019).



Şekil 4.3. Elektroliz ile toz üretimi (Altınışık, 2019)

Bu tekniği kullanarak üretilen tozlar yüksek saflıkta ve dallanmış yapıdadır. Bu faydalarının yanı sıra elektrik sarfiyatının, üretilen tozların yıkama ve kurutma maliyetlerini yüksek olması, sadece metal tozlarının üretilmesi gibi dezavantajlara da sahiptir (Karaman, 2011).

#### 4.2.3. Kimyasal Üretim Teknikleri

Kimyasal teknikler, metal oksit, karbonat, nitrat veya halojenli bileşiklerin indirgeyici gazlarla (CO, H) oksitlerinden arındırılarak metal tozlarının üretilmesi esasına dayanır. Bu teknikle 5-10  $\mu m$  ile 100-500  $\mu m$  arasında boyutlarda toz üretimi gerçekleştirilebilir. Hidrojen indirgenmesinde oksit tozları tüp fırın içerisinde geçirilirken ters yönde de hidrojen akışı sağlanarak oksit bileşikleriyle indirgeyicilerin tepkimesi sonucu metal tozları üretilmiş olur (Ürer, 2009).

#### 4.2.4. Atomizasyon Teknikleri

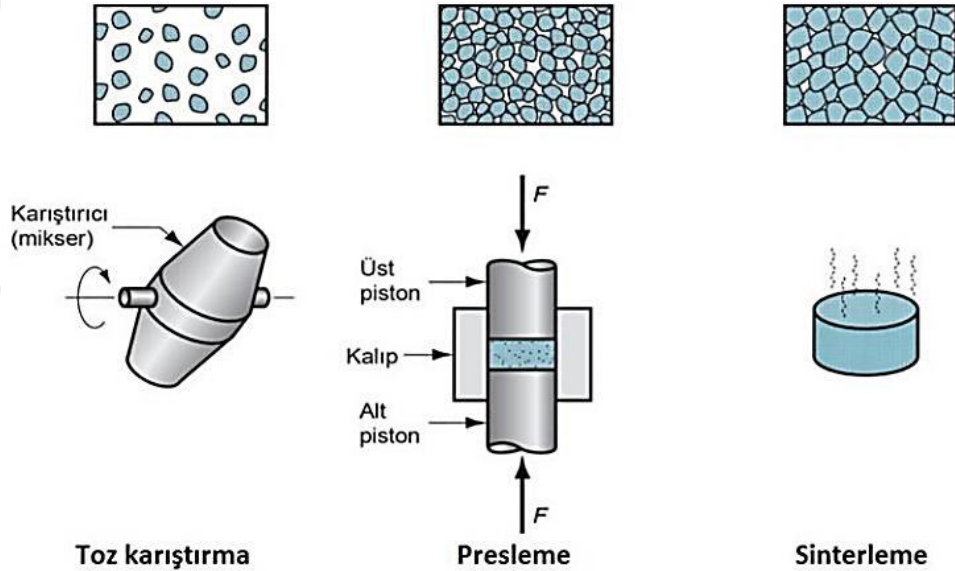
Metal ve alaşım tozlarının üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemin esası, erimiş metal veya alaşımın bir nozuldan serbest bir şekilde akması esnasında yüksek basınçlı gaz veya su ile akan sıvı metal demetinin parçalanmasıdır. Eğer erimiş metal demeti basınçlı gaz ile parçalanıyorsa teknik “gaz atomizasyonu”, basınçlı su ile parçalanıyorsa “su atomizasyonu” olarak isimlendirilmektedir. Gaz atomizasyonunda basınçlı gaz olarak hava, argon, helyum ve azot kullanılmaktadır. Gaz atomizasyonu ile elde edilen tozlar küresel yüzeyli, oksitsiz ve homojen yapıdadır. Su atomizasyonu ile üretilen tozlar ise düzensiz şekilli ve yüzeyleri oksit tabakalıdır (Karaman, 2011). Şekil 4.4.’de bu yönteme ait görsel verilmektedir.



Şekil 4.4. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları (Ayata, 2014)

### 4.3. Toz Metalürjisi ile Parça Üretimi

Toz metalürjisi yöntemi ile MMK üretimi dört aşamada gerçekleşir. Bunlar; toz hazırlama, toz karıştırma, şekillendirme(presleme) ve sinterlemedir. Toz metalürji ile parça üretimi iş akış şeması Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Toz metalürjisinde ana üretim aşamaları (Zhu, 2014)

Toz metalürjisinde malzeme üretimi için kullanılan matris ve takviye tozları homojen bir yapı elde etmek için karıştırılır. Homojen yapının oluşması malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Elde edilen homojen karışım istenilen geometride bir kalıp içerisinde şekillendirilmek için preslenir. Presleme işleminin ardından malzemenin mukavemetini artırmak ve partiküller arasında bağ oluşmasını sağlamak için malzemeler, ergime sıcaklıkları altında bir sıcaklıkta belirli bir süre sinterlenir. Sinterleme işleminin ardından ihtiyaç halinde malzemeye kaplama, ısıl işlem, yağ emdirme vb. ikincil veya tamamlayıcı son işlemler uygulanabilir (Koçanaoğulları, 2010).

Kompozit malzeme üretimi için kullanılacak olan tozların üretimi önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Toz metalürjisinde kullanılan tozlar üretim yöntemlerine göre farklı özellikler göstermekte ve imal edilen son ürünün özelliklerini de etkilemektedir (Ürer, 2009).

#### **4.3.1. Karıştırma ve Harmanlama**

Karıştırma, farklı metal veya alaşımlardan, harmanlama ise farklı boyutlarda ve tek bileşenli tozlardan homojen bir kompozisyon oluşturulması işlemidir. Karıştırma ve harmanlama, matris ve takviye malzemelerinin tane boyutlarının ayarlanması, karışımın kalıp içerisinde rahatlıkla akabilmesi ve homojen bir karışım elde edebilmek amacıyla yapılmaktadır (German, 2007).

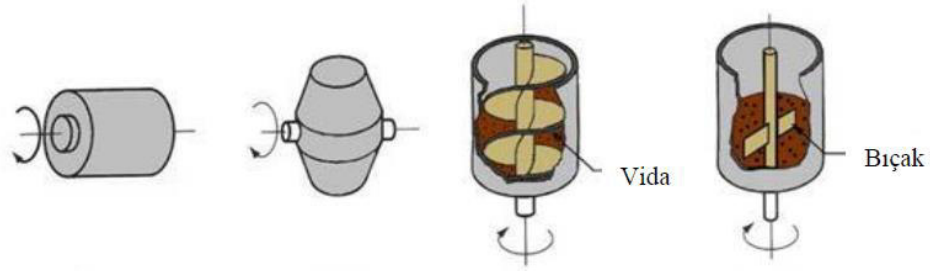
Karıştırma ve harmanlama işlemi bazı parametrelerden etkilenmektedir. Bunlar; tozların fiziksel karakteri, karıştırıcı boyutu, karıştırma hızı, toz hacmi ve karıştırma süresidir. Ayrıca karıştırma işleminin atmosfere açık ortamda yapılması da işlemi etkilemektedir (Ayata, 2014).

Kalıp içerisinde gerçekleştirilen sıkıştırma işleminden dolayı kalıp yüzeyi ile toz tanecikleri arasında bir sürtünme kuvveti meydana gelmektedir. Bu kuvvet hem sıkıştırma işlemini zorlaştırmakta olup fazlaca enerji ihtiyacı gerektirmekte hem de parçanın kalıptan çıkartılmasını zorlaştırmaktadır. Bu sorunları tamamen veya kısmen ortadan kaldırmak için karışım içerisine yağlayıcı malzemeler eklenmektedir. Kullanılan bu yağlayıcılar parçanın kalıptan çıkmasını kolaylaştırmaktadır. Fakat karışım içerisindeki yağlayıcı miktarı arttıkça sinterleme sırasında parça yüzeyinde gözenekler oluşacak ve bu da parçanın yüzey kalitesinde önemli bir düşmeye neden olacaktır (Sayın, 2020).

Kullanılan yağlayıcı miktarı imal edilen parçanın geometrisine bağlı olarak %0,5-1,5 arasında eklenmelidir. Metal tozları için en yaygın kullanılan yağlayıcılar; stearik asit, parafin, çinko stearat, metalik stearat, lityum stearat, kalsiyum stearat ve grafitir. Bu yağlayıcılar sinterleme sırasında buharlaşarak yapıyı terkederler ancak grafit yağlayıcı özelliğinin yanında bağlayıcı özellikte gösterdiği için yapı içerisinde kalmaya devam eder (Ayata, 2014).

Tozların karıştırılmasında ve harmanlanmasında değişik öğütme ve karıştırma ekipmanları kullanılmaktadır. Bunlar; dönen tambur, dönen çift koni, vidalı mikser

ve bıçaklı mikserdir (Ayata, 2014). Şekil 4.6'da farklı öğütme ve karıştırma ekipmanları gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları (Ayata, 2014)

#### 4.3.2. Sıkıştırma (Presleme)

Karıştırma işlemi tamamlanmış tozlar, imal edilecek parçanın şekline ve ölçüsüne uygun bir kalıpta manuel veya hidrolik bir presle sıkıştırılır. Sıkıştırma işleminin amacı; tozlara istenilen şekli vermek ve ihtiyaç duyulan oranda gözenekli yapı elde etmektir. Presleme işlemi parçaya şekil verir ancak mukavemet kazandırmaz. Mukavemet sinterleme işleminden sonra elde edilir. Kalıp içerisindeki tozlardan kalıp boşluğunu tamamen doldurması ve sıkıştırma işleminden sonra parçanın istenilen yoğunlukta olması beklenmektedir. Zira toz metalürjisi ile imal edilen parçaların mekanik özelliklerini yoğunluk çok büyük oranda etkilemektedir (Babayev, 2007).

Şekillendirilebilirlik kabiliyeti malzemenin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Malzeme gevrekleştikçe şekillendirilebilme kabiliyeti azalmaya başlamaktadır. Ayrıca tanecikler arasındaki ve tanecikler ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmede bu kabiliyeti etkilemektedir (Şenel, 2018).

Kalıpla presleme işlemi üç aşamada gerçekleşir;

- Tozların kalıba yerleştirilmesi
- Kalıp içerisindeki tozlara kuvvetin uygulanması
- Şekillendirilen parçanın kalıptan çıkartılması

Sıkıştırma işlemi parçanın geometrisine, boyutuna ve maliyetine bağlı olarak farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu yöntemler; haddeleme, metal kalıplarda presleme ve izostatik preslemedir.

#### 4.3.2.1. Metal Kalıplarda Sıkıştırma

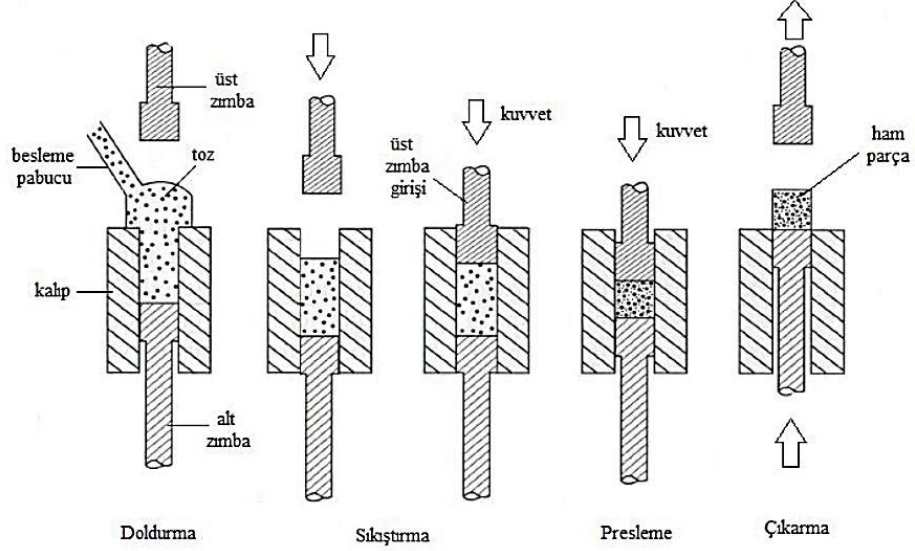
Metal kalıplarda sıkıştırma yöntemi, tozların şekillendirilmesinde en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Bu yöntemde, hidrolik ve mekanik presler kullanılmaktadır. Elde edilen yoğunluk değerleri %95'e kadar çıkmaktadır. Sıkıştırma işleminde yük uygulanmaya başlandığı anda yoğunluk da artmaya başlamaktadır. Yoğunluk artışı üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada tozlar yer değiştirerek sıkı bir düzen alır. İkinci aşamada, tozlarda önce elastik deformasyon daha sonra da yükün artmasıyla plastik deformasyon gözlenir. Üçüncü aşamada ise gevrek tozlar yükün etkisini kaldıramayarak kırılır ve daha küçük tozlar oluştururlar (Babayev, 2007).

Bu yöntemde iki tür presleme tekniği kullanılmaktadır. Bunlar;

- Tek eksenli zımbalarla sıkıştırma
- Çift eksenli zımbalarla sıkıştırma

Tek eksenli zımbalarla sıkıştırma işleminde presleme kuvveti arttıkça yoğunluk değeri artmakta ve gözeneklilik oranı azalmaktadır. Oldukça ekonomik bir yöntemdir. Fakat presleme işlemi sırasında kuvvet uygulandıkça hem tozların kendi aralarındaki hem de tozlar ile kalıp cidarları arasındaki sürtünmeden dolayı ve boy/en oranının yüksek olduğu durumlarda düzgün olmayan bir basınç dağılımı görülmektedir. Bu durum iş parçası üzerinde homojen olmayan bir yoğunluk dağılımına neden olmaktadır. Dolayısıyla hareketli zımbaya yaklaştıkça yoğunluk değeri düşmektedir. Ayrıca karmaşık şekilli parçaların üretimi de yapılamamaktadır (Özay, 2004).

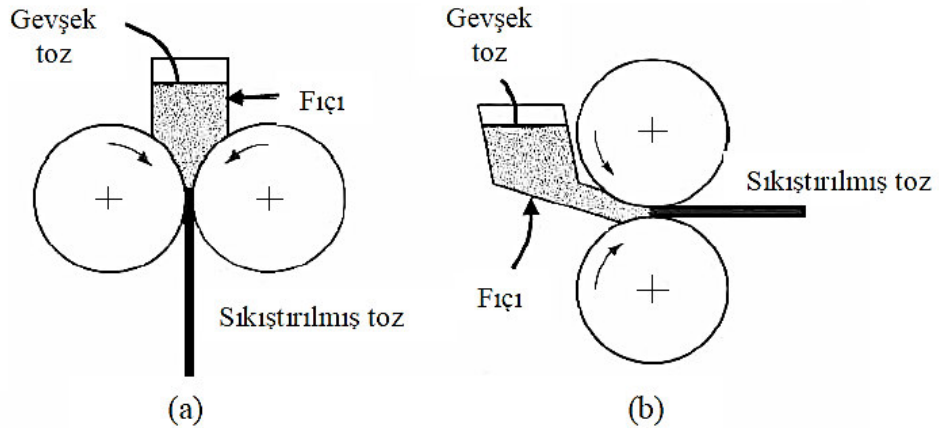
Tek eksenli zımbaların bu kısıtlamalarından dolayı çift eksenli zımbalar geliştirilmiş ve bu sayede daha yoğun ve daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Şekil 4.7'de tek eksenli preslemeyle parça üretim aşamaları verilmiştir.



Şekil 4.7. Tek eksenli preslemeyle ham parça üretim aşamaları (German, 2007)

#### 4.3.2.2. Metal Tozlarının Haddelenmesi

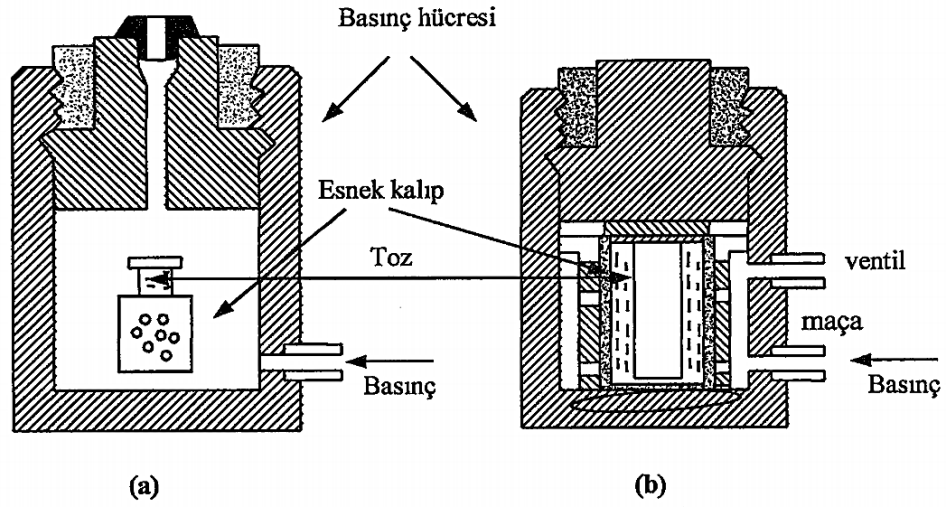
Bu yöntem, şekil itibariyle basit olan çubuk, plaka ve şerit gibi malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem, toz haldeki karışımın bir besleyici vasıtasıyla haddeleme merdaneleri arasına sürekli dökülüp tozların yoğunlaşması sağlanarak toz-metal şeritler üretilmesi esasına dayanır. Haddeleme işlemi, düşey veya yatay yönde gerçekleştirilebilir. Şekil 4.8’de haddeleme çeşitlerine ait görseller verilmektedir. Haddeleme işleminden sonra merdanelerin önüne yerleştirilen fırın vasıtasıyla malzeme ısıtılıp tekrar haddelenebilir (Kevenlik, 2013).



Şekil 4.8. Metal tozlarının haddelenme şekilleri: (a) dikey ve (b) yatay konumda (Babayev, 2007)

### 4.3.2.3. İzostatik Sıkıştırma

İzostatik sıkıştırma, ileri teknoloji malzemelerin üretilmesinde önemli bir yere sahiptir. Diğer metotlarla üretilemeyen karmaşık şekilli, boy/en oranı yüksek ve üstün mekanik özelliklere sahip parçalar izostatik sıkıştırma ile üretilmektedir. Bu sıkıştırma tekniğinde, üretimi yapılacak olan parçanın şekline sahip esnek bir kalıp içerisine toz-metal malzeme doldurulur ve kalıbın havası boşaltılır. Havası boşaltılan kap; yağ, hava veya su dolu basma ünitesine yerleştirilerek sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Sıkıştırma işlemi oda sıcaklığında yapılır. Sıkıştırma işleminde esnek kalıp kullanıldığından kalıp ile toz-metal arasında sürtünme gerçekleşmemekte ve sıkıştırma işleminin sıvı ortamda yapılması sebebiyle basınç her yerde eşit olmaktadır. Bu nedenlerle malzeme üzerinde yoğunluk her yerde eşit olmaktadır. Şekil 4.9’da sıkıştırma işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Kütük halindeki takım çelikleri ve süper alaşım uçak türbini diskleri bu yöntemin örneklerindedir (Özay, 2004; Boz, 1999).



Şekil 4.9. İzostatik sıkıştırma prensibi (a) ıslak, (b) kuru (Boz, 1999)

### 4.3.3. Sinterleme

Toz metalürjisinin en önemli işlemlerinden birisi de sinterleme işlemidir. Sinterleme, sıkıştırılmış tozların metallerin ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta belirli bir süre tutularak tanecikler arasında kuvvetli bağların oluşturulması işlemidir. Sinterleme sıcaklığı olarak tek bileşenli sistemlerde malzemenin ergime sıcaklığının  $2/3$ 'ü veya  $4/5$ 'i kadarı seçilirken birden

fazla bileşenli sistemlerde ise ergime sıcaklığı en düşük olan malzemenin ergime sıcaklığı üzerinde bir sıcaklık sinterleme sıcaklığı olarak tercih edilir (Yılmaz, 2013).

Sinterlenmiş malzemelerden beklenen mekanik özellikler sinterleme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Sinterleme sıcaklığı, süresi ve sinterleme ortamı mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Bu nedenle bu parametreler malzemenin malzemeye değiştiği için deneysel olarak belirlenmektedir (Varol, 2012).

Sinterleme işleminde amaç, kompozit yapı içerisinde tanecikler arasındaki boşluğu azaltıp tanecikler arasında kuvvetli bağlar oluşturarak malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektir. Presleme işleminden sonra tozlar noktasal olarak temas halindedir ve yapı gözenekli bir haldedir. Sinterleme işlemi ile beraber tanecikler arasındaki noktasal temas, boyun oluşumu gerçekleştirerek yerini kaynaklanmaya bırakır. Bu sayede tanecikler arasında kuvvetli bağlar oluşur ve mekanik özellikler artar (Varol, 2012). Şekil 4.10'da sinterleme sırasında boyun oluşumu gösterilmektedir.

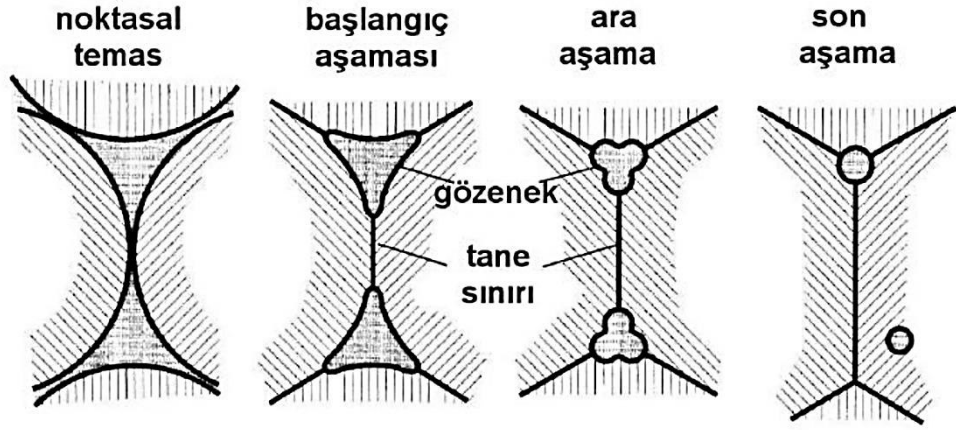


Şekil 4.10. Sinterleme sırasında boyun oluşumu (Ayata, 2014)

Sinterleme sırasında tanelerin birbirine bağlanması olayı aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir. Şekil 4.11'de tanelerin birbirine bağlanmasına ait görsel verilmektedir.

- Partiküllerin birbiriyle bağ oluşturması; bu aşamada tane sınırlarında difüzyon olayı gerçekleşir. Eğer yapıda oksitlenme mevcutsa bu safhada gecikmeler görülebilir.

- Boyun oluşması ve büyümesi; taneler arasında bağların oluşmasıyla boyun büyümesi gerçekleşir. Yapı içindeki gözeneklilik durumu değişmez.
- Gözeneklerin kapanması; taneler arasındaki bağların artmasına bağlı olarak gözenek oranının %10'un altına düşmesidir.
- Gözenek yuvarlaklaşması; taneler arasındaki boşluğun giderek azalması ve yuvarlak bir hal almasıdır.
- Yoğunlaşma ve gözenek büzülmesi; bu safhada gözenekler artık çok küçülmüştür ve büzülmeye başlamıştır.
- Gözenek büyümesi; gözeneklerin birleştiği ve yeni büyük gözenekleri oluşturduğu aşamadır (Matik, 2003)



Şekil 4.11. Sinterleme aşamaları (Varol, 2012)

#### 4.4. Toz Metalürjisi ile Üretilen Kompozitlerin Plastik Şekillendirilmesi

Plastik şekil verme işlemi (PŞV), metallerin katı halde hacimlerini ve kristal yapı özelliklerini koruyarak, çeşitli takım ve kalıplarla akma dayanımları üzerinde kuvvetler uygulanarak şekillerinin kalıcı olarak değiştirilmesi işlemidir. PŞV işlemi uygulanacak malzeme düşük akma dayanımına ve sünek karaktere sahip olmalıdır. PŞV işlemi sıcaklık, deformasyon hızı, sürtünme ve pekleşme davranışı gibi faktörlerden etkilenmektedir (Karamış, 2012).

Kompozit malzemelere sıcak veya soğuk şekillendirme işlemlerinin uygulanması, kompozit malzemelerin yoğunluklarını arttırmak, gözeneklilik oranlarını düşürmek, sertlik ve basma dayanımlarını arttırmak amacıyla yapılmaktadır.

#### 4.4.1. Sıcak Şekillendirme

Sıcak şekillendirme, yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklıkta malzemelere uygulanan deformasyon işlemidir. Sıcak deformasyon yöntemlerinde aşırı yüksek kuvvetler kullanmadan ve malzemede kırılmaya sebep olmadan malzemelerin şeklini değiştirmek mümkündür. Yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde yapılan şekillendirme işlemlerinde, malzeme pekleşmekte ve sünekliği artmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklık uygulaması ile malzemenin akma dayanımı düşmekte ve şekillendirme işlemleri için daha düşük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır.(Karamış, 2012).

Sıcak şekillendirme bazı avantajlara sahiptir. Bunlar;

- Sıcaklıktan dolayı daha düşük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır
- Malzemenin şekli tek seferde büyük oranda değiştirilebilmektedir
- Malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetleri yüksektir
- Daha sonraki işlemler için malzemenin dayanımının artmaması

gibi avantajları vardır. Bunun yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Üretilen ürünlerin boyutsal hassasiyeti düşüktür.
- Parça üretimi için kullanılan sıcaklıktan dolayı yüksek enerji ihtiyacı vardır.
- Üretilen ürünlerin yüzey kalitesi düşüktür.
- Sıcaklıktan kaynaklı kullanılan kalıpların ömürleri kısadır (Mısırlı, 2006; Karamış, 2012).

#### 4.4.2. Soğuk Şekillendirme

Soğuk şekillendirme malzemelerin oda sıcaklığında veya yeniden kristalleşme sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta kuvvet uygulanarak malzemelerin şekillerinin değiştirilmesi işlemidir. Malzemelere soğuk halde kuvvet uygulanarak malzeme içerisinde dislokasyon yoğunlukları artırılarak malzemenin pekleşmesi sağlanmaktadır (Karamış, 2012).

Soğuk şekillendirme işlemi sıcak şekillendirme işlemine göre bazı avantajlara sahiptir. Bunlar;

- Şekillendirme işlemi için sıcaklık ihtiyacı yoktur.
- Yüzey kalitesi yüksektir.
- Üretilen parçaların boyutları kontrol edilebilir.
- Malzemelere yöne bağlı mukavemet değerleri kazandırabilir.

- Kirlenme en düşük seviyededir.

Bu avantajların yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Sıcak deformasyon işlemine kıyasla şekillendirme işlemi için yüksek kuvvetlere ihtiyaç vardır.
- Kullanılacak donanımların daha mukavemetli olması gerekmektedir.
- Elde edilen malzemelerin süneklik değerleri düşüktür.
- Tanelerin yönlenmiş olması bazı durumlarda sorun oluşturabilir.
- Şekillendirme işleminden sonra malzeme, içyapısında iç gerilmeler bulundurabilir (Karamış, 2012).

#### **4.4.3. Plastik Şekil Verme Yöntemleri**

##### **4.4.3.1. Dövme**

Dövme işlemi, plastik şekil verme yöntemleri arasında en eski ve en çok kullanılan yöntemlerden biridir. İş parçasının deformasyonunun darbe veya basma kuvvetleriyle karşılıklı iki kalıp arasında gerçekleştirildiği PŞV yöntemidir. Motorlar için krank milleri ve biyeler, cıvata başları, el aletleri ve dişliler dövme işlemi ile üretilen malzemelerin başlıca örneklerindedir (Mısırlı, 2006).

Dövme işlemi oda sıcaklığında (soğuk şekillendirme), ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Dövme işlemi açık kalıpta dövme ve kapalı kalıpta dövme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

##### **Açık Kalıpta Dövme**

Bu teknikte dövülecek olan malzemenin yan yüzeyleri serbest halde hareket etmektedir. Açık kalıpta dövme işlemi basit ve düz şekilli kalıplarla yapılan dövme işlemidir (Mısırlı, 2006).

##### **Kapalı Kalıpta Dövme**

Açık kalıpta dövme işleminde malzemenin yan yüzeyleri serbest halde hareket ettiği için karmaşık geometrili ve dar toleranslı malzemelerin şekillendirilmesi işlemi, açık kalıpta dövme ile genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle karmaşık geometrili ve dar toleranslı malzemelerin şekillendirilmesi işlemi kapalı kalıpta dövme ile gerçekleştirilir. Bu teknikte üretilecek parçanın şekline sahip iki yarım kalıp kullanılır (Mısırlı, 2006).

#### **4.4.3.2. Ekstrüzyon**

Ekstrüzyon işleminde, şekillendirilecek malzeme bir kalıp içerisine yerleştirilerek basma kuvvetlerinin etkisiyle kalıbın dışına akmaya zorlanması işlemidir. Ekstrüzyon işlemi soğuk veya sıcak olarak yapılabilir. Ekstrüzyon işlemi genel olarak diş macununun tüp içerisinden akmasına benzemektedir. Ekstrüzyon işlemi ile karmaşık veya içi boş ürünler ile çubuk, boru, şerit gibi ürünler de üretilebilir. Bu yöntemle yüksek boyutsal doğrulukta ürünler üretilebilir. Bu yöntemle şekillendirilen malzemelerde tanecik yönelmesi diğer yöntemlere kıyasla daha fazladır (Mısırlı, 2006).

#### **4.4.3.3. Haddeme**

Haddeme işlemi, dönen bir çift merdane arasına yerleştirilen malzemeye merdaneler tarafından basma kuvvetleri uygulanarak, malzemenin şeklini veya kesitini değiştirme işlemidir. Haddeme işlemi de sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilebilir. Bu yöntemle düz plaka veya saclar gibi basit geometri malzemelerin yanı sıra ray, I-profil ve U-profil gibi malzemelerde şekillendirilebilir (Mısırlı, 2006).

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında, toz metalürjisi yöntemiyle Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-Grafen Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Grafen hibrit kompozitler üretilmiştir. Kompozit yapılarda matris malzemesi olarak Al2024 alüminyum alaşım tozu kullanılırken takviye elemanı olarak da grafen ve silisyum nitrür tozları kullanılmıştır.

Al2024 alüminyum alaşımı, bünyesinde ana alaşım elementi bakır bulundurmasının yanında bunların haricinde, mangan ve magnezyum barındırmaktadır. Bunların haricinde eser miktarda demir (Fe), çinko (Zn), krom (Cr), silisyum (Si) ve titanyum (Ti) da bulundurabilmektedir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek yorulma dayanımlarından dolayı havacılık ve uzay sanayinde, uçakların bağlantı parçalarında, millerde ve dişlilerde, mühimmat yapımında, muhtelif saat parçalarında, otomotiv motor blok ve silindirlerinde, medikal uygulamalarda ve daha pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Ayrıca ısı işlemlerle sertleştirilebilmekte ve kaynak edilebilme kabiliyetleri de vardır. Bu çalışma kapsamında kullanılan Al2024 alüminyum alaşımı Nanografi Nano Technology (Türkiye) firmasından temin edilmiş olup 325 mesh (~44 µm) boyutundadır. Erime sıcaklığı 637 °C olup, yoğunluğu 2,78 g/cm<sup>3</sup>'tür. Al2024 alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon bilgileri Tablo 5.1'de ve alaşıma ait diğer genel özellikleri ise Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Al2024 alüminyum alaşımına ait kimyasal kompozisyon

Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Si	Ti	Fe	Al
3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	≤0,1	≤0,25	≤0,5	≤0,15	≤0,5	Kalan Yüzde

Tablo 5.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alüminyum alaşımına ait genel özellikler

Özellik	Değer
Bileşik formülü	AlCuMgMn
Görünüm	Pudra
Erime Noktası	502-638 °C
Yoğunluğu	2,78 g/cm <sup>3</sup>
Poisson Oranı	0,33
Özısı	0,875 J/g-°C
Akma Dayanımı	345 MPa
Gerilme Direnci (Nihai)	469 MPa
Termal İletkenlik	121 W/mK
Termal Genleşme	23,2-24,7 µm/m-°C
Vickers Sertliği	137

Takviye elemanı olarak kullanılan grafen, 2004 yılında keşfedilmiş karbon atomlarının bir düzlemde altıgen hücreler oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşan grafit yapının tek katmanıdır. Yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasının yanında bir o kadar da esnektir. Kendinden yağlama özelliğine sahip olması grafeni yağlamanın önemli olduğu sürtünmeli ortamlarda aranan bir takviye elemanı yapmaktadır. Ayrıca grafen vücut sıvılarıyla tepkimeye girmemektedir. Uzay ve havacılık, otomotiv, haberleşme, medikal, tekstil, ulaşım, savunma ve enerji alanı gibi çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu çalışmada kullanılan grafen takviye malzemesi Graphene Checimal Industry (Türkiye) firmasından temin edilmiş olup 5-8 nm kalınlıkta ve 120-150 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahiptir. Tablo 5.3’de grafene ait genel özellikler verilmektedir.

Tablo 5.3. Grafen nanotabakaya ait genel özellikleri (Şenel,2018)

Genel Özellik	Değer
Hibrit şekli	sp <sup>2</sup>
Tabaka sayısı	Çok tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Bağ yapısı	Kovalent bağ
Boyut	İki
Saflik derecesi (%)	99
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,2-0,4
Kalınlık (nm)	5-8
Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	120-150
Yüksek sıcaklık direnci	-75 +200 °C arasında özellikleri değişmiyor.
Isıl iletkenliği (W/mK)	4840-5300
Elektron hareketliliği (cm <sup>2</sup> /V.s)	~1,5x10 <sup>4</sup>
Elastisite modülü (TPa)	~1

Kullanılan diğer bir takviye malzemesi olan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, oksit dışı nitrür seramikler sınıfında yer alan üstün mekanik özelliklere, yüksek oksidasyon ve şok direncine, yüksek kırılma tokluğuna, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme özelliğine ve düşük yoğunluğa sahip olma gibi özelliklerinden dolayı sıkça tercih edilmektedirler. Motor

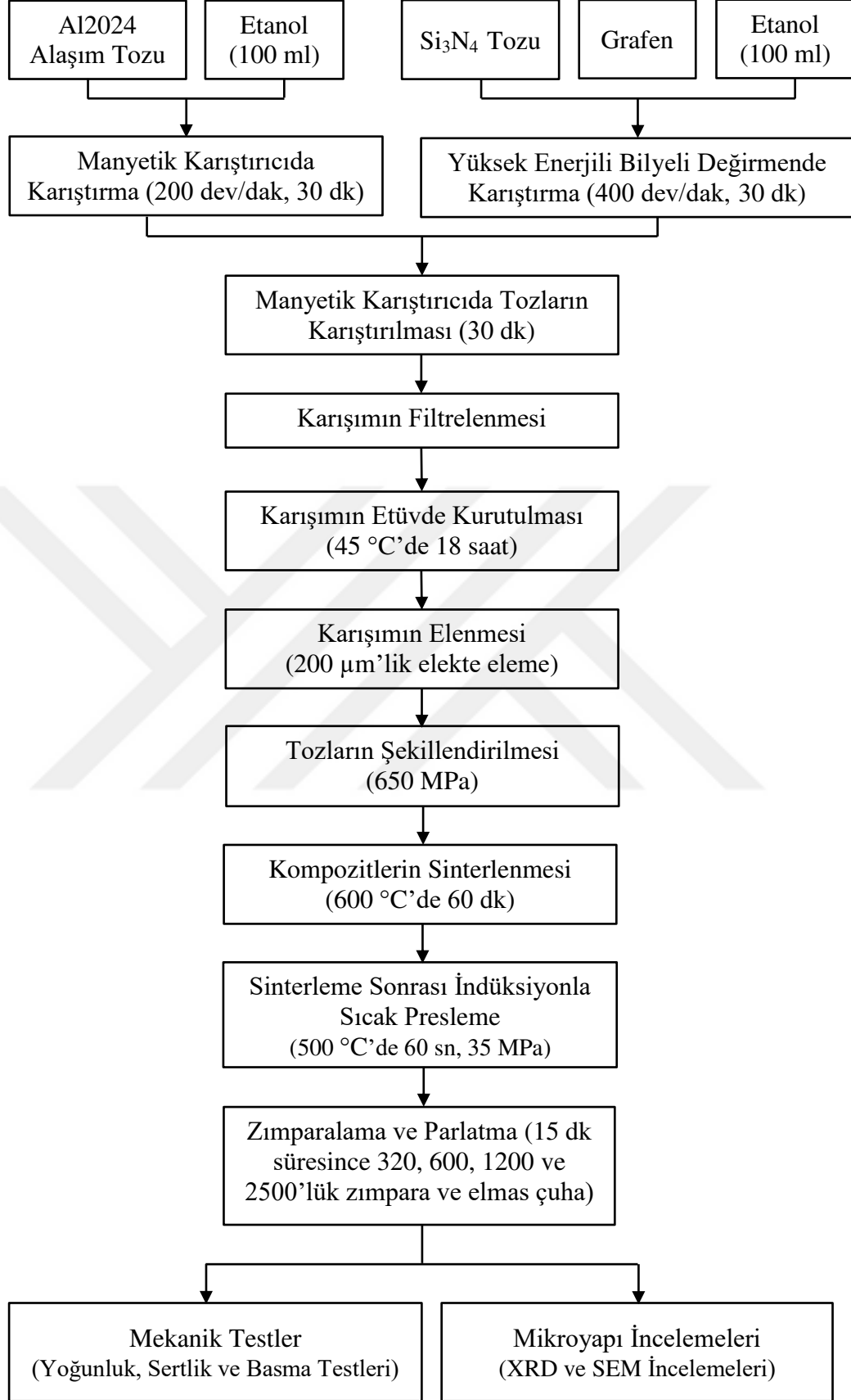
parçalarında, korozyonu önlediği için kaplama uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Bu çalışma kapsamında kullanılan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye malzemesi, Ube Industry (Japon) firmasından temin edilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'e ait genel özellikler Tablo 5.3'te verilmektedir.

Tablo 5.4. Silisyum nitrüre ait genel özellikler (Şenel, 2018)

Genel Özellik	Değer
Teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ fazı: 3,168-3,118 $\beta$ fazı: 3,19-3,202
Molekül ağırlığı (g/mol)	140,28
Sertliği (HV)	1450
Kırılma tokluğu [25 °C] (MPa.m <sup>1/2</sup> )	5,7
Eğme dayanımı [25 °C, 4 nokta eğme] (MPa)	689
Elastisite modülü (GPa)	310
Poisson oranı	0,24
Isıl iletkenliği (W/mK)	29
Isıl genleşme katsayısı (293-1473 °K) (K <sup>-1</sup> )	3,3x10 <sup>-6</sup>
Maksimum kullanım sıcaklığı (°C)	1000
Ergime sıcaklığı (°C)	1800

## 5.2. Yöntem

Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-GNT ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeler ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-GNT hibrit kompozit malzemeler toz metalürji yöntemiyle üretilmiş olup üretim sonrası mekanik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretim aşamaları; tozların karıştırılması, tozların filtrelenmesi, tozların kurutulması, tozların elenmesi, tozların şekillendirilmesi, numunelerin sinterlenmesi, numunelerin sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlenmesi ve karakterizasyon aşamalarından oluşmaktadır. Toz metalürjisi ile malzeme üretimine ait şema Şekil 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.1. Toz metalürji yöntemiyle kompozit malzeme üretimine yönelik akış diyagramı

## 5.2.1. Toz Metalürjisiyle Kompozit Malzeme Üretimi

### 5.2.1.1. Toz Miktarının Belirlenmesi ve Karıştırılması

Toz metalürjisi ile kompozit malzeme üretirken kullanılacak tozların ağırlığının çok net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında kullanılacak Al2024 alüminyum alaşımı, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve grafen tozlarının ağırlıkları Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.2’de gösterilmekte olan Radwag AS 220.R2 marka 0,0001 g hassasiyetle çalışan terazi ile belirlenmiştir.



Şekil 5.2. Hassas terazi

Ağırlığı belirlenen Al2024 matris tozu, 100 ml etanolla bir beher içerisinde birbirine eklenerek Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.3’de gösterilmekte olan Mtops MS300HS marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı kullanılarak 30 dk boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.3. Mtops MH300HS ısıtıcılı manyetik karıştırıcı

Matris malzemesi etanol içerisinde manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemine tabi tutulurken aynı esnada  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafen tozları da etanol içerisinde yüksek enerjili bilyeli değirmende topaklanmaları engellemek ve homojen bir yapı elde etmek amacıyla karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için, değirmenin karıştırma haznesine hacimce 1/3 oranında zirkon bilye, 1/3 oranında da takviye malzemesi ve etanol eklenerek 30 dk süresince 400 dev/dk karıştırma hızında karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işlemi için Şekil 5.4’de gösterilen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan MTI MSK-SFM-3 marka yüksek enerjili bilyeli değirmen kullanılmıştır.

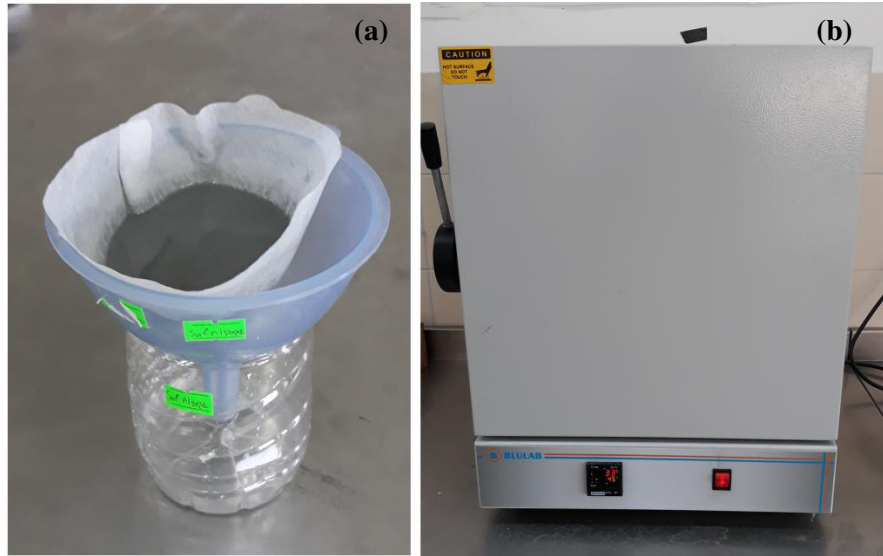


Şekil 5.4. MTI MSK-SFM-3 marka yüksek enerjili bilyeli değirmen

Bu işlemleri takiben bilyeli değirmendeki etanol-grafen-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> karışımı, etanol-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışımına eklenerek manyetik karıştırıcıda 30 dk süresince tekrar karıştırma işlemine tâbi tutulur.

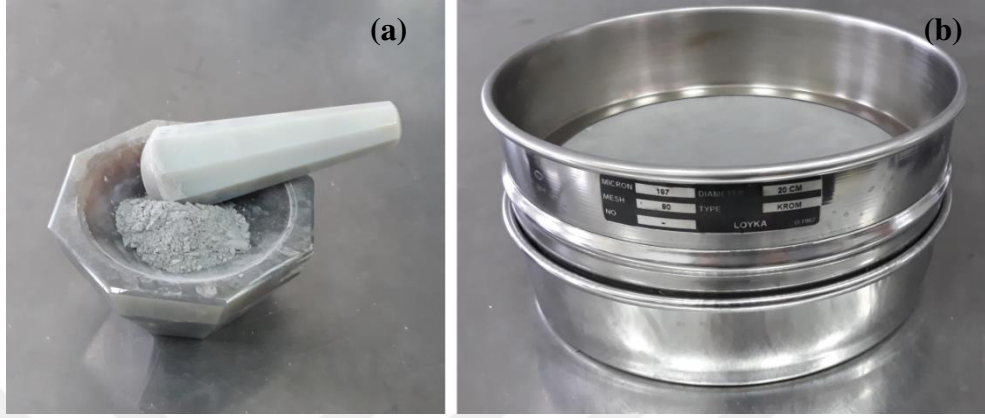
#### 5.2.1.2. Karışımın Filtrelenmesi, Kurutulması ve Elenmesi

Elde edilen etanol-toz karışımından etanolün uzaklaştırılması için karışım öncelikle filtreleme işlemine tabii tutulur. Filtreleme işleminden sonra bünyesinde hala bir miktar etanol bulunduran toz karışımını kurutmak için toz karışımı vakuma alınabilen bir etüv fırın içerisinde 45 °C'de 18 saat boyunca kurutulur. Kurutma işlemi için Şekil 5.5'de gösterilen Ondokuzmayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yer alan Bluelab FN120 markalı etüv fırını kullanılmıştır.



Şekil 5.5. (a) Karışımın filtrelenmesi ve (b) kurutulması işlemi

Kurutma işleminden sonra elde edilen tozlar bir havan içerisinde hafice dövüldükten sonra 200 mikron ölçüsünde bir elek aracılığı ile elenir. Şekil 5.6'da bu işlemlere ait görseller verilmektedir. Bu sayede oluşabilecek toprakların önlenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5.6. (a) Tozların dövülmesi ve (b) tozların elenmesi işlemi

### 5.2.1.3. Tozların Şekillendirilmesi

Eleme işleminden sonra elde edilen tozlar mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi amacıyla belirli bir geometriye sahip kalıp içerisinde şekillendirilir. Şekillendirme işlemi için paslanmaz çelikten yapılmış bir kalıp (Şekil 5.7a) kullanılmıştır. Bu kalıp yardımıyla 10 mm × 10 mm ölçülerinde kare geometrili numuneler üretilmiştir. Presleme işlemi için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalürji ve Malzeme mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan MSE-10 markalı manuel hidrolik el presi kullanılmıştır (Şekil 5.7b). Bu pres kullanılarak 8 tonluk bir yük uygulanmış olup bu yükün etkisiyle numune üzerinde 650 MPa'lık bir basınç oluşmuştur.

Şekillendirme işleminde şekillendirilecek toz miktarı belirlendikten sonra şekillendirme kalıbı temizlenir ve yağlanır. Bu işlem her bir şekillendirme işleminden sonra muhakkak yapılmalıdır. Bu işlem sayesinde sürtünme kuvveti en aza indirilmekte ve şekillendirilen numunenin kalıptan çıkartılması kolaylaşmaktadır.



Şekil 5.7. (a) Presleme kalıbı ve (b) manuel el presi

#### 5.2.1.4. Şekillendirilen Numunelerin Sinterlenmesi

Şekillendirme işleminden sona elde edilen ham numunelerin tanecikleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturmak ve bu suretle mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla numunelere sinterleme işlemi uygulanır. Bu işlem için Şekil 5.8’de gösterilen ve OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Protherm marka 12/50/250 model tüp fırın kullanılmıştır. Bunun yanında alüminyum ve alaşımları yüksek sıcaklıklarda çok hızlı oksitlenme davranışı göstermektedir. Bu yüzden oksitlenmeyi önlemek için  $5 \times 10^{-2}$  MPa vakum basıncı sağlayabilen OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında yer alan Value VRD-4 marka bir vakum pompası da tüp fırın ile birlikte kullanılmıştır. Şekil 5.8’de tüp fırın ve vakum pompasına ait görseller verilmektedir.

Şekillendirme işleminden sonra elde edilen ham numuneler yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve vakum pompasına bağlanabilen bir kuartz cam tüp içerisine yerleştirilmiştir. Ardından 15 dk boyunca vakuma alma işlemine tâbi tutulmuştur. Yürütülen literatür çalışmaları sonucunda, sinterleme işlemi için 60, 120 ve 180 dk sinterleme süreleri ile 560, 580 ve 600 °C sinterleme sıcaklıkları belirlenmiştir. Her

bir sıcaklık için üç farklı sürede sinterleme işlemi yapılmıştır. Elde edilen numunelere yoğunluk ölçümü ve sertlik analizi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucu en iyi mekanik özellikler 600 °C sinterleme sıcaklığında ve 60 dk'lık sinterleme süresinde elde edilmiştir. Bu sinterleme koşulları dikkate alınarak bütün çalışma bu sinterleme koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Tüp fırın ve vakum pompası

#### 5.2.1.5. Sinterlenen Numunelerin İndüksiyonla Sıcak İşlenmesi

Sinterleme işleminden sonra elde edilen numunelerin yoğunluk değerlerini artırmak, gözeneklilik oranlarını düşürmek ve mekanik özelliklerini daha da geliştirmek adına kompozit numunelere sinterleme işleminden sonra indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. İndüksiyonla sıcak işlem ise hem taneciklerin yönlenmesini sağlayarak mekanik özellikleri artırmak amacıyla hem de sinterleme işleminin çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Bu işlem için OMÜ Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan MTI EQ-SP-15VIM marka su soğutmalı radyo frekans indüksiyonla ısıtma makinesi entegreli Başaran marka 11099 model 10 ton yük kapasiteli tek eksenli hidrolik pres kullanılmıştır. Kullanılan indüksiyonla sıcak işlem makinesine ait görsel Şekil 5.9'da verilmiştir. İndüksiyonla sıcak işlem makinesi, 220 V voltaj ve 50 Hz frekans ile çalışmaktadır. Çıkış gücü 2-25 kW ve çıkış akımı 0-34 A'dır. Bu makine, ağırlığı 100 g'dan küçük ve erime sıcaklığı da 1900 °C'den küçük olan malzemelerin kullanımını için uygundur.

Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işleme (SSİSİ) başlamadan önce işlem parametrelerini belirlemek amacıyla; sisteme K tipi termocouple ve infrared lazer termometre entegresi yapıp, deneme yanılma suretiyle birçok tekrar sonucu işlem sıcaklığı 60 saniye boyunca 500 °C'de sabit kalacak şekilde ısıtma gücü ve tutma

gücü belirlenmiştir. Çalışma sıcaklığı sisteme entegre edilen termometreler ile teyit edilmiştir. Daha sonra sistem çalıştırılmadan önce kompozit numune grafit pota içerisine yerleştirilmiştir. Grafit pota içerisine yerleştirilen numuneye 35 MPa'lık bir presleme basıncı uygulanmıştır. İşlem parametreleri belirlendikten sonra, indüksiyonla sıcak işlemden numuneler 62 sn'de 500 °C sıcaklığa çıkarılıp bu sıcaklıkta 60 sn bekletildikten sonra 10 sn'de soğutulmuştur. Kuvvet kaldırıldıktan sonra numune, pota içerisinden çıkarılarak mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla zımparalama ve parlatma işlemi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.9. İndüksiyonla sıcak presleme makinesi

#### **5.2.1.6. Numunelerin Zımparalanması ve Parlatılması**

Sinterleme işleminden sonra elde edilen numunelere sertlik testi yapabilmek amacıyla numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için OMÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarındaki METKON marka zımparalama ve parlatma makinesi kullanılmıştır. Makineye ait görsel Şekil 5.10'da verilmiştir.

Zımparalama işlemi, 15 dk süresince 280 dev/dk dönme hızıyla sırasıyla 320, 600, 1200 ve 2500'lük SiC su zımparaları kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra çuha üzerine azar azar su damlatılıp ve çuha üzerine nano alümina tozu eklenerek 15 dk süresince ve 300 dev/dk dönme hızında parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10. Numune zımparalama ve parlatma cihazı

## 5.2.2. Test Yöntemleri ve Karakterizasyon Teknikleri

### 5.2.2.1. Yoğunluk Ölçümü ve Gözenekliliğin Belirlenmesi

Yoğunluk ölçümünde; teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk, karışımın yoğunluğu ve deneysel yoğunluk değerleri ölçülmektedir.

Şekillendirilen numuneler teorik yoğunluk ( $\rho_T$ ) değerleri Eşitlik (5.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_T = m/V \quad (5.1)$$

Burada,  $m$  numunenin kütlesi ( $g$ ),  $V$  numunenin hacmidir ( $cm^3$ ). Numunenin hacmi ise  $V = a \times b \times c$  formülü ile hesaplanmaktadır. Bu ifadedeki  $a$ ,  $b$  ve  $c$  ifadeleri numunenin kenar uzunluklarıdır.

Numunelerin yoğunluklarının referans kabul edilen başka bir malzemenin yoğunluğuna oranı ise bağıl yoğunluğu ( $\% \rho_T$ ) vermektedir. Bu çalışma kapsamında ise referans malzeme toz karışımı olarak kabul edilmiştir. Bu veriler ışığında numunelerin teorik bağıl yoğunluğu ( $\% \rho_T$ ) ise Eşitlik (5.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\% \rho_T = (\rho_T / \rho_K) \times 100 \quad (5.2)$$

Bu ifadedeki  $\rho_K$ , toz karışımının teorik yoğunluğunu sembolize etmekte olup boyutsuzdur.  $\rho_K$  ise Eşitlik (5.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_K = (\rho_M \times \%M) + (\rho_{TK} \times \%TK) + \dots \quad (5.3)$$

Burada  $%M$  matris malzemesinin ağırlıkça oranı ve  $%TK$  takviye malzemesinin ağırlıkça oranını ifade etmektedir. Mekanik özellikler ile doğrudan ilişkili olan bir diğer parametre ise kompozit malzemenin gözeneklilik oranı ( $%G$ ) olup Eşitlik (5.4) ile hesaplanmaktadır.

$$%G=(1-\rho_T/\rho_K)\times 100 \quad (5.4)$$

Numunelerin deneysel yoğunlukları ( $\rho_D$ ) ise Arşimet prensibine göre hesaplanmaktadır. Arşimet prensibine göre numuneler ilk önce suya doyurulmalıdır. Bunun için numuneler ısıtıcı manyetik tabla üzerinde su dolu bir beher içerisinde üzeri folyo ile kapatılarak 200 °C sıcaklıkta 3 saat kadar bekletilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Numunelerin suya doyurulması işlemi

Suya doyurulmuş numuneler hassas terazide tartılarak suya doymuş kütleleri ( $m_D$ ) ölçülmüştür. Daha sonra suya doymuş bu numunelerin Arşimet yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak su içerisindeki asılı kütlesi ( $m_A$ ) ölçülmüştür (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Numunelerin asılı kütlelerin ölçülmesi işlemi

Bu işlemlerin ardından numuneler etüv içerisine konularak 50 °C sıcaklıkta ve 18 saat süresince kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tekrardan tartılarak kuru kütlesi ( $m_K$ ) ölçülmüştür. Ölçümleri doğruluğunu arttırmak amacıyla en az beş numune ile ölçüm yapılmıştır. Bütün bu veriler belirlendikten sonra deneysel yoğunluk ( $\rho_D$ ) değeri Eşitlik (5.5) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\rho_D = m_K / (m_D - m_A) \quad (5.5)$$

Numunelere ait yüzde deneysel yoğunluk ( $\% \rho_D$ ) değeri ise Eşitlik (5.6) ile hesaplanabilir.

$$\% \rho_D = (\rho_D / \rho_K) \times 100 \quad (5.6)$$

#### 5.2.2.2. Numunelerin Sertlik Ölçümü

Üretilen kompozitlerin sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla Vickers sertlik testinden faydalanılmıştır. Vickers sertlik testi, ince sac malzemelerden kalın malzemelere, kaplama işlemi yapılmış yüzeylerden yüzey sertleştirme işlemi yapılmış malzemelere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca kullanılan batıcı ucun kuvvet karşısında göstermiş olduğu rijit davranış ile diğer yöntemlere kıyasla daha kesin sonuçlar vermektedir. Vickers sertlik, testi temel olarak malzemenin sertliğinden daha sert olan batıcı bir ucun sertlik değeri ölçülmek istenen malzeme üzerine belirli bir süre batırılması esasına dayanır.

Uygulanan yüke bağlı olarak makro vickers, düşük yüklü vickers ve mikro vickers sertlik testi olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Tablo 5.5'te sertlik ölçme yöntemlerine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 5.5. Vickers sertlik ölçme yöntemleri (Şenel, 2018)

Vickers Sertlik Yöntemi	Test Durumu	Uygulana Yükler
Makro Vickers Sertlik Yöntemi	$\geq HV 5$	$P \geq 49,03$
Düşük Yüklü Viçkers Sertlik Ölçme Yöntemi	$HV 0,2 \leq < HV 5$	$1,961 \leq P < 49,03$
Mikro Vickers Sertlik Ölçe Yöntemi	$HV 0,001 \leq < HV 0,2$	$0,09807 \leq P < 1,961$

Bu test yönteminde  $136^\circ$  tepe açısına sahip kare tabanlı elmas piramit bir uç kullanılır. Batıcı uç numune yüzeyine belirli bir yük altında belirli bir süre uygulandıktan sonra kaldırılır. Numune yüzeyinde batıcı ucun oluşturduğu izin köşegen uzunlukları, cihaza bağlı metalürjik mikroskop yardımıyla hassas bir şekilde ölçülür. Elde edilen köşegen uzunluklarının ortalaması alınır ve Eşitlik 5.7'de yerine konularak sertlik değeri hesaplanır.

$$HV = 1,8544 \times (P/d^2) \quad (5.7)$$

Burada, uygulanan yük  $P$  (daN), köşegen uzunlukları  $d$  (mm) ve Vickers sertlik değeri HV dir.

Bu çalışmada sertlik ölçümü için OMÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne ait HV1000B marka Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Test kapsamında Al2024 matrisli yüzeyi parlatılmış numunelere batıcı uç 1,961 N'luk yükü 15 s boyunca uygulanmıştır. Numune yüzeyinde elde edilen iz mikroskop yardımıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür. Elde edilen değerler 40 ile çarpılarak elle sertlik ölçme cihazına girilerek sertlik değeri hesaplanmıştır. Şekil 5.13'te test kapsamında kullanılan sertlik ölçme cihazına ait görüntü verilmektedir



Şekil 5.13. Vickers sertlik ölçme cihazı

### 5.2.2.3. Basma Testi

Basma testi ile malzemelerin statik yükler altında nasıl davranacağı hakkında bilgi elde edilir. Basma testi için belirli standartlara göre hazırlanmış numuneler, test cihazının basma plakaları arasına yerleştirilir. Test parametreleri belirlendikten sonra malzemeye yük uygulanır. Malzeme, uygulanan yükü taşıyamayarak dağılınca test sonlandırılır. Bu test sayesinde gerilme-gerinin diyagramı elde edilir. Bu diyagramla birlikte malzemeye ait en yüksek basma dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve rezilyans gibi mekanik özellikler belirlenebilir.

Malzemenin dağılıncaya kadar taşıyabileceği en yüksek gerilme değeri ( $\sigma$ ) ve aynı zamanda gerilme-gerinin diyagramının tepe noktası Eşitlik 5.8 ile hesaplanır.

$$\sigma = F_{max}/A_0 \quad (5.8)$$

Burada,  $\sigma$  en yüksek basma dayanımı,  $F_{max}$  maksimum uygulanan yük ve  $A_0$  numunenin ilk kesit alanı olarak gösterilmektedir.

Gerilme-gerinim diyagramında elastik bölge içerisinde Hooke kanunu geçerlidir. Hooke kanuna göre gerilme ( $\sigma$ ) ve birim şekil değışı ( $\mathcal{E}$ ) arasındaki ilişki Eşitlik 5.9 ile belirlenir.

$$\sigma = E \times \mathcal{E} \quad (5.9)$$

Bu eşitlikte E elastisite modülü olup malzemenin şekil değışimine karşı göstermiş olduğu direncin bir ölçüsüdür. Elastisite modülü, elastik bölge içerisindeki doğrunun eğimi ile hesaplanır. Birim şekil değışimi ( $\mathcal{E}$ ) ise uygulanan yük karşısında malzemenin boyunda meydana gelen değışimi göstermekte olup Eşitlik 5.10'dan faydalanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{E} = \Delta L / L_i \quad (5.10)$$

Bu eşitlikte,  $\Delta L$  malzemenin kuvvete bağlı boyunda meydana gelen değışimdir. Boyda meydana gelen değışim  $\Delta L = L_s - L_i$  formülü ile hesaplanır.

Bu çalışma kapsamında yapılan testlerde OMÜ Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yer alan Mares marka Tst-10t model 10 tonluk universal test makinası kullanılmıştır. Test makinesine ait görsel Şekil 5.14'te verilmektedir. Basma testi için basma hızı 5 mm/dk, ön yükleme hızı 2 mm/dk ve ön yüklemde 5 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.14. Çekme/Basma test makinesi

#### 5.2.2.4. Tozların Tane Boyunun Ölçümü

Kompozit malzeme üretimi için kullanılan tozlar dış kaynaklardan temin edilmiştir. Bu nedenle tozların tane boyutlarını doğrulamak amacıyla tozlara tane boyut ölçümü yapılmış. Bu işlem için OMÜ bünyesindeki Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezindeki Malvern Mastersizer 3000 markalı tane ölçüm makinesi kullanılmıştır. Şekil 5.15’de tane boyut ölçüm cihazına ait görsel verilmektedir.



Şekil 5.15. Malver Mastersizer 3000 tane boyut ölçüm cihazı (Şenel, 2018)

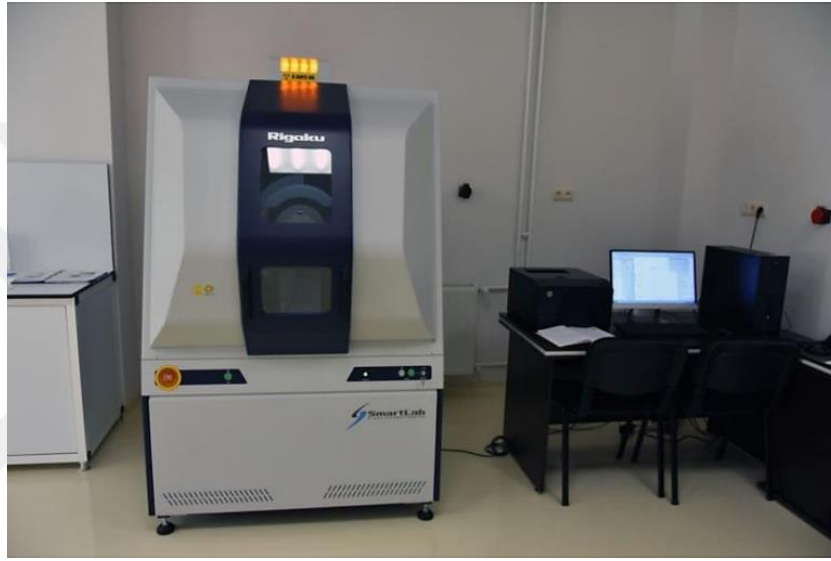
Tanelerin mikron boyutunda olduğu bilindiğinden tozların boyutu lazer kırınım yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemde lazer ışınları tozlar üzerine düşürülmekte ve tanelere çarparak kırılan lazer ışınları bir mercekten geçerek tarayıcıya gelmektedir. Tarayıcıya gelen bu lazer ışınları bilgisayar aracılığı ile değerlendirilerek tozların tane boyutları ve yüzdeleri hesaplanabilmektedir.

#### 5.2.2.5. X Işını Kırınım Analizi

X-ışını kırını (XRD) yönteminde, malzeme üzerine x-ışınları gönderilmekte ve bu ışınların malzemeye ait düzlemlere bağlı olarak farklı açılarda kırılarak yansıtılması esasına dayanmaktadır. Bu yansımalar her bir malzemenin parmak izi gibi kendine özgü desenleridir. Yansıma sonucu elde edilen yansıma desenleri sayesinde malzeme içerisindeki fazların dağılımı, fazların miktarı, kristal boyutu ve yönlenmesi hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. XRD analizi sırasında numune tahrip edilmez ve çok az miktardaki numuneye bile analiz yapılabilir. XRD analizi

yapılacak numunede tane boyutu 10-50  $\mu\text{m}$  arasında olması en iyi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca XRD analizinde bileşiklere ait bilgi alınabilmesi için karışımdaki oranların en az %1 olması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan tozların ve üretilen numunelerin XRD incelemeleri OMÜ bünyesindeki KİTAM laboratuvarında yer alan Rigaku SmartLab model X-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.16'da XRD cihazına ait görsel verilmektedir. Bu cihaz monokromatik Cu-K $\alpha$  ışınımı, 40 kV, 150 mA ve 0,154 nm dalga boyunda çalışma koşullarına sahiptir.



Şekil 5.16. Rigaku marka SmartLab model x-ışını kırınımı (XRD) cihazı (Şenel, 2018)

#### 5.2.2.6. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılan analiz temel olarak, yüksek enerjili odaklanmış bir elektron demetini malzeme yüzeyine düşürülerek malzemenin elektronlarıyla etkileşime girip geri yansıyan düşük enerjili elektronların toplanıp incelenmesi prensibine dayanmaktadır. SEM analizi ile malzemelerin morfolojisi, tanecik boyutları, yapıyı oluşturan faz dağılımı ve miktarı gibi konularda bilgi sahibi olunabilir. SEM analizinde, numune yüzeyine gönderilen odaklanmış elektronlar, numune yüzeyindeki veya yüzeye çok yakın olan atomlarla etkileşime girerek 1 nm'nin altına detaylara sahip çok yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilir. SEM analizleri genel olarak, malzemeye gönderilen elektronların havadaki atomlar ile etkileşime girmemesi için yüksek vakum altında yapılır. Ayrıca SEM analizleri iletken malzemelere uygulanmaktadır. İletken olmayan malzemelere ise kaplama işlemi yapılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında OMÜ bünyesindeki KİTAM laboratuvarında yer alan Jeol marka JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 5.17’de SEM cihazına ait görsel verilmektedir.



Şekil 5.17. Jeol JSM7001F taramalı elektron mikroskobu

#### 5.2.2.7. FTIR Analizi

Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisi, incelemesi yapılacak olan malzemenin molekülleri üzerine cihaz tarafından gönderilen kızılötesi ışınların etkisiyle titreşim ve dönme hareketi yapan bağların, gönderilen kızılötesi ışınları soğurması esasına dayanır. Molekülleri oluşturan atomlar arasındaki bağların tanımlanmasını sağlayan bu analiz yöntemi; mühendislik, tıp, eczacılık, kimya, jeoloji ve temel bilimler gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. FTIR analizi, dipol momente sahip bütün malzemelere uygulanabilir. FTIR analizi ile katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki bileşikler incelenebilir. Bu inceleme ile moleküller arasındaki bağların durumu, iki bileşiğin kıyaslanması, yapının alifatik veya aromatik olup olmadığı hakkında bilgiler öğrenilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisli kompozit numunelerin yapılarındaki grafenin varlığı XRD analizi ile belirlenemediği için FTIR analizi yapılması gerekli görülmüştür. Bu nedenle Fourier Transform Infrared (FTIR) spektrum ölçümleri Hitit Üniversitesi bünyesindeki Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTUAM) laboratuvarında yer alan Thermo Scientific marka Nicolet IS50 model FTIR spektroskopu ile gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrumları,

400-4000  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında alınmıştır. Şekil 5.18’de FTIR spektroskopuna ait görsel verilmektedir.



Şekil 5.18. Thermo Scientific marka Nicolet IS50 model FTIR spektroskopu

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

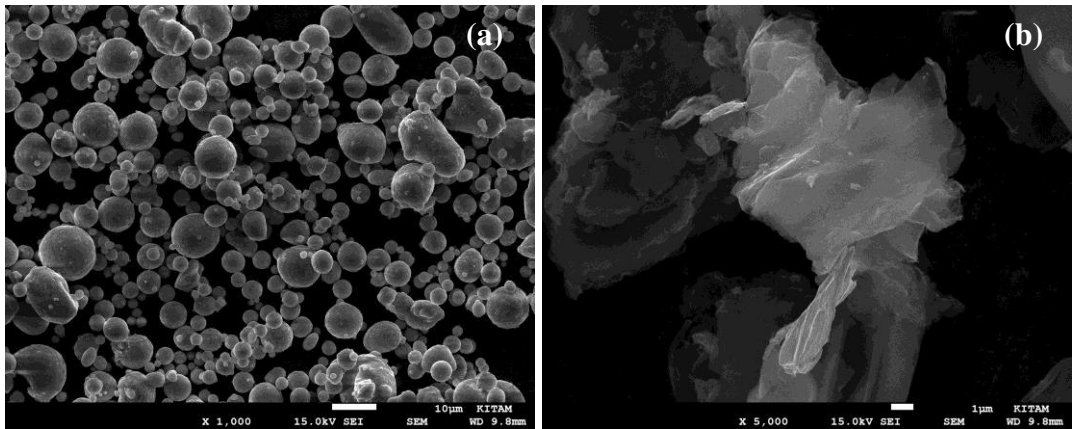
Bu çalışma kapsamında toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit üretimi için Al2024'ün matris olarak kullanıldığı çalışmada Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve grafen takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Al2024 alüminyum alaşımı ile Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-grafen ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-grafen kompozit malzemeler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu bölümde ise üretilen kompozitlerin yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği, basma dayanımı ve mikroyapı incelemeleri ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.

### 6.1. Grafen Takviyeli Al2024 Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi

Bu bölümde ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45 oranlarında grafen takviyesi yapılmış Al2024 matrisli kompozit malzemelerin SEM, XRD, FTIR analizleri ile yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği ve basma dayanımı ayrı ayrı incelenmiş ve rapor edilmiştir.

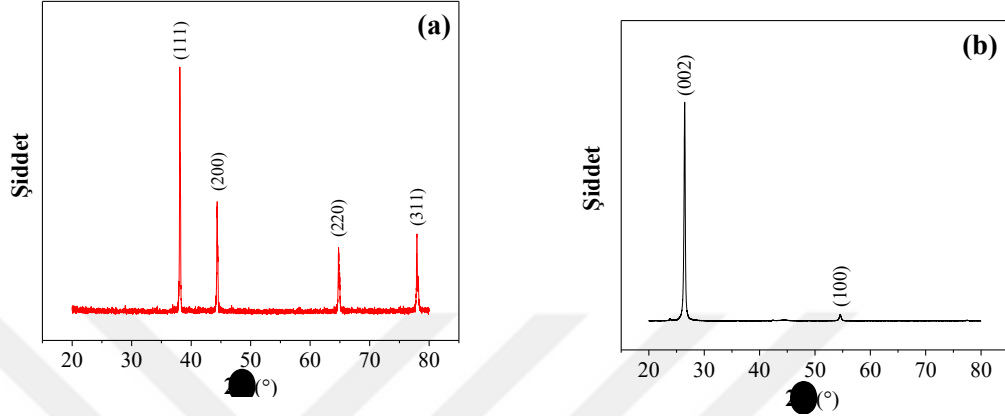
#### 6.1.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri

Bu çalışmada kullanılan Al2024 ve grafen tozlarının kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmeden önce taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleri elde edilmiştir. Al2024 tozunun ×1000 büyütme farklı görüntüleri incelendiğinde; Al2024 toz taneciklerinin yaklaşık 10 µm boyutunda ve küresel morfolojide olduğu belirlenmiştir. Grafen tozuna ait yürütülen ×4000 ve ×5000 büyütme SEM analizinde ise grafen tozunun plaka şeklinde ve tabakalı olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.1'de Al2024 alaşımı ve grafen tozuna ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



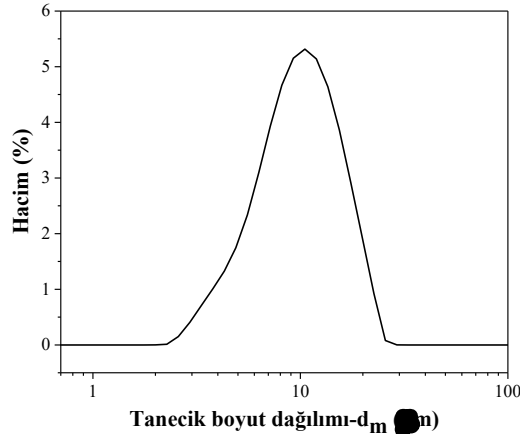
Şekil 6.1. (a) Al2024 alüminyum alaşımı ve (b) grafen tozuna ait SEM görüntüleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Al2024 ve grafen tozlarına faz analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda Al2024 tozunun kırınım açılarının;  $38^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $66^\circ$  ve  $78^\circ$  olarak tespit edilmiştir. Grafenin kırınım açısı ise  $26,5^\circ$  ve  $54,5^\circ$  olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.2’de Al2024 ve grafen tozuna ait XRD örgü desenleri verilmiştir.



Şekil 6.2. (a) Al2024 alüminyum alaşımı ve (b) grafen tozlarına ait XRD örgü desenleri

Al2024 matris tozlarının tanecik boyut dağılımı Mastersizer 3000 tane boyut ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Elde edilen veriler Şekil 6.3’te gösterilmiştir. Yapılan ölçüm sonucuna göre; Al2024 alaşım tozu %5,32 hacimsel oranda  $10,51 \mu\text{m}$ ’lik tanecik boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir.

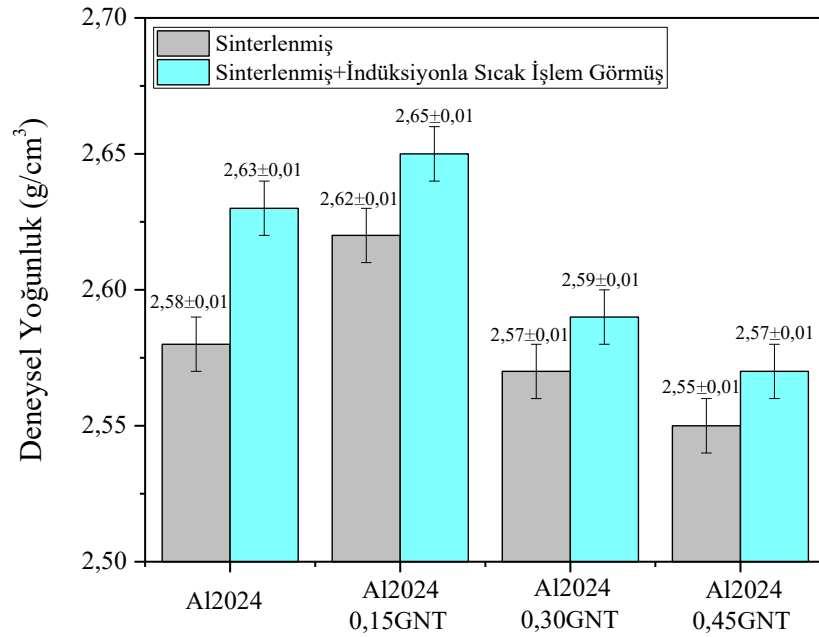


Şekil 6.3. Al2024 Al alaşımının tane boyut dağılımı

### 6.1.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları

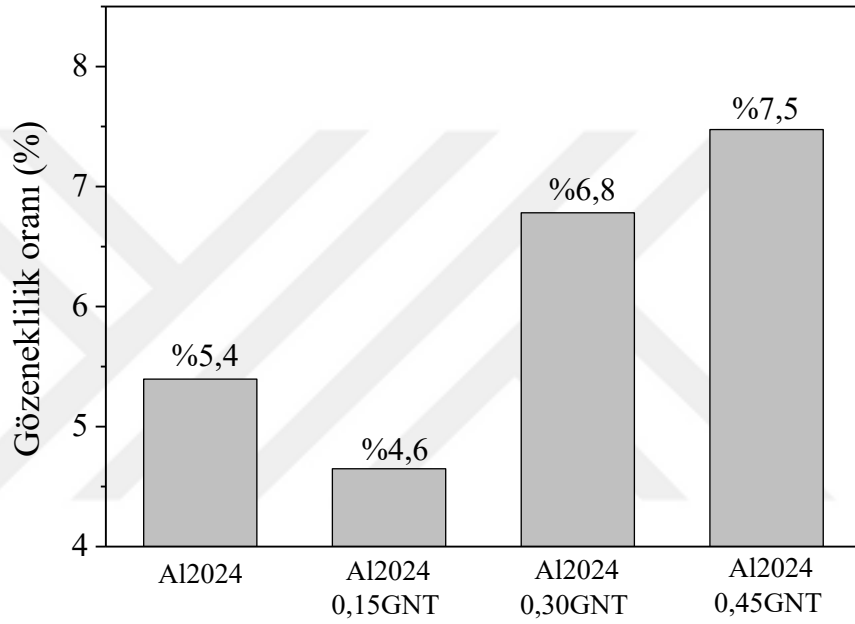
Bu bölümde takviyesiz Al2024 alüminyum alaşımı ile ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45 olmak üzere üç farklı oranda grafen ile takviye edilmiş Al2024-xGNT kompozitlerin, takviye oranına bağlı olarak yoğunluk değişimleri incelenmiştir.

Numunelerin deneysel yoğunlukları Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Üretilen numunelerin deneysel yoğunlukları; sinterleme işleminden ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem (SSİSİ) sonra olmak üzere iki farklı durumda belirlenmiştir. Al2024 alüminyum alaşımının, sadece vakuma alınarak yapılan sinterleme işleminin sonucunda gözeneklilik oranının yüksek olması nedeniyle kompozit malzemelere sinterleme sonrası ilave bir işlem yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle çok hızlı bir proses olmasından dolayı yoğunluğu ve mekanik özellikleri artırmak amacıyla kompozit numunelere SSİSİ uygulanmıştır. Grafen takviyesine bağlı olarak her iki durumda da deneysel yoğunlukta meydana gelen değişim Şekil 6.4’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde; grafen ilavesi ile deneysel yoğunluğun her iki durumda da artışı görülmektedir. En yüksek yoğunluk değeri %0,15 GNT takviyesi yapılmış sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak işlem uygulanmış kompozitlerde  $2,65\pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Al2024 alüminyum alaşımıyla kıyaslandığında deneysel yoğunluk değeri %2,71 artış göstermiştir. Ancak %0,15 GNT takviyesinden sonra ise deneysel yoğunluğun düştüğü görülmüştür. Yoğunluk değerinde meydana gelen düşüşün nedeni, grafenin toplanma eğilimine girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük yoğunluk değeri ise %0,45 GNT takviyesi yapılmış kompozitlerde  $2,55$  g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.



Şekil 6.4. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait deneysel yoğunluk değerleri

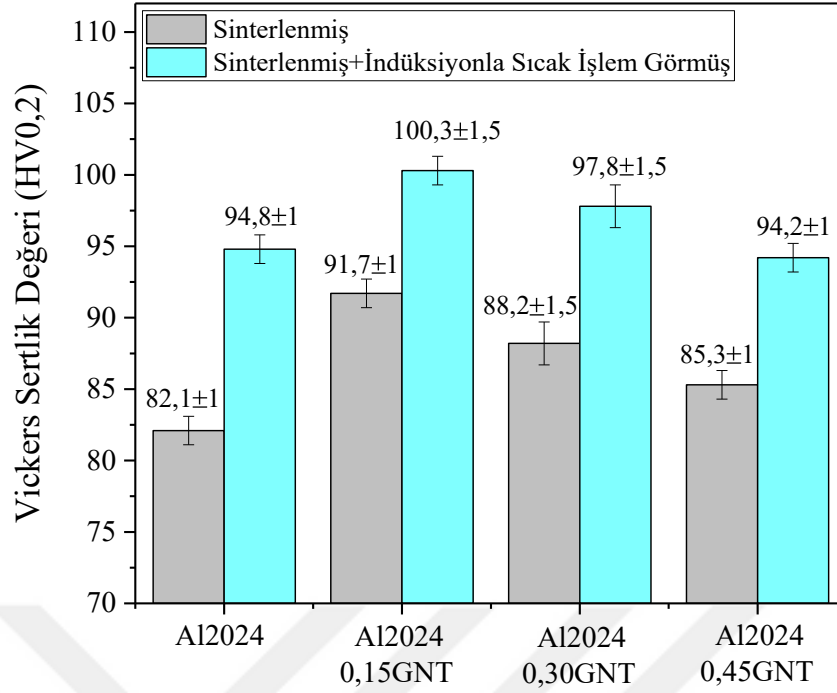
Mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir diğer faktör ise gözenekliliktir. Grafen takviyesine bağlı sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmış kompozit yapıda gözeneklilik oranının değişimi Şekil 6.5’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en düşük gözeneklilik oranı %0,15 GNT takviye oranında %4,6 olarak belirlenmiştir. En yüksek gözeneklilik oranı ise %0,45 GNT takviyesinde %7,5 olarak tespit edilmiştir. Artan grafen takviyesiyle grafen nanopartüküller matris içerisinde topaklanmış olup yapıda gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 6.5. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait gözeneklilik oranı değerleri

### 6.1.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, Al2024 matris malzemesine farklı oranlarda (ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45) yapılan grafen takviyesinin Vickers sertliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Takviyesiz ve grafen takviyeli numunelerin Vickers sertlik değerleri sinterleme ve SSİSİ uygulandıktan sonra olmak üzere iki durumda analiz edilmiştir (Şekil 6.6). Grafen takviyesiyle kompozitin sertliğinin her iki durumda da arttığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri, SSİSİ uygulanmış Al2024-%0,15GNT kompozit yapıda  $100,3 \pm 1,5$  HV olarak tespit edilmiştir. Grafen takviyesi ve SSİSİ sonucu sertlik değeri Al2024 alüminyum alaşımının sertlik değerine (82,1 HV) kıyasla yaklaşık %22,17 oranında artış göstermiştir. Ancak bu değerden sonraki takviye oranlarında sertliğin düştüğü görülmektedir. Sertlikte meydana gelen bu düşüşün sebebi olarak, grafenin matris içerisinde topaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.6. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri

Takviye malzemesinin sertlik değeri üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerini doğrudan etkilemektedir. Takviye malzemesinin sertlik değerinin matris malzemenin sertlik değerine etkisi karışımlar kuralına göre Eşitlik (6.1)'de açıklanmaktadır (Dieter,1961).

$$H_c = H_m f_m + H_r f_r \quad (6.1)$$

Burada eşitlikte,  $H_c$  kompozit malzemenin sertliği,  $H_m$  matris malzemenin sertliği,  $H_r$  takviye malzemesinin sertliği,  $f_m$  matris malzemenin hacimsel katkı oranı ve  $f_r$  takviye malzemesinin hacimsel katkı oranıdır.

Kompozit malzemelere belirli bir orana kadar yapılan GNT takviyesi sonucu Vickers sertlik değerinde görülen artış, dislokasyon teorisi ile açıklanabilir. Dislokasyon hareketini azaltmak veya engellemek, malzemelerin sertliklerinin ve dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. Dislokasyon yoğunluğu, dislokasyonların hareketini sınırlar ve malzemelerin plastik deformasyonunu zorlaştırır. Grafen takviye malzemesinin tabakalı ve nano boyutta olması Al2024-GNT kompozitlerin dislokasyon yoğunluklarını arttırmakta ve buna bağlı olarak kompozit malzemelerin sertlik değerleri artmaktadır. Dislokasyon yoğunluğu ile kompozit malzemelerin Vickers sertlik değerleri arasındaki ilişki Eşitlik (6.2)'de verilmiştir (Callister and Rethwisch, 2010; Mutuk ve Gürbüz, 2019).

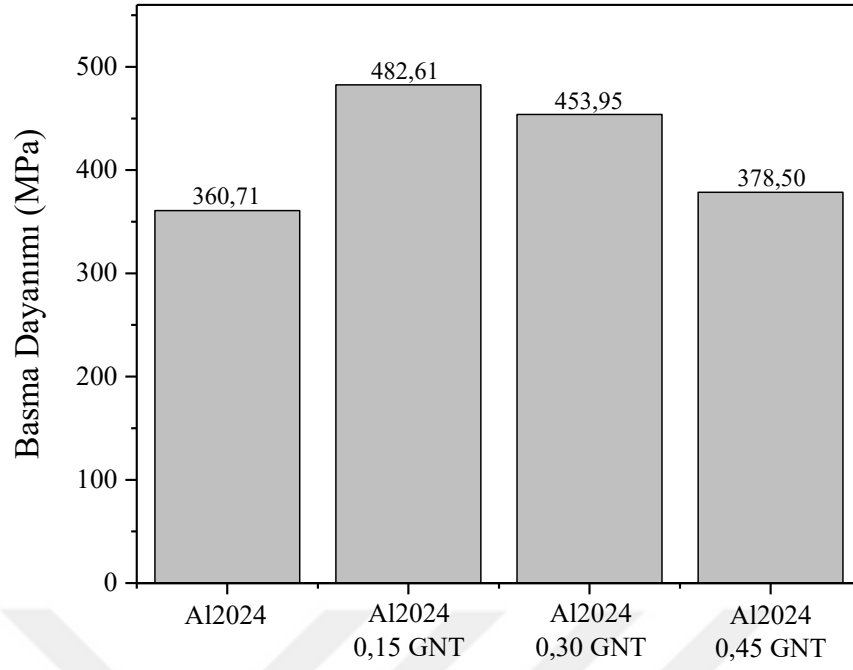
$$H=H^* +\alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (6.2)$$

Bu eşitlikte,  $G$  kayma modülü,  $\rho$  dislokasyon yoğunluğu,  $b$  Burger vektörü,  $H^*$  ve  $\alpha$  ise malzeme sabitleridir.

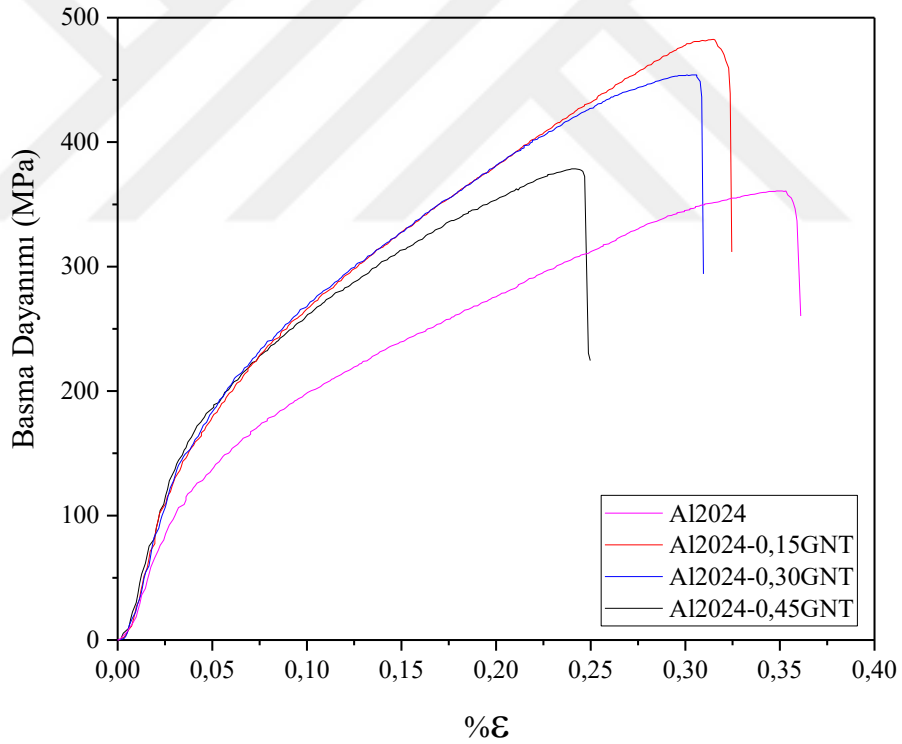
#### 6.1.4. Basma Testi Sonuçları

Al2024 alüminyum alaşımı ve grafen takviyeli Al2024 matrisli kompozitlerin basma dayanımı değerleri Şekil 6.7’de verilmiş. Şekil incelendiğinde; Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-0,15GNT, Al2024-0,30GNT ve Al2024-0,45GNT kompozitlerin basma dayanımlarının sırasıyla; 360,71 MPa, 482,61 MPa, 453,95 MPa ve 378,50 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit yapılarda elde edilen en yüksek basma dayanımı Al2024-0,15GNT kompozit yapıda 482,61 MPa olarak tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle %0,15 GNT ilavesi kompozitin basma dayanımını yaklaşık olarak %34 oranında artırmıştır. Şekil incelendiğinde; grafen takviyesinin basma mukavemetini olumlu yönde etkilediği ancak %0,15 GNT ilavesinden sonra basma dayanımının düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün sebebi olarak; artan grafen katkı oranıyla nano grafen partiküllerinin topaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.8’de Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024-GNT kompozitlere ait basma dayanımı eğrileri verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde ise Al2024- $\times$ GNT kompozit yapının gevrek bir malzeme olduğu görülmektedir.

Uygun numune üretilmediği için sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmış numunelere basma testi yapılamamıştır.



Şekil 6.7. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait basma dayanımı değerleri



Şekil 6.8. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait basma dayanımı eğrileri

Kompozit malzemelerin basma dayanımları üzerinde dislokasyon yoğunluğu doğrudan etkili bir parametredir. Al2024 alüminyum alaşımına GNT takviyesi sonucu matris içerisinde dislokasyon yoğunluğu artmakta bu da mekanik özellikleri geliştirmektedir. GNT takviyesi, Al2024 alüminyum alaşım matrisi içerisinde tane sınırlarına yerleşip burada bir engel vazifesi görerek dislokasyon hareketini

engellemektedir. Dislokasyon yoğunluğu ile mekanik özellikler arasındaki ilişki Orowan eşitliği olan Eşitlik (6.3) ile ifade edilebilir (Şenel ve Gürbüz, 2020c).

$$\gamma = b\rho\vartheta \quad (6.3)$$

Bu eşitlikte  $\gamma$  kayma şekil değiştirme oranı,  $b$  Burger vektörü,  $\vartheta$  dislokasyon hızı ve  $\rho$  dislokasyon yoğunluğudur.

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemelerinin boyutu ve şekli üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Takviye malzemesinin boyutu ile takviye malzemesinin tanecikleri arasındaki mesafenin birbiriyle olan ilişkisi Eşitlik (6.4)'te verilmektedir (Şenel ve Gürbüz, 2020c).

$$\lambda = [4r(1-f)]/(3f) \quad (6.4)$$

Bu eşitlikte  $\lambda$  grafen taneciklerinin arasındaki boşluk,  $r$  grafen taneciklerinin yarıçapı ve  $f$  grafen taneciklerinin hacimsel katkı oranıdır. Al2024 alüminyum alaşımına GNT takviyesi sonucu tanecikler arasındaki boşluğun azalmasına bağlı olarak tanecikler arasındaki kayma gerilmesi artmaktadır. Tanecikler arasındaki mesafeye bağlı olarak, tanecikler arasındaki kayma gerilmesi Eşitlik (6.5)'te verilmektedir.

$$\tau_0 = Gb/\lambda \quad (6.5)$$

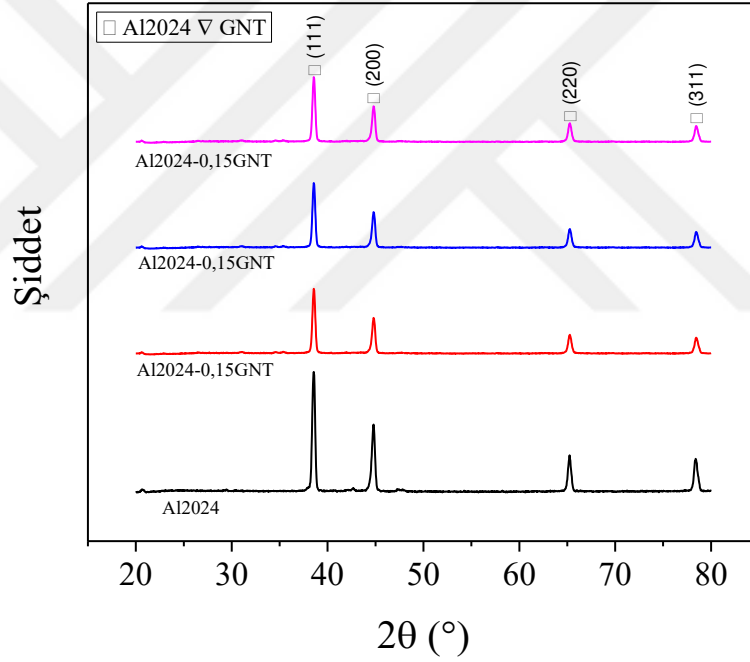
Bu eşitlikte  $\tau_0$  tanecikler arasındaki kayma gerilmesi (MPa),  $\lambda$  tanecikler arasındaki mesafe ( $\mu\text{m}$ ),  $G$  kayma modülü (MPa) ve  $b$  Burger vektörüdür. Kompozit malzemeye yapılan takviyeler sonucu mekanik özelliklerdeki artış teorik olarak Eşitlik (6.6)'da verilmektedir (Mutuk ve Gürbüz, 2019).

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_r f_r \quad (6.6)$$

Bu eşitlikte  $\sigma_c$  kompozit malzemenin mukavemeti (MPa),  $\sigma_m$  matris malzemenin mukavemeti (MPa),  $\sigma_r$  takviye malzemesinin mukavemeti (MPa),  $f_m$  matris malzemenin hacimsel birleşme oranı ve  $f_r$  takviye malzemesinin hacimsel birleşme oranıdır.

### 6.1.5. XRD Analiz Sonuçları

Toz metalürji yöntemi kullanılarak Al2024 matris malzemesine ağırlıkça farklı oranlarda GNT takviyesi sonucu elde edilen Al2024-xGNT kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.9’da verilmiştir. XRD örgü deseninde alüminyum “□” simgesi ile GNT ise “▽” simgesi ile sembolize edilmiştir. XRD örgü deseni incelendiğinde kompozit yapı içerisinde sadece alüminyum pikine rastlanmıştır. Sinterlemenin etkisiyle Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> gibi istenmeyen herhangi bir ikincil faz görülmemiştir. Üretilen kompozit malzemelerde kullanılan GNT takviye miktarının düşük olması ve XRD analiz cihazının düşük hassasiyetinden dolayı herhangi bir grafen pikine ( $2\theta=26,5^\circ$ ) rastlanmamıştır. Bu nedenle Al2024-xGNT kompozit malzemelere FTIR analizi yapılmıştır.

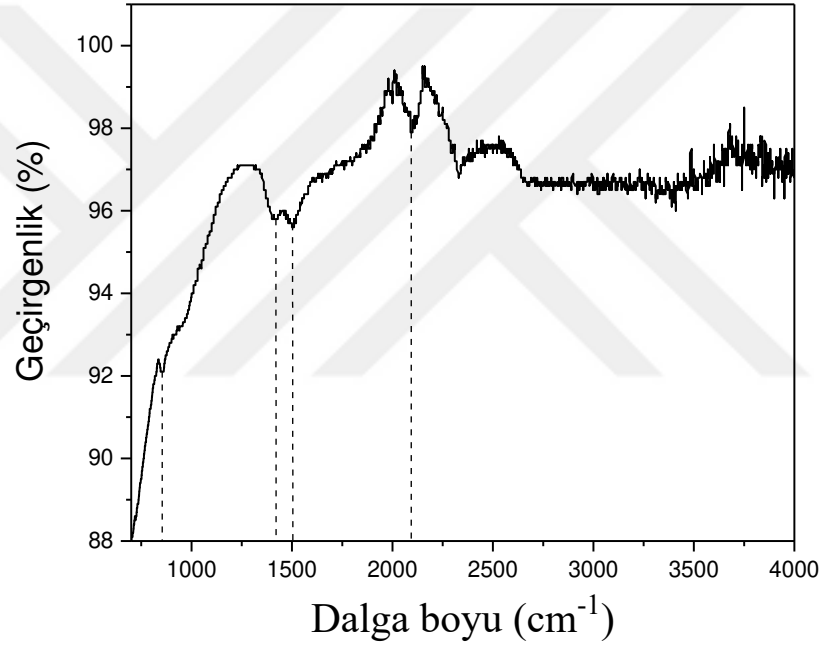


Şekil 6.9. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait XRD faz analizleri

### 6.1.6. FTIR Analiz Sonuçları

XRD analizinde grafenin kompozit yapı içerisindeki varlığı hem grafen miktarının düşük seviyede olması hem de kullanılan analiz cihazının hassasiyetinin düşük olması nedeniyle tespit edilememiştir. Bu nedenle Al2024-0,15GNT kompozit malzemelerdeki grafen varlığını doğrulamak amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) analizi yapılmıştır. Spektral analiz,  $700-4000\text{ cm}^{-1}$  arasındaki kızılötesi dalga boyları arasında gerçekleştirilmiştir. Al2024-0,15GNT kompozit malzemeye ait FTIR spektrumu Şekil 6.10’da verilmektedir. Grafikte

4000-1900  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu arasındaki absorpsiyon bantları kompozit malzemenin yüzeyinden emilen nemden kaynaklanmaktadır. Grafene ait karakteristik absorpsiyon bantları ise 1600-1300  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu arasında görülmektedir. Kompoziti oluşturan malzemelere bağlı olarak grafenin absorpsiyon bantları biraz sapma gösterebilmektedir. Kompozit malzemeye ait bu grafikte 1510  $\text{cm}^{-1}$  ve 1400  $\text{cm}^{-1}$  bantları karbon atomları arasındaki  $\text{sp}^2$  hibritleşmesinden kaynaklanmaktadır. 856  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki bantlar ise alüminyuma ait absorpsiyon bantlarıdır. Yapılan analiz ile elde edilen bu sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırıldığında, Al2024-0,15GNT kompozit yapı içerisindeki grafenin varlığı doğrulanmaktadır (Boppana vd., 2020; Sahoo vd, 2013; Song vd., 2015; Altıparmak, 2009).

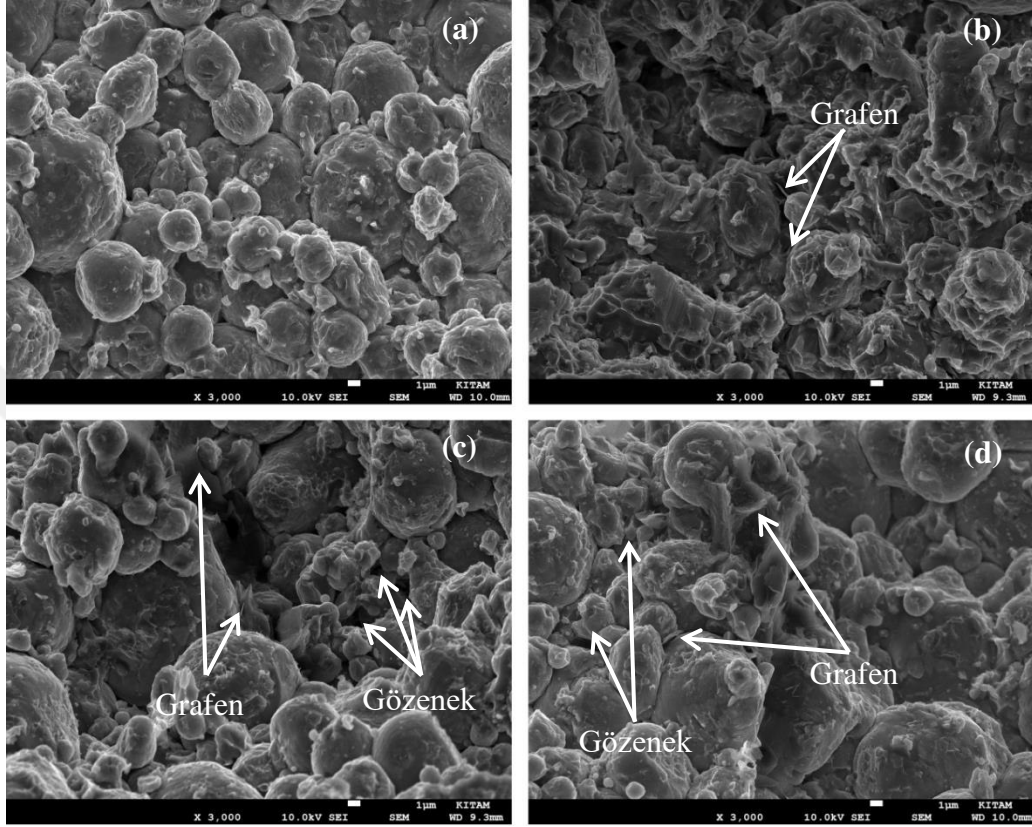


Şekil 6.10. Al2024-0,15GNT kompozit malzemenin FTIR spektrumu analizi

### 6.1.7. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları

Al2024 matris malzemesine ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında grafen takviyesi yapılmıştır. Yapılan takviye sonucu ve sinterlemenin de etkisiyle %0,15 GNT takviyeli kompozitlerde sertlik değeri artış göstermiştir. Ancak bu değerden sonra yapılan takviyelerde sertlik değerinin düştüğü görülmüştür. Bu duruma neyin sebebiyet verdiğini öğrenmek amacıyla kompozit malzemelerin kırık yüzey ve mikro yapıları incelenmiştir. Al2024-xGNT kompozitlere ait SEM görüntüleri Şekil 6.11’de verilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında %0,15GNT takviyeli kompozitlerde matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında iyi bir ara yüzey

bağlantısının olduğu görülmektedir. Ancak grafen takviyesi artıkça kompozit yapıda topaklanmalar artmış ve buna bağlı olarak da yapıda gözenekler oluşmuştur. Bu durum grafen takviyeli kompozitlerin, artan grafen takviye oranlarında sertliklerinin düşmesini açıklar.

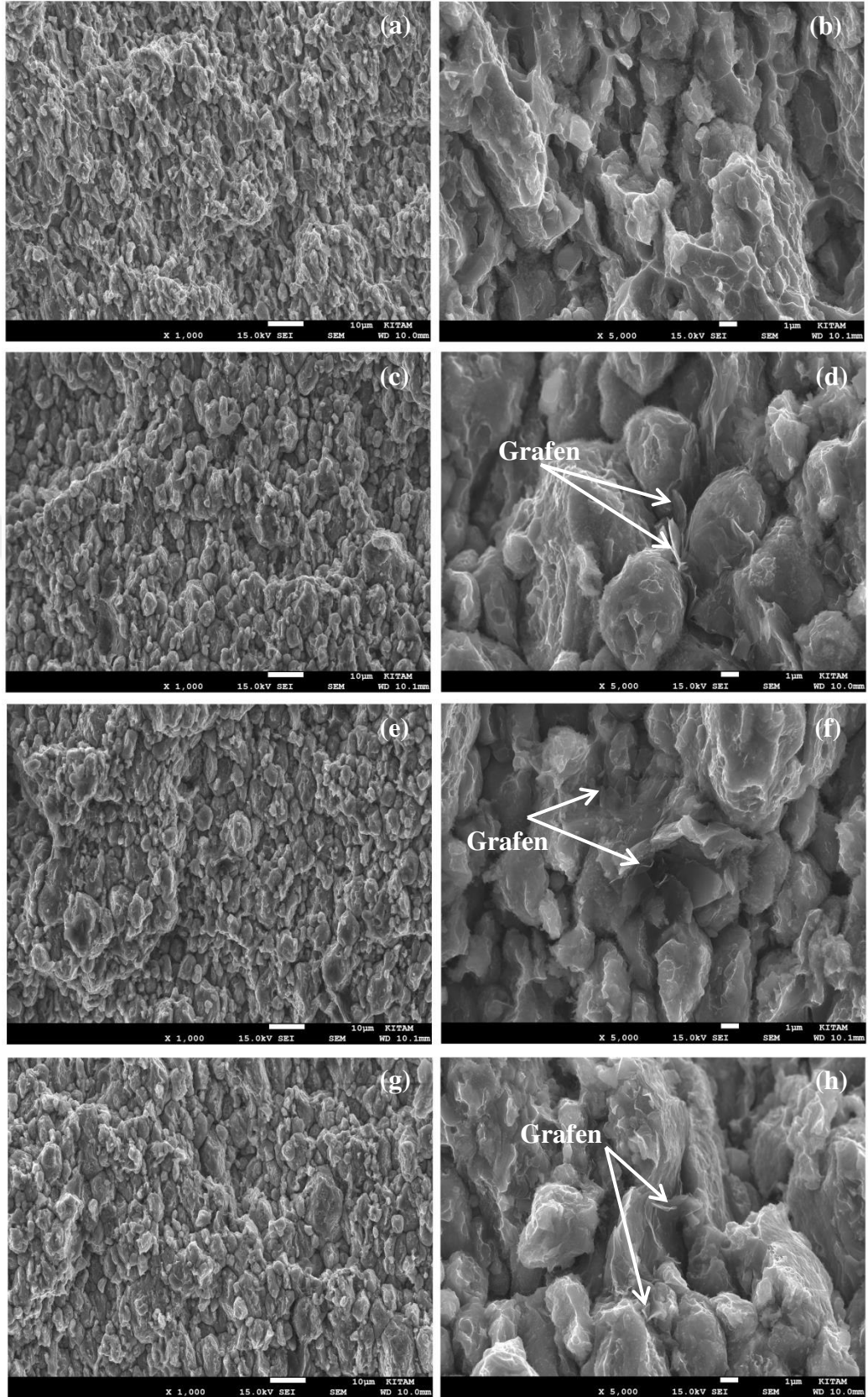


Şekil 6.11. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al-GNT kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al2024, (b) Al-0,15GNT, (c) Al-0,30GNT, (d) Al-0,45GNT

Sinterlenmiş Al2024-xGNT kompozit numunelere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmış ve sertlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan bu işlemle beraber Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024-GNT kompozitlerin sertlik değerleri yalnızca sinterlenmiş numunelere kıyasla tüm takviye oranlarında %10'dan fazla artış göstermiştir. Elde edilen en yüksek sertlik değeri ağırlıkça %0,15GNT takviyeli numunelerde elde edilmiş olup ve bu değerden sonraki takviyelerde sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Bu durumun sebebini belirlemek amacıyla üretilen kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri alınmış ve incelenmiştir. SSİSİ uygulanmış Al2024 ve Al2024-xGNT kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.12'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; tanecikler arasında kuvvetli ara yüzey bağlarının oluştuğu ve tüm kompozitlerde taneciklerin yönlendiği görülmektedir. Sertlikte meydana gelen artışın sebebi

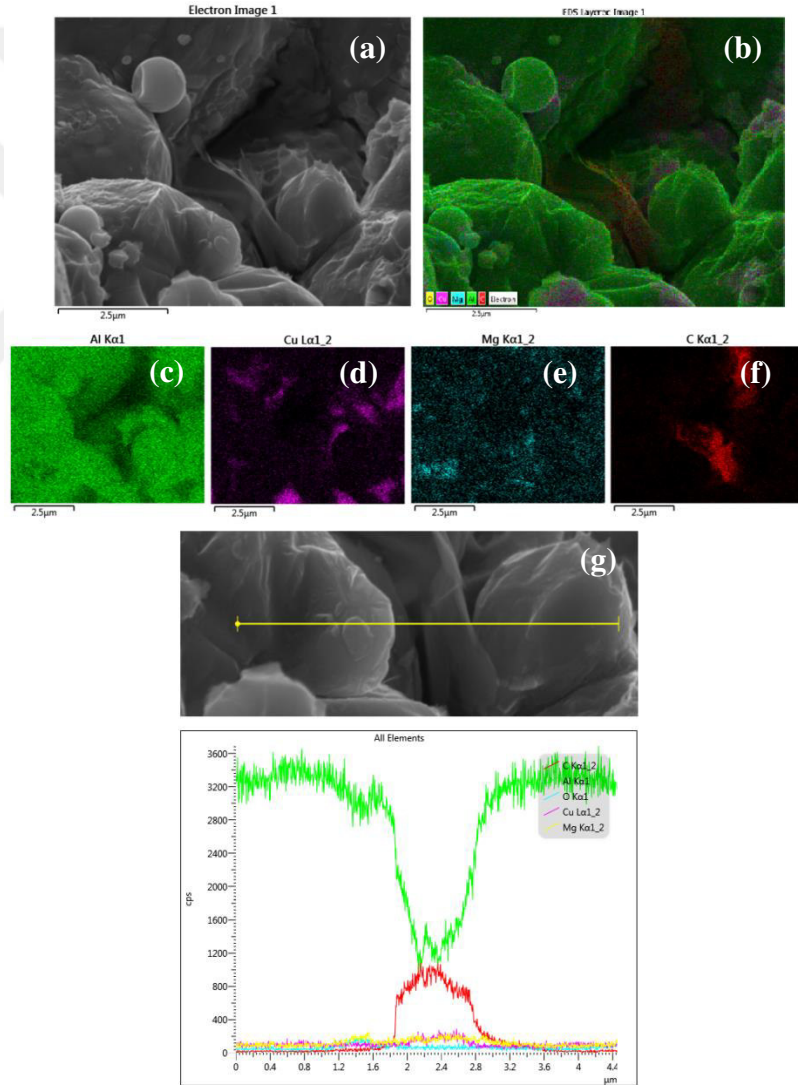
taneciklerin yönlenmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Takviye malzemesi olan grafenin ise tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür. Ağırlıkça %0,15GNT takviyesinden sonraki katkı oranlarında ise grafende topaklanmalar meydana gelmiş ve yapı içerisinde gözenekler oluşmuştur. Bu veriler takviyeli numunelerde sertliğin düşme nedenini açıklamaktadır.





Şekil 6.12. İndüksiyonla sıcak işlem görmüş Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024-GNT kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al2024  $\times 1000$  büyütme, (b)  $\times 5000$  büyütme, (c) Al2024-0,15GNT  $\times 1000$  büyütme, (d)  $\times 5000$  büyütme, (e) Al2024-0,30GNT  $\times 1000$  büyütme, (f)  $\times 5000$  büyütme, (g) Al2024-0,45GNT  $\times 1000$  büyütme, (h)  $\times 5000$  büyütme

Al2024-0,15GNT kompozit malzemesinin taramalı elektron mikroskopuyla elde edilen element haritası ve çizgi taraması analizi Şekil 6.13’de verilmiştir. Element dağılım analizi kompozit malzemenin kırık yüzeylerine uygulanmıştır. Bu analiz sonucunda Al2024 matris malzemesinin ana elementleri olan Al (yeşil dağılımlı), bakır (mor dağılımlı) ve magnezyum (mavi dağılımlı) yapı içerisinde rahatlıkla görülebilmektedir. Grafen ise karbon elementinin bir allotropu olduğundan yapı içerisinde karbon (kırmızı dağılımlı) olarak görülmüştür. Kırmızı dağılımlara bakıldığında grafenin tane sınırlarında bulunduğu açık bir şekilde görülmektedir. SEM-EDX çizgi taraması analizi ise karbon atomlarının varlığını ve grafenin tane sınırlarında yoğunlaştığını göstermektedir.



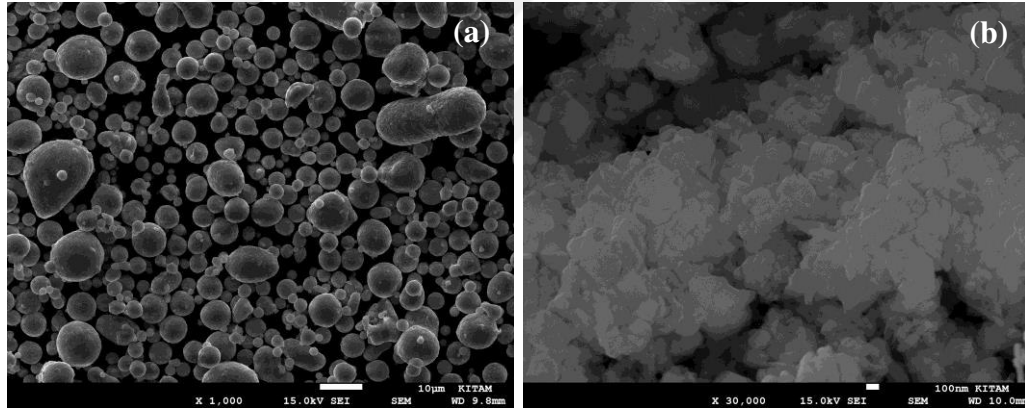
Şekil 6.13. Al-0,15GNT kompozitinin element dağılım haritası ve çizgi taraması analizi: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c, d, e, f) element dağılım haritaları, (g) çizgi taraması analizi

## 6.2. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Al2024 Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi

Bu bölümde ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış Al2024 matrisli kompozit malzemelerin SEM, XRD analizleri ve yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı değerleri ayrı ayrı incelenmiş ve rapor edilmiştir.

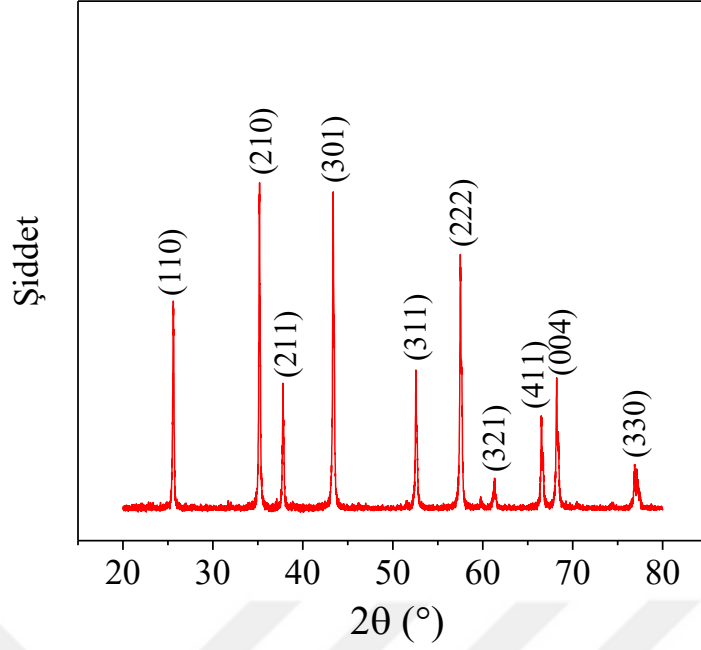
### 6.2.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan Al2024 alüminyum alaşımı ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik takviye malzemesinin kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmeden önce taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleri elde edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Al2024 alüminyum alaşım tozunun küresel morfolojide ve yaklaşık 10 µm boyutunda olduğu belirlenmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozunun ise küresel olmayan bir morfolojide ve tanecik boyutunun 1 µm'nin altında olduğu görülmektedir. Şekil 6.14'te Al2024 alüminyum alaşımı ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozuna ait SEM görüntüleri verilmiştir.



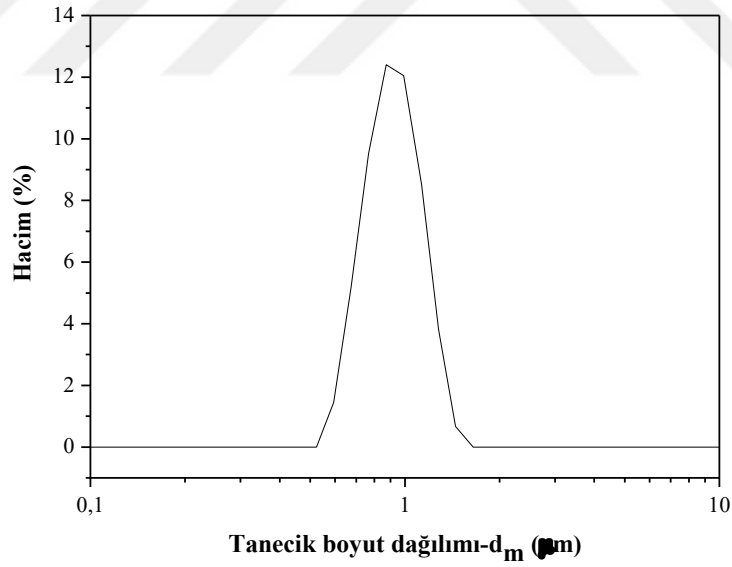
Şekil 6.14. (a) Al2024 alüminyum alaşımı ve (b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozlarına ait SEM görüntüleri

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik tozuna ait faz analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün kırınım açılarının 26°, 35°, 38°, 43°, 53°, 57°, 61°, 67°, 69° ve 77° olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozlarına ait XRD faz analizi

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye malzemesine ait tane boyut dağılımı analiz sonucuna göre tozların ortalama boyutunun 872 nm olduğu tespit edilmiştir (Şekil6.16).



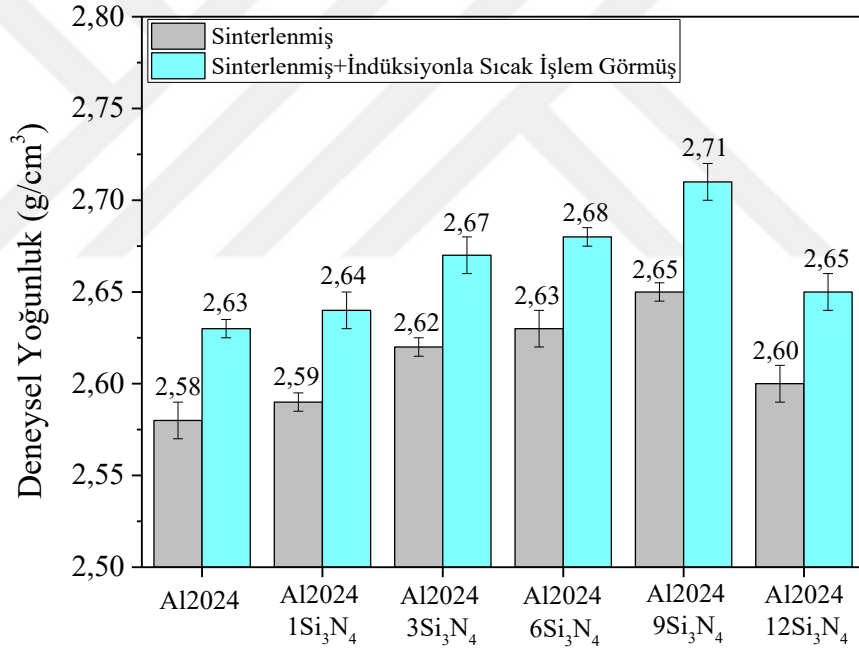
Şekil 6.16. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozuna ait tane boyut dağılımı

### 6.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde Al2024 alüminyum alaşımı ile ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile takviye edilmiş Al2024-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin deneysel yoğunluk değerleri incelenmiştir. Yalnızca sinterlenmiş ve hem sinterlenip hem de

SSİSİ uygulanmış numunelere ait deneysel yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır.

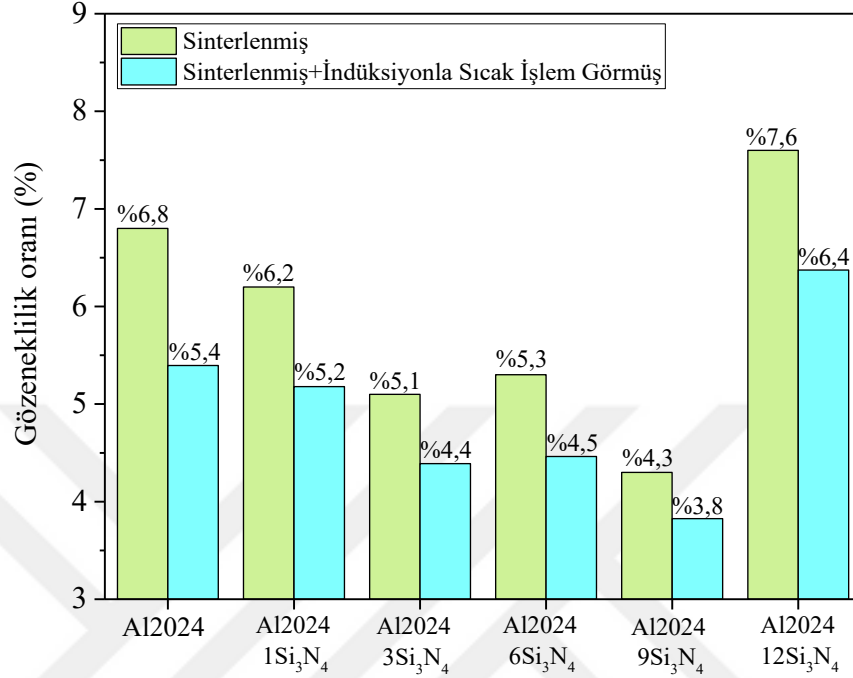
Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024- $\times$ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin deneysel yoğunluklarının takviye oranına göre değişimi Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesine bağlı olarak yalnızca sinterlenmiş ve hem sinterlenmiş hem de SSİSİ uygulanmış numunelerin deneysel yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Üretilen kompozitlerde en yüksek yoğunluk değeri %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi ile 2,71 g/cm<sup>3</sup> olarak SSİSİ uygulanmış numunelerde elde edilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi ve SSİSİ, takviyesiz matris malzemesinin yoğunluğunu (2,58 g/cm<sup>3</sup>) %5,04 oranında artırmıştır. Ancak %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranında ise deneysel yoğunluğun düştüğü gözlemlenmiştir. Takviye malzemesinin topaklanmış olmasına bağlı olarak yoğunluk değerinin düştüğü düşünülmektedir.



Şekil 6.17. Al2024 Al alaşımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait deneysel yoğunluk değerleri

Mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip diğer bir etken ise gözeneklilik oranıdır. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesine bağlı olarak kompozit yapılarıdaki gözeneklilik oranındaki değişimi Şekil 6.18’de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranı arttıkça yapıdaki gözenek miktarı azalmaktadır. Elde edilen en düşük gözeneklilik oranı (%3,8) %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesiyle SSİSİ uygulanmış numunelerde tespit edilmiştir. Gözeneklilik oranı Al2024 alüminyum alaşımına oranla Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerde %44 oranında düşüş

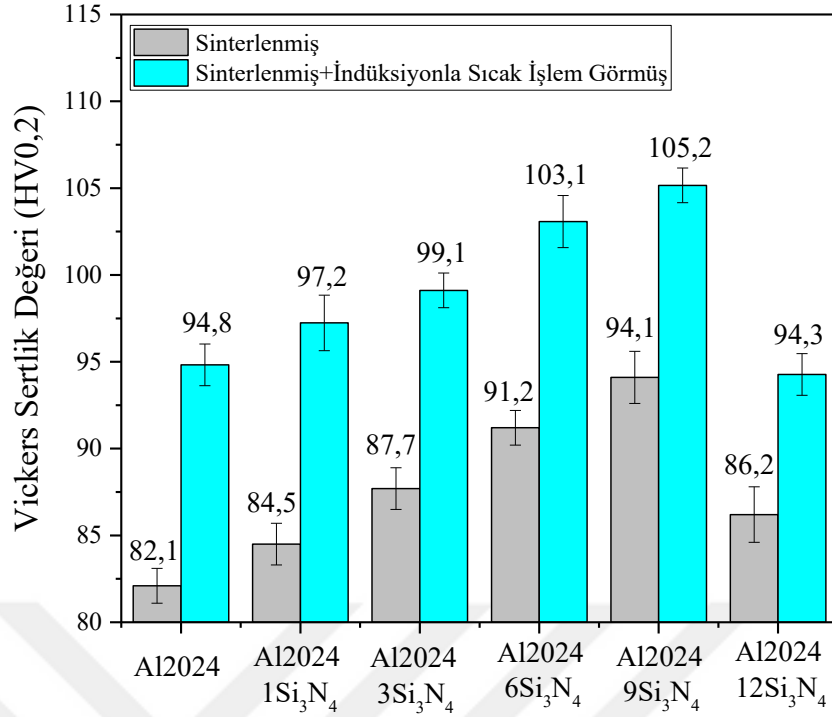
göstermiştir. Ancak %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinde gözeneklilik oranı aniden artmıştır. Bu duruma takviye malzemesinin yapı içerisinde topaklanması ve homojen dağılamaması sebep olmuştur.



Şekil 6.18. Al2024 Al alaşımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait gözeneklilik oranı değerleri

### 6.2.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Al2024 matris malzemesi içerisine toz metalürjisi yöntemiyle ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik malzemesi takviye edilmiştir. Elde edilen numunelerin Vickers sertlik değerleri yalnızca sinterleme ve SSİSİ'den sonra belirlenmiştir. Her iki işlem sonrası elde edilen Vickers sertlik verileri takviye miktarına bağlı olarak Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde; artan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkı oranına bağlı olarak her iki işlem için de sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Elde edilen en yüksek sertlik değeri ağırlıkça %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış SSİSİ uygulanmış numunelerde 105,2 HV olarak bulunmuştur. Sertlik değeri Al2024 alüminyum alaşımına oranla %28,14 oranında artış göstermiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış numunelerde sertliğin her iki işlem için de düştüğü görülmektedir. Sertlikte yaşanan bu düşüş takviye malzemesinin yapı içerisinde topaklanmasından kaynaklanmaktadır.

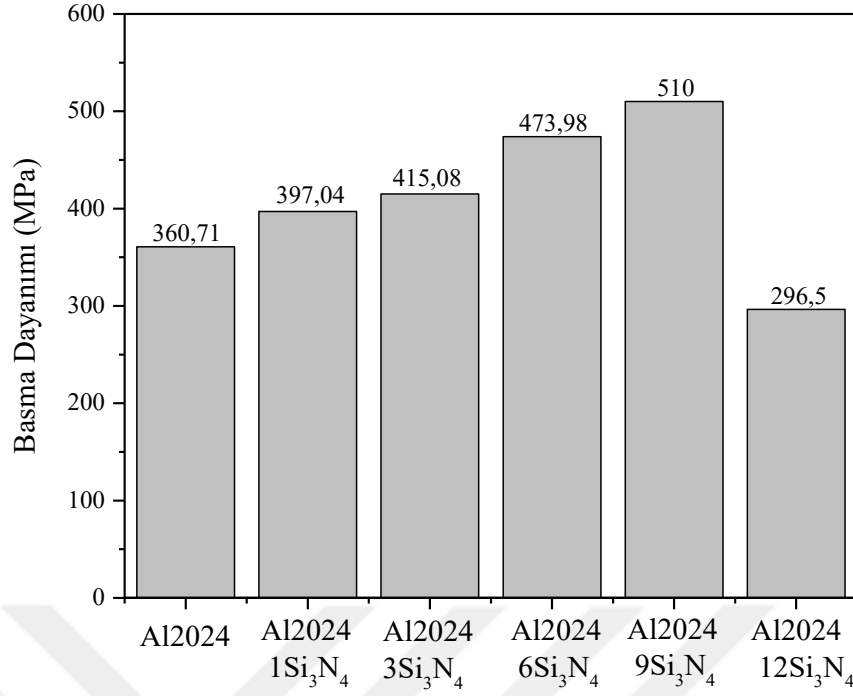


Şekil 6.19. Al2024 Al alaşıımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait Vickers sertlik değerleri

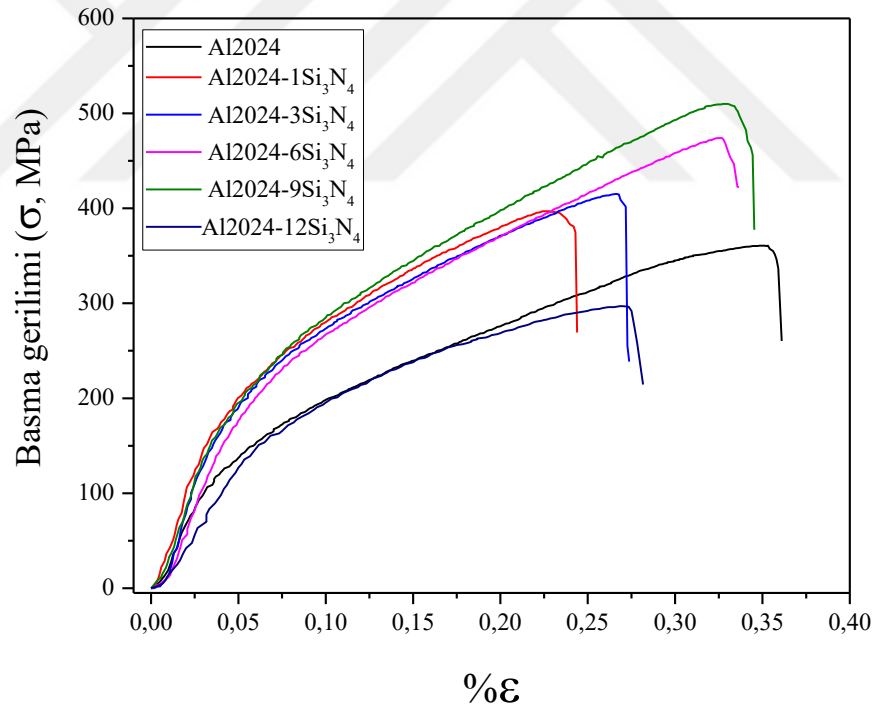
#### 6.2.4. Basma Testi Sonuçları

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlere ait basma dayanımı verileri Şekil 6.20'de verilmiştir. Al2024 alüminyum alaşıımı, Al2024-1Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-3Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-6Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-12Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin basma dayanımları sırasıyla 360,71, 397,04, 415,08, 510 ve 296,5 MPa olarak bulunmuştur. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi Al2024 alüminyum alaşıımının basma dayanımını arttırmıştır. En yüksek basma dayanımı (510 MPa) ağırlıkça %9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Yapılan bu takviye kompozit malzemenin basma dayanımını Al2024 alüminyum alaşıımına göre yaklaşık olarak %41,38 oranında artırmıştır. Ancak ağırlıkça %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli Al2024 matrisli kompozitin basma dayanımı (296,5 MPa), Al2024 alüminyum alaşıımının basma dayanımından (360,71 MPa) da düşüktür. Bu duruma Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye elemanının topaklanmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Bunu doğrulamak için kompozit malzemelerin mikroyapıları incelenmiştir. Al2024 alüminyum alaşıımı ve Al2024-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait gerilme-gerinim eğrileri (Şekil 6.21) incelendiğinde ise Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerin gevrek bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır.

SSİSİ uygulanmış kompozit malzemelerden basma testi için uygun numuneler üretilmediği için bu numunelere basma testi uygulanamamıştır.



Şekil 6.20. Al2024 Al alaşımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait basma dayanımları değerleri

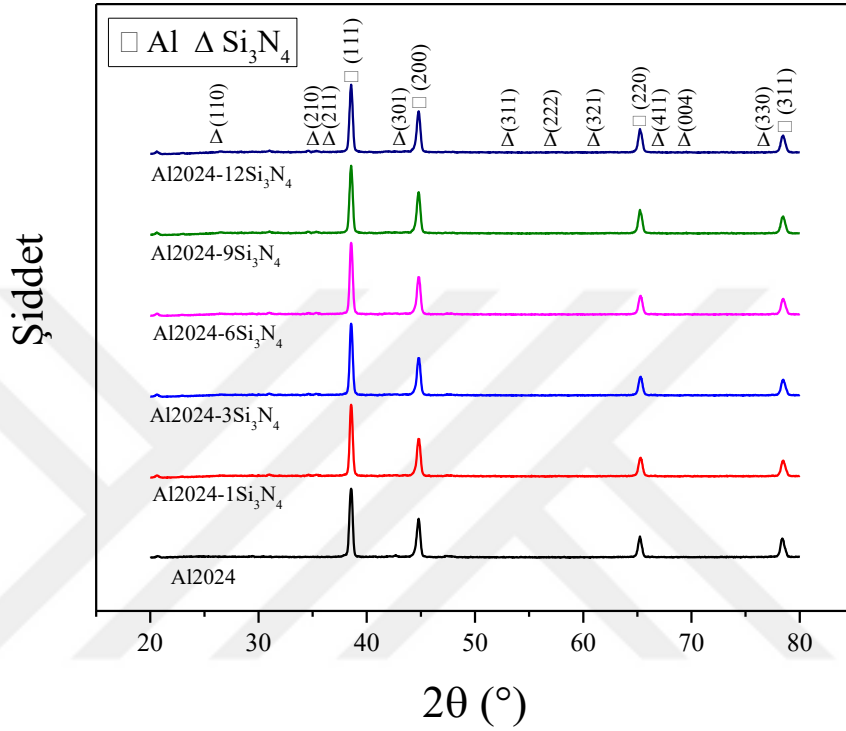


Şekil 6.21. Al2024 Al alaşımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait basma dayanımı eğrileri

### 6.2.5. XRD Analiz Sonuçları

Ağırlıkça farklı oranlarda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış Al2024-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.22’de verilmiştir. XRD örgü deseninde alüminyum “□” simgesi ile Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi ise “Δ” simgesi ile sembolize edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemeler şekillendirme işleminden sonra 600 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı düşük olduğu için (1420 °C'nin altında) kompozit yapıdaki silisyum nitrür  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  yapıdadır. Şekil 6.23'deki XRD örgü deseni incelendiğinde tüm piklerin Al ve  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'e ait olduğu görülmektedir. Sinterleme etkisiyle AlN gibi istenmeyen ikincil fazlar oluşmamıştır.

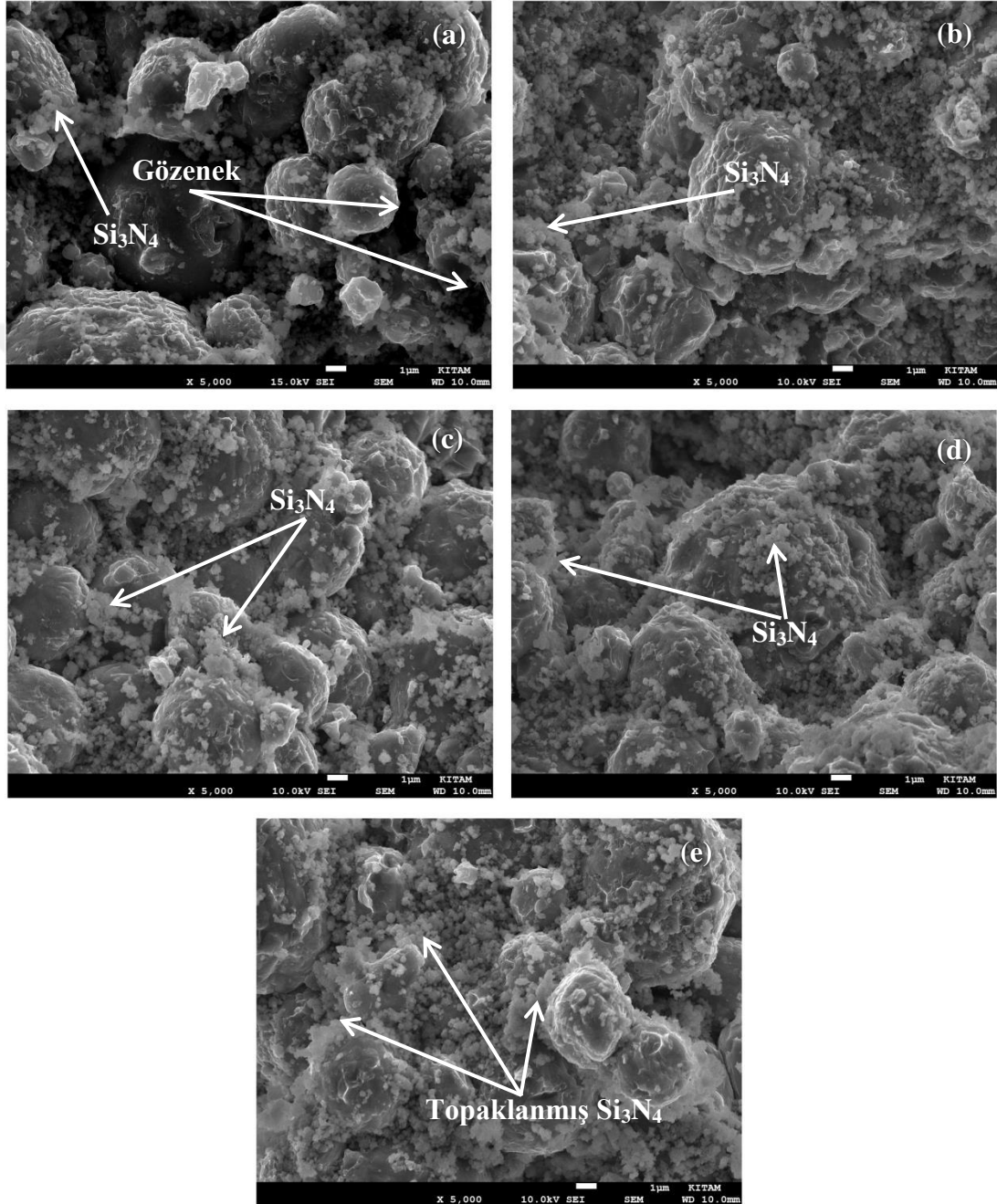


Şekil 6.22. Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024- $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozitlere ait XRD faz analizleri

### 6.2.6. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları

Al2024 matris malzemesine toz metalürjisi yöntemi kullanılarak ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesi yapılmıştır. Yapılan bu takviyeler sonucunda Vickers sertlik değeri takviye oranıyla beraber artış göstermiş ve en yüksek sertlik değeri ağırlıkça %9  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviye oranında elde edilmiştir. Ancak matris malzemeye yapılan ağırlıkça %12  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesiyle Vickers sertlik değeri düşmüştür. Kompozit yapının sertliğinde meydana gelen bu düşüşün nedenini öğrenmek için  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al2024 matrisli kompozitlerin kırık yüzeylerinin mikroyapıları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiş ve sonrasında kırık yüzeylere element dağılım haritalama analizi yapılmıştır. Al2024- $\times\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 6.23'de verilmiştir. Al2024-1 $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al2024-3 $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al2024-6 $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve Al2024-12 $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde; takviye

malzemesinin tanecik sınırlarına homojen bir şekilde yerleştiği ve ara yüzey bağlarının iyi olduğu görülmektedir. Ağırılıkça %12 oranında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesinde ise takviye malzemesinin topaklandığı görülmüş olup sertliğin bu sebeple düştüğü belirlenmiştir.

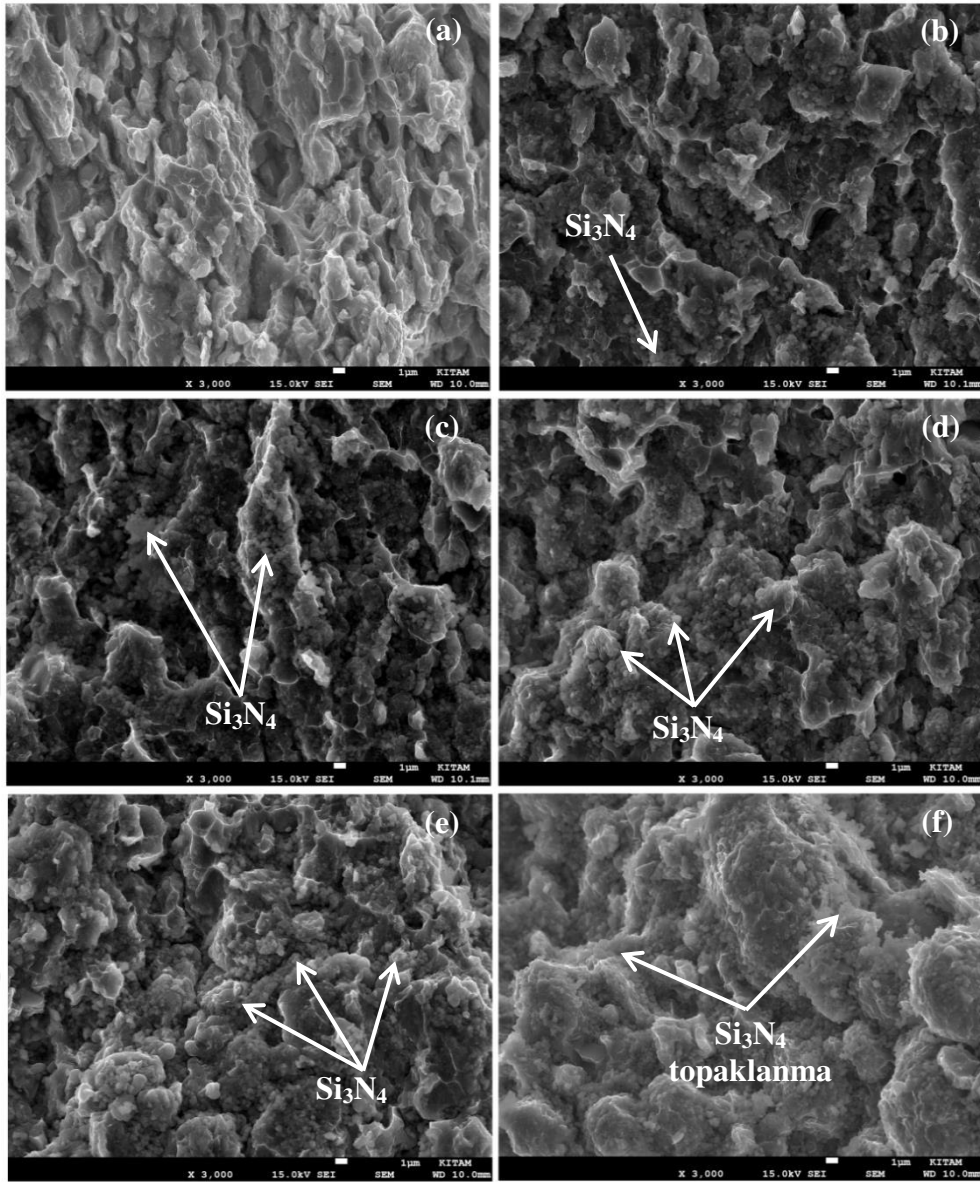


Şekil 6.23. Al<sub>2024</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al<sub>2024</sub>-1%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b) Al<sub>2024</sub>-3%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al<sub>2024</sub>-6%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (d) Al<sub>2024</sub>-9%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve (e) Al<sub>2024</sub>-12%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Yalnızca sinterlenmiş Al<sub>2024</sub> alüminyum alaşımı ve Al<sub>2024</sub>-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemelere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Bu işlemle beraber yalnızca sinterlenmiş numunelere kıyasla kompozit malzemelerin sertlik

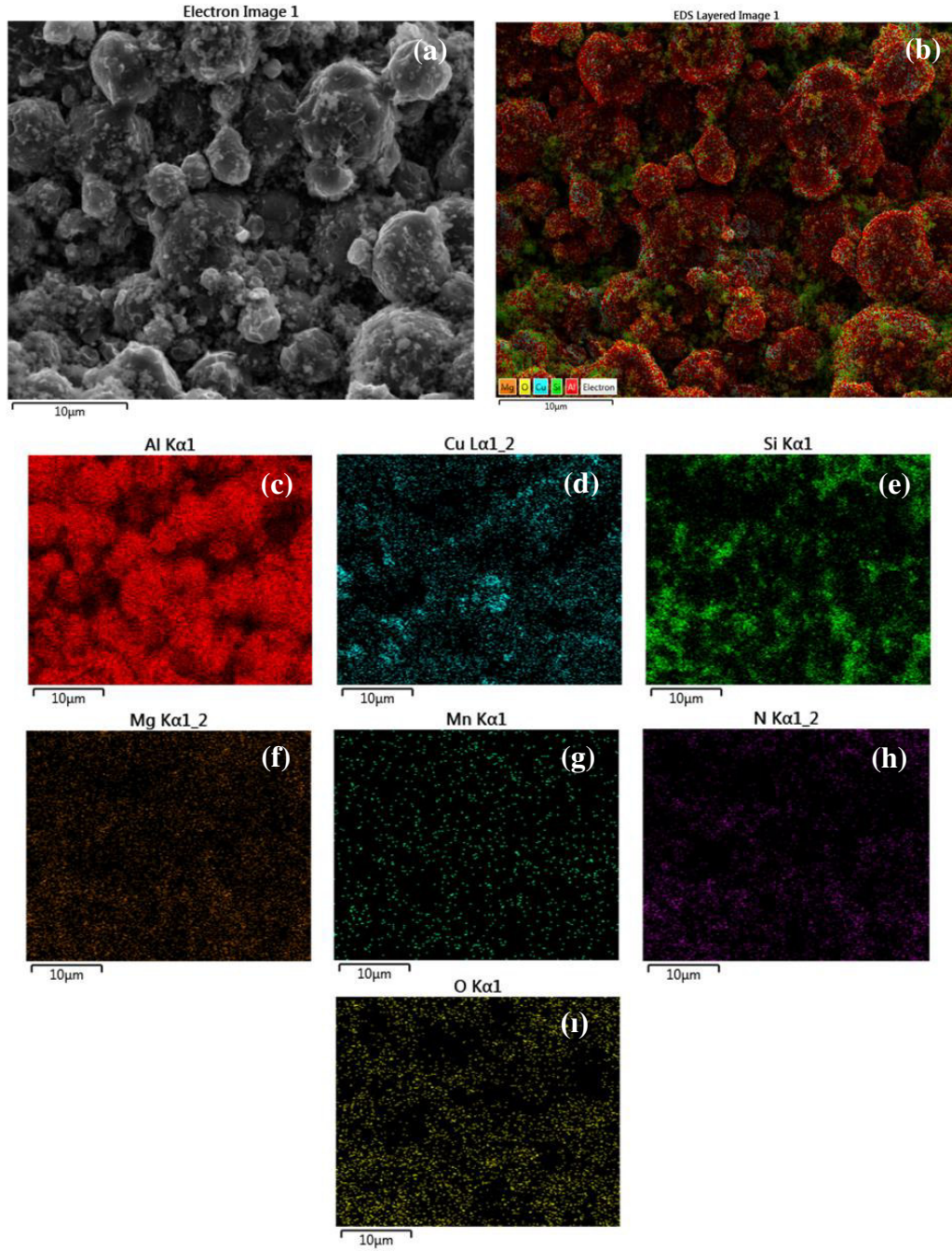
değerlerinde yaklaşık olarak %12 oranında bir artış gözlenmiştir. Ağırlıkça %12  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesi sonucunda ise sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu duruma neyin sebebiyet verdiğini belirlemek amacıyla  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir (Şekil 6.24). Kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde; SSİSİ sonucu tanecikler arasında kuvvetli ara yüzey bağlarının oluştuğu ve taneciklerin yönlendiği görülmektedir. Taneciklerin yönlenmiş olmasına bağlı olarakta sertlik değerleri artmıştır. Ancak ağırlıkça %12  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesinde, takviye elemanı yapı içerisinde topaklanmış ve topaklanmaya bağlı gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Bu da sertlikte meydana gelen düşüşü açıklamaktadır.





Şekil 6.24. Sinterleme sonrası induksiyonla sıcak işlem görmüş Al2024 alüminyum alaşımı ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al2024, (b) Al2024-%1Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al2024-%3Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (d) Al2024-%6Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (e) Al2024-%9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (f) Al2024-%12Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinin taramalı elektron mikroskopuyla elde edilen element dağılım haritası Şekil 6.25’de verilmiştir. Element dağılım analizi kompozit malzemelerin kırık yüzeylerine uygulanmıştır. Bu analiz sonucunda Al2024 matris malzemesinin ana elementleri olan Al (kırmızı dağılımlı), bakır (mavi dağılımlı), silisyum (yeşil dağılımlı), magnezyum (sarı dağılımlı), mangan (yeşilimsi dağılım) ve azot (mor dağılımlı) yapı içerisinde rahatlıkla görülebilmektedir. Görüntüler incelendiğinde; Al, Si ve N’nin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. İyapıda görülen O ise sinterleme sırasında kompozit malzemenin iç yapısında oksit tabakasının varlığını göstermektedir.



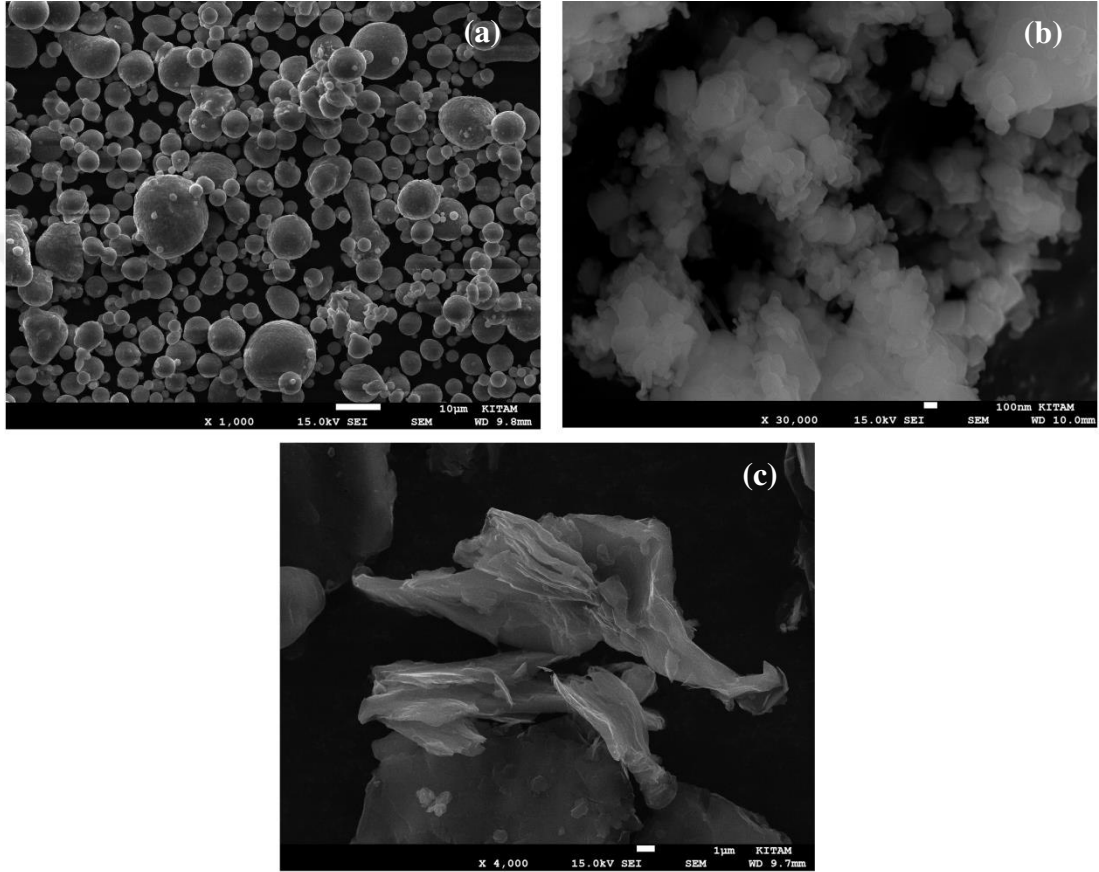
Şekil 6.25. Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlere ait element dağılım haritası ve çizgi taraması analizi: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c-i) element dağılım haritaları

### 6.3. Grafen ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Al<sub>2024</sub> Matrisli Kompozitlerin İncelenmesi

Bu bölümde ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında grafen takviyesi yapılmış Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit kompozitlerin analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerin; SEM, XRD analizleri ve yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği, basma dayanımı değerleri ve kırık yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir.

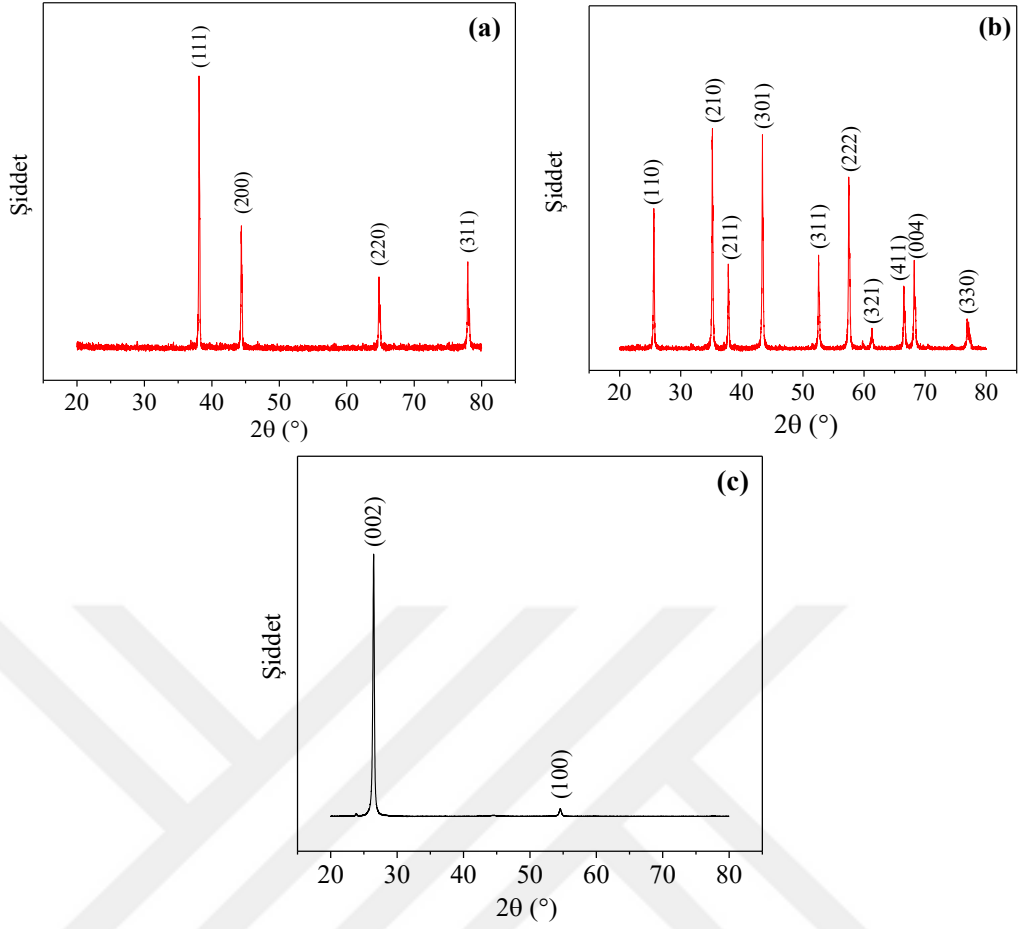
### 6.3.1. Tozların Tane Boyut, XRD ve SEM İncelemeleri

Hibrit kompozit malzeme üretiminde kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve grafen tozlarının sinterleme öncesi çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 6.26'da verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matris tozunun küresel bir morfolojide olduğu, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> toz taneciklerinin küresel olmayan düzensiz bir morfolojiye sahip oldukları ve grafen toz taneciklerinin ise tabakalı bir yapıda olduğu görülmektedir.



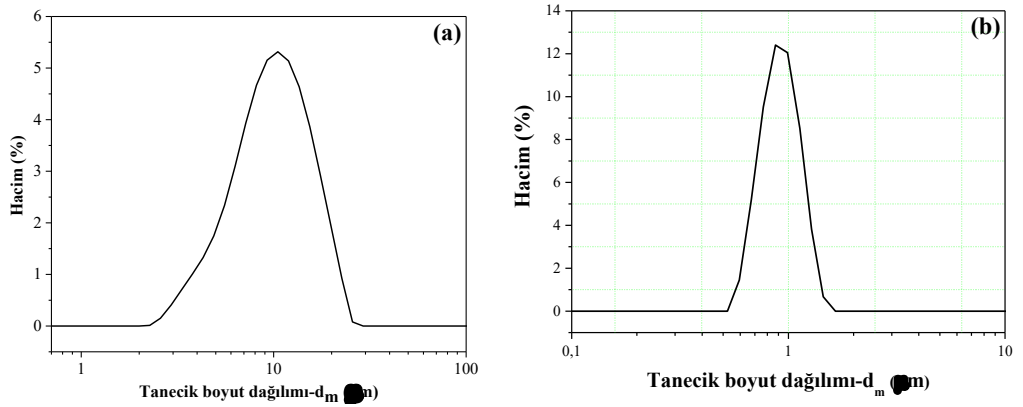
Şekil 6.26. Tozların SEM görüntüleri: (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alüminyum alaşımı ×1000 büyütme, (b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ×30000 büyütme ve (c) grafen toz tanecikleri ×4000 büyütme

Kompozit üretiminde kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve grafen tozlarına ait XRD faz analizleri yapılmıştır. Faz analizi sonucu elde edilen XRD örgü desenleri Şekil 6.27'de verilmiştir. Bu analizlerden; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşım tozunun kırınım açılarının  $2\theta=38^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $66^\circ$  ve  $78^\circ$ , Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün kırınım açılarının  $2\theta=26^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $43^\circ$ ,  $53^\circ$ ,  $57^\circ$ ,  $61^\circ$ ,  $67^\circ$ ,  $69^\circ$  ve  $77^\circ$  ve grafenin kırınım açılarının ise  $2\theta=26,5^\circ$  ve  $54,5^\circ$  olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.27. Tozların XRD faz analizleri: (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün XRD örgü deseni, (b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün XRD örgü deseni ve (c) grafen'in XRD örgü deseni

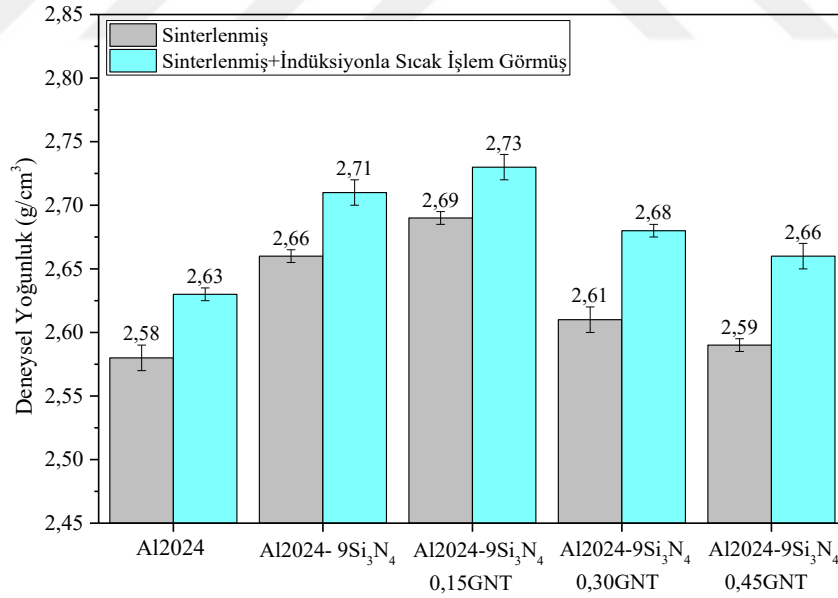
Kompozit malzeme üretiminde kullanılan toz boyut dağılım analizi sonuçları Şekil 6.28'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz taneciklerinin yaklaşık 10,51 µm boyutunda ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> toz taneciklerinin ise 872 nm boyutunda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.28. Tozların tanecik boyut dağılımı: (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alüminyum alaşımı ve (b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 6.3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları

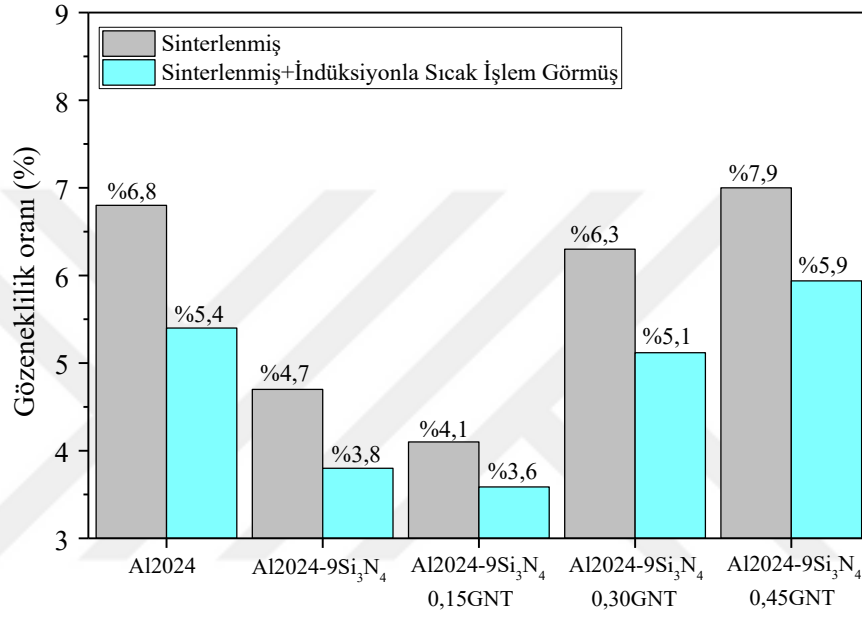
$\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al2024 alüminyum alaşımı matrisli kompozitlerde en yüksek Vickers sertlik değeri (105,2 HV) ağırlıkça %9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli SSİSİ uygulanmış kompozitlerde elde edilmiştir. Bu nedenle üretilen hibrit kompozitlerde  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviye miktarı %9 olarak belirlenmiş ve kompozitlere ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında grafen takviyesi yapılmıştır. Kompozit numunelerin sinterleme sonrası ile sinterleme ve SSİSİ'den sonrası deneysel yoğunlukları Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerin deneysel yoğunluk değerleri Şekil 6.29'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde; en yüksek deneysel yoğunluk değeri ( $2,73 \text{ g/cm}^3$ ) SSİSİ uygulanmış Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$ -0,15GNT hibrit kompozitlerde elde edilmiştir. Hibrit kompozitlerde deneysel yoğunluk değeri Al2024 alüminyum alaşımının yoğunluk değerine ( $2,58 \text{ g/cm}^3$ ) oranla %5,8 oranında artarken Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozit malzemesinin yoğunluk değerine ( $2,66 \text{ g/cm}^3$ ) oranla %2,63 oranında artış göstermiştir. Ancak bu takviye oranından sonra kompozit yapıda grafen nanopartiküllerin topaklanmasına bağlı olarak deneysel yoğunluk değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 6.29. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$ -GNT hibrit alüminyum kompozitlerin deneysel yoğunluk değerleri

Mekanik özellikleri etkileyen diğer bir faktör ise gözenekliliktir. Alüminyum hibrit kompozitlerde grafen takviyesine bağlı olarak kompozit yapıda meydana gelen gözeneklilik oranı değerleri Şekil 6.30'da verilmiş. Şekil incelendiğinde elde edilen

en düşük gözeneklilik oranı değeri SSİSİ uygulanmış Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozitte %3,6 olarak tespit edilmiştir. Bu oran Al2024 alüminyum alaşımının gözeneklilik oranıyla kıyaslandığında %45, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesi ile kıyaslandığında ise %23,4 oranında daha düşüktür. Bu değerden sonraki takviyelerde ise gözeneklilik oranının giderek arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi ise grafenin matris içerisinde topaklanmasına bağlı olarak homojen bir şekilde dağıtılamamasındandır.

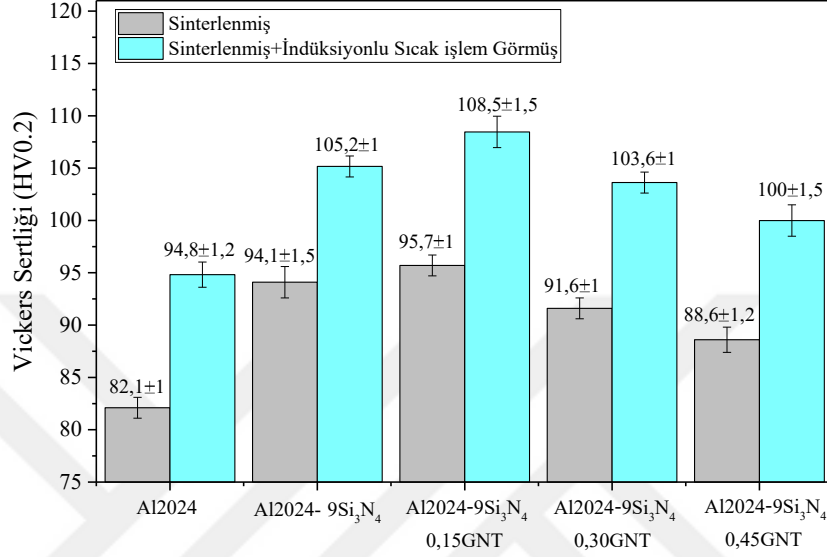


Şekil.6.30. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit alüminyum kompozitlerin gözeneklilik oranları

### 6.3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli Al2024 alüminyum alaşımını matrisli kompozitlerde SSİSİ'den sonra elde edilen en yüksek sertlik değeri (105,2±1 HV) ağırlıkça %9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranında elde edilmiştir. Bu nedenle alüminyum hibrit kompozitlere ağırlıkça %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> katkı oranı sabit tutularak ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında grafen ilavesi yapılmıştır. Grafen takviyesine bağlı Vickers sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6.31'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde; ağırlıkça %0,15 GNT ilavesi yapılmış numunelerde sinterlemenin de etkisiyle Vickers sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Üretilen numunelerde elde edilen en yüksek Vickers sertlik değeri SSİSİ uygulanmış Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozitte 108,5±1,5 HV olarak bulunmuştur. Bu oran takviyesiz numunelerin sertlik değeri ile kıyaslandığında %32,15, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesi ile kıyaslandığında ise %15,30

oranında daha yüksektir. Ancak %0,15 GNT takviyesinden sonraki diğer takviye oranlarında (ağırlıkça %0,30, 0,45)Vickers sertlik değeri düşmektedir. Sertlik değerinde görülen bu düşüş, grafenin matris içerisinde topaklanması sebep olmuştur. Topaklanma sonucu yapı içerisinde takviye malzemesi homojen olarak dağılmamakta ve gözenek oluşturmaktadır.

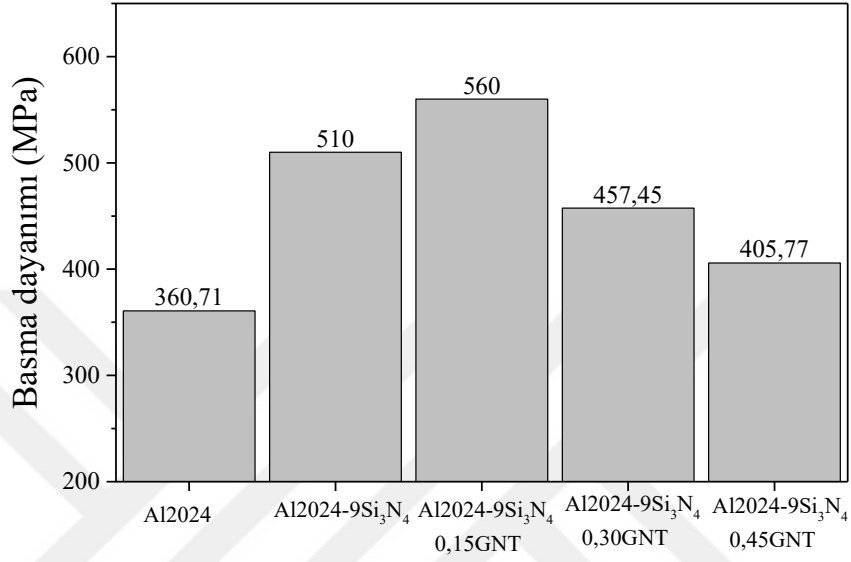


Şekil 6.31. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit alüminyum kompozitlerin Vickers sertlik değerleri

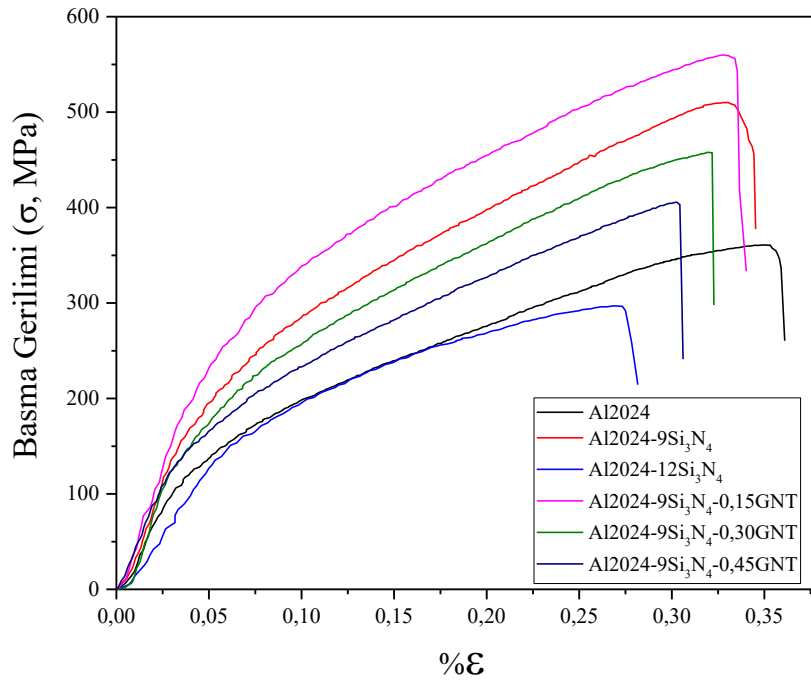
#### 6.3.4. Basma Testi Sonuçları

Al2024 matris malzemesine değişik oranlarda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda da alüminyum hibrit kompozit malzeme üretimi için sertlik verileri esas alınmıştır. Bu nedenle en yüksek sertlik değeri SSİSİ uygulanmış ağırlıkça %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi numunelerde elde edilmiş olduğundan hibrit kompozit üretiminde %9'luk bu oran sabit tutulmuş ve farklı katkı oranlarında grafen ilavesi yapılmıştır. Grafen takviyesi sonucu elde edilen basma dayanımı değeri Şekil 6.32'de verilmiştir. Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,30GNT ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,45GNT kompozitlere ait en yüksek basma değerleri sırasıyla; 510, 560, 457,45 ve 405,77 MPa olarak bulunmuştur. Yapılan test sonucunda en yüksek basma dayanımı %0,15 GNT takviyeli alüminyum hibrit kompozitte 560 MPa olarak tespit edilmiştir. Yapılan bu takviye oranıyla beraber basma dayanımı Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeye göre yaklaşık olarak %10 oranında artış göstermiştir. Ancak yapılan diğer takviyelerde (ağırlıkça %0,30 ve %0,45 GNT) basma dayanımı matris

malzemesinin basma dayanımı değerinden daha düşük değerlere gerilemiştir. Basma dayanımında yaşanan bu düşüşün sebebi, grafenin artan takviye oranıyla topaklanmış olmasıdır. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al2024-12Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit kompozitlerin gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde ise grafen takviyesinin alüminyum hibrit kompozitlerin gevrekliğini artırdığı tespit edilmiştir.



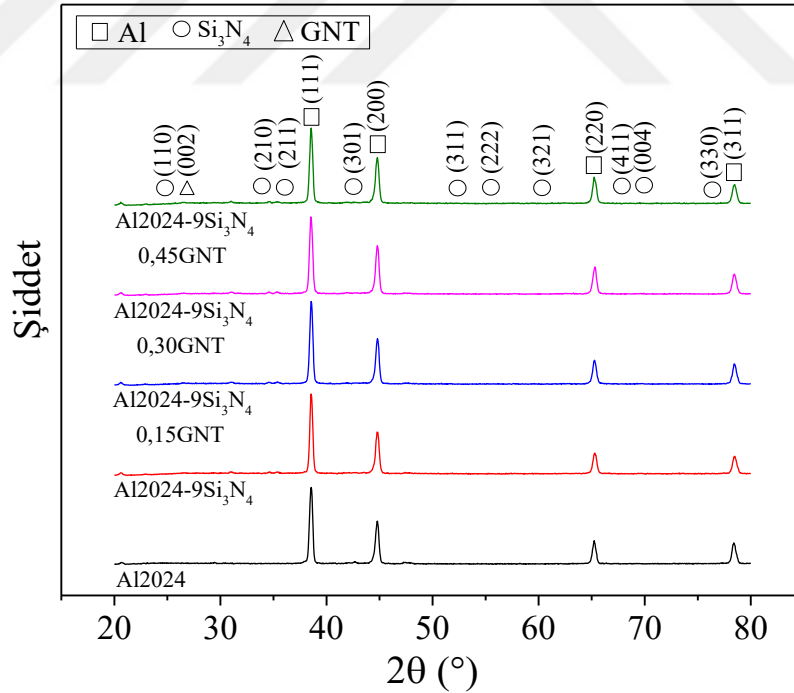
Şekil 6.32. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT alüminyum hibrit kompozitlerin basma dayanımı değerleri



Şekil 6.33. Al2024 alüminyum alaşımı, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT alüminyum hibrit kompozitlerin basma dayanımı eğrileri

### 6.3.5. XRD Analiz Sonuçları

Üretimi gerçekleştirilen alüminyum hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için sinterleme işlemi uygulanmıştır. Yapılan sinterleme işlemi ile alüminyum hibrit kompozitlerin yapılarında, kompoziti oluşturan ana fazların dışında  $Al_4C_3$  gibi yapı içerisinde, istenilmeyen ikincil fazların oluşup oluşmadığını belirlemek için alüminyum hibrit kompozitlere XRD faz analizi yapılmıştır. 600 °C’de ve 60 dk. süresince sinterlenmiş Al2024, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT (x; %0,15, 0,30, 0,45) kompozitlere ait XRD örgü desenleri Şekil 6.34’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde sinterleme sonucu  $Al_4C_3$  gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı görülmektedir. Şekilde “□” simgesiyle Al, “○” simgesiyle Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve “△” simgesiyle GNT sembolize edilmiştir. Grafen nanotabaka XRD analizinde cihazın hassasiyetinden dolayı herhangi bir pik vermemiş olup şekil üzerinde  $2\theta=26,5^\circ$ ’de “△” simgesiyle sembolize edilerek gösterilmiştir. Burada silisyum nitrürün, sinterleme sıcaklığının 1420 °C’nin altında olması nedeniyle “α- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>” yapıda olduğu belirlenmiştir.

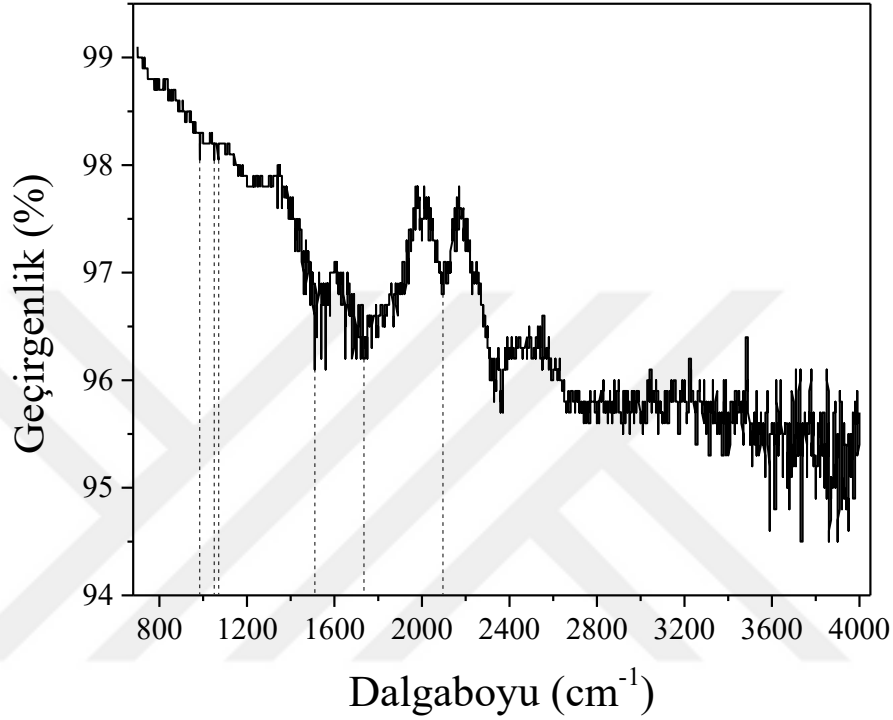


Şekil 6.34. Al2024, Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve hibrit kompozitlerin XRD faz analizleri

### 6.3.6. FTIR Analiz Sonuçları

XRD analizinde grafenin hibrit yapı içerisindeki varlığı hem grafen miktarının düşük seviyede olması hem de kullanılan analiz cihazının hassasiyetinin düşük

olması nedeniyle tespit edilememiştir. Bu nedenle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozit malzemelerdeki grafen varlığını doğrulamak amacıyla FTIR analizi yapılmıştır. Spektral analiz, 700-4000 cm<sup>-1</sup> arasındaki kızılötesi dalga boyu arasında gerçekleştirilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozit malzemeye ait FTIR spektrumu Şekil 6.35’de verilmektedir.

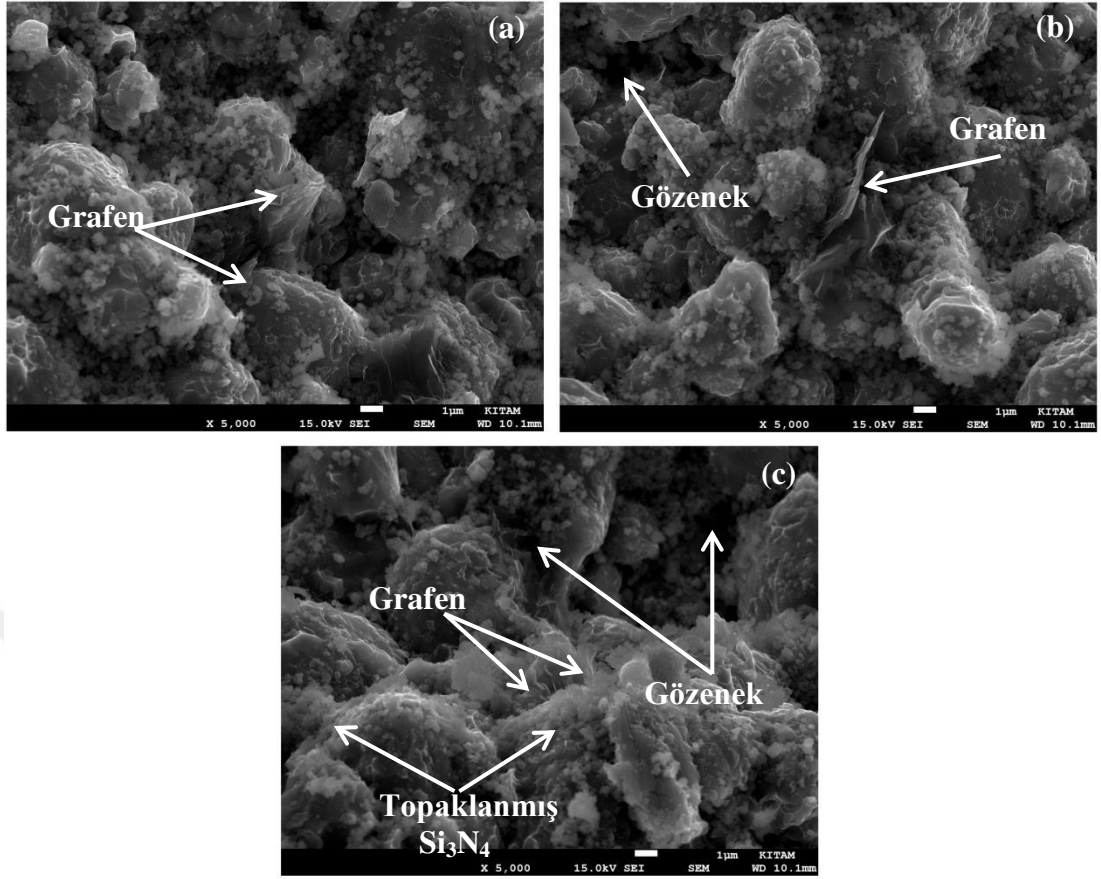


Şekil 6.35. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit alüminyum kompozitin FTIR spektrum analizi

Şekil üzerindeki 4000-1900 cm<sup>-1</sup> dalga boyları arasındaki absorpsiyon bantları kompozit malzemenin yüzeyinden emilen nemden kaynaklanmaktadır. Grafene ait karakteristik absorpsiyon bantları ise 1600-1300 cm<sup>-1</sup> dalga boyu arasında görülmektedir. Kompoziti oluşturan malzemelere bağlı olarak grafenin absorpsiyon bantları biraz sapma gösterebilmektedir. Kompozit malzemeye ait bu grafikte 1740 cm<sup>-1</sup> ve 1510 cm<sup>-1</sup> dalga boylarındaki absorpsiyon bantları karbon atomları arasındaki sp<sup>2</sup> hibritleşmesinden kaynaklanmaktadır. 1070 cm<sup>-1</sup>, 1050 cm<sup>-1</sup> ve 985 cm<sup>-1</sup> dalga boylarındaki bantlar ise Si-N etkileşiminden kaynaklandığından Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’e ait absorpsiyon bantlarıdır. Yapılan analiz ile elde edilen bu sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırıldığında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozit yapı içerisindeki grafenin ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’ün varlığı doğrulanmaktadır (Altıparmak, 2009; Boppana vd., 2020; Omidı vd., 2014; Sahoo vd, 2013; Wang vd., 2008; Wu vd, 2013; Song vd., 2015).

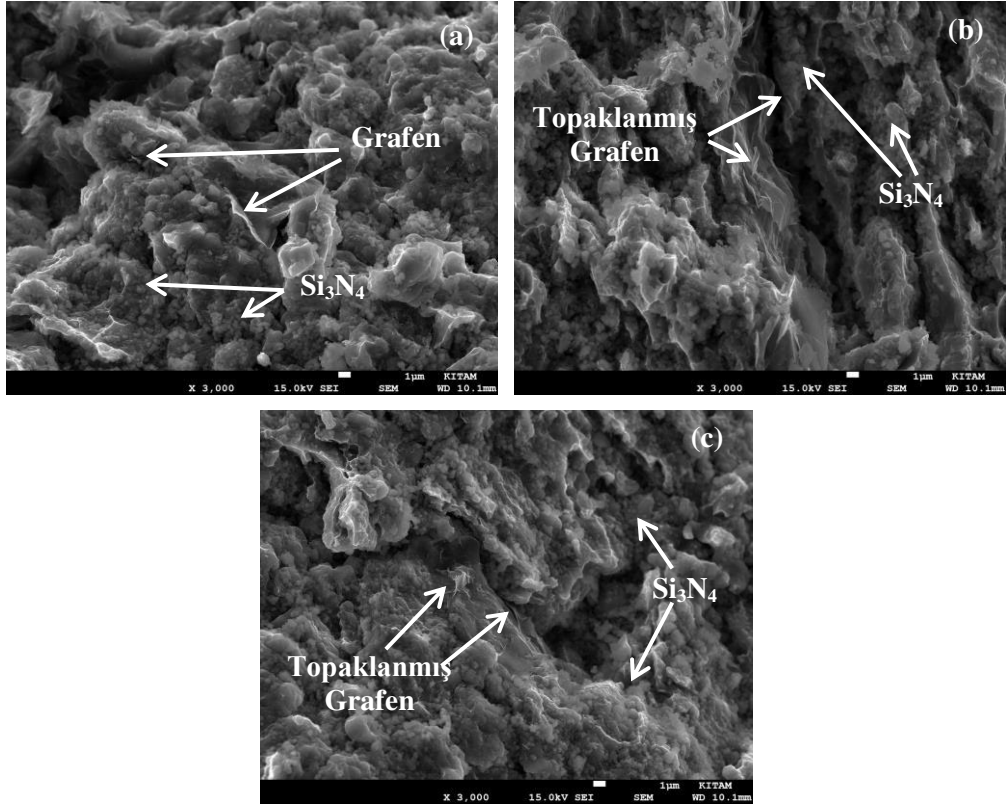
### 6.3.7. SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alüminyum matrisine ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi yapılmış olup mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Yürütülen sertlik ölçüm testleri sonucunda en yüksek sertlik değeri (105,2±1,5 HV) SSİSİ uygulanmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerde elde edilmiştir. Bu nedenle hibrit kompozit malzeme üretimi için ağırlıkça %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oranı sabit tutulup yapı içerisine farklı oranlarda grafen ilavesi yapılmıştır. Grafen takviyeleri ise ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında yapılmıştır. Yapılan takviyeler sonucu elde edilen hibrit kompozit yapıların sertlik değerleri incelendiğinde, hem sinterlenmiş hem de SSİSİ uygulanmış %0,15 GNT takviyeli alüminyum kompozit numunelerde en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Ancak bu değerden sonra yapılan grafen takviyelerinde sertlik değeri düşmüştür. Sertlikte yaşanan düşmeye neyin sebebiyet verdiğini belirlemek için hibrit kompozitlerin mikro yapıları incelenmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT alüminyum hibrit kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.36'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT hibrit kompozitte grafen takviye malzemesinin tane sınırlarına yerleştiği görülmektedir. Ancak ağırlıkça %0,30 ve %0,45 GNT takviyesinde yapı içerisinde grafenin topaklandığı, buna bağlı olarak da grafenin homojen bir şekilde dağılmadığı ve yapı içerisinde gözenekler oluşturduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı da sertlik değerlerinde düşüş tespit edilmiştir.



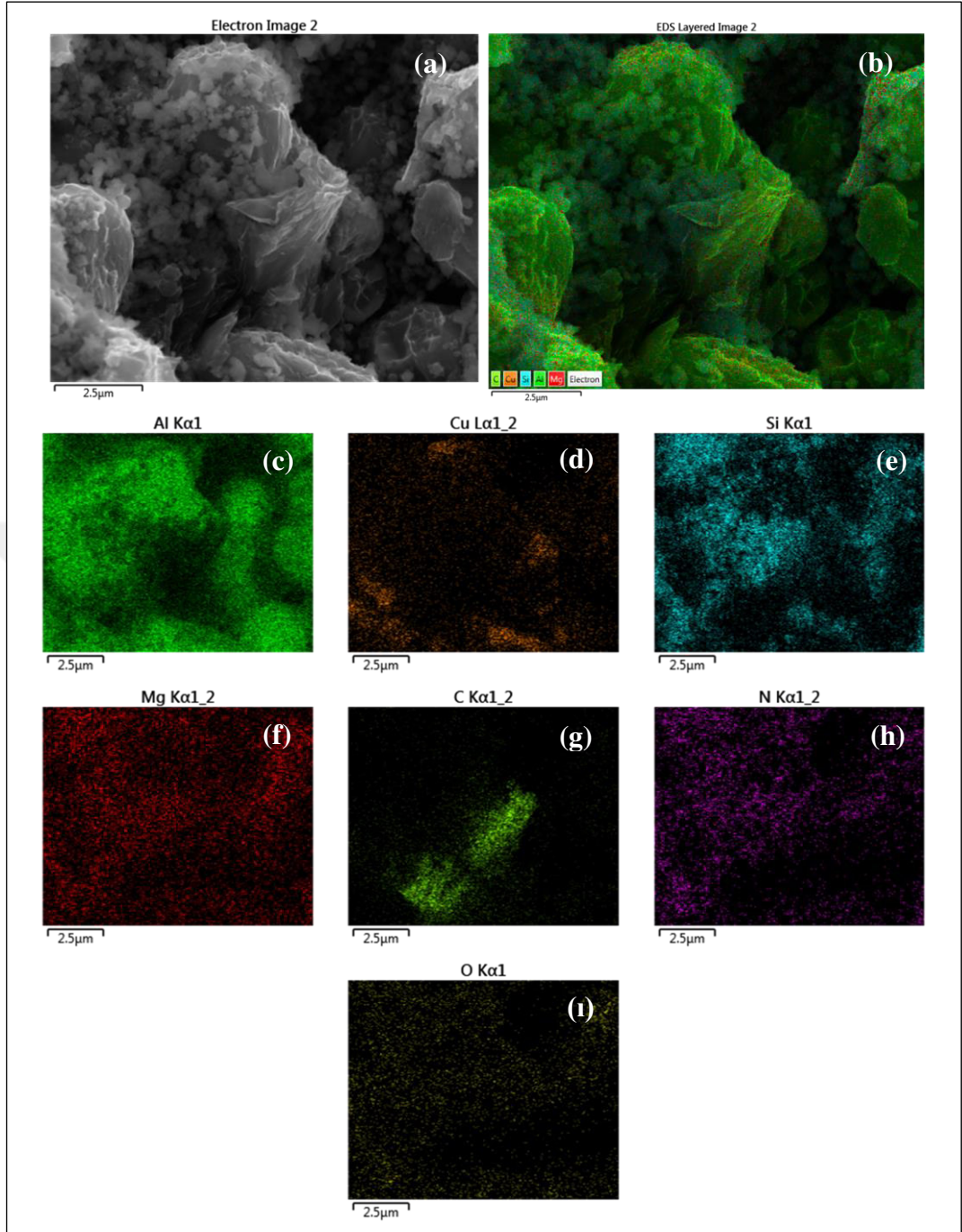
Şekil 6.36. Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-GNT kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT, (b) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,30GNT, (c) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,45GNT

Sinterlenmiş Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit kompozitlere sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Yapılan bu işlemle beraber hibrit kompozitlerin sertlik değerleri yalnızca sinterlemeye kıyasla yaklaşık %13 oranında artmıştır. Ancak ağırlıkça %0,15 GNT takviyesinde artan sertlik değeri artan GNT katkı oranıyla düşmüştür. Sertlikte gerçekleşen bu düşüşün sebebini belirlemek için hibrit yapıli kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir. Alüminyum hibrit kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 6.37’de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; tanecikler arasında ara yüzey bağlarının arttığı ve tanelerin yönlenmiş olduğu görülmektedir. Bu etkenler %0,15 GNT takviyeli kompozitlerde sertliğin artışı açıklamaktadır. Ancak diğer takviye oranlarında (%0,30 ve %0,45) ise grafen takviyesinin topaklanması sebebiyle kompozit yapı içerisinde homojen olmayan bir dağılım gerçekleşmiş ve gözenekler oluşmuştur. Bu durumlar da sertliğin neden düştüğünü açıklamaktadır.



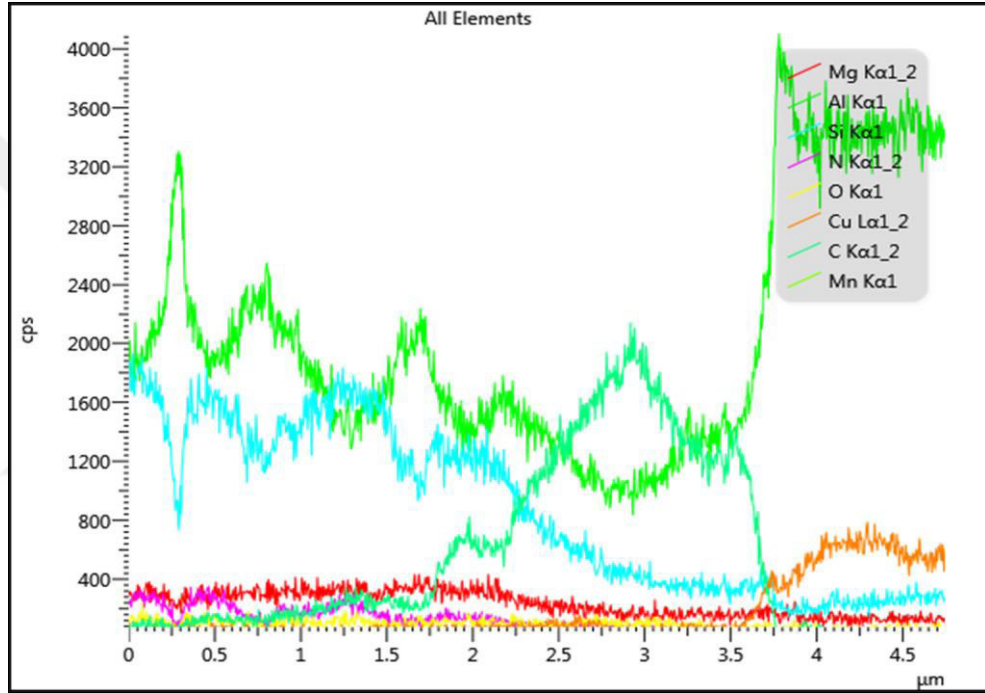
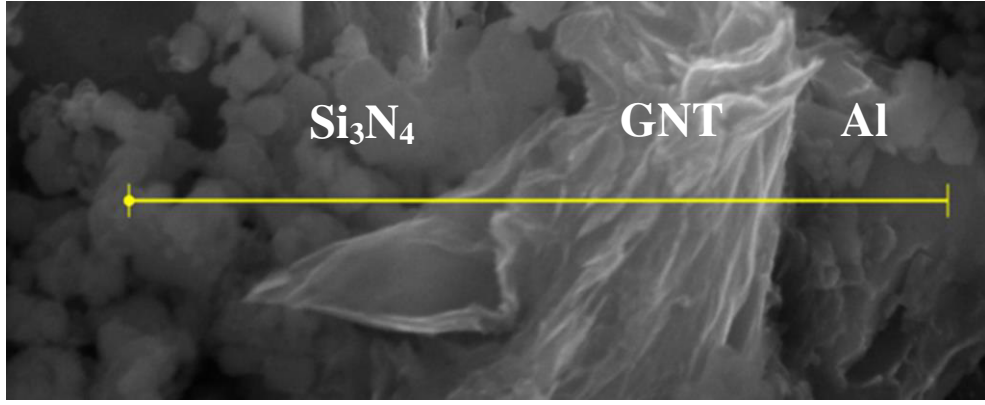
Şekil 6.37. (a) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT, (b) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,30GNT, (c) Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,45GNT alüminyum hibrit kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri

Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskopuyla elde edilen element dağılım haritalama analizi Şekil 6.38’de verilmiştir. Element dağılım haritalama analizi kompozit malzemelerin kırık yüzeylerine uygulanmıştır. Element dağılım haritalama analizi sonucunda Al<sub>2024</sub> matris malzemesinin ana elementleri olan Al (yeşil dağılımlı), bakır (turuncu dağılımlı), silisyum (mavi dağılımlı) ve magnezyum (kırmızı dağılımlı) yapı içerisinde rahatlıkla görülebilmektedir. Bunların yanında takviye malzemelerine ait; Si (mavi dağılımlı), N (mor dağılımlı), C (açık yeşil dağılımlı) elementleri de görülmektedir. Yapı içerisinde görülen O (sarı dağılımlı) ise içyapıdaki oksit tabakasının varlığını göstermektedir. Özellikle açık yeşil dağılım olduğu yani karbon elementinin yoğunlaştığı bölge grafenin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.38. Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-0,15GNT alüminyum hibrit kompozit malzemenin element dağılım haritası: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c-i) element dağılım haritaları

Şekil 6.39’da ise Al<sub>2024</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT hibrit kompozit malzemeye ait SEM-EDX çizgi taraması analizi verilmiştir. Bu analizde tane sınırlarına yaklaştıkça alüminyum miktarının azaldığı ve karbon miktarının arttığı görülmektedir. Şekilde karbonca zengin bölgeler grafenin hibrit yapı içerisindeki varlığını doğrulamakta ve grafenin tane sınırlarına yerleştiğini göstermektedir.



Şekil 6.39.  $\text{Al}_{2024}-9\text{Si}_3\text{N}_4-0,15\text{GNT}$  alüminyum hibrit kompozit malzemenin çizgi taraması analizi

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alüminyum alaşım matrisine farklı oranlarda GNT ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeleri yapılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisli malzemeler ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-xGNT, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-xGNT kompozit malzemeler üretilmiştir. Yapılan literatür araştırmaları sonucu elde edilen değişik sinterleme sıcaklığı ve süreleri ışığında bu çalışmada kullanılacak sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Vakuma alınarak yapılan sinterleme sonucu elde edilen kompozitlerin, deneysel yoğunluklarının ve mekanik özelliklerinin düşük olması nedeniyle kompozit malzemelere sinterleme işleminden sonra indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Takviye malzemelerinin katkı oranlarının ve numunelere yapılan ısıl işlemlerin kompozit malzemelerin; yoğunluk, sertlik, basma mukavemeti ve mikroyapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan araştırmanın sonuçları ayrı ayrı bölümler halinde özetlenmiştir.

### 7.1. Grafen Takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matris malzemesine toz metalürjisi tekniği kullanılarak ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında GNT takviyesi yapılmıştır. Literatür araştırması sonucu elde edilen sinterleme sıcaklığı (560, 580 600 °C) ve süresi (60, 120 ve 180 dk) verileri temel alınarak deneysel olarak yapılan çalışma sonucu sinterleme parametreleri belirlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra düşük olan mekanik dayanımı ve yoğunluk değerini arttırmak amacıyla kompozit malzemelere 500 °C sıcaklıkta 60 s boyunca indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. GNT takviyesinin ve ısıl işlemlerin kompozit malzemelerin yoğunluk, Vickers sertliği, basma dayanımı ve mikroyapıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

- Sinterleme işlemi için uygulanan 560, 580 ve 600 °C sıcaklıklarından, sıcaklığın artmasına bağlı olarak mekanik özellikler iyileşmiş ve en iyi sonuçlar 600 °C’de alınmıştır. Sinterleme süresi olarak uygulanan 60, 120 ve 180 dk için, artan sürelerde mekanik özellikler düşmüş ve en iyi sonuçlar 60 dk’lık sinterleme süresinde elde edilmiştir.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GNT kompozit malzemelerde en yüksek deneysel yoğunluk ve en düşük gözeneklilik oranı verileri sırasıyla 2,65±0,01 g/cm<sup>3</sup> ve %4,6

olarak %0,15 GNT takviyesi yapılmış ve SSİSİ uygulanmış kompozitlerde elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,15 oranından sonra yapılan GNT takviyelerinde, takviye malzemesinin topaklanmış olması ve matris içerisinde homojen olmayan bir dağılım göstermesi yoğunluğun düşmesine ve gözenekliliğin artmasına sebep olmuştur.

- Yapılan sertlik analizlerinde, GNT takviyesi ve SSİSİ kompozit yapının sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Sinterlenmiş numunelerde elde edilen en yüksek sertlik değeri  $91,7 \pm 1$  HV olarak %0,15 GNT takviyeli Al2024 esaslı kompozitlerde elde edilmiştir. SSİSİ uygulanmış numunelerde elde edilen en yüksek sertlik değeri ise Al2024 alüminyum alaşımına kıyasla yaklaşık %22,17 oranında artarak  $100,3 \pm 1,5$  HV olarak %0,15GNT takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Sertlikte meydana gelen bu artışa sinterleme ile tanecikler arasındaki kuvvetli boyun oluşumları ve yapılan SSİSİ ile taneciklerin yönlenmesi sebep olmuştur. Ağırlıkça %0,15 GNT takviyesinden sonra sertlikte meydana gelen düşmeye, grafenin matris içerisinde topaklanması ve homojen dağılmaması sebep olmuştur.
- Al2024 matris malzemesine yapılan GNT takviyesi kompozit yapının basma dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Al2024-GNT kompozit malzemelerde en yüksek basma dayanımı ağırlıkça %0,15 GNT takviyeli sinterlenmiş kompozitlerde 482,61 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer takviyesiz malzemeye oranla %34 daha fazladır. Basma dayanımında görülen bu artış, takviye malzemesinin tane sınırlarına yerleşmesi sonucu kompozit yapı içerisinde gerçekleşen dislokasyon hareketlerini engellemesiyle gerçekleşmiştir. %0,15 GNT takviyesinden sonra basma dayanımı artan takviye oranıyla düşmüş olup bu düşüşe takviye malzemesinin matris içerisinde topaklanması ve grafenin iyi katı yağlayıcılık özelliği sebep olmuştur.
- SEM analizlerinde, sinterleme sonucu taneler arasında iyi bir boyun oluşumu gerçekleştiği ancak ağırlıkça %0,15 GNT takviyesinden sonra grafenin topaklandığı ve yapı içerisinde gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. GNT takviyeli kompozitlere yapılan SSİSİ ile tanecikler arasında daha kuvvetli bir bağlanmanın oluştuğu ve taneciklerin

yönlendirilmiş olduğu SEM analizinde görülmüştür. SEM-EDX haritalama ve çizgi taraması analizlerinde ise, grafenin yapı içerisindeki varlığı ve tane sınırlarına yerleştiği doğrulanmıştır. Yapılan XRD faz analizlerinde ise  $Al_4C_3$  gibi istenmeyen ara fazlar oluşmamıştır.

- Sonuç olarak, belirli bir oranda yapılan GNT takviyesi Al2024 esaslı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. SSİSİ ise sinterleme işlemi ile elde edilen mekanik özellikleri daha da arttırmıştır. SSİSİ sonucu elde edilen GNT takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Al2024 alüminyum alaşımı ile kıyaslandığında, deneysel yoğunluk değeri %2,71 ve sertlik değeri %22,17 oranında artmıştır. Gözeneklilik oranı ise ~%15 oranında düşmüştür.

## **7.2. $Si_3N_4$ Takviyeli Al2024 Matrisli Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi**

Toz metalürjisi teknikleri kullanılarak Al2024 matris malzemesine ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 oranlarında  $Si_3N_4$  takviyesi yapılmıştır. Elde edilen kompozit malzemelere 600 °C sıcaklıkta 60 dk süresince sinterleme işlemi ve ardından 500 °C'de 60 s süresince de indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem, sinterleme sonucu elde edilen mekanik özelliklerin daha da geliştirilmesi amacı ile uygulanmıştır.  $Si_3N_4$  takviyesi ve ısıl işlem uygulaması yapılmış Al2024 matrisli kompozit numunelere ait yoğunluk, Vickers sertlik, basma dayanımı ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Al2024- $Si_3N_4$  kompozit malzemelerde elde edilen en yüksek deneysel yoğunluk ve en düşük gözeneklilik oranı sırasıyla 2,71 g/cm<sup>3</sup> ve %3,8 olarak %9  $Si_3N_4$  takviyesi yapılmış ve SSİSİ uygulanmış kompozitlerde elde edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem, tüm katkı oranlarında yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerlerini takviyesiz matris malzemesine kıyasla iyileştirmiştir. Matris yapıya yapılan %12  $Si_3N_4$  takviyesinde ise yoğunluk düşmüş, gözeneklilik oranını artmıştır. Bu duruma takviye malzemesinin yapı içerisinde topaklanması sebep olmuştur.

- Sertlik analizlerinde ise, en yüksek sertlik değeri 105,2 HV olarak sinterlenmiş ve sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmış kompozit yapıda elde edilmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem, kompozit yapının sertlik değerini Al2024 alüminyum alaşımına kıyasla yaklaşık olarak %28 oranında artırmıştır. Sertlikte yaşanan bu artış, indüksiyonla sıcak işlem sonucu taneciklerin birbirine daha kuvvetli bağlanması ve taneciklerin yönlenmesine bağlı olarak gelişmiştir. Kompozit yapıya yapılan %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinde ise sertlik değeri, takviye malzemesinin toplanması ve yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılması sebebiyle düşmüştür.
- Al2024 matris malzemesine yapılan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi matris malzemesinin basma dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Al2024-xSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemelerde en yüksek basma dayanımı %9 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli numunelerde 510 MPa olarak bulunmuştur. En düşük basma dayanımı ise %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerde 296,5 MPa olarak bulunmuştur. Alüminyum esaslı kompozitin basma dayanımının artmasına, takviye malzemesinin tane sınırlarına yerleşerek dislokasyon hareketlerini engellemesi neden olmuştur.
- Yapılan SEM analizlerinde, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye malzemesinin tane sınırlarına yerleştiği ve tanecikler arasında iyi bir boyun oluşumu gerçekleştiği görülmüştür. SSİSİ uygulanmış kompozit malzemelerde tanecikler arası oluşan bağların daha kuvvetli ve taneciklerin yönlenmiş olduğu görülmüştür. Kompozit yapı içerisinde ağırlıkça %12 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi sonucu takviye malzemesinin toplanıldığı SEM analizi ile doğrulanmıştır. Yapılan XRD analizlerinde ise AlN gibi istenmeyen ara fazların oluşmadığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi belirli bir orana kadar kompozit yapının mekanik özelliklerini artırmıştır. SSİSİ ise kompozit yapının mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmıştır. SSİSİ ile tanecikler arası bağlanma kuvveti sinterleme işlemine kıyasla daha da artmış ve tanecikler yönlenmiştir. SSİSİ sonucu elde edilen Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, takviyesiz Al2024 matris malzemesi ile kıyaslandığında, deneysel yoğunluk değeri %5,04 ve

sertlik değeri %28,14 oranında artmıştır. Gözeneklilik oranı ise %44 oranında düşmüştür.

### 7.3. Grafen ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Takviyeli Al2024 Matrisli Hibrit Kompozitlerin Genel Değerlendirilmesi

Bu çalışmada toz metalürjisi teknikleri kullanılarak Al2024 matris malzemesine değişik oranlarda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12) takviyesi yapılmış ve en yüksek mekanik özellikleri veren ağırlıkça %9 takviye oranı sabit değer olarak kabul edilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi belirlendikten sonra kompozit yapıya ağırlıkça %0,15, 0,30 ve 0,45 oranlarında GNT takviyesi yapılmıştır. Elde edilen hibrit malzemeler 600 °C'lik sıcaklıkta 60 dk süresince sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonucu elde edilen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini sinterleme işlemine kıyasla daha da geliştirmek için, elde edilen hibrit yapılara sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Al2024 matris malzemesine yapılan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve GNT takviyesi sonucu elde edilen hibrit yapıların yoğunluk, gözeneklilik oranı Vickers sertlik, basma dayanımı ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Al2024-9Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit yapıya GNT takviyesi sonucu elde edilen en yüksek deneysel yoğunluk ve en düşük gözeneklilik oranı değerleri sırasıyla 2,73 g/cm<sup>3</sup> ve %3,6 olarak %0,15 GNT takviyesi yapılmış SSİSİ uygulanmış kompozitlerde elde edilmiştir. Yoğunluktaki bu artışa, sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak işlemin etkisiyle tanelerin birbirine daha da yaklaşması sebep olmuştur. Bu değerden sonra yoğunluk değeri düşmüş, gözeneklilik oranı ise takviye malzemesinin topaklanmasına bağlı olarak artmıştır.
- Yapılan sertlik analizlerinde ise, en yüksek sertlik değeri 108,5±1,5 HV olarak %0,15 GNT takviyesi yapılmış SSİSİ uygulanmış hibrit kompozitlerde elde edilmiştir. SSİSİ sertlik değerini sinterleme işlemine kıyasla %13 oranında artırmıştır. Sertlikte yaşanan bu artış hem sinterleme sonucu takviye ve matris malzemeleri arasındaki kuvvetli etkileşim hem de SSİSİ ile taneciklerin yönlenmiş olmasına bağlı olarak gelişmiştir. Bu orandan sonra yapılan takviyelerde ise sertlik değeri GNT takviyesinin topaklanası sebebiyle düşmüştür.

- Basma dayanımlarının analizinde ise en yüksek basma dayanımı %0,15 GNT takviyesi yapılmış hibrit kompozitte 560 MPa olarak bulunmuştur.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve GNT tane sınırlarına yerleşmiş ve dislokasyon hareketlerini engellemesi sonucu basma dayanımı artmıştır. Ancak bu değerden sonraki takviye oranlarında basma dayanımı, grafenin topaklanmasına ve grafenin katı yağlayıcılık özelliğine bağlı olarak düşmüştür.
- Yapılan SEM analizlerinde,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve GNT'nin tane sınırlarına homojen bir şekilde yerleştiği tespit edilmiştir. SSİSİ ile sinterlemeye kıyasla taneciklerin arasında daha kuvvetli bağların olduğu ve taneciklerin yönlendirilmiş olduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0,15 GNT takviyesinden sonra, takviye malzemesinin topaklandığı görülmüştür. SEM-EDX element dağılım analizinde ise, grafenin kompozit yapı içerisindeki varlığı ve homojen bir dağılım gösterdiği doğrulanmıştır. Çizgi taraması analizinde, karbon atomlarının tane sınırlarında yoğunluk göstermesiyle grafenin tane sınırlarına yerleştiği doğrulanmıştır.
- Sonuç olarak, belirli bir değere kadar Al2024 alüminyum alaşımına yapılan GNT ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesi ve SSİSİ hibrit yapının mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozit yapıya GNT takviyesi ve SSİSİ sonucu elde edilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Al2024 alüminyum alaşımıyla kıyaslandığında, deneysel yoğunluk değeri %5,8, sertlik değeri ise %32,15 oranında artmıştır. Gözeneklilik oranı ise ~%45 oranında düşmüştür. Hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri Al2024-9 $\text{Si}_3\text{N}_4$  kompozit malzemesi ile kıyaslandığında ise, deneysel yoğunluk değeri %2,63, sertlik değeri ise %15,30 oranında artmıştır. Gözeneklilik oranı ise ~%23 oranında düşmüştür.

#### 7.4. İleride Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu bilimsel çalışmada Al2024 matris malzemesine, karbon esaslı GNT ve seramik bir malzeme olan Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Toz metalürjisi teknikleri kullanılarak Al2024-GNT ve Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeler ile Al2024-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-GNT hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelere SSİSİ uygulanmış, mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Yapılan bu çalışma sonucu olumlu sonuçlar elde edilmiş olup ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Bu çalışmada Al2024 alüminyum alaşımı matris malzeme olarak kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda yine 2xxx serisi diğer alüminyum alaşımları kullanılarak GNT takviyeli kompozit malzemeler üretilip mekanik ve mikro yapı özellikleri incelenebilir.
- Bu çalışmada kompozit malzeme üretimi için toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Aynı kompozit malzemeler mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilip mekanik ve mikroyapı özellikleri kıyaslanabilir.
- Yapılan bu çalışmada Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesi kullanılmış olup ileriki çalışmalarda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yerine farklı bir seramik takviye malzemesi (TiB<sub>2</sub>, BN) kullanılarak GNT takviyeli kompozit malzemeler üretilebilir.
- Üretilen mevcut kompozit malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ve termal iletkenlikleri incelenebilir.
- Toz metalürjisi ile üretilen bu kompozitlerin aşınma davranışları incelenebilir.
- Yapılan başka bir çalışmada elde edilen kompozit malzemelerin korozyon davranışları araştırılabilir.
- Elde edilen kompozitlere yaşlandırma ısıl işlemi uygulanıp mekanik özelliklere etkisi analiz edilebilir.
- Bu çalışmada kompozit malzemelere sinterleme işleminden sonra indüksiyonla sıcak işlem uygulanmıştır. Yapılacak başka bir çalışmada sinterleme işleminden sonra elde edilen malzemelere sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanıp mekanik özellikleri bu çalışma ile kıyaslanabilir.

## KAYNAKLAR

- AbuShanab, W. S., Moustafa, E. B., Ghandourah, E. and Taha, M. A. (2020). Effect of graphene nanoparticles on the physical and mechanical properties of the Al2024-graphene nanocomposites fabricated by powder metallurgy. *Results in Physics* 19. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103343>
- Altınışık, G. (2019). Toz metalürjisi yöntemleri kullanılarak üretilmiş Fe katkılı NiTi şekil hafızalı alaşımın karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, Ankara
- Altıparmak, N. (2009). Alken epoksidasyonu katalizörlerinin hazırlanması ve etkinliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 127, İstanbul.
- Ayata, A. (2014). Toz metal alüminyum malzemelerin mikro dalga enerjisi ile sinterebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, Ankara
- Babayev, Y. (2007). Bir kompresör gövdesi imalatının toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri uygulanarak optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, 127, İzmir.
- Bağcı, C. (2007). Sepiyolitten silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) tipi teknolojik seramik malzeme üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 129, Ankara.
- Başer, T. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makine*. 53(635). 51-58.
- Bayar, H. (2009). SiC<sub>p</sub> Takviye etial 171(AlSiMg10) alüminyum alaşım matrisli kompozitten basınçlı pres döküm yöntemiyle parça üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 105, Ankara.
- Baydemir, E., (2018). Sıcak presleme yöntemi ile üretilen AA6061 matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 80, Denizli
- Bilir, H. (2014). Al/SiC kompozitlerin karıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 123, Kırıkkale.
- Boppana, S. B., Dayanand, S., Kumar, A., Kumar, V. and Aravinda, T. (2020). Synthesis and characterization of nano graphene and ZrO<sub>2</sub> reinforced Al 6061 metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(4). 7354-7362. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.013>
- Boz, M. (1999). Toz metalürjisi ile üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 98, Ankara.
- Bozkurt, D. (2019). Silisyum nitrür esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 94, İstanbul.
- Callister, W.D. and Rethwisch, D. G. (2010). *Materials science and engineering*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık

- Canaran, M. (2002). Mekanik alaşımlamanın volfram ağır alaşımlarının yüksek sıcaklık sinterleme davranışlarına olan etkilerini incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, İstanbul
- Chavla, N. and Chavla, K.K. (2006). Metal matrix composites, Springer Science Business Media, Inc., Boston.
- Chen, L., Qi, Y., Fei, Y., Liu, Y. and Du, Z. (2020). GNP-reinforced Al<sub>2024</sub> composite fabricated through powder semi-solid processing. Mater. Trans. 61(7). 1239-1246. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020039>.
- Cilasun, N., S. (2013). Karıştırmalı döküm yöntemi ile SiC takviyeli Al esaslı kompozit üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 100, Kırıkkale.
- Çakır, Ç. (2007). Toz metal alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 103, Ankara.
- Çelebi, C. (2013). Bakır esaslı kompozit malzeme üretimi ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 90, Trabzon.
- Dengiz, Ö., E. (2018). Grafen takviyeli magnezyum kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, Samsun.
- Deniz, M. E. (2005). Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısı ile presleme tekniğini kullanarak kompozit bir malzeme üretecek düzeneğin tasarım ve imalatı. Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 105, Şanlıurfa.
- Dieter, G. E. (1961). Mechanical metallurgy. USA: McGraw-Hill book company.
- Ekici, R. (2004). Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 114, Kayseri.
- Elibol, Ç. (2020). Eş kanallı açılmalık pres (EKAP) yöntemi ile şekillendirilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri ve makroskobik deformasyon davranışı arasındaki ilişki. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(4) , 672-682.
- German, R.M. (2007). Toz metalürjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri (Çev. N. Durlu, S. Sarıtaş, M. Türker). Türk Toz Metalürjisi Derneği Yayınları. Ankara
- Gökçe, A. Fındık, F. Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve alaşımlarının toz metalürjisi işlemleri, Mühendis ve Makine. 58(686). 21-27.
- Gültaş, A. (1998). Aşınma deney aparatının tasarımı, üretimi ve metal matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 99, Ankara.
- Günay, M. (2009). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiC<sub>p</sub> kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 209, Ankara.
- Gürbüz, M., Can Şenel, M., Koç, E. (2018). The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites. Journal of Composite Materials. 52(4). 553-563. <https://doi.org/10.1177/0021998317740200>

- Gürbüz, M., Gençoğlu, O., Durmuş, A., Kolbakır, F., Pekşen, C., Üreyen, M. E., Koparal, A. S. ve Doğan, A. (2010). Kompozit Malzemeler ve Nano Boyutlu Antibakteriyel Seramik Toz Katkılı Kompozitlerin Havacılık Sektöründe Kullanımı, III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 16-18 Eylül, Eskişehir, Türkiye
- Hiçyılmaz, N. (1999). Toz metalürjisi yöntemleri ile üretilen seramik tanecik destekleyicili alüminyum esaslı tanecikli kompozit malzemelerin aşınma özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 143, Ankara.
- Jagdish, B. S. (2015). Synthesis and characterisation of aluminium 2024 and graphene metal matrix composites by powder metallurgy means. SSRG Int. J. Mech. Eng. 2(7). 13-17.
- Kalaycıoğlu, A. S. (2010). SiC tane katkıli alüminyum kompozitlerin toz metalürjisi ile üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, İzmir.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış, Putech & Composites, 22. 18-30
- Karademir, İ. (2013). SiO<sub>2</sub> takviyeli etial 21 esaslı kompozit malzemelerin basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 88, Bartın.
- Karadeniz, E. (1989). Elyaf takviyeli plastik kompozitlerin mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 78, İstanbul.
- Karakoç, H. (2020). Toz metal Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. Politeknik Dergisi, 23(4). 1141-1151. DOI: 10.2339/politeknik.585813
- Karaman, Y. (2011). Toz metalürjisi ile MgO takviyeli Al esaslı kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, Kırıkkale.
- Katmer, H. (2019). Karbon nanotüp (KNT) ve grafen takviyeli bakır matrisli nanohibrit kompozitlerin üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı, 74, Mersin
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. Putech & Composite.
- Kaykılarlı, C. (2018). Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen grafen katkıli Al-Cu alaşımının sertlik ve aşınma değerlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 81, İstanbul.
- Kevenlik, O. F. (2013). Toz metalürjisi yöntemi ile SiC takviyeli Al 2014 esaslı kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 135, Kırıkkale.
- Kılıç, E. F. (2007). Alüminyum alaşımlı SiC parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle ve aşınma davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 93, Ankara.
- Kılıçkap, E. (2003). Al Si7 Mg2/SiCp metal matrisli kompozitlerin talaşlı işlenmesinin araştırılması. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 279, Elazığ.

- Koçanaoğulları, S. (2010). Demir esaslı toz metalürjisi ile üretilmiş parçalarda alüminyum kaplamanın yüzey özelliklerine etkisi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 87, Manisa.
- Kumar, L. K., Sripad Kulkani, s., Deepu, J. N., Subramani, N. And Sivaprakash, K. (2020). Investigation of mechanical & corrosion properties of graphene, R-glass fiber reinforced Aluminium 2024 hybrid composites. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.036>
- Matik, U. (2003). Toz metalürjisi ile üretilmiş demir esaslı parçaların akımsız nikel kaplanabilirliği ve yorulma dayanımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Kara Elmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 116, Zonguldak
- Mısırlı, C. (2006). Yanal ekstrüzyon ile dişli benzeri parçaların imalatı: Analiz ve deneyler. Doktora Tezi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 123, Edirne.
- Mohanavel, V., Ashraff, A., Prasath, S., Sathish, T. and Ravichandran, M. (2020). Microstructural and tribological characteristics of AA6351/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites manufactured by stir casting. Journal of Materials Research and Technology. 9(6). 14662-14672. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.128>
- Mutlu, Y. (2019). AA2024 matrisli B<sub>4</sub>C-SiC ve B<sub>4</sub>C-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 219, Manisa.
- Mutuk, T. and Gürbüz, M. (2019). Fabricating Graphene-Titanium (<30µm) composites by powder metallurgy method: Microstructure and mechanical properties . Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(2). 89-97. <https://doi.org/10.29130/dubited.467622>
- Omidi, Z., Bakhshi, S. R. and Ghasemi, A. (2014). Evaluation of processing parameters effects on the formation of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> wires synthesized by means of ball milling and nitridation route. Advanced Powder Technology. 25(6). 1667-1671. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.06.009>
- Özay, Ç. (2004). Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Cu-C-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> kompozitinin abrasiv aşınma dayanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, 88, Elazığ.
- Özay, Ç. ve Haşçalık, A. (2004). T/M yöntemi ile üretilen Cu-C-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> kompozitinin abrasif aşınma dayanımı. DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. (006). 175-184. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpufbed/issue/36238/409747>
- Öztop, B. (2017). Atık alüminyum kullanılarak grafen ve silisyum nitrür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, Samsun.
- Öztop, B. ve Gürbüz, M. (2017). Atık alüminyumdan elde edilen matrisle grafen takviyesiyle üretilen kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 1(1). 4-8.
- Polat, S. (2020). Alüminyum matrisli farklı seramik takviyeli kompozitlere grafen ilavesinin termal ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 153, Karabük.
- Pul, M. (2010). Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, 210, Ankara.

- Pul, M. (2019). Karbon nanotüp (CNT) ve nano grafen (G) takviyeli Al 2024 kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretilerek aşınma ve işlenebilme özelliklerinin incelenmesi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi. 11(1). <https://doi.org/10.29137/umagd.493868>
- Raghavendra Rao, P. S. and Mohan, C. B. (2020). Study on mechanical performance of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. Materials Today: Proceedings. 33(8). 5534-5538. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.495>.
- Ramu, S., Hari Kiran Reddy, R., Kunaal Kumar, B., Padmanathan, T. and Phanibhushana, M. V. (2021). Investigation of wear characteristics of Al6061-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites subjected to strain hardening through equal channel angular pressing. Materialstoday:Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.765> (in press).
- Reddy, V. K. and Chennakesava Reddy, A. (2012). Influence of Matrix Alloy and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanoparticle on Wear Characteristics of Aluminum Alloy Composites. 4th International Conference on Modern Materials and Manufacturing. Chennai. India
- Sahoo, S., Dhibar, S., Hatui, G., Bhattacharya, P. and Das, C. K. (2013). Graphene/polypyrrole nanofiber nanocomposite as electrode material for electrochemical supercapacitor. Polymer. 54(3). 1033-1042. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.12.042>
- Sayın, E. (2020). Grafen-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli Tİ6Al4V matrisli hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 97, Samsun.
- Sharma, P., Sharma, S. and Khanduja, D. (2015). Production and some properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced aluminium alloy composites. Journal of Asian Ceramic. 3(3). 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.07.002>
- Shin, S. E. and Bae, D. H. (2015). Deformation behavior of aluminum alloy matrix composites reinforced with few-layer graphene. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 78. 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.001>
- Shingh, P. K. (2021). Mechanical characterization of graphene-aluminum nanocomposites. Materials Today: Proceedings. 44(1). 2304-2308. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.395>
- Song, y., Yu, J., Yu, L., Alam, F., Dai, W., Li, C. and Jiang, N. (2015). Enhancing the thermal, electrical, and mechanical properties of silicone rubber by addition of graphene nanoplatelets. Materials & Design. 88. 950-957. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.064>
- Subaşı, M. ve Karataş, Ç. (2012). titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme. politeknik Dergisi. 15(2). 87-103.
- Sur, G. (2002). Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitim Anabilim Dalı, 148, Ankara.
- Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. Mühendis ve Makine. 56(669). 36-47.
- Şenel, M. C. (2018). Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi yoluyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 164, Samsun.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2018a). Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets. Materials Science and Technology. 34(16). 1980-1989. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1501839>

- Şenel, M., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018b). Toz metalürjisi metoduyla üretilen Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makine*. 59(693). 33-46. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/48384/612874>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. and Koç, E. (2019). Fabrication and characterization of aluminum hybrid composites reinforced with silicon nitride/graphene nanoplatelet binary particles. *Journal of Composite Materials*. 53(28–30). 4043–4054. <https://doi.org/10.1177/0021998319853329>
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020a). Investigation on mechanical properties and microstructure of B<sub>4</sub>C/graphene binary particles reinforced aluminum hybrid composites. *Met. Mater. Int.* <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00592-w>
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020b). Microstructure and wear behaviour of graphene–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> binary particle-reinforced aluminium hybrid composites. *Bulletin of Materials Science*. 43(148). <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02124-4>
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2020c). The influence of particle size and reinforcement rate of B<sub>4</sub>C on mechanical and microstructure properties of Al-B<sub>4</sub>C composites. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(3), 1864-1876. <https://doi.org/10.29130/dubited.683876>
- Şenel, M. C. and Gürbüz, M. (2021). Investigation on mechanical properties and microstructures of aluminum hybrid composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GNPs binary particles. *Arch. Metall. Mater.* 66(1). 97-106. DOI: 10.24425/amm.2021.134764
- Ürer, A. (2009). Mg-SiO<sub>2</sub> metal matrisli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 91, Kütahya.
- Varol, T. (2012). AA2024 matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 192, Trabzon.
- Vinothkumar, H., Saravanakumar, S., Ramesh, C., Prakash, P., Ragul Vignesh, A. and Naveen, S. (2020). Investigation on Al2024 with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and AlN composites using friction stir processing. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.683>
- Wang, F., Qin, X., Jin, G., Wang, Y. and Guo, X. (2008). Synthesis and characterization of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> thin nanobelts via direct nitridation of Si powders. *Physica E: low-dimensional Systems and Nanostructures*. 41(1). 120-123. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2008.06.019>
- Wu, Z., Zhang, Z., Yun, J., Yan, J. and You, T. (2013). Synthesis of α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> crystallon by a solvothermal method at a low temperature of 180°C. *Physica B: Condensed Matter*. 428(1). 10-13. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.07.001>
- Xiu, Z., Chen, G., Liu, Y., Yang, W. and Wu, G. (2009). Effects of extrusion deformation on mechanical properties of sub-micron Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/2024 composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 19(2). 373-377. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60072-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60072-6)
- Xiu, Z., Chen, G., Wu, G., Yang, W. and Liu, Y. (2011). Effect of volume fraction on microstructure and mechanical properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al composites, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 21(2). 285-289. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61592-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61592-6)
- Yaşar, A. (2012). Mekanik metalürji yöntemi ile metal (matriks) esaslı kompozit malzeme üretimi (MEK). Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 89, Ankara.

Yılmaz, T. A. (2013). AA2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrisli kompozitin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve yaşlandırılabilme özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 88, Ankara.

Zhu, Y. (2014). Processing of metallic materials. 27, North Carolina: NC State University



