

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC NANOKOMPOZİT VE HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN**  
**ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malz. Müh. Abdullah Hasan KARABACAK**

**Ocak 2018**  
**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC NANOKOMPOZİT VE HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN**  
**ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Abdullah Hasan KARABACAK**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİS"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:27.12.2017**  
**Tezin Savunma Tarihi:11.01.2018**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI**

**Trabzon 2018**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Abdullah Hasan KARABACAK tarafından hazırlanan

A12024/B<sub>4</sub>C/SiC NANOKOMPOZİT VE HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN  
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

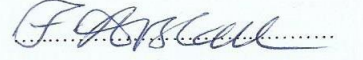


başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 / 12 / 2017 gün ve 1733 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Üye : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Alüminyum matrisli kompozitler, yüksek spesifik mukavemet ve tokluk, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme özelliği, düşük termal genleşme derecesi ve korozyon ve yüksek aşınma direnci gibi önemli özelliklere sahip kompozit malzemelerdir. Nanokompozitler, tane boyutlarının fazlasıyla küçük olmasından ötürü, büyük boyutlu taneli malzemelerle karşılaştırılma olmayacak şekilde iyi ve değişik özelliklere sahiptirler. Bu özellikler ise; sertlik, yüksek mukavemet, gelişmiş tokluk ve süneklik, yüksek difüzyon kabiliyeti, düşük elastisite modülü, düşük yoğunluk, yüksek kullanım sıcaklığı, yüksek elektrik direnci, düşük ısı iletkenlik, üstün manyetik özellikler ve yüksek termal genlik olarak örneklendirilebilir.

Bu çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımına nano boyutlu B<sub>4</sub>C ve SiC tozları hem ayrı ayrı hem de birlikte ilave edilerek sabit bir mekanik alaşımlama süresi ile nano kompozit ve hibrit nano kompozit tozları hazırlanarak yapılacak olan testlere uygun numuneler sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen numunelere eğme, çekme mukavemeti testleri, sertlik testleri, yoğunluk ölçümleri ve korozyon testleri uygulanmıştır ve eğme ve çekme testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri, korozyon yüzeyleri ve mikroyapılar taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Bu kapsamda, takviye oranlarının malzemenin mekanik ve korozyon davranışlarına etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı adı altında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Doktora çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile önümü açan danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yaptığım çalışmalarda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Yrd. Doç.Dr. Temel VAROL, Yrd. Doç. Dr. Fatih ERDEMİR ve Dr. Hüseyin İPEK, Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA, Arş. Gör. Onur GÜLER, Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak bana maddi manevi hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve hep yanımda bulunan aileme ve eşime teşekkür ederim.

Abdullah Hasan KARABACAK

Trabzon 2018

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC Nanokompozit ve Hibrit Nanokompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11.01.2018.

Abdullah Hasan KARABACAK

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	iii
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET .....	viii
SUMMARY .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xv
SEMBOLLER DİZİNİ .....	xvi
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kompozit Malzemeler .....	3
1.3 Metal Matrisli Kompozitler .....	5
1.3.1 Metal Matris Kompozitler İçin Kullanılan Matris Malzemeleri .....	6
1.3.1.1. Alüminyum Matrisli Kompozitler .....	6
1.3.2. Metal Matris Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri .....	7
1.3.2.1. Bor Karbür (B <sub>4</sub> C) .....	8
1.3.2.2. Silisyum Karbür (SiC).....	9
1.3.2.3. Takviye Fazın Islatabilirliği.....	9
1.4. Nanoteknoloji .....	10
1.4.1. Nanokompozitler .....	11
1.5. Toz Metalurjisi .....	12
1.5.1. Metal Tozların Üretimi.....	14
1.5.2 Tozların Karıştırılması.....	16
1.5.3. Tozların Preslenmesi .....	17
1.5.4. Sinterleme İşlemi.....	18
1.6. Mekanik Alaşımlama.....	19
1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
2.1. Malzeme .....	27

2.2.	Malzeme Bileşimleri.....	28
2.3.	Mekanik Alaşımama.....	29
2.4.	Parçacık Boyutu.....	30
2.5.	Presleme .....	31
2.6.	Metalografik İşlemler .....	31
2.7.	Mekanik ve Fiziksel Testler .....	34
2.7.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini .....	34
2.7.2.	Eğme ve Çekme Mukavemeti Testleri .....	35
2.7.3.	Sertlik Testleri .....	35
2.8.	Korozyon Testleri .....	36
3.	BULGULAR .....	38
3.1.	Toz Karakterizasyonu.....	38
3.1.1.	Toz Morfolojisi.....	38
3.1.2.	Öğütme Süresi ile Toz Morfolojilerinin Değişimi .....	39
3.1.2.1.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C Nano Kompozit Tozları .....	42
3.1.2.2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC Nano Kompozit Tozları.....	44
3.1.2.3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC Nano Kompozit Tozları.....	46
3.1.3.	Partikül Boyutu.....	47
3.2.	Üretilen Kompozitlerin İç Yapı İncelemeleri.....	50
3.2.1.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Alaşımının İç Yapı Görüntüleri.....	50
3.2.2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri.....	51
3.2.3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri .....	54
3.2.4.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC Hibrit Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri.....	57
3.3.	Üretilen Kompozitlerin XRD Analizleri .....	62
3.4.	Üretilen Kompozitlerin Özellikleri.....	64
3.4.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik.....	64
3.4.2.	Sertlik Değerleri .....	66
3.4.3.	Üç Nokta Eğme Mukavemeti Testleri .....	67
3.4.3.1.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Numunesinin Kırılma Yüzeyi.....	69
3.4.3.2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	70
3.4.3.3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri.....	72
3.4.3.4.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	74

3.4.4.	Çekme Mukavemeti Testleri .....	75
3.4.4.1.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Numunesinin Kırılma Yüzeyi.....	77
3.4.4.2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	78
3.4.4.3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri.....	80
3.4.4.4.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C- SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	82
3.4.5.	Korozyon Testleri .....	83
3.4.5.1.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi .....	89
3.4.5.2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi.....	89
3.4.5.3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi .....	91
3.4.5.4.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C Hibrit Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi.....	93
4.	TARTIŞMA.....	96
5.	SONUÇLAR.....	99
6.	ÖNERİLER .....	101
7.	KAYNAKLAR.....	102
ÖZGEÇMİŞ		



ÖZET

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC NANOKOMPOZİT VE HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ  
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullah Hasan KARABACAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı  
Danışman: Doç.Dr. Aykut ÇANAKÇI  
2018, 110 Sayfa

Bu çalışmada, üretim yöntemi olarak toz metalurjisi kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nanokompozitleri ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nanokompozitleri üretildi. Matris malzemesi olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunun ortalama partikül boyutu 50µm olup, içerisine ortalama partikül boyutu 45-55nm olan B<sub>4</sub>C ve 40nm olan SiC partikülleri öğütme işlemi kullanılarak takviye edildi. Takviye oranları olarak 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 ve 5.0 kullanılarak, öğütme işlemi 8 saat olarak gerçekleştirildi. Öğütme işleminden sonra tozların partikül boyutu ve mikroyapısal incelemelerinde B<sub>4</sub>C, SiC ve B<sub>4</sub>C-SiC hibrit partiküllerinin homojen olarak dağıldığı görüldü. Öğütülen tozlar sıcak presleme yöntemiyle preslenerek nano kompozitler ve hibrit nano kompozitler üretildi. Üretilen nano kompozitlerin mikroyapı özellikleri (SEM ve XRD analizleri), mekanik özellikleri (eğme, çekme ve sertlik testleri) ve korozyon özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nano kompozitlerinin hepsinde en iyi eğme ve çekme deneyi sonucu %2 takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara faz miktarlarının eğme ve çekme mukavemetlerini etkileyen önemli bir etken olduğu görüldü. Brinell sertlik değerleri ise artan takviye oranıyla arttığı artmıştır. Kompozitlerin korozyon hızları ise artan takviye oranı ile artmış fakat %1.5 takviye oranından sonra korozyon hızında sürekli düşüş gerçekleşip en düşük korozyon hızı %5 takviye oranında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelime:** Toz Metalurjisi, Mekanik Alaşımlama, Nano Kompozit, B<sub>4</sub>C, Korozyon Hibrit Nano Kompozit, SiC

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION AND INVESTIGATION PROPERTIES OF Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC  
NANOCOMPOSITE AND HYBRID NANOCOMPOSITES

Abdullah Hasan KARABACAK

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Aykut ÇANAKÇI  
2018, 110 Pages

In this study, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiC nano composites and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C-SiC hybrid nano composites were produced using powder metallurgy production method. The average particle size of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder used as the matrix material was 50 µm, and the B<sub>4</sub>C having a mean particle size of 45-55 nm and the SiC particles having a 40 nm particle size were reinforced by milling. Milling was carried out for 8 hours using 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 and 5.0 as reinforcement ratios. After milling, it was observed that B<sub>4</sub>C, SiC and B<sub>4</sub>C-SiC hybrid particles were homogeneously dispersed in the particle size and microstructural investigations of the powders. Milling powders were pressed by hot pressing method to produce nano composites and hybrid nano composites. Microstructure properties (SEM and XRD analysis), mechanical properties (bending, tensile and hardness tests) and corrosion properties of the produced nanocomposites were determined. In the obtained test results, the best bending and tensile tests were obtained from 2% reinforced composites in all Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C-SiC nanocomposites. Al<sub>2</sub>Cu and Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> were found to be important factors affecting the bending and tensile strengths of the interphase amounts. Brinell hardness values increased with increasing reinforcement ratio. Corrosion rates of the composites increased with increasing reinforcement ratio, but after 1.5% reinforcement, there was a continuous decrease in corrosion rate and the lowest corrosion rate was obtained at 5% reinforcement.

**Keywords:** Powder Metallurgy, Mechanic Alloying, Nano Composite, Corrosion, B<sub>4</sub>C, Hybrid Nano Composite, SiC

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tüm kompozit malzemelerin, yapısına katılan takviye malzemesine göre sınıflandırılması. ....	4
Şekil 1.2. Takviye elemanının şekline göre kompozit türleri.....	5
Şekil 1.3. B <sub>4</sub> C Yapısı.....	8
Şekil 1.4. SiC Yapısı .....	9
Şekil 1.5. Sıvı damlasının katı yüzey ile arasındaki temas açısı ölçümü .....	10
Şekil 1.6. Nano kompozitlerin mikroyapıya bağlı olarak sınıflandırılması a)taneler arası b)tane içi c)hibrit d)nano-nano yapılar .....	11
Şekil 1.7. Toz metalurjisi yönteminin akış şeması .....	13
Şekil 1.8. Gaz atomizasyon yöntemi .....	15
Şekil 1.9. Bilyalı Öğütücü. ....	16
Şekil 1.10. TM’de preslemenin aşamaları .....	17
Şekil 1.11. Sinterleme sırasında oluşan olayların şematik gösterimi .....	19
Şekil 1.12. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması .....	20
Şekil 1.13. Mekanik alaşımlama da başlangıç tozlarında meydana gelendeformasyon.....	21
Şekil 1.14. Fritsch Pulverizatör 5 gezegen tipi değirmen.....	24
Şekil 2.1. Elek Ünitesi .....	27
Şekil 2.2. Deneysel çalışmanın akış şeması .....	29
Şekil 2.3. Öğütme elemanları .....	30
Şekil 2.4. Parçacık boyutu ölçüm cihazı .....	30
Şekil 2.5. Sıcak pres cihazı (a), pres cihazı içerisindeki fırın.....	31
Şekil 2.6. (a) Kesme Cihazı (b) Bakalit Cihazı (c) Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı .....	32
Şekil 2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	33

Şekil 2.8. X ışınları analizi cihazı.....	33
Şekil 2.9. Üretilen (a) eğme ve (b) çekme numuneleri.....	34
Şekil 2.10. MTS 45 model universal eğme ve çekme cihazı.....	35
Şekil 2.11. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı .....	36
Şekil 2.12. Gamry marka korozyon test cihazı.....	37
Şekil 2.13. Korozyon testleri için hazırlanmış numune şematik resmi .....	37
Şekil 3.1. Yapılan çalışmada kullanılan başlangıç tozlarının morfolojileri, .....	38
Şekil 3.2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 1 saat öğütme sonrası. ....	39
Şekil 3.3. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 2 saat öğütme sonrası. ....	40
Şekil 3.4. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 4 saat öğütme sonrası .....	40
Şekil 3.5. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 8 saat öğütme sonrası .....	41
Şekil 3.6. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 10 saat öğütme sonrası. ....	41
Şekil 3.7. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri .....	42
Şekil 3.8. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri .....	44
Şekil 3.9. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri.....	46
Şekil 3.10. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> başlangıç tozlarının partikül boyutu analiz sonucu .....	48
Şekil 3.11. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi .....	48
Şekil 3.12. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi .....	49
Şekil 3.13. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi .....	49
Şekil 3.14. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alaşım numunesinin mikroyapısı .....	50
Şekil 3.15. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alaşım numunesinin bakır ağırlıklı bölgesinden	

nokta analizi .....	50
Şekil 3.16. Sinterlenmiş saf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alaşım numunesinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	51
Şekil 3.17. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri,.....	51
Şekil 3.18. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi .....	53
Şekil 3.19. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	54
Şekil 3.20. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri .....	54
Şekil 3.21. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiC nano kompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	56
Şekil 3.22. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiC nano kompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	57
Şekil 3.23. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri .....	57
Şekil 3.24. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC nanokompozitinin SiC ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	59
Şekil 3.25. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nanokompozitinin B <sub>4</sub> C ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	60
Şekil 3.26. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC nanokompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	60
Şekil 3.27. Sinterlenmiş Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC nanokompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi.....	61
Şekil 3.28. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozit numunelerin XRD analizi .....	62
Şekil 3.29. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozit numunelerin XRD analizi.....	63
Şekil 3.30. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC nano kompozit numunelerin XRD analizi	
Şekil 3.31. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC kompozitlerin ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi.....	65
Şekil 3.32. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC kompozitlerin ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin gözeneklilik oranının takviye oranı ile değişimi .....	66

Şekil 3.33. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC kompozitlerin ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin sertliklerinin takviye oranı ile değişimi .....	67
Şekil 3.34. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC kompozitlerin ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin eğme mukavemeti değerlerinin takviye oranı ile değişimi.....	69
Şekil 3.35. Saf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> numunesinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi.....	69
Şekil 3.36. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri .....	70
Şekil 3.37. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri .....	72
Şekil 3.38. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri, .....	74
Şekil 3.39. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC kompozitlerin ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin takviye oranı ile değişimi .....	76
Şekil 3.40. Saf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> numunesinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi .....	77
Şekil 3.41. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri .....	78
Şekil 3.42. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri .....	80
Şekil 3.43. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri.....	82
Şekil 3.44. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel eğrileri...	85
Şekil 3.45. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel eğrileri ...	86
Şekil 3.46. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel eğrileri.....	87
Şekil 3.47. Saf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> numunesinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyi .....	89
Şekil 3.48. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona	

uğrayan yzeyleri .....	89
Şekil 3.49. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yzeyleri .....	91
Şekil 3.50. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>4</sub> C-SiC hibrit nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yzeyleri .....	93



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarında simgeleme dizini, alaşım elementlerinin katılma ve oda sıcaklığında çözünürlükleri. ....	7
Tablo 1.2. Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri ve özellikleri. ....	8
Tablo 2.1. Al2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi (% ağı.) ....	27
Tablo 2.2. Kompozitlerin bileşimleri ve adlandırılmaları ....	28
Tablo 3.1. Al2024/B <sub>4</sub> C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/B <sub>4</sub> C-SiC hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	65
Tablo 3.2. Al2024/B <sub>4</sub> C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin sertlik değerleri.....	67
Tablo 3.3. Al2024/B <sub>4</sub> C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin eğme mukavemeti değerleri .....	68
Tablo 3.4. Al2024/B <sub>4</sub> C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri .....	76
Tablo 3.5. Al2024/B <sub>4</sub> C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B <sub>4</sub> C hibrit kompozitlerin korozyon testleri sonucu E <sub>kor</sub> , I <sub>kor</sub> ve Korozyon hızı değerleri...	84



## SEMBOLLER DİZİNİ

MMK	: Metal matris kompozit
TM	: Toz Metalurjisi
MA	: Mekanik Alaşımlama
Al	: Alüminyum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışınları difraktometresi
MPa	: Mega paskal
nm	: Nanometre
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
HV	: Vickers sertlik değeri
BSD	: Brinell sertlik değeri

# 1. GENELBİLGİLER

## 1.1. Giriş

Kompozit malzemeler teknolojik problemleri çözmek için uzun zamandır kullanılıyor fakat kompozit malzemeler, polimer içerikli kompozitlerin endüstride kullanılmaya başlandığı 1960'larda, endüstrinin ilgisini çekmeye başladı [1]. O yıllardan sonra kompozit malzemeler genel bir mühendislik malzemesi olarak kabul edilip ve tasarlanıp otomotiv, uzay araçları, spor malzemeleri, petrol endüstrileri ve denizcilik gibi birçok uygulama alanlarında yer edinmiştir [2]. Kompozit malzemeler yapısında kullanılan matris ve takviye malzemelerine göre sınıflandırılmakla beraber en önemli kompozit türlerinden biri Metal Matrisli Kompozitler (MMK)'dir [3]. MMK'ler yüksek mukavemeti, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta çalışabilme, mükemmel ısıl iletkenlik, kolay şekil alabilme kabiliyeti, yakıt ürünleri ve çözücülere karşı minimum etkilenme ve yanmazlık özelliklerine sahiptirler. Alüminyum, magnezyum veya titanyum gibi hafif metal alaşımlarına, yüksek dayanımlı seramik malzemelerin takviye edilmesiyle MMK'ler elde edilir. Metal matrisli kompozit kullanılarak tek fazlı malzemelerin üretilmesiyle çok üstün özellikte malzeme ortaya çıkması mümkündür [4].

Alüminyum esaslı MMK'ler, iyi aşınma direnci ve yorulma, yüksek elastiklik modülü ve dayanım, düşük yoğunluk özellikleriyle otomotiv, savunma, havacılık ve uzay gibi alanlarda gelişmiş mühendislik malzemesi olarak tercih edilmektedir [5]. Alüminyum esaslı MMK'lere, genellikle  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  gibi seramik takviye malzemeleri katılarak kompozitlerin yapısı güçlendirilir [6]. Sahip olduğu mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ülkemizin sahip olduğu zengin bor kaynakları ile seramikler arasında  $B_4C$  göze çarpmaktadır. Buna ek olarak son zamanlarda alüminyum esaslı  $SiC$  takviyeli kompozitlerin kullanımında da artışlar görülmüştür [4,7].

MMK'lerin yukarıdaki gibi söz edilen üstün özelliklerine ulaşabilmek için matris ve takviye elemanı arasındaki uyum ve kompozitlerin üretim yöntemi dikkat edilmesi gereken önemli bir unsur olmaktadır. Ara yüzey bağı vasıtasıyla, yükün, matristen takviyeye iletilmesi sağlanır. Bu sebepten dolayı matris ve takviye elemanı sınırlarındaki ara yüzey bağlantısının çok iyi olması mecburidir. Ara yüzey bağlantısının iyi olması, matrisin ıslatabilirlik özelliğine ve çiftlerin uyumuna bağlıdır [8]. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde birçok yöntem kullanılmasına rağmen hepsi esasında katı ve sıvı

faz yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. İki yöntemde de kendine özel üstünlükleri olmasına ek olarak matris içerisine takviye elemanının, mekanik alaşımlama yöntemi ile homojen dağılımını sağlayarak MMK'lerin üretiminde katı faz yöntemini diğer yönteme göre bir adım öne çıkarmaktadır [9].

Mekanik alaşımlama işleminde tozlar bilyeli değirmen içerisinde, bilye-toz-değirmen ve bilye-toz-bilye çarpışmalarına maruz kalıp, sürekli kırılma ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanmasını içeren katı faz işlemidir. Yapılan bu işlemde, takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen dağıtılmasına, tane boyutunun küçültülmesine, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına, katı çözünürlüğünün artırılmasına imkân sağlar [10].

Ortak bir metal matristen oluşan, iki veya daha fazla takviye türü içeren kompozit malzemelere hibrit MMK malzemeler denir. Hibrit kompozit malzemelere bir başka deyişle iki fonksiyonlu kompozitler de denir. Bu malzemeler kullanılmadan önce özelliklerinin daha iyi sonuçlar elde etmek için optimize edilmesi gerekir. Bir örnekle anlatmak gerekirse, yüksek sıcaklıkta kullanılacak olan bir malzeme düşünelim; ilk olarak o malzemenin, hem uzun süre kullanılabilme özelliğine sahip olması aynı zamanda yüksek sıcaklıkta kullanım esnasında yük taşıyabilme yeteneğinin iyi olması gerekir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak malzemeye yüksek mukavemet kazandırılması daha sonra ise bu kazandırılan mukavemeti malzemenin kaybetmemesi beklenir. Beklenen bu durumun yapılabilmesi için mikro yapısı iki işlevli üretilmelidir. Hibrit kompozitlerin üretilme amacı, istenilen tasarıma uygun, malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için herhangi bir bileşenin yetersiz veya olumsuz yönlerini farklı bir bileşenle dengelemektir. Örneğin; yüksek ısı iletimi istenen bir bölgede ve aynı zamanda aşınma ortamında çalışan bir MMK malzemesi kullanılmak istenirse, bu malzemenin yüzey ısınmasını, buna bağlı olarak oksitlenmesini ve yük taşıma kabiliyetinin ortadan kalkmasını engellemek gerekir. Bunun için en etkili yöntemlerden biri metal içerisine, hem yük taşıma kabiliyetini arttıran bir takviye fazı hem de sürtünmeyi azaltacak bir bileşen ilave etmektir. Bütün bu durumlar değerlendirildiğinde, bir alüminyum alaşımına hem SiC hem de grafit partikülleri ilave etme en kullanışlı ve elverişli bir mikro yapı ve malzeme özelliği ortaya çıkaracaktır [11].

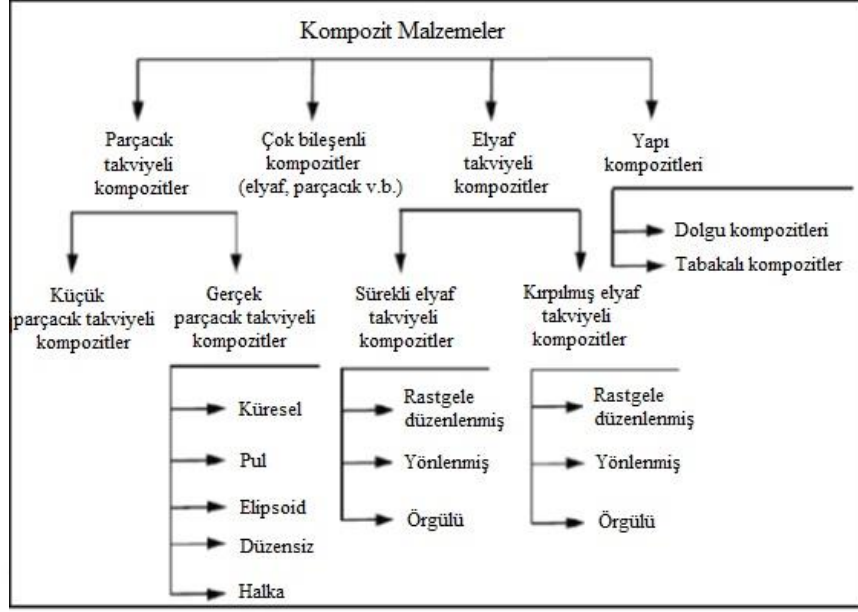
## 1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, şekilleri ve kimyasal bileşimleriyle birbirinden ayrılmış ve birbiri içerisinde hiçbir biçimde çözünmeyen, iki veya daha fazla mikro veya makro bileşenin birleşimiyle veya karışımı ile meydana gelen malzemelerdir [12]. Bir diğer deyişle, kompozit malzemeler, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin iyi özelliklerini tek ve yeni malzemede toplamak amacı ile, birbirlerinden farklı malzeme kompozisyonuna ve/veya şekline sahip ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla makro bileşenin birleşmesinden veya karışımından elde edilmektedir [13].

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre üstün özellikleri [14];

- a) Düşük yoğunluklara sahip olmalarına rağmen yüksek dayanım sergilemeleri,
- b) Kendisini oluşturan malzemelerin yük paylaşımı,
- c) İstenen mekanik özelliklere göre çeşitli kombinasyonlarda üretilebilme kolaylığı,
- d) Isıl ve elektriksel iletkenlik, yorulma, tokluk, sürünme, yüksek sıcaklıkta göstermiş olduğu kararlılık özellikleri yönünden geleneksel malzemelere oranla daha iyi özellik sergilemeleri, olarak tanımlanabilir.

Kompozit malzemeler farklı kriterler esas alınarak sınıflandırılabilir. Doğal ve yapay olmasına göre doğal kompozitler ( kas, deri, kemik, ağaç vb.) ve yapay kompozitler ( karbon-karbon, kevlar-epoksi, cam elyaf takviyeli vb.) olarak sınıflandırılır. Kompozitin temel yapısını oluşturan matris malzemesine göre sınıflandırma yapılırsa, metal, seramik ve plastik (polimer) matrisli kompozit malzemeler diye yapılır. Fakat uygulamada en yaygın olarak yapılan sınıflandırma ise kompozite iyi özellikler kazandıran takviye malzemesine göre yapılır [15]. Bu sınıflandırma ise Şekil 1.1.'de gösterilmiştir.

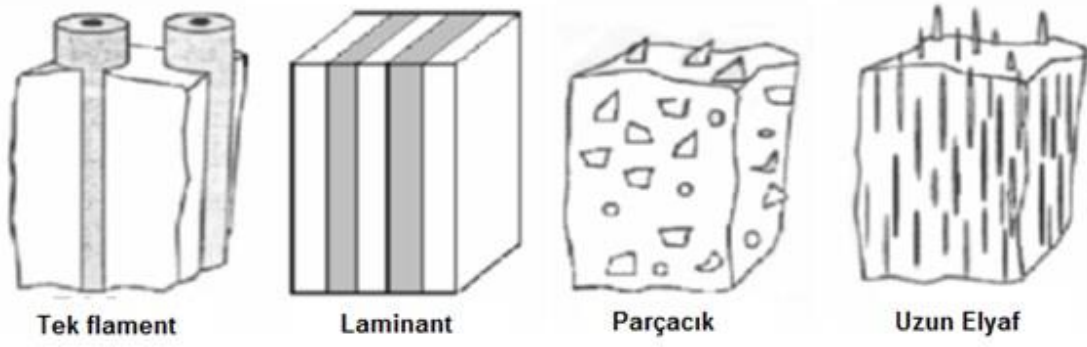


Şekil 1.1. Tüm kompozit malzemelerin, yapısına katılan takviye malzemesine göre sınıflandırılması[15].

Seramik malzemeler ergime sıcaklıkları yüksek, ısıl genleşme katsayıları ve yoğunlukları düşük, sert ve yalıtkan malzemelerdir. Ancak aşırı gevrek malzemelerdir. Isıl ve kimyasal etkilere karşı yüksek dirençli yapıya sahiptir. Metal malzemeler saf halde dayanımları düşük ve yumuşak ancak alaşım yapılma şartıyla sınırsız özellikler elde edilebilir. Metaller çoğu zaman seramik, fakat bazen refrakter takviye elemanları katılma suretiyle güçlendirerek MMK malzemeler üretilebilmektedir. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri Şekil 1.2.'de görülmektedir.

Takviye elemanının şekline göre kompozitler;

- a. Tek filament
  - b. Laminant (Katmerli),
  - c. Parçacık
  - d. Kısa ve uzun elyaf (Fiber)
- olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 1.2. Takviye elemanının şekline göre kompozit türleri [16].

### 1.3 Metal Matrisli Kompozitler

MMK'ler, ana yapısında metal kullanılan ve takviye elemanı olarak da refrakter veya seramik kullanılan kompozitlerdir [17]. MMK'ler, yüksek sıcaklıklarda kullanımında sorun çıkaran veya uygun olmayan malzemelerin yerine kullanılması ideal olan ve onun için tasarlanmış ileri bir malzeme çeşididir [18]. MMK'ler ve bilhassa da süreksiz (kısa fiber, wisker, parçacık) parçacık takviyeli MMK'in, otomotiv ve havacılık uygulama alanlarındaki kullanımı giderek artmaktadır. Son zamanlarda yapısal kompozit uygulama alanında alüminyum bazlı süreksiz parçacık takviyeli MMK'lere ait araştırmalar ve pratik uygulamalar üzerinde durulmaktadır. Araştırmaların çoğu bu ileri malzemelerin üretim şekli ve özelliklerinin tahmini doğrultusunda olmakla beraber ikincil üretim işlemleri olan plastik şekil verme, birleştirme, talaşlı işleme üzerine de araştırmalar yapılması gerekmektedir [19].

MMK'ler metal malzemelerle karşılaştırıldığı zaman çeşitli avantajlara sahiptir [20]:

- Yüksek mukavemet,
- Yüksek elastik modül,
- Yüksek sıcaklıklarda ki kararlılık,
- Düşük yoğunluk,
- Metaller kadar tokluğu ve sünekliliği, seramik malzemeler kadar mukavemet,
- Yüksek termal ve elektriksel iletkenlik,
- Isıl şoklara ve sıcaklık farklılıklarına karşı düşük hassasiyet

### 1.3.1 Metal Matris Kompozitler İçin Kullanılan Matris Malzemeleri

MMK'lerde genellikle matris malzemesi olarak, aranan spesifik özellikleri sağlamak ve daha üstün özelliklere sahip malzemeler üretmek amacıyla hafif ve düşük yoğunluklu metaller kullanılmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalarda ve sanayide yaygın olarak, Al, Mg, Cu, Ti, Ni, gibi metaller ve alaşımlar kullanılan matris malzemeleridir. Bu metal ve alaşımların başında ise düşük yoğunluk, kolay şekillendirilebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek ısılatabilirlik ve düşük ergime sıcaklığı gibi karakteristik özellikleri olan alüminyum ve alüminyum alaşımları gelmektedir [21,22].

#### 1.3.1.1. Alüminyum Matrisli Kompozitler

Alüminyum matrisli kompozitler, mükemmel mekanik, fiziksel ve tribolojik özelliklerinden dolayı savunma, havacılık ve otomotiv uygulamalarında tercih edilip; son zamanlarda insan üzerinde kullanılan zırhlarda da, yüksek mukavemet ve tokluğun öneminden dolayı kullanımı artmaktadır [23,24]. Alüminyum matrisli kompozitler, yüksek spesifik mukavemet ve tokluk, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme özelliği, düşük termal genleşme derecesi ve korozyon ve yüksek aşınma direnci gibi önemli özelliklere sahiptirler [25].

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluk, çökelme sertleşmesi ile mukavemetlerini arttırabilme özellikleri, yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri, tuzlu su da dahil birçok ortamdaki mükemmel korozyon dirençleri, kolay işlenebilirlikleri ve elde edilme kolaylıkları sebebi ile, diğer rekabet içinde bulunduğu malzemelerle karşılaştırılırsa büyük avantajlar sağlayarak gelişmiş uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Bu özellikler içinde en çok göze çarpan ise düşük yoğunluğudur ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) ki bu değer, çelik ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), pirinç ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ) ve bakır ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ) gibi malzemelere kıyasla yaklaşık üçte biri kadardır [26,27].

Alüminyumun simgeleme gösterim şekli ilk elde dört rakam kullanılan bir sayılma üzerine kurulmuştur (Tablo 1.1.). Bu gösterim şekline göre dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, alüminyum alaşımının hangi temel alaşım elementini içerdiğini belirtmektedir. Alüminyum matrisli kompozitler de sertleştirilebilir 2XXX(Al-Cu), 6XXX (Al-Mg-Si) ve 7XXX (Al-Zn-Mg-Cr) serisi alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Bu alaşımlara

yaşlandırma işlemleri ve çözeltiye alma uygulanabilir. Gösterimdeki ilk rakam alaşım türünü belirtirken ikinci rakam ise değişken sayısını simgelemektedir. Son iki rakamın ise özel bir anlamı olmayıp, seri içerisindeki alaşımları birbirinden ayıran sıra sayısını belirtir. Örnek anlatmak gerekirse, 2024 alaşımı özellikle hiçbir katkı elementi bulundurmeyen bir Al-Cu alaşımını simgeler. AA 2024 alaşımına çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma ısı işlemlerini sırayla uygulayarak sertleştirilebilmektedir. Bu alüminyum alaşımları doğal ve yapay olarak yaşlandırılabilirler. Alüminyum alaşımları içerisinde AA2024 alaşımı en yüksek sertlik, elastisite modülü ve dayanıma sahiptir. Mühendislik uygulamalarında, uçak yapımlarında, uzay sanayinde, perçin ve çekme tekerleklerinde ve ortopedik tabanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [28].

Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarında simgeleme dizini, alaşım elementlerinin katılma ve oda sıcaklığında çözünürlükleri [29].

Simge	Temel Alaşım Elementi	Katılma Sıcaklığında Çözünürlük(%)	Oda Sıcaklığında Çözünürlük(%)
1xxx	Alaşımız Al	100	100
2xxx	Al-Cu	5,65 (548 °C)	0,02
3xxx	Al-Mn	1,8 (659 °C)	0,3
4xxx	Al-Si	1,65 (577 °C)	0,1
5xxx	Al-Mg	14,9 (450 °C)	2,5
6xxx	Al-Mg-Si	-	-
7xxx	Al-Zn	82 (382°C)	2
8xxx	Diğer elementler	-	-
9xxx	Kullanılmayan dizi	-	-

### 1.3.2. Metal Matris Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Takviye malzemelerinin, matris malzemesiyle mukavemet, rijitlik, yoğunluk ve uyumluluk değerleri açısından mükemmel bir birleşim oluşturan seramik esaslı malzemelerdir. Bu seramik malzemeler; partikül, fiber ve visker formda olup, karbür, oksit, borür ve nitrür olarak kullanılabilirler. Bunların yanı sıra, çelik ve tungsten fiberler gibi metalik esaslı malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilirler [30]. MMK'lerde takviye elamanı olarak genellikle B<sub>4</sub>C, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, WC, TiC, W, MgO ve C kullanılır [31].

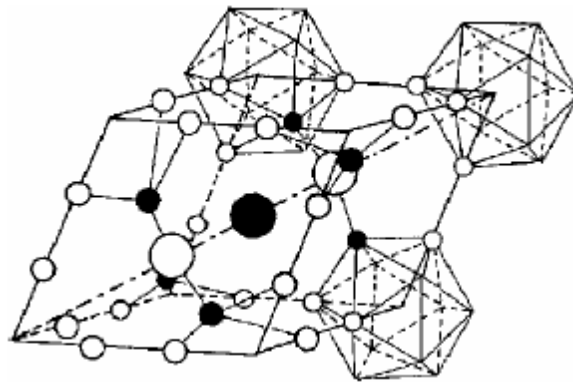


Tablo 1.2. Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri ve özellikleri[32].

Takviye Mazemesi	Yoğunluk ( $\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$ )	Isıl Genleşme Katsayısı ( $10^{-6} \text{C}^{-1}$ )	Ergime Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,98	7,92	2100	221 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )	379 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{SiC}$	3,21	5,40	2750	-	324 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{C}$	2,18	-1,44	-	-	690
$\text{SiO}_2$	2,66	<1,08	1710	-	73
$\text{AlN}$	3,26	4,84	2375	2069 (24 $^{\circ}\text{C}$ )	310 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{B}_4\text{C}$	2,52	6,08	2420	2759 (24 $^{\circ}\text{C}$ )	448 (24 $^{\circ}\text{C}$ )

### 1.3.2.1. Bor Karbür ( $\text{B}_4\text{C}$ )

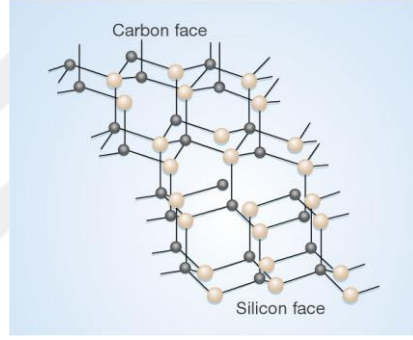
$\text{B}_4\text{C}$ , elmas ve kübik bor nitrür'ün ardından en sert (9.5+ Mohs skalasında) üçüncü malzemedir. Darbe dayanımı, Sürünme direnci ve nötron absorpsiyonu gerekli uygulamalarda birçok kabiliyete sahip, kovalent bağa sahip seramik esaslı bir yapıdadır. Ayrıca seramikler arasındaki en hafif olanıdır. Bunlardan dolayı kompozit malzemenin toplam ağırlığını etkilemeden mekanik özelliklerini üstün hale getirmek için kullanılabilir.  $\text{B}_4\text{C}$  ile çalışırken dikkate alınması gereken dezavantajı,  $\text{B}_4\text{C}$ 'ün en sert malzemelerden biri olmasından dolayı kompozitin ekstrüzyon yapılabilme kabiliyetini olumsuz yönde etkileyebilmesidir. Tamamen yoğun mikroyapıların üretim aşamasında karşılaşılan sorunlar ve gevrek kırılmaya karşı  $\text{B}_4\text{C}$ 'ün aşırı derecede hassasiyeti bu takviye malzemesinin sahip olduğu sınırlılıklardır [17]. Şekil 1.3 de  $\text{B}_4\text{C}$  takviye malzemesinin yapısı verilmiştir[1].



Şekil 1.3.  $\text{B}_4\text{C}$  Yapısı

### 1.3.2.2. Silisyum Karbür (SiC)

SiC yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek korozyon dayanıklılığı gibi özellikleri iyi olan seramik esaslı malzemedir. 800°C'ye kadar asidik ve alkali ortamlardan etkilenmezken ve 1200°C de koruyucu olan bir oksit (SiO<sub>2</sub>) filmi oluşturmakla birlikte bu film, SiC yapısının 1600°C'ye kadar bozulmadan kalabilmesini sağlamaktadır. Isıl genleşme ve yüksek mukavemet ile ısı iletkenlik bu malzemeye mükemmel ısı şok direnci kazandırmaktadır. İçerisinde bulunan safsızlıklar sebebiyle mukavemeti olumsuz yönde etkilenirken, az miktarda safsızlık olsa bile SiC'ün mukavemetini, 1600°C'ye kadar ki sıcaklıklarda muhafaza etmektedir. 2300°C sıcaklıkta ise SiC'ün yapısı bozulmaya başlamaktadır [33,34]. Şekil 1.4 de SiC takviye malzemesinin yapısı verilmiştir[1].



Şekil 1.4. SiC Yapısı

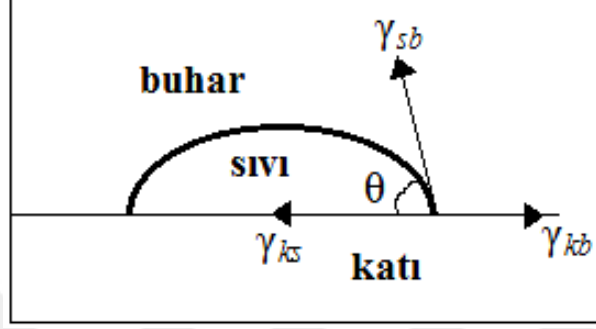
### 1.3.2.3. Takviye Fazın Islatabilirliği

Katı yüzey ile bir sıvı damlası arasındaki temas açısı Şekil 1.5.'de gösterilmiştir. Islatabilirlik oluşan bu temas açısını ölçülerek hesaplanabilmektedir. MMK'lerde sıvı faz üretim yöntemi kullanıldığı zaman takviye partikülleri ile matris fazı arasında oluşabilecek temasın sağlanabilmesi için ıslatmanın olması gerekir. Islatabilirlik; matris ile takviye arasındaki ara yüzey reaksiyonları, takviyenin yapısı, gözeneklilik, sıcaklık, atmosfer cinsi ve bekleme süresi ile kontrol edilebilmektedir. Takviye partiküllerinin ıslatabilirliğini artırmak amacıyla katının yüzey enerjisi artırılabilirken katı-sıvı ara yüzey enerjisi de azaltılabilir. Bunun için takviye partiküllerinin kaplanması, matris alaşımına ilave element eklenmesi ve partiküllere ısı işlem uygulanarak azaltılabilir [35,36]. Temas açısı Eşitlik 1.1.'dekine göre (Young-Dupre eşitliği) hesaplanabilir:

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{sb} \cos\theta$$

(1.1)

Eşitlikte görüldüğü üzere;  $\gamma_{kb}$  katı buhar arası ara yüzey enerjisi,  $\gamma_{sb}$  sıvı buhar arası ara yüzey enerjisi,  $\gamma_{ks}$  katı sıvı arası ara yüzey enerjisidir.



Şekil 1.5. Sıvı damlasının katı yüzey ile arasındaki temas açısı ölçümü

Temas açısı  $\theta = 0$  olursa çok iyi bir ıslatma,  $\theta=180$  ıslatma yok ve  $0 < \theta < 180$  olduğunda ise kısmi ıslatma söz konusu olur [35].

#### 1.4. Nanoteknoloji

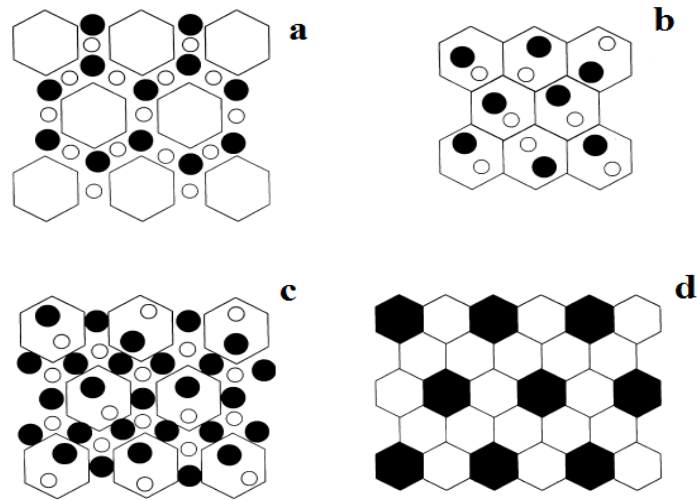
Nanoteknoloji ultra küçük/ince malzemelerin veya parçaların kullanıldığı bilimdir. Bir nano metre (1 nm) milimetrenin bir milyonda birine tekabül eder. İnsan saç kılı ise 80.000 nm kalınlığındadır. Nanoteknoloji malzemelerin büyük ölçekteki özellikleri dışında malzemeleri makro moleküler, moleküler ve atomik ve ölçekte araştırır. Malzeme boyutu küçüldüğünde birim kütle de yüzey alanı artışı ile, malzemenin kimyasal reaktifliğini artırır. Bundan dolayı nano malzemeler pillerde ve yakıt hücrelerinde katalizör görevini üstlenebilmektedir. Parçacık boyutu küçüldükçe kuantumun etkisi artar ve malzemenin elektriksel, optik ve manyetik özellikleri önemli ölçüde değişir [37].

Nanoteknoloji, atomlarla ilgilenen bir teknoloji dalıdır. Atomları ve molekülleri tek tek sararak istenen yapının meydana getirilmesi temeline dayalıdır. Atomlar tek tek işleme maruz kalır. Nano ölçeklerde bir nesnenin ortaya çıkması için yaklaşık 100 ile 1000

arasında atom bir araya gelir. Bu bağlamda nanoteknoloji de ‘çok küçük maddelerin teknolojisi’ olmaktadır [38-40].

### 1.4.1. Nanokompozitler

Nano kompozitler en az bir fazı ( matris veya takviye elemanı) nanometrik boyutlardan oluşan yeni malzeme çeşididir. Nano kompozitler matris malzemesine göre metal matrisli nano kompozitler, polimer matrisli nano kompozitler ve seramik matrisli nano kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir. Diğer bir sınıflandırma olarak mikroyapıya göre sınıflandırılma şekli yapılmıştır. Nano kompozitler, partiküllerin yapıda yerleştiği yere göre taneler arası, tane içi, hibrit ve nano-nano kompozitler olarak dört kısma bölünür (Şekil 1.6.). Sınıflandırmanın ilk üçünde de takviye elemanı olarak nano boyutta partikül kullanılmasına rağmen matris fazı nanometrik ölçüde değildir. Fakat nano - nano kompozitlerde ise hem matris hem de takviye elemanı fazı nanometrik boyutlardadır ve yapıyor gelişigüzel dağılmışlardır. Taneler arası nanokompozitlerde (Şekil 1.6a.), mikron mertebesindeki matris fazının tane sınırlarına, nanometrik ölçülerdeki takviye elemanı, dağılır. Tane içi nanokompozitlerde, Şekil 1.6b de gösterildiği gibi takviye elemanı büyük matris fazı tanelerinin içinde yer alır, hibrit nano kompozitlerde (Şekil 1.6c) ise takviye elemanı, aynı anda matris taneleri içerisinde ve tane sınırlarında yer alır [9].



Şekil 1.6. Nano kompozitlerin mikroyapıya bağlı olarak sınıflandırılması  
a)taneler arası b)tane içi c)hibrit d)nano-nano yapılar

Nanokompozitler, tane boyutlarının çok fazla küçük olmasından dolayı, büyük taneli malzemelerle karşılaştırılma olarak bırakmayacak kadar iyi ve değişik özelliklere sahiptirler. Bu özellikler ise; sertlik, yüksek mukavemet, gelişmiş tokluk ve süneklik, yüksek difüzyon kabiliyeti, düşük elastisite modülü, düşük yoğunluk, yüksek kullanım sıcaklığı, yüksek elektrik direnci, düşük ısı iletkenlik, üstün manyetik özellikler ve yüksek termal genlik olarak örneklendirilebilir. Bu özellikler içerisinde en önemlisi üstün özellikler malzemelerin mekanik davranışlarında görülmektedir [41].

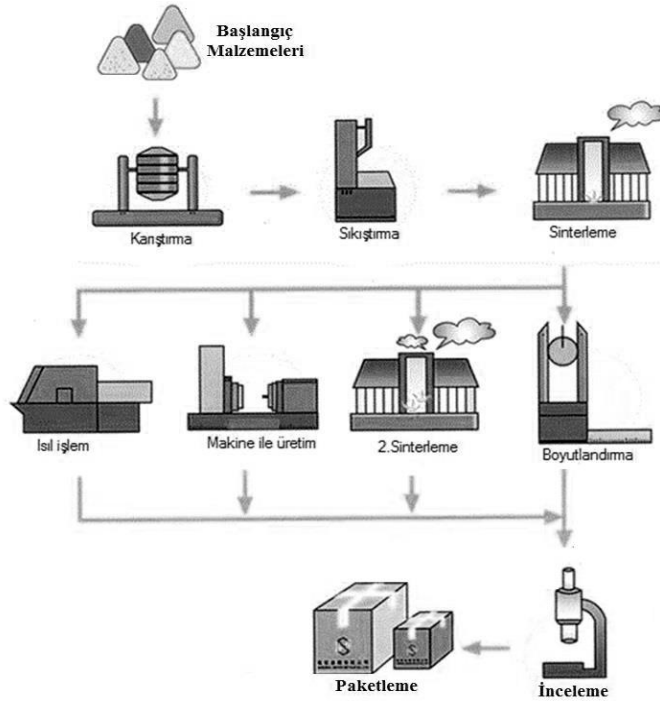
### **1.5. Toz Metalurjisi**

Metal tozları ve bu tozlardan üretilmiş kütleli malzeme veya şekillendirilmiş parçaların üretim yöntemine toz metalurjisi (TM) olarak adlandırılmaktadır. Tozların üretimi, şekillendirilmesi, elde edilen parçaların kullanılabilirlik testleri ve özellikleri gibi alt başlıkların tamamı da toz metalurjisi tarafından incelenmektedir. Toz metalürjisinin asıl amacı; metalleri yoz halinde elde edip ve bu tozları da presledikten sonra fırın içerisinde sinterleyerek son ürünü elde etmektir [42,43]. Öncelikli olarak, toz üretme, istenilen tozların homojen olarak karıştırılması, homojen karıştırılmış tozların kalıp içerisine paketlenmesi ve toz parçacıklarının birbirleri ile bağ kurmaları için atmosfer kontrolü altında ve ihtiyaç duyulan sürede-sıcaklıkta sinterleme işlemlerinin yapılması adımlarını kapsar. Farklı şekil, boyut ve sıkıştırılabilirlik özelliğine sahip olan tozların, % ağırlıkça oranları belirlenip homojen olarak karıştırılması, oluşturulan karışımın uygun şekilde sıkıştırılmasıyla istenilen forma veya şekle dönüştürülerek mukavemetinin ve yoğunluğunun güçlendirilmesi ve yoğunluğun artırılması için sinterleme işlemi yapılması esasına bağlı parça üretme tekniği olarak tanımlanmaktadır. Titanyum, tungsten ve bu malzemelerin karbürleri ile birlikte alüminyum, kobalt ve nikel gibi metallere kompozit malzeme şeklinde üretimlerinde; üstün mukavemet, çok sert, korozyon ve aşınma direnci yüksek, mükemmel fiziksel ve mekanik özellikte malzemelerin üretimin de kullanılır. Farklı şekil, boyut ve sıkıştırılabilirlik özelliğine sahip metal partiküllerini sağlam, hassas ve yüksek performanslı malzemelere dönüştürülmesi ve bu sürecin ekonomisinin uygun olarak sağlanması toz metalurjisi yöntemini cazip hale getirmiştir. Ayrıca, sahip olduğu bu özellikler ile TM; düşük enerji, kolay hammadde ve yüksek verimlilik gibi özellikleriyle

günümüz ihtiyaçlarını karşılar Bunların sonucunda, TM konusu sürekli gelişmekte olup, geleneksel metal şekillendirme yöntemlerine alternatif oluşturmaktadır [44,45].

Toz metalurjisi, uygulama alanlarına bakıldığında karmaşık geometrili parçaların ekonomik olarak üretimine dayalı olması ile dikkat çekmektedir. Otomotiv sektöründe; subap yuvaları, yataklar, katalitik konvertörler, emisyon algılayıcıları, bujiler, darbe emiciler, motor zamanlama parçaları, zincir dişlisi, piston kolları gibi birçok otomotiv parçaları TM yöntemi ile üretilmektedir. Oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, gözenekli filtreler, fonksiyonel tabakalı yapay kemikler, sermetler, tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden sert kesici takımlar ve kontak alaşımları (bakır-krom) bunlara örnek olarak verilebilir [46].

Hurda kaybının çok az olması, talaşlı işlemeye duyulan ihtiyacın az olması, seri üretime uygunluk, gözenekli parçaların üretilmesi, kimyasal bileşim kontrolü ve yoğunluk farkı nedeniyle döküm ile üretimi zor olan metal matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi bu yöntemin avantajıdır. Yüksek ilk yatırım maliyeti, düşük mekanik özellikler, yüksek kalıp maliyeti, üretilebilecek parça şekli ve boyutunun sınırlı olması TM yönteminin dezavantajıdır [42,47-52]. Toz metalurjisinin akış şeması Şekil 1.7'da gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Toz metalurjisi yönteminin akış şeması [53]

### 1.5.1. Metal Tozların Üretimi

Tozların fiziksel veya kimyasal gibi birçok özelliğini belirlemede, üretimde kullanılan yöntemler önemli bir rol oynar. Üretim yöntemlerine bağlı olarak küresel yapıdan karmaşık şekilli yapıya, çok farklı toz yapıları elde edilebilmektedir. Tozun yüzey durumu üretim yöntemine göre değişiklik gösteren diğer bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin birçoğunun toz haline getirilmesinde, malzeme özelliklerin uygun olarak herhangi bir teknik kullanılabilir. Çok çeşitli toz üretim yöntemi mevcuttur fakat ticari anlamda bahsedilecek olursa, ön planda aşağıda verilen teknikler gelmektedir:

- Elektrolitik ayrıştırma yöntemi
- Değirmende öğütme
- Atomizasyon yöntemi
- Kimyasal yöntemler
- Mekanik alaşımlama
- Talaş kaldırma
- Mekanik yöntemler [54].

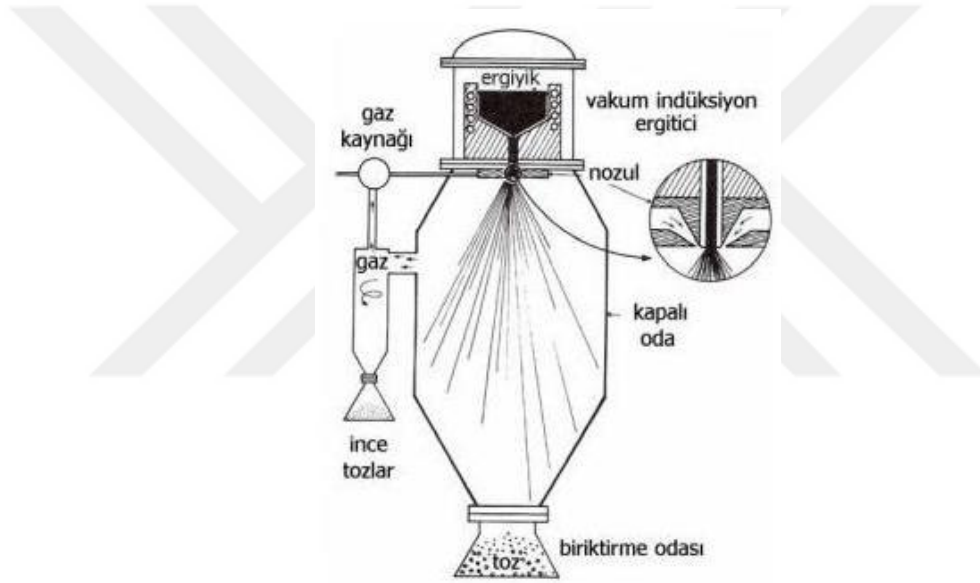
Birçok çeşitte toz üretim yöntemleriyle üretilen tozların şekilleri farklı bir yapı ortaya çıkaracaktır. Farklı toz üretim metotları kullanılarak üretilen toz tane şekilleri; küresel, karmaşık, yüksek gözenekli, dentritik, iğnesel ve pul olabilmektedir. Çeşitli uygulamalarda kullanılan tüm tozların %80 den fazlasında atomizasyon üretim yöntemleri kullanılır. Bunun nedeni olarak, atomizasyon yöntemlerinin diğer bütün üretim yöntemlerine kıyasla tane büyüklüğü, tane şekli, alaşım tozlarının üretilmesinde ve dağılım kontrolünün gayet kolay olması bu üretim yöntemlerinin çok cazip olmasını sağlamaktadır [55].

Metal tozlarının üretiminde kullanılan çeşitli atomizasyon teknikleri maddeler halinde aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Gaz atomizasyonu
- Su jeti atomizasyonu
- Santrifüj atomizasyonu
- Ultrasonik gaz atomizasyonu

➤ Vakum atomizasyonu

Gaz atomizasyon yönteminde genellikle gaz olarak azot kullanılır. Sıvı metal demetine, oldukça yüksek basınçlı bir gazın belirli açıyla püskürtülmesi sonucu ve sıvı demetin dağılımı ile sıvı metal damlaları meydana gelmesi işlemi olarak izah edilen bu yöntemde iki veya daha fazla ağızlık sıvı metalin akma eksenine çevresine eşit açıda yerleştirilir ve gaz jetleri yardımıyla sıvı metal demeti tek noktada kesilir. Atomizasyon gazının türü, akma hızı ve basıncı, akma hızı ve sıcaklığı, atomize edilecek sıvı metalin çeşidi, gazın püskürtüldüğü nozulun tasarımı bu yöntemin işlem parametreleridir. Toz üretim sistemi ve gaz atomizasyon tekniğinin gösterimi Şekil 1.8’de gösterilmiştir. [56-57].



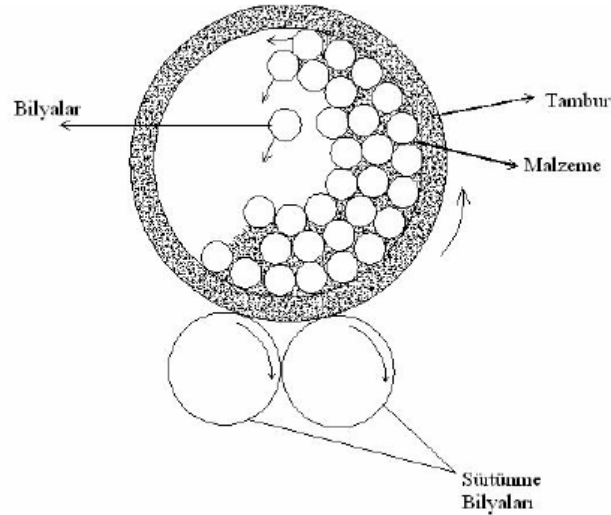
Şekil 1.8. Gaz atomizasyon yöntemi[58]

Su atomizasyonu tekniği, atomizasyon teknikleri içerisinde en çok kullanılan yöntemdir. Çalışma prensibi ise, sıvı metalin akış eksen çevresinde minimum iki adet olması kaydıyla aynı açı ile monte edilen su jetleri yardımıyla kesilmesi ile açıklanabilir. Yassı huzmeli V-jetleri, serbest bir düşüşle akmakta olan sıvı metalin kesilmesini sağlar. Atomizasyon yönteminde V-jetleri ikili veya dörtlü şekilde kullanılabilir. İkili V-jetlerinde akan sıvı metalin dağılmadan huzme dışına çıkabilir ve bu nedenle, dörtlü V-jetlerinden elde edilen verimi sağlamak amacıyla daha yüksek basınçlarda çalışmak gerekmektedir [59,60].



### 1.5.2. Tozların Karıştırılması

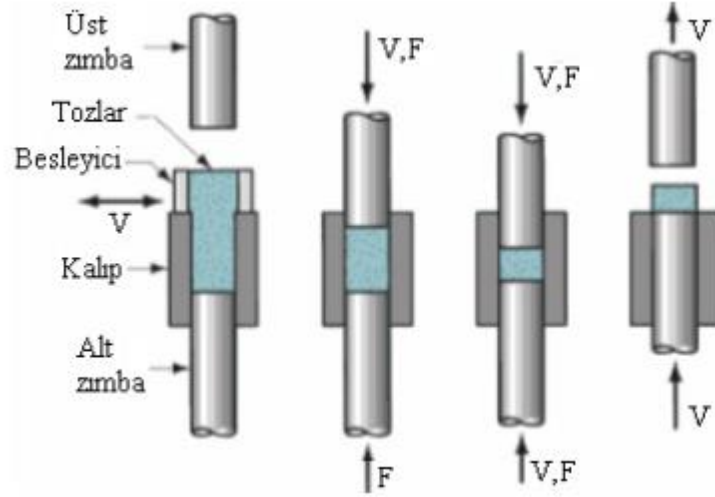
İki veya daha fazla malzemeden oluşabilen tozlar ASTM B23 standartlarına bakılarak karıştırılırlar. Metalik stearit ve parafin gibi yağlayıcılar %0,5-1,5 arasındaki oranlarda katılırlar. Karıştırma işlemi ile tozlar ve yağlayıcılar arasında elde edilen karışım homojen olur. Yağlayıcı kullanılmasının amacı tozlar ile takım yüzeyleri ve kalıp çeperleri arasında oluşabilecek sürtünmeleri azaltmak ve daha iyi bir yoğunluk dağılımına sahip parçalar üretmektir. Eğer düzgün bir dağılım yapılırsa sinterleme işlemi esnasında atomlar difüzyon aracılığıyla taşınarak tüm bölgelerinde homojen bir kompozisyon sağlanır. Sinterleme sırasında alaşım (homojen karışım) oluşur; konsantrasyon farklılıklarından dolayı potansiyel kimyasal gradyant, atomların difüzyon sağlayabilmesi için itici kuvvet oluşturur [61]. Yağlayıcı kullanılmaması durumunda tozlar ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme artacağından homojen olmayan bir basınçla dağılma söz konusu olur ve sonuç olarak preslenen parçada gerilme farklılıkları oluşur. Preslenen kompakt parça bünyesinde oluşan bu gerilme farklılıkları ise sinterleme sırasında distorsiyonlara yol açar. Karışımda kullanılan yağlayıcı miktarı %1,5'i aşarsa sinterleme esnasında numune yüzeylerinde kabarcıklar meydana gelir ve bu durum numune yüzeyinin kalitesini düşürür [45]. Karıştırıcı olarak atritör, bilyalı öğütücü gibi cihazlar kullanılır. Şekil 1.9'de bilyalı öğütücü şematik gösterimi vardır.



Şekil 1.9. Bilyalı Öğütücü[21].

### 1.5.3. Tozların Preslenmesi

Toz metalurjisindeki üçüncü ve en önemli işlem basamağı ise tozların preslenmesidir. Metalik tozlar, basıncın etkisiyle özel olarak hazırlanmış kalıp içinde kompakt hale getirilir. Preslemenin en önemli amacı, istenilen şekle toz partiküllerini dönüştürmek için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabileceği uygun yoğunluk kazandırılmasıdır [42,43]. Presleme işlemi sırasında toz partikülleri önce uygulanan kuvvete paralel yönde hareket ederler. Tozlar sıvı şeklinde akmaz; tanecikler ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı bir reaksiyon kuvveti oluşur. Bu oluşan reaksiyon kuvveti ile uygulanan kuvvet eşit bir değere ulaşıncaya kadar sıkıştırma aksel olarak devam eder. Presleme işlemi sıcak veya soğuk olarak iki türlü yapılmaktadır. Soğuk presleme işlemi, basit makine parçalarının seri üretiminde ve gözenekli bronz yatakların imalatında elverişlidir Sıcak presleme işlemi, tel çekme haddelerinin, sert alaşımların ve elmas alaşımlarının imali gibi olağandışı hallerde uygulanmış olan bu teknik, tozların özel olarak ısıtılmış kömür, grafit veya çelik bir matris içerisine yerleştirilerek ve sıkıştırılarak ham mukavemet kazandırma işlemidir [62-65].

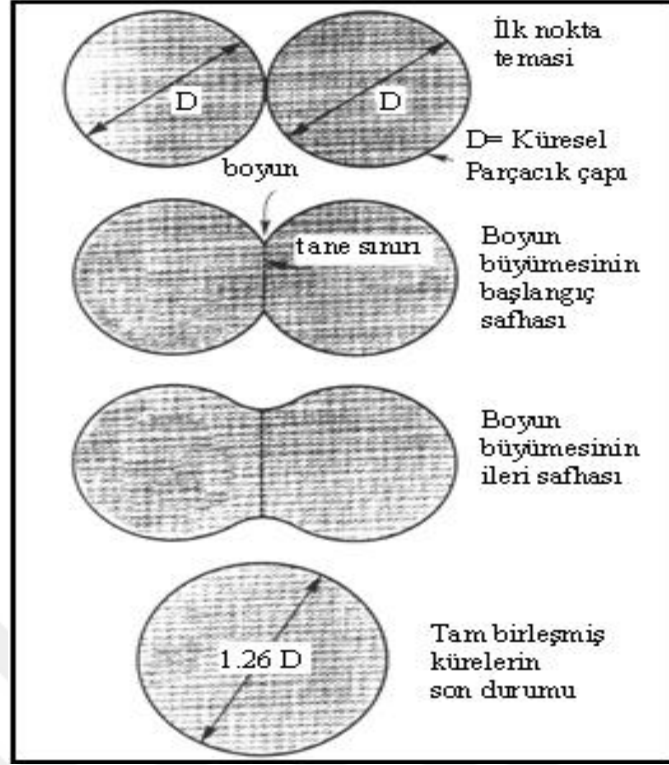


Sekil 1.10. TM’de preslemenin aşamaları [66] a) Kalıbın otomatik besleyici tarafından tozla doldurulması, b) Presleme sırasında alt ve üst zımbaların hareketi, c) Son şeklin verilmesi, d) Parçanın çıkarılması.

#### 1.5.4. Sinterleme İşlemi

Bütün toz metal ve seramik parçacıklar, mukavemet arttırmak için yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme toz metalurjisinin en önemli üretim basamaklarından birisidir ve bir ısıl işlemdir [21]. Sinterleme işlemi, gözenekli yapı olarak şekillendirilmiş tozların spesifik olarak yüzey alanının azalması, parçacık temas noktalarının artması ve bunlara bağlı şekilde gözenek yapısının değişimine ve gözenek hacminin azalmasına sebep olan ısıl olarak aktifleştirilmiş malzeme taşınması olayı olarak tanımlanabilir (Şekil 1.11.). Sinterleme işlemi esnasında parçacık temas noktaları artış göstermekte ve iyonlar ile atomlar arasında fiziksel bağ meydana gelmektedir. Bu şekilde bağ oluşumu, kristal kafes sistemi içindeki mükemmel dayanımı atomsal olarak bağlanma ile benzerdir [67,68]. Sinterleme sonrasında malzemenin özelliklerinde de değişimler görülür. Bunlar;

- Mukavemet, elastik modülü,
- Elektrik ve ısı iletkenliği,
- Sertlik, kırılma tokluğu,
- Tane boyutu dağılımı ve şekli,
- Ortalama tane sayısı, büyüklüğü ve biçimi,
- Gözeneklilik şeklinin ve boyutunun dağılımı,
- Kristal yapı ve kimyasal kompozisyon
- Ortalama gözeneklilik boyutu ve şekli[69].



Şekil 1.11. Sinterleme sırasında oluşan olayların şematik gösterimi [70]

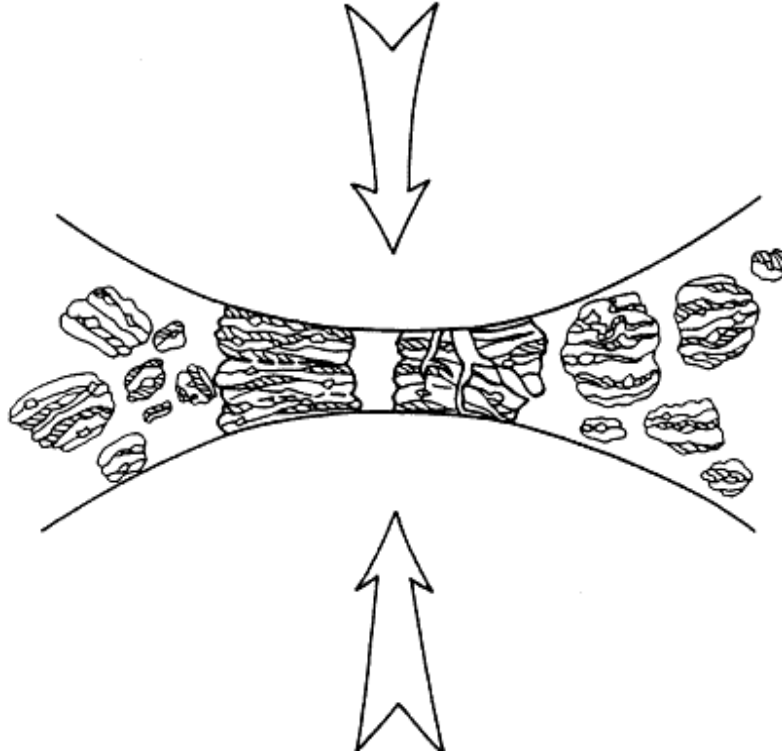
Asıl olarak sinterleme işlemini katı hal ve sıvı hal sinterleme olarak iki bölümde sınıflandırılır. Sıkıştırılan tozun mikro yapısı, işlem ve malzeme değişkenleri sinterleme işlemini belirleyen önemli değişkenlerdir. Malzeme ile ilgili değişkenler ise, sıkıştırılan tozun kimyasal yapısı, toz şekli ve boyutu, tozlarında yığılma derecesini içermektedir. Bu değişkenler tozun sinterlenmesi ve sıkıştırılabilmesi üzerine etkili olup birden fazla toz karışımının homojen olarak sıkıştırılması için önemli faktörlerdir. Basınç, sıcaklık, ısıtma ve soğutma süreleri gibi faktörler sinterlemeyi etkilene diğer etkenlerdir. Sıkıştırılan tozların sinterleme basıncı ve sıcaklığı sinterleme üzerindeki etkileri birçok çalışma ile araştırılmıştır [71-73].

## 1.6. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA) özellikle uzay sanayisi gibi ileri malzeme teknoloji alanında ihtiyaçları karıştırmak amacı ile geliştirilmiş yeni üretim yöntemlerinden biridir [11,74]. MA son derece cazip özellikler gösteren toz üretim yöntemidir. 30 yıl önce International Nickel Company şirketinde çalışan Benjamin ve arkadaşları aracılığıyla

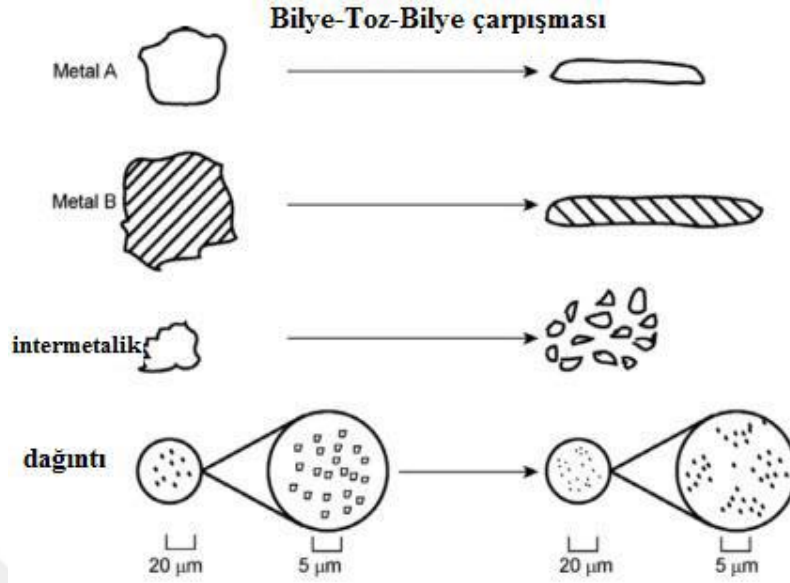
geliştirilen MA, toz partiküllerinin sürekli olarak kaynaklandığı, parçalandığı ve yeniden kaynaklandığı ve ‘toz değirmen’ adı verilen yüksek enerjili ortamda gerçekleşen bir işlemdir. Mekanik alaşımla uygulanarak üretilmiş ilk malzemeler ilk olarak uçak endüstrisinde kullanılır diye düşünülerek geliştirilmiştir. İlk ticari üretim yapma başarısını INCONEL MA 754 alaşımı göstermiştir. Bu alaşım 23 yıldan bu yana askeri uçak motorlarının sıcak bölgelerinde kullanılan bir parça olarak hali hazırda kullanılmaktadır [75-80].

Toz partiküllerinde yüksek enerjili öğütme sırasında sürekli olarak sırasıyla ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi, kırılma ve son olarak yeniden kaynaklanma meydana gelmektedir Şekil 1.12.’de iki bilyenin çarpışması esnasında ara bölgede kalan tozların ezilerek başlangıçtaki toz boyutlarına oranla daha da büyümesi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Mekanik alaşımlama sırasında bilye-toz-bilye çarpışması [81].

Şekil 1.13.’da ise mekanik alaşımla-öğütme esnasında başlangıç tozlarının maruz kaldıkları deformasyon şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Mekanik alaşımlama da başlangıç tozlarında meydana gelen deformasyon [82].

Yüksek enerjili öğütme esnasında öğütme haznesi içerisindeki bilye-toz-kap duvarı ve bilye-toz-bilye arasında meydana gelen çarpışmalardan dolayı, toz parçacıklarında deformasyon (kırılma ve deformasyon sertleşmesi şeklinde) meydana gelmektedir. Mekanik öğütme sırasında tozlarda meydana gelen deformasyonun devam etmesiyle birlikte, toz parçacıklar kırılarak boyutları küçülür. Bu aşamada ise kırılma eğilimi, soğuk deformasyon eğiliminden daha fazladır. Bilyelerin darbe etkisiyle tozlar küçülmektedir. Buna rağmen, toz parçacıkların boyutu fazla değişmez. Mekanik alaşımlama işleminde ilerleyen süreçte, tabakalar arasındaki boşluklar giderek azalmakta ve parçacık tabakaları ise artmaktadır. Belli bir öğütme süresi sonrasında otalama partikül boyutunun artması için, kaynaklanma ile kırılma arasında bir denge oluşmaktadır. Bu aşamada, karışımı oluşturan malzemelerin tümünü, her bir parçacık içermektedir. Mekanik alaşımlama işlemi esnasında meydana gelen deformasyonun etkisiyle, dislokasyon boşlukları gibi kristal etkiler, tane şekillerindeki değişimi oluşturmaktadır. Meydana gelen bu etkiler sayesinde matriste çözünen elementlerin difüzyonu da artmaktadır. Mekanik alaşımlama işlemi esnasında sıcaklığın artması da, bu difüzyonu daha da kolaylaştırır. Bu şekilde, elementler arasında mekanik alaşımlama oluşur [82].

MA işlemi, çeşitli reaksiyonlardan dolayı karmaşık bir işlemdir. Bu sebeple, bu teknikle üretilecek olan son nihai ürünün bileşimi ve mikro yapısında etkili olan birçok faktör söz konusudur. Bu faktörler birbiri ile ilişkili olup, birbirinden bağımsız da değildir. Bunlar;

- Öğütme tipi (değirmen çeşidi)
- Öğütme hızı
- Öğütme kabı
- Öğütücü malzeme ve tipi
- Öğütme süresi
- Kabın doluluk oranı
- Bilye toz oranı
- Öğütme sıcaklığı
- Öğütme atmosferi
- İşlem kontrol kimyasalları 'dır.

Öğütme işleminde kullanılan öğütme hücreleri bu işlem için çok önemlidir. Öğütme işlemi sırasında öğütücü malzemelerin (bilye gibi) kabın duvarlarına çarpması sonucunda, kırılmalar ve çatlaklar meydana gelebilmektedir. Kırılmalar ve çatlaklar sonucunda kopan parçalar kap içerisindeki toza karışarak, üretilmek istenen karışımın kimyasal bileşimini etkilemekte ve kirlenmelere sebep olmaktadır. Bundan dolayı, öğütme işlemi yapılacak olan kapların dayanıklı, sağlam malzemelerden yapılmış olması gerekmektedir [83].

MA işlemlerinde kullanılan bilye/toz oranı 1:1 ve 1:220 aralığında olup, bilye-toz oranı öğütme esnasında tozların istenilen boyuta gelmesi için gerekli olan zamana önemli bir etki sağlamaktadır. Bilye-toz oranı artıkça, homojen bir yapı elde etmek için gerekli süre de azalmaktadır. Shafiee vd. yapmış oldukları bir çalışmada, Mo<sub>2</sub>Si ve Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> nano kompozit sentezlemesinde bilye-toz oranı ve öğütme süresinin faz dönüşümü ve mikro yapıya etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmaların neticesinde, bilye-toz oranı ve öğütme süresinin, kristal boyutu ve faz dönüşümü gibi parametreler üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, 35:1 bilye-toz oranının ve 48 saat öğütme süresinde en küçük parçacık boyutuna ulaşıldığı ifade edilmiştir [84].

Öğütme haznesinde, bilye ve tozların rahat bir şekilde hareket edebilmesi için, haznenin doluluk oranı da önemlidir. Kabın doluluk oranının, bilyeler ve tozlarına daha

rahat hareket edebilmesi için ve dahası öğütmenin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için genellikle %50' geçmemelidir.

MA yönteminde, öğütme atmosferi de diğer önemli bir parametredir. Oksitlenme ve korozyon gibi problemlerin önlenmesi amacıyla, mekanik alaşımlama işlemi argon gibi inert gaz ortamlarında veya vakumlu ortamlarında yapılmaktadır.

MA işleminde, öğütme süresi de etkili olan başka bir değişkendir. Birçok durumda, kristal boyutu, parçacık boyutu, lameller yerleşimi inceltme oranı işlem süresi ile birlikte logaritmik olarak artmaktadır.

MA işlemi esnasında tozların plastik deformasyon olması sebebiyle, toz partikülleri arasında soğuk kaynaklanma oluşmaktadır. Tozların kutuplaşarak topaklanmasını (aglomerasyon) engellemek için ortama işlem kontrol kimyasalları (İKK) katılır [81-83].

Mekanik alaşımla işleminde çeşitli değirmen türleri kullanılmaktadır. Bu değirmenler öğütme etkileri, farklı toz kapasiteleri, ısıtma ve soğutma gibi ayarlanabilir ünitelere sahiptirler. Bunlar ise; Planeter (düzlemsel) tipi değirmenler, Artritör değirmenler ve Speks tipi değirmenlerdir.

Mekanik alaşımlama çalışmalarına öncülük eden başka bir değirmen türü de, tek seferde yüzlerce gram tozu öğütme kapasitesine sahip Planeter (gezegen) tipi bilyeli değirmenlerdir. Bu değirmenlerin özellikleri, kendi eksenini etrafında hareket etmesini sağlayan döner destek disklerine ve özel dönme mekanizmalarına sahiptir. Kabın kendi eksenini etrafında dönmesiyle ve kapta dönen destek diskleriyle, merkezkaç kuvveti üretilmektedir. Çünkü aksi istikametteki merkezkaç kuvvetler, kaplar ve birbirine ters yönde dönen destek diskleriyle, birbirine etki ederler. Bu olayla, öğütme bilyeleri kabın iç duvarları içerisinde aşağı doğru hareket ederek darbe etkisi sağlanmaktadır. Öğütme bilyelerinin kap duvarlarına etkilemeleri ve kabın içinde serbestçe hareketleri de çarpma etkisi olarak tanımlanmaktadır [85].





Şekil 1.14. Fritsch Pulverizatör 5 gezegen tipi değirmen[86].

### 1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Metal matrisli kompozitler (MMK), yüksek mukavemet ve rijitliğin önemli olduğu uygulamalarda geleneksel alaşımların yerini alması için geliştirilmiştir. Günümüz endüstrisinde maliyet üretimde önemli bir faktördür bununla beraber hafiflik, geri dönüştürülebilirlik ve uzun kullanım ömrünü de dikkate almak gerekir. Bu özelliklere bakıldığında MMK'ler diğer malzemelere göre hala çok pahalıdır. Fakat bu maliyet, basit üretim yöntemleri, ucuz takviye malzemeleri kullanımı ve yüksek üretim miktarı ile düşürülebilmektedir [87]. Uygulama alanı bakıldığında ise savunma sanayi, havacılık elektronik, otomotiv ve uzay teknolojileri sektöründe azımsanmayacak miktarda kullanım alanlarına sahiptirler [5,88-90].

Parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitler ise yüksek elastik modülü ve spesifik mukavemet, düşük termal genleşme ve iyi aşınma direnci özelliklerinden dolayı önemli bir araştırma konusu olmuştur. Ayrıca düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen yüksek mukavemet değerleri göstermesi bu malzemeleri hafif olmasının yanında dayanıklı olarak kabul edilmesini sağlamıştır [91].  $Al_2O_3$ , TiN,  $B_4C$ , MgO,  $MoSi_2$ , SiC ve benzeri seramik parçacıklar, alüminyum esaslı kompozitlerin üretilmesinde en yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleridir [92].

Zhang ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada  $B_4C$  takviyeli Al matris kompozitlerinin vakumlu sıcak pres sinterleme ile mal edilen çeşitli hacim oranlarının

etkisidir. Bu araştırmanın sonucunda  $B_4C$  hacim içeriğinin artmasıyla Al- $B_4C$  kompozitlerinin bağıl yoğunluğu azalmış ve %0.78 gibi minimum görünür gözenekliliğe neden olmuş; bu da, Al ve  $B_4C$  ıslanabilirliğinin ve kristal sınırların artışına bağlı olmuştur. Ayrıca  $B_4C$  parçacıkları ve  $Al_3BC$  etkiyi güçlendirdiğinden, sertlik,  $B_4C$  miktarındaki artış ile büyük ölçüde artmıştır [93].

Alizadeha ve arkadaşları (2013) AA1100 alaşımına  $B_4C$  seramik partikülleri takviye ederek kompozit malzeme üretmiştir. Hacimce % 9.9  $B_4C$  ilave ederek akümülatif hadde birleştirme yöntemi (ARB) kullanılarak bu kompozitler üretilmiştir. Bu çalışma sonucunda nano yapılı Al- $B_4C$  kompozit malzemelerin mikroyapı, sertlik ve mukavemet gibi özellikleri karşılaştırılmış ve  $B_4C$  parçacıkları Al matrisi içerisine homojen olarak dağıtıldığı görülmüştür. Ayrıca bu kompozitler Al'den 1.2 kat yüksek bir değer olan 362 MPa'lık maksimum çekme mukavemetine ve 90 Hv'lik sertlik değerine ulaşmış olduğunu tespit etmişlerdir [94].

Zhang ve arkadaşları (2016) Al - %20 hacimce SiC kompozitleri 20MPa'lık bir basınç altında  $700^{\circ}C$  sıcaklıkta imal edip, numunelerin bükülme mukavemeti  $294 \pm 10.21$  MPa arasında ölçüldü ve Al'dan göreceli olarak daha yüksek olduğu tespit etmiştir. Aynı zamanda, bu kompozitlerin sertliği bir Vickers sertlik test cihazı ile  $55.43 \pm 5.26$  HV arasında test edip, Al'dan daha sert malzemeler olduğunu incelemiştir [95].

Xiao-min ve arkadaşları (2012) Al-SiC kompozit malzemelerinde SiC parçacıklarının dağılımının ve miktarının mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemiş ve SiC miktarının %4'den %12'ye arttırmasıyla birlikte alüminyum matrisli kompozitlerde eğme mukavemetinin 230 MPa'dan 250 MPa'a arttığını tespit etmiştir [97]. Başka bir çalışmada ise Al-SiC kompozit malzemelerde SiC miktarı hacimce % 4'den % 8'e arttırıldığında sertlik değerinin 130 HV'den 171 HV'ye arttığını incelemiştir [96].

Candan (2009) Al-Mg/SiC kompozitlerinin %3.5 NaCl çözelti ortamda korozyon davranışlarını incelemiş ve Al-Mg alaşımı ile SiC takviyeleri arasında oluşan bileşiklerin korozyon dayanımını artırdığını belirtmiştir [97].

Mubiayi (2017) ve arkadaşları alüminyum ve bakır sürtünme karıştırma nokta kaynaklarında intermetalik bileşiklerin karakterizasyonu çalışmasında oluşan Cu içerikli intermetaliklerin ( $Al_4Cu_9$ ,  $AlCu_3$ ,  $Al_2Cu_3$  and  $Al_2Cu$ ) sertlik değerlerinin arttırdığını belirtmiştir [101].

Li (2016) ve arkadaşları A319 alüminyum alaşımında, yerinde çekme testleri sırasında dijital görüntü korelasyonu ile hasar muayenesi çalışmasında oluşan mikro

çatlaklar, SEM görüntülerindeki çatlak yoluna yakın olan  $Al_2Cu$  fazında tespit edilmiştir. Fraktürografi analizi, çatlak yayılımı üzerindeki zorlu inklüzyonların rolünü vurguladı ve monoton yük altında çatlak yayılımının,  $Al_2Cu$  fazlarının ve ötektik Si parçacıklarının bazı bölünme benzeri özelliklerini gösteren ötektik Si,  $Al_2Cu$  fazları ve birincil fazlar yoluyla ortaya çıktığını ortaya koyduğunu belirtmişlerdir [102].

Literatür incelemesinde de görüldüğü üzere genellikle  $B_4C$  ve SiC takviye partiküllerini mikro boyutlu olarak katılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca Al matrisi içerisine sadece  $B_4C$  veya SiC seramik partikülleri katılarak kompozit malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine durulmuştur ve bunların karşılaştırılması üzerine sınırlı sayıda çalışmalara rastlanmıştır. Bu sebeplerden ötürü çalışmanın özgün değerini arttırmaktadır. Bu tez çalışmasında ise  $B_4C$  ve SiC seramik takviye partikülleri matris içerisine nano boyutta ayrı ayrı ve hibrit şeklinde katılarak mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon dayanımları karşılaştırılması amaçlanmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Malzeme

Bu yapılan çalışmada, kullanılan matris malzemesi düzensiz şekilli başlangıç morfolojisine sahip ve ortalama toz boyutu değeri ise 50  $\mu\text{m}$  olan Al2024 ( $2.72 \text{ g/cm}^3$ ) alaşım tozları (Gündoğdu Exotherm Company'den temin edilen) kullanılmıştır (Şekil2.1). Tablo 2.1'de Al2024 matris alaşımının kimyasal bileşik analizi sonucu değerleri verilmiştir. Seramik parçacık takviyesi olarak ise  $\text{B}_4\text{C}$  ( $2.52 \text{ g/cm}^3$ ) ve SiC ( $3.1 \text{ g/cm}^3$ ) partikülleri (Alfa Aesar) kullanılmıştır. Kullanılan seramik takviye partiküllerinin ortalama partikül boyutları;  $\text{B}_4\text{C}$  için 45-55nm, SiC için 40 nm'dir.

Tablo 2.1. Al2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4.85	1.78	0.312	0.374	0.385	0.138	0.042	0.005	92.114

İlk aşamada Al2024 tozlarına eleme işlemi yapılarak d50 değeri olan ortalama 50 $\mu\text{m}$  başlangıç tozları, bu çalışmada kullanılmıştır. Takviye partikülleri olarak kullanılan  $\text{B}_4\text{C}$  ve SiC tozlarının ortalama boyutları sırasıyla 45-55nm ve 40nm olup hazır bir biçimde temin edilmiştir. Matris ve takviye malzemelerinin başlangıç morfolojileri SEM cihazında incelenmiştir.



Şekil 2.1. Elek Ünitesi

## 2.2. Malzeme Bileşimleri

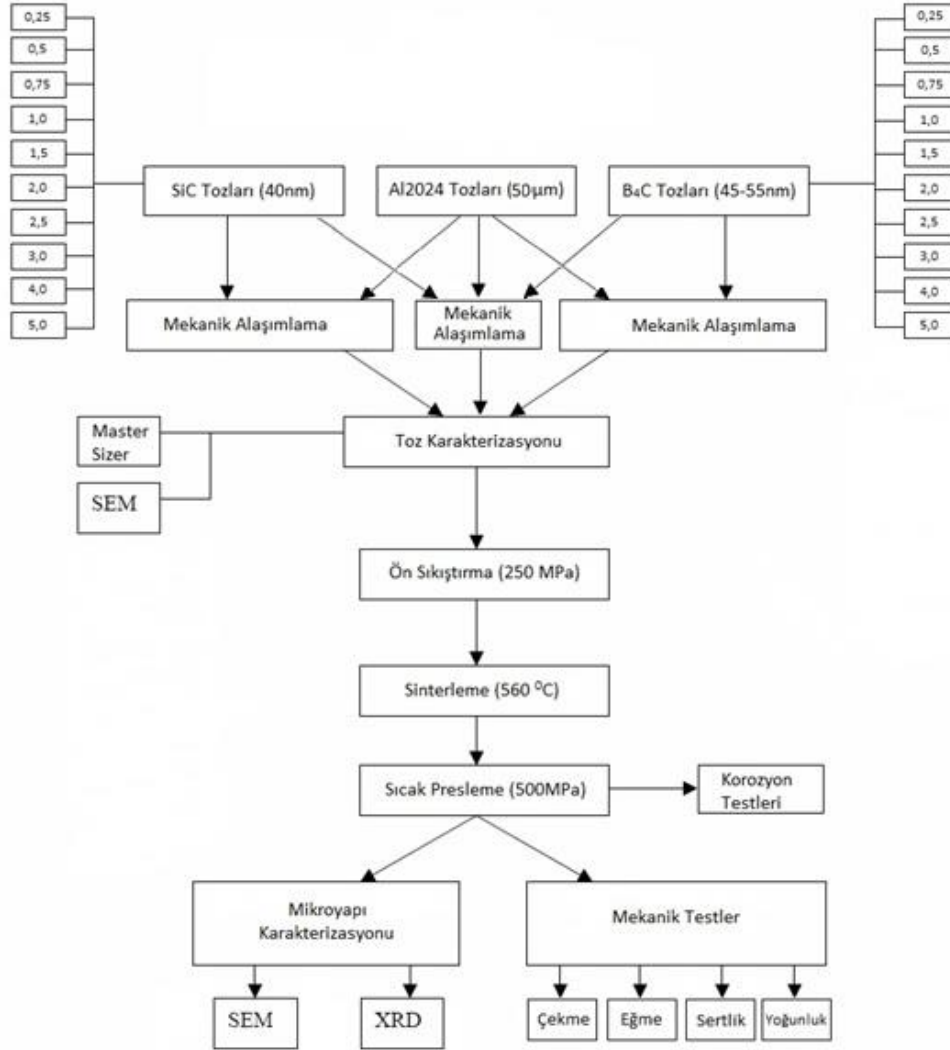
Bu çalışmada üretilecek olan kompozit ve hibrit kompozitlerin bileşimleri ve tüm numunelerin adlandırılması Tablo 2.2’de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Kompozitlerin bileşimleri ve adlandırılmaları

Numune Kodu	Takviye Türü	Takviye Oranı (%ağ.)	
<b>Al2024</b>	-	0	
<b>B<sub>0.25</sub></b>	<b>B<sub>4</sub>C</b>	0.25	
<b>B<sub>0.50</sub></b>		0.5	
<b>B<sub>0.75</sub></b>		0.75	
<b>B<sub>1</sub></b>		1.0	
<b>B<sub>1.5</sub></b>		1.5	
<b>B<sub>2</sub></b>		2.0	
<b>B<sub>2.5</sub></b>		2.5	
<b>B<sub>3</sub></b>		3.0	
<b>B<sub>4</sub></b>		4.0	
<b>B<sub>5</sub></b>		5.0	
<b>S<sub>0.25</sub></b>		<b>SiC</b>	0.25
<b>S<sub>0.50</sub></b>			0.5
<b>S<sub>0.75</sub></b>			0.75
<b>S<sub>1</sub></b>	1.0		
<b>S<sub>1.5</sub></b>	1.5		
<b>S<sub>2</sub></b>	2.0		
<b>S<sub>2.5</sub></b>	2.5		
<b>S<sub>3</sub></b>	3.0		
<b>S<sub>4</sub></b>	4.0		
<b>S<sub>5</sub></b>	5.0		
<b>BS<sub>0.25</sub></b>	<b>B<sub>4</sub>C-SiC</b>	0.25	
<b>BS<sub>0.50</sub></b>		0.5	
<b>BS<sub>0.75</sub></b>		0.75	
<b>BS<sub>1</sub></b>		1.0	
<b>BS<sub>1.5</sub></b>		1.5	
<b>BS<sub>2</sub></b>		2.0	
<b>BS<sub>2.5</sub></b>		2.5	
<b>BS<sub>3</sub></b>		3.0	
<b>BS<sub>4</sub></b>		4.0	
<b>BS<sub>5</sub></b>		5.0	

Çalışmada öncelikli olarak toz kompozisyonları ve malzeme tasarımı yapılmıştır. B<sub>4</sub>C, SiC ve hibrit parçacık takviyeli malzemeler % ağırlıkça 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 ve 5.0 oranlarında Al2024 matris içerisine katılarak üretilmiştir.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC kompozit malzemeler için ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit kompozit için sırasıyla ağırlık % 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 ve 5.0 oranlarında takviye edilerek 30 farklı kompozit numune üretilip Tablo 2.2’de ki gibi kodlanmıştır. Hibrit nano kompozitlerde takviye elemanı olarak B<sub>4</sub>C ve SiC aynı oranda yani %50 B<sub>4</sub>C ve %50 SiC olarak eklenmiştir. Bu çalışmada en iyi çekme ve eğme mukavemeti, en iyi sertlik, en iyi korozyon dayanımı ortaya koyacak kompozisyonlar belirlenmiştir. Ayrıca kompozitlerin en iyi yoğunluk ve gözeneklilik değerlerini de sağlayacak bileşenler belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel çalışmanın akış şeması

### 2.3. Mekanik Alaşım

Bu çalışmada toz karışımları gezegen tipi bilyeli öğütücüde (Retsch PM100) 400dv/dk öğütme hızında ve 8 saatlik öğütme süresince mekanik alaşım işlemi

uygulanmıştır (Şekil 2.3). Uygulanan bu öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücünün sahip olduğu haznenin hacmi 125 ml ve bilye boyutu ise 10mm'dir. Öğütücü hazneye şarj edilen toz miktarı 60 gr ve bilye:toz ağırlık oranı ise 10:1 olarak belirlenmiştir. Öğütme işleminde  $B_4C$  ve  $SiC$  partiküllerinin  $Al_{20}24$  matris içerisinde homojen olarak dağılımı amaçlanmıştır.



Şekil 2.3. Öğütme elemanları

#### 2.4. Parçacık Boyutu

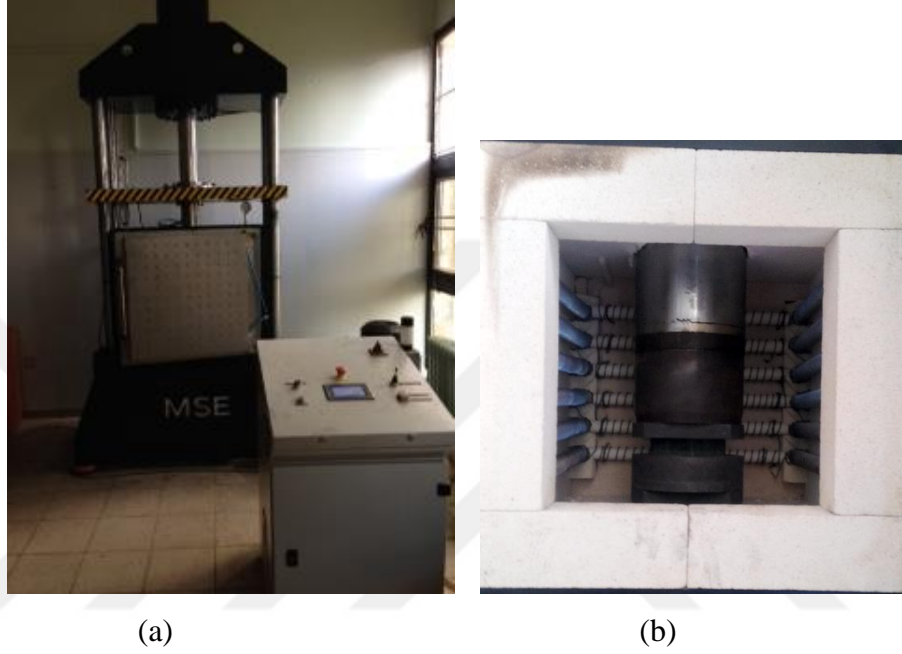
Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern Instrument<sup>TM</sup> marka Mastersizer 2000e (Şekil 2.4) model lazer parçacık boyut ölçüm cihazında saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 2.4. Parçacık boyutu ölçüm cihazı

## 2.5. Presleme

Hazırlanan toz karışımı ilk olarak soğuk şekilde ön presleme (250 MPa) işlemine tabi tutulmuştur. Ardından mükemmel yoğunlaştırma için sıcak presleme (500MPa ve 560 °C) işlemi uygulanarak ham numuneler elde edilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sıcak pres cihazı (a), pres cihazı içerisindeki fırın

## 2.6. Metalografik İşlemler

Üretilen SiC ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin içyapı incelemeleri için sırasıyla aşağıda belirtilen aşamalarda gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada otomatik kesme cihazında numuneler hassas olarak kesilmiştir. Diğer aşamalarda ise, kalıplama işlemi bakalite alma cihazında, zımparalama ve parlatma işlemleri ise otomatik zımparalama ve parlatma cihazında yapılmıştır (Şekil 2.6). Bu aşamalarda sonra dağlama yapılmıştır ve dağlama işleminde ise araç olarak %1 oranında kullanılan HF asit çözeltisi uygulanmıştır.





(a)



(b)



(c)

Şekil 2.6. (a) Kesme Cihazı (b) Bakalit Cihazı (c) Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı

Üretilen bu kompozitler, zımparalama esnasında sırasıyla 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve alümina içeren parlatma sıvısıyla parlatılmıştır.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano takviyeli Kompozitler ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit kompozitlerin mikroyapı incelemeleriyle, matris ve takviye partiküllerinin morfolojik incelemeleri ZEISS marka LS 10 (Şekil 2.7) model taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla yapılmıştır. Matris içerisinde takviye dağılımı, gözeneklilik büyüklüğü ve dağılımı SEM analizleri ile detaylı olarak yapılmıştır EDS analizleri de aynı cihazda, haritalama metodu ile matris ile takviye dağılımı ile matris içerisinde intermetalik oluşumu ve dağılım durumu incelenmiştir. SEM’de çekme ve üç nokta eğme numunelerinin kırılma

yüzeyleri incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca SEM’de korozyon numunelerinin korozyon testleri sonrası yüzey durumu ve korozyon türü araştırılmıştır.



Şekil 2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C kompozitleri ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozit numunelerinin X ışınları analizi yapılarak sinterleme sonrası numunelerde oluşan faz tanımları yapılmıştır. Bu araştırmalar ise PANalytical marka XRD cihazında (Şekil 2.8) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8. X ışınları analizi cihazı

## 2.7. Mekanik ve Fiziksel Testler

Üretilen numunelere mekanik ve fiziksel özelliklerinin tayini için çeşitli mekanik testler uygulanmıştır. Bu mekanik testler ise, yoğunluk ve gözeneklilik tayini, üç nokta eğme ve çekme mukavemeti deneyleri ve sertlik testleridir.

### 2.7.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini

Üretilen kompozitlerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre hesaplanmış deneysel yoğunlukları ise hem geometrik şekle göre hem de piknometre ile ölçülmüştür. Elde edilen deneysel yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünmesi ile bağıl yoğunluk sonuçları ortaya çıkmıştır.

$$\delta_t = [(\%W)_1 \cdot \delta_1] + [(\%W)_2 \cdot \delta_2] + \dots + [(\%W)_n \cdot \delta_n] \quad (2.2)$$

Burada;

$\delta_t$ : Kompozitin teorik yoğunluğu

$(\%W)_n$ : Her bir takviyenin karışım içindeki ağırlık olarak yüzdesi

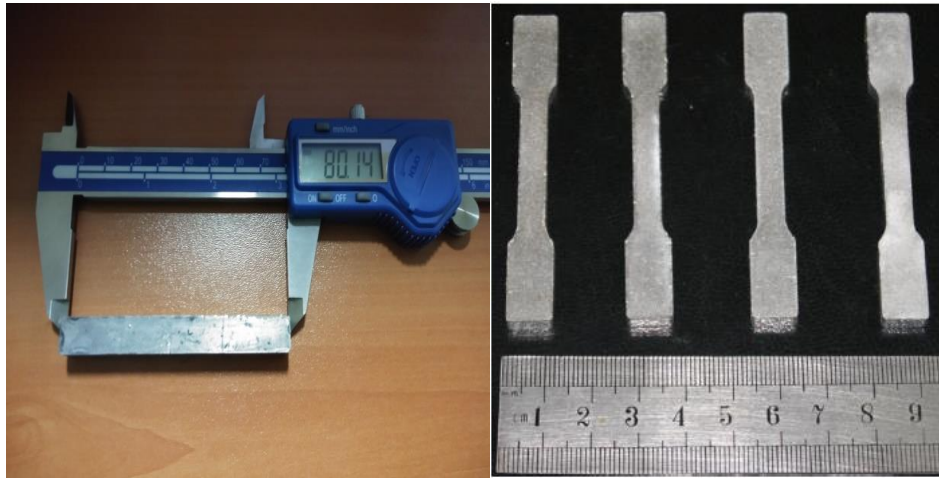
$\delta_n$ : Her bir takviyenin yoğunluğu

Bağıl yoğunluk =  $[(\delta_t - \delta_d) / \delta_t] \times 100$

Burada;

$\delta_d$ : deneysel yoğunluk

%Gözenek =  $(1 - \frac{\text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}}) \times 100$  formülünden bulunmuştur.



(a)

(b)

Şekil 2.9. Üretilen (a) eğme ve (b) çekme numuneleri

### 2.7.2. Eğme ve Çekme Mukavemeti Testleri

Üç nokta eğme ve çekme testleri MTS 45 (Şekil 2.10) model test cihazında 3mm/sn eğme hızından, 0.3 mm/sn çekme hızında test yapılmıştır. Her bir gruptaki numuneler için üçer kez üç nokta eğme ve çekme deneyleri yapıp, ortalama değerleri sonuç olarak alınmıştır.



Şekil 2.10. MTS 45 model universal eğme ve çekme cihazı

### 2.7.3. Sertlik Testleri

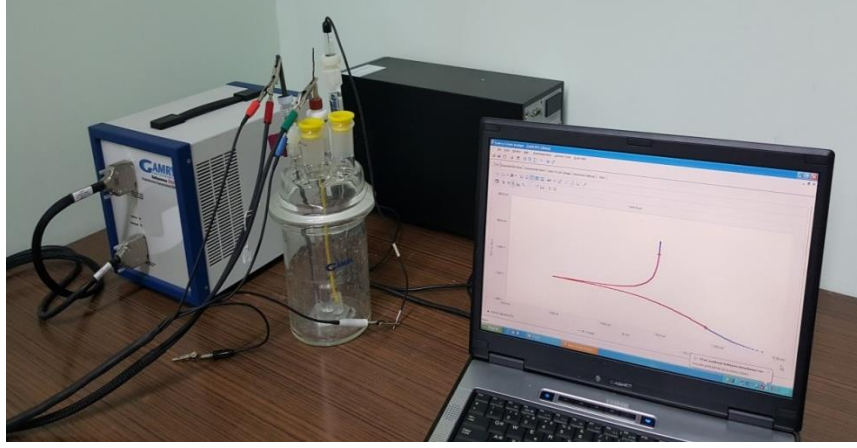
Üretilen kompozitler için sertlik ölçümleri Innovatest Nemesis 9000 sertlik cihazında Brinell sertlik ölçümü olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.11). Brinell sertlik ölçümünde 2.5mm çapında baticı uç ve 31.25 kgf yük 10 sn uygulanmıştır. Yapılan ölçümler her bir numune için ayrı ayrı beşer kez yapılmış ve en düşük ve en yüksek değerler çıkarılıp, kalan üç değerın ortalaması alınıp sonuç hesaplanmıştır.



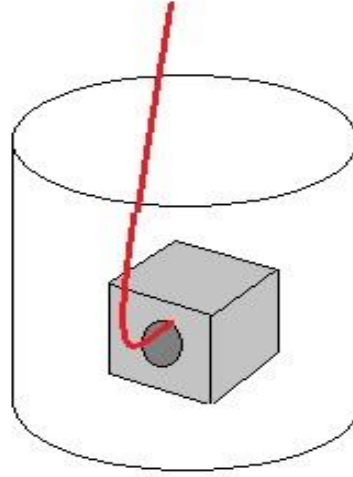
Şekil 2.11. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı

## 2.8. Korozyon Testleri

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C kompozitleri ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitleri korozyon davranışlarını belirlemek için potansiyodinamik polarizasyon testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12). Elektrolit çözeltisi olarak %3.5 NaCl tuzu çözeltisi kullanılmıştır. Korozyon testleri öncesinde hazırlanmış numunelerin yüzeyleri metanol ile yakınıp, kurutulmuştur. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerine -500 mV katodik potansiyel ile başlanmış, ölçümlere 1 mV/s tarama hızı ile +500 mV anodik potansiyeline kadar devam edilip bitirilmiştir. Elektrolit korozyon davranışı akım yoğunluğu ve korozyon potansiyeline göre değerlendirme yapılmıştır. Üretilen kompozit numunelerin korozyon davranışlarının belirlenmesi için potansiyodinamik polarizasyon testlerinden en az üç adet yapıp ortalaması sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.12. Gamry marka korozyon test cihazı



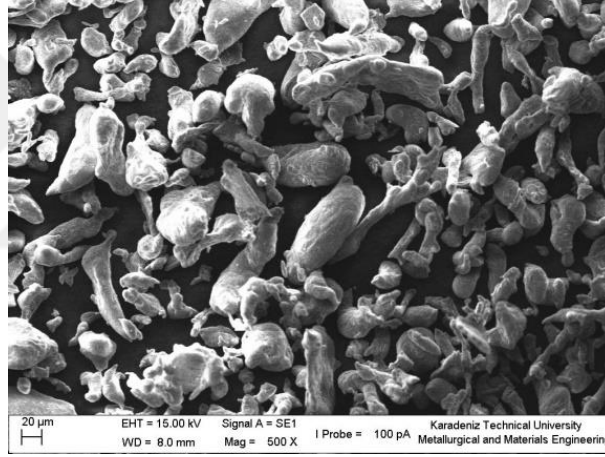
Şekil 2.13. Korozyon testleri için hazırlanmış numune şematik resmi

### 3. BULGULAR

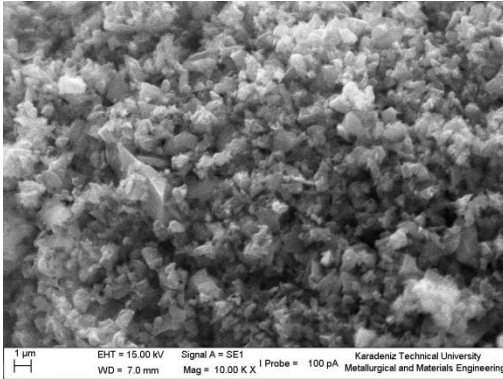
#### 3.1. Toz Karakterizasyonu

##### 3.1.1. Toz Morfolojisi

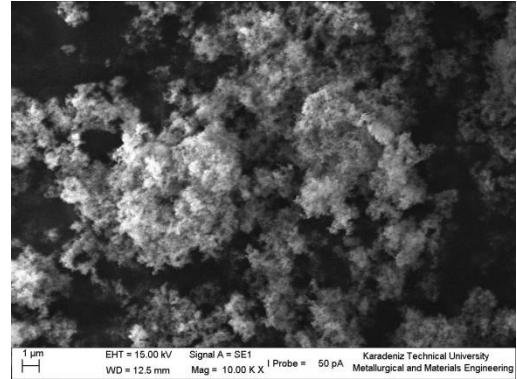
Alınan görüntülerden de anlaşılacağı üzere kullanılan Al2024 tozlarının başlangıçtaki morfolojisi düzensiz şekillidir. Şekil 3.1’de hem matris malzemesi olan Al2024 hem de takviye olarak kullanılan B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının başlangıç morfolojileri verilmiştir.



(a)



(b)

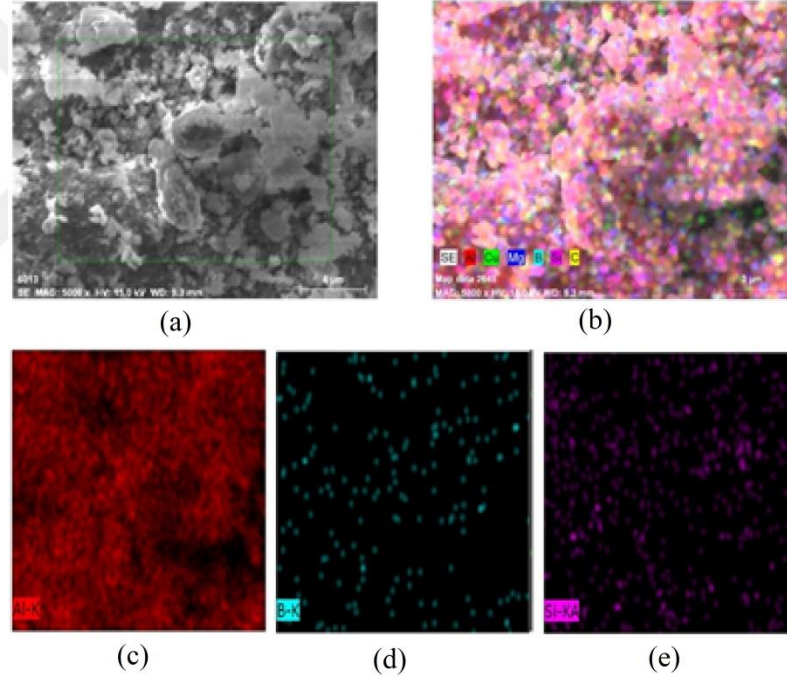


(c)

Şekil 3.1. Yapılan çalışmada kullanılan başlangıç tozlarının morfolojileri, (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) B<sub>4</sub>C ve (c) SiC

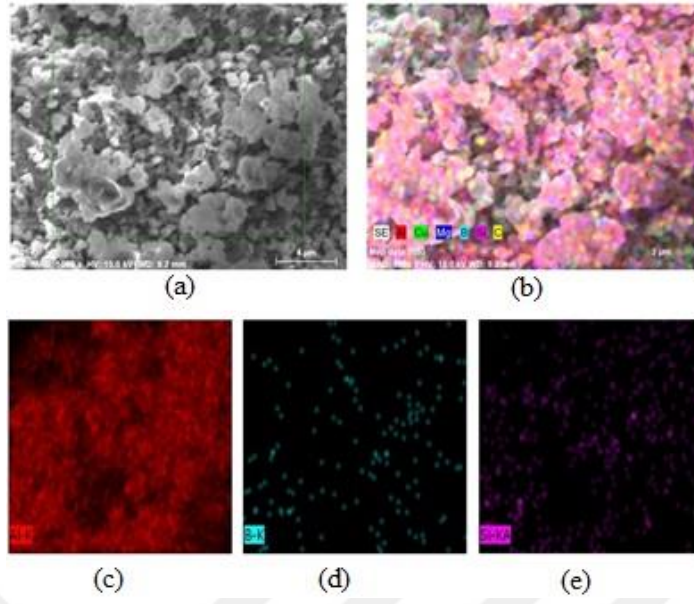
### 3.1.2. Öğütme Süresi ile Toz Morfolojilerinin Değişimi

$B_4C$  ve SiC takviye elemanlarının matris malzemesinden daha sert partiküller olmasından dolayı, matris içerisine takviye elemanlarının gömülmesi ve homojen olarak dağılması için çeşitli öğütme saatleri uygulanmıştır. Uygulanan bu farklı öğütme süreleri EDS element dağılım incelemesiyle ortaya koyulmuştur. Öğütme süreleri olarak 1, 2, 4, 8 ve 10 saat seçilip, hem  $B_4C$  ve SiC takviyeleri kullanılarak öğütmeye tabi tutulmuştur. Öğütmeler sonrası 8 saatlik öğütmenin takviye elemanlarının matris içerisine daha iyi gömüldüğü ve daha homojen yapının elde edildiği görülmüştür. Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da %2  $B_4C$  ve SiC hibrit kompozit tozlarının elementel dağılımları gösterilmiştir.

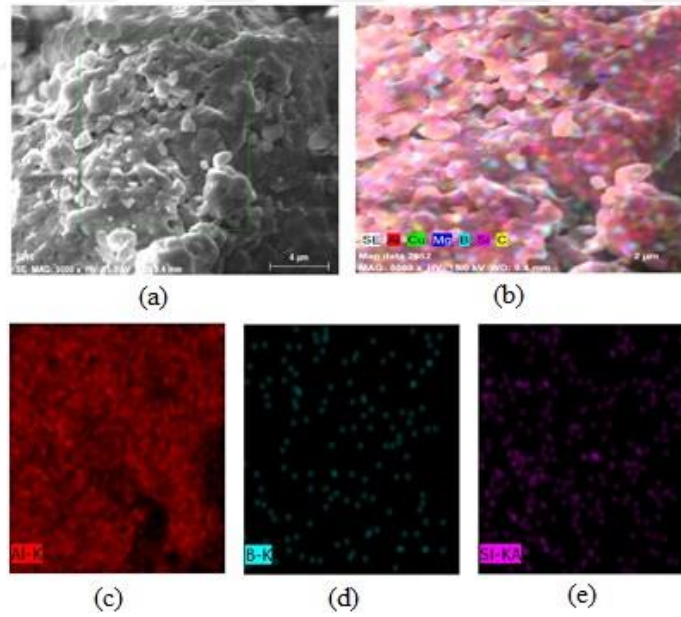


Şekil 3.2. Al2024/  $B_4C$ -SiC hibrit nano kompozit tozlarının 1 saat öğütme sonrası; (a) yüzey morfolojisi, (b) Al2024 alaşımı,  $B_4C$  ve SiC dağılımı, (c) Al dağılımı, (d) ve (e)  $B_4C$  ve SiC tozlarının matris içerisinde dağılımı.

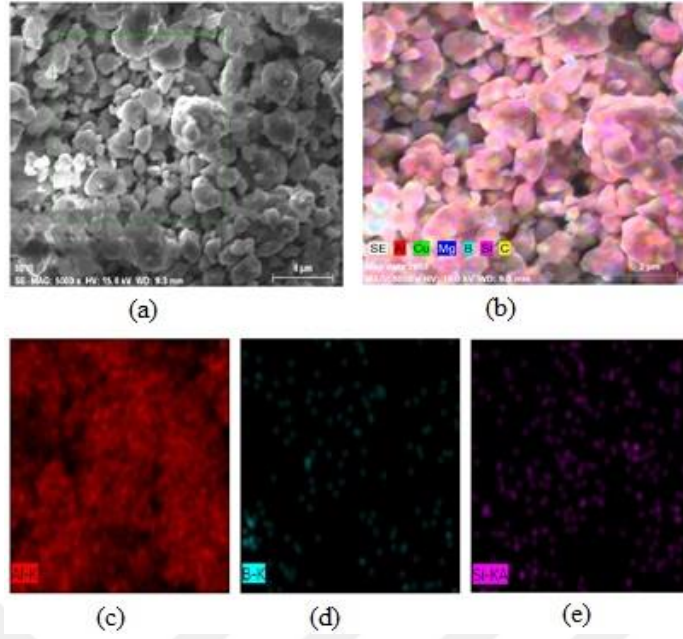




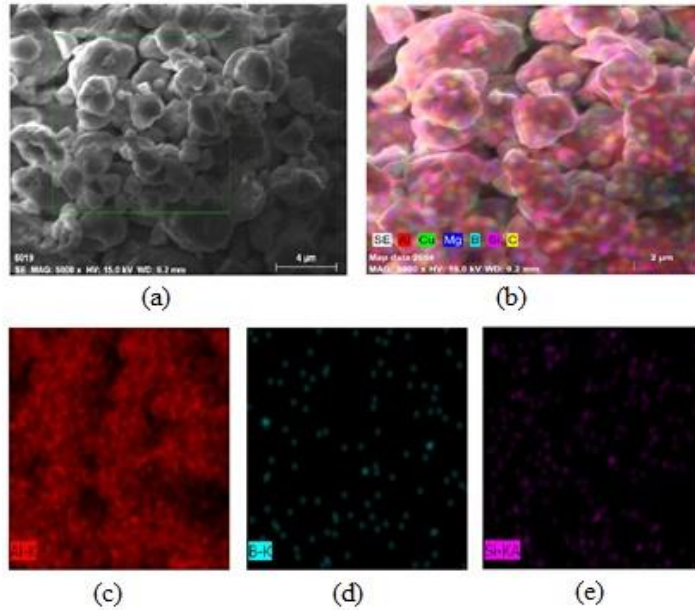
Şekil 3.3. Al2024/ B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 2 saat öğütme sonrası; (a) yüzey morfolojisi, (b) Al2024 alaşımı, B<sub>4</sub>C ve SiC dağılımı, (c) Al dağılımı, (d) ve (e) B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının matris içerisinde dağılımı.



Şekil 3.4. Al2024/ B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 4 saat öğütme sonrası; (a) yüzey morfolojisi, (b) Al2024 alaşımı, B<sub>4</sub>C ve SiC dağılımı, (c) Al dağılımı, (d) ve (e) B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının matris içerisinde dağılımı.

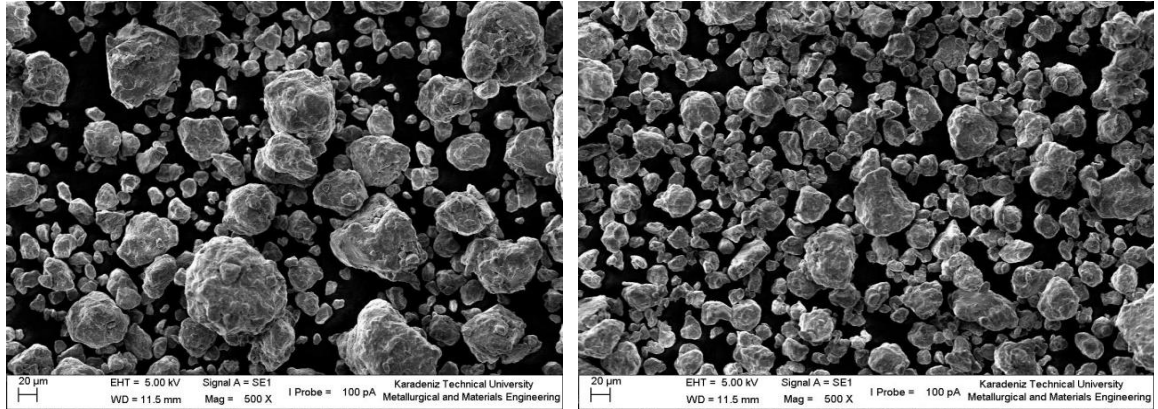


Şekil 3.5. Al<sub>2024</sub>/ B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 8 saat öğütme sonrası; (a) yüzey morfolojisi, (b) Al<sub>2024</sub> alaşımı, B<sub>4</sub>C ve SiC dağılımı, (c) Al dağılımı, (d) ve (e) B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının matris içerisinde dağılımı.



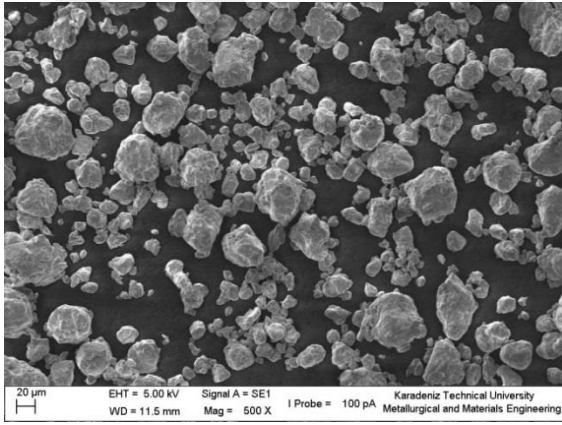
Şekil 3.6. Al<sub>2024</sub>/ B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 10 saat öğütme sonrası; (a) yüzey morfolojisi, (b) Al<sub>2024</sub> alaşımı, B<sub>4</sub>C ve SiC dağılımı, (c) Al dağılımı, (d) ve (e) B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının matris içerisinde dağılımı.

### 3.1.2.1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C Nano Kompozit Tozları

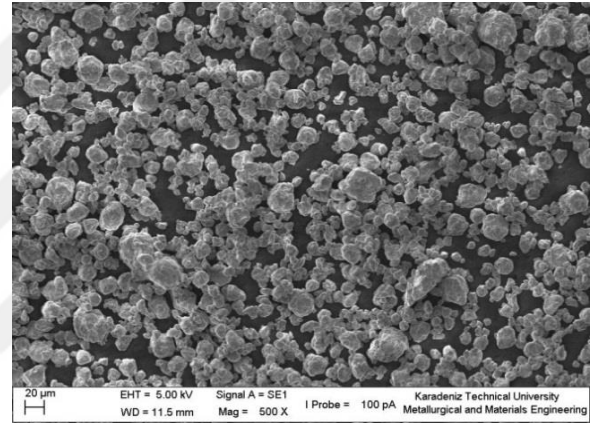


(a)

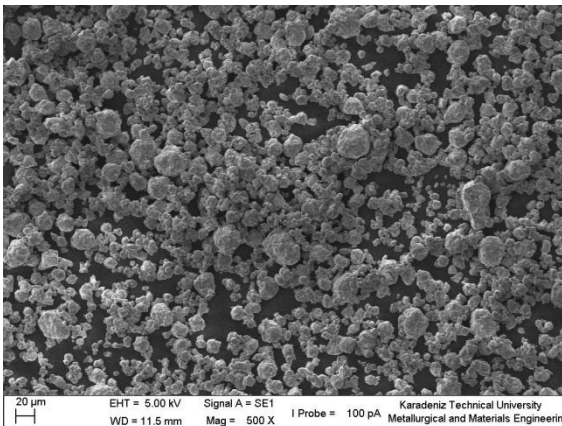
(b)



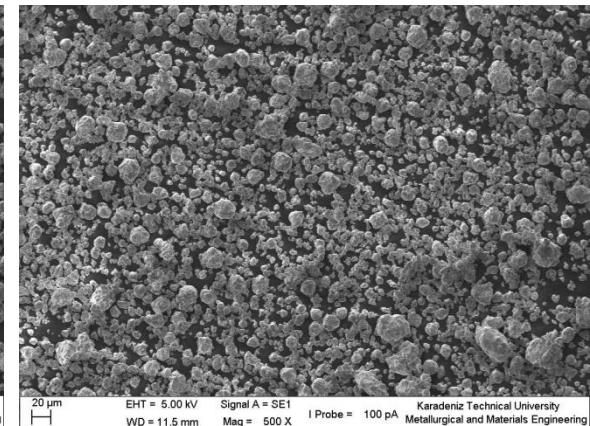
(c)



(d)



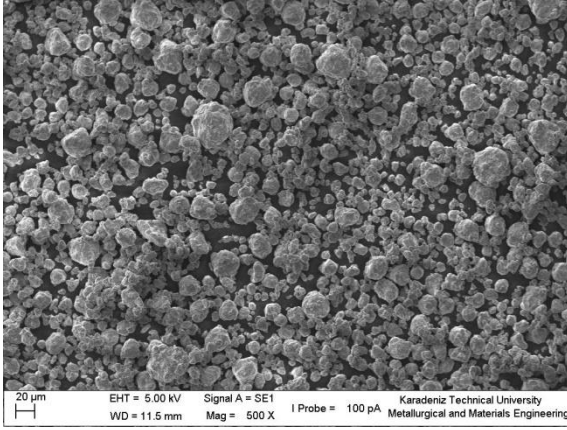
(e)



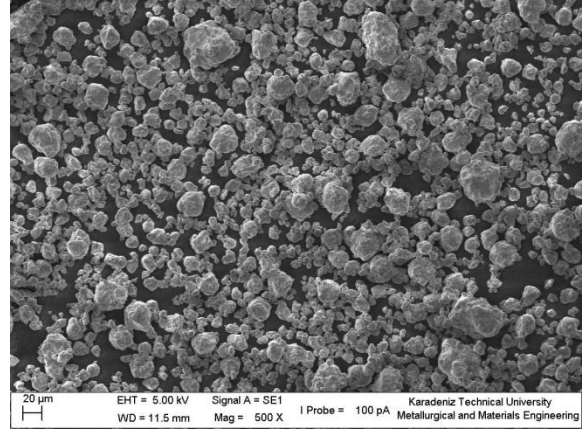
(f)

Şekil 3.7. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri (a)0.25, (b)0.5, (c)0.75, (d)1.0, (e)1.5, (f)2.0, (g)2.5, (h)3.0, (i)4.0, (j)5.0

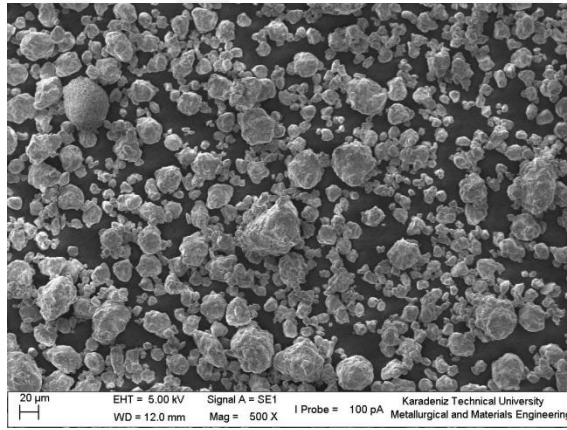
Şekil 3.7.'nin devamı



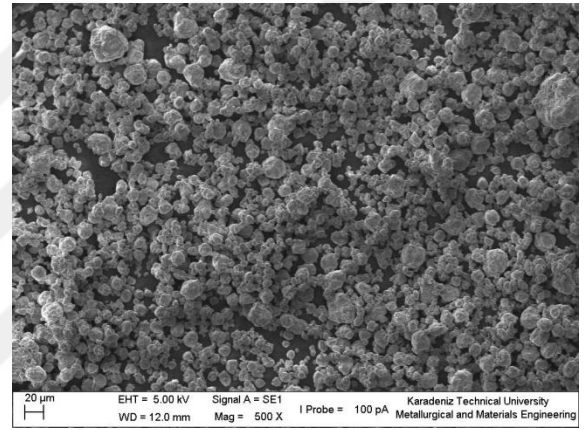
(g)



(h)

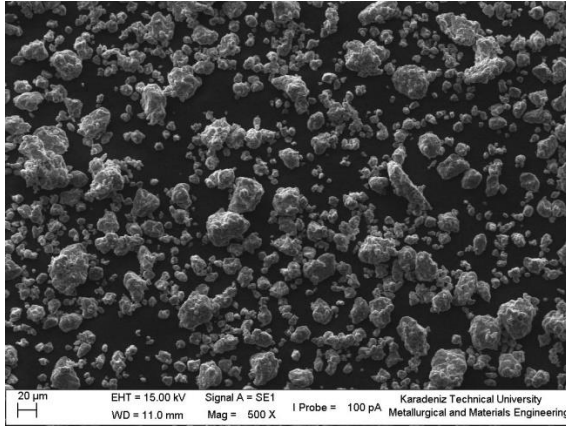


(i)

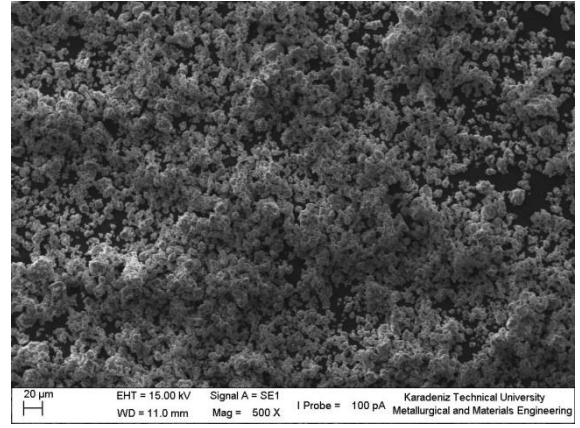


(i)

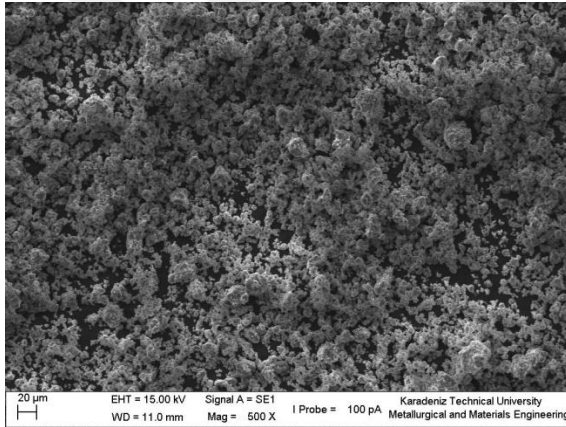
### 3.1.2.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Nano Kompozit Tozları



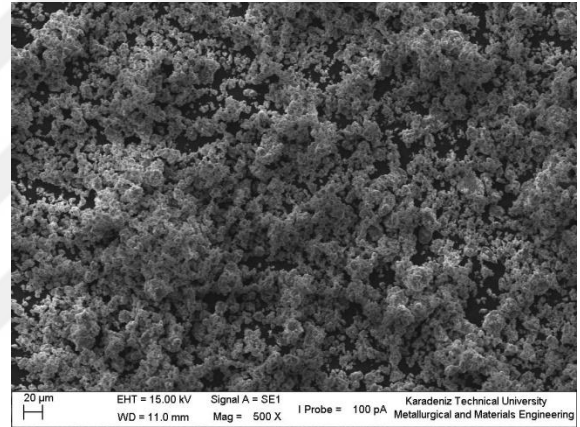
(a)



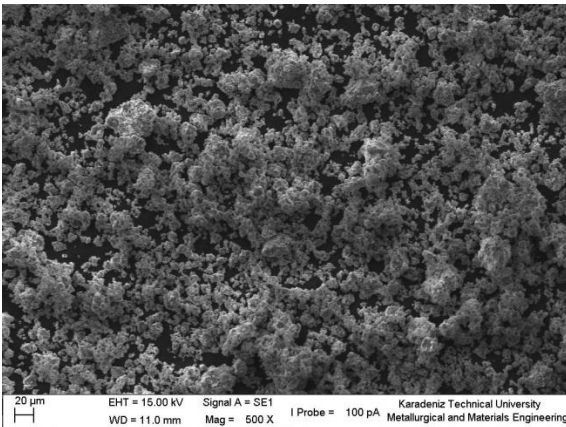
(b)



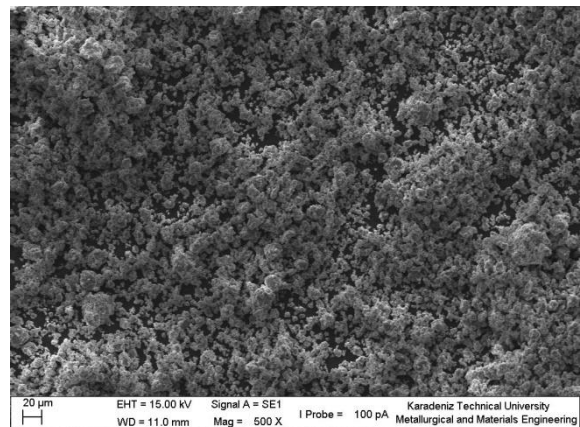
(c)



(d)



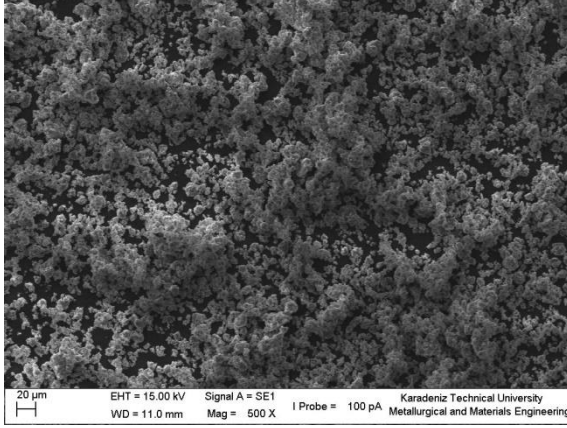
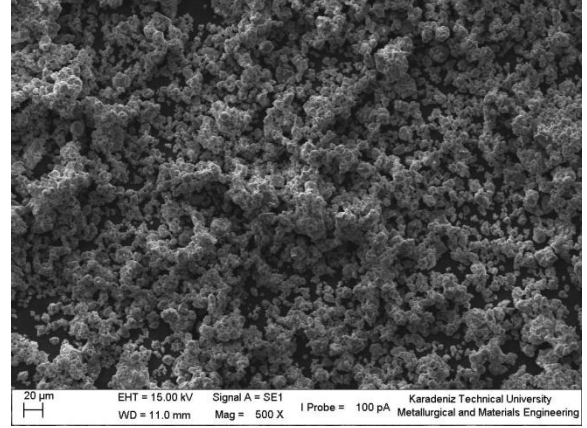
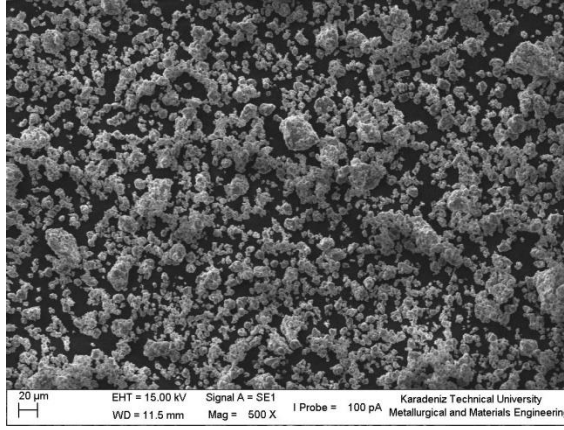
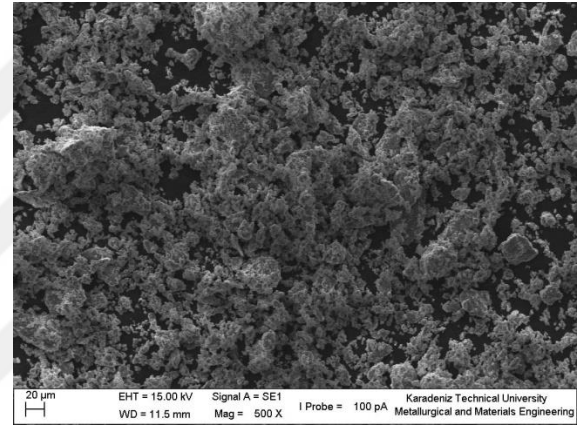
(e)



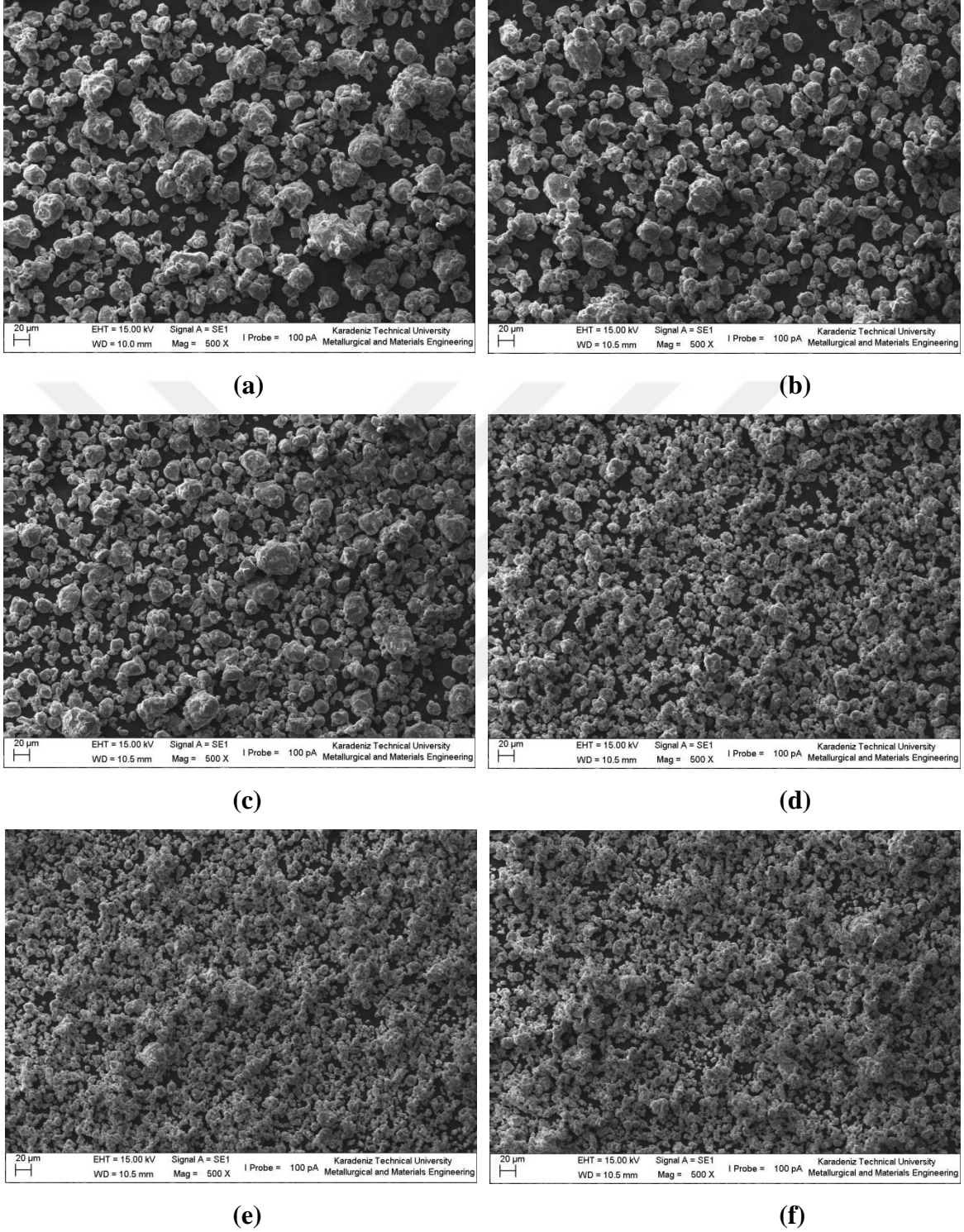
(f)

Şekil 3.8. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri (a)0.25, (b)0.5, (c)0.75, (d)1.0, (e)1.5, (f)2.0, (g)2.5, (h)3.0, (i)4.0, (i)5.0

Şekil 3.8'in devamı

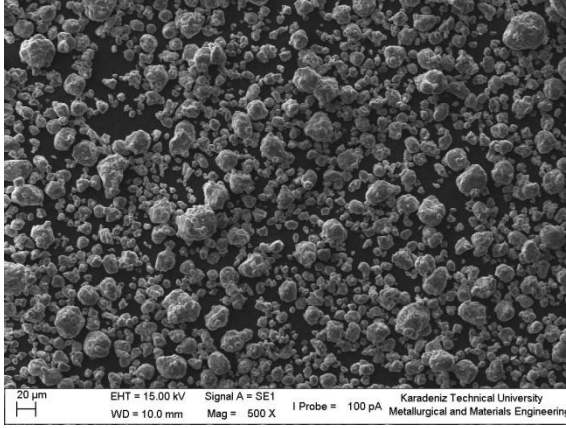
**(g)****(h)****(i)****(i)**

### 3.1.2.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC Nano Kompozit Tozları

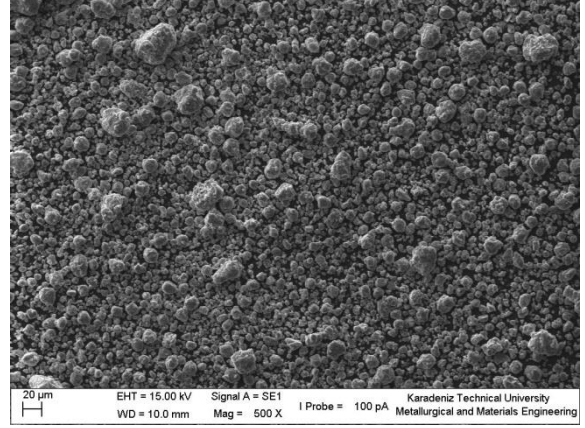


Şekil 3.9. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının 8 saatlik öğütme işlemi sonrası takviye oranı değişimi ile oluşan toz morfolojileri (a)0.25, (b)0.5, (c)0.75, (d)1.0, (e)1.5, (f)2.0, (g)2.5, (h)3.0, (i)4.0, (j)5.0

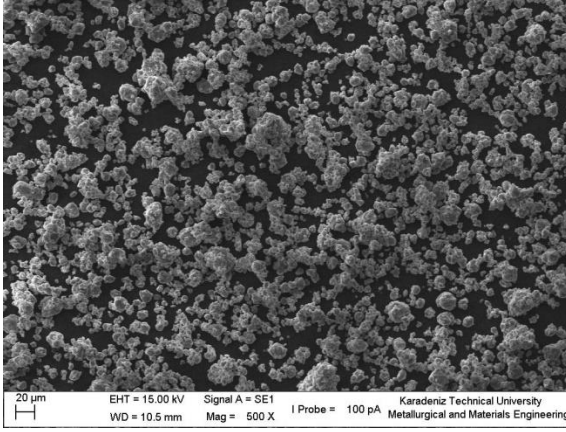
Şekil 3.9'un devamı



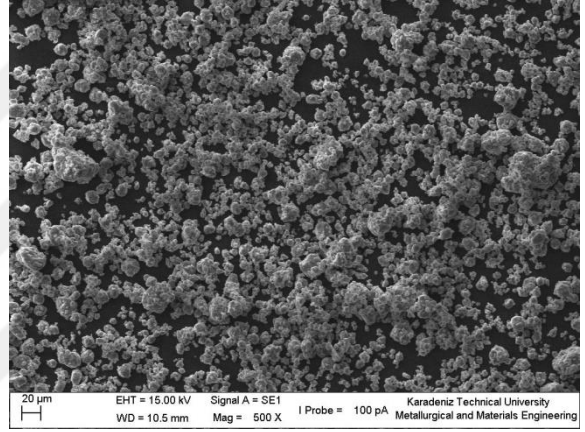
(g)



(h)



(i)

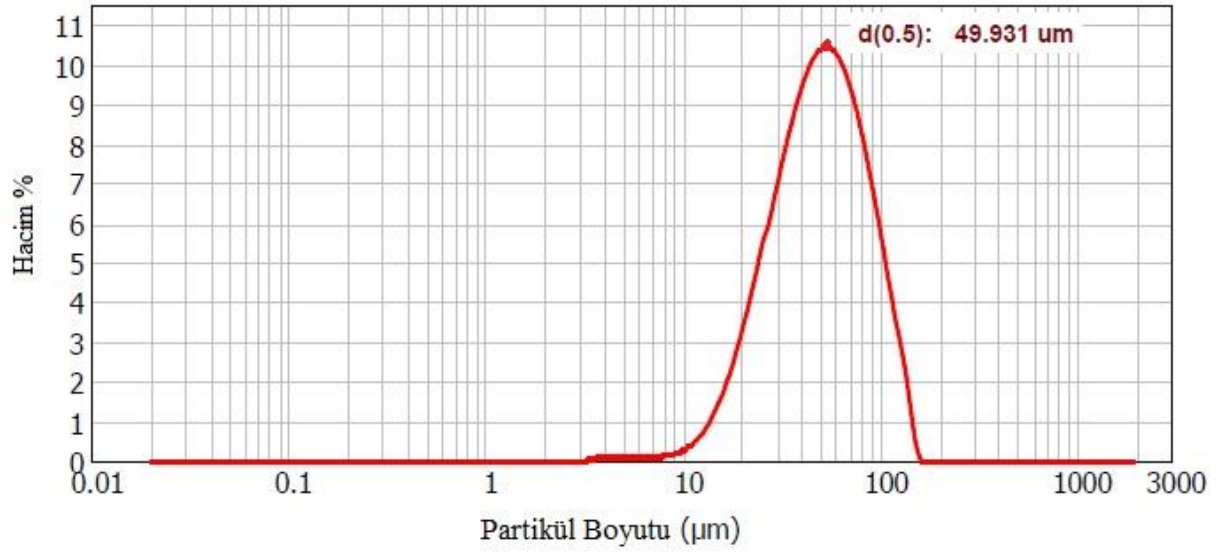


(j)

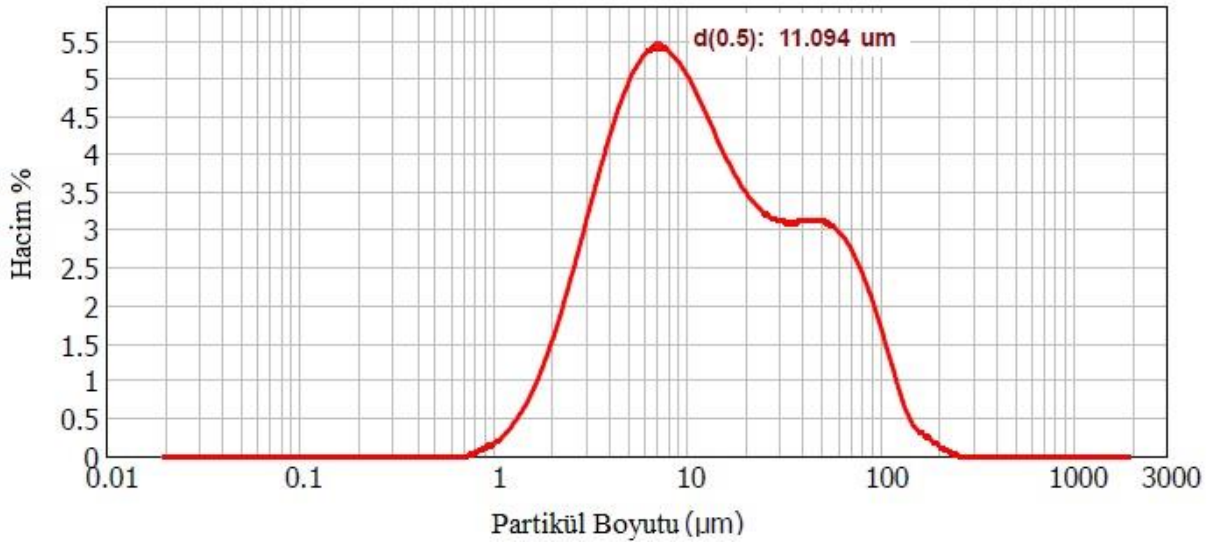
### 3.1.3. Partikül Boyutu

Mekanik alaşımlama işlemi esnasında yüksek enerjiye sahip öğütme işlemine maruz kalan toz partiküllerinin bilye:toz:değirmen ve bilye:toz:bilye yüzeyleri arasında oluşan çarpışmalar sonucu partiküller hem morfolojik anlamda hem de boyut anlamında değişimler gösterirler. Genel görüş olarak bu tozların soğuk kaynak sonucu boyutlarında artış, ilerleyen zamanda ise azalarak kararlı hale geldiğidir. Bu oluşumlar ise tozların başlangıç boyutlarına ve morfolojilerine, işlem kontrol katkısının miktarına ve uygulama şekline bağlıdır. Öğütme işlemi sonrası matris malzemesi olarak kullanılan Al2024 alaşımının boyutunda takviye malzemelerinin de ilavesiyle Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 'de görüldüğü üzere bir azalma söz konusudur.

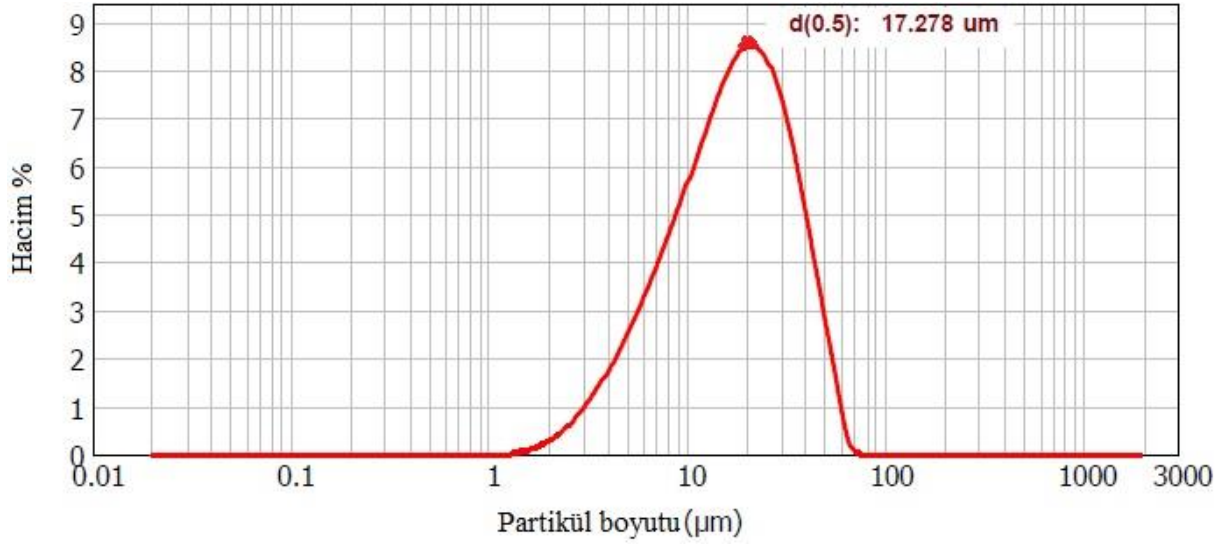




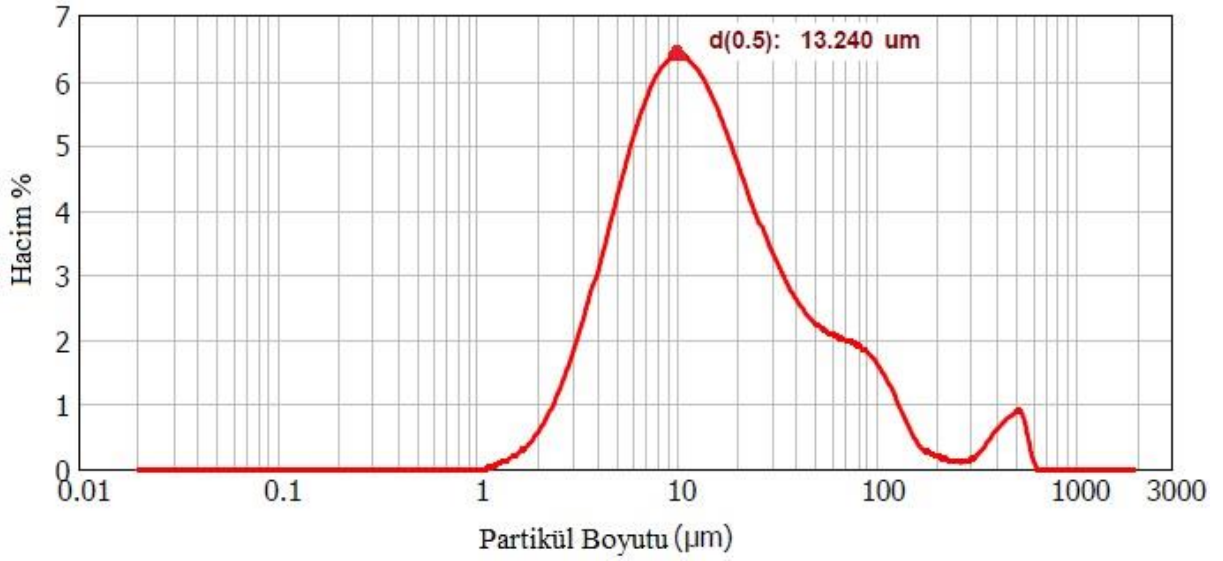
Şekil 3.10. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> başlangıç tozlarının partikül boyutu analiz sonucu



Şekil 3.11. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi



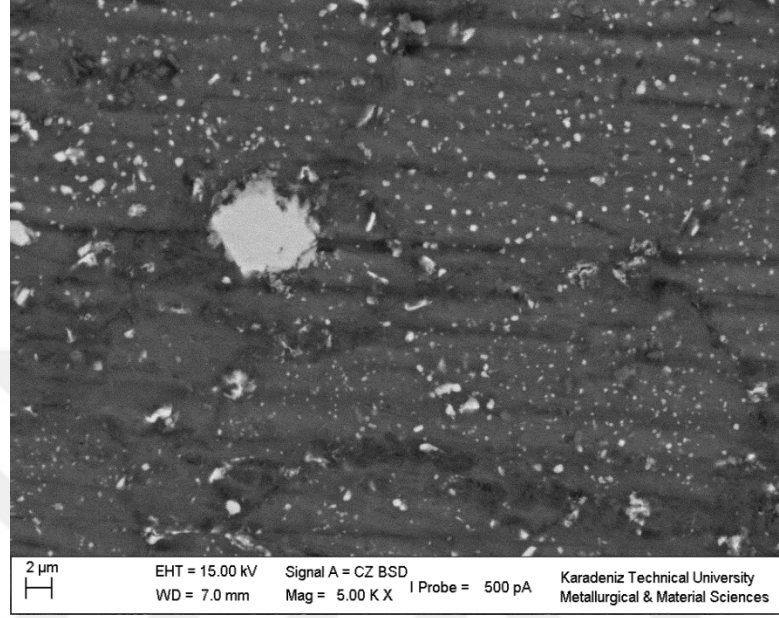
Şekil 3.12. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi



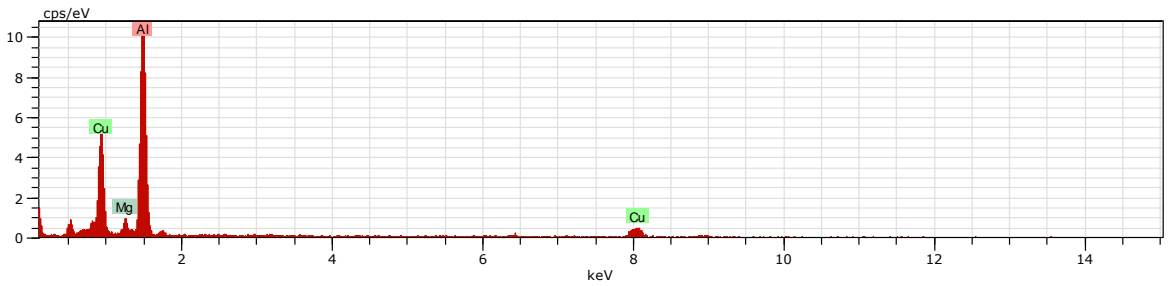
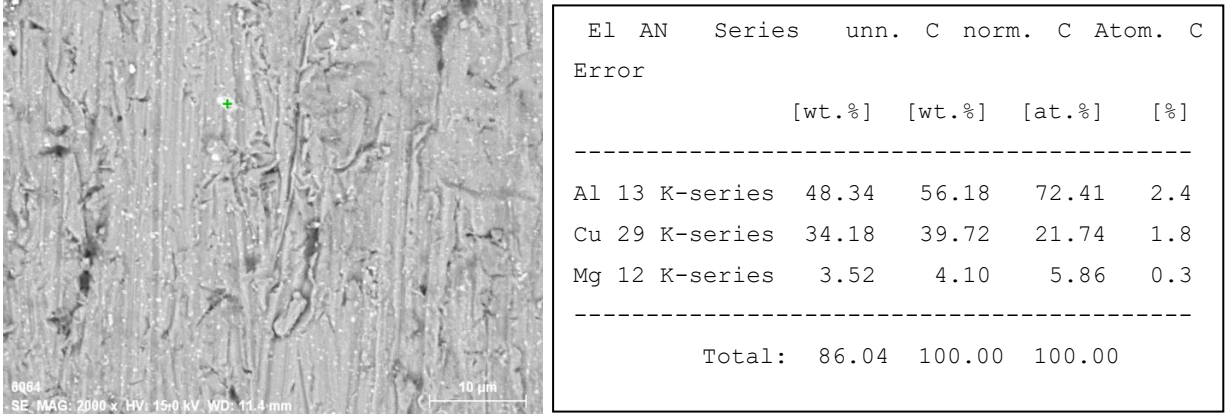
Şekil 3.13. 8 saat öğütme işlemi sonrası Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit tozlarının partikül boyutu analizi

### 3.2. Üretilen Kompozitlerin İç Yapı İncelemeleri

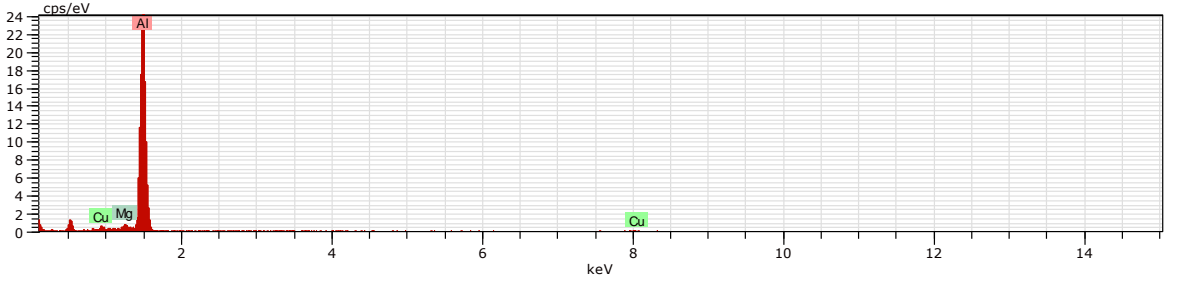
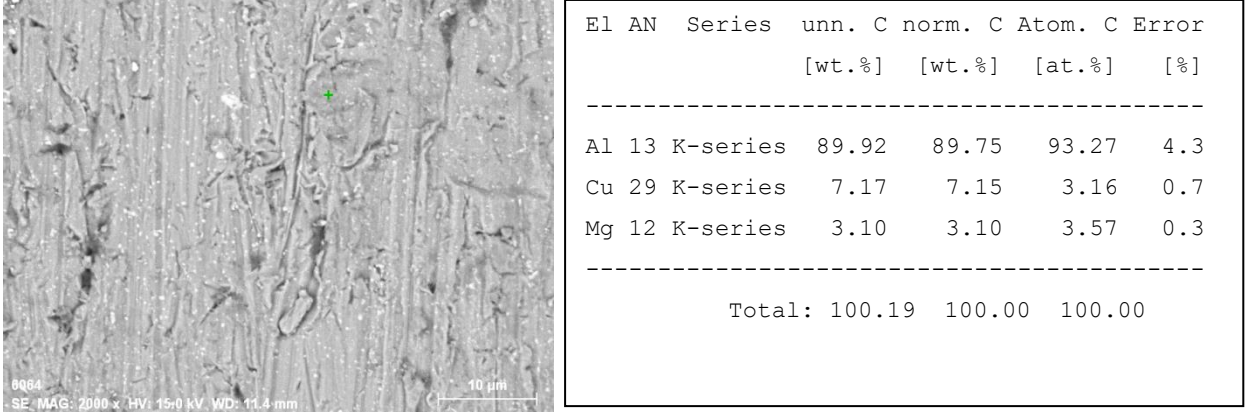
#### 3.2.1. Al<sub>20</sub>Zn<sub>4</sub> Alaşımının İç Yapı Görüntüleri



Şekil 3.14. Sinterlenmiş Al<sub>20</sub>Zn<sub>4</sub> alaşım numunesinin mikroyapısı

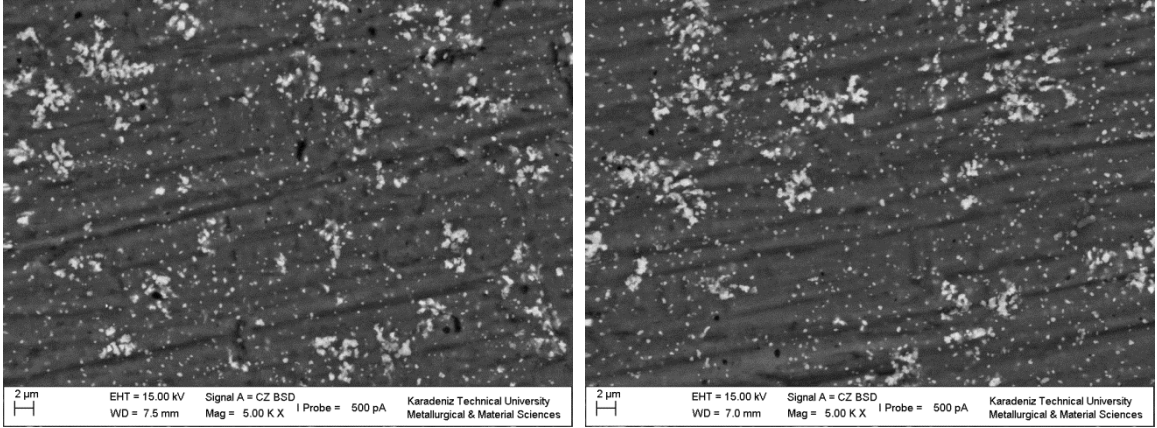


Şekil 3.15. Sinterlenmiş Al<sub>20</sub>Zn<sub>4</sub> alaşım numunesinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi



Şekil 3.16. Sinterlenmiş saf Al2024 alaşım numunesinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi

### 3.2.2. Al2024/B<sub>4</sub>C Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri

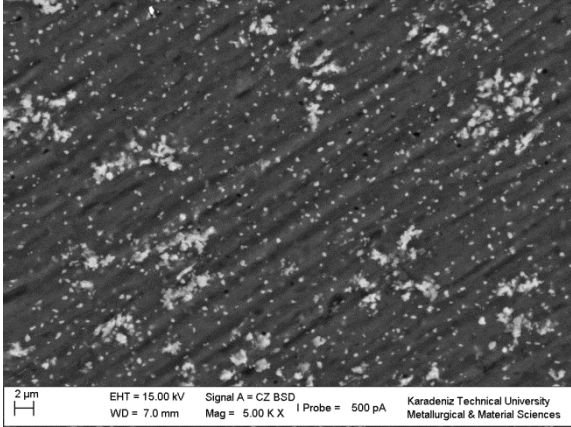


(a)

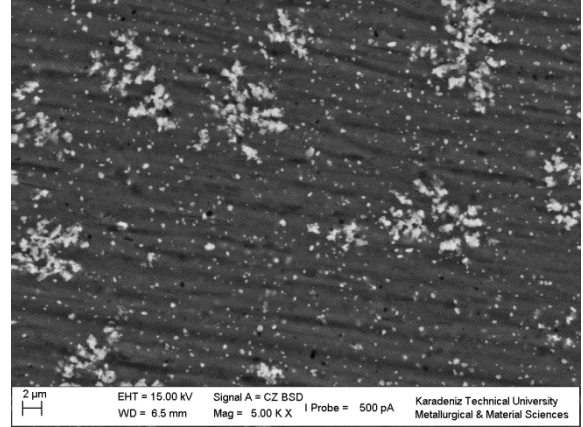
(b)

Şekil 3.17. Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)B<sub>0.25</sub>, (b)B<sub>0.50</sub>, (c)B<sub>0.75</sub>, (d)B<sub>1</sub>, (e)B<sub>1.5</sub>, (f)B<sub>2</sub>, (g)B<sub>2.5</sub>, (h)B<sub>3</sub>, (i)B<sub>4</sub>, (i)B<sub>5</sub>

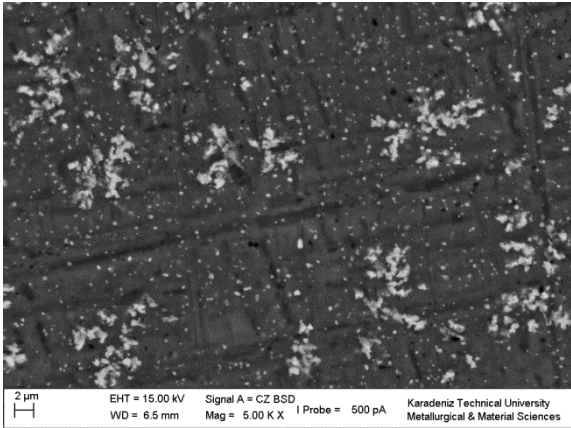
Şekil 3.17'nin devamı



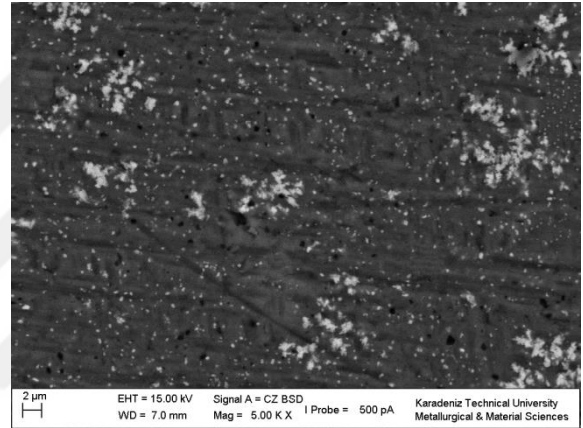
(c)



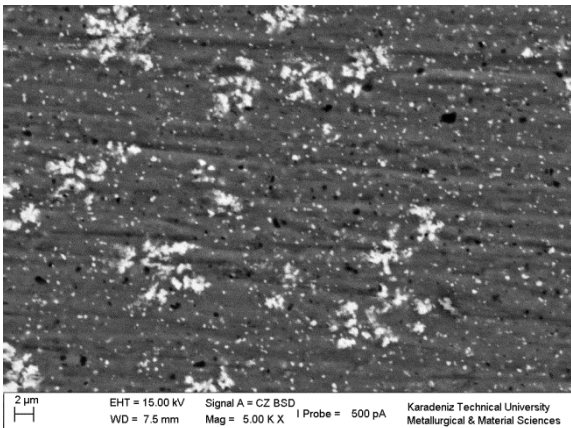
(d)



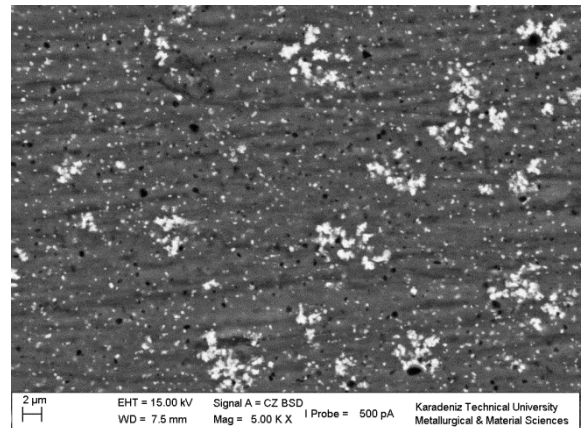
(e)



(f)

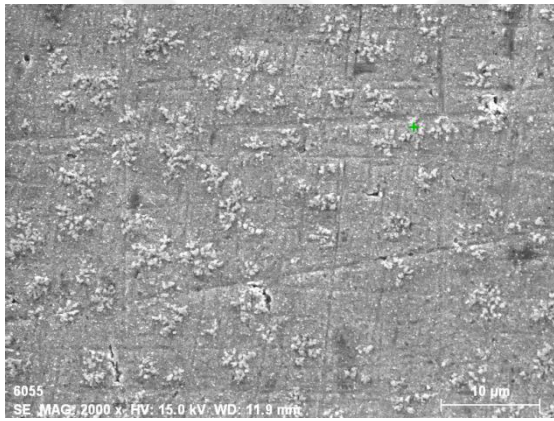
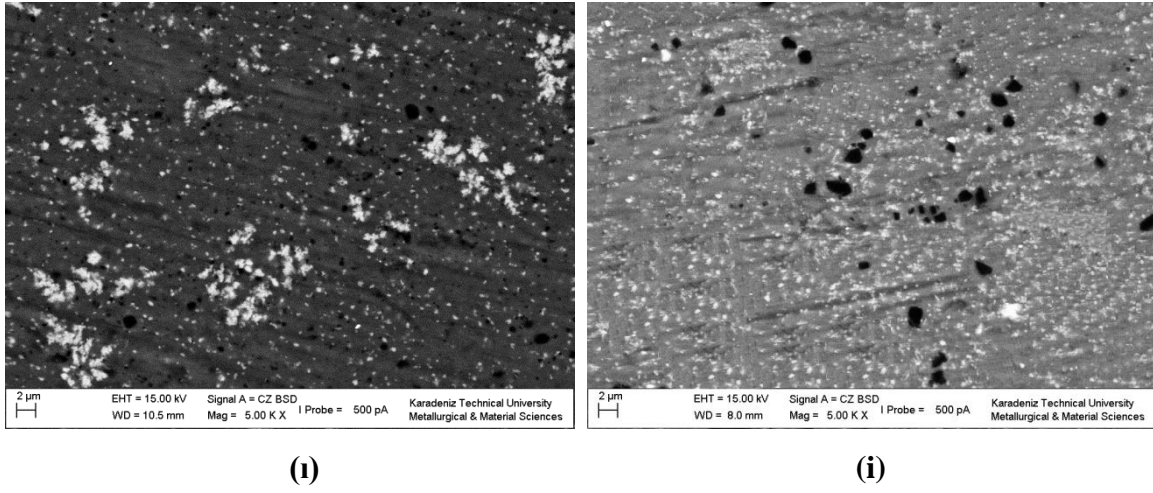


(g)

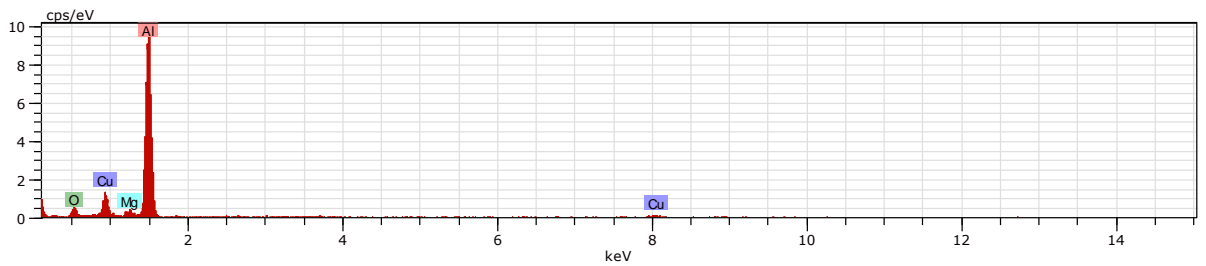


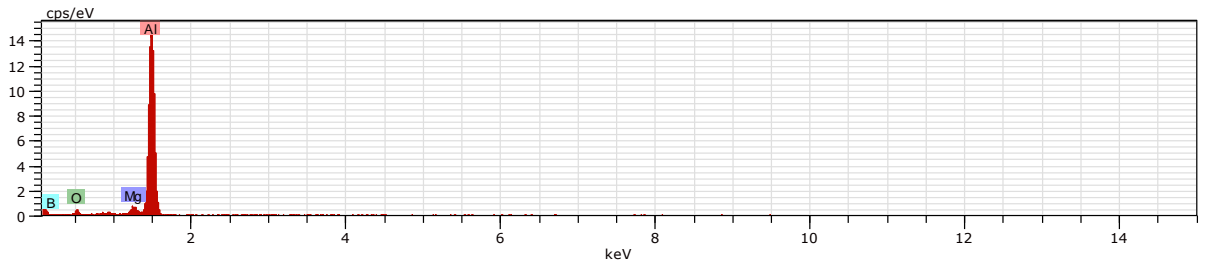
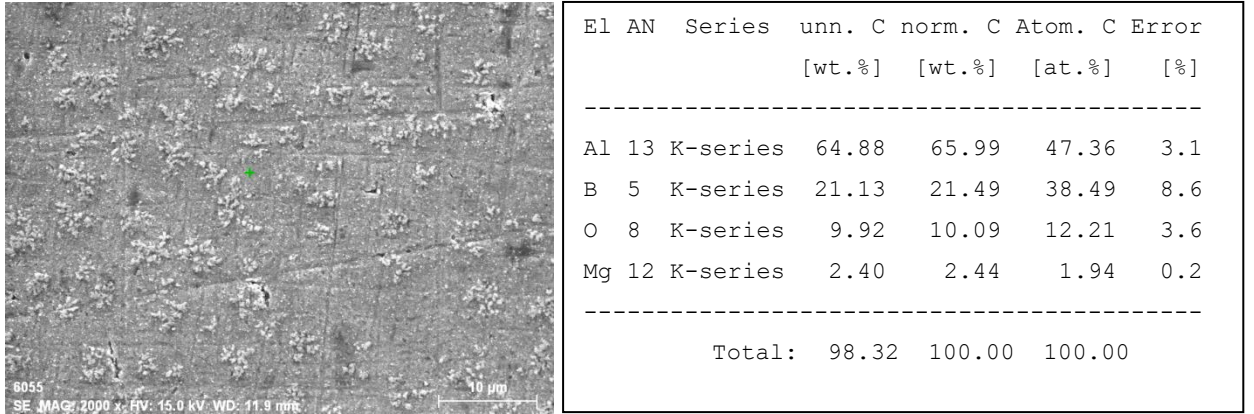
(h)

Şekil 3.17'nin devamı



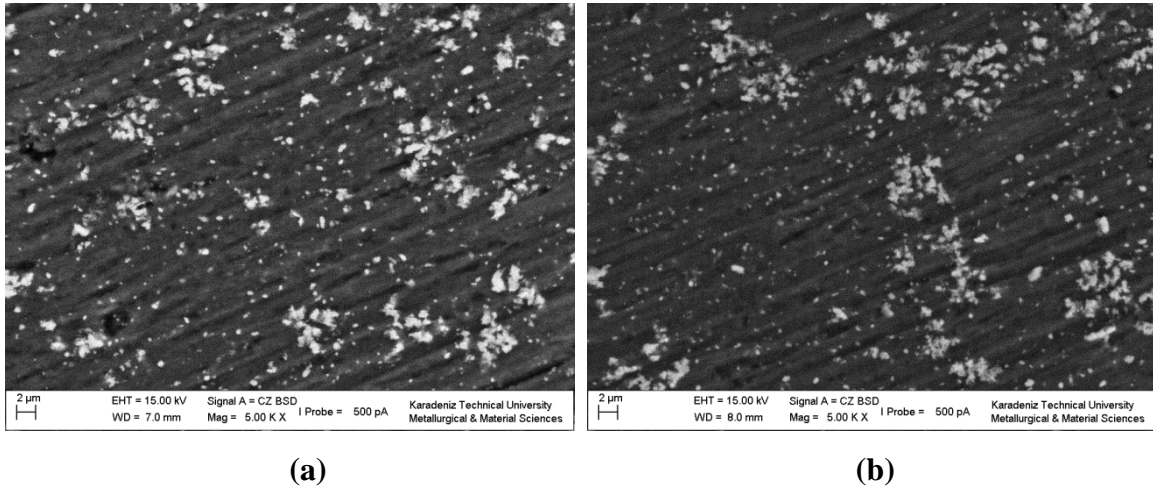
El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[%]
Al	13	K-series	73.61	68.06	68.81	3.6
Cu	29	K-series	18.47	17.08	7.33	1.7
O	8	K-series	13.35	12.35	21.05	4.2
Mg	12	K-series	2.71	2.51	2.81	0.3
Total:			108.15	100.00	100.00	

Şekil 3.18. Sinterlenmiş Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C nano kompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi



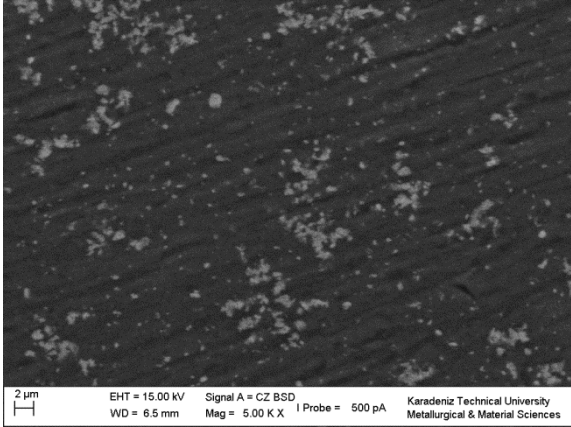
Şekil 3.19. Sinterlenmiş Al2024/B<sub>4</sub>C nano kompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi

### 3.2.3. Al2024/SiC Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri

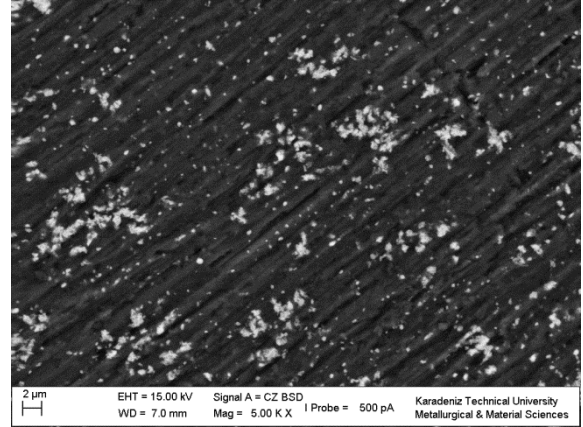


Şekil 3.20. Al<sub>2024</sub>/SiC nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)S<sub>0.25</sub>, (b)S<sub>0.50</sub>, (c)S<sub>0.75</sub>, (d)S<sub>1</sub>, (e)S<sub>1.5</sub>, (f)S<sub>2</sub>, (g)S<sub>2.5</sub>, (h)S<sub>3</sub>, (i)S<sub>4</sub>, (i)S<sub>5</sub>

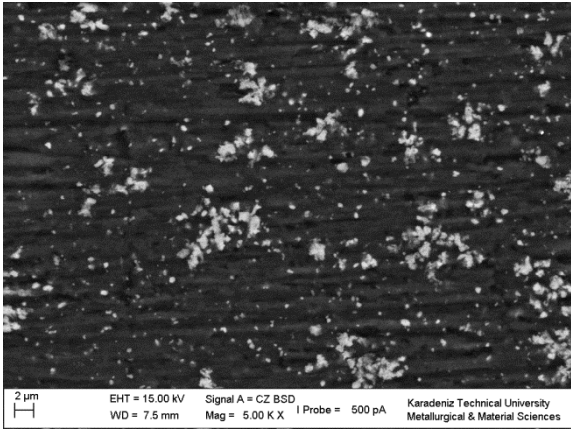
Şekil 3.20'nin devamı



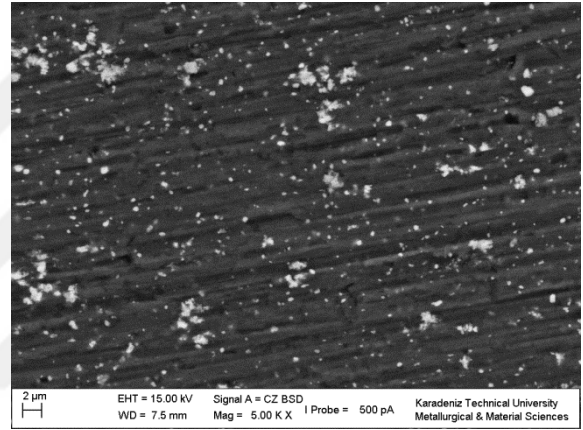
(c)



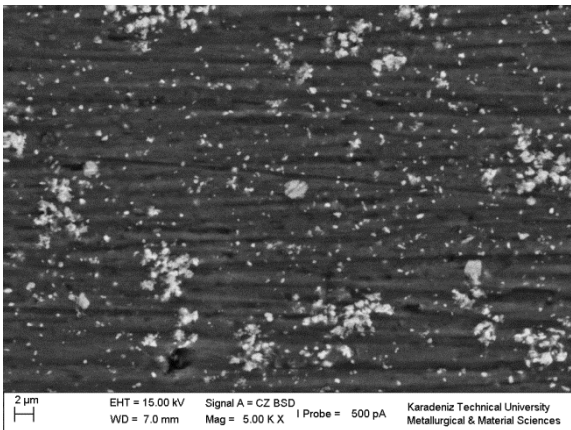
(d)



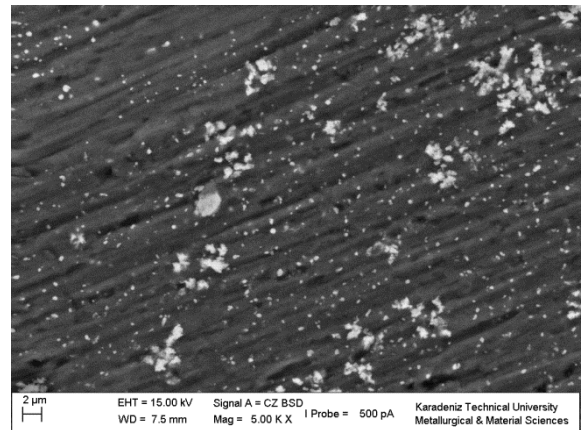
(e)



(f)



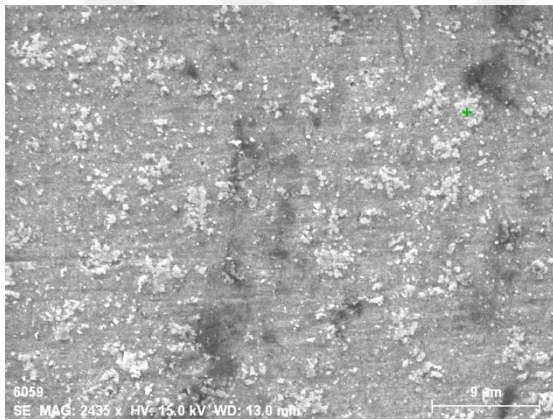
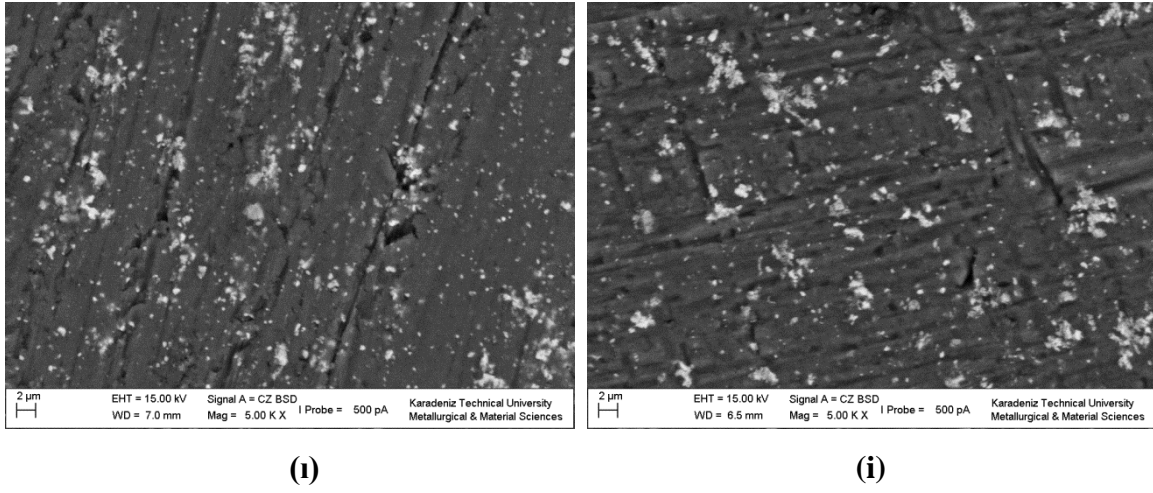
(g)



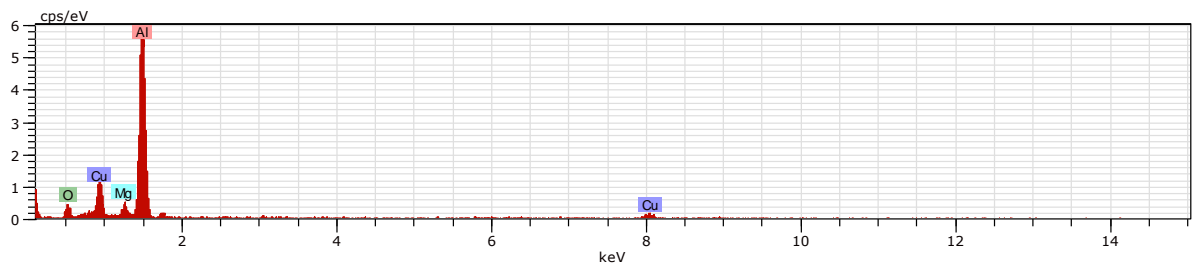
(h)



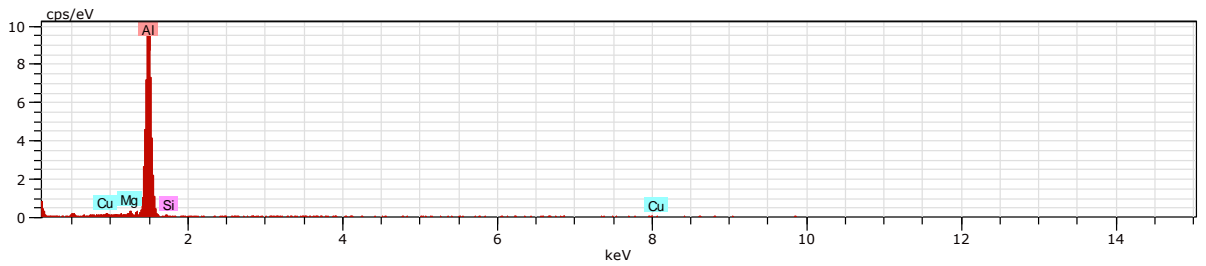
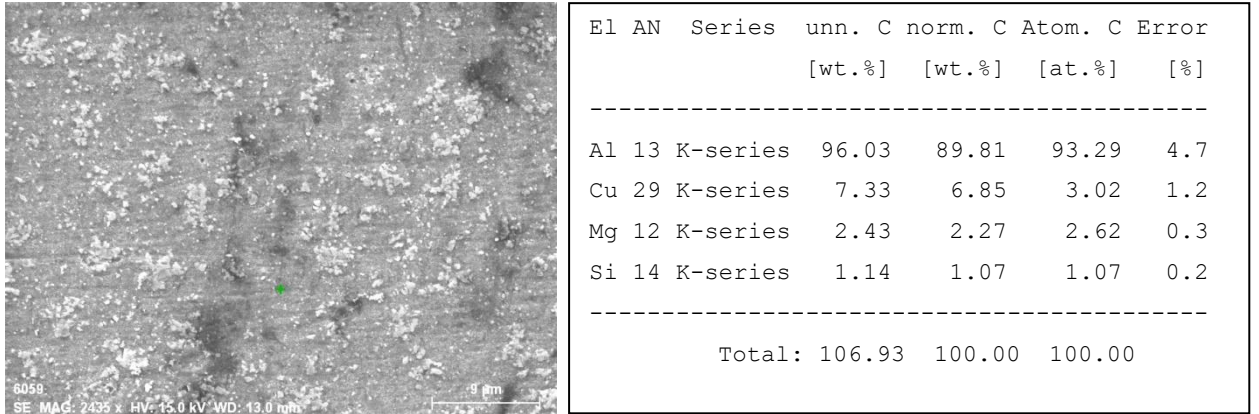
Şekil 3.20'nin devamı



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Al	13	K-series	65.15	61.17	64.03	3.3
Cu	29	K-series	24.44	22.94	10.20	2.1
O	8	K-series	12.90	12.11	21.39	4.5
Mg	12	K-series	4.02	3.77	4.39	0.4
Total:			106.51	100.00	100.00	

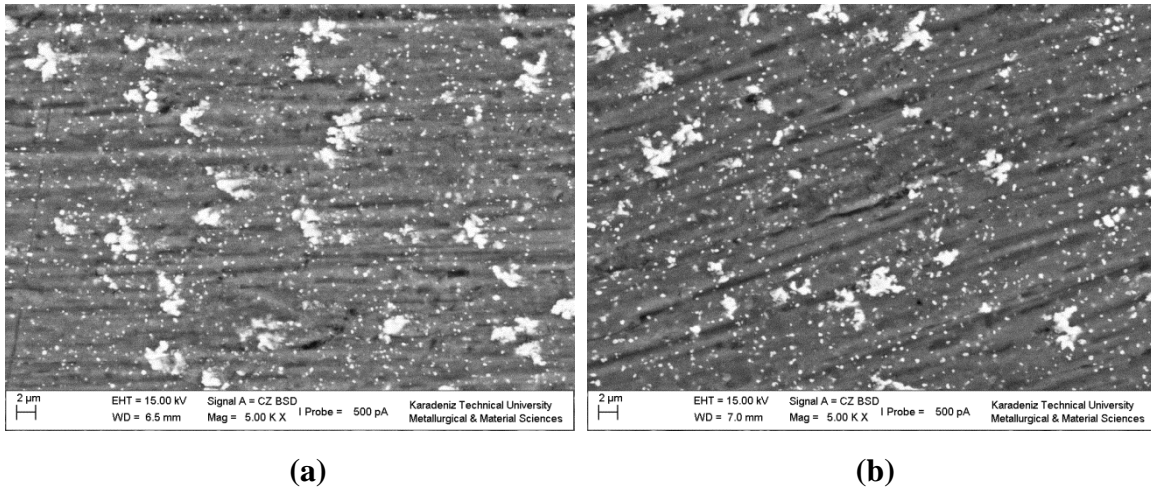


Şekil 3.21. Sinterlenmiş Al2024 / SiC nano kompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi



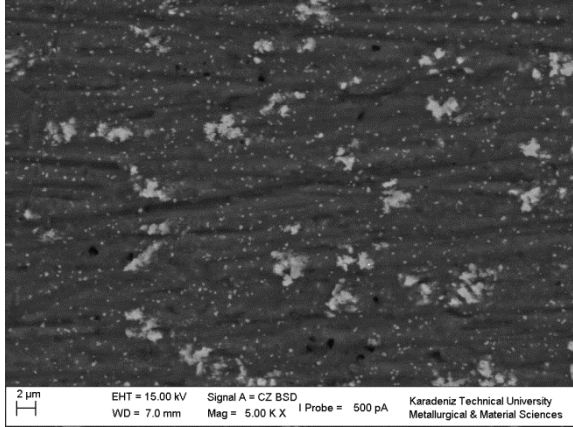
Şekil 3.22. Sinterlenmiş Al2024 / SiC nano kompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi

### 3.2.4. Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC Hibrit Nano Kompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri

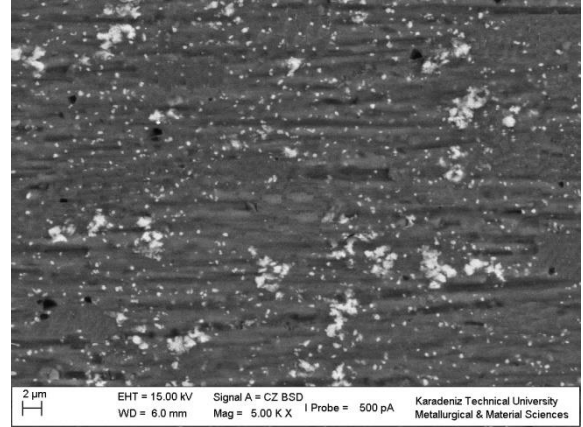


Şekil 3.23. Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)BS<sub>0.25</sub>, (b)BS<sub>0.50</sub>, (c)BS<sub>0.75</sub>, (d)BS<sub>1</sub>, (e)BS<sub>1.5</sub>, (f)BS<sub>2</sub>, (g)BS<sub>2.5</sub>, (h)BS<sub>3</sub>, (i)BS<sub>4</sub>, (i)BS<sub>5</sub>

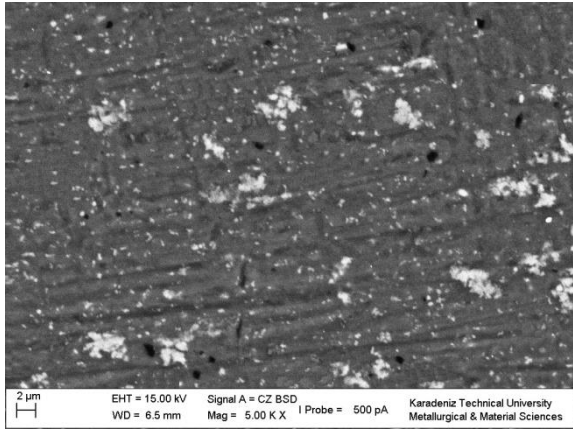
Şekil 3.23'ün devamı



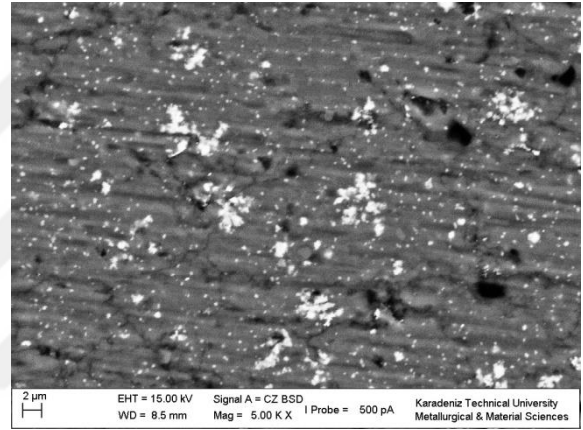
(c)



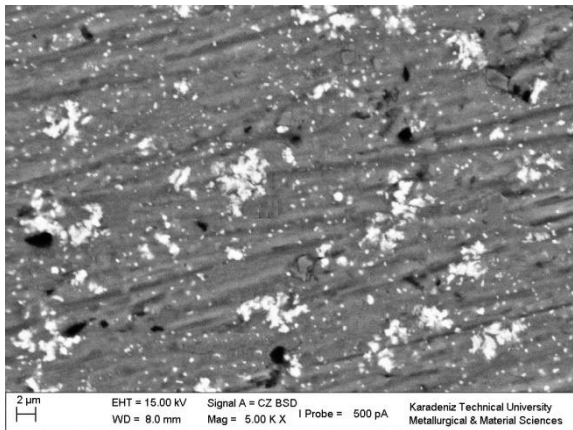
(d)



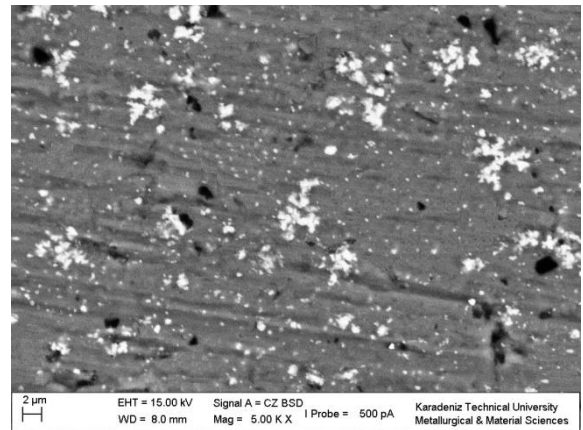
(e)



(f)

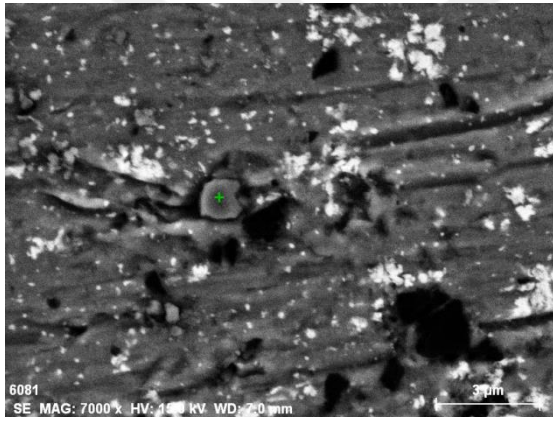
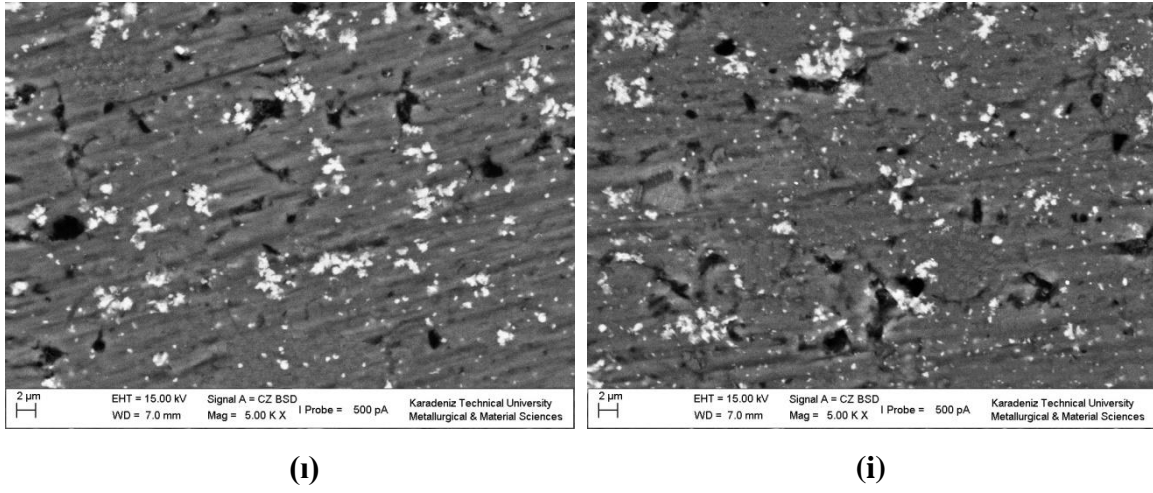


(g)

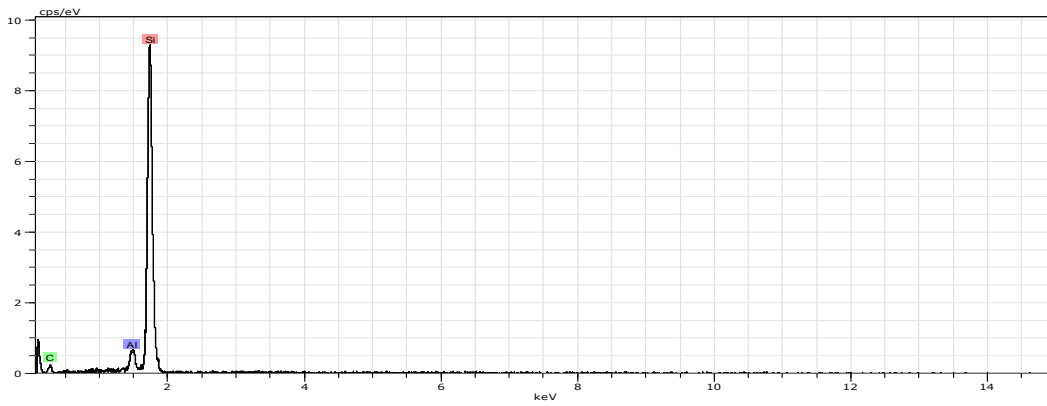


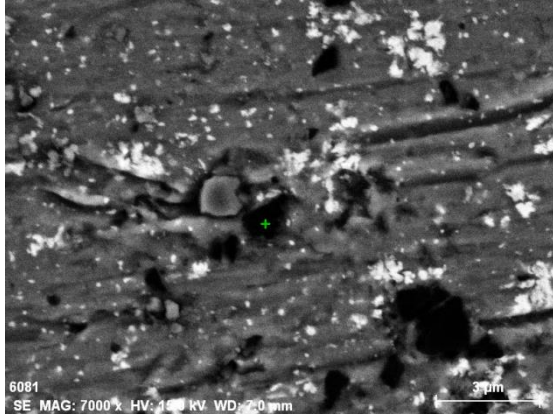
(h)

Şekil 3.23'ün devamı

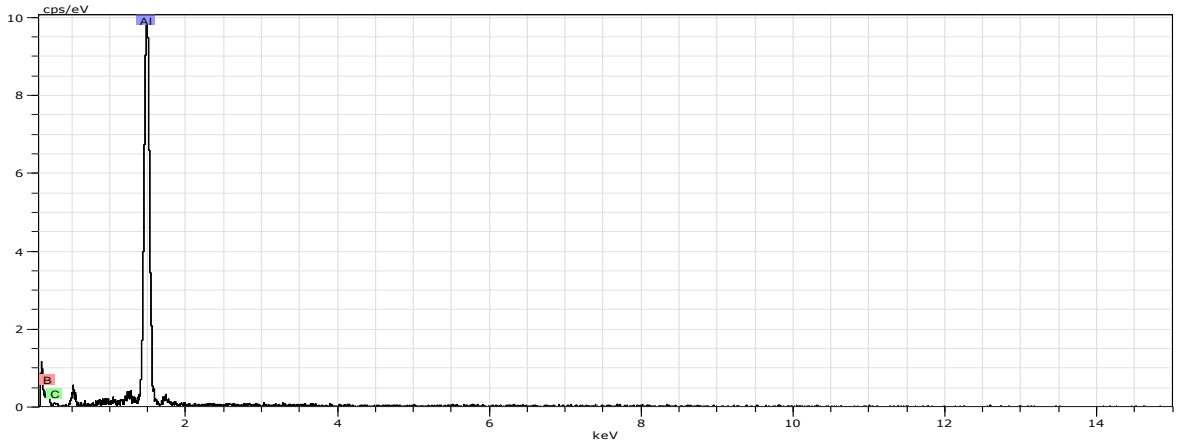


El AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
		[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[%]
Si	14 K-series	67.53	82.40	69.96	3.0
C	6 K-series	10.78	13.15	26.11	4.6
Al	13 K-series	3.64	4.45	3.93	0.3
Total:		81.96	100.00	100.00	

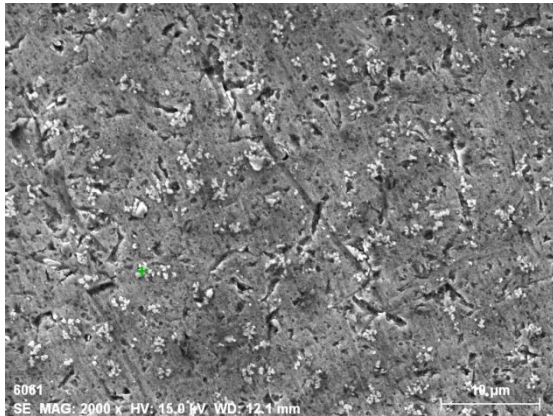
Şekil 3.24. Sinterlenmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nanokompozitinin SiC ağırlıklı bölgesinden nokta analizi



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
B	5	K-series	30.83	37.54	48.60	9.7
Al	13	K-series	27.18	33.09	17.17	1.4
C	6	K-series	24.13	29.37	34.23	13.8
Total:			82.15	100.00	100.00	



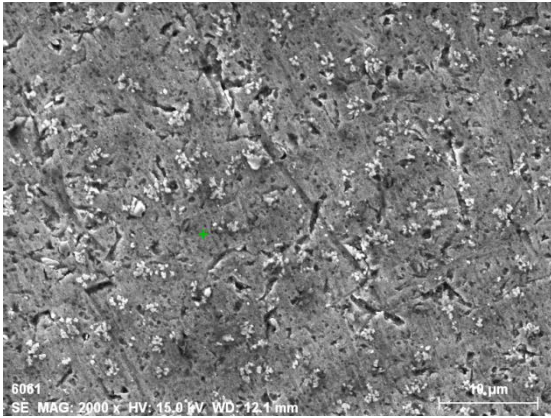
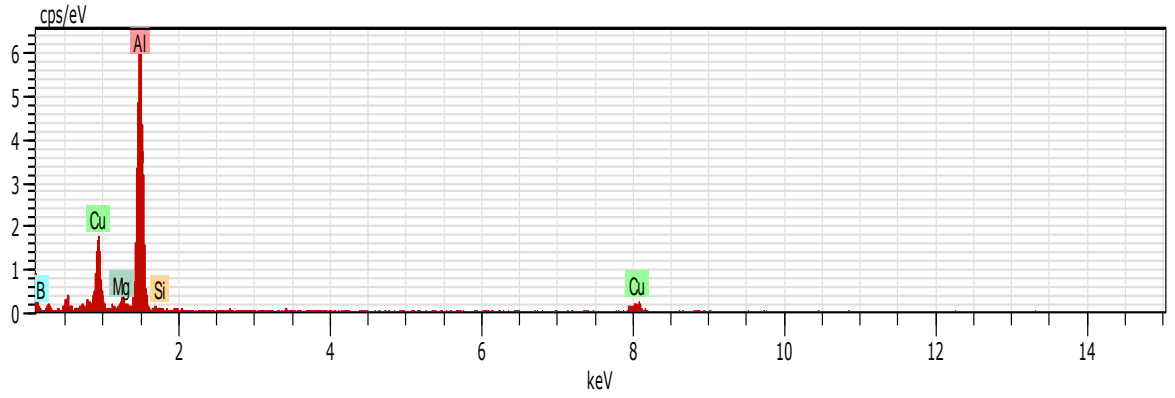
Şekil 3.25. Sinterlenmiş Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nanokompozitinin B<sub>4</sub>C ağırlıklı bölgesinden nokta analizi



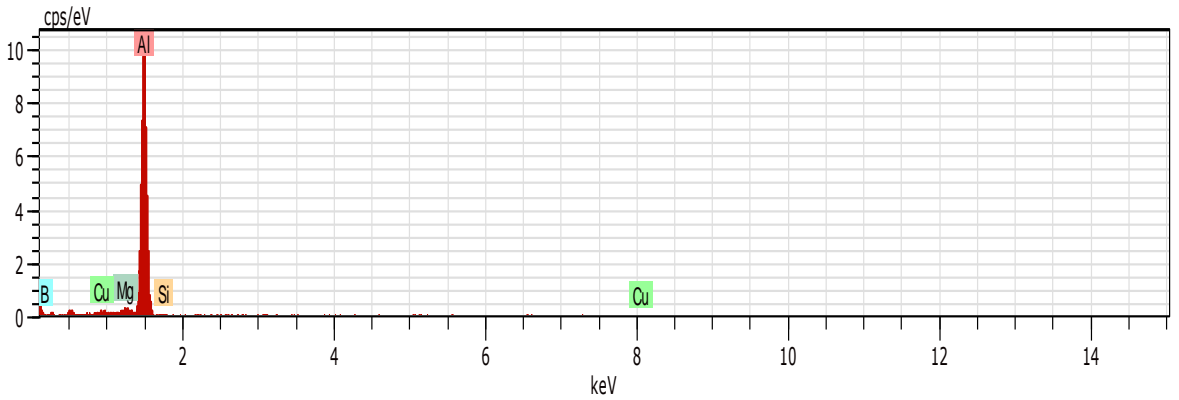
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Al	13	K-series	69.93	54.12	49.07	3.6
Cu	29	K-series	33.17	25.67	9.88	2.5
B	5	K-series	21.46	16.60	37.57	9.7
Mg	12	K-series	3.20	2.48	2.49	0.4
Si	14	K-series	1.45	1.12	0.98	0.2
Total:			129.22	100.00	100.00	

Şekil 3.26. Sinterlenmiş Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nanokompozitinin bakır ağırlıklı bölgesinden nokta analizi

Şekil 3.26'nın devamı

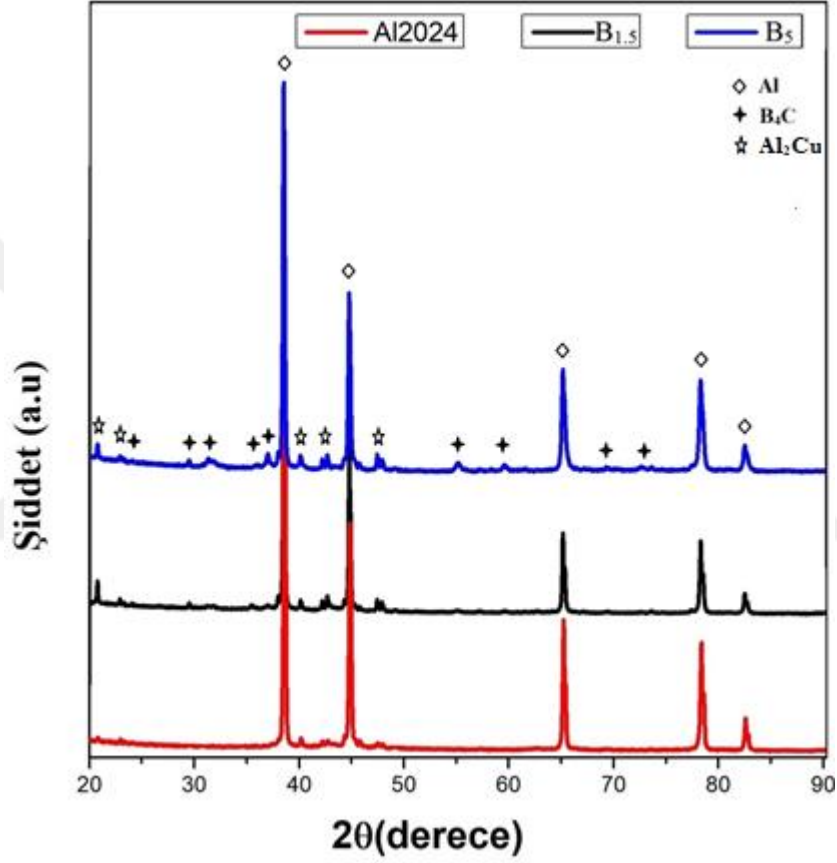


El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[%]
Al	13	K-series	90.46	72.70	58.32	4.5
B	5	K-series	22.78	18.31	36.66	10.5
Cu	29	K-series	6.57	5.28	1.80	1.1
Mg	12	K-series	3.64	2.92	2.60	0.4
Si	14	K-series	0.99	0.79	0.61	0.2
Total:			124.44	100.00	100.00	

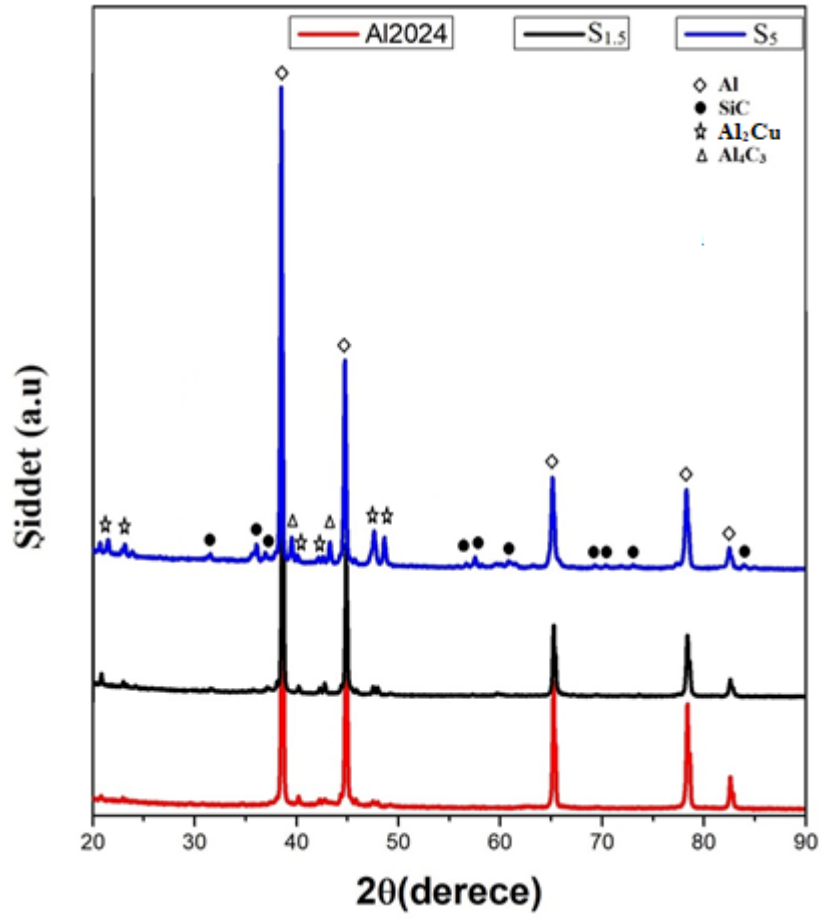
Şekil 3.27. Sinterlenmiş Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nanokompozitinin alüminyum ağırlıklı bölgesinden nokta analizi

### 3.3. Üretilen Kompozitlerin XRD Analizleri

Al2024 / B<sub>4</sub>C, Al2024 / SiC nano kompozitlerinin ve Al2024 / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerine ait XRD spektrumunda Al, B<sub>4</sub>C, SiC, Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> fazlarına rastlanmıştır (Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22). Al2024 / SiC nano kompozitlerinde Al<sub>2</sub>Cu fazlarına ait XRD spektrumları daha şiddetli görülmektedir. Buna ek olarak Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> fazlarına ait spektrumlar sadece Al2024 / SiC nano kompozitlerde rastlanmıştır.

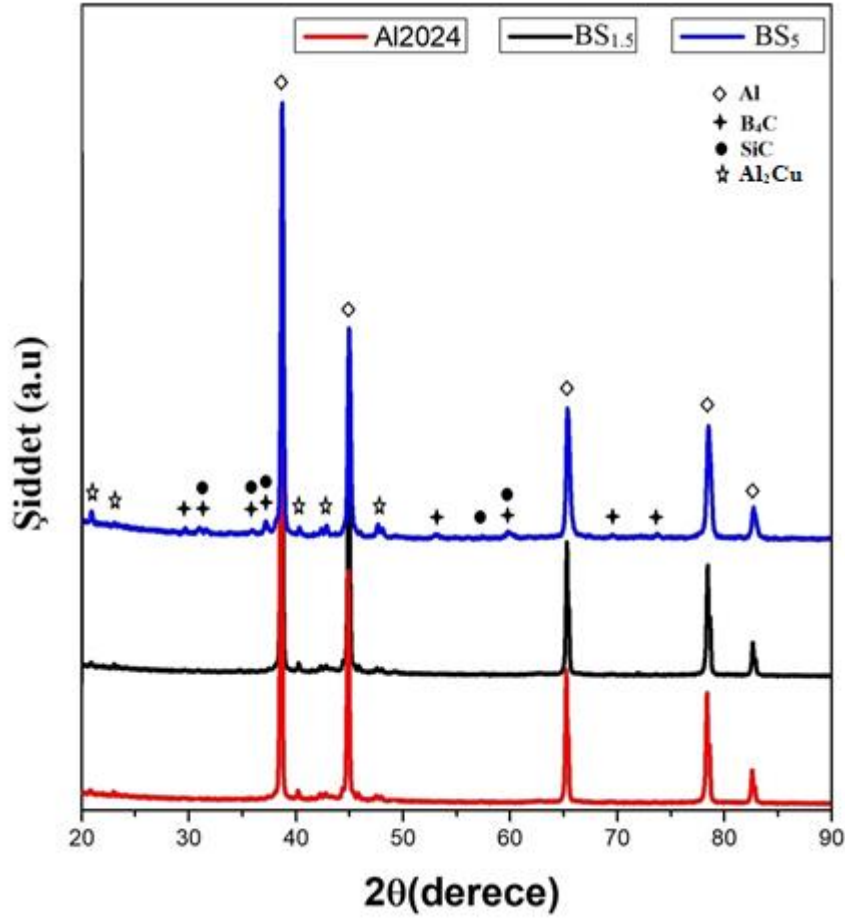


Şekil 3.28. Al2024/B<sub>4</sub>C nano kompozit numunelerin XRD analizi



Şekil 3.29. Al2024/SiC nano kompozit numunelerin XRD analizi





Şekil 3.30. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC nano kompozit numunelerin XRD analizi

### 3.4. Üretilen Kompozitlerin Özellikleri

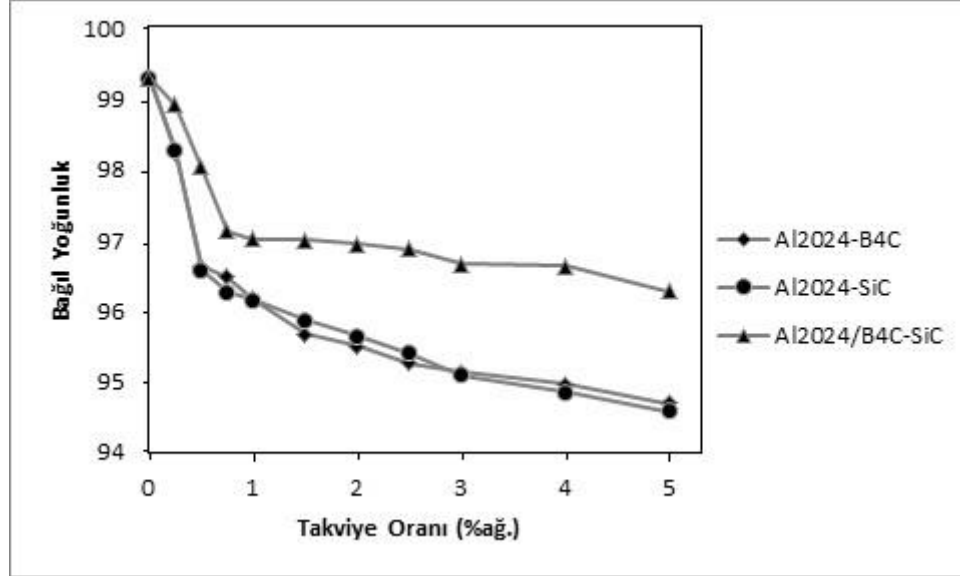
#### 3.4.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Tozların sıkıştırılması işleminde oluşan presleme mekanizması kısaca şu aşamalardan oluşur; ilk aşamada sıkıştırma ile toz parçacıkları birbirini içerisinde hareket ederek yer değiştirirler. Bu aşamada tozların paketlenmesini etkileyen en önemli parametreler parçacık boyutu, toz morfolojisi ve parçacıklar arası sürtünme gelmektedir. İkinci aşamada ise tozların sıkıştırılmasıyla elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları etkilidir ve parçacıklar arası mekanik bağ oluşmaktadır. Son aşamada ise tozların kırılması ve plastik deformasyon ile gözenekler azalmakta toz partikülleri basıncın ve sıcaklığın etkisiyle birbirine soğuk kaynak olmaktadır. Tozun presleme ve paketlenme kabiliyetini azaltan diğer faktör, artan takviye oranıyla birlikte yapıdaki sert partiküllerinin artması

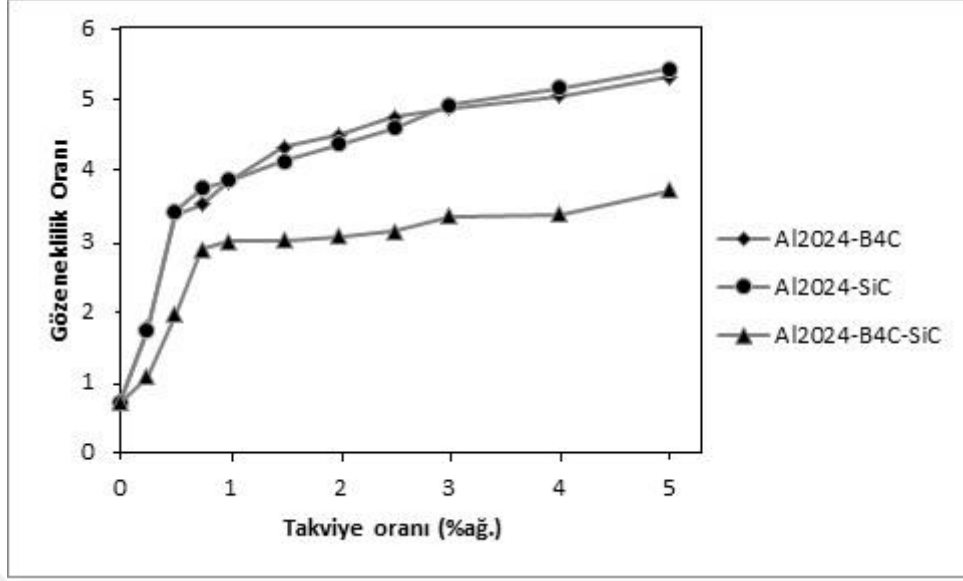
ile kompozit tozlarının sertliğinin artmış olmasıdır. Bu da Şekil 3.23’de görüldüğü gibi bağıl yoğunlukta artış ve gözeneklilikte artış olarak gözlemlenmektedir. Tüm gruplardaki numunelerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC kompozitlerin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,3	0,7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,3	0,7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,3	0,7
B <sub>0.25</sub>	98,25	1,75	S <sub>0.25</sub>	98,28	1,72	BS <sub>0.25</sub>	98,93	1,07
B <sub>0.50</sub>	96,64	3,36	S <sub>0.50</sub>	96,59	3,41	BS <sub>0.50</sub>	98,05	1,95
B <sub>0.75</sub>	96,49	3,51	S <sub>0.75</sub>	96,27	3,73	BS <sub>0.75</sub>	97,14	2,86
B <sub>1</sub>	96,17	3,83	S <sub>1</sub>	96,16	3,84	BS <sub>1</sub>	97,02	2,98
B <sub>1.5</sub>	95,68	4,32	S <sub>1.5</sub>	95,88	4,12	BS <sub>1.5</sub>	97,01	2,99
B <sub>2</sub>	95,51	4,49	S <sub>2</sub>	95,65	4,35	BS <sub>2</sub>	96,95	3,05
B <sub>2.5</sub>	95,26	4,74	S <sub>2.5</sub>	95,41	4,59	BS <sub>2.5</sub>	96,88	3,12
B <sub>3</sub>	95,13	4,87	S <sub>3</sub>	95,09	4,91	BS <sub>3</sub>	96,67	3,33
B <sub>4</sub>	94,96	5,04	S <sub>4</sub>	94,85	5,15	BS <sub>4</sub>	96,64	3,36
B <sub>5</sub>	94,69	5,31	S <sub>5</sub>	94,58	5,42	BS <sub>5</sub>	96,29	3,71



Şekil 3.31. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC kompozitlerin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi



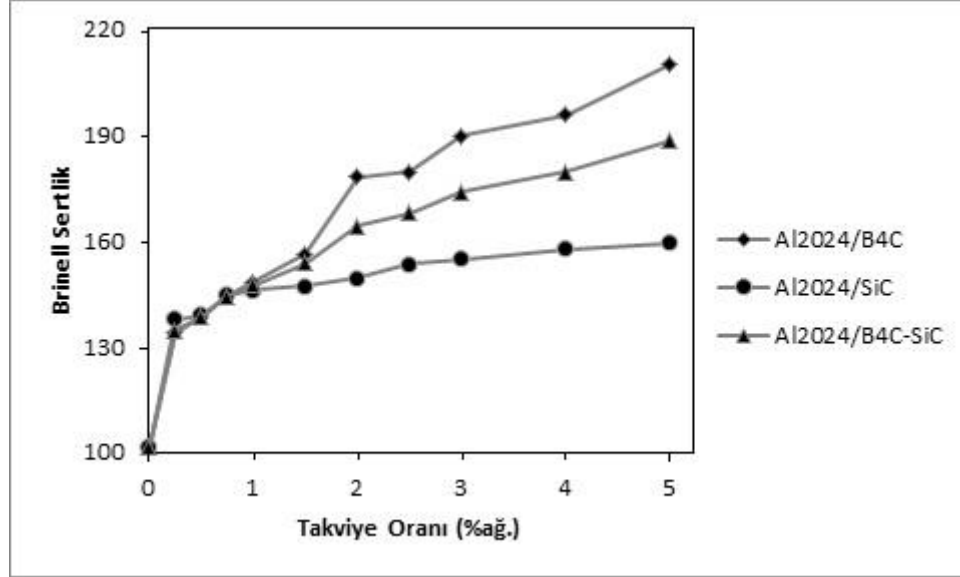
Şekil 3.32. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin gözeneklilik oranının takviye oranı ile değişimi

### 3.4.2. Sertlik Değerleri

Üretilen numunelere Brinell sertlik testi uygulanmıştır. Tablo 3.2’de alınan sonuçlara göre nano kompozit ve hibrit nano kompozitlerin artan takviye oranı ile sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak takviye partiküllerinin yani B<sub>4</sub>C ve SiC partiküllerinin matris malzemesinden daha sert olduğudur. Al2024 / B<sub>4</sub>C nano kompozit grupları diğer gruplara oranla daha üstün BSD değerleri sergilemiştir ve en yüksek BSD değeri B<sub>5</sub> numunesine aittir. Presleme sırasında B<sub>5</sub> ve S<sub>5</sub> nano kompozitlerinin ve BS<sub>5</sub> hibrit nano kompozitlerinin yüksek takviye miktarına sahip olması sebebiyle Al2024 alaşımlı matris tozları daha fazla plastik deformasyona uğramışlardır. Bu yüzden bu kompozitlerin takviye ile matris arasında daha fazla gerilmeler oluşmuştur. Bu durum, bir dislokasyon mekanizması olan pekleşme sertleşmesi olarak da bilinen mekanizma ile tanımlanabilir.

Tablo 3.2. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin sertlik değerleri

Numune Kodu	BSD	Numune Kodu	BSD	Numune Kodu	BSD
Al2024	101,6	Al2024	101,6	Al2024	101,6
B <sub>0,25</sub>	133,8	S <sub>0,25</sub>	137,8	BS <sub>0,25</sub>	134,6
B <sub>0,50</sub>	138,6	S <sub>0,50</sub>	138,9	BS <sub>0,50</sub>	138,3
B <sub>0,75</sub>	144,2	S <sub>0,75</sub>	144,6	BS <sub>0,75</sub>	144,2
B <sub>1</sub>	148,3	S <sub>1</sub>	146,1	BS <sub>1</sub>	147,3
B <sub>1,5</sub>	156,1	S <sub>1,5</sub>	147,1	BS <sub>1,5</sub>	153,6
B <sub>2</sub>	178,1	S <sub>2</sub>	149,5	BS <sub>2</sub>	164,1
B <sub>2,5</sub>	179,4	S <sub>2,5</sub>	153,3	BS <sub>2,5</sub>	167,7
B <sub>3</sub>	189,8	S <sub>3</sub>	154,9	BS <sub>3</sub>	173,9
B <sub>4</sub>	195,6	S <sub>4</sub>	157,5	BS <sub>4</sub>	179,4
B <sub>5</sub>	209,9	S <sub>5</sub>	159,3	BS <sub>5</sub>	188,2



Şekil 3.33. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin sertliklerinin takviye oranı ile değişimi

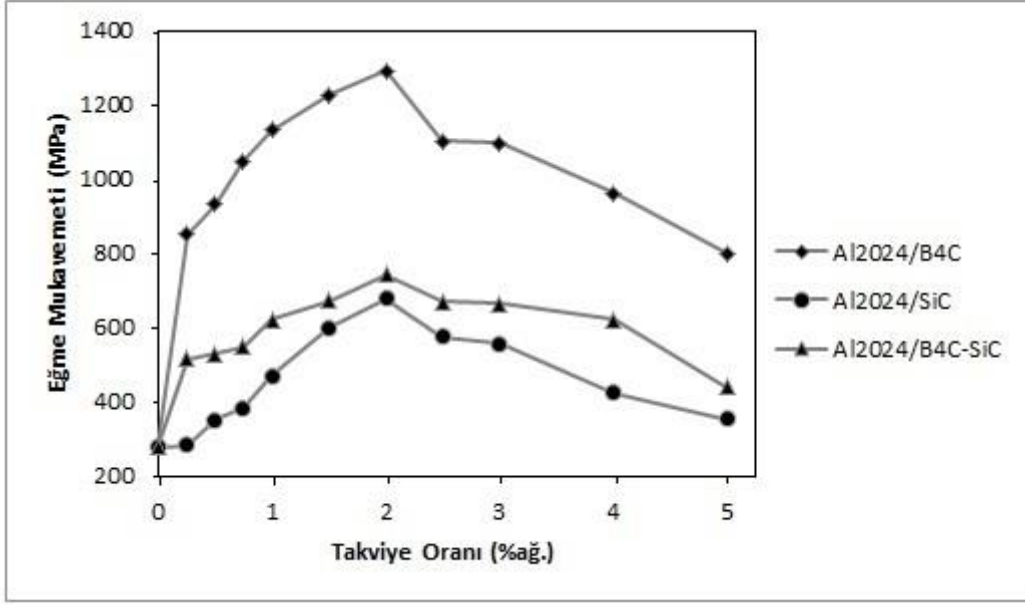
### 3.4.3. Üç Nokta Eğme Mukavemeti Testleri

Sinterlenmiş numunelere mekanik test olarak üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır. Eğme mukavemeti testleri sonucu alınan sonuçlar Tablo 3.3’de verilmiştir. Artan takviye miktarları ile eğme mukavemeti değerlerinde artış olduğu görülmüş fakat üç grupta da %2 takviye oranından sonra eğme mukavemeti değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir ve en yüksek eğme mukavemeti değerleri sırasıyla B<sub>2</sub>, S<sub>2</sub> ve BS<sub>2</sub> kodlu numunelerdir. Artışın

sebepleri olarak; matris içerisine ilave edilen takviye partiküllerinin daha yüksek eğilme davranışı göstermeleri, matris alaşımının üstün mekanik özelliği, takviye partiküllerinin matris içerisine homojene yakın dağılması ve matris ile takviye arasında çok iyi bir arayüzeyin oluşması gösterilebilmektedir. Eğme dayanımındaki düşüşün sebebi olarak, artan takviye oranıyla topaklanma bölgelerinin artması ve matris ve takviye arasındaki bağların zayıflaması gösterilebilir. Bu zayıf bağlardan dolayı eğme dayanımında düşüşlere neden olabilmektedir. SiC takviye nano kompozitlerle B<sub>4</sub>C ve B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitler arasındaki mukavemet farkının sebebi ise SiC takviyeli nano kompozitlerde XRD analizleri olsun veya mikro yapı görüntüleri olsun Al<sub>2</sub>Cu ara bileşiğinin miktarının fazla olması ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara bileşiğinin varlığıdır.

Tablo 3.3. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin eğme mukavemeti değerleri

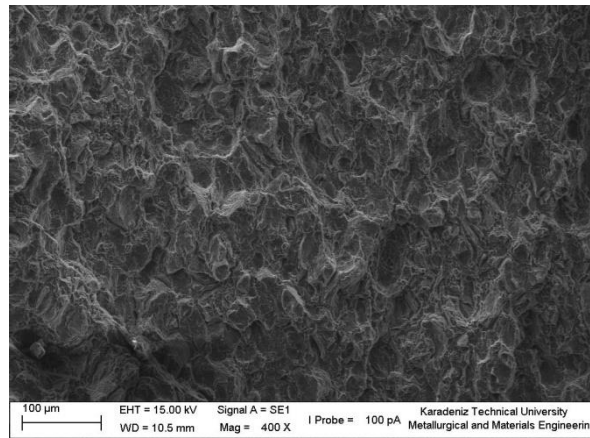
Numune Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)
Al2024	279,2	Al2024	279,2	Al2024	279,2
B <sub>0,25</sub>	851,4	S <sub>0,25</sub>	284,7	BS <sub>0,25</sub>	517,2
B <sub>0,50</sub>	930,6	S <sub>0,50</sub>	352,5	BS <sub>0,50</sub>	529,6
B <sub>0,75</sub>	1047,2	S <sub>0,75</sub>	383	BS <sub>0,75</sub>	548,3
B <sub>1</sub>	1130,3	S <sub>1</sub>	469,2	BS <sub>1</sub>	621,5
B <sub>1,5</sub>	1224,5	S <sub>1,5</sub>	598,7	BS <sub>1,5</sub>	671,6
B <sub>2</sub>	1288,7	S <sub>2</sub>	676,7	BS <sub>2</sub>	742,3
B <sub>2,5</sub>	1100,2	S <sub>2,5</sub>	573,9	BS <sub>2,5</sub>	669,2
B <sub>3</sub>	1096,5	S <sub>3</sub>	556,2	BS <sub>3</sub>	663,1
B <sub>4</sub>	961,3	S <sub>4</sub>	424,1	BS <sub>4</sub>	620,8
B <sub>5</sub>	799,2	S <sub>5</sub>	352,8	BS <sub>5</sub>	441,5



Şekil 3.34. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin eğme mukavemeti değerlerinin takviye oranı ile değişimi

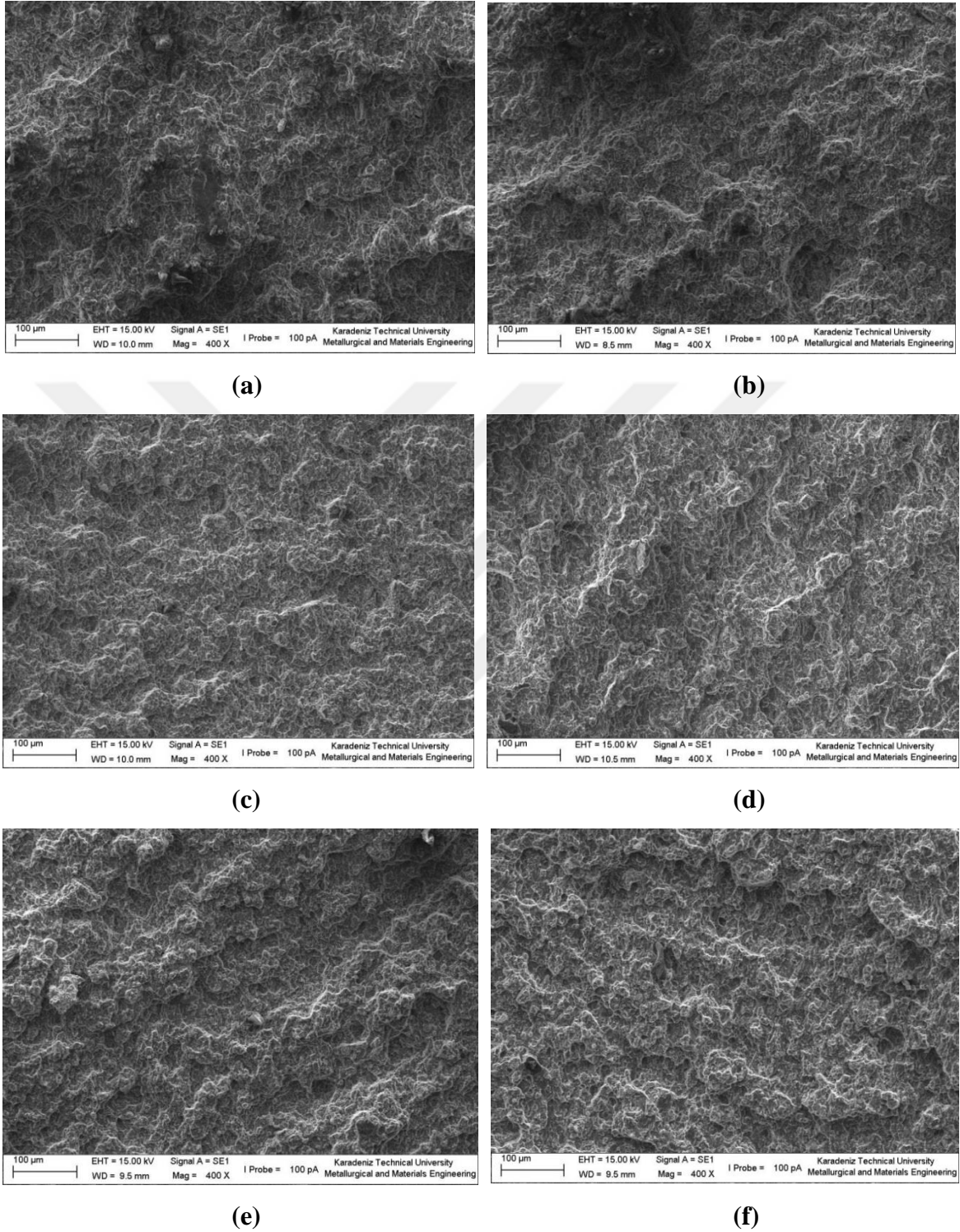
Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da Al2024 alaşımının, nano kompozitlerin ve hibrit nano kompozitlerin kırılma yüzeyleri verilmiştir. Kırılma yüzeyleri, kompozitlerin eğilme dayanımını ve kırılma davranışları hakkında bize birçok bilgiyi gösterir. Şekiller incelendiğinde kırılma davranışı Al2024 alaşımında daha sünek olup takviye oranları arttıkça kırılma davranışı giderek gevrek davranış göstermiştir.

### 3.4.3.1. Al2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi



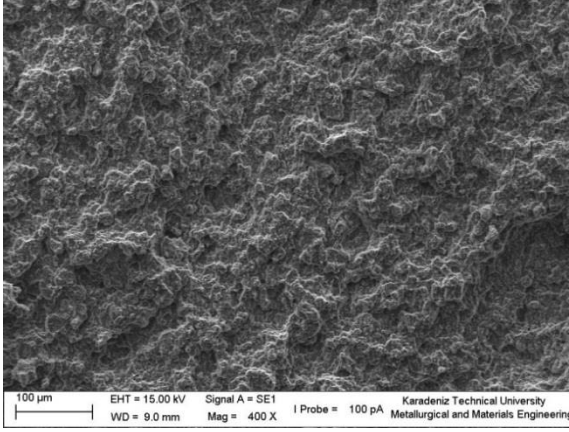
Şekil 3.35. Saf Al2024 numunesinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi

### 3.4.3.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

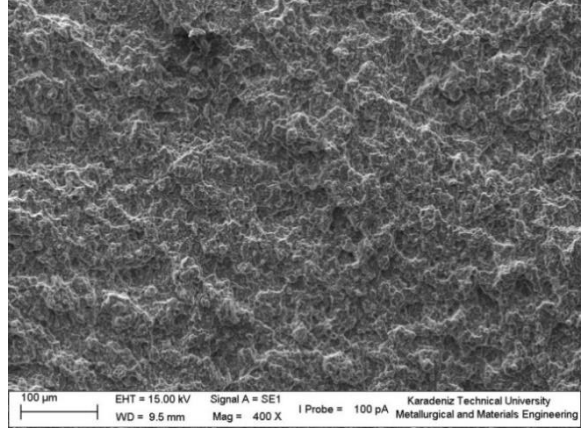


Şekil 3.36. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)B<sub>0.25</sub>, (b)B<sub>0.50</sub>, (c)B<sub>0.75</sub>, (d)B<sub>1</sub>, (e)B<sub>1.5</sub>, (f)B<sub>2</sub>, (g)B<sub>2.5</sub>, (h)B<sub>3</sub>, (i)B<sub>4</sub>, (j)B<sub>5</sub>

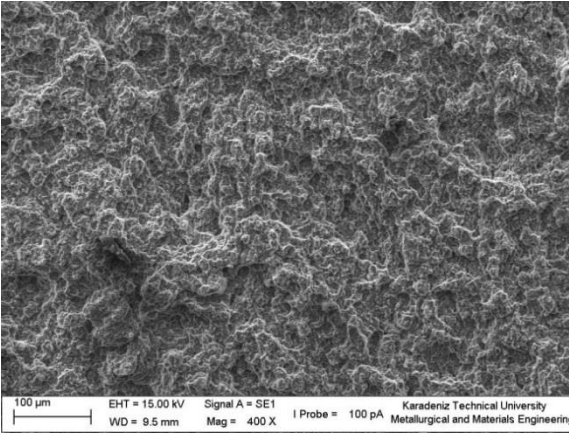
Şekil 3.36'nın devamı



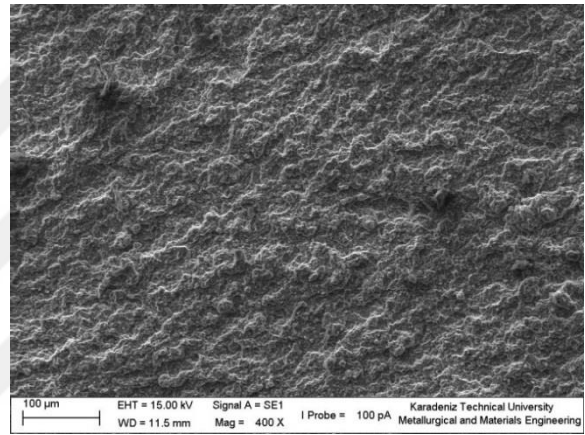
(g)



(h)



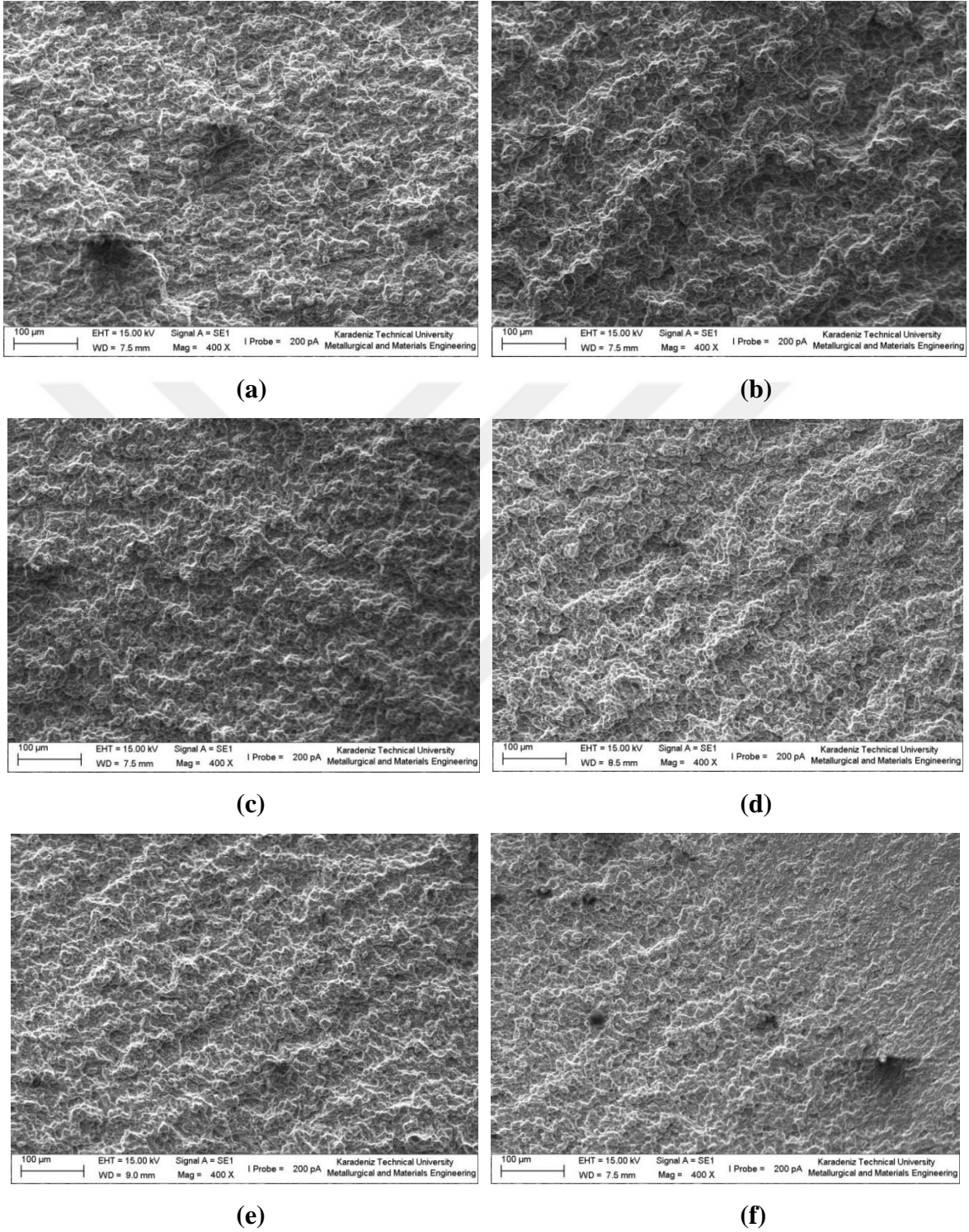
(i)



(i)

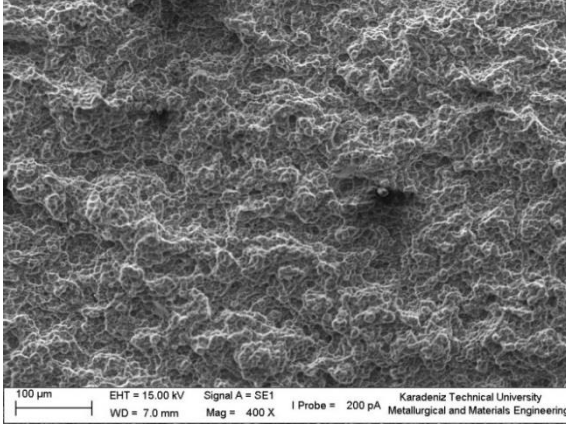
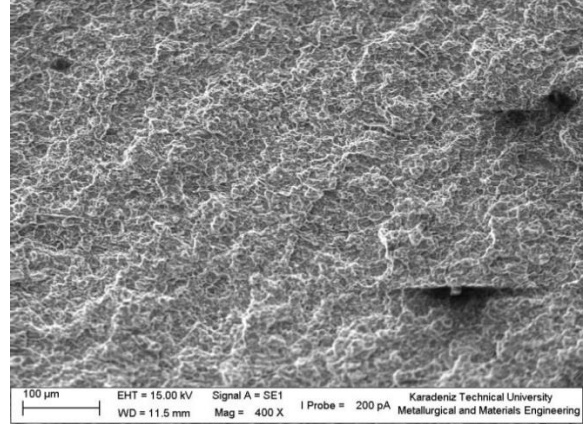
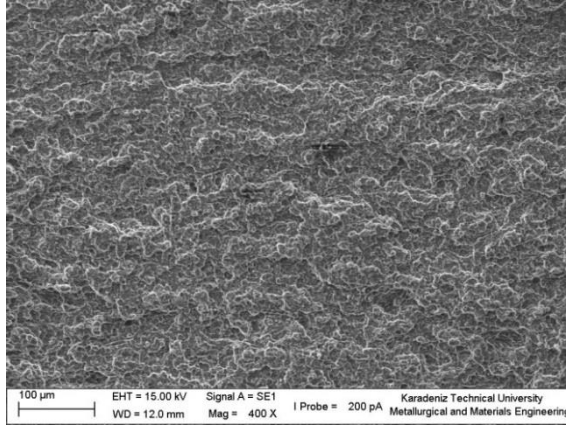
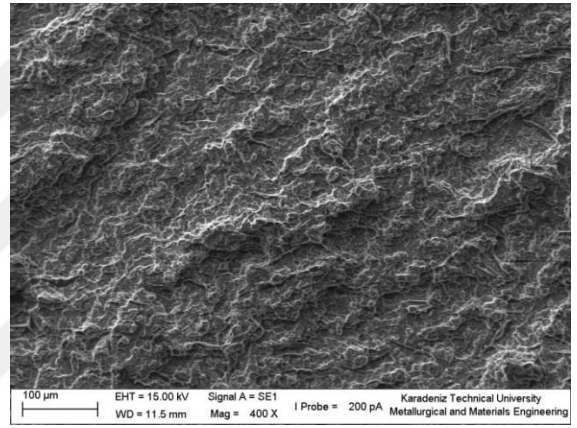


### 3.4.3.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

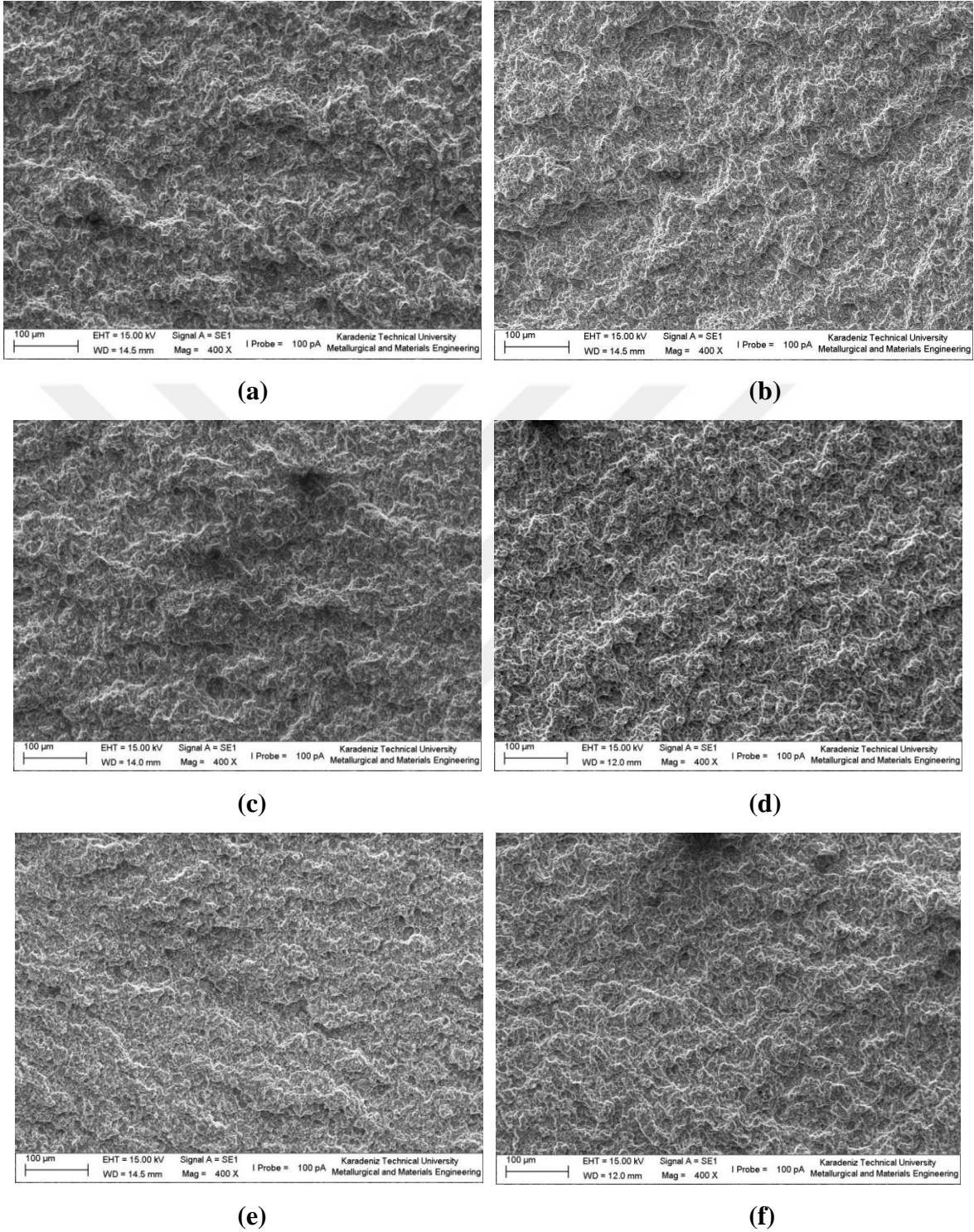


Şekil 3.37. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)S<sub>0.25</sub>, (b)S<sub>0.50</sub>, (c)S<sub>0.75</sub>, (d)S<sub>1</sub>, (e)S<sub>1.5</sub>, (f)S<sub>2</sub>, (g)S<sub>2.5</sub>, (h)S<sub>3</sub>, (i)S<sub>4</sub>, (i)S<sub>5</sub>

Şekil 3.37'nin devamı

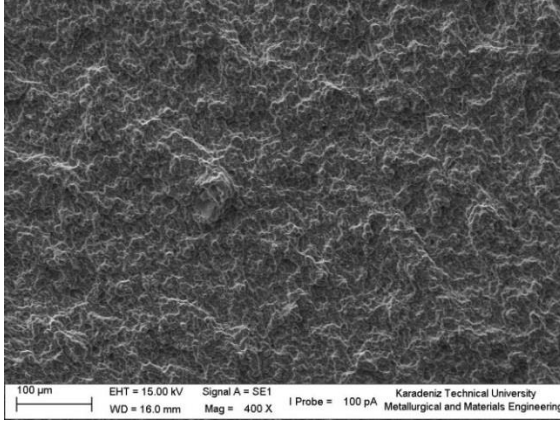
**(g)****(h)****(i)****(i)**

### 3.4.3.4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

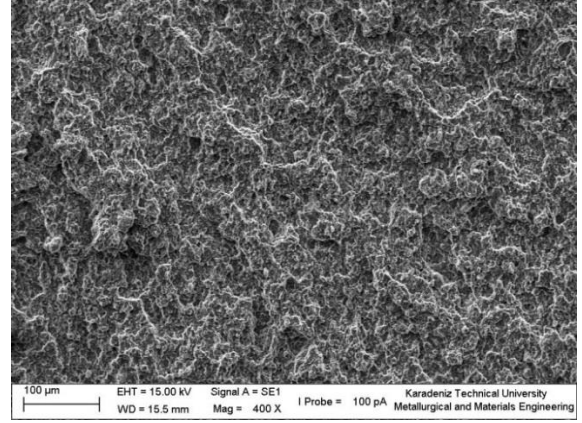


Şekil 3.38. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit numunelerinin eğme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)BS<sub>0.25</sub>, (b)BS<sub>0.50</sub>, (c)BS<sub>0.75</sub>, (d)BS<sub>1</sub>, (e)BS<sub>1.5</sub>, (f)BS<sub>2</sub>, (g)BS<sub>2.5</sub>, (h)BS<sub>3</sub>, (i)BS<sub>4</sub>, (i)BS<sub>5</sub>

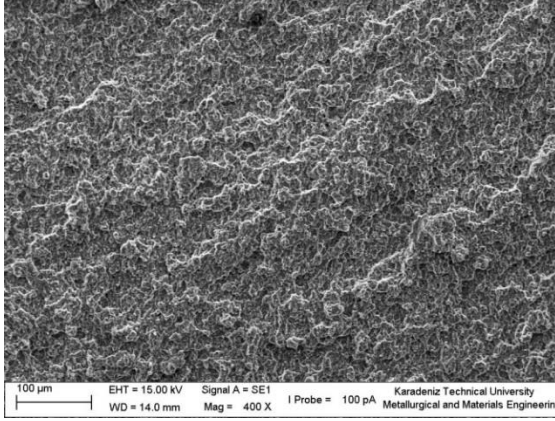
Şekil 3.38'in devamı



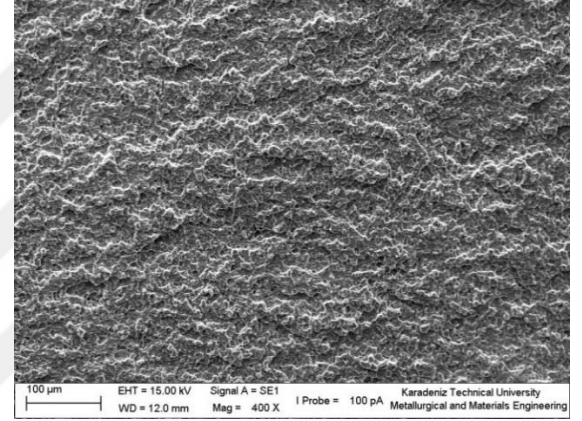
(g)



(h)



(i)



(i)

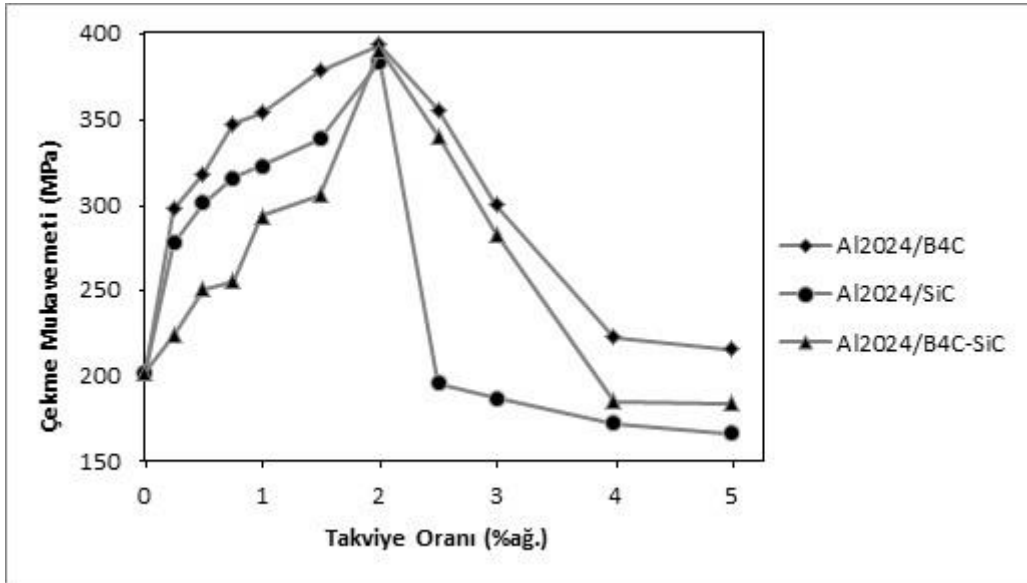
#### 3.4.4. Çekme Mukavemeti Testleri

Sinterlenmiş nano kompozitlere uygulanan çekme mukavemeti test sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir. Artan takviye oranlarıyla nano kompozitlerin ve hibrit nano kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri artmıştır. Bütün gruplarda en yüksek çekme mukavemeti değerleri % 2 takviye oranında sağlanmıştır. Bununla birlikte nedeni takviye partiküllerinin %2 oranında daha homojen dağılması ve matris içerisine daha iyi gömülmesinden dolayı olduğu tespit edilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C nano kompozitler arasındaki en yüksek çekme mukavemeti değeri 392.9 MPa olup B<sub>2</sub> numunesine aittir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiC nano kompozit numuneler arasındaki en iyi çekme mukavemeti değeri ise 383.2 MPa ile S<sub>2</sub>'dir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitler arasında ise en yüksek değer 390,1 MPa ile BS<sub>2</sub>'dir (Şekil 3.30). Çekme dayanımındaki düşüşün sebebi olarak, artan takviye

oranıyla topaklanma bölgelerinin artması ve matris ve takviye arasındaki bağların zayıflaması gösterilebilir. Bu zayıf bağlardan dolayı çekme dayanımında düşüişlere neden olabilmektedir. SiC takviye nano kompozitlerle B<sub>4</sub>C ve B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitler arasındaki mukavemet farkının sebebi ise SiC takviyeli nano kompozitlerde XRD analizleri olsun veya mikro yapı görüntüleri olsun Al<sub>2</sub>Cu ara bileşğinin miktarının fazla olması ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara bileşğinin varlığıdır.

Tablo 3.4. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri

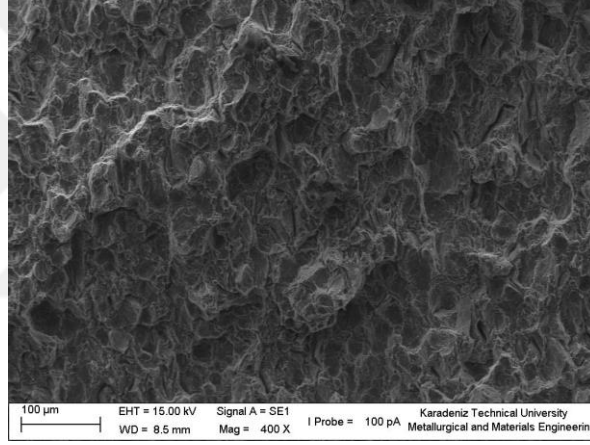
Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)
Al2024	202,0	Al2024	202,0	Al2024	202,0
B <sub>0.25</sub>	297,4	S <sub>0.25</sub>	277,1	BS <sub>0.25</sub>	223,4
B <sub>0.50</sub>	317,8	S <sub>0.50</sub>	300,5	BS <sub>0.50</sub>	250,8
B <sub>0.75</sub>	346,7	S <sub>0.75</sub>	315,1	BS <sub>0.75</sub>	255,3
B <sub>1</sub>	353,5	S <sub>1</sub>	322,5	BS <sub>1</sub>	293,1
B <sub>1.5</sub>	377,8	S <sub>1.5</sub>	337,9	BS <sub>1.5</sub>	305,7
B <sub>2</sub>	392,9	S <sub>2</sub>	383,2	BS <sub>2</sub>	390,1
B <sub>2.5</sub>	339,8	S <sub>2.5</sub>	195,5	BS <sub>2.5</sub>	354,9
B <sub>3</sub>	282,5	S <sub>3</sub>	187,1	BS <sub>3</sub>	299,6
B <sub>4</sub>	172,4	S <sub>4</sub>	185,1	BS <sub>4</sub>	222,7
B <sub>5</sub>	166,3	S <sub>5</sub>	184,2	BS <sub>5</sub>	215,2



Şekil 3.39. Al2024/B<sub>4</sub>C, Al2024/SiC kompozitlerin ve Al2024/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin takviye oranı ile değışimi

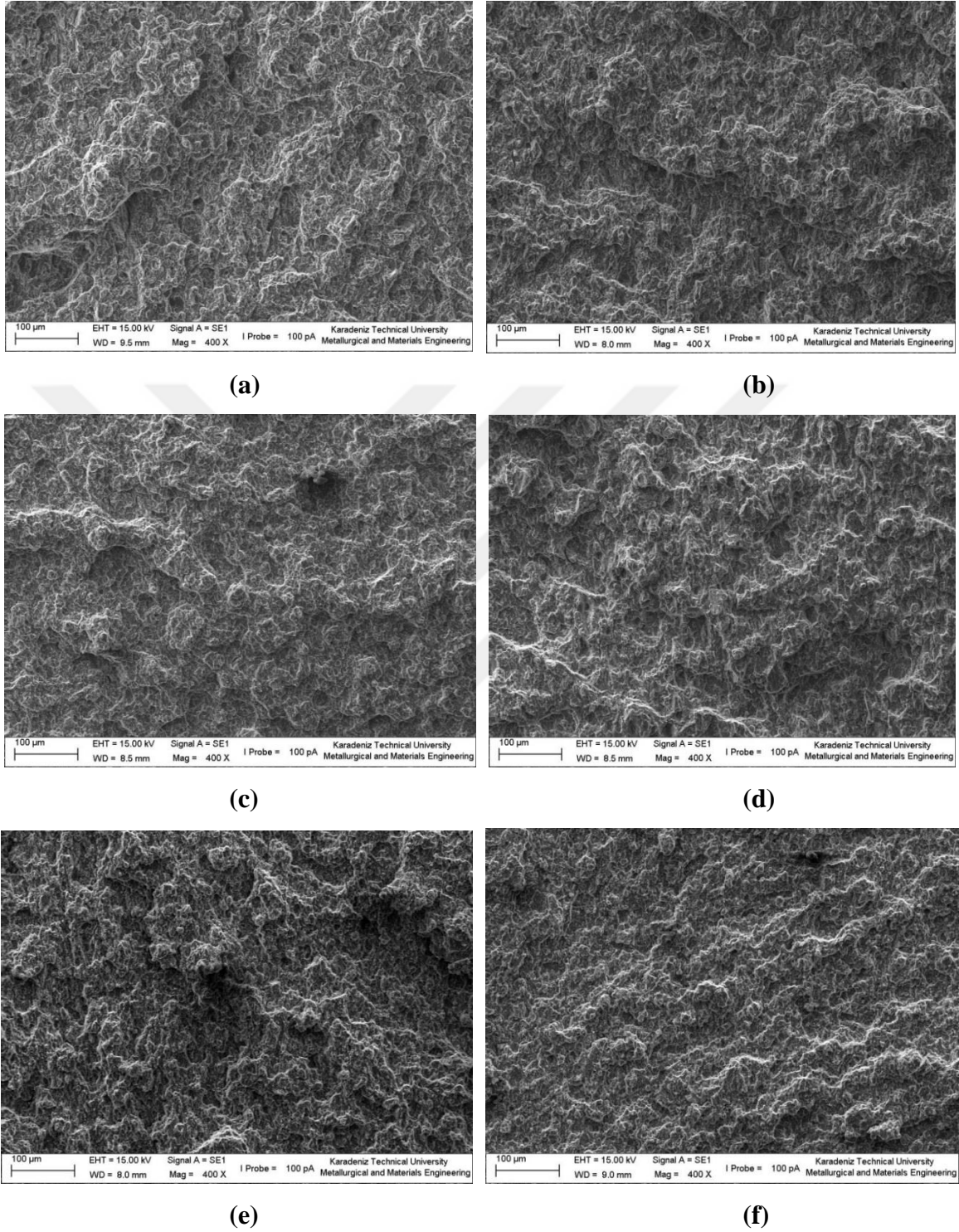
Kırılma davranışının belirlenmesinde kırılma yüzeyinin görünüşü, kırılma enerjisi, büzülme miktarı, kırılma yüzeyinin pürüzlülüğünün incelenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kırılma yüzeyinin görünüşü kırılma davranışının belirlenmesinde (sünek-gevrek, taneler arası-tane içi) önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’de gruplar içerisindeki numuneler arasındaki çekme mukavemeti ve kırılma davranışları farkları gözlemlenmektedir. Numunelerin çekme mukavemeti testleri sonucu kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.

#### 3.4.4.1. Al2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi



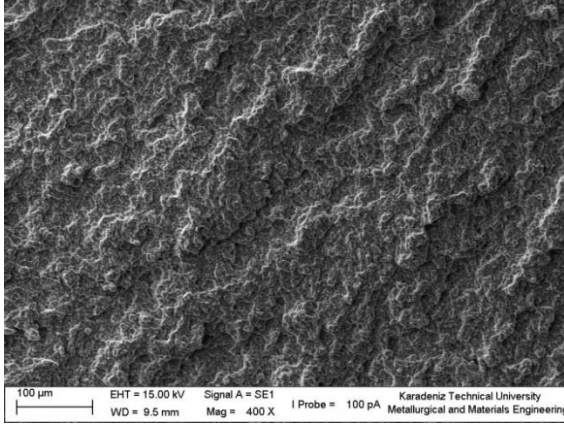
Şekil 3.40. Saf Al2024 numunesinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi

### 3.4.4.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

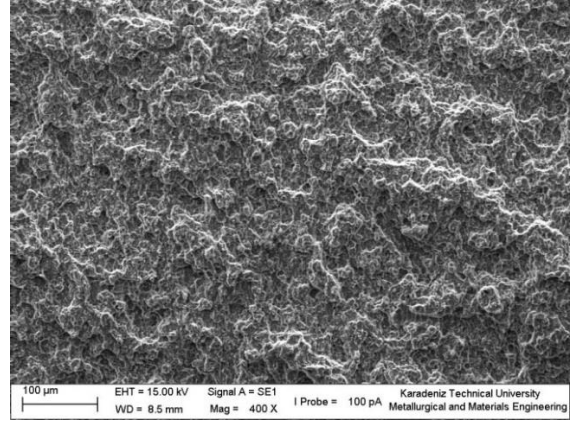


Şekil 3.41. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)B<sub>0.25</sub>, (b)B<sub>0.50</sub>, (c)B<sub>0.75</sub>, (d)B<sub>1</sub>, (e)B<sub>1.5</sub>, (f)B<sub>2</sub>, (g)B<sub>2.5</sub>, (h)B<sub>3</sub>, (i)B<sub>4</sub>, (i)B<sub>5</sub>

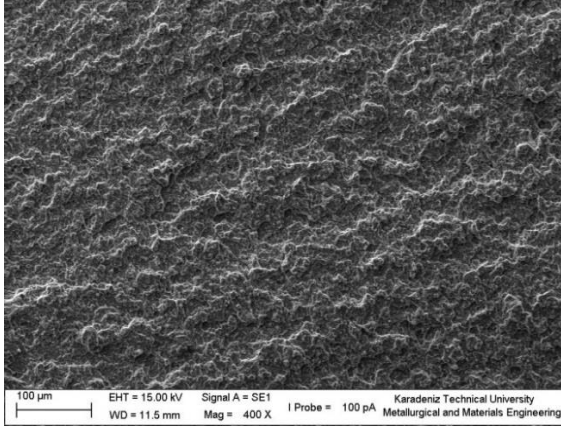
Şekil 3.41'in devamı



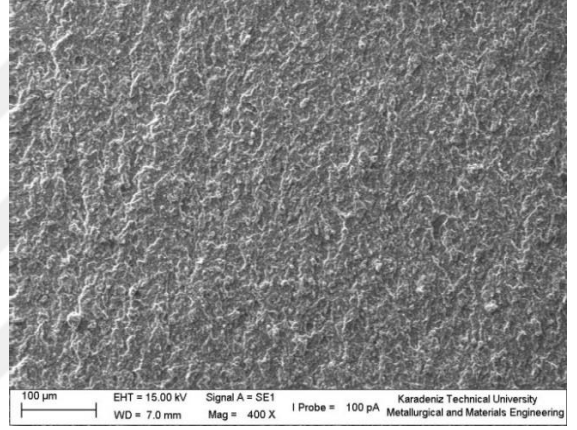
(g)



(h)



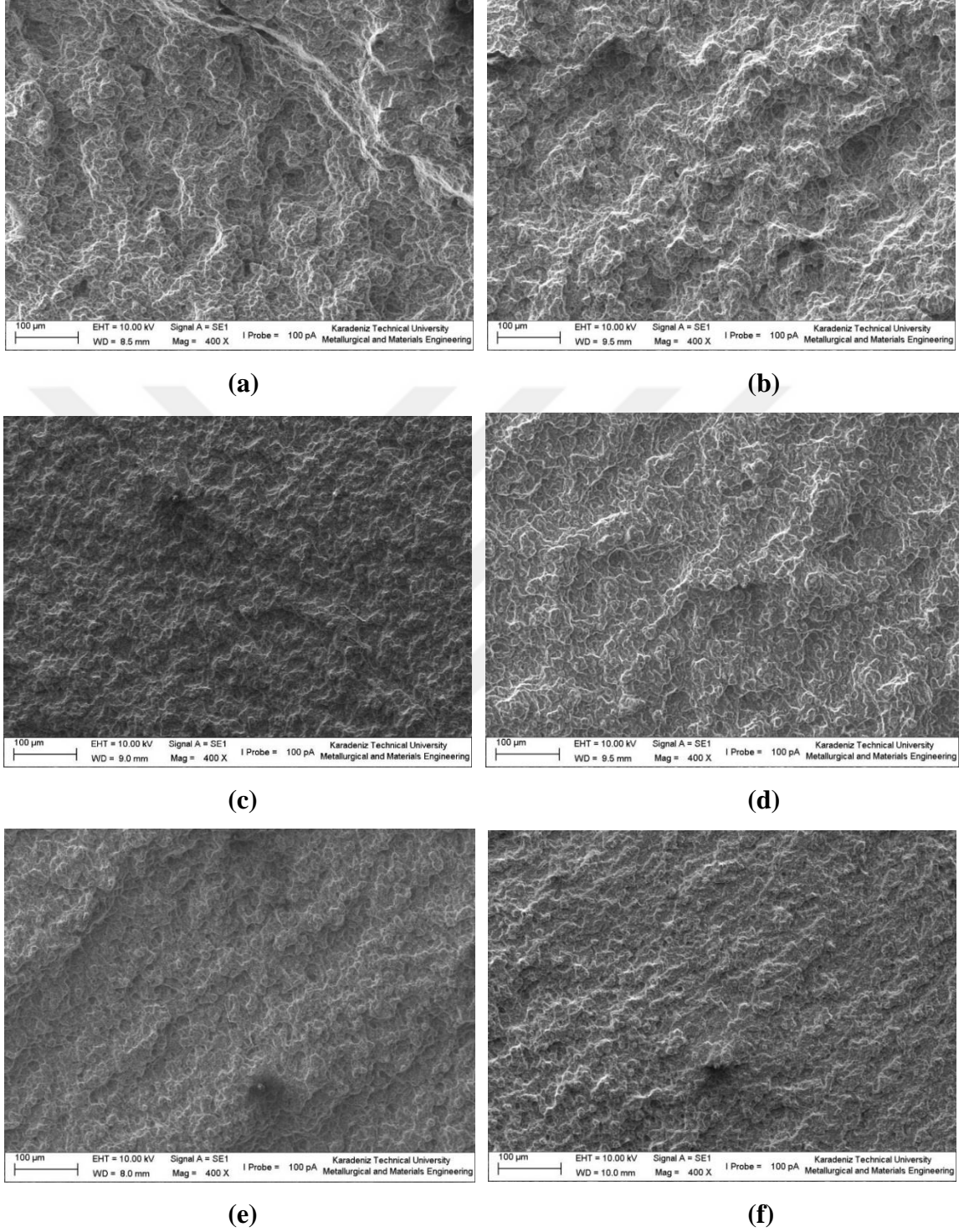
(i)



(j)

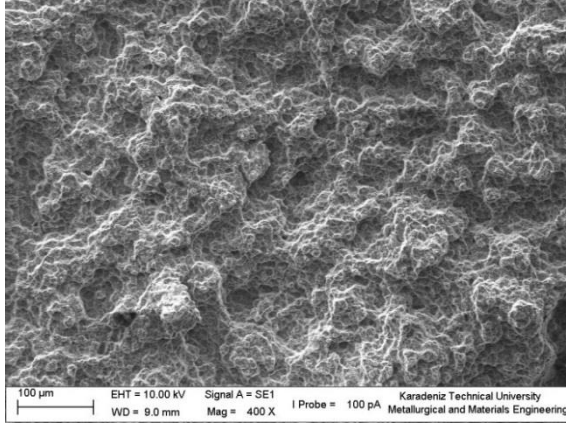


### 3.4.4.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

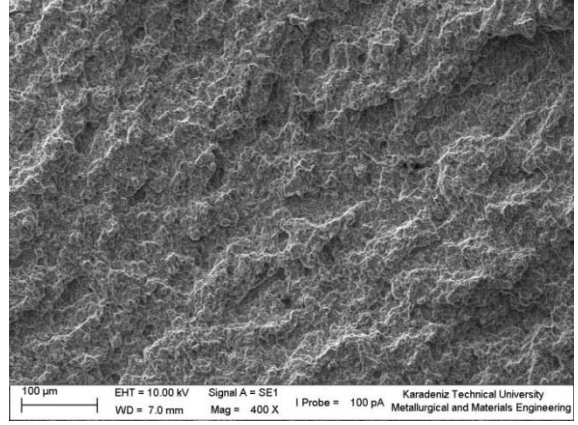


Şekil 3.42. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)S<sub>0.25</sub>, (b)S<sub>0.50</sub>, (c)S<sub>0.75</sub>, (d)S<sub>1</sub>, (e)S<sub>1.5</sub>, (f)S<sub>2</sub>, (g)S<sub>2.5</sub>, (h)S<sub>3</sub>, (i)S<sub>4</sub>, (j)S<sub>5</sub>

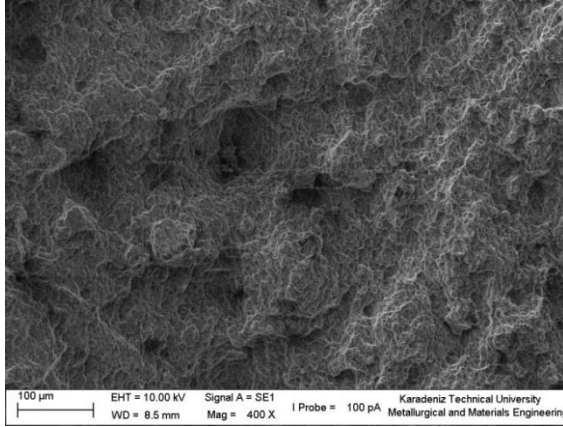
Şekil 3.42'nin devamı



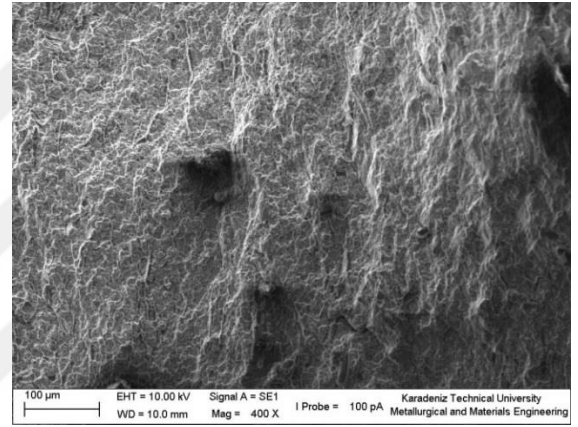
(g)



(h)

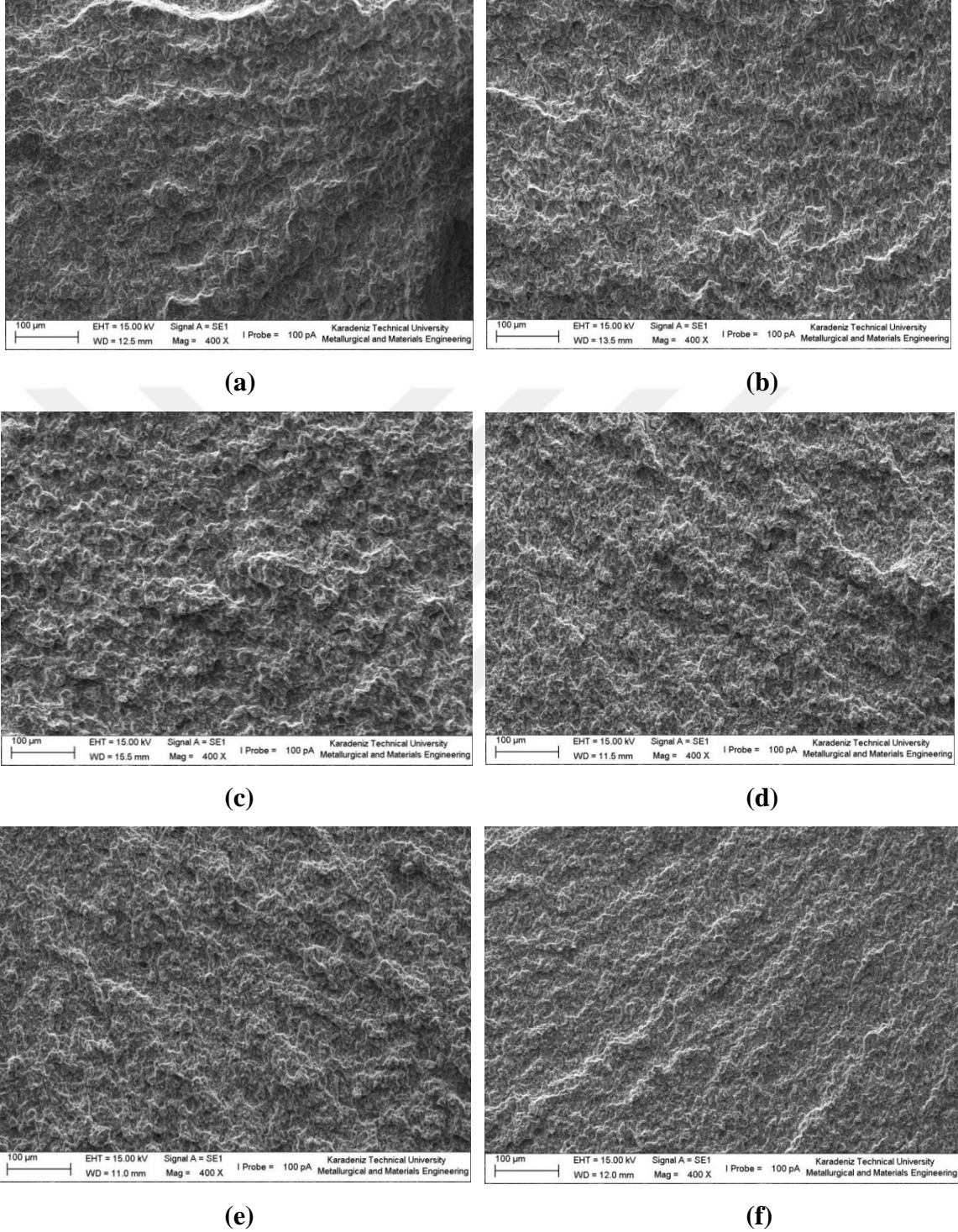


(i)



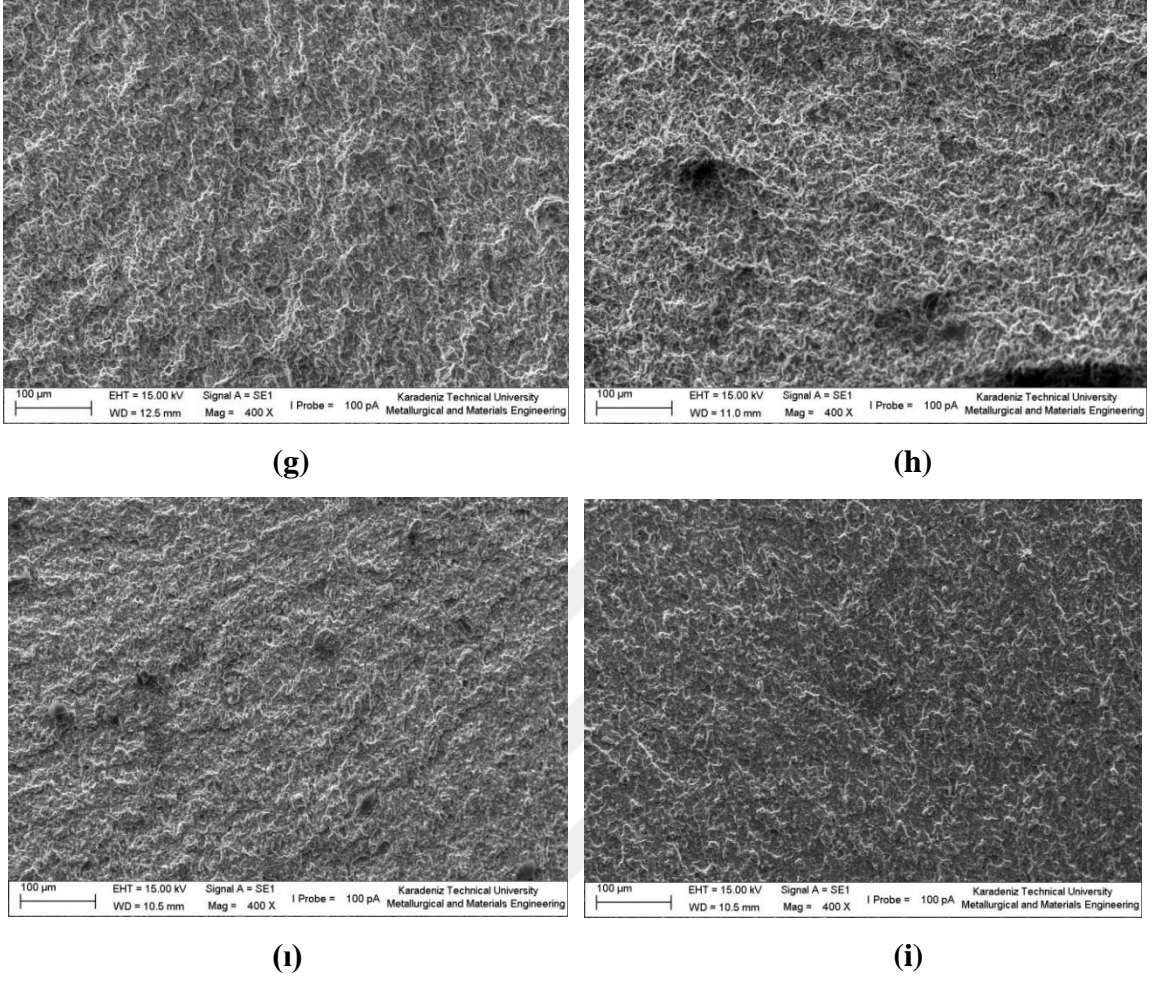
(j)

### 3.4.4.4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C- SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Kırılma Yüzeyleri



Şekil 3.43. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)BS<sub>0.25</sub>, (b)BS<sub>0.50</sub>, (c)BS<sub>0.75</sub>, (d)BS<sub>1</sub>, (e)BS<sub>1.5</sub>, (f)BS<sub>2</sub>, (g)BS<sub>2.5</sub>, (h)BS<sub>3</sub>, (i)BS<sub>4</sub>, (j)BS<sub>5</sub>

Şekil 3.43'ün devamı



### 3.4.5. Korozyon Testleri

Alüminyum matrisli ve B<sub>4</sub>C ve SiC takviyeli kompozitlerin korozyon davranışlarını en çok etkileyen parametreler şöyle sıralanabilir:

- Takviye partiküllerinin miktarı
- Takviye partiküllerinin matris içerisine dağılımı
- Matris alaşımının mikroyapısı

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiC nano kompozitlerin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerin korozyon deneyi sonuçları ( $E_{kor}$ ,  $I_{kor}$ , korozyon hızı) Tablo 3.5'de belirtilmiştir. Tablo 3.5.'de belirtildiği üzere hem B<sub>4</sub>C ve SiC takviye nano kompozitler hem de B<sub>4</sub>C-SiC takviyeli hibrit nano kompozitler arasında en yüksek  $i_{kor}$  ve korozyon hızı değerleri % 1.5 takviyeli numunelerde görülmüştür. B<sub>4</sub>C takviyeli nano kompozitler içinde

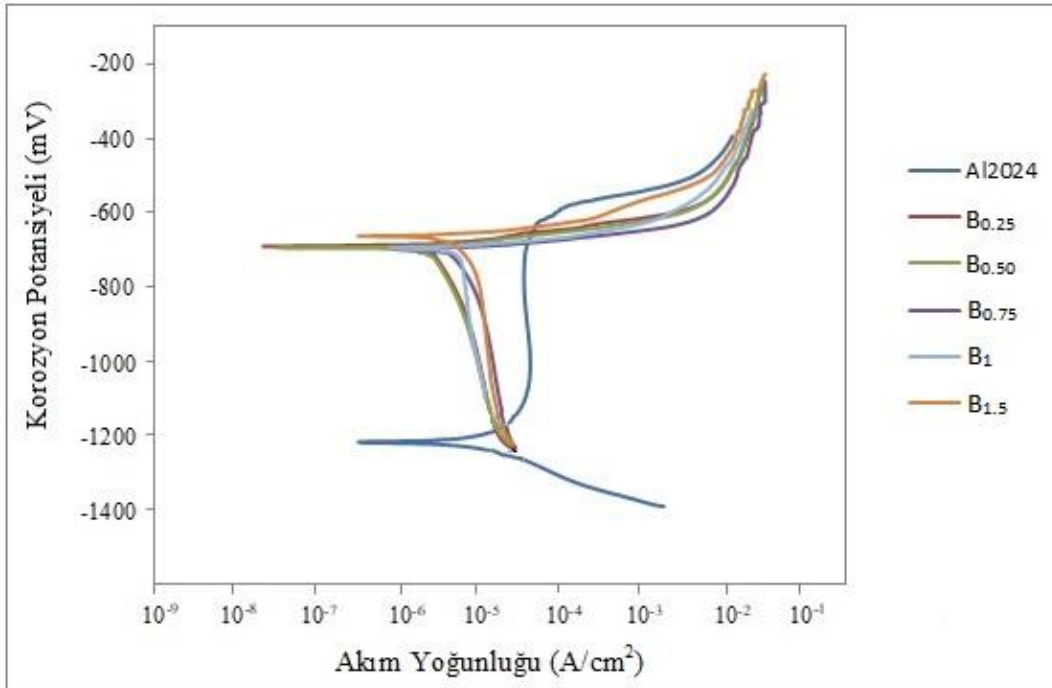
korozyon hızı 0.37 mpy ile en yüksek korozyon direncine sahip nano kompozit B<sub>5</sub>'dur. S<sub>5</sub> ise SiC takviyeli nano kompozitler arasında 3.91 mpy korozyon hızı ile en yüksek korozyon direncine sahiptir. Aynı şekilde BS<sub>5</sub> numunesi de hibrit nano kompozitler arasında 0.38 mpy korozyon hızı ile en yüksek korozyon direncine sahiptir. Genel anlamda alınan sonuçlara bakıldığında zaman üretilen bütün nano kompozitlerin ve hibrit nano kompozitlerin korozyon dayanımları Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımından daha yüksek olduğu bulunmuştur. Üretilen nano kompozitler arasında ise en düşük korozyon dayanımları SiC takviyeli nano kompozitlerdir. Bunun nedeni ise yapısında oluşan Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara bileşiklerinin varlığı ve miktarından dolayıdır.

Tablo 3.5. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC kompozitlerin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin korozyon testleri sonucu E<sub>kor</sub>, I<sub>kor</sub> ve korozyon hızı değerleri

Numune Kodu	E <sub>kor</sub>	I <sub>kor</sub>	Korozyon Hızı
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1220	46,12	31,87
B <sub>0.25</sub>	-691	2,71	1,91
B <sub>0.50</sub>	-695	4,07	2,86
B <sub>0.75</sub>	-699	8,52	5,95
B <sub>1</sub>	-696	8,64	6,07
B <sub>1.5</sub>	-664	9,12	6,32
B <sub>2</sub>	-718	6,92	4,82
B <sub>2.5</sub>	-675	3,92	2,75
B <sub>3</sub>	-697	3,88	2,69
B <sub>4</sub>	-696	0,81	0,57
B <sub>5</sub>	-703	0,53	0,37
S <sub>0.25</sub>	-690	10,53	7,23
S <sub>0.50</sub>	-651	11,91	8,88
S <sub>0.75</sub>	-678	13,98	10,09
S <sub>1</sub>	-667	15,46	10,51
S <sub>1.5</sub>	-678	17,79	12,21
S <sub>2</sub>	-679	14,52	10,29
S <sub>2.5</sub>	-666	13,91	10,02
S <sub>3</sub>	-676	12,24	8,69
S <sub>4</sub>	-697	6,71	4,69
S <sub>5</sub>	-621	5,35	3,91
BS <sub>0.25</sub>	-676	5,14	3,55
BS <sub>0.50</sub>	-690	5,37	3,81
BS <sub>0.75</sub>	-690	6,51	4,68
BS <sub>1</sub>	-680	8,61	6,02
BS <sub>1.5</sub>	-698	16,01	11,54
BS <sub>2</sub>	-692	7,32	5,13
BS <sub>2.5</sub>	-692	6,05	4,28
BS <sub>3</sub>	-687	5,43	3,89
BS <sub>4</sub>	-654	3,17	2,19
BS <sub>5</sub>	-679	0,54	0,38

Al2024 / B<sub>4</sub>C, Al2024 / SiC nano kompozitlerin ve Al2024 / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 3.35, Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de verilmiştir.

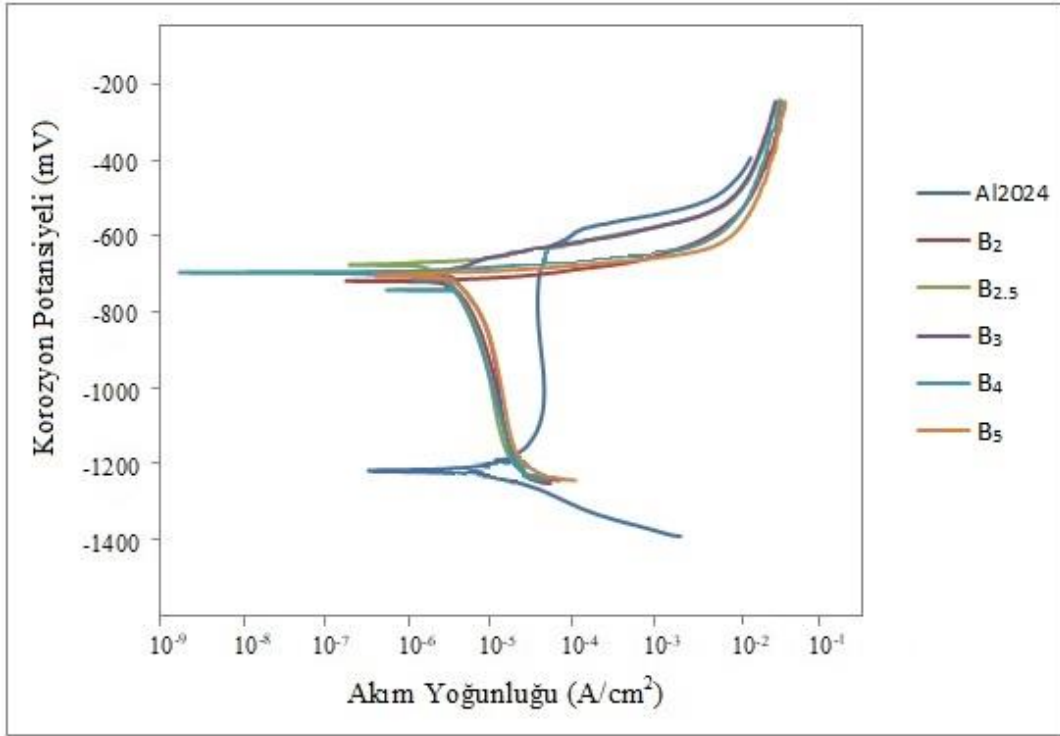
Anodik polarizasyon eğrileri numunelerin anodik çözünmesi sonucu oluşurken katodik polarizasyon eğrileri ise katodik hidrojen çıkışını göstermektedir. Üretilmiş olan nano kompozitlerin ve hibrit nano kompozitlerin hem anodik hem de katodik polarizasyon eğrileri saf Al2024 alaşım numunesinin eğrileri ile aynı olduğu görülmüştür. Küçük bir anodik çözünme akımının bu nano kompozitlerin pasifliğine ait bir potansiyel aralık içerisinde olduğunu göstermektedir. Bu bölgeden sonra pasif akıma göre daha büyük ve güçlü bir potansiyel anodik çözünmelerin meydana gelmesi çukurcuk korozyonunun başladığını göstermektedir. Saf Al2024 alaşımının oksijen indirme reaksiyonuna ait katodik polarizasyon akımı nano kompozitlerin katodik polarizasyon akımından daha düşüktür (Şekil 3.35a). Dolayısıyla, kompozitlerin katodik hidrojen çıkış reaksiyonunun aşırı potansiyel değeri Al2024 alaşımından daha az olduğu gözlemlenmiştir. NaCl tuz çözeltisi içerisinde nano kompozitlerin anodik pasif akım yoğunlukları Cl<sup>-</sup> iyonlarının konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır.



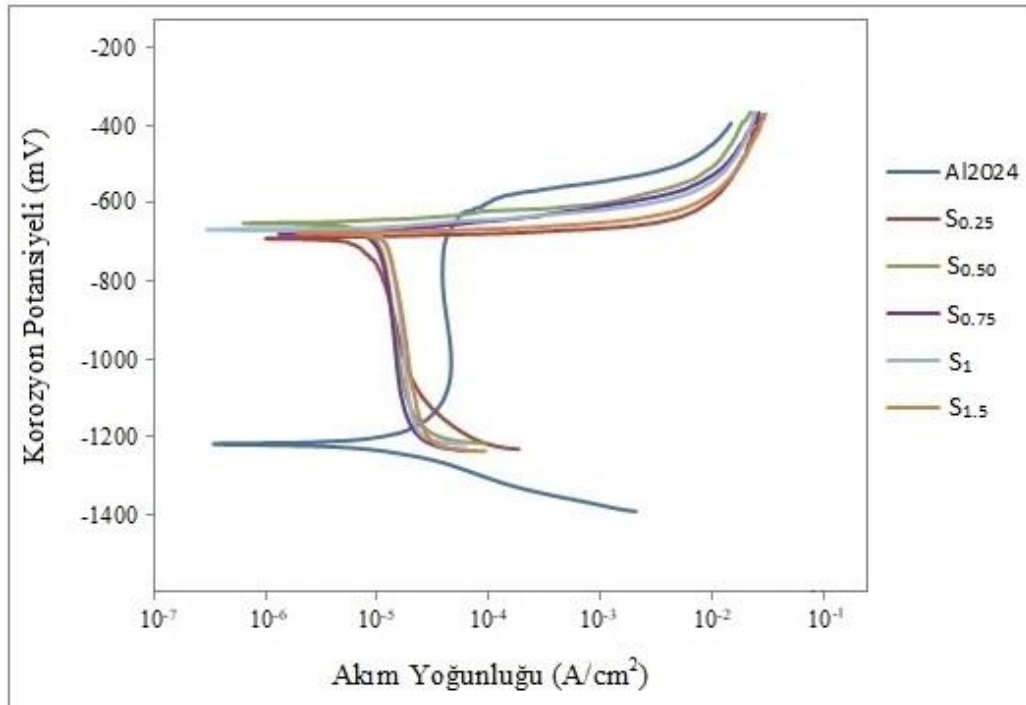
(a)

Şekil 3.44. Al2024/B<sub>4</sub>C nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel Eğrileri

Şekil 3.44'ün devamı



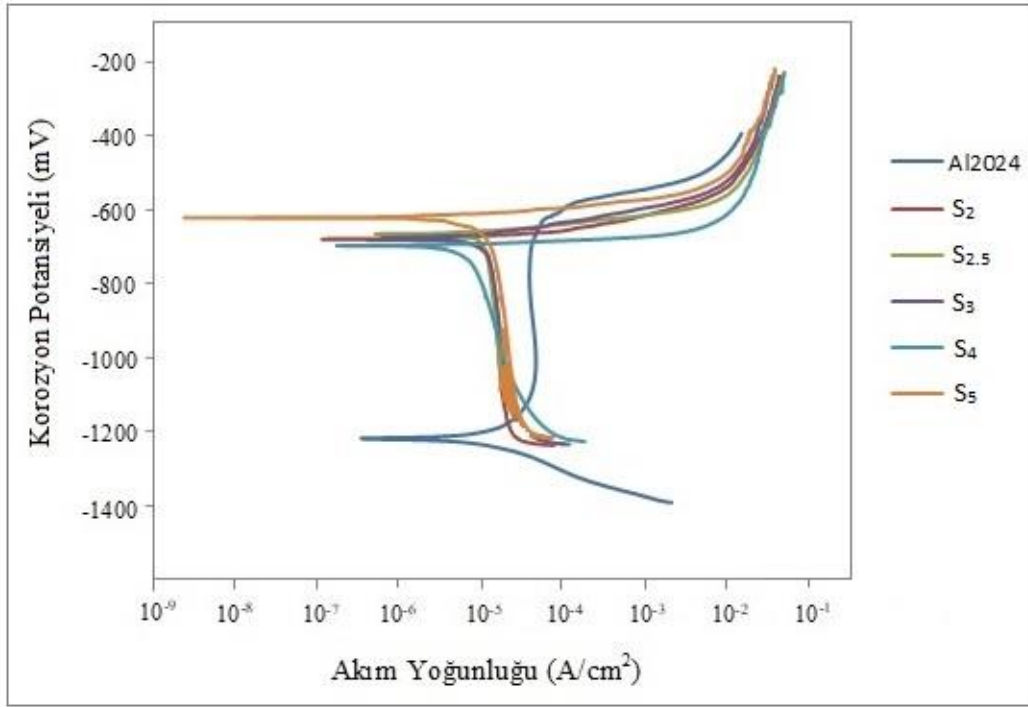
(b)



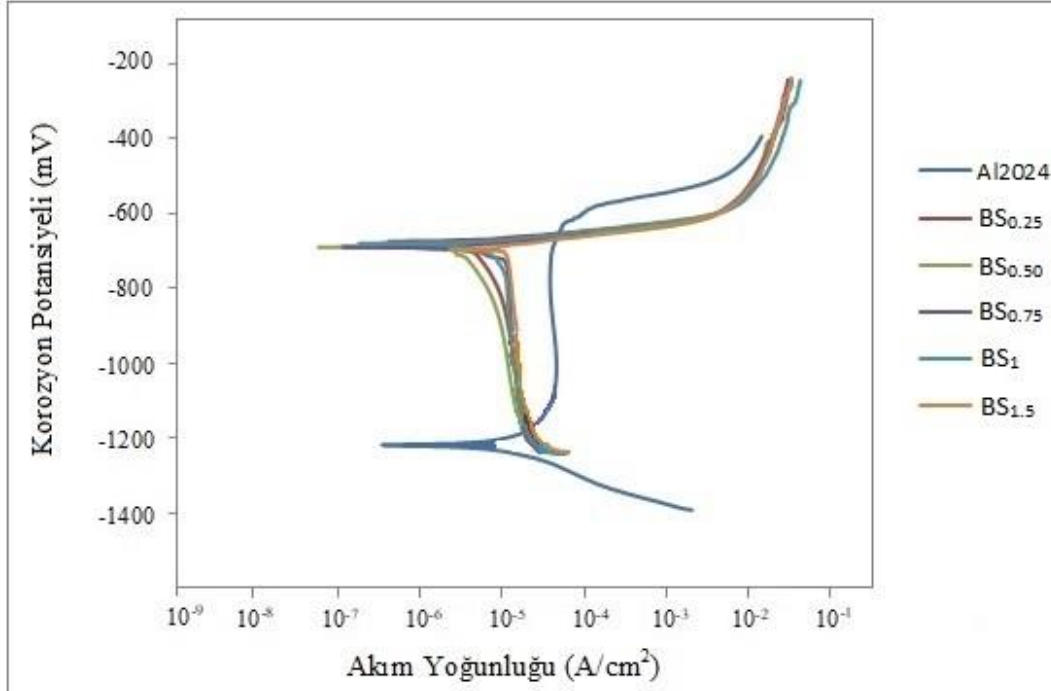
(a)

Şekil 3.45. Al2024/SiC nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel eğrileri

Şekil 3.45'in devamı



(b)

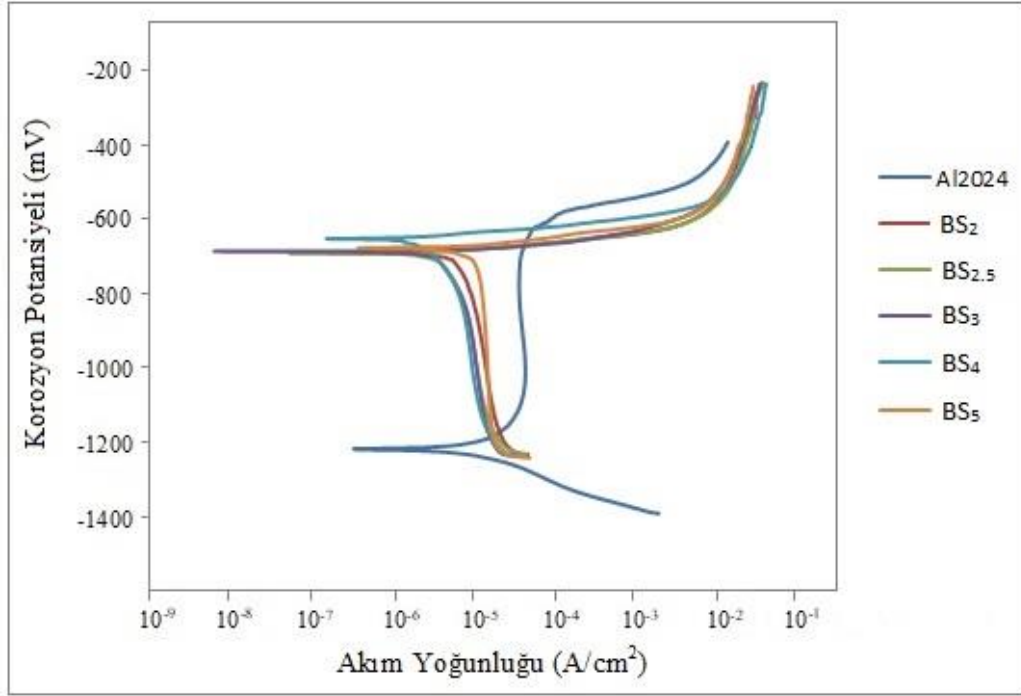


(a)

Şekil 3.46. Al2024/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerin korozyon testi sonucu oluşan tafel eğrileri



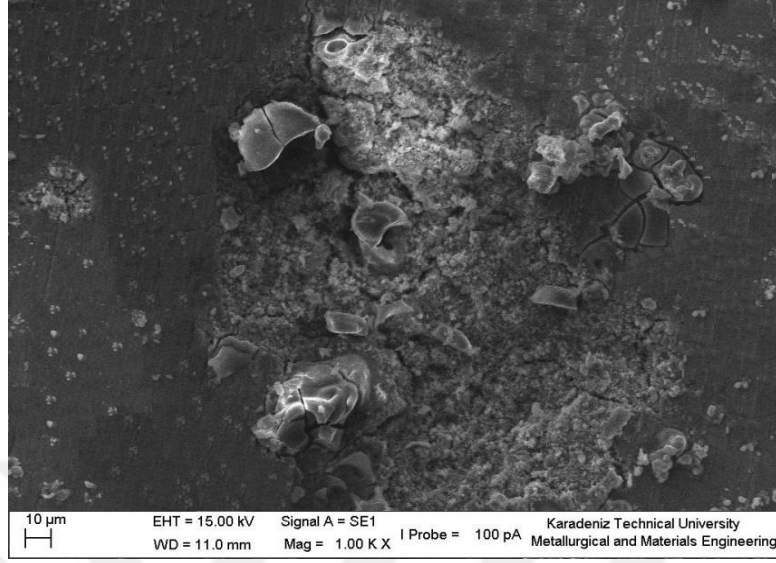
Şekil 3.46'nın devamı



(b)

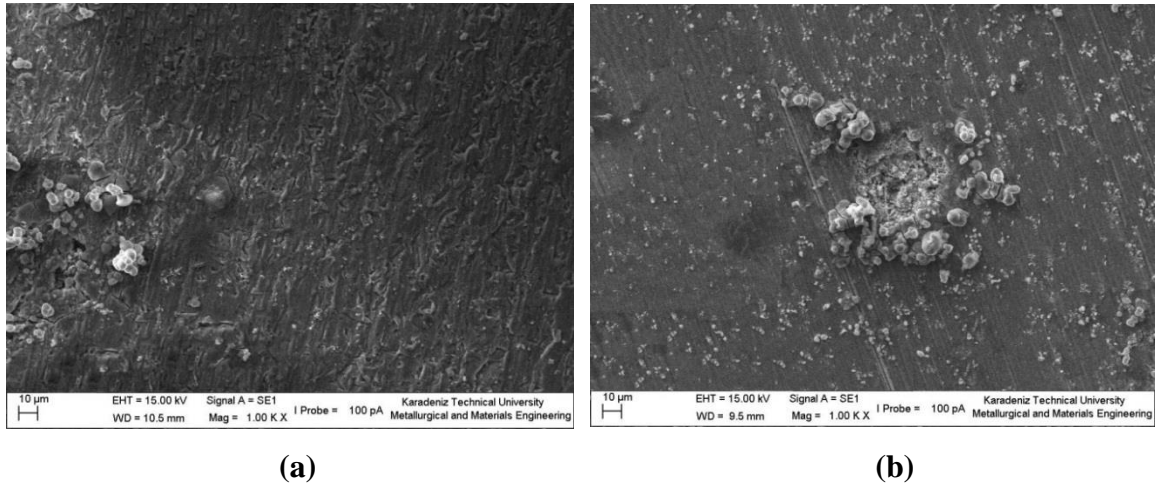
Şekil 3.38, Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'de Al2024 / B<sub>4</sub>C, Al2024 / SiC nano kompozitlerin ve Al2024 / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerin korozyona uğramış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde Al2024 / SiC nano kompozitlerin yüzeylerinde oluşan çukurcuklar daha geniş alanda ve derinlikte oluşmuştur. Yani Al2024 / B<sub>4</sub>C nano kompozitlerinde ve Al2024 / B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerinde B<sub>4</sub>C partikülleri korozyon için daha iyi bariyer görevi görerek numunelerin korozyon dayanımını arttırmıştır. Diğer bir parametre ise nano kompozitlerde oluşan Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara bileşikleridir. Numunelerin korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilediğine dair araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan birinde Al<sub>2</sub>Cu ve Mg<sub>2</sub>Si gibi fazlar, galvanik çift oluşumuna sebep olduğundan Al alaşımlarında çukurcuk korozyona yol açabileceği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Al<sub>2</sub>Cu fazının çukurcuk korozyonunda SiC'den daha önemli rol oynağı tespit edilmiştir [98-100]. Genel anlamda takviye oranı arttıkça numunelerin korozyon dayanımı da artmıştır ve çukurcuk yüzey alanları da sonuçlar kısmında olduğu gibi %1.5 ağırlıkça takviye oranına kadar artmış sonra ise çukurcuklar sürekli küçülmüştür.

### 3.4.5.1. Al2024 Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi



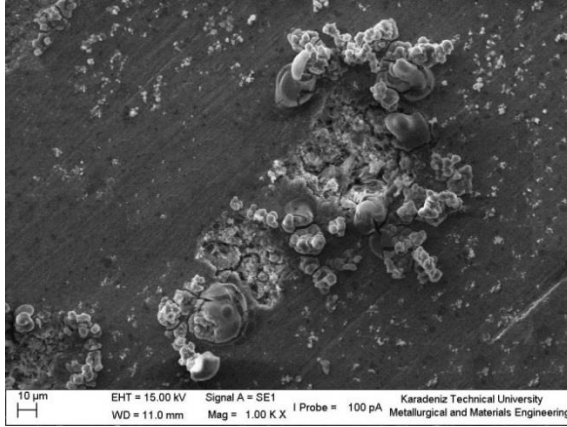
Şekil 3.47. Saf Al2024 numunesinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyi

### 3.4.5.2. Al2024/B<sub>4</sub>C Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi

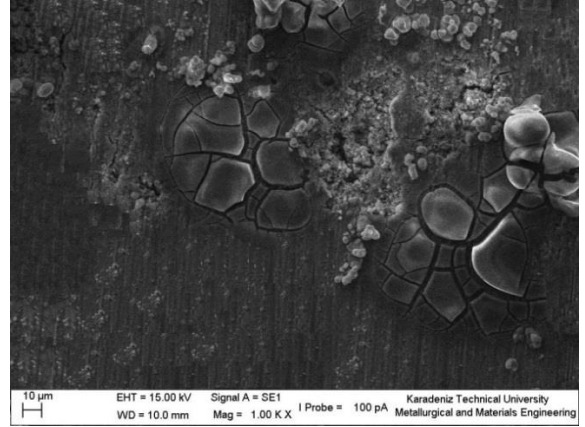


Şekil 3.48. Al2024/B<sub>4</sub>C nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)B<sub>0.25</sub>, (b)B<sub>0.50</sub>, (c)B<sub>0.75</sub>, (d)B<sub>1</sub>, (e)B<sub>1.5</sub>, (f)B<sub>2</sub>, (g)B<sub>2.5</sub>, (h)B<sub>3</sub>, (i)B<sub>4</sub>, (i)B<sub>5</sub>

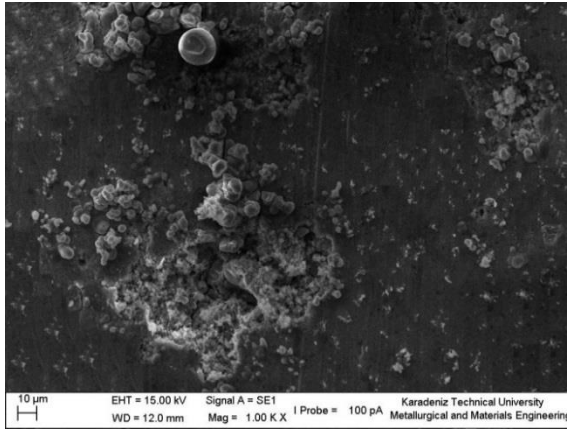
Şekil 3.48'in devamı



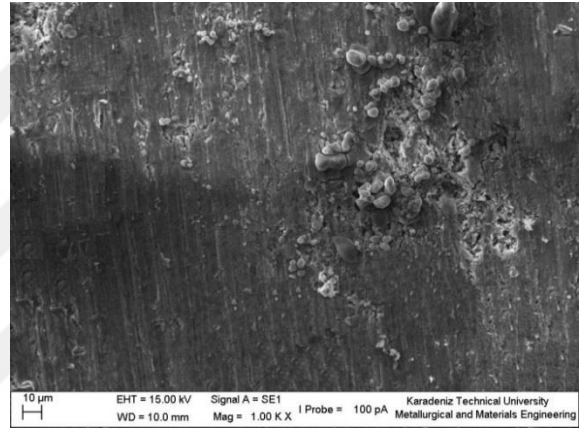
(c)



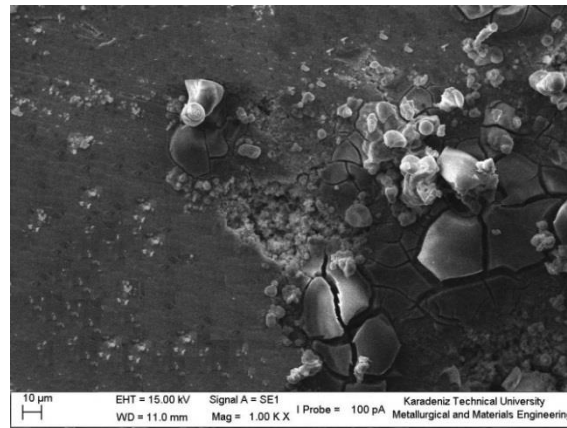
(d)



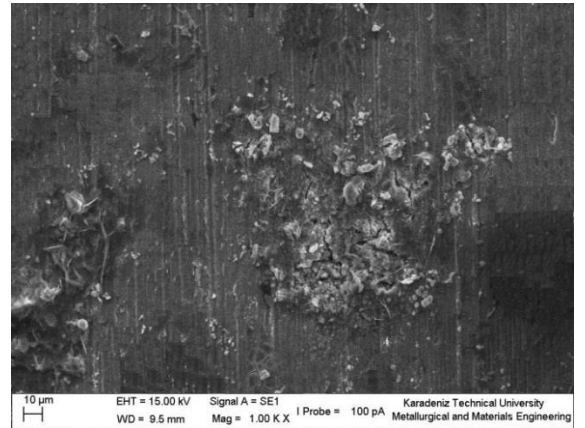
(e)



(f)

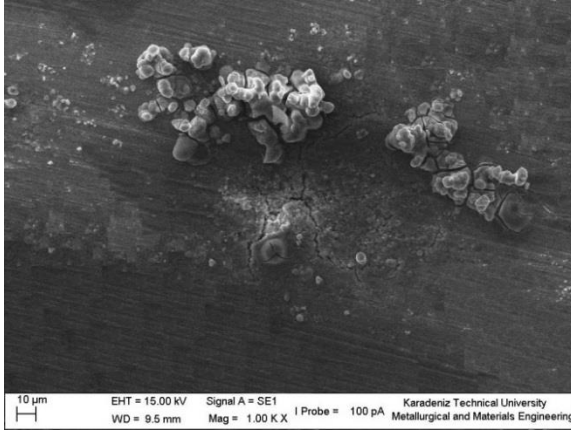


(g)

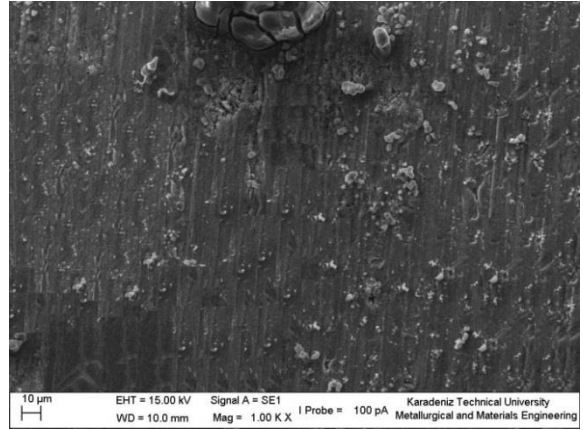


(h)

Şekil 3.48'in devamı

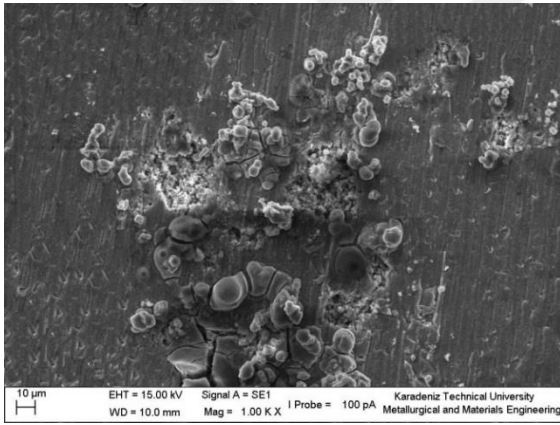


(i)

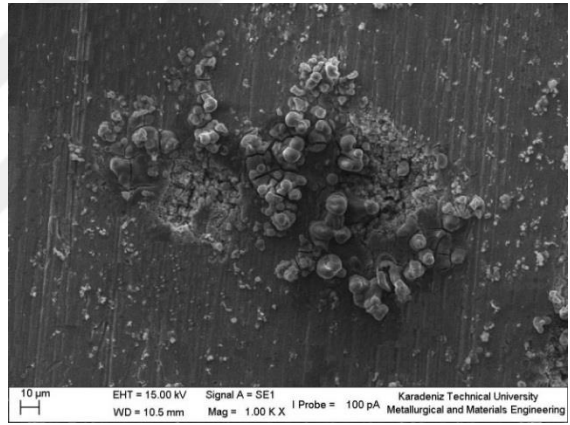


(i)

### 3.4.5.3. Al2024/SiC Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi



(a)



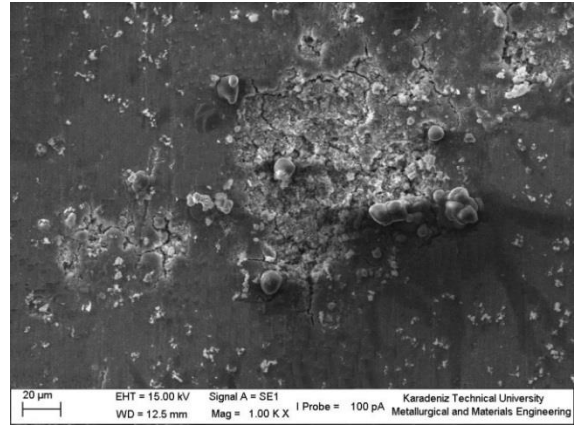
(b)

Şekil 3.49. Al2024/SiC nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)S<sub>0.25</sub>, (b)S<sub>0.50</sub>, (c)S<sub>0.75</sub>, (d)S<sub>1</sub>, (e)S<sub>1.5</sub>, (f)S<sub>2</sub>, (g)S<sub>2.5</sub>, (h)S<sub>3</sub>, (i)S<sub>4</sub>, (i)S<sub>5</sub>

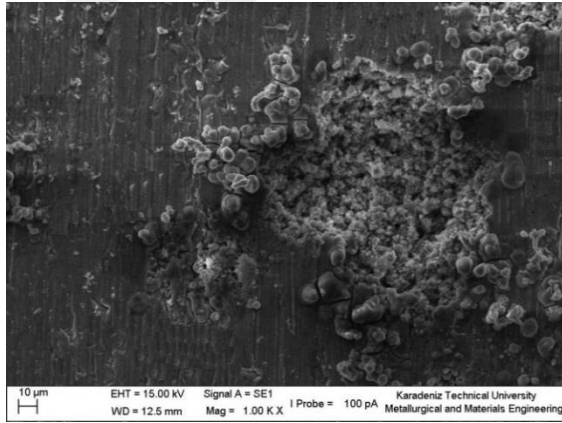
Şekil 3.49'un devamı



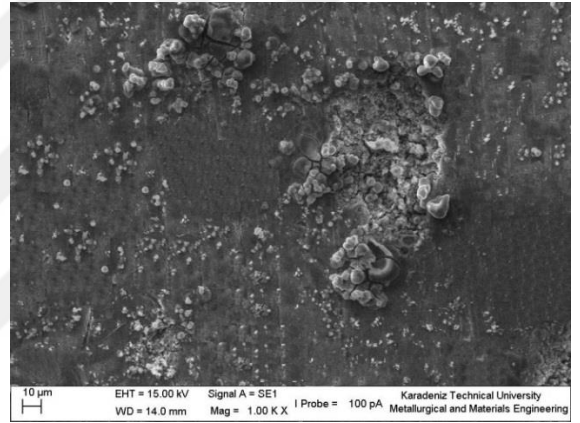
(c)



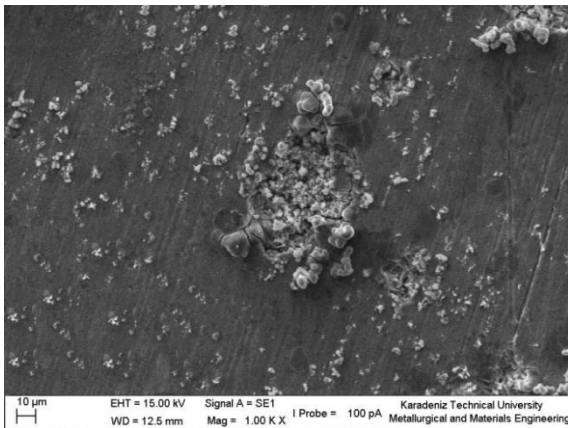
(d)



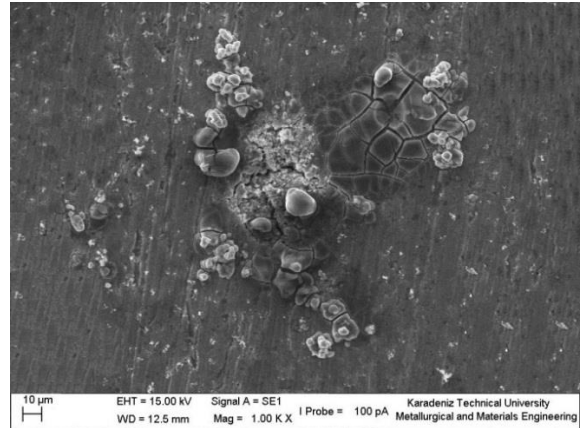
(e)



(f)

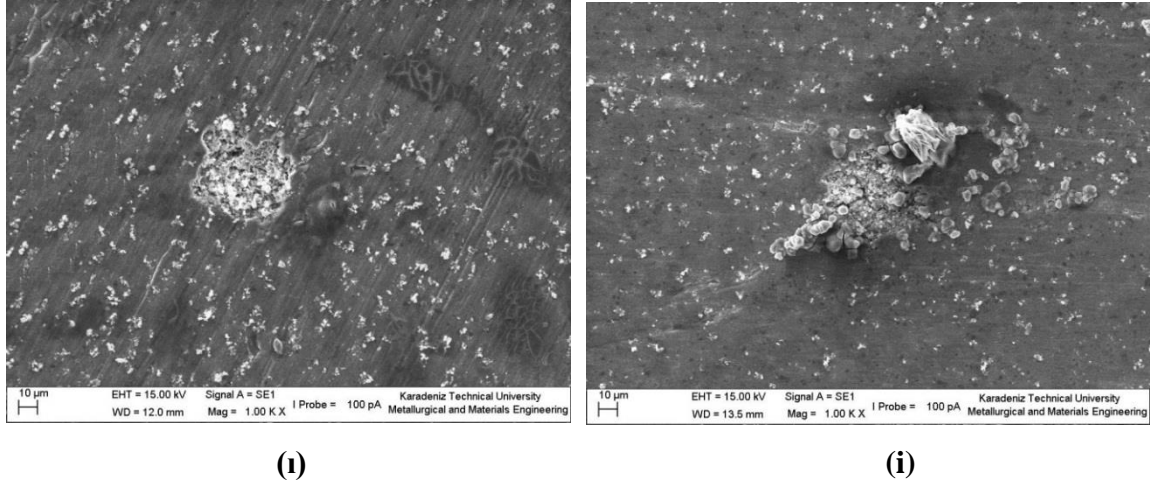


(g)

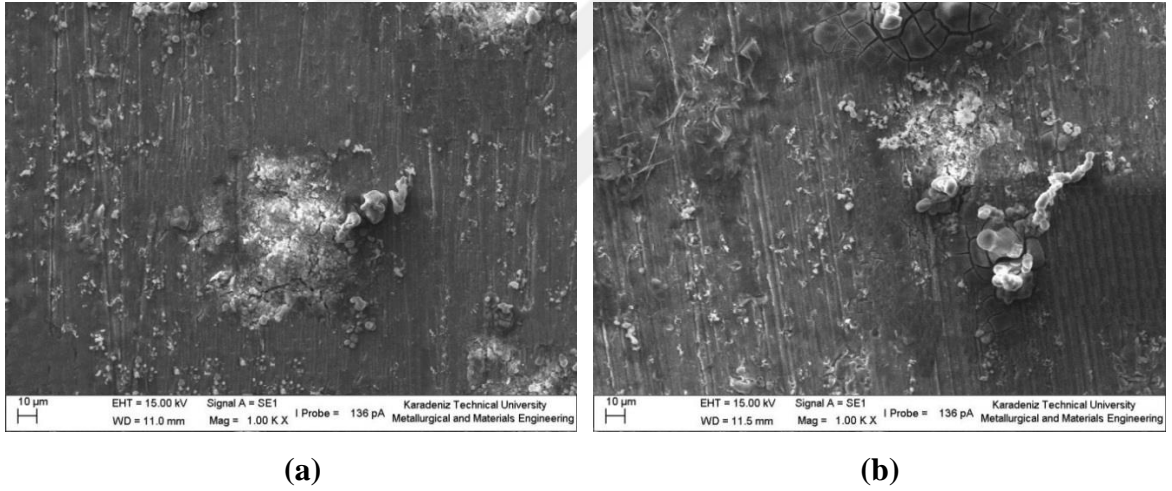


(h)

Şekil 3.49'un devamı

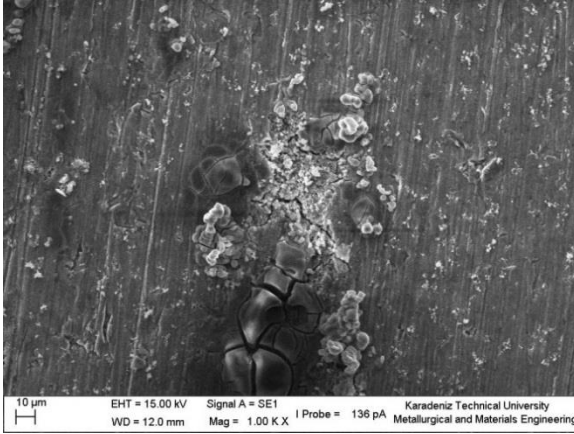


#### 3.4.5.4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC-B<sub>4</sub>C Hibrit Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzeý İncelemesi

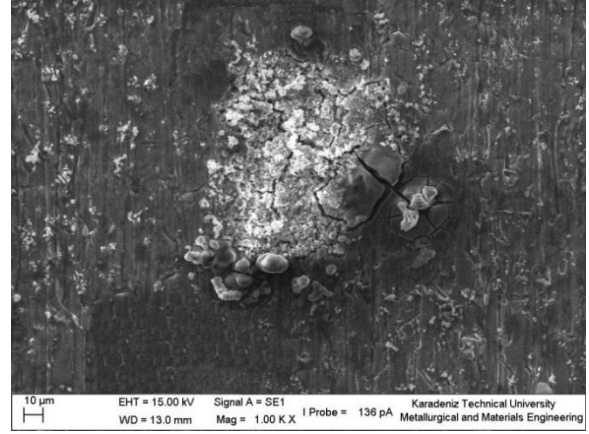


Şekil 3.50. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)BS<sub>0.25</sub>, (b)BS<sub>0.50</sub>, (c)BS<sub>0.75</sub>, (d)BS<sub>1</sub>, (e)BS<sub>1.5</sub>, (f)BS<sub>2</sub>, (g)BS<sub>2.5</sub>, (h)BS<sub>3</sub>, (i)BS<sub>4</sub>, (i)BS<sub>5</sub>

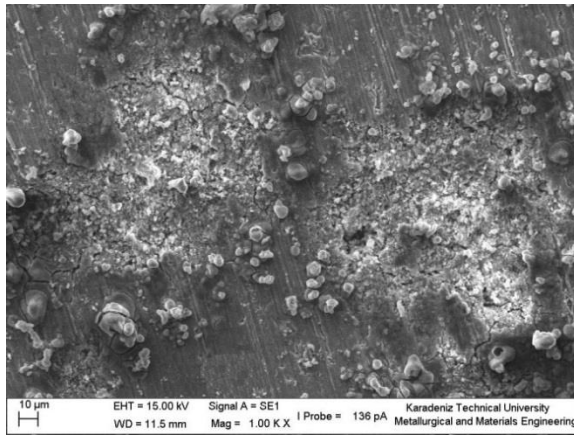
Şekil 3.50'nin devamı



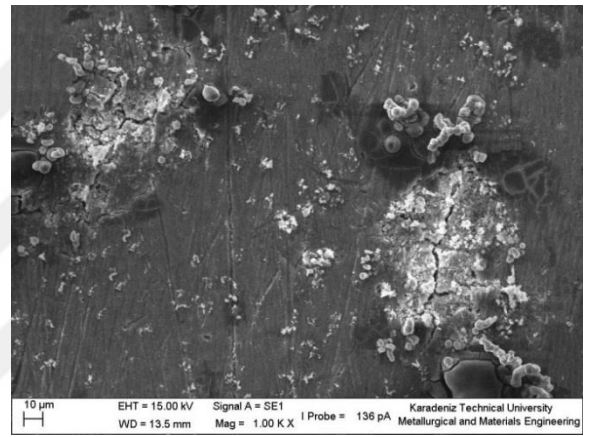
(c)



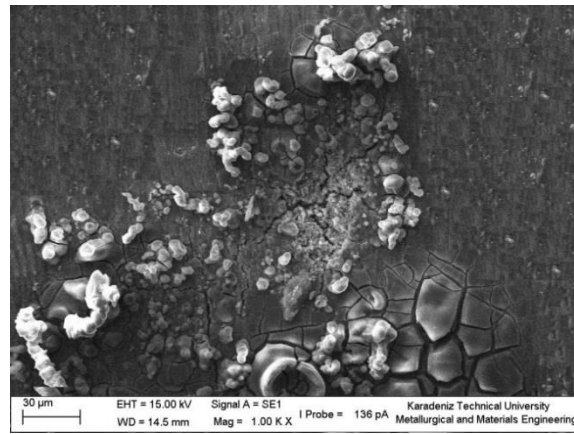
(d)



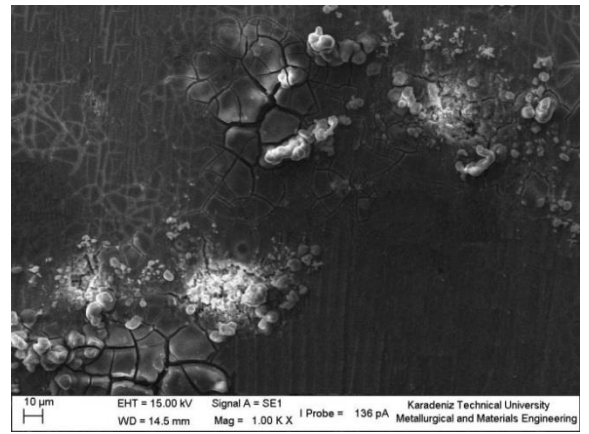
(e)



(f)

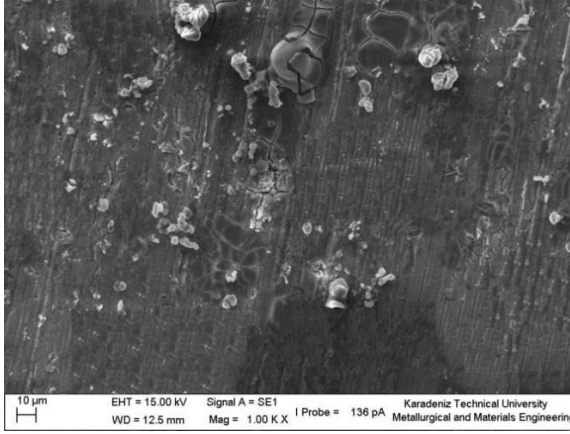


(g)

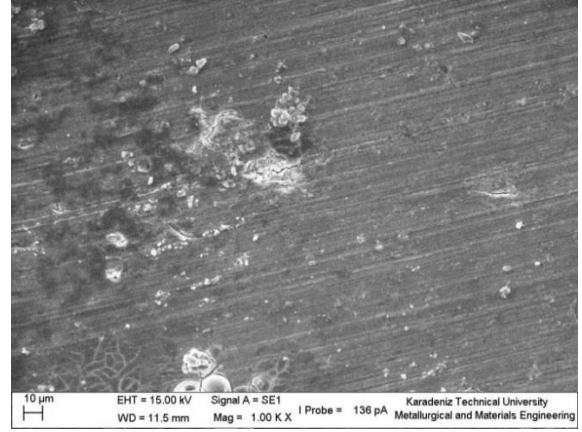


(h)

Şekil 3.50'nin devamı



(i)



(ii)





#### 4. TARTIŞMA

Öğütme ile üretilen tozların morfolojilerine bakıldığında uygulanan öğütme sürelerinde en iyi homojen dağılımı ve matris içerisine takviye parçacıklarının en iyi dağılımını 8 saatlik öğütme süresinde ulaşılmıştır. Sünek-gevrek sistemde takviye edilen sert parçacık miktarına bağlı olarak, ne kadar fazla ise mekanik alaşımlama ve öğütme işlemlerinde o oranda etkili olmakla birlikte kararlı hal durumuna daha hızlı ulaşılmaktadır. Bu bağlamda farklı takviye oranı ilave edilen nano kompozitlerin aynı öğütme süresindeki toz boyutlarına bakıldığı zaman artan takviye oranıyla beraber parçacık boyutlarının azaldığı fakat bütün nano kompozit gruplarında olduğu gibi % 2 takviye oranından sonra topaklanma miktarında artışlar görünmüştür (Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9). Başlangıç tozları 50 µm (Şekil 3.10) olan matris malzemesinin 8 saatlik öğütmeden sonra farklı takviyelerle parçacık boyutları düşmüştür. B<sub>4</sub>C takviyeli nano kompozitlerde ortalama boyut 11 µm olurken SiC takviyeli nano kompozitlerde ise ortalama boyut 17 µm'dir (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12). B<sub>4</sub>C-SiC takviyeli hibrit nano kompozitlerde ise ortalama boyut 13 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.13). Bu boyut ölçümlerindeki farklılığın sebebi ise B<sub>4</sub>C parçacıklarının SiC parçacıklarına göre daha sert davranış göstermesidir.

Preslenmiş numunelerin nokta analizlerine incelediğimizde ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımı olsun, nano kompozitlerde olsun yüzeyde Al<sub>2</sub>Cu ara bileşiklerinin bulunduğu görülmüştür. Alınan sonuçlar incelendiğinde yüzeyde görünen açık renkli taneler bakırca zengin bir yapıdır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nano kompozitlerinde ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C-SiC hibrit nano kompozitlerinin hepsinde bu yapıya ve bu oranlara rastlanmıştır. Fakat nano kompozitler arasında bu yapının oranda daha fazla SiC takviyeli nano kompozitlerde olduğu incelenmiştir.

XRD analizlerine de bakıldığında nokta analizlerini doğrular sonuçlar vermiştir. Bu doğrultuda elde edilen XRD spektrumlarında Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> ara bileşiklerine rastlanmıştır. Fakat Al<sub>2</sub>Cu fazının spektrum şiddetleri SiC takviyeli nano kompozitlerde diğer kompozitlere oranla daha fazla görünmüştür ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> fazı ise sadece SiC takviyeli nano kompozitlerde görülmüştür.

Preslenmiş numunelerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik oranları da incelendiğinde artan takviye beraber kompozitlerin bağıl yoğunlukları azalırken, gözeneklilik miktarlarında artış gözlemlenmiştir (Şekil 3.23). Artan takviye miktarı tozların paketlenme

kabiliyetini düşürerek gözenekliliğin artmasına neden olmuştur. Sıkıştırma yöntemi olarak seçilen sıcak presleme yöntemi ile %99'a varan bağıl yoğunluk miktarı ile geleneksel sıkıştırma ve presleme yöntemi ile toz metalurjisi ürünlerde bu değerlere ulaşmak oldukça zordur.

Nano kompozitlerin sertliği ise artan takviye miktarı ile artış göstermiştir (Şekil 3.24). Bu artışın sebebi ise  $B_4C$ 'ün elmas ve kübik bor nitrür'ün ardından en sert (9.5+ Mohs skalasında) üçünü malzeme olmasıdır [17].  $B_4C$  parçacıkları matris fazından ve SiC parçacıklarından daha sert malzeme olmasından dolayı,  $B_4C$  takviyeli nano kompozitlerin sertlik değerleri daha fazladır.

Üç nokta eğme mukavemeti değerleri incelendiğinde, artan takviye miktarı ile tüm kompozit gruplarında %2 takviye oranına kadar artış göstermiş, daha sonra artan takviye oranıyla eğme mukavemeti değerleri düşmüştür. Bunun sebebi olarak ise %2 takviye oranından sonra topaklanma miktarında artışların olması ve gözeneklilik miktarının artmasından dolayıdır. Nano kompozit gruplar arasında en iyi eğme davranışı gösteren grup ise  $B_4C$  takviyeli nano kompozitlerdir. SiC takviyeli nano kompozitler ve hibrit nano kompozitlerde  $Al_2Cu$  faz miktarının fazla olması ve SiC takviyeli nano kompozitlerde ilave olarak  $Al_4C_3$  fazının varlığı sebebiyle eğme mukavemeti değerleri daha düşüktür. Kırılma yüzeylerinde bakıldığında kırılma davranışı Al2024 alaşımında daha sünek olup takviye oranları arttıkça kırılma davranışı giderek gevrek davranış göstermiştir (Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29).

Çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde, artan takviye oranlarıyla nano kompozitlerin ve hibrit nano kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri artmıştır. Bütün gruplarda en yüksek çekme mukavemeti değerleri % 2 takviye oranında sağlanmıştır. Bununda nedeni takviye parçacıklarının %2 oranında daha homojen dağılması ve matris içerisine daha iyi gömülmesinden dolayı olduğu tespit edilmiştir. Takviye oranı %2'den sonra topaklanma miktarındaki artıştan dolayı çekme mukavemeti değerlerinde düşüş görülmüştür. Kırılma yüzeyinin görünüşü kırılma davranışının belirlenmesinde (sünek-gevrek, taneler arası-tane içi) önemli rol oynamaktadır. Gruplar içerisindeki numuneler arasındaki çekme mukavemeti ve kırılma davranışları farkları gözlenmiştir. (Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34). Takviye oranı arttıkça sünek kırılma davranışından gevrek kırılma davranışına doğru değişim söz konusudur.

Korozyon testleri sonuçları, Tablo 3.5.'de görüldüğü üzere hem  $B_4C$  ve SiC takviye nano kompozitler hem de  $B_4C$ -SiC takviyeli hibrit nano kompozitler arasında en yüksek

$i_{kor}$  ve korozyon hızı değerleri % 1.5 takviyeli numunelerde görülmüştür. Bunun sebebi olarak artan takviye oranı ile gözeneklilik miktarında artış ve  $Al_2Cu$  fazının varlığıdır. Fakat %1.5'dan sonra kompozitlerin korozyon dayanımları artmıştır. Bunun sebebi olarak ise  $B_4C$  ve  $SiC$  seramik özlü takviyelerin hem gözenekliliğin olumsuz etkisini hem de  $Al_2Cu$  varlığının etkisini azaltmasından dolayıdır. Nano kompozit grupları arasında ise en iyi korozyon dayanımını  $B_4C$  takviyeli nano kompozitler ve  $B_4C-SiC$  takviyeli hibrit nano kompozitler göstermiştir. Korozyon testleri sonrası kompozitlerin yüzeylerinin SEM yüzeylerine bakıldığı zaman  $Al_2O_3 / SiC$  nano kompozitlerin yüzeylerinde oluşan çukurcuklar daha geniş alanda ve derinlikte oluşmuştur. Yani  $Al_2O_3 / B_4C$  nano kompozitlerinde ve  $Al_2O_3 / B_4C-SiC$  hibrit nano kompozitlerinde  $B_4C$  parçacıkları korozyon için daha iyi bariyer görevi görerek numunelerin korozyon dayanımını arttırmıştır. Diğer bir parametre ise nano kompozitlerde oluşan  $Al_2Cu$  ve  $Al_4C_3$  ara bileşikleridir. Numunelerin korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilediğine dair araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan birinde  $Al_2Cu$  ve  $Mg_2Si$  gibi fazlar, galvanik çift oluşumuna sebep olduğundan Al alaşımlarında çukurcuk korozyona yol açabileceği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir.  $Al_2Cu$  fazının çukurcuk korozyonunda  $SiC$ 'den daha önemli rol oynadığı tespit edilmiştir [98-100].

## 5. SONUÇLAR

Uygulanan deneylerden bulunan sonuçların değerlendirilmesi ile elde edilen çıkarımlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Kompozit tozlarının morfolojik incelemelerine bakıldığında tüm grupları için en iyi öğütme süresinin 8 saat olduğu bulunmuştur. Mekanik alaşımlama sonucu  $B_4C$  ve SiC takviyeleri matris içerisine homojen dağılmış ve iyi gömülmüş olarak nano kompozitler üretilmiştir.
2. Toz resimlerine bakıldığında en iyi homojen dağılım %2 takviyeli kompozitlerde görülmüştür.
3. Tüm nano kompozit gruplarının XRD analizlerinde ve nokta analizlerinde Al,  $B_4C$ , SiC,  $Al_2Cu$  ve  $Al_4C_3$  fazlarına rastlanmıştır. SiC takviyeli nano kompozitlerde  $Al_2Cu$  fazı diğer kompozitler gruplarına göre daha baskındır ve  $Al_4C_3$  fazı ise sadece bu kompozit grupta görülmüştür.
4. Tüm grup nano kompozitlerin yoğunluk değerleri artan takviye miktarı ile birlikte azalmıştır ve artan takviye oranı ile nano kompozitlerin gözeneklilik oranları artmıştır.
5. Artan takviye oranıyla tüm nano kompozit grupların sertliği de artmıştır. Nano kompozit gruplar arasında en yüksek sertlik değerine  $B_4C$  takviyeli  $B_5$  kod'lu (209 BSD) sahiptir.
6. Nano kompozitlerin eğme mukavemeti değerleri artan takviye ile artmış fakat topaklanma miktarının %2 takviye oranından sonra artmasıyla azalmıştır. Tüm gruplarda en iyi eğme mukavemeti değerini %2 takviyeli nano kompozitler göstermiştir. Al2024 /  $B_4C$ , Al2024 / SiC nano kompozitlerinin ve Al2024 /  $B_4C$ -SiC hibrit nano kompozitlerinin sırasıyla en iyi eğme mukavemeti değerleri; 1288 MPa, 676 MPa ve 742 MPa'dır.
7. Nano kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri (eğme mukavemetinde olduğu gibi) artan takviye ile artmış fakat topaklanma miktarının %2 takviye oranından sonra artmasıyla azalmıştır. Tüm gruplarda en iyi çekme mukavemeti değerini %2 takviyeli nano kompozitler göstermiştir. Al2024 /  $B_4C$ , Al2024 / SiC nano kompozitlerinin ve Al2024 /  $B_4C$ -SiC hibrit nano kompozitlerinin sırasıyla en iyi çekme mukavemeti değerleri; 392 MPa, 383 MPa ve 390 MPa'dır.
8. Tüm nano kompozitlerin %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testleri sonuçlarına göre en yüksek korozyon direncine sahip  $B_5$  nano kompozitinin korozyon hızı

0.37 mpy olarak belirlenmiştir. Gruplar arasında en kötü korozyon dayanımına SiC takviyeli nano kompozitlerin sahip olduğu bunun sebebinin de  $Al_2Cu$  fazının miktarının fazla olmasından dolayıdır. Genel anlamda takviye oranı arttıkça tüm gruplarda korozyon dayanımında düşüş görülmüş ve %2 takviye oranıyla beraber korozyon dayanımı sürekli artmıştır.



## 6. ÖNERİLER

1. Üretilmiş olan nano kompozitlerin mikroyapısal tayininde geçirimli elektron mikroskopundan (TEM) faydalanılabilir.  $Al_2Cu$  fazı ile  $Al_4C_3$  fazlarının daha doğru bir şekilde analiz edilebileceği düşünülmektedir
2. Nano kompozitlere ve hibrit nano kompozitlere yaşlandırma ısı işlemi yapılarak, mekanik özellikler iyileştirilebilir.
3. Soğuk ve/veya sıcak plastik deformasyon yöntemleri kullanılarak gözeneklilik miktarları daha yüksek oranda düşürülerek üretilen nano kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilebilir.
4. Nano kompozitlerin NaCl dışında farklı ortamlarda da korozyon davranışları incelenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Keçeli, Z., 2007. Characterization Investigations of Powder and Sintered Al-SiC and Al-B<sub>4</sub>C Composites Developed Via Mechanical Alloying, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
2. Ahlatçı, H., 2003. Alüminyum-Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. Varol, T., 2012. AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
4. Erdemir, F., 2016. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
5. Scudino, S., Liu, G., Prashanth, K.G., Bartusch, B., Surreddi, K.B., Murty, B.S. ve Eckert, J., Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurg, Acta Materialia, 57 (2009) 2029–2039.
6. Canakci, A., Arslan, F. ve Yasar, I., Pre-treatment process of B<sub>4</sub>C particles to improve incorporation into molten AA2014 alloy, Journal of Materials Science, 442 (2007) 9536-9542.
7. Varol T. ve Canakci A., Effect of particle size and ratio of B<sub>4</sub>C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C composite powders, Powder Technology, 246 (2013) 462–472.
8. Aktaş, H., 2007. Alüminyum Matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
9. Dalmış, R., 2014. Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Nano-Parçacık Takviyeli Zn-Al Esaslı Nano-Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, İyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
10. Çanakçı, A. ve Varol, T., 2011. Aşamalı İşlem Kontrol Katkısı Tekniğinin Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Üzerine Etkisi, 1. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, Haziran 2011, İstanbul Bildiriler Kitabı: 8-16.

11. Azaklı, M. A., Aslan, S., Akbulut, H. ve Bindal, C., 2003. Etial 171-SiC-Grafit Hibrit Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi Ve Mikroyapısı, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 2, 2003.
12. Smith, W.F., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çeviri Kınıkoğlu, N.G., 3. Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.
13. Weeton, J.W., Peters, D.M., ve Thomas, K.L., Engineers guide to composite materials, American Society for Metals, 1-10, 1990
14. Chavla, N., ve Chavla, K.K., Metal Matrix Composites, Springer Science Business Media, Inc., Boston, 5-102, 2006.
15. Callister, W.D., Materials Science and Engineering, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., Singapore, 1990.
16. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, 91-134, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
17. Taşçı, U., AA2014-B4C Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi Ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilirliği, Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
18. Huda, M.D. ve Hashmi, M.S.J., Application of Aluminium Metal Matrix Composites, Key Engineering Materials, 104-107, 37-64, 1995.
19. Zhang X.P., Ye L., Mai Y.W., Quan G.F. ve Wei W., Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC), Composites: Part A, 30 (1999) 1415-1421.
20. Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. ve Lavernia, E.J., Particulate Reinforced Metal Matrix Composites - a review. Journal of Materials Science, 26 (1991) 1137-1156.
21. Kumdalı, F., 2008. Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
22. Özgün, E.C., 2008. Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Sentezlenen Al-TiC ve Al-Ti-C Toz ve Sinter Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
23. Mondal, D.P, Das, S., Rao, Rn. ve Singh, M., Effect of SiC addition and running-in-wear on the sliding wear behaviour of Al-Zn-Mg aluminium alloy, Materials Science and Engineering: A, 402 (2005) 307-319.
24. Chi, R., Serjouei, A., Sridhar, I., ve Tan, G.E.B., Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach ,International Journal of Impact Engineering, 52 (2013) 37-46.



25. Azimi, A., Shokuhfar, A., ve Zolriasatein, A., Mechanically alloyed Al7075–TiC nanocomposite: Powder processing, consolidation and mechanical strength, Materials and Design, 66 (2015) 137-141.
26. Cayron, C., 2000. TEM Study of Interfacial Reactions and Precipitation Mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Short Fiber or High Volume Fraction SiC Particle Reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5 Ag Squeeze-Cast Composites, Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lozan.
27. Rooy, E.L., Introduction to aluminum and aluminum alloys, ASM Metals Handbook, 2, 10. Baskı, 3–14, ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
28. Kaçar, H, Atik, E ve Meriç, C., The effect of precipitation-hardening conditions on wear behaviours at 2024 aluminium wrought alloy, *Wear*, 236 (2003) 144-152.
29. Deschams, A., Dumont, D., Brechet, Y., Siğli, C. ve Dubost, B., Process modeling of age-hardening aluminum alloys : from microstructure evolution to mechanical and fracture properties, ASM International, Materials Park, OH, (2001) 298-305.
30. Hunt, J.W., ve Herling, D.R., Aluminum Metal Matrix Composites, *Advanced Materials & Processes*, 162 (2004) 39.
31. Yılmaz, T.A., AA 2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretimi ve Yaşlandırılabilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Metal Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
32. Toptan, F., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin döküm yöntemi ile üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
33. Shipway, P.H., Kennedy, A.R. ve Wilkes, A.J., Sliding wear behaviour of aluminum-based metal matrix composites produced by a novel liquid route, *Wear*, 216, (1998) 160-171.
34. Izadi, H., Nolting, A., Munro, C., Bishop, D.P., Plucknett, K.P. ve Gerlich, A.P., Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy, Journal of Materials Processing Technology ,213 (2013) 1900–1907.
35. Kevorkijan, V.M., Stabilisation in and rejection of ceramic particles from molten aluminium alloy: modelling and experimental testing, Composites Science and Technology, 59 (1999) 2363-2374.
36. Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M.S.J., The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites, Journal of Materials Processing Technology, 119 (2001) 329-335.
37. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.
38. Özdoğan, E. ve Demir, A., ve Seventekin, N., Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16 (2006), 159-163.

39. Balcı, H., Akıllı (Fonksiyonel) Tekstiller, Seçilmiş Kumaşlarda Antibakteriyel Apre ve Performans Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ç.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
40. Cireli, A., Kutlu, B., Onar, N. ve Erkan, G., Tekstilde ileri teknolojiler, Tekstil ve Mühendis, 13 (2006) 7-20.
41. Morris, D. G., Mechanical Behavior of Nanostructured Materials. Zurich: TransTech, 1998.
42. German, R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Çeviri Editörleri: Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker ve Nuri Durlu, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
43. German, R.M., Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1994.
44. Jacobs, A.J., ve Kilduff, T.F., Engineering Materials Technology: Structure, Processing, Properties and Selection, 5. Edition, Prentice-Hall Inc., USA, 645 357-397, 2003.
45. Moustafa, S.F., Abdel-Hamid, Z., ve Abd-Elhay, A.M., Copper matrix SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate composites by powder metallurgy technique, Materials Letters, 53 (2002) 244-249.
46. URL-1, <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd.tr.html>, 1 Kasım 2015.
47. Canakci, A., Varol, T. ve Ertok, S., The effect of mechanical alloying on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> distribution and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced Al-MMCs, Science and Engineering of Composite Materials, 19 (2012) 227-235.
48. Mutlu, İ., Toz metalurjisi yöntemiyle elde edilen gözenekli martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikler, Doktora Tezi, İ.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
49. Canakci, A., Varol, T. ve Nazik, C., Effects of amount of methanol on characteristics of mechanically alloyed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders, Materials Technology, 27 (2012) 320-327.
50. Günay, M., Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
51. Kaya, M., Toz metalurjisi ile üretilen NiTi şekil hatırlamalı alaslamların metalurjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.

52. Canakci, A., Varol, T. ve Ozsahin S., Prediction of effect of volume fraction, compact pressure and milling time on properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMCs using neural networks, Metals and Materials International, 19 (2013) 519-526.
53. Ciftci, I., Turker, M., ve Seker, U., Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites, Materials & Design, 25 (2004) 251-255.
54. Nazik, C., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz metalürjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
55. Kurt, A., Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1992.
56. Mabuchi, M. and Higashi, K., “An experimental investigation of a superplastic constitute equation in Al-Mg-Si alloy composites reinforced with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> whiskers”, International Journal of Plasticity, 17 (2001) 399-407.
57. Arık, H., Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrürleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Seramik Tozu Üretimi Parametrelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1, 36, 1996.
58. Söyler, A.U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
59. Işıker, V. ve Ögel, B., “Al-SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi”, 1.Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Eylül 1996, Ankara, Bildiriler Kitabı: 377-385.
60. Türker, M., Özdemir, A.T., Ögel, B. ve Yavuz, A., Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması, Uluslar arası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Kongresi, ODTÜ, 425-431, Ankara, 1998.
61. Hale, R., Powder Metallurgy Process and Applications, AE 510 Research Project, University of Kansas, Lawrence, 2003.
62. Upadhyaya, G.S., Powder Metallurgy, Cambridge International Science Publishing, England, 2002.
63. ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, ASM International, Volume 7, USA, 1998.
64. Schumacher, E.E ve Souden, A.G., Some Aspects of Powder Metallurgy, Bell System Technical Journal, 23 (1944) 422-457.

65. Lawley, A., Atomization: The Production of Metal Powders, MPIF, Princeton, NJ, USA, 1992.
66. Groover M.P., Fundamentals of modern Manufacturing, Materials, Processes and Systems, 4 th Edition. U.S.A. 2009.
67. Bakkaloğlu, A., Yıldız Teknik Üniversitesi Toz Metalurjisi Ders Notları, 2000.
68. Palacı, Y., Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
69. Upadhyaya, G.S., Powder Metallurgy Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2002.
70. URL-2, [www.turktoz.gazi.edu.tr/](http://www.turktoz.gazi.edu.tr/) Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını, 24-28 Haziran 2003.
71. Archbold, J., 1999. Sintering Temperature Effects On The Mechanical Properties Of Porous-coated Ti-Al-4V ELI Alloy, Master Degree Of Applied Science, Graduate Department Of Metallurgy And Material Science, University Of Toronto, 106, Canada.
72. Ekici, E., Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 187, Ankara, 2012.
73. Durmuş, H., CO2 Lazer Kaynağıyla birleştirilmiş Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 1- 150, 2006.
74. Mitrović, S., Babić, M., Stojanović, B., and Miloradović N., Tribological Potencial Of Hybrid Composites Based On Zinc And Alüminium Alloys Reinforced With SiC And Graphite Particles, 12th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 2011.
75. Singer, R.F., Oliver, W.C. and Nix, W.D., Metal Transaction., 11(1980) 1895.
76. Arzt, E., High temperature properties of dispersion strengthened materials produced by mechanical alloying, Conf. of New Materials by MA. Techniques, (1988) 185-200.
77. Kobayashi, K.F., Tackibana, N. and Shingu, P.H., Formation of amorphous Al-Cr alloys by mechanical alloying, J. Of Material Science., 25 (1990) 3149-3154.
78. Koch, C.C., Cavin, O.B., Mc Kamey, C.G. and Scabrough, J.O., Preparation of Amorphous Ni60Nb40 by MA, Appl.Phys. Letters, 43(1983), 1017-1019.

79. Fair, G.H. and Wood, J.U., MA. of iron- aluminium intermetallics, Powder Metals, 36 (1993), 123-128.
80. Sümer, M., Mekanik Alaşım İle Üretilen Fe-Fe<sub>3</sub>C Kompozit Malzemede Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
81. Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling, Progress in Materials Science, 46 (2001) 1-184.
82. Suryanarayana, C. and Al-aqeeli, N., Mechanically alloyed nanocomposites, Progress in Materials Science, 58 (2013) 383-502.
83. Özyürek, D., Mekanik alaşım yöntemi ile titanyum bazlı metal matris kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-40, 2002.
84. Shafiee, M. R. M., Zamani, S. ve Rad, H.R.B., Effect of mechanical alloying time and ball-powder weight ratio on synthesis of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> nanocomposite, Advanced Science Letters, 13 (2012) 616-619.
85. Yıldırım M., Mekanik Alaşım Yöntemi İle Aa7075-Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Üretimi Karakterizasyonu Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 39-42, 2016.
86. Erdoğan, E. B., Niyobyum Borür Katkılı Al<sub>5</sub>Si Hibrit Tozların Ve Kompozitlerin Mekanik Alaşım Ve Basıncısız Sinterleme Yöntemleriyle Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
87. Onat, A., Akbulut H. ve Yılmaz, F., Production and characterisation of silicon carbide particulate reinforced aluminium-copper alloy matrix composites by direct squeeze casting method, Journal of Alloys and Compounds, 436 (2007) 375-382.
88. Kumar S., ve Balasubramanian V., Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/SiCp powder metallurgy composites, Wear, 264 (2008) 1026-1034.
89. Rahimian, M., Parvin, N. ve Ehsani, N., The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite, Materials and Design, 32 (2011) 1031-1038.
90. Liu, Z.Y., Wang, Q.Z., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. ve Liu, Y., Experimental and modeling investigation on SiCp distribution in powder metallurgy processed SiCp/2024 Al composites, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 5582-5591.

91. Kennedy, A.R. ve Brampton, B., "The Reactive Wetting and Incorporation of B<sub>4</sub>C Particles into Molten Aluminium", Scripta Materiala, 44 (2001) 1077-1082.
92. Abdollahi, A., Alizadeh, A. ve Baharvandi, H.R., Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5 wt.%B<sub>4</sub>C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion, Materials and Design 55 (2014) 471-481.
93. Zhang, L., Wang, Z., Li, Q., Wu, J., Shi, G., Qi, F. ve Zhou, X., Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B<sub>4</sub>C composites, Ceramics International, In Press ,2017.
94. Alizadeha, M., Paydar, M.H. ve Sharifian, F., Structural evaluation and mechanical properties of nanostructured Al/B<sub>4</sub>C composite fabricated by ARB process", Composites: Part B, 44 (2013) 339–343.
95. Zhang, L., Xu, H., Wang, Z., Li, Q., Wu, J., Mechanical properties and corrosion behavior of Al/SiC composites, Journal of Alloys and Compounds 678 (2016) 23-30.
96. Xiao-min, Z., Jia-kang, Y., ve Xin-yu, W., Microstructure and properties of Al/Si/SiC composites for electronic packaging, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22 (2012) 1686-1692.
97. Candan, S., An investigation on corrosion behaviour of pressure infiltrated Al–Mg alloy/SiCp composites, Corrosion Science , 51 (2009) 1398.
98. Mei-feng, H.E., Wen-bin, H.U., Su, Z., Lei, L., ve Ya-ting, nW.U., Tribological behavior of CNTs-Cu and graphite-Cu composites with electric current, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22 (2012) 78.
99. De Salazar, J.M.G., Ureña, A., Manzanedo, S. ve Barrena, M.I., Corrosion behaviour of AA6061 and AA7075 reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles in aerated 3.5% chloride solutions: potentiodynamic measurements and microstructure evaluation, Corrosion Science, 41 (1999) 529-545.
100. Vieira, A.C., Pinto, A.M., Rocha, L.A. ve Mischler, S., Effect of Al<sub>2</sub>Cu precipitates size and mass transport on the polarisation behaviour of agehardened Al–Si Cu–Mg alloys in 0.05 M NaCl, Electrochimica Acta, 56 (2011) 3821–3828.
101. Mubiayi, M.P. ve Akinlabi, E.T., Characterization of the intermetallic compounds in aluminium and copper friction stir spot welds, Materials Today: Proceedings, 4 (2017) 533–540.

102. Li, Z., Limodin, N., Tandjaoui, A., Quaegebeur, P., Witz, J. ve Balloy, D., Damage investigation in A319 aluminum alloy by digital image correlation during in-situ tensile tests, Procedia Structural Integrity, 2 (2016) 3415-3422.



## ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Hasan KARABACAK 1990 yılında İstanbul'da doğdu. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Lisans eğitiminin ardından, ara vermeden Karadeniz Teknik Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı ve 2017 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsüne 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı ve halen bu görevi yürütmektedir. Göreve başladığı günden beri uluslararası sempozyumlarda sunulmuş olan 5 adet bildirisi bulunmaktadır.

