

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

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malz. Müh. Kürşat Alp ARPACI**

**OCAK 2019**  
**TRABZON**



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



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Kürşat Alp ARPACI Tarafından Hazırlanan

AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ




başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 12 / 2018 gün ve 1784 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 aşınma ve yorulma direnci, yüksek dayanım, hafiflik gibi özellikleriyle otomotiv, havacılık, savunma ve uzay gibi alanlarda gelişmiş mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların sonucunda, “nanokompozit” olarak adlandırılan geleneksel kompozit yapılarından daha iyi özellik gösteren kompozit sınıfı ortaya çıkmıştır. Büyük taneler içeren kristal yapı ile kıyaslandığında nanokompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve sertlik, iyi tokluk ve süneklik, iyi difüzyon kabiliyeti, düşük elastisite modülü, düşük ısıl iletkenlik, hafiflik, daha iyi manyetik özellikler göstermektedir.

Bu çalışmada AA2024 matrisli nano h-BN ve nano B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli metal matrisli nanokompozit ve hibrit nanokompozitler mekanik alaşımlama yöntemiyle üretildi. Elde edilen numunelere sertlik, çekme, aşınma, korozyon testleri uygulandı ve yoğunluk ölçümleri yapıldı. Ayrıca çekme testlerinden elde edilen kırılma yüzeyleri, aşınma testi sonrası aşınma yüzeyleri, korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyler SEM ile incelendi. Böylece takviye oranlarının malzemenin mekanik, fiziksel ve korozif özelliklerine etkisi araştırıldı. Silindir şeklindeki numunelere Bal-on-disk aşınma testleri yapılarak kompozitlerde oluşan ağırlık kayıplarına göre aşınma özellikleri incelendi.

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

Yüksek lisans çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile önümü açan danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI' ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarımda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Temel VAROL, Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERDEMİR, Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ, Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA, Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK, Arş. Gör. Özgür Yasin KESKİN, Metalurji ve Malzeme Müh. Doğan Can DEMİR, Metalurji ve Malzeme Yüksek Müh. Mustafa Enis TAŞÇIOĞLU, Metalurji ve Malzeme Müh. Mohammed OUIKHALFAN ve Elektrik&Elektronik Müh. Bahar ÖZMEN' e teşekkür ederim.

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

Kürşat Alp ARPACI

Trabzon 2019



## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C 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 laboratuarlarda 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. 14/01/2019

Kürşat Alp ARPACI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ .....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kompozit Malzemeler.....	1
1.2.1. Kompozitlerin Yapısı.....	2
1.2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
1.3. Metal Matrisli Kompozitler.....	5
1.3.1. Matris Malzemeleri .....	6
1.3.1.1. Magnezyum ve Alaşımları .....	6
1.3.1.2. Titanyum ve Alaşımları.....	7
1.3.1.3. Bakır ve Alaşımları .....	7
1.3.1.4. Alüminyum ve Alaşımları .....	7
1.3.1.4.1. Alüminyum 2XXX Serisi.....	8
1.3.2. Takviye Malzemeleri .....	9
1.3.2.1. Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	10
1.3.2.2. Silisyum Karbür (SiC).....	10
1.3.2.3. Bor Minerali (B).....	11

1.3.2.3.1.	Bor Nitrür (BN).....	12
1.3.2.3.1.1.	Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN) .....	14
1.3.2.3.2.	Bor Karbür (B <sub>4</sub> C) .....	16
1.4.	Nanoteknoloji ve Nanokompozitler .....	18
1.5.	Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	19
1.5.1.	Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....	19
1.5.1.1.	Sıvı Metal Emdirme .....	19
1.5.1.2.	Sprey Yöntemi.....	20
1.5.1.3.	Karıştırmalı Döküm.....	21
1.5.1.4.	Kompozit Döküm.....	22
1.5.1.5.	In-Situ Yöntemi.....	23
1.5.1.6.	Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi .....	23
1.5.2.	Buhar Faz Üretim Yöntemleri .....	24
1.5.2.1.	Fiziksel Buhar Çökeltme .....	24
1.5.3.	Katı Faz Üretim Yöntemleri .....	24
1.5.3.1.	Difüzyonla Bağlama.....	24
1.5.3.2.	Toz Metalurjisi .....	25
1.5.3.2.1.	Toz Üretimi .....	26
1.5.3.2.2.	Tozların Karıştırılması .....	28
1.5.3.2.3.	Tozların Preslenmesi .....	28
1.5.3.2.4.	Sinterleme.....	29
1.6.	Mekanik Alaşımlama .....	30
1.6.1.	Mekanik Alaşımlamanın Avantajları.....	32
1.6.2.	İşlem Parametreleri .....	33
1.7.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	34
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	39

2.1.	Malzeme .....	40
2.2.	Malzeme Bileşimleri .....	42
2.3.	Mekanik Alaşımama .....	43
2.4.	Toz Morfolojisi .....	43
2.5.	Parçacık Boyutu .....	44
2.6.	Presleme .....	44
2.7.	Metalografik İşlemler .....	45
2.8.	Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	47
2.8.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik .....	47
2.9.	Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	48
2.9.1.	Çekme Mukavemeti Testi .....	48
2.9.2.	Sertlik Testi .....	49
2.9.3.	Aşınma Testi .....	49
2.10.	Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi .....	50
2.10.1.	Korozyon Testi .....	50
3.	<b>BULGULAR</b> .....	51
3.1.	Toz Karakterizasyonu .....	51
3.1.1.	Toz Morfolojisi.....	51
3.1.2.	Sabit Öğütme Süresi ile Takviye Malzemesinde Değişen Orana Bağlı Olarak Toz Morfolojisinde Meydana Gelen Değişim .....	52
3.1.2.1.	AA2024/h-BN Nanokompozit Tozları.....	52
3.1.2.2.	AA2024/B <sub>4</sub> C Nanokompozit Tozları .....	53
3.1.2.3.	AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C Hibrit Nanokompozit Tozları .....	54
3.1.3.	Partikül Boyutu .....	57
3.2.	Üretilen Nanokompozitlerin İç Yapı İncelemeleri.....	59
3.2.1.	AA2024 Alaşımının İç Yapı Görüntüleri.....	59
3.2.2.	AA2024/h-BN Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri .....	59

3.2.3.	AA2024/B <sub>4</sub> C Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri .....	61
3.2.4.	AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C Hibrit Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri .....	62
3.3.	Üretilen Nanokompozitlerin XRD Analizleri .....	65
3.4.	Üretilen Kompozitlerin Özellikleri .....	67
3.4.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik .....	67
3.4.2.	Çekme Mukavemeti Testi .....	71
3.4.2.1.	AA2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi.....	74
3.4.2.2.	AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri.....	74
3.4.2.3.	AA2024/B <sub>4</sub> C Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	76
3.4.2.4.	AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C Hibrit Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri .....	77
3.4.3.	Sertlik Değerleri .....	80
3.4.4.	Aşınma Testi .....	82
3.4.4.1.	AA2024 Numunesinin Aşınma Yüzey İncelemesi .....	86
3.4.4.2.	AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi.....	87
3.4.4.3.	AA2024/B <sub>4</sub> C Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi .....	89
3.4.4.4.	AA2024/h-BN-B <sub>4</sub> C Hibrit Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi ..	91
3.4.5.	Korozyon Testi .....	97
3.4.5.1.	AA2024 Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi.....	104
3.4.5.2.	AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi .....	105
3.4.5.3.	AA2024/B <sub>4</sub> C Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi .....	106
3.4.5.4.	AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C Hibrit Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi.....	107
4.	İRDELEME .....	111
5.	SONUÇLAR .....	114
6.	ÖNERİLER.....	116
7.	KAYNAKLAR .....	117

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C HİBRİT NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kürşat Alp ARPACI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI  
2019, 127 Sayfa

Çalışmada; AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitleri ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitleri toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretildi. Matris malzemesi olarak ortalama parçacık boyutu 110 µm olan AA2024 tozu kullanıldı ve içerisine ortalama parçacık boyutu 100 nm olan h-BN ve 50 nm olan B<sub>4</sub>C partikülleri öğütme işlemi uygulanarak takviye edildi. Nanokompozitler için takviye oranları ağırlıkça %0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 ve 5.0, hibrit nanokompozitler için ağırlıkça %0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 3.0 öğütme işlemi 1 saat olarak gerçekleştirildi. Öğütülen tozlar 560° sıcaklıkta 250 MPa basınçta vakum altında sıcak preslenerek nanokompozitler ve hibrit nanokompozitler üretildi. Üretilen nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin karakterizasyonu (SEM, XRD), fiziksel özellikleri (yoğunluk, gözenek miktarı), mekanik özellikleri (çekme, sertlik), aşınma özellikleri ve kimyasal özellikleri (elektrokimyasal korozyon) testleri ile belirlenmiştir. Elde edilen test sonuçlarında AA2024/h-BN nanokompozitlerinde artan takviye oranı ile gözenek miktarı ve aşınma dayanımı artarken çekme mukavemeti, sertlik ve yoğunluk değerlerinin azaldığı görüldü. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde ise artan takviye oranı ile gözenek miktarı, aşınma dayanımı ve sertlik artarken, yoğunluk değerlerinin azaldığı görüldü. Çekme mukavemeti ise belli bir orana kadar arttıktan sonra düşüş göstermiştir. Korozyon testleri sonucunda AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde belli bir orana kadar korozyon direnci artmış daha sonra düşüş göstermiştir.

**Anahtar Kelime:** Toz Metalurjisi, Metal Matrisli Kompozitler, Mekanik Alaşım, Nanokompozit, h-BN, B<sub>4</sub>C, Hibrit Nanokompozit, Aşınma, Korozyon

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C HYBRID NANOCOMPOSITES AND PROPERTIES  
CHARACTERIZATION

Kürşat Alp ARPACI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Aykut ÇANAKÇI  
2019, 127 Pages

In this study; AA2024/h-BN and AA2024/B<sub>4</sub>C nanocomposites and AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hybrid nanocomposites were produced using powder metallurgy. The average particle size of the AA2024 powder used as the matrix material was 110 µm, with h-BN and B<sub>4</sub>C particles having an average particle size of 100 nm and 50 nm respectively, reinforced by grinding. The reinforcement rates for the nanocomposites were 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 wt.%, for the hybrid nanocomposites, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 3.0 wt.%. The ground powders were hot pressed under vacuum at 250 MPa at 560 °C to produce nanocomposites and hybrid nanocomposites. The characterization of produced nanocomposites and hybrid nanocomposites was carried out using (SEM, XRD), along with mechanical properties (tensile, hardness), wear characteristics, physical properties (density, pore amount) and chemical properties (electrochemical corrosion) tests. In the obtained test results, it was seen that increasing the reinforcement of AA2024/h-BN nanocomposites increased pore amount and wear resistance while tensile strength, hardness and density values decreased. In AA2024/B<sub>4</sub>C nanocomposites and AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hybrid nanocomposites, the amount of pore, wear resistance and hardness increased with increasing reinforcement rate, while the density values decreased. Tensile strength decreased after increasing to a certain ratio. Corrosion tests showed that AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanocomposite and AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hybrid nanocomposites have increased their corrosion resistance to a certain extent and then decreased.

**Key Words:** Powder Metallurgy, Metal Matrix Composites, Mechanical Alloying, Nanocomposite, h-BN, B<sub>4</sub>C, Hybrid Nanocomposites, Wear, Corrosion

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. 1. Kompozit malzemelerin üretildikleri malzemeler [7].	2
Şekil 1. 2. Kompozitlerde matris-takviye arasında bağ oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar. a) Ara fazsız birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı, c) Karşılıklı olarak sınırlı oranda çözünme ile ara faz oluşumu [8].	3
Şekil 1. 3. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması [8].	4
Şekil 1. 4. Kompozitlerin takviye elemanının şekline göre sınıflandırılması [10].	5
Şekil 1. 5. Kübik bor nitrür kristal yapısı [74].	13
Şekil 1. 6. Farklı tane boyutlarında c-BN'in morfolojisi [72].	13
Şekil 1. 7. Vürtzit bor nitrürün kristal yapısı [72].	14
Şekil 1. 8. (a) Hegzagonal bor nitrürün yapısı (b) Grafitin yapısı [76].	14
Şekil 1. 9. h-BN tozlarının morfolojisi [72].	15
Şekil 1. 10. B <sub>4</sub> C Kristal yapısı [96].	16
Şekil 1. 11. Nanokompozitlerin mikroyapıya göre sınıflandırılması a) Taneler arası b) Tane içi c) Hibrit d) Nano-nano yapılar [101].	18
Şekil 1. 12. Basınçlı İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi [103].	20
Şekil 1. 13. Sprey çökeltme düzeneği [105].	20
Şekil 1. 14. Vortex yöntemi şematik gösterimi [40].	21
Şekil 1. 15. Karıştırılmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanım [106].	22
Şekil 1. 16. Kompozit döküm işlem akış şeması [40].	22
Şekil 1. 17. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi aşamalarını gösteren sistematik diyagram [115].	23
Şekil 1. 18. Difüzyonla bağlama [40].	24
Şekil 1. 19. TM yöntemiyle malzeme üretim aşamaları [120].	25
Şekil 1. 20. Atomizasyon yöntemleri, a) Gaz atomizasyon yöntemi, b) Su atomizasyon yöntemi [121].	27
Şekil 1. 21. Toz metalurjisinde kullanılan olası parçacık şekilleri [65].	27
Şekil 1. 22. Presleme işleminin basamakları [121].	28
Şekil 1. 23. Presleme işleminde aşamalar [121].	29
Şekil 1. 24. Sinterleme kademelerinin şematik gösterimi [127].	30
Şekil 1. 25. Sinterlemede meydana gelen boyun oluşumu [128].	30



Şekil 1. 26. Bilyelerin tozlarla çarpışmasının şematik görünümü [129].	31
Şekil 1. 27. MA esnasında tozlarda meydana gelen deformasyon [129].	31
Şekil 1. 28. Mekanik alaşımlamanın son aşamasında meydana gelen yapı [130].	32
Şekil 2. 1. Yapılan çalışmanın akış şeması.	40
Şekil 2. 2. Elek ünitesi	41
Şekil 2. 3. Öğütme işleminde kullanılan elemanlar	43
Şekil 2. 4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	44
Şekil 2. 5. Lazer saçınımlı partikül boyut ölçer cihazı	44
Şekil 2. 6. Sıcak pres cihazı	45
Şekil 2. 7. (a) Kesme cihazı (b) Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı (c) Bakalit cihazı	45
Şekil 2. 8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	46
Şekil 2. 9. PANalytical marka XRD cihazı	47
Şekil 2. 10. Üretilen aşınma ve çekme numuneleri	48
Şekil 2. 11. MTS 45 model universal çekme cihazı	48
Şekil 2. 12. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı	49
Şekil 2. 13. Ball-on-Disk (Numune Üzeri Bilye) aşınma cihazı	50
Şekil 2. 14. a) Gamry marka korozyon test cihazı, b) korozyon testleri için hazırlanan numunenin şematik gösterimi	50
Şekil 3. 1. Çalışmada kullanılan başlangıç tozlarının morfolojileri, (a) AA2024, (b) h-BN ve (c) B <sub>4</sub> C	51
Şekil 3. 2. AA2024/h-BN nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> , (g)AN <sub>4,0</sub> , (h)AN <sub>5,0</sub>	52
Şekil 3. 3. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AC <sub>0,25</sub> , (b)AC <sub>0,5</sub> , (c)AC <sub>1,0</sub> , (d)AC <sub>1,5</sub> , (e)AC <sub>2,0</sub> , (f)AC <sub>3,0</sub> , (g)AC <sub>4,0</sub> , (h)AC <sub>5,0</sub>	53
Şekil 3. 4. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b) AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	54
Şekil 3. 5. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	55
Şekil 3. 6. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	56

Şekil 3. 7. AA2024/h-BN ve AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası partikül boyutlarının takviye oranı ile değişimi .....	58
Şekil 3. 8. AA2024/h-BN ve AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası partikül boyutlarının takviye oranı ile değişimi .....	58
Şekil 3. 9. Sinterlenmiş AA2024 alaşım numunesinin mikro yapısı.....	59
Şekil 3. 10. AA2024/h-BN nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> , (g)AN <sub>4,0</sub> , (h)AN <sub>5,0</sub> .....	59
Şekil 3. 11. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AC <sub>0,25</sub> , (b)AC <sub>0,5</sub> , (c)AC <sub>1,0</sub> , (d)AC <sub>1,5</sub> , (e)AC <sub>2,0</sub> , (f)AC <sub>3,0</sub> , (g)AC <sub>4,0</sub> , (h)AC <sub>5,0</sub> .....	61
Şekil 3. 12. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	62
Şekil 3. 13. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	63
Şekil 3. 14. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	64
Şekil 3. 15. AA2024/h-BN nanokompozit numunelerinin XRD analizi.....	65
Şekil 3. 16. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit numunelerinin XRD analizi .....	66
Şekil 3. 17. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit numunelerinin XRD analizi .....	66
Şekil 3. 18. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi...	70
Şekil 3. 19. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının bağlı yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi.....	70
Şekil 3. 20. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin gözeneklilik oranının takviye oranı ile değişimi.....	71
Şekil 3. 21. AA2024/h-BN ve AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin çekme mukavemetinin takviye oranı ile değişimi.....	73
Şekil 3. 22. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının çekme mukavemetinin takviye oranı ile değişimi.....	73
Şekil 3. 23. Saf AA2024 numunesinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi .....	74
Şekil 3. 24. AA2024/h-BN nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)AN <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> , (g)AN <sub>4,0</sub> , (h)AN <sub>5,0</sub> .....	74

Şekil 3. 25. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)AC <sub>0,25</sub> , (b)AC <sub>0,5</sub> , (c)AC <sub>1,0</sub> , (d)AC <sub>1,5</sub> , (e)AC <sub>2,0</sub> , (f)AC <sub>3,0</sub> , (g)AC <sub>4,0</sub> , (h)AC <sub>5,0</sub> .....	76
Şekil 3. 26. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	77
Şekil 3. 27. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	78
Şekil 3. 28. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	79
Şekil 3. 29. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin sertliğin takviye oranı ile değişimi.....	82
Şekil 3. 30. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının sertliğinin takviye oranı ile değişimi .....	82
Şekil 3. 31. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin farklı yüklere bağlı ağırlık kayıplarının takviye miktarına bağlı değişimi.....	85
Şekil 3. 32. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının farklı yüklere bağlı ağırlık kayıplarının takviye miktarına bağlı değişimi.....	86
Şekil 3. 33. A <sub>0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.....	86
Şekil 3. 34. AN <sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	87
Şekil 3. 35. AN <sub>2,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	88
Şekil 3. 36. AN <sub>5,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	89
Şekil 3. 37. AC <sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	89
Şekil 3. 38. AC <sub>2,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	90
Şekil 3. 39. AC <sub>5,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	91
Şekil 3. 40. AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	91
Şekil 3. 41. AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	92

Şekil 3. 42. AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	93
Şekil 3. 43. AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	93
Şekil 3. 44. AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	94
Şekil 3. 45. AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	95
Şekil 3. 46. AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	95
Şekil 3. 47. AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	96
Şekil 3. 48. AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N. ....	97
Şekil 3. 49. AA2024/h-BN nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri.....	98
Şekil 3. 50. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri.....	98
Şekil 3. 51. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri .....	99
Şekil 3. 52. AA2024/h-BN nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi.....	102
Şekil 3. 53. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi.....	102
Şekil 3. 54. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi .....	103
Şekil 3. 55. Saf AA2024 numunesinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyi.....	104
Şekil 3. 56. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>3,0</sub> , (g)AN <sub>4,0</sub> , (h)AN <sub>5,0</sub> .....	105
Şekil 3. 57. AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AC <sub>0,25</sub> , (b)AC <sub>0,5</sub> , (c)AC <sub>1,0</sub> , (d)AC <sub>1,5</sub> , (e)AC <sub>2,0</sub> , (f)AC <sub>3,0</sub> , (g)AC <sub>4,0</sub> , (h)AC <sub>5,0</sub> .....	106
Şekil 3. 58. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub> , (b)AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub> , (c)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub> , (d)AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub> , (e)AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub> , (f)AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub> .....	107

- Şekil 3. 59. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>3,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>C<sub>3,0</sub> ..... 108
- Şekil 3. 60. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>4,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>..... 109



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 1. Alüminyum alaşımlarında simgeleme dizini, alaşım elementlerinin katılma ve oda sıcaklığında çözünürlükleri [47] .....	8
Tablo 1. 2. AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi [50].....	9
Tablo 1. 3. AA2024' e uygulanan işlemler sonrası özelliklerindeki değişimler [50]. .....	9
Tablo 1. 4. Bor madeninin uygulama alanı ve kullanıldığı yerler [66-68].....	11
Tablo 1. 5. h-BN' ün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [69].....	15
Tablo 1. 6. Bor karbür tozunun genel özellikleri [90].....	17
Tablo 2. 1. AA2024 başlangıç tozlarının bileşimi (%).....	41
Tablo 2. 2. AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	41
Tablo 2. 3. Üretilen kompozit malzemelerin bileşimleri ve adlandırılmaları.....	42
Tablo 3. 1. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	68
Tablo 3. 2. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	69
Tablo 3. 3. AA2024/h-BN ve AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozit gruplarının çekme mukavemeti değerleri .....	72
Tablo 3. 4. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının çekme mukavemeti değerleri .....	72
Tablo 3. 5. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin sertlik değerleri .....	81
Tablo 3. 6. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının sertlik değerleri.....	81
Tablo 3. 7. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin pürüzlülük değerleri.....	83
Tablo 3. 8. AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozit gruplarının pürüzlülük değerleri .....	84
Tablo 3. 9. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin farklı yüklere bağıl ağırlık kayıpları .....	84
Tablo 3. 10. AA2024/h-BN, AA2024/B <sub>4</sub> C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B <sub>4</sub> C hibrit nanokompozitlerin korozyon testleri sonucu Ekor, Ikor ve korozyon hızı değerleri .....	101

## SEMBOLLER DİZİNİ

AA2024: Alüminyum 2024 alaşımı

Al: Alüminyum

MMK: Metal matrisli kompozitler

B: Bor

h-BN: hegzagonal nor nitrür

B<sub>4</sub>C: bor karbür

TM: Toz Metalurjisi

PVD: Fiziksel Buhar Çökeltme

MA: Mekanik alaşımlama

XRD: X-ışınları difraktometresi

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

d<sub>50</sub>: Ortalama toz boyutu

BSD: Brinell sertlik değeri

µm: Mikrometre

nm: Nanometre

MPa: Mega pascal

GPa: Giga pascal

Mpy: milimetre/yıl

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren geleneksel malzemeler teknolojinin gereksinimlerini karşılayamaz hale gelmiştir ve bu yüzden malzeme bilimi alanında yapılan çalışmaların hız kazanmasıyla ihtiyaçları karşılayabilecek seviyede malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bu malzemelerden birisi olan kompozit malzemeler düşük yoğunluğa karşı çok iyi dayanım gösterir, farklı bileşim ve geometride üretilebilirler ve yüksek sıcaklık, aşınma, oksitlenme, korozyon ve yorulma dayanımları oldukça iyidir. Bu özelliklerinde dolayı kompozit malzemelerin kullanımı otomotiv, demiryolu, denizcilik, havacılık, tıp, uzay ve spor gibi alanlarda gün geçtikçe artmaktadır [1].

### 1.2. Kompozit Malzemeler

Genel olarak kompozit malzeme, makroskobik olarak şekil veya kompozisyon açısından farklılık gösteren, aralarında tanınabilir ara yüzlere sahip olan iki veya daha fazla bileşenin bir kombinasyonu olarak tanımlanır [2]. Bir başka ifade ile iki farklı malzemenin, bu malzemeler ile elde edilemeyen özellikleri elde etmek amacıyla birleştirilmesi sonucu oluşan ürün kompozittir [3]. Böylelikle malzemenin mekanik özellikleri geliştirilmiş olur. Örneğin kemik, protein kolajeninin lifleri ile bir kalsiyum bileşiği olan apatit kristallerini birleştirerek hafiflik ve mukavemetin kombinasyonunu oluşturur. Odun ise lignin ve hemiselülozla çevrelenmiş selüloz lifleri içerir. Betonda kullanılan kırma kaya agregası, maliyeti düşüren ve basınç dayanımını arttırmaya yardımcı olan kompozit bir yapı oluşturur. Kompozitlerin havacılık ve roket uygulamalarında kullanılan diğer mühendislik malzemelerinden daha hafif ve dayanımlı olması kompozitlerin kullanım yolunu açmıştır [4-5].

Kompozit malzeme üreterek elde edilebilecek bazı özellikler aşağıdadır.

- Mükemmel aşınma direnci,
- Rijitlik,
- Hafiflik,

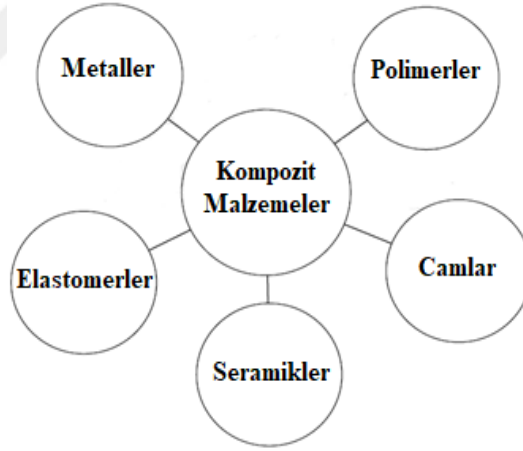


- Estetik görünüm,
- Mükemmel korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenlik,
- Dayanım,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi yorulma dayanımı.

Kompozit malzemenin aşağıda verildiği gibi bazı dezavantajları vardır.

- İşlenme güçlüğü,
- Kırılma uzamasının az olması,
- Geri dönüşümünün olmaması,
- Üretim zorluğu,
- Yüksek maliyetli olmasıdır [6].

Kompozit malzemeler Şekil 1.1' de görüldüğü gibi mühendislik malzemelerinin belirli oranlarla birleştirilmesi ile elde edilmektedir.



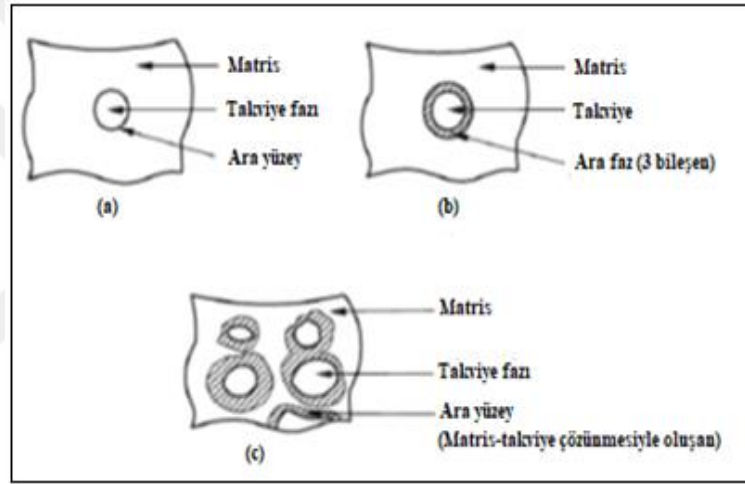
Şekil 1. 1. Kompozit malzemelerin üretildikleri malzemeler [7].

### 1.2.1. Kompozitlerin yapısı

Kompozitler, daha sert ve yüksek dayanıma sahip olan takviye ve genellikle daha düşük dayanım ve yüksek sünekliğe sahip kompozit malzemenin yapıtaşı olan matris malzemeleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kompozit sisteminde matris malzemesinin;

- Kompozitin tokluğunu arttırmak,
- Kompozitin mukavemetine katkı sağlamak,
- Kompozite gelen yükleri takviye malzemesine aktarmak,
- Takviye elemanlarının bir arada tutarak bağlayıcılık görevi görmek,
- Takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak gibi görevleri vardır.

Kompozitin tanımlamasına göre matris fazı ve takviye fazının biribiri içinde çözünmemesi gerekse de az miktarda çözünme matris-takviye arasında kuvvetli bir bağ oluşumuna yardımcı olur (Şekil 1.2.c).

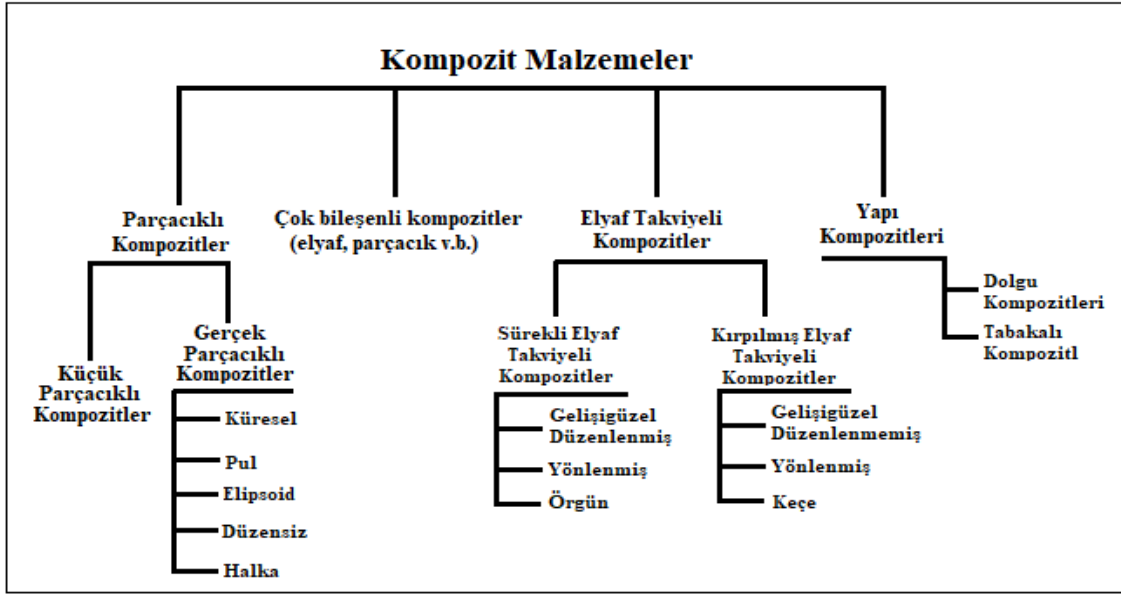


Şekil 1. 2. Kompozitlerde matris-takviye arasında bağ oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar. a) Ara fazsız birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı, c) Karşılıklı olarak sınırlı oranda çözünme ile ara faz oluşumu [8].

Kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde matris-takviye ara yüzeyinin yapısı ve özellikleri önemli rol oynamaktadır. Bunun nedeni matris yüzeyine etkiyen gerilmelerin takviye elemanına aktarılmasının ara yüzey aracılığı ile olmasından kaynaklanmasıdır [8,9].

### 1.2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

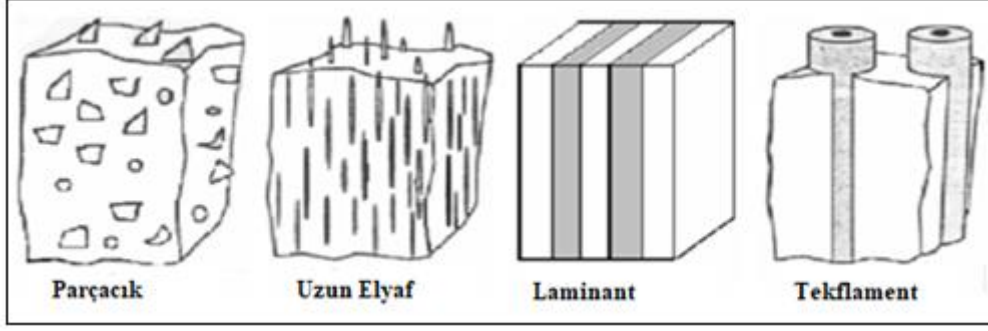
Kompozit malzemeler bazı kriterlere göre sınıflandırılabilir (Şekil 1.3). Kompozitler doğal kompozitler (kas, ağaç, kemik) ve yapay kompozitler (karbon-karbon cam elyaf takviyeli, kevlar-epoksi v.b) olarak sınıflandırılır. Ayrıca kompoziti oluşturan matris malzemesine göre ve kompozite mukavemet kazandıran takviye elemanının şekline ve cinsine göre de sınıflandırma yapılabilir [8].



Şekil 1. 3. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması [8]

Takviye elemanının şekline göre ise kompozitler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Şekil 1.4):

- Parçacık,
- Uzun ve kısa elyaf (fiber),
- Laminant (katmerli),
- Tekfilament.



Şekil 1. 4. Kompozitlerin takviye elemanının şekline göre sınıflandırılması [10]

Matris malzemesine göre kompozit malzemeler:

- Seramik matrisli kompozitler,
- Polimer matrisli kompozitler,
- Metal matrisli kompozitler olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir.

Seramik matrisli kompozit malzemeler yapısında cam ve kristal yapıları ve genellikle gözenek bulundurmaktadır. Bu yapının dağılımı ve miktarı kompozit malzemeye katıldığı zaman özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir [11,12]. Seramikler yoğunluk ve ısı genleşmeleri düşük, ergime dereceleri yüksek, yalıtkan ve sert malzemelerdir. Fakat oldukça gevrek olmaları kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır [10].

Polimer matrisli kompozit malzemeler, ekonomik olması, kolay üretilmesi, iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra yalıtkanlık özelliğinden dolayı endüstride sıkça tercih edilmektedir. Kompozitlerin sıcaklık dayanımlarını genellikle matris malzemesi belirlediği için düşük ısı dayanıma sahip polimerler için bir dezavantajdır [10]. Polimer matrisler termoset ve termoplastikler olarak ikiye ayrılırlar ve genellikle sürekli fiberlerle kullanılırlar. Sürekli fiberlerle kullanılan bazı polimer matris malzemeleri ise polyester ve epoksi reçinedir [13].

### 1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitlerde (MMK) ana matris genellikle metalden oluşmakta ve takviye elemanı olarak da seramik veya refrakter malzeme kullanılmaktadır [14]. MMK'ler yüksek sıcaklıklarda kullanılması durumunda sorun çıkaran ya da kullanılması uygun

olmayan malzeme yerine kullanılabilen ve bunun için tasarlanan ileri malzeme türüdür [15]. Günümüzde MMK'lerin özellikle de parçacık takviyeli MMK'lerin otomobil ve havacılık sektöründe kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır [16]. Bu yüzden metal matrisli kompozitler ile ilgili son yıllarda birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar literatüre önemli katkı sağlamıştır [17-23]. Yapılan deneysel çalışmalarda ise birçok farklı tür malzeme kullanılmıştır fakat bu malzemelerin uygun kullanım şartlarının belirlenmesi için bazı koşullar gereklidir. Bunlar kısaca şöyle sıralanabilir;

- Yüksek sıcaklıklarda iyi kararlılık,
- Yüksek elastik modül,
- Yüksek dayanım,
- Yüksek tokluk ve darbe direnci,
- Yüksek elektriksel ve termal iletkenlik,
- Düşük yoğunluk,
- Isıl şoklara karşı düşük hassasiyet,
- İyi aşınma direnci,
- Yüksek yorulma ve sürünme direnci [24-33].

### **1.3.1. Matris Malzemeleri**

MMK'lerde matris malzemesi olarak genellikle çoğu mühendislik metalleri kullanılabilir [34]. İstenen özellikleri elde etmek amacıyla genellikle düşük yoğunluğa sahip metaller tercih edilmektedir. Bu metallerin başlıcaları; Al, Cu, Mg, Ti, Ni, Co, Mo gibi metaller ve bu metallerin alaşımlarıdır. Bu metaller içinde Al göstermiş olduğu düşük yoğunluğa sahip olması, ergime sıcaklığının düşük olması ve takviye fazını iyi ıslatabilmesi nedeniyle daha çok tercih edilmektedir [35,36].

#### **1.3.1.1. Magnezyum ve Alaşımları**

Magnezyum alaşımları hafif metal alaşımları olup endüstriyel olarak kullanımının yakın gelecekte yaygınlaşacağı ve magnezyum esaslı kompozitlerin kullanımının artacağı düşünülmektedir. Yapısal uygulamalarda kullanılan en hafif metal olma özelliği gösteren magnezyumun yoğunluğu  $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Düşük ergime sıcaklığına sahip olma ( $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ), iyi

kaynak edilebilme, yüksek özgül dayanım, iyi dökülebilirlik ve yüksek sönümlenme kapasitesi gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca oksijene olan ilgisine, düşük elastik modülüne ve düşük yorulma direncine sahip olması kullanım alanını sınırlandırmıştır [37].

### **1.3.1.2. Titanyum ve Alaşımları**

Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerinden biri de titanyum ve alaşımlarıdır. Titanyum esaslı MMK'lerin yüzeyinde oluşan ince  $TiO_2$  tabakası kompozitin korozyon direncini önemli derecede arttırmaktadır. Hem bu özelliklerinden hem de insan vücudu için toksik bir etkisinin olmaması biyomalzeme olarak kullanılmasının önünü açmıştır (Ni-Ti alaşımları). Isıl genleşme katsayıları düşük, mukavemet/özgül ağırlık oranı yüksek olduğu için uzay ve uçak sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadırlar [38].

### **1.3.1.3. Bakır ve Alaşımları**

Bakır esaslı kompozitler yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu için genellikle elektrik devre elemanları olarak elektronik sistemlerde kullanılmaktadırlar. Bakır matrisle grafit parçacıkları takviye edilerek iletkenliği yüksek ve düşük termal genleşme katsayısına sahip malzemeler elde edilebilir [39,40].

### **1.3.1.4. Alüminyum ve Alaşımları**

Yeryüzünde en yaygın elementlerden biri olan alüminyum yer kabuğunun yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır. Alüminyum için üretim teknolojisinin gelişimi diğer metallere göre yeni olsa da üretimi günümüzde oldukça fazladır [41]. Alüminyum alaşımları; düşük yoğunluğu, yüksek korozyon direnci, çökme sertleşmesi ile mukavemetinin artırılabilmesi, kolay işlenebilir olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği ve kolay tedarik edilmesi gibi üstünlüklerinden dolayı diğer malzemelere göre kullanımı daha çok tercih edilir olmuştur. Çelik ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), pirinç ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ) ve bakır ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ) gibi diğer malzemelere göre daha düşük yoğunluğa ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) sahiptir [42-45].

Alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı döküm kabiliyeti oldukça kötüdür. Bu yüzden mekanik özelliklerini geliştirmek için alaşımlama yapılmaktadır. İşlenmiş

alüminyum ve alaşımları için Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen simgeleme dizisi kullanılmaktadır. Dört rakam kullanılarak simgeleme işlemi Tablo 1.1’de verilmiştir. Buna göre alüminyum alaşımının içerdiği temel alaşım elementini ilk rakam göstermektedir [37]. Alüminyum matrisli kompozitlerde genel olarak sertleştirilebilir ve yaşlandırma ve çözeltiye alma işlemleri uygulanabilen 2XXX (Al-Cu), 6XXX (Al-Mg-Si) ve 7XXX (Al-Zn-Mg-Cr) serisi alüminyum alaşımları kullanılır. Simgeleme işleminde ikinci rakam değişken sayısını belirtmektedir. Son iki rakam ise özel bir anlam ifade etmez ve seri içindeki alaşımları birbirinden ayıran sıra sayısını belirtmektedir. Örneğin; AA2024 alaşımı herhangi bir katkı maddesi içermeyen Al-Cu alaşımını simgelemektedir. Bu alaşıma sırasıyla çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanarak sertleştirme yapılmaktadır. Al alaşımları doğal ve yapay olarak yaşlandırılabilirler [46].

Tablo 1. 1. Alüminyum alaşımlarında simgeleme dizini, alaşım elementlerinin katılma ve oda sıcaklığında çözünürlükleri [47]

Simge	Temel Alaşım Elementi	Katılma Sıcaklığında Çözünürlük (%)	Oda Sıcaklığında Çözünürlük (%)
1xxx	Alaşımsız 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	-	-

#### 1.3.1.4.1. Alüminyum 2XXX Serisi

İlk olarak çökelme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar alüminyum-bakır-magnezyum alaşımlarıdır. Endüstriyel kullanım alanı olan en önemli alaşım ise AA2024 alaşımıdır. Bu alaşım %4,5 bakır, %1,5 magnezyum, ve %0,6 mangan içerir (Tablo 1.2) ve çekme dayanımı 442 MPa’dır [47,48]. AA2024, alüminyum alaşımları arasında elastisite modülü, en yüksek sertlik ve iyi dayanım gibi özelliklere sahiptir [48]. Mühendislik uygulamalarında özellikle akma mukavemeti veya elastik modülünün önemli olduğu uzay sanayinde, uçak yapımında, ortopedik tabanlarda, perçin ve çekme tekerlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır [49].

Tablo 1. 2. AA2024 alaşımın kimyasal bileşimi [50].

Alaşım Elementi	Al	Cu	Mg	Mn
Ağırlıkça Yüzdeleri	93,5	4,4	1,5	0,6

AA2024 içeriğinde magnezyum olduğundan üretimi için özel yöntemler gerekli olmasına rağmen ısıl işleme tabi tutulan diğer alüminyum alaşımlarına göre şekillendirilebilme kabiliyeti oldukça iyidir [51]. Oldukça iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen korozyona karşı dayanımı zayıftır, talaşlı işleme kabiliyeti iyidir ve kaynak edilebilmesi ise orta derecede iyidir [52]. Tablo 1.3' de AA 2024 alaşıma uygulanan işlemler sonrası özelliklerindeki değişimler verilmiştir.

Tablo 1. 3. AA2024' e uygulanan işlemler sonrası özelliklerindeki değişimler [50].

Özellik	Isıl İşlem					
	T3	T361	T4	T6	T72	T861
Sertlik (BSD)	120	130	120	125	-	-
Alt Çekme Mukavemeti (MPa)	395-483	55-496	395-469	715-476	415	485-517
Üst Çekme Mukavemeti (MPa)	290-345	340-393	260-324	345-1393	315	245-490
Elastisite Modülü (GPa)	73,1	73,1	73,1	72,4	72,4	-
Yorulma Mukavemeti (MPa)	138	124	138	124	-	-
İşlenebilirlik (%)	30	70	70	70	-	-

### 1.3.2. Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye elemanları da matris malzemesi kadar önemlidir. Takviye elemanları matris fazı ile uyumlu olmalı ve matris fazı tarafından kolay ıslatılabilirliktedir. Takviye elemanın görevi kompozit malzeme üzerindeki yükü taşıyarak matris fazının dayanımını artırmaktır. MMK' lerde genellikle seramik takviye elemanları kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde çoğunlukla kullanılan takviye



elemanları  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ , WC,  $TiB_2$ , TiC, W, C ve MgO' dur [53]. Takviye elemanı seçerken elastikiyet modülü, ergime sıcaklığı, çekme dayanımı, yoğunluk, kimyasal kararlılık, matris malzemesiyle uyumluluk, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, maliyet gibi dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır [53-57].

Seramik takviye elemanlarının kullanımını birçok avantaj sağlamasına rağmen seramik takviyelerin gevrek karakterde olmaları ve sıvı metaller tarafından ıslatılabilmesinin kötü olması gibi sakıncaları da vardır. Seramikler takviye elemanları oksit esaslı; alümina ( $Al_2O_3$ ), berilya (BeO), magnezya (MgO), bariya (BaO), torya ( $ThO_2$ ), yitriya ( $Y_2O_3$ ), zirkonya ( $ZrO_2$ ), nitrür esaslı; bor nitrür (BN), alüminyum nitrür (AlN), silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), v.b., ve karbür esaslı; bor karbür ( $B_4C$ ), silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC), v.b. olmak üzere sınıflandırılırlar. Ayrıca bor (B), karbon (C) ve silisyum (Si) elementel malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilir [58].

#### **1.3.2.1. Alümina ( $Al_2O_3$ )**

Alüminyum ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozitlerde alümina yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek modül ve rijitlik gibi özelliklerinden dolayı sık sık takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır [59-62].

#### **1.3.2.2. Silisyum Karbür (SiC)**

MMK' lerde kullanılan bir diğer önemli takviye elemanı da silisyum karbürdür ve silisyum dioksitin kok kömürü ile elektrikli fırında indirgenmesi sonucu gerçekleşen saf olarak silisyum eldesi sırasında gerekenden daha fazla karbon kullanılması durumunda oluşan bileşiktir. Oksitlenmeye karşı yüksek dayanım, termal şok direnci ve yüksek mukavemet gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca silisyum karbür yüksek sıcaklık dayanımına sahip olduğu için refrakter olarak da kullanılmaktadır. Aşınmaya dirençli malzemeler, balistik zırh plakalar, döküm potası ve seramik fırın malzemelerinde silisyum karbür esaslı malzemeler kullanılmaktadır [63].

### 1.3.2.3. Bor Minerali (B)

Bor elementi periyodik tabloda “B” ile simgelendirilen ısıya karşı dayanıklı, sert bir yapıya sahiptir ve 2300 °C’ de erirken, 2500 °C’ de kaynamaktadır. Doğada, tuz şeklinde ya da diğer elementlerle bileşik halinde bulunmaktadır. Türkiye’de önemli derece kaynakları olan bor elementi savunma sanayi, inşaat sektörü ve otomobil sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır [64]. Günümüzde bor mineralleri pek çok ticari amaçla kullanılmaktadır (Tablo 1.4). Ayrıca borun günlük yaşantımızda da kullanım alanı geniştir ve askeriye sistemleri, uzay teknolojileri, sabun ve deterjan yapımı gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Birçok bilim insanı bor elementini “21. Yüzyılın Petrolü ve Sanayinin Tuzu” olarak adlandırmaktadır. Bor kullanım alanı olarak makine yağı, akaryakıt, fuel oil, gaz yağı, jet yakıtı vb. alanları kapsadığı gibi bilgisayar ve savunma sistemlerinde ve ayrıca aşınmaya ve ısınmaya dirençli olduğundan uçaklarda ve uzay araçlarında da yer bulmuştur [65]. Borun temel cevherleri;

- Kolemanit ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- Kernit ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- Boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- Uleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) gibi boratlardır [64].

Tablo 1. 4. Bor madeninin uygulama alanı ve kullanıldığı yerler [66-68].

Uygulama Alanı	Kullanıldığı Yerler
Cam Sanayi	İzolasyon cam elyafı, tekstil cam elyafı, optik lifler, cam seramikleri, borosilikat camları, şişe ve diğer düz camlar
Seramik Sanayi	Porselen boya, emaye, sır ve sırça
Nükleer Sanayi	Reaktör kontrol çubukları, nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünmeye-aşınmaya ve ısıya dirençli malzemeler, roket yakıtı katkı malzemeleri, Askeri & Zırhlı Araçlar: Zırh plakalar, kompozit malzemeler
Elektronik-Elektrik ve Bilgisayar Sanayi	Bilgisayarlarda mikro çip, cd-sürücüler, fiber optik kablolar, yarı iletkenler, elektrik kondansatörleri, gecikmeli sigortalar
İletişim Araçları	Televizyonlar, cep telefonları, modemler
İnşaat-Çimento Sektörü	Mukavemet artırıcı ve izolasyon ürünleri
Metalurji	Paslanmaz ve alaşımlı çelik, sürtünmeye-aşınmaya dayanıklı malzemeler, metalurjik flaks, refrakterler, lehimleme, kesiciler, aşındırıcılar
Enerji Sektörü	Hidrojen taşıyıcı, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak
Otomobil Sanayi	Hava yastıklarında, hidroliklerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksanlarda, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler
Tekstil Sektörü	Isıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, tekstil boya, deri renklendiricileri, izolasyon malzemeleri

İlaç ve Kozmetik Sanayi	Diş macunları, dezenfekte ediciler, antiseptikler
Tıp	Osteoporoz tedavilerinde, alerjik hastalıklarda, psikiyatride, kemik gelişiminde ve artiritte, menopoz tedavisinde, beyin kanserlerinin tedavisinde
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, flotasyon ilaçları, elektrolitik işlemler, banyo çözeltileri, katalistler, atık temizleme amaçlı olarak, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boyaları
Temizleme ve Beyazlatma Sanayi	Toz deterjanlar, toz beyazlatıcılar, parlaticılar
Tarım Sektörü	Gübreler, böcek-bitki öldürücüler
Kağıt Sektörü	Beyazlatıcı olarak
Koruyucu	Ahşap malzemelerde koruyucu olarak, boya ve vernik kurutucularında

Bunların dışında;

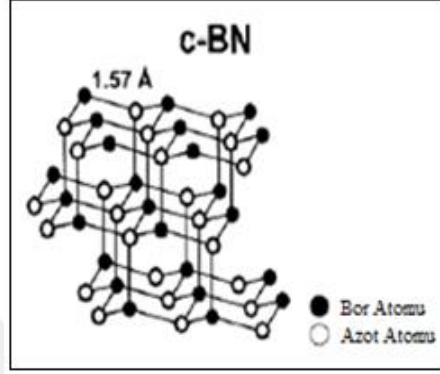
- Fiber optik,
- Petrol boyaları, erimeyen ve yanmayan boyalar, tekstil boyaları,
- Zımpara ve aşındırıcılar,
- Patlayıcı maddeler (havai fişek vb.),
- Manyetik cihazlar,
- Fotoğrafçılık,
- Kauçuk ve plastik sanayii,
- İleri teknoloji araştırmaları gibi alanlarda da kullanılmaktadır [66-68].

### 1.3.2.3.1. Bor Nitrür (BN)

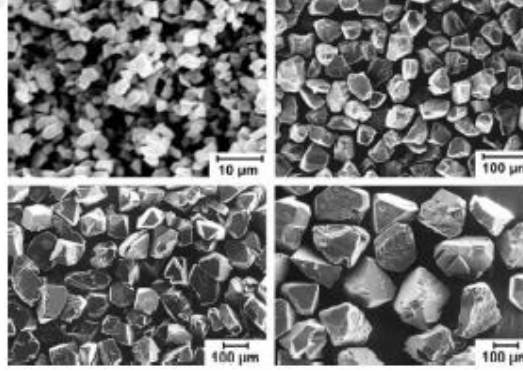
BN, bor ve azot atomlarını eşit oranda içiren doğada bulunmayan, sentetik olarak üretilen kimyasal bir bileşiktir. Ampirik formülü BN olup katı halde ve beyaz renkte bulunmaktadır. Periyodik cetvelde karbon elementine komşu oldukları için elementel form olarak izoelektronik olan bor ve azot elementleri arasında polimorfizm vardır [69]. Bor nitrür üç adet polimorfa sahiptir. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) grafitte, würtzit bor nitrür (w-BN) ise kristal yapısı olarak karbonun içi boş bir küreyi andıran polimorfuna ve kübik bor nitrür (c-BN) ise elmasa benzemektedir. h-BN sentezi ilk kez Balmain tarafından 1842 yılında yapılmıştır fakat malzemenin ticarileşmesi yaklaşık yüz yıl sonra olmuştur. Wentorf ise 1957 yılında yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında elmasa benzer yapıda bulunan kübik bor nitrür sentezlemeyi başarmıştır. Kübik bor nitrür 1969 yılından itibaren kullanılmaya başlamıştır ve elmastan sonra en sert ikinci malzemedir. Bor nitrürün oldukça sert bir formu olan würtzit bor nitrür ise normal şartlarda stabil değildir, dinamik şok yöntemleri ile oda sıcaklığında 13

GPa basınç etkisinde elde edilebilmektedir [69-73]. Bor nitrürün bilinen üç çeşit kristal yapısı vardır:

Kübik Bor Nitrür (c-BN): Yüksek basınç ve sıcaklık altında elde edilebilen kübik çinko blend formunda olup (Şekil 1.6) teorik yoğunluğu  $3,48 \text{ g/cm}^3$  tür ve kristal yapısı elmasa çok benzerdir. Şekil 1.5'te c-BN'ün kristal yapısı verilmiştir [74].

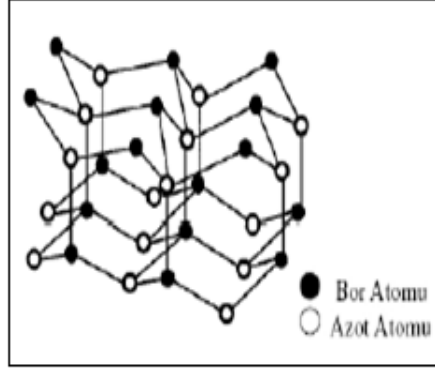


Şekil 1. 5. Kübik bor nitrür kristal yapısı [74].



Şekil 1. 6. Farklı tane boyutlarında c-BN'in morfolojisi [72].

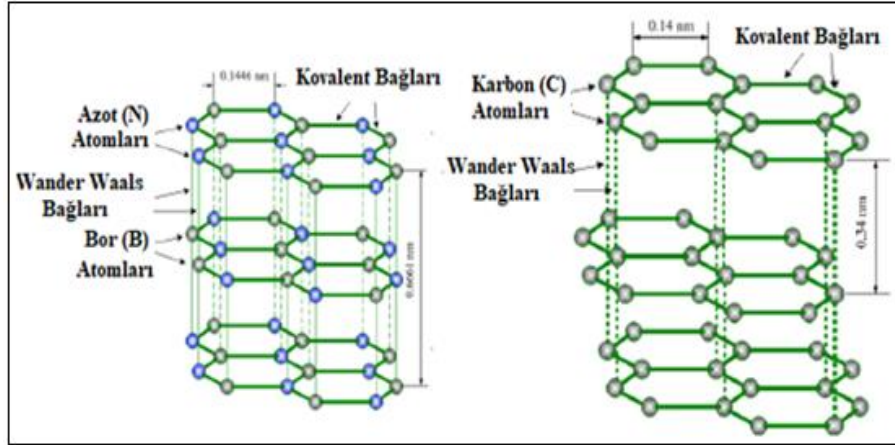
Vürtzit Bor Nitrür (w-BN): Yoğunluğu yüksek olup ( $3,48 \text{ g/cm}^3$ ) vürtzitik forma sahiptir. Şekil 1.7' de vürtzit bor nitrürün kristal yapısı verilmiştir.



Şekil 1. 7. Vürtzit bor nitrürün kristal yapısı [72].

### 1.3.2.3.1.1. Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN)

Grafite benzerliğinden dolayı beyaz grafit olarak adlandırılır (Şekil 1.8), yumuşaktır ve tabakalı hegzagonal yapıdadır [75-79]. Hegzagonal bor nitrürün yoğunluğu  $2,27 \text{ g/cm}^3$  tür ve seramik malzemeler arasında en hafif olandır. Düzenli bir ergime davranışı göstermez ve ergime sıcaklığı  $2600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Atmosfer koşullarında  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , argon gazı altında  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$  ve azot gazı altında  $2400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kararlılığını kaybetmektedir.



Şekil 1. 8. (a) Hegzagonal bor nitrürün yapısı (b) Grafitin yapısı [76].

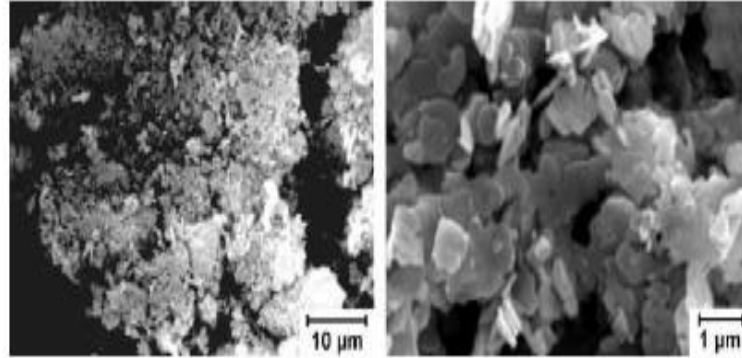
"a" kafes parametresi yönündeki güçlü bağlar ve "c" kafes parametresi yönünde sahip olduğu zayıf bağlar sayesinde son derece iyi yağlayıcı özellik göstermektedir. Malzeme tabanında bulunan zayıf bağlar sürtünme sırasında kopar ve böylelikle yağlayıcılık özelliği ve kayganlık kazanmış olur. Yağlayıcı özellik gösteren diğer malzemeler ile

karşılaştırıldığında, MoS<sub>2</sub> 350 °C' de uçarken, grafit 600 °C' de h-BN ise 900 °C' ye kadar yağlayıcılık özelliğini korumaktadır [69]. h-BN' ün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1.5' de verilmiştir.

Tablo 1. 5. h-BN' ün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [69].

Moleküler ağırlık	24,83 g
Teorik Yoğunluk	2,27 g/cm <sup>3</sup>
Kristal yapı	Hegzagonal
Renk	Beyaz
Elektriksel direnç (298K)	1.7x10 <sup>13</sup> ohm.cm
Sürtünme katsayısı	0.2-0.7
Kullanım sıcaklığı	1800 °C inert atmosfer 1400 °C vakum 1100 °C oksitleyici atmosfer
Ergime sıcaklığı	2600 °C
Sertlik (knoop 100g)	400 kg.mm <sup>-1</sup>
Young modülü	20-103 MPa

h-BN düşük sıcaklıklarda 5,2 eV'lik bant boşluğuna sahiptir ve elektriksel yalıtkanlık özelliği gösterir. Buna ek olarak sıcaklığın artmasıyla elektriksel direnci azalır ve böylelikle iletken malzeme olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir [69]. h-BN tozlarının morfolojisi aşağıda verilmiştir (Şekil 1.9).



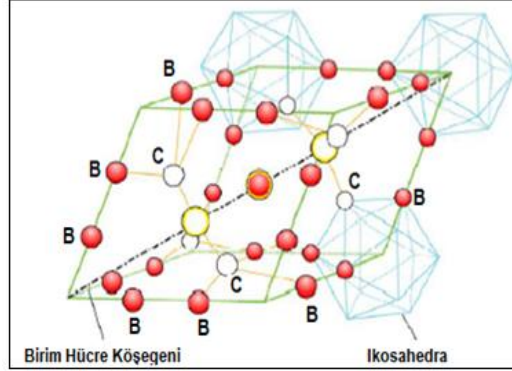
Şekil 1. 9. h-BN tozlarının morfolojisi [72].

Hegzagonal bor nitrürün kullanım alanları:

- h-BN yapışmama, yüksek ısı iletkenliği, yüksek sıcaklıklardaki refrakterliği, kimyasal inertlik, elektriksel yalıtkanlık, yüksek ısı sok direnci ve yağlayıcılık özellikleri sayesinde yüksek sıcaklık teknolojisi, kimya, metalurji, elektronik gibi alanlarda geniş olarak kullanılmaktadır [80-86].
- Başlangıç malzemesi olarak h-BN; elmasan sonra ikinci sert malzeme olan c-BN' ün üretiminde kullanılmaktadır.
- Katkı maddesi olarak ise h-BN; yüksek sıcaklıkta yüksek performansın gerekli olduğu uçak frenlerinde kullanılan metal kompozit sürtünme elemanlarını yağlama görevinde kullanılmaktadır ve bu tozların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [69].

### 1.3.2.3.2. Bor Karbür (B<sub>4</sub>C)

B<sub>4</sub>C; elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir (Şekil 1.10) ve etkili bir takviye malzemesinden istenen yüksek sertlik ve rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin birçoğunu gösterdiği için oldukça talep gören bir takviye malzemesidir (Tablo 1.6) [87].



Şekil 1. 10. B<sub>4</sub>C Kristal yapısı [96].

Kimyasal inertliği oldukça iyi ve ısı kararlılığı çok yüksek düşük yoğunluğa sahip olan bor karbür yüksek aşınma direnci ve korozyon direnci gösterir ve yüksek ergime ergime sıcaklığına sahiptir [88,89].

Tablo 1. 6. Bor karbür tozunun genel özellikleri [90].

Bor İçeriği (%)	78,28
Karbon İçeriği (%)	21,72
Yoğunluk (Teorik)	2,52 g/cm <sup>3</sup>
Kristal yapı	Rombohedral
Renk	Siyah
Elektrik iletkenliği	140 ohm.m
Eğme Mukavemeti Oda sıcaklığında 650 °C' de 1100 °C	303-480 (MPa) 290 (MPa) 241 (MPa)
Sertlik (knoop 100g)	2900-3100 kg.mm <sup>-1</sup>
Ergime sıcaklığı	2450 °C

Bor karbürün kullanım alanları:

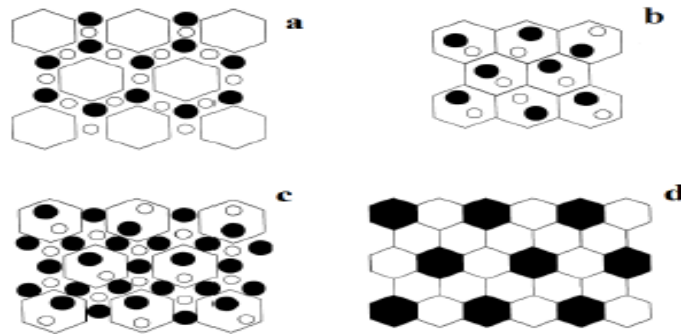
- Yüksek sertlik özelliğinden dolayı kurşungeçirmez yeleklerde ve tank zırhlarında, [90]
- Yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı sayesinde çeşitli nozullarda, elmadan daha ekonomik olduğu için kaba leplemede, düşük yoğunluğa sahip olduğu için de savunma sanayinde zırh malzemesi olarak, [65]
- Asma kilitlerde,
- Kişilerde ve araçlarda koruyucu balistik zırh malzemesi olarak,
- Kumlamada kum püskürtme ucu olarak,
- Yüksek basınçlı su jet nozullarında,
- Kazımaya ve aşınmaya dayanıklı kaplamalarda,
- Presleme ve kesim kalıplarında,
- Aşındırıcılarda,
- Nükleer reaktörlerde nötron soğurucularda,
- Katı yakıt ramjetler için yüksek enerjili yakıtlarda,
- Araçların fren balatalarında,
- Metal matris kompozitlerde kullanılmaktadır [91-95].



#### 1.4. Nanoteknoloji ve Nanokompozitler

Nanoteknoloji ifadesi evrendeki nesnelerin niceliklerinin ölçülmesi, tanımlanması ve ayrıca karakterize edilmesiyle beraber bu nesnelerin özelliklerinin derin bir bakış açısıyla incelenmesini benimsemektedir [97]. Nano terimi genel olarak metrenin milyarda biri olarak tanımlanırken, nano parçacık olarak isimlendirilen parçacık ise 100 nm ve daha küçük boyuta sahip olan parçacıklar olarak tanımlanır. Nano boyutta parçacıkların üretimi, karakterizasyonu, fiziksel ve kimyasal karakteristiklerinin incelenmesiyle birlikte bu yapıların en iyi özelliklerinin açığa çıkması hedeflenmektedir. Böylelikle hafif, oldukça dayanıklı ve rijit nano parçacıkların manyetik, optik, katalitik ve elektronik gibi birçok özelliğinin de gelişim göstermesi beklenmektedir [98,99].

Nanokompozit terimi ilk olarak 1980'li yılların başında ortaya atılmıştır ve genel anlamıyla nanokompozit, bünyesinde en az bir tane nano boyutta faz bulduran çok fazlı bileşiktir [100]. İçerdiği matris malzemesine göre metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli nanokompozitler olarak sınıflandırılabilirler. Başka bir sınıflandırma ise parçacıkların yapıda yerleştiği bölgeye göre tane içi, taneler arası, hibrit ve nano-nano kompozitler şeklindedir (Şekil 1.11.). Nano-nano kompozitlerde, matris ve takviye fazı da nano boyuttadır gelişigüzel şekilde dağılım göstermişlerdir (Şekil 1.11d). Taneler arası nano kompozitlerde, mikron mertebesindeki matris fazının tane sınırlarına nano boyuttaki takviye fazı dağılmıştır (Şekil 1.11a). Tane içi nanokompozitlerde (Şekil 1.11b) ise takviye elemanı büyük matris fazı tanelerinin içinde bulunur. Şekil 1.11c'de de takviye elemanının, aynı anda matris tanelerinin içinde ve tane sınırlarında yer aldığı hibrit nanokompozitler gösterilmektedir [101].



Şekil 1. 11. Nanokompozitlerin mikroyapıya göre sınıflandırılması  
a) Taneler arası b) Tane içi c) Hibrit d) Nano-nano yapılar [101].

## 1.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Farklı matris ve takviyeler kullanıldığı için metal matrisli kompozitlerin üretiminde birçok farklı tekniğin geliştirilmesine neden olmuştur. MMK'lerin üretim yöntemleri şekilde gösterildiği gibi üretim sırasında matrisin katı, sıvı ya da buhar fazında olmasına göre sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemler:

### 1) Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Sıvı Metal Emdirme
- b) Sprey Yöntemi
- c) Karıştırmalı döküm
- d) Kompozit Döküm
- e) In-situ Yöntemi
- f) Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

### 3) Buhar-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)

### 2) Katı-Faz Üretim Yöntemleri

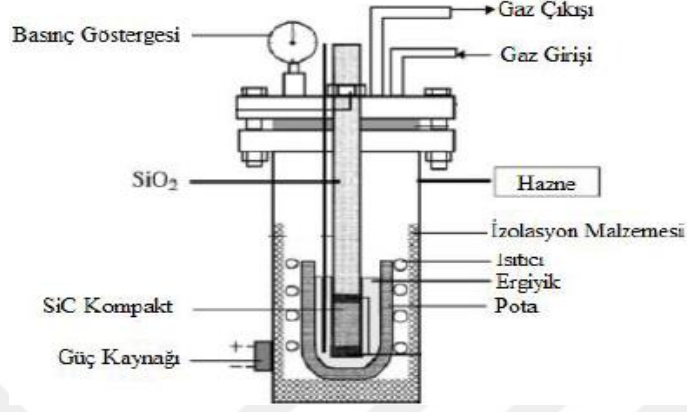
- a) Difüzyonla Bağlama
- b) Toz Metalurjisi (TM) [40]

### 1.5.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

#### 1.5.1.1. Sıvı Metal Emdirme

Bu yöntem sürekli, kılcal kristalli ve sürekli elyaf takviyeli MMK'lerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılır. İlk olarak istenen biçimde uygun bağlayıcı ilave edilerek ön şekil (preform) hazırlanır. Tasarlanan elyaf doğrultuları bu aşamada yapılır ve hazırlanan model kalıp içerisine konulduktan sonra ergimiş metal enjekte edilir. Sıvı emdirilerek mastarın ısıtılması sağlanır ve preformun şeklini koruyabilmesi için kullanılan bağlayıcılar yanar ve

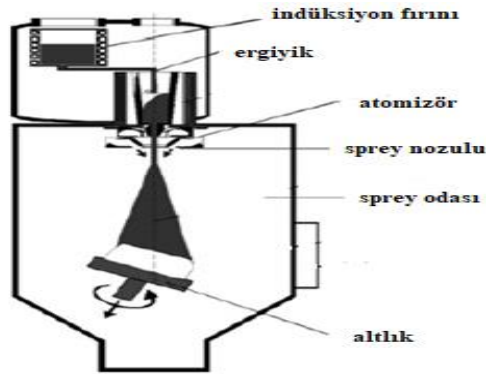
katılaşma için beklenir. Bu yöntem basınçlı ve basınçsız olarak gerçekleştirilebilir [102]. Basınçlı İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 1.12’ de verilmiştir.



Şekil 1. 12. Basınçlı İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi [103].

### 1.5.1.2. Sprey Yöntemi

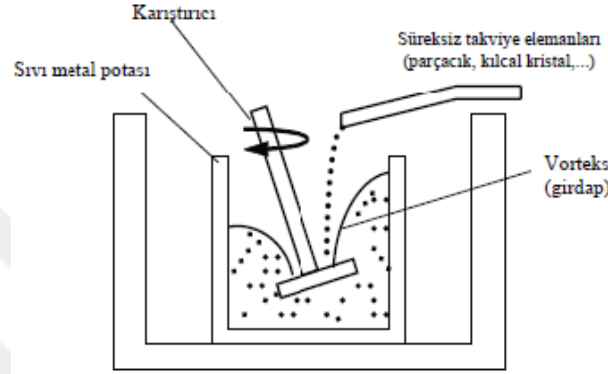
Bu yöntem, sıvı metalin takviye malzemesi ile altlık üzerine püskürtülmesi ve metalin katılaşması işlemlerinden oluşur. Seramik tozların sprey içerisine enjekte edilmesi ile parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır. Üretilen kompozitlerde seramik takviyelerin homojen dağılmadığı gözlenmiştir. Bu yöntemin avantajı ince taneli yapı elde edilmesidir. Fakat bu yöntem sadece süreksiz takviye fazları için uygulanabilir ve maliyetlidir [104]. Şekil 1.13’ de sprey çökeltme düzeneğinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 1. 13. Sprey çökeltme düzeneği [105].

### 1.5.1.3. Karıştırılmalı Döküm

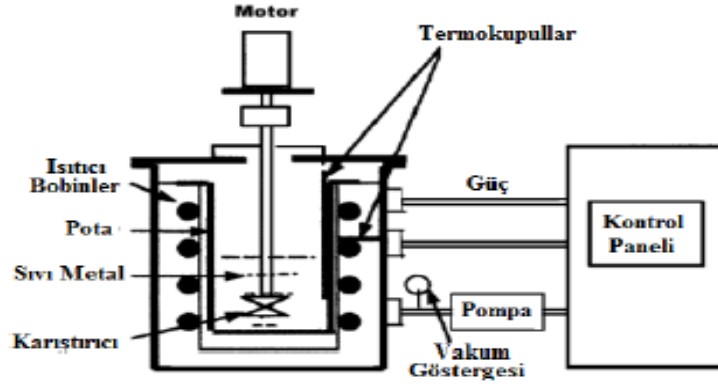
Karıştırılmalı döküm yönteminde takviye parçacıkları sıvı metale karıştırılarak katılaşmaya bırakılır. Ekonomik bir yöntemdir ve bu yöntemin en basit şekli vortex (girdap) yöntemidir. Vortex yönteminde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 1.14).



Şekil 1. 14. Vortex yöntemini şematik gösterimi [40].

Parçacık takviyeli MMK'ların karıştırılmalı döküm yöntemiyle üretilmesi sırasında karşılaşılan bazı zorluklar vardır. Bunlar:

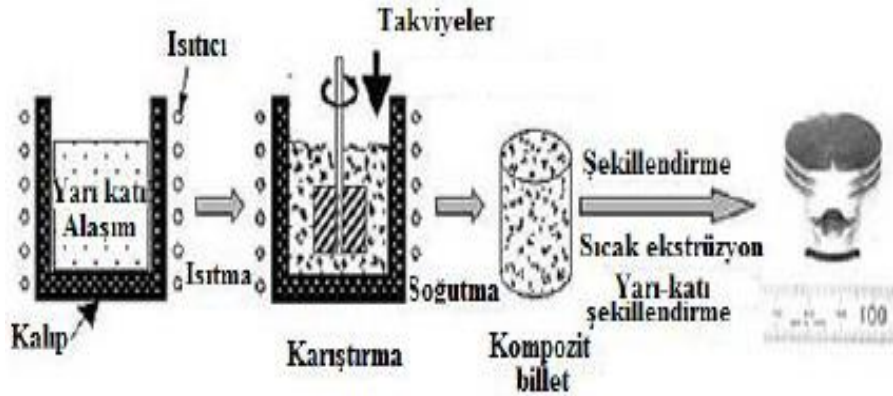
- Matrisin seramik takviyeyi kötü ıslatması,
- Ergimiş metal ve parçacıkların uzun süre teması halinde istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşması,
- Katılma esnasında gazların yapıdan çıkmaması nedeniyle iç yapıda gözenek (porozite) oluşması,
- Karıştırma işlemi vakum ve soygaz ortamında yapılmadığında iç yapıda inkülüzyon oluşumu gibi problemlerdir. Şekil 1.15' te vakumlu karıştırılmalı döküm deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 1. 15. Karıştırılmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanım [106].

#### 1.5.1.4. Kompozit Döküm

Kompozit döküm kuvvetli bir karıştırma işlemi yapılırken katılaşmaya başlamış olan sıvı eriyik içerisine takviye elemanının eklenmesi yöntemidir. Katılaşmaya başlamış matris tanecikleri takviye parçacıklarını kendi bünyelerine hapseder ve böylelikle takviye elemanları matristen ayrılmaz hem de kendi içinde topaklanmaz. Bu da takviye parçacıklarının matris içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamış olur. Kompozit döküm yöntemi ekonomiktir ve üretim kolaylığından dolayı magnezyum matrisli kompozitlerin üretimi için kullanılabilir [107,108]. Şekil 1.16' da kompozit döküm işlemi akış şeması verilmiştir.



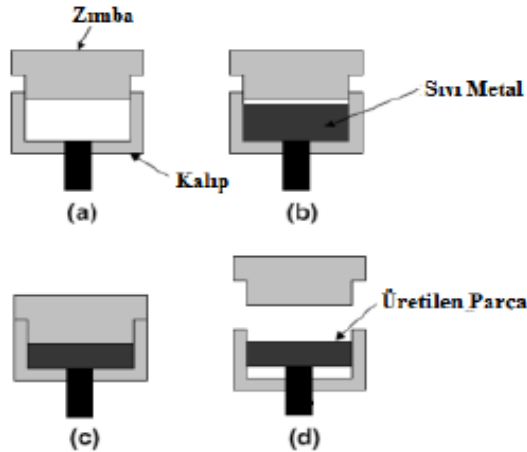
Şekil 1. 16. Kompozit döküm işlem akış şeması [40].

### 1.5.1.5. In-situ Yöntemi

Yaygın olarak kullanılan dışarıdan takviye parçacıklarının matrise eklenmesi ile üretilen metal matrisli kompozitlerde takviye fazının sıvı metal tarafından tam olarak ıslatılmaması sonucunda ara yüzey problemleri açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan eksik ıslanmalarda kimyasal reaksiyonlara ve bunun sonucunda da porozitelerin oluşmasına neden olur. Bu durumu iyileştirmek için takviye fazını sıvıya sonrandan ilave etmek yerine sıvı eriyik içerisinde yerinde (in-situ) reaksiyonlar oluşması sağlanır. Bu reaksiyonlarla oluşturulan seramik takviyeler  $Al_4C_3$ ,  $Fe_3C$ ,  $Al_2O_3$  gibi parçacıklardır [109-112].

### 1.5.1.6. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

Hemen hemen tüm takviye çeşitleri kullanılarak metal matrisli kompozit üretimi yapılan sıkıştırılmalı döküm yöntemi metalin basınç altında katılaştırılması işlemidir. Döküm sıcaklığına gelmiş sıvı metal kalıba yerleştirilmiş ve belirli bir sıcaklığa ısıtılmış takviye elemanı üzerine dökülür. Katılma bitene kadar sıvı metal üzerine yüksek miktarda basınç uygulanır [113-115]. Aşağıda sıkıştırılmalı döküm yöntemini aşamalarını gösteren sistematik diyagram verilmiştir (Şekil 1.17).



Şekil 1. 17. Sıkıştırılmalı döküm yöntemini aşamalarını gösteren sistematik diyagram [115].

## 1.5.2. Buhar Faz Üretim Yöntemleri

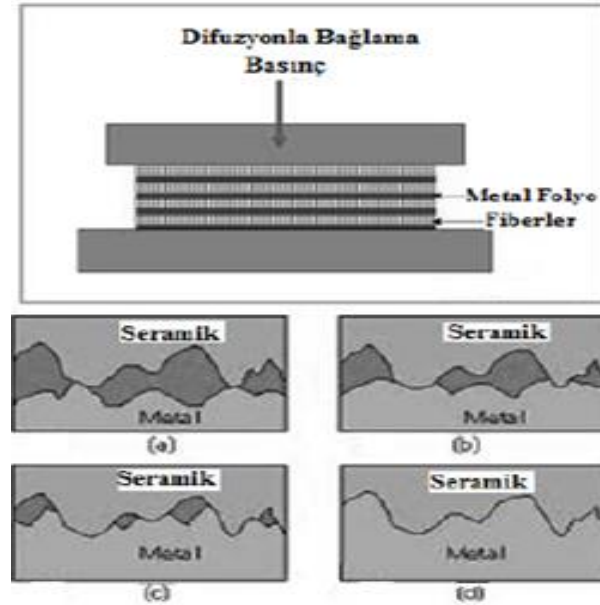
### 1.5.2.1. Fiziksel Buhar Çökeltme

Katı haldeki malzemenin buharlaştırılarak ya da sıçratılarak başka bir malzeme üzerinde biriktirilmesi olarak tanımlanabilir. PVD' nin ilk uygulaması olarak Faraday' ın metal bir teli vakum altında buharlaştırarak yaptığı kaplamadır [116].

## 1.5.3. Katı Faz Üretim Yöntemleri

### 1.5.3.1. Difüzyonla Bağlama

İnce saç ve yaprak biçimindeki metal matrisli fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde genellikle difüzyonla bağlama yöntemi kullanılmaktadır. Takviye için kullanılan fiberler metal saç üzerine yerleştirilir ve presleme işlemi uygulanarak bağlanma sağlanmış olur (Şekil 1.18). Kompozit üretilmek için belirlenen sistematığe göre uygulanacak basınç, sıcaklık ve bekleme süresi değişiklik gösterebilir. Bu yöntemin en büyük eksisi ara yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlardır [117].

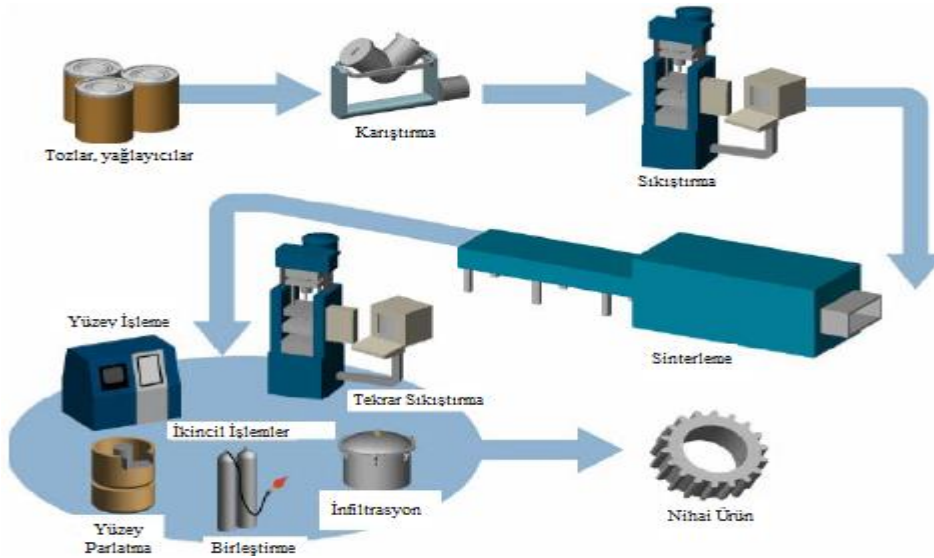


Şekil 1. 18. Difüzyonla bağlama [40].

### 1.5.3.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi (TM) çok küçük boyutlu metal toz partiküllerinin preslenmesi ve bu işlemin devamında uygun bir sıcaklıkta sinterlenmesi ile şekillendirilmiş malzemelerin üretim yöntemidir [117]. Toz metalurjisi genel olarak; toz üretimi, üretilen tozların homojen olarak karıştırılması, homojenitesi sağlanmış tozların kalıpta preslenmesi ve atmosfer kontrolü altında toz partiküllerinin birbirleri ile bağ kurmaları amacıyla gerek duyulan süre ve sıcaklıkta sinterleme proseslerinin yapılması işlemlerini kapsar (Şekil 1.19). Toz metalurjisi işlemini cazip hale getiren farklı sıkıştırılabilirlik kabiliyeti olan metal toz parçacıklarının sağlam, hassas ve mükemmel performans gösteren malzemelere dönüştürülmesi ve bu işlemin ekonomikliğinin sağlanması gibi birkaç husus vardır [118,119].

Metal matrisli kompozit ve nanokompozit malzemelerin üretiminde toz metalurjisi (TM) yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. TM yöntemi seramik parçacıkların sıvı metal tarafından ıslatılmasındaki zorluklardan dolayı kompozit üretimi için geliştirilmiş olan tekniklerden birisidir. Genel olarak toz haldeki matris malzemesi ile parçacık şeklindeki takviye elemanı kullanılarak metal matrisli kompozit (MMK) malzeme elde edilir. Toz metalürjisinde döküm yöntemindeki gibi ergitme işlemi olmadığı için oldukça ekonomik bir yöntem olup istenilen boyutlarda malzeme üretimi yapılabildiği için de son yüzey işlemine çok gereksinim duyulmaz [120].



Şekil 1. 19. TM yöntemiyle malzeme üretim aşamaları [120].

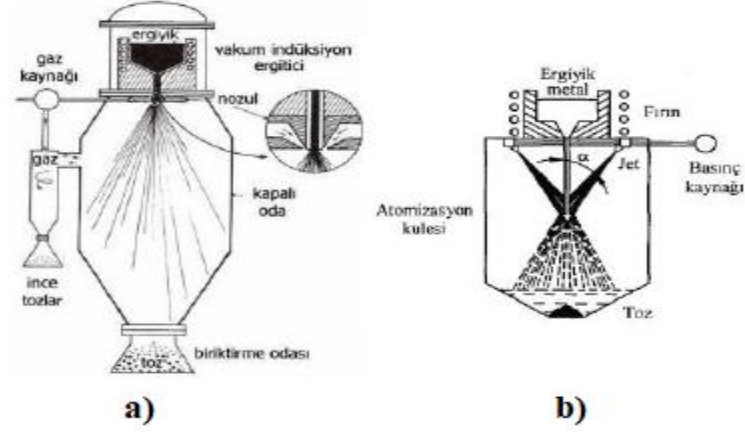


### 1.5.3.2.1. Toz Üretimi

Toz metalürjisi (TM) yönteminde istenilen ürünü elde etmek için kullanılan başlangıç malzemesi olan tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemler oldukça önemlidir. Tozların kimyasal bileşimi, saflığı, parçacık şekli, parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı ve tozların yüzey yapısı gibi dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Metal tozları üretim işlemine göre şekilleri küresel yapıdan karmaşık yapıya kadar değişebilir. Toz üretimi için kullanılan birçok yöntem vardır. Bunların bazıları:

- Elektrolitik ayrıştırma yöntemi,
- Değirmende öğütme,
- Atomizasyon yöntemi,
- Mekanik yöntemler,
- Kimyasal yöntemler,
- Talaş kaldırma,
- Mekanik alaşımlama gibi yöntemlerdir.

Atomizasyon yöntemi bu yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan yöntemdir ve bu yöntemde ergimiş haldeki metal sprey yardımıyla aniden soğutularak toz haline getirilir. Atomizasyon için farklı yöntemler kullanılır ve bunlardan biri olan su atomizasyonu yönteminde, ergimiş metal akarken su püskürtülmesi ile elde edilen ani soğutma sonucunda küçük tozlar elde edilir ve su metali çok hızlı soğuttuğu için elde edilen tozların şekilleri düzensizdir. Bu yöntemin bir eksisi suyun bazı metalleri oksitlemesidir. Bu yüzden su yerine ergimiş metale inert bir gaz püskürtülür ve malzeme daha yavaş soğuduğu için yuvarlak şekilli tozların eldesi mümkündür (Şekil 1.20). Bir başka yöntemde ise ergimiş haldeki metal dönen bir disk üzerine dökülür, malzeme dönen diskten fırlar ve kap duvarına yapışarak toz eldesi sağlanmış olur [121].



Şekil 1. 20. Atomizasyon yöntemleri, a) Gaz atomizasyon yöntemi, b) Su atomizasyon yöntemi [121].

Metal tozların üretimi için kullanılan bir başka yöntem kimyasal indirgeme yöntemidir. Bu yöntem farklı kimyasal reaksiyonlar içerir ve metal elementel toz haline indirgenmektedir. Oldukça saf toz elde edilebilen elektroliz yönteminde de elektrik kullanılır ve metalin çözülerek ince toz haline getirilmesi sağlanır. Elektrik sayesinde malzeme anottan katoda taşınır ve film üzerine yapıştırır. Kolayca yıkanıp temizlendikten sonra kurutulan bu filmden tozlar alınır ve toz üretimi tamamlanmış olur [122]. Toz metalürjisinde kullanılan olası parçacık şekilleri aşağıda verilmiştir (Şekil 1.21).



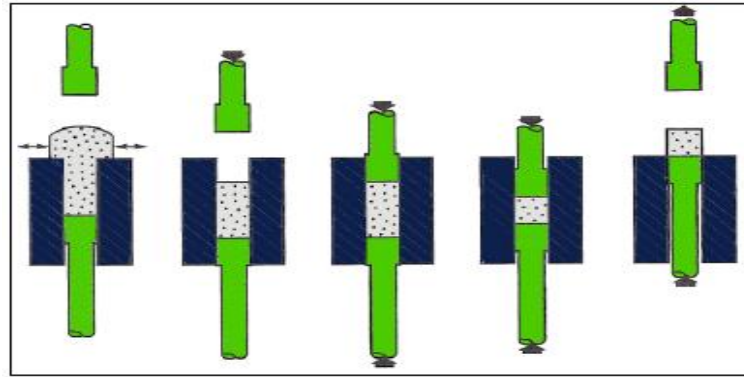
Şekil 1. 21. Toz metalürjisinde kullanılan olası parçacık şekilleri [65].

### 1.5.3.2.2. Tozların Karıştırılması

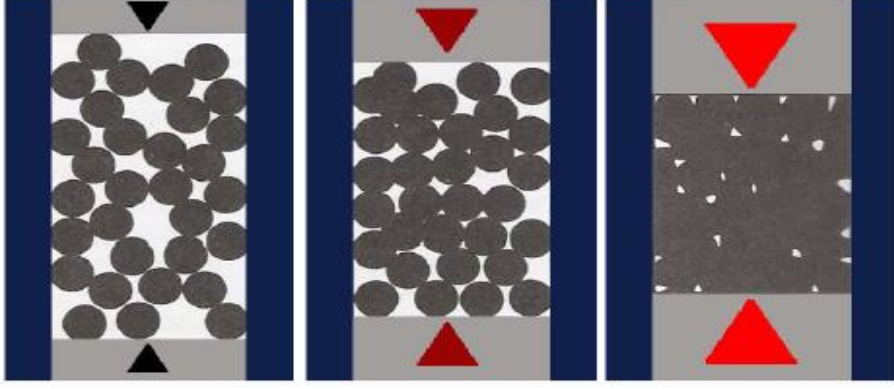
Tek tane boyut dağılımlı toz elde etmek ve sıkıştırmayı kolaylaştıracak yağlayıcı ilavesi için karıştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem sonucunda tozlar ve yağlayıcılar arasında homojenlik sağlanmış olur [36]. Yağlayıcı, tozlar ve kalıp çeperleri arasında oluşabilecek sürtünmeleri azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [123]. Ayrıca yağlayıcı ilavesi tozun şekillenmesi ve numunenin kalıptan çıkarılması da kolaylaştırır. Toz karıştırma işlemi için genellikle bilyeli değirmenler kullanılır. Kullanılan karıştırıcı tipi ve karıştırma süresi karıştırma kalitesini etkiler ve ayrıca karıştırma süresi homojen bir karışım için doğru seçilmelidir [124].

### 1.5.3.2.3. Tozların Preslenmesi

Bu işlemde yük altındaki serbest haldeki toz partikülleri istenilen forma dönüştürülür ve tozlara yoğunluk kazandırılmış olur. İşlemin amacı ham yoğunluk ve dayanım elde etmektir. Birçok sıkıştırma yöntemi olmasına rağmen genellikle tek eksenli kalıp ile sıkıştırma kullanılmaktadır (Şekil 1.22). Presleme işleminde tozlar yer çekiminin etkisi altında, gelişigüzel bir şekilde kalıba doldurulur bu yüzden toz parçacıkları arasında büyük boşluklar bulunmaktadır. Kalıbın titreştirilmesi sonucu tozlar belirli bir düzene girer ve buna paketlenme denir. Daha sonra kalıp ve presin hareketleri ile tozlar sıkışmaya başlar (Şekil 1.23). Uygulanan basınç kuvveti arttıkça tozlar önce elastik sonra plastik şekil değişimine uğrar [125].



Şekil 1. 22. Presleme işleminin basamakları [121].



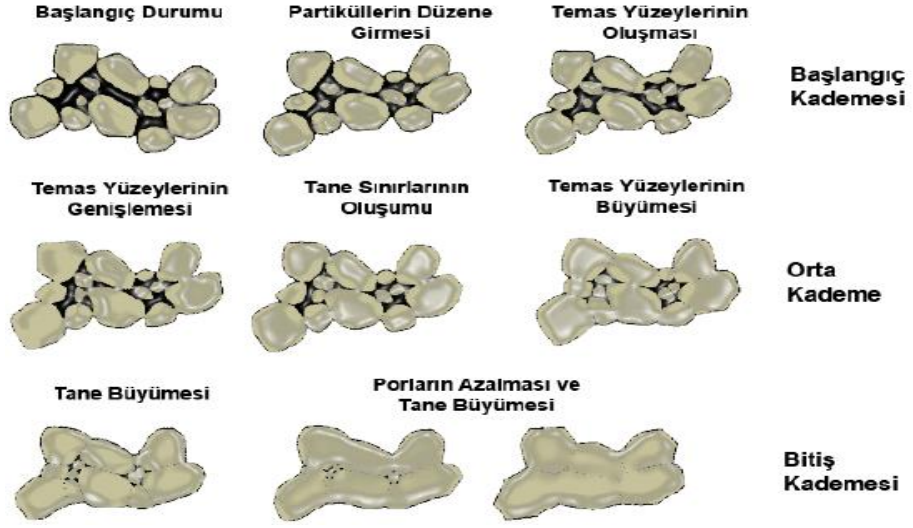
Şekil 1. 23. Presleme işleminde aşamalar [121].

#### 1.5.3.2.4. Sinterleme

Sıkıştırılmış, ham yoğunluğa sahip toz karışımının ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar ısıtılması ve tozlar arasında bağ oluşumunun sağlanması işlemi sinterleme olarak tanımlanmaktadır. Sinterleme işlemi ergime sıcaklığının yaklaşık 1/3'ü kadar düşük sıcaklıklarda yapılabilir. Sinterleme işleminin amacı kompakt malzemedeki poroziteyi azaltmaktır. Presleme işlemi sonrası mekanik olarak bağlanan tozlar sinterleme sonrası kimyasal olarak da bağlanarak iyi bir mekanik dayanım elde edilmiş olur. Sinterleme işlemi atmosfer korumalı ve atmosfer korumasız olarak yapılabilmektedir [65,126]. Sinterleme işlemiyle birlikte malzemede istenen veya istenmeyen bazı değişimler olmaktadır. Bunlar:

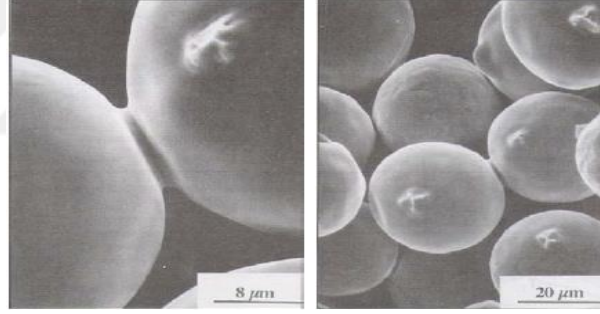
- Sertlik, kırılma tokluğu,
- Sıvı ve gaz geçirgenliği,
- Por boyutu ve şeklinin dağılımı,
- Tane sınırlarının ve şeklinin dağılımı,
- Dayanım, elastik modül,
- Ortalama tane sayısı, boyutu ve şekli,
- Kimyasal bileşim ve kristal yapı,
- Ortalama por boyutu ve şeklidir [126].

Şekil 1.24' de sinterleme kademelerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. 24. Sinterleme kademelerinin şematik gösterimi [127].

Şekil 1.25' de sinterleme esnasında boyun oluşumunun SEM resimleri verilmiştir.



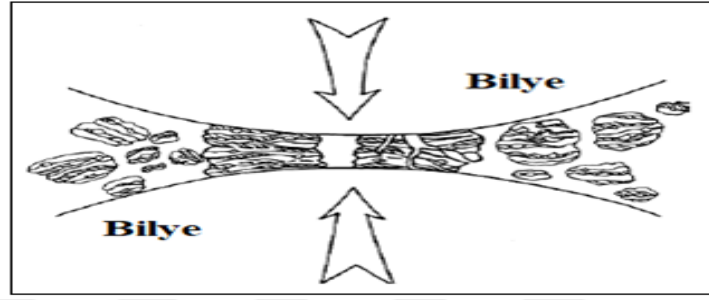
Şekil 1. 25. Sinterlemede meydana gelen boyun oluşumu [128].

## 1.6. Mekanik Alaşımlama

Döküm ve plastik şekil verme gibi yöntemlerle üretimi mümkün olmayan malzemelerin üretiminde genellikle toz metalurjisi yöntemi kullanılmaktadır ve TM'nin kullanımı da son yıllarda oldukça artış göstermiştir. Gün geçtikçe nano malzemeye karşı artan ilgi ve nano teknolojiye görülen hızlı gelişmeler toz metalürjisinin yeni yöntemlerinden biri olan mekanik alaşımlama (MA) yönteminin oldukça yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur [120]. Bu yöntem, yüksek enerjili bilyeli öğütme işlemi olup bir diğer ifade ile bilyeli değirmen içerisinde tozların sürekli kırılması ve soğuk kaynak işleminin tekrar

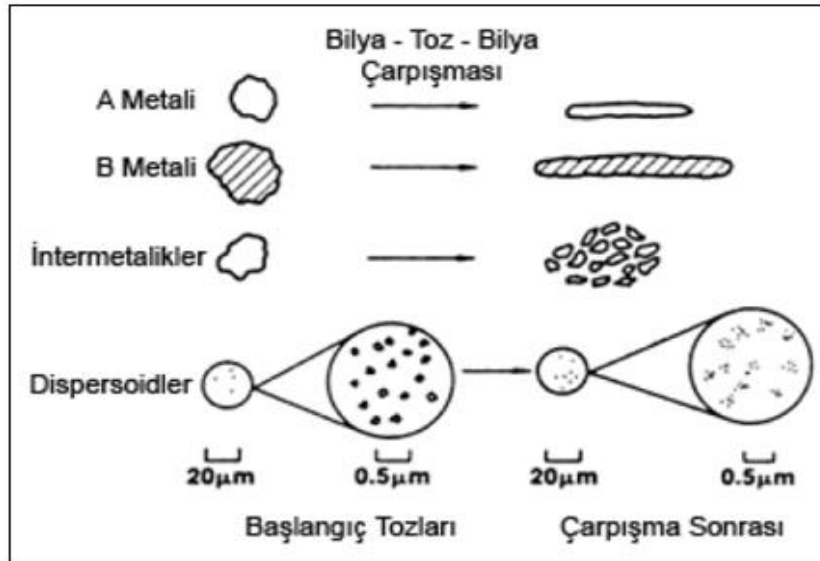
etmesini kapsayan katı faz işlemidir. Bu işlem ile tane boyutu küçültülür, takviye malzemesi matris içinde homojen olarak dağılır, katı çözünürlüğü artar ve amorf fazlar oluşur [44].

MA işlemi sırasında meydana gelen fiziksel değişim üç aşamada incelenebilir. Başlangıçta tozlar oldukça yumuşak ve birbirleri ile kaynayıp topaklanabilirler. Bu aşamada tozların başlangıç boyutunun yaklaşık üç katı büyüklükte parçalar oluşur. Şekil 1.26' da bilyelerin tozlarla çarpışmasının şematik şekli verilmiştir.



Şekil 1. 26. Bilyelerin tozlarla çarpışmasının şematik görünümü [129].

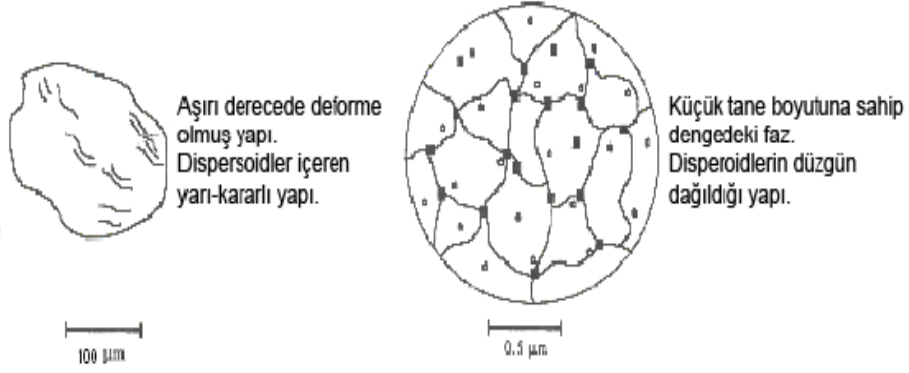
Metalik faz bilye-toz çarpışması sırasında düzleşir, üst üste biner, temiz yüzeyler birbiri ile temas eder ve bu devam ettikçe tozlar birbiriyle soğuk kaynarlar. Ayrıca kaynayan yüzeyler arasında sıkışan kırılgen fazlar kaplanarak yapıya karışır. MA esnasında tozlarda meydana gelen deformasyonun şematik gösterimi Şekil 1.27' de verilmiştir.



Şekil 1. 27. MA esnasında tozlarda meydana gelen deformasyon [129].

Mekanik alaşımla işleminin orta kademesinde sürekli devam eden kırılma ve kaynama sonucunda tozlar deformasyon sertleşmesine uğramış, pekiştirici fazlar ise sürekli haldedir. Parçacık boyutundaki küçülme mikro yapıdaki karışmanın hızlanmasını sağlar. MA' da bilyeler tarafından absorbe edilen kinetik enerji ve ısı artışıyla metalik matriste çözünme meydana gelir. Bu noktada atomik düzeyde meydana gelen difüzyonun artması sonucunda yeni fazlar oluşabilmektedir [130].

MA' nın son evresinde düzenli bir yapı elde edilmiş, parçacık boyutunu büyütücü etkiye sahip kaynama ve parçacık boyutunu küçülten kırılma mekanizmaları arasında denge sağlanmıştır. Sonuç olarak büyük ve küçük toz parçacıkları birbirleriyle karışarak boyutsal olarak bir homojenlik sağlanmış olur [129]. Şekil 1.28'de MA' nın son aşamasında oluşan yapı gösterilmiştir.



Şekil 1. 28. Mekanik alaşımlamanın son aşamasında meydana gelen yapı [130].

### 1.6.1. Mekanik Alaşımlamanın Avantajları

Mekanik alaşımla işlemi MMK' ların üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir. Bu yöntem ile takviye partiküllerinin topak oluşturması önlenir ve matris içerisinde homojen olarak dağılması sağlanır [131]. Genel olarak bu yöntemin avantajlarına bakacak olursak:

- Mekanik alaşımlama, bir katı hal işlemi olduğu için ergitme teknikleriyle üretilmesi imkansız ya da zor olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesine olanak sağlar.
- Gelişmiş malzemelerin tasarlanmasına olanak sağlayan yeni tekniklerdendir.

- Farklı ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerden intermetaliklerin üretilmesi.
- Sıvı (Cu-Pb) ya da katı (Fe-Cu) fazda birbiri içerisinde çözünmeyen elementlerin alaşımlanabilmesi.
- Matris içerisine homojen olarak dağılmış oksit parçacıkları dayanım için önemli bir rol oynar ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayan bir bariyer görevi görürler.
- Nano kristalli malzeme üretimine uygun bir yöntemdir.
- Matriste homojen dağılım gösteren oksit parçacıkları toparlanma ve yeniden kristalleşmeyi yavaşlatıp engelleyerek yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapı sağlar.
- Dış etkilere karşı yüksek dayanımlı malzeme üretimi mümkündür.
- Tamamen homojen bir toz karışımı elde edilerek segregasyon sorunun ortadan kaldırılabilir.
- Çok miktarda toz üretimi ve alaşımlanması için uygundur [120].

### 1.6.2. İşlem Parametreleri

Mekanik alaşımla işleminde son ürünün özelliklerini etkileyecek birçok parametre vardır ve bu parametreler birbirleri ile bağımlıdır. Bu parametreler:

- Öğütücü tipi,
- Kabın doluluk oranı,
- Bilye-toz oranı,
- Öğütme kabı,
- Öğütücü malzeme ve tipi,
- Öğütme sıcaklığı
- Öğütme hızı,
- Öğütme süresi,
- İşlem kontrol kimyasalları,
- Öğütme atmosferi' dir.

Öğütme esnasında öğütücü malzemeler kabın duvarlarına çarparak kopma, kırılma ve çatlak meydana getirebileceği için kullanılan öğütücü hazne oldukça önemlidir. Kırılma ve kopma sonucunda öğütücü haznedeki kopan parçacıklar toz karışımına karışarak bileşimi



etkileyerek kirlenmelere neden olabilir. Bu yüz öğütücü haznenin dayanıklı olmasına dikkat edilmelidir [132].

MA işleminde kullanılan bilye-toz oranı değişkenlik göstermekte olup kullanılan bilye-toz oranı 1:1 ve 1:200 arasında değişmektedir. Bilye-toz oranı homojen bir karışım için gerekli olan süreyi etkilemektedir ve bilye-toz oranının artması homojenliğin sağlanması için gerekli süreyi kısaltmaktadır [133].

Öğütme kabında bilye ve tozların rahatça hareket etmesi sağlıklı öğütme işleminin gerçekleşmesi için kabın doluluk oranının yaklaşık %50' yi geçmemesi gerekir.

Bir diğer önemli değişken de öğütme atmosferi olup, korozyon ve oksitlenme gibi problemleri önlemek için öğütme işlemi vakumlu ortam ya da argon gibi inert gaz ortamında yapılabilir.

Kristal boyut, parçacık boyutu öğütme süresi ile doğrudan ilişkili olup öğütme süresi önemli bir parametredir.

İşlem sırasında tozlar plastik deformasyona uğrar ve toz partikülleri arasında soğuk kaynaklanma meydana gelir ve tozlar aglomera olabilir, bunu önlemek için işlem kontrol kimyasalları ilave edilir [132].

MA' da farklı toz kapasitesi, değirmen öğütme etkileri, ısıtma-soğutma gibi ayarlanabilir üniteleri bulunan planeter (düzlemsel) tipi, speks ve artritör tipi değirmenler gibi birçok değirmen çeşidi vardır [96].

## 1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

MMK' ler mükemmel dayanım ve rijitlik gerektiren uygulamalarda geleneksel malzemelerin ihtiyaçları karşılayamaması nedeniyle geliştirilmiştir [57]. Kompozit malzemelerin yapısında hemen hemen bütün mühendislik malzemeleri kullanılmaktadır ve takviye elemanı olarak farklı malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. MMK üretiminde matris malzemesi olarak, hafif ve sünek olmalarından dolayı alüminyum, magnezyum, silisyum ve alaşımları kullanılmaktadır [10].

Alüminyum matrisli parçacık takviyeli kompozitler sahip olduğu yüksek elastik modülü, iyi aşınma direnci, düşük termal genleşme gibi özellikler önemli bir araştırma konusu olmasını sağlamıştır ve düşük yoğunluğuna karşın sahip olduğu yüksek dayanım bu malzemeyi önemli kılmıştır [134].

Alüminyum esaslı kompozitlerin üretilmesinde  $Al_2O_3$ , TiN,  $B_4C$ , MgO, h-BN,  $MoSi_2$ , SiC ve benzeri seramik partiküller yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleridir [135]. Bilindiği üzere ülkemiz bor cevheri rezervi açısından dünya ülkeleri arasında ilk sırada yer almaktadır ve bu nedenle bor ürünlerinin üretimi ve kullanımının yaygınlaştırılması büyük bir önem taşımaktadır. Takviye elemanı olarak hegzagonal bor nitrür (h-BN), grafit benzerliğinden dolayı beyaz grafit olarak adlandırılır, yumuşaktır ve tabakalı hegzagonal yapıdadır. Yüksek sıcaklıkta yüksek performansın gerekli olduğu uçak frenlerinde kullanılan metal kompozit sürtünme elemanlarının yağlanması işleminde kullanılmaktadır ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.  $B_4C$  ise elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve elastisite modülü ile nötron absorblama özelliklere sahiptir ve bu yüzden  $B_4C$  ile üretilen kompozit malzemeler nükleer reaktörlerde, kum veya abrasif püskürtme nozullarında, zırh malzemesi olarak, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [8, 69, 75-79, 87].

Firestein (2017) ve arkadaşları alüminyum esaslı BN micro ve nano partikül takviyeli kompozit malzeme üretmiştir. Hacimce %10' a kadar BN ilave edilerek Al-BN toz karışımı mekanik alaşımlanmış ve spark plazma yöntemi ile sinterleme gerçekleştirilerek kompozitler üretilmiştir. Bu çalışma sonucunda artan BN takviyesi ile çekme mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. BN mikro partikülleri, bilyalı öğütülmüş toz karışımları ve SPS ürünleri içinde daha homojen biçimli morfolojilerin oluşumu nedeniyle BN nano partiküllere kıyasla daha çok tercih edilen bir katkı maddesi olduğu görülmüştür. %7 BN mikro partikül takviyeli kompozit için çekme dayanımı  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 170 MPa iken, saf Al içeren kompozitin çekme dayanımı 33 MPa olarak bulunmuştur [136].

Firestein (2015) ve arkadaşları Al esaslı BN nano partikül takviyeli kompozit malzeme üretmiştir. Kompozitler spark plazma yöntemi kullanılarak sinterlenmiştir. Toz karışımları ve üretilen kompozitlerin yapıları ve kırılma yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. BN nano partikül takviye oranlarının (%0.5, 1.5, 3, 4.5, 6 ve 7.5) ve  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ' deki fırında tutma sürelerinin (5, 60, 300 dk) çekme mukavetine etkisi araştırılmıştır. Mukavemetteki en yüksek artış %4,5 BN nano partikül takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir [137].

Patil (2017) ve arkadaşı Deshmukh  $Al_{2024}$  esaslı h-BN takviyeli (%0, 5, 10) kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Al esaslı kompozitleri üretirken karıştırılmalı döküm (stir casting) yöntemini kullanmışlardır. Aşınma özellikleri, ASTM standartları G-99' a göre pin-on disk aşınma testi kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak,

h-BN yüzdesinin, uygulanan yük ve kayma hızından sonra en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür [138].

Gostariani (2017) ve arkadaşları yüksek enerjili bilyeli öğütme, soğuk sıkıştırma ve sinterleme işlemi kullanarak Al esaslı ağırlıkça %15 BN içeren nanokompozit malzeme üretmiştir. Bu çalışmada öğütme işleminin morfoloji değişimi ve fazlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Al (45 mm) ve h-BN (70 nm) tozları 75, 150, 300 ve 600 dakika gibi farklı sürelerde saf argon atmosferi altında planet bilyalı değirmen kullanılarak öğütülmüştür. Öğütülmüş tozlar 400 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır ve 600 °C' de 60 dakika sinterlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenen morfoloji, eş eksenli kompozit tozların, 150 dakikalık bir öğütme işleminden sonra elde edildiğini göstermiştir. X-ışını kırınım paternleri ve diferansiyel taramalı kalorimetrik (DSC) sonuçları, BN parçacıklarının boron ve nitrojene tamamen ayrıştığını, 300 dakikalık bilyalı öğütme işleminden sonra Al matrisinde çözündüğünü ve 580 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleme sonrası in-situ fazlar olarak AlN ve AlB<sub>2</sub>' nin oluştuğunu ortaya çıkarmıştır [139]

Zheng (2014) ve arkadaşları toz metalurjisi yöntemini kullanarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> esaslı B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozit malzeme üretmiştir. %100 mekanik öğütülmüş tozlardan üretilen kompozit malzemeler 670 MPa kırılma direncine sahiptir. Öğütülmemiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunun ilavesi hacimce %10' dan %40' a arttırıldığında, oda sıcaklığındaki sıkıştırma mukavemeti görünür bir plastik deformasyon olmaksızın 1115 MPa' dan 739 MPa' ya düşmüştür. Bununla birlikte, öğütülmemiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu hacimce %50' ye yükseldiğinde, sıkıştırma mukavemeti 580 MPa' ya düşerken, yaklaşık %10 gibi bir kırılma gerilmesi elde edilmiştir [140].

Gökmen (2016) yaptığı çalışmada son yıllarda yaygın olarak tercih edilen Al 2XXX serisi alaşımların özel bir türü olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu (Al-Cu-Mg) içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (% 5-10-15) B<sub>4</sub>C ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları ilave ederek hibrit kompozitler üretmiştir. Matris tozu ve takviye elemanları üç boyutlu karıştırıcı ile 45 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar tek yönlü basınç (400 MPa) altında preslenerek numuneler elde edilmiştir, 600 °C sıcaklıkta sinterlenmiş ve 500°C sıcaklıkta kalıp içerisinden geçirilerek ekstrüze edilmiştir. Daha sonra numuneler tel erozyon yöntemiyle kesilerek standart boyutlarda çapraz kırılma test numuneleri elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda sinterlenmiş numunelerin ekstrüzyon sonrası yoğunluklarının daha da arttığı görülmüştür. Takviye elemanın miktarındaki artışa bağlı olarak çapraz kırılma dayanım ve sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Bu çalışmada en yüksek çapraz kırılma dayanımı (920 MPa) ve en yüksek

sertlik (110 HB) değerleri sırasıyla %10 B<sub>4</sub>C ve %15 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sağlanmıştır [141].

Harichandran (2017) ve arkadaşı karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak B<sub>4</sub>C nanopartikül ve Al-B<sub>4</sub>C-h-BN hibrit nanokompozit toz takviyeli alüminyum esaslı nanokompozit malzeme üretmiştir. Üretilen hibrit ve nanokompozitler X ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDX) kullanılarak karakterize edilmiştir. Üretilen numunelere çekme, darbe ve mikro sertlik testleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemesinin sonuçları, üretilen kompozitlerde homojen dağılım, tane küçülmesi ve düşük gözenekliliği ortaya koymuştur. Ağırlıkça %6 B<sub>4</sub>C içeren nanokompozit, tüm diğer takviye oranlarına göre maksimum çekme mukavemeti ve sertlik göstermiştir. Al esaslı B<sub>4</sub>C (ağırlıkça %2 ve %4) ve h-BN (ağırlıkça %2) nanopartikül takviyeli hibrit nanokompozitlerin nanokompozitlere göre darbe enerjisinde ve uzamada iyileşme gösterdiği görölmüştür. Ağırlıkça %4 B<sub>4</sub>C ve %2 h-BN içeren hibrit nanokompozitlerin aşınma özellikleri, takviyesiz alüminyum matrisli nanokompozitler ile karşılaştırıldığında üstün aşınma direnci özellikleri sergilemektedir [142].

Çanakçı (2012) ve arkadaşı mekanik alaşımlama yönteminin metal matrisli kompozitlerin üretimi ve özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Matris malzemesi olarak Al2024 tozları ve takviye malzemesi olarak ağırlıkça %5 B<sub>4</sub>C parçacıkları kullanılmıştır. Kompozit tozları farklı öğütme süreleri seğilerek yüksek enerjili bilyeli öğütme ile üretilmiştir. Üretilen kompozit tozlar farklı basınçlarda preslenerek daha sonra argon atmosferinde sinterlenmiştir. Al2024-B<sub>4</sub>C kompozitlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca, üretilen kompozitlerin sertliğinin öğütme süresi ve takviye ile değişimi araştırılmıştır. SEM sonuçları AA2024 matrisinde artan öğütme süresi ile B<sub>4</sub>C parçacıklarının eşit dağılımını göstermiştir. Kompozitlerin sertliği, artan öğütme süresi ve takviye ile arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kompozit özelliklerini önemli ölçüde geliştiren mekanik alaşımlama ile sağlanan sıvı faz yöntemleri ile takviye partiküllerinin homojen dağılımı elde edilemediği görölmüştür [143].

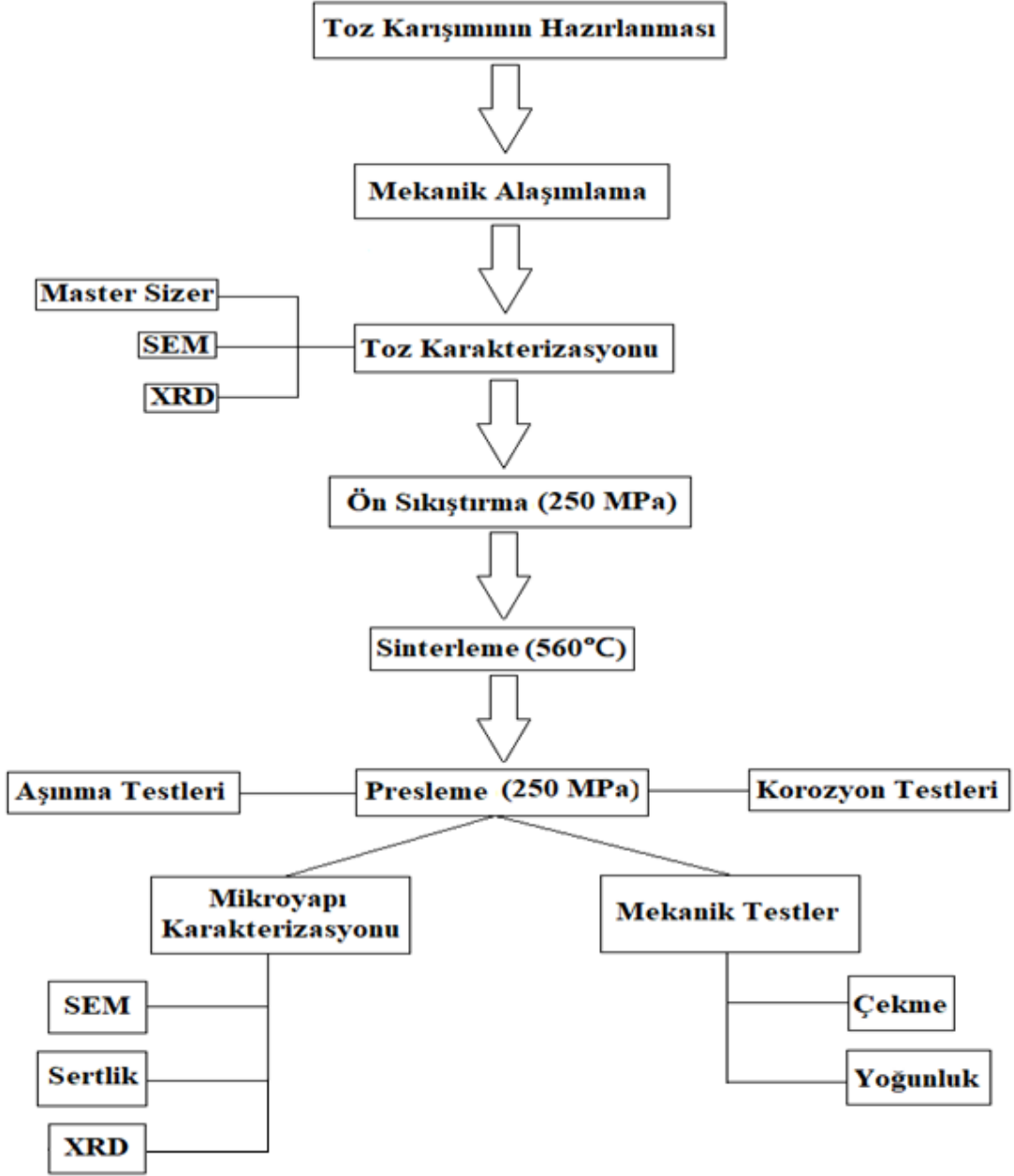
Varol (2013) ve arkadaşı takviye malzemelerinin boyutuna göre iki yeni öğütme modeli üzerine araştırmalar yapmıştır. Takviye olarak iki farklı parçacık boyutu ( $d_{50} = 49 \mu\text{m}$  ve  $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ ) ve ağırlıkça B<sub>4</sub>C partikülleri içeren %0, 5, 10 ve 20 AA2024-B<sub>4</sub>C nanoyapılı kompozit tozlar, mekanik öğütme ile üretilmiştir. Öğütme işlemi 400 devir ve 10:1 bilye oranı ve 10 saatlik bir öğütme süresi ile planet bilyeli değirmende geręekleřtirilmiřtir.

Takviyenin parçacık boyutu ve ağırlık yüzdesinin kompozit tozların kırılma ve plastik deformasyon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Öğütülmüş tozların yapısal ve mekanik değişimleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), lazer parçacık boyutlu analiz cihazı, X-ışını difraktometresi (XRD) ve mikro sertlik test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Takviye malzemesinin, takviye boyutunun ve öğütme süresinin kompozit tozların partikül büyüklüğünü ve mikro sertliğini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Sonuçlar, büyük B<sub>4</sub>C parçacıklarının kesme etkisi nedeniyle öğütme işlemini hızlandırdığını, ince B<sub>4</sub>C parçacıklarının gömme etkisine bağlı olarak öğütme işlemini hızlandırdığını göstermiştir [144].

Çalışmada matris malzemesi olarak endüstride yaygın bir uygulama alanına sahip olan AA2024, seramik takviye malzemesi olarak ise h-BN ve B<sub>4</sub>C kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda AA2024 ile ilgili nanokompozit çalışmasının çok az olduğu, özellikle AA2024' e h-BN katılarak nanokompozit üretimi olmadığı tespit edilmiş olup ayrıca AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C, AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit üretiminin olmadığı ve üretilen malzemelerin sanayiye katkı sağlayacağı düşünülerek AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitleri toz metalurjisi ile üretilmesi ve üretilen kompozitlerin birbiri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada üretilen nano ve hibrit nanokompozitlerin iç yapı, mekanik, fiziksel özellikleri, elektrokimyasal (korozyon) ve karakterizasyon ile ilgili özellikleri incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada mekanik alaşımlama yöntemi ile AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitleri ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitleri üretilmiş ve takviye oranlarının kompozit malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Öncelikle mekanik alaşımlama ile nanokompozit tozlar üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C kompozitlerinde 8 farklı oran (%0.25, %0.5, %1, %1.5, %2, %3, %4, %5) seçilmiştir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinde ise üç farklı grup üretimi yapılmış olup oranlar %0.25, %0.5, %1, %1.5, %2, %3 şeklindedir. MA yöntemi ile üretimi yapılan nanokompozit tozların karakterizasyon çalışmaları, X-ışınları difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve lazer parçacık boyutu analiz cihazı (Mastersizer 2000e, Malvern Instruments) ile yapılmıştır. Toz karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra nanokompozit tozlar basınç altında preslenmiş ve daha sonra sinter fırınında 3 saat bekletildikten sonra tekrar basınç altında preslenmiştir ve nanokompozit numuneler üretilmiştir. Kullanılan basınçlar 250 MPa' dır. Üretilen bu nanokompozitlerin, yoğunluk, gözeneklilik, sertlik değerleri, iç yapı incelemeleri, aşınma, çekme ve korozyon testleri yapılmıştır. Şekil 2.1'de yapılan çalışma boyunca uygulanan işlem akış şeması verilmiştir.



Şekil 2. 1. Yapılan çalışmanın akış şeması

## 2.1. Malzeme

Çalışmalarda matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 ( $2.78 \text{ g/cm}^3$ ) alaşım tozlarının (Gündoğdu Exotherm Company'den (GES) temin edilen) ortalama toz boyutu  $110 \mu\text{m}$ ' dir. AA2024 tozlarının spektral analizi Tablo 2.1' de verilmiştir. Seramik partikül takviyesi olarak h-BN ( $2.27 \text{ g/cm}^3$ ) ve  $\text{B}_4\text{C}$  ( $2.52 \text{ g/cm}^3$ ) partikülleri (Alfa-Aesar firmasından

temin edilen) kullanılmıştır ve ortalama parçacık boyutları; h-BN 100 nm ve B<sub>4</sub>C 50 nm'dir. AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik zellikleri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2. 1. AA2024 başlangıç tozlarının bileşimi (%)

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

Tablo 2. 2. AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik zellikleri

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	ekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
2,78	185	75	20	55

İlk olarak AA2024 tozlarına önce eleme işlemi uygulanmış ve d<sub>50</sub> değeri olan ortalama 110 μm başlangıç tozları kullanılmıştır (şekil 2.2). Takviye elemanları olarak kullanılan h-BN ve B<sub>4</sub>C tozlarının ortalama boyutları sırasıyla 100 nm ve 50 nm olup hazır şekilde temin edilmiştir. Matris ve takviye elemanlarının başlangıç morfolojileri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.



şekil 2. 2. Elek nitesi



## 2.2. Malzeme Bileşimleri

Üretilecek nanokompozit ve hibrit nanokompozit bileşimleri belirlenmiş ve bütün numunelerin kodlandırılması Tablo 2.3' de yapılmıştır.

Tablo 2. 3. Üretilecek kompozit malzemelerin bileşimleri ve adlandırılmaları

Bileşim (% ağı.)	Matris	Takviye		Numune Kodu
	AA2024	h-BN	B <sub>4</sub> C	
AA2024	100,0	0	0	A <sub>0</sub>
AA2024-%0,25 h-BN	99,75	0,25	0	AN <sub>0,25</sub>
AA2024-%0,5 h-BN	99,5	0,5	0	AN <sub>0,5</sub>
AA2024-%1,0 h-BN	99,0	1,0	0	AN <sub>1,0</sub>
AA2024-%1,5 h-BN	98,5	1,5	0	AN <sub>1,5</sub>
AA2024-%2,0 h-BN	98,0	2,0	0	AN <sub>2,0</sub>
AA2024-%3,0 h-BN	97,0	3,0	0	AN <sub>3,0</sub>
AA2024-%4,0 h-BN	96,0	4,0	0	AN <sub>4,0</sub>
AA2024-%5,0 h-BN	95,0	5,0	0	AN <sub>5,0</sub>
AA2024-%0,25 B <sub>4</sub> C	99,75	0	0,25	AC <sub>0,25</sub>
AA2024-%0,5 B <sub>4</sub> C	99,5	0	0,5	AC <sub>0,5</sub>
AA2024-%1,0 B <sub>4</sub> C	99,0	0	1,0	AC <sub>1,0</sub>
AA2024-%1,5 B <sub>4</sub> C	98,5	0	1,5	AC <sub>1,5</sub>
AA2024-%2,0 B <sub>4</sub> C	98,0	0	2,0	AC <sub>2,0</sub>
AA2024-%3,0 B <sub>4</sub> C	97,0	0	3,0	AC <sub>3,0</sub>
AA2024-%4,0 B <sub>4</sub> C	96,0	0	4,0,	AC <sub>4,0</sub>
AA2024-%5,0 B <sub>4</sub> C	95,0	0	5,0	AC <sub>5,0</sub>
AA2024-%2 h-BN-%0,25 B <sub>4</sub> C	97,75	2,0	0,25	AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>
AA2024-%2 h-BN-%0,5 B <sub>4</sub> C	97,50	2,0	0,5	AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>
AA2024-%2 h-BN-%1,0 B <sub>4</sub> C	97,0	2,0	1,0	AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>
AA2024-%2 h-BN-%1,5 B <sub>4</sub> C	96,5	2,0	1,5	AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>
AA2024-%2 h-BN-%2,0 B <sub>4</sub> C	96,0	2,0	2,0	AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>
AA2024-%2 h-BN-%3,0 B <sub>4</sub> C	95,0	2,0	3,0	AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>
AA2024-%3 h-BN-%0,25 B <sub>4</sub> C	96,75	3,0	0,25	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>
AA2024-%3 h-BN-%0,5 B <sub>4</sub> C	96,50	3,0	0,5	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>
AA2024-%3 h-BN-%1,0 B <sub>4</sub> C	96,0	3,0	1,0	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>
AA2024-%3 h-BN-%1,5 B <sub>4</sub> C	95,5	3,0	1,5	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>
AA2024-%3 h-BN-%2,0 B <sub>4</sub> C	95,0	3,0	2,0	AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>
AA2024-%3 h-BN-%3,0 B <sub>4</sub> C	94,0	3,0	3,0	AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>
AA2024-%4 h-BN-%0,25 B <sub>4</sub> C	95,75	4,0	0,25	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>
AA2024-%4 h-BN-%0,5 B <sub>4</sub> C	95,50	4,0	0,5	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>
AA2024-%4 h-BN-%1,0 B <sub>4</sub> C	95,0	4,0	1,0	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>
AA2024-%4 h-BN-%1,5 B <sub>4</sub> C	94,5	4,0	1,5	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>
AA2024-%4 h-BN-%2,0 B <sub>4</sub> C	94,0	4,0	2,0	AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>
AA2024-%4 h-BN-%3,0 B <sub>4</sub> C	93,0	4,0	3,0	AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>

### 2.3. Mekanik Alaşım

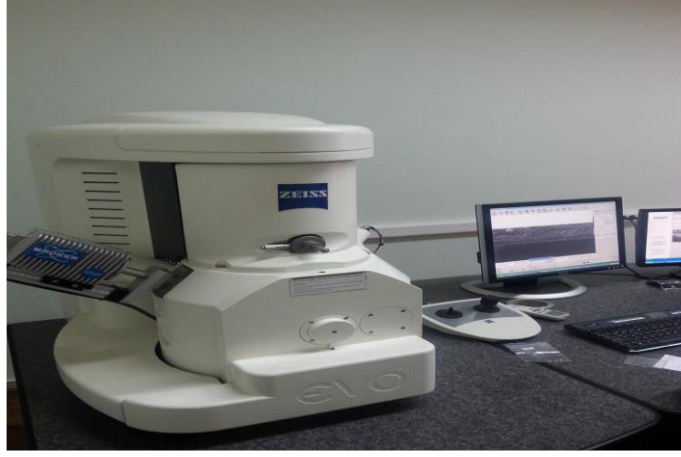
Mekanik alaşım (MA) işlemi gezegen tip bilyeli öğütücüde (Retsch PM100) 400 dv/dak ile gerçekleştirilmiştir. Öğütme süresi 1 saat seçilmiştir. Öğütme işleminde tungsten karbür hazne ve bilyeler kullanılmıştır. Bilye boyutu 10 mm öğütücü kabın hacmi ise 125 ml' dir. Bilye:toz ağırlık oranı ise 5:1 olarak seçilmiş ve öğütücü kaba şarz edilen toz karışım miktarı 60 gr' dır. Bu işlemde amaç  $B_4C$  ve h-BN toz partiküllerinin AA2024 matris içerisinde homojen olarak dağılmasıdır. Öğütücü kap, öğütme cihazı, ve bilye fotoğrafları Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2. 3. Öğütme işleminde kullanılan elemanlar

### 2.4. Toz Morfolojisi

Mekanik alaşım yöntemi ile üretilen nanokompozit, hibrit nanokompozit tozlarının ve başlangıç tozlarının morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde takviye oranının değişiminin kompozit morfolojisine olan etkileri araştırılmıştır. Şekil 2.4' de incelemelerde kullanılan SEM' nin resmi verilmiştir.



Şekil 2. 4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

## 2.5. Parçacık Boyutu

Başlangıç tozları ve MA ile üretilmiş tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri (Şekil 2.5) lazer parçacık boyut ölçüm cihazıyla (Malvern Instruments™ Mastersizer 2000e) saf su ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 5. Lazer saçınımlı partikül boyut ölçer cihazı

## 2.6. Presleme

Mekanik alaşımlanmış tozlara önce soğuk şekilde ön presleme (250 MPa) uygulanmıştır. Daha sonra ön şekil verilmiş numuneler 560 °C sıcaklıktaki fırında 3 saat bekletildikten sonra 100 ton kapasiteli tek eksenli preste (Şekil 2.6) tekrar 250 MPa basınç altında preslenerek numuneler üretilmiştir.



Şekil 2. 6. Sıcak pres cihazı

## 2.7. Metalografik İşlemler

MA yöntemi ile üretilen h-BN ve B<sub>4</sub>C takviyeli nanokompozit ve hibrit nanokompozitler otomatik kesme cihazında hassas olarak kesildikten sonra kompozitlerin iç yapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri için gerekli metalografik işlemleri tam otomatik zımparalama ve parlatma cihazlarıyla yapılmıştır. Ayrıca ihtiyaç duyulan numuneler için bakalite alma işlemi de uygulanmıştır (Şekil 2.7).

Zımparalama işlemi sırasında üretilen nanokompozit malzemelere 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 numaralı zımpara kağıtları kullanılarak zımpara işlemi yapılmıştır ve sonrasında alümina sıvısı kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 2. 7. (a) Kesme cihazı (b) Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı  
(c) Bakalit cihazı

Şekil 2.7' nin devamı



(c)

AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C takviyeli nanokompozitler ile AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin iç yapı incelemeleriyle, matris ve takviye parçacıklarının morfolojik yapıları Şekil 2.8' de gösterilen ZEISS marka LS 10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. SEM' de çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin ve korozyon testleri sonrası korozyona uğrayan yüzeylerin incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 2. 8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitleri ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit numunelerinin PANalytical marka XRD cihazında X ışınları analizi yapılarak sintirleme işlemleri sonrası numunelerde oluşan faz tanımları yapılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2. 9. PANalytical marka XRD cihazı

## 2.8. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

### 2.8.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Üretilmiş olan nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralı kullanılarak hesaplanmıştır, deneysel yoğunlukları ise numunenin geometrik şekline göre hesaplanmıştır. Bağıl yoğunluk ise elde edilen deneysel yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünerek hesaplanmıştır.

$$\delta t = [(\%W)_1 \cdot \delta 1] + [(\%W)_2 \cdot \delta 2] + \dots + [(\%W)_n \cdot \delta n] \quad (2.1)$$

Burada;

$\delta t$ : Kompozitin teorik yoğunluğu

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

$\delta n$ : Her bir takviyenin yoğunluğu

$$\text{Bağıl yoğunluk} = [(\delta t - \delta d) / \delta t] \times 100 \quad (2.2)$$

Burada;

$\delta d$ : Deneysel yoğunluk

$\delta t$ : Teorik yoğunluk

$$\% \text{Gözenek} = \left( 1 - \frac{\text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

formülü ile hesaplanmıştır.





Şekil 2. 10. Üretilen aşınma ve çekme numuneleri

## 2.9. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

### 2.9.1. Çekme Mukavemeti Testi

Çekme numunelerine MTS 45 marka çekme test cihazında (Şekil 2.11), 0,2 mm/sn çekme hızı kullanılarak test uygulanmıştır. Her bir numune için üçer kez çekme testi yapıp ortalama değer, sonuç olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2. 11. MTS 45 model universal çekme cihazı

### 2.9.2. Sertlik Testi

Üretilen nanokompozit ve hibrit nanokompozitler için sertlik ölçümleri Innovatest Nemesis 9000 marka sertlik cihazı kullanılarak Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. (Şekil 2.12). Brinell sertlik ölçümünde 2,5 mm çapında batıcı uç ve 31,25 kgf yük 10 sn uygulanmıştır. Ölçümlerde her numune için ayrı ayrı yedişer kez yapılmış olup en küçük ve en büyük değerler çıkarılıp, kalan beş değerın ortalaması alınarak sonuç hesaplanmıştır.



Şekil 2. 12. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı

### 2.9.3. Aşınma Testi

Üretilen silindirik aşınma numunelerine Ducom marka, universal tip aşınma test cihazı kullanılarak Ball-on-Disk (numune üzeri bilye) aşınma testleri yapılmıştır (Şekil 2.13). Aşınma testleri 5N, 10N, 20N ve 40N' luk yüklerde 0,5 m/sn kayma hızında ve her numune için 400 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan aşınma testleri sonucunda aşınma miktarı, ağırlık kaybı olarak alınmış ve grafiksel olarak ifade edilmiştir.



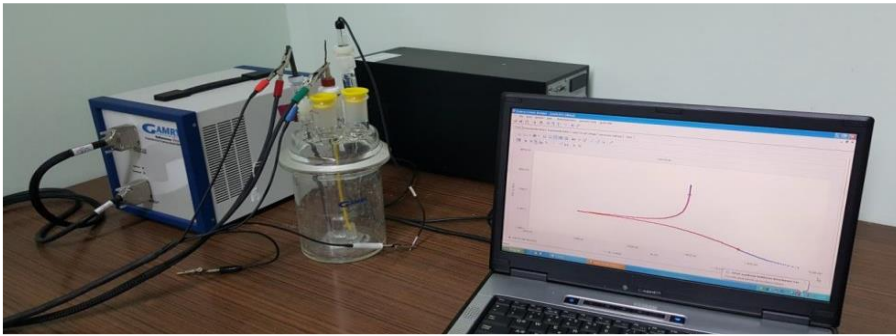


Şekil 2. 13. Ball-on-Disk (Numune Üzeri Bilye) aşınma cihazı

## 2.10. Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi

### 2.10.1. Korozyon Testi

AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitleri ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlere potansiyodinamik polarizasyon testleri yapılarak korozyon davranışları belirlenmiştir (Şekil 2.14). %3,5 NaCl çözeltisi hazırlanarak elektrolit çözeltisi olarak kullanılmıştır. Yapılacak testlerden önce hazırlanan numunelerin yüzeyleri metanol ile yıkanıp kurutulmuştur. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerine -500 mV katodik potansiyel ile başlanmış, ölçümlere 1 mV/s tarama hızı ile +500 mV anodik potansiyeline kadar devam edildikten sonra bitirilmiştir. Elektrolit korozyon davranışı akım yoğunluğu ve korozyon potansiyeline göre değerlendirilmiştir. Üretilen kompozit numunelerinin korozyon davranışlarını belirlemek için potansiyodinamik polarizasyon testlerinden üçer adet yapıp ortalaması sonuç olarak değerlendirilmiştir.



a)

b)

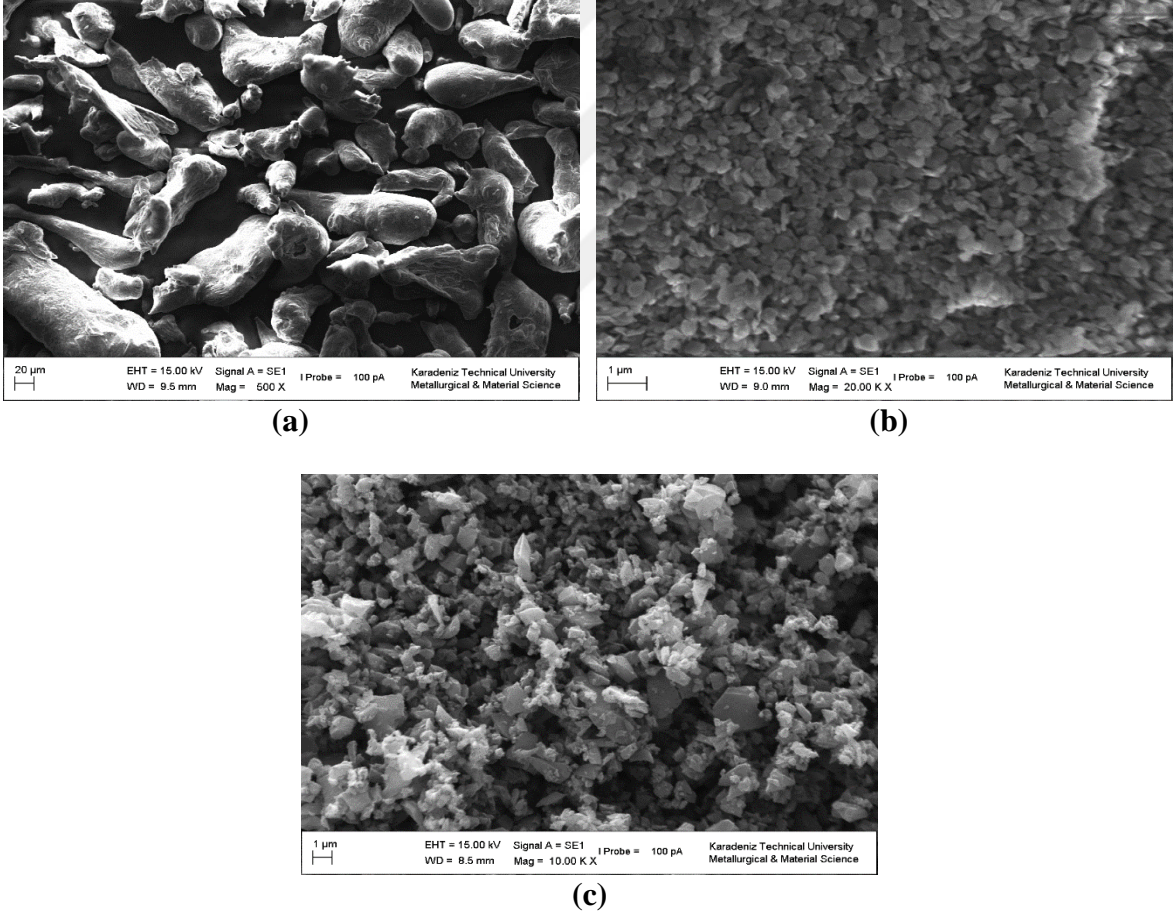
Şekil 2. 14. a) Gamry marka korozyon test cihazı, b) korozyon testleri için hazırlanan numunenin şematik gösterimi

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Toz Karakterizasyonu

##### 3.1.1. Toz Morfolojisi

SEM görüntülerinde görüldüğü gibi kullanılan matris malzemesi olan AA2024 tozlarının başlangıç morfolojisi düzensiz (irregular shape) şeklindedir. Aşağıda matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 alaşım tozu, takviye malzemesi olarak kullanılan h-BN ve B<sub>4</sub>C başlangıç tozlarının morfolojileri verilmiştir (Şekil 3.1).

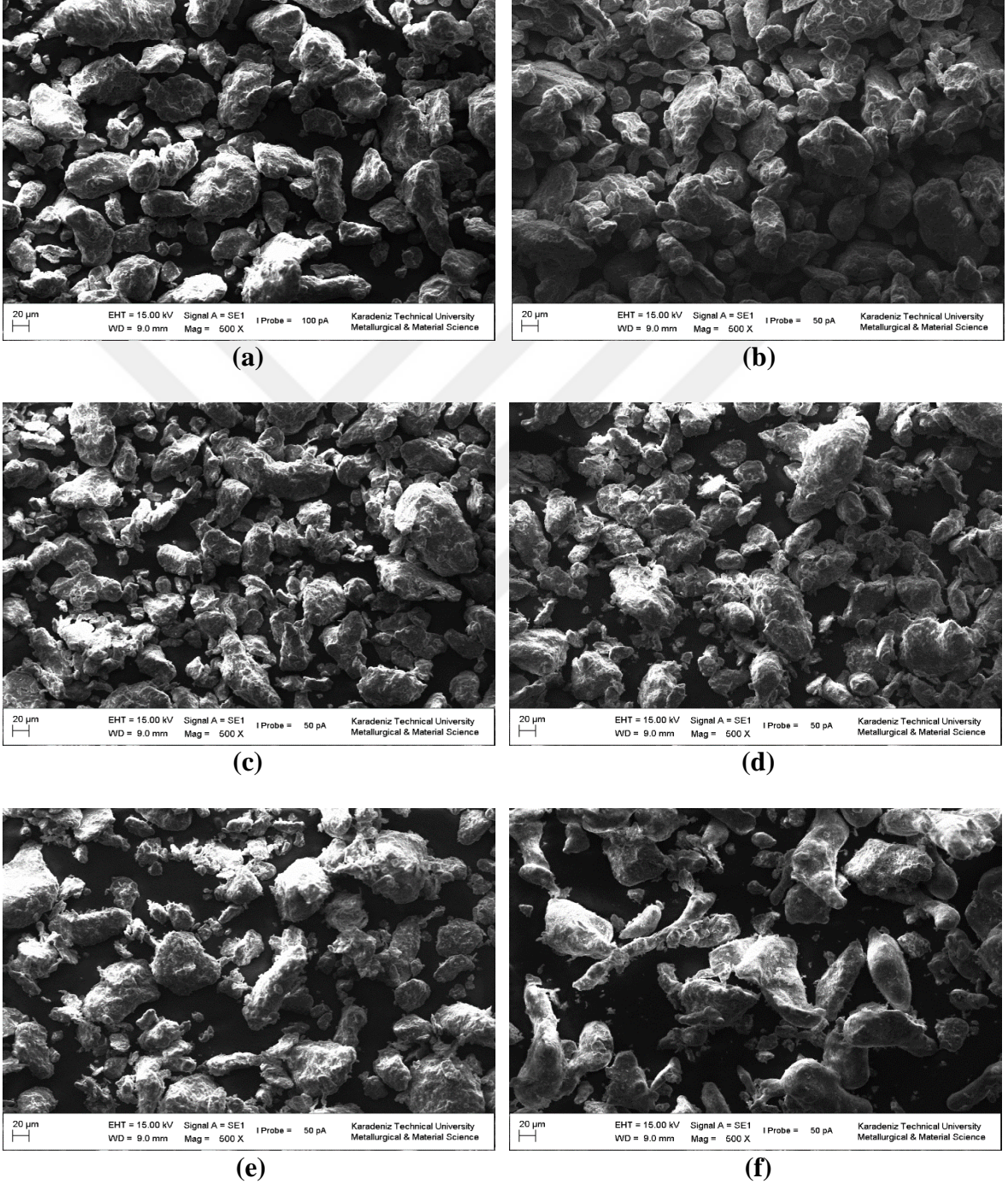


Şekil 3. 1. Çalışmada kullanılan başlangıç tozlarının morfolojileri, (a) AA2024, (b) h-BN ve (c) B<sub>4</sub>C



### 3.1.2. Sabit Öğütme Süresi ile Takviye Malzemesinde Değişen Orana Bağlı Olarak Toz Morfolojisinde Meydana Gelen Değişim

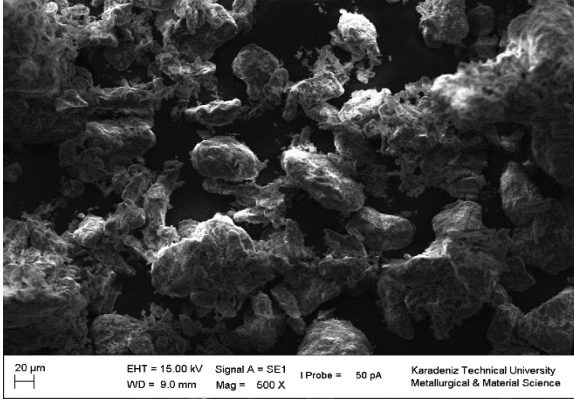
#### 3.1.2.1. AA2024/h-BN Nanokompozit Tozları



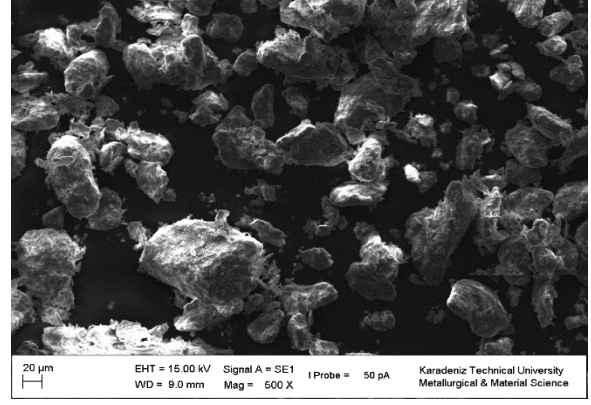
Şekil 3. 2. AA2024/h-BN nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a) $AN_{0,25}$ , (b) $AN_{0,5}$ , (c) $AN_{1,0}$ , (d) $AN_{1,5}$ , (e) $AN_{2,0}$ , (f) $AN_{3,0}$ , (g) $AN_{4,0}$ , (h) $AN_{5,0}$



Şekil 3.2' nin devamı

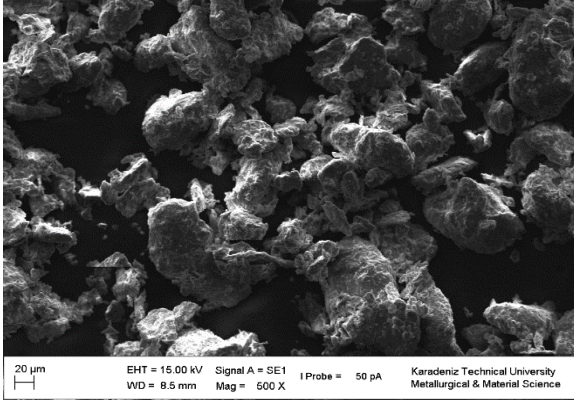


(g)

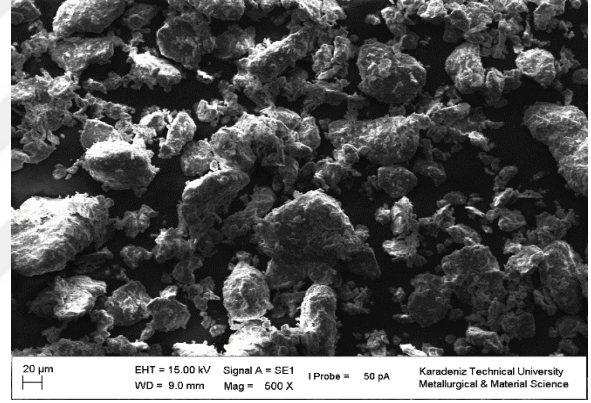


(h)

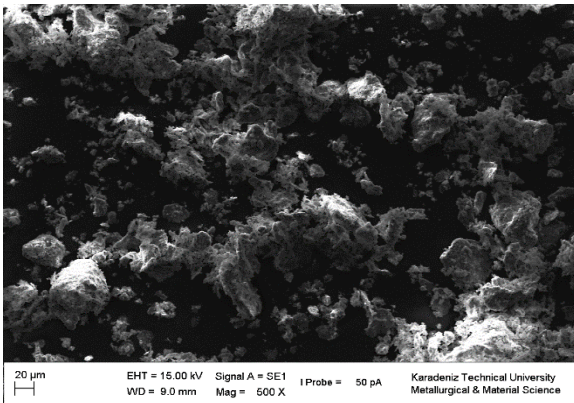
### 3.1.2.2. AA2024/B<sub>4</sub>C Nanokompozit Tozları



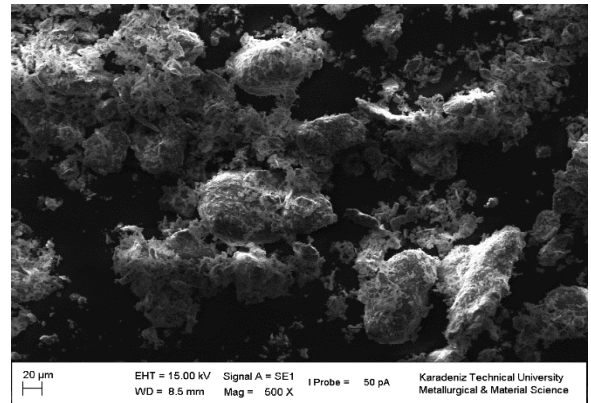
(a)



(b)



(c)

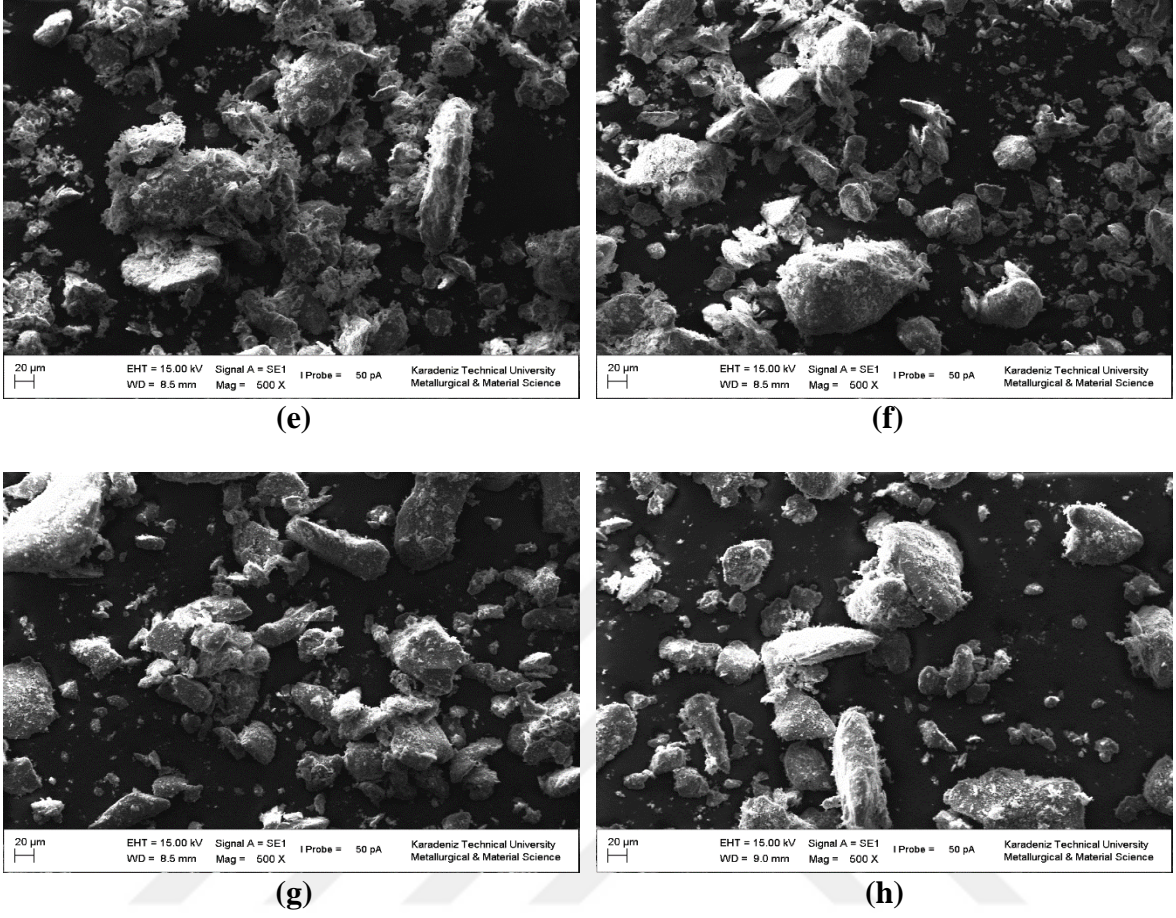


(d)

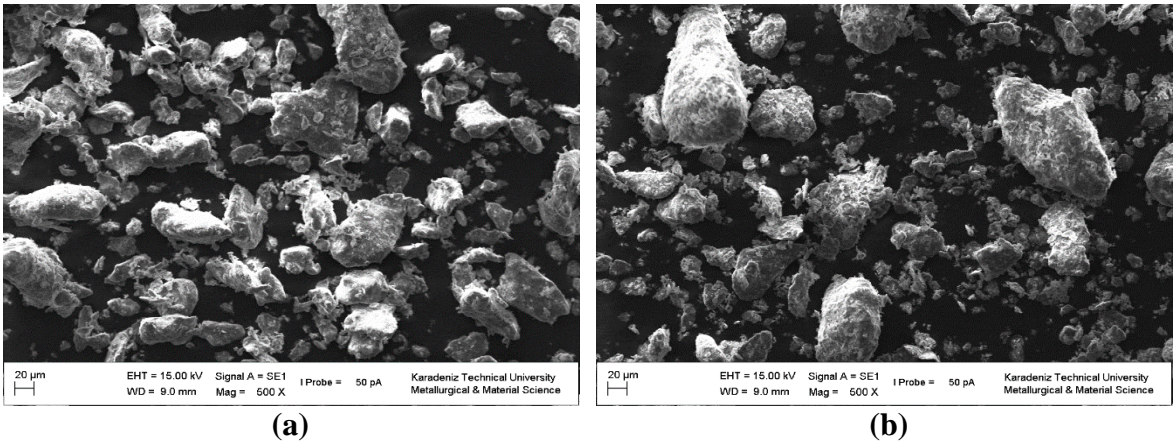
Şekil 3. 3. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AC<sub>0,25</sub>, (b)AC<sub>0,5</sub>, (c)AC<sub>1,0</sub>, (d)AC<sub>1,5</sub>, (e)AC<sub>2,0</sub>, (f)AC<sub>3,0</sub>, (g)AC<sub>4,0</sub>, (h)AC<sub>5,0</sub>



Şekil 3.3' ün devamı



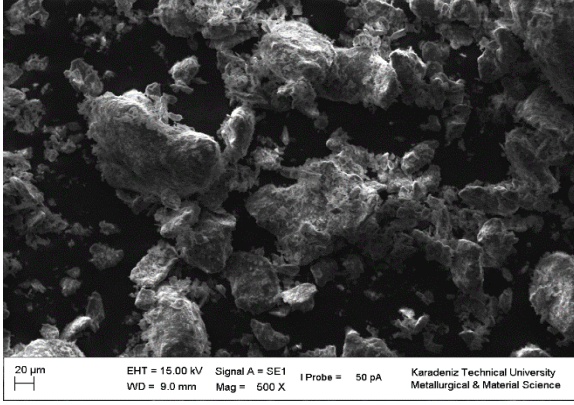
### 3.1.2.3. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C Hibrit Nanokompozit Tozları



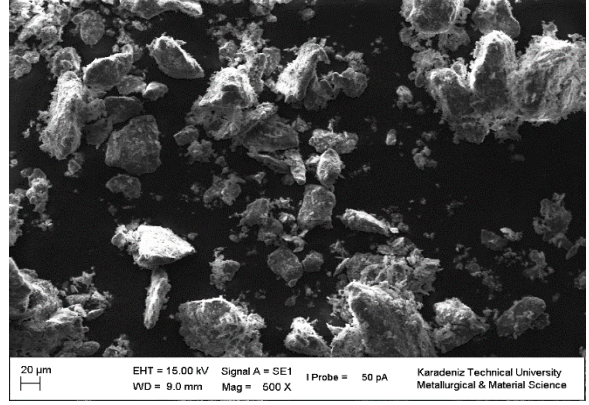
Şekil 3. 4. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b) AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>2,0</sub>C<sub>3,0</sub>



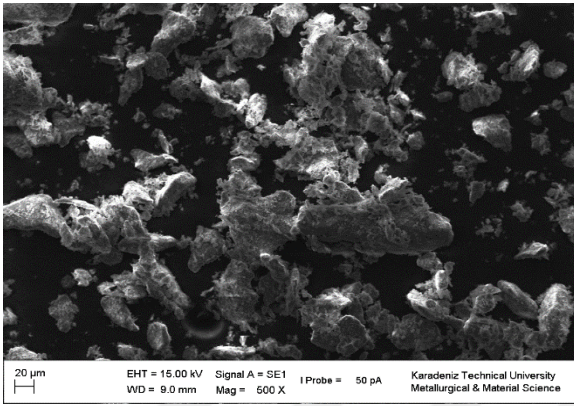
Şekil 3.4' ün devamı



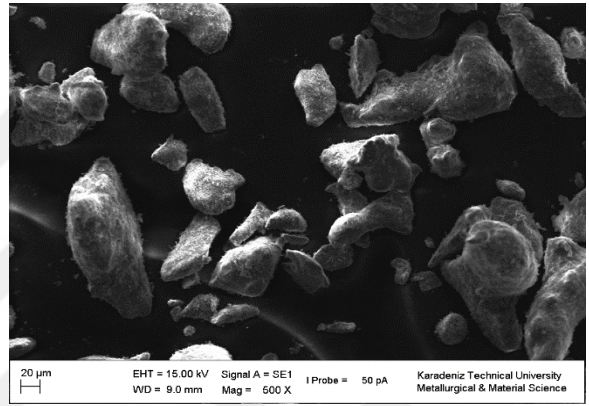
(c)



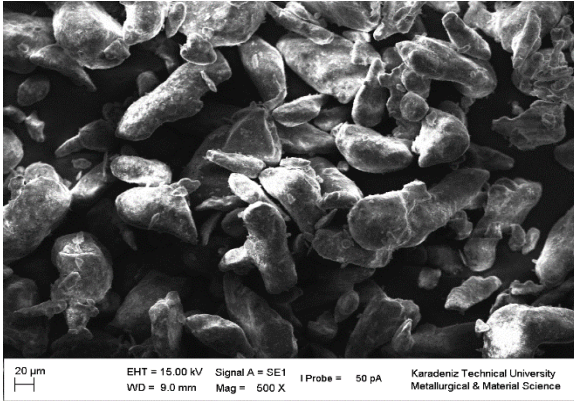
(d)



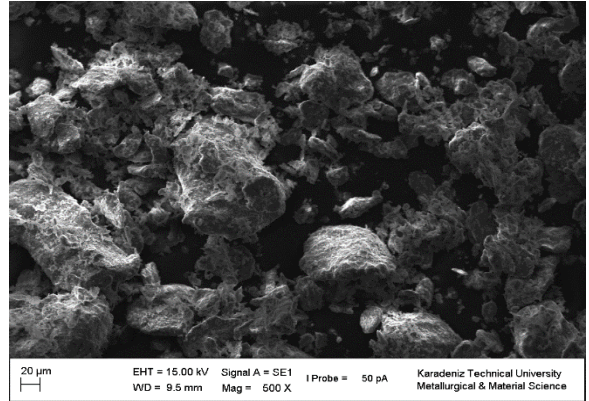
(e)



(f)



(a)

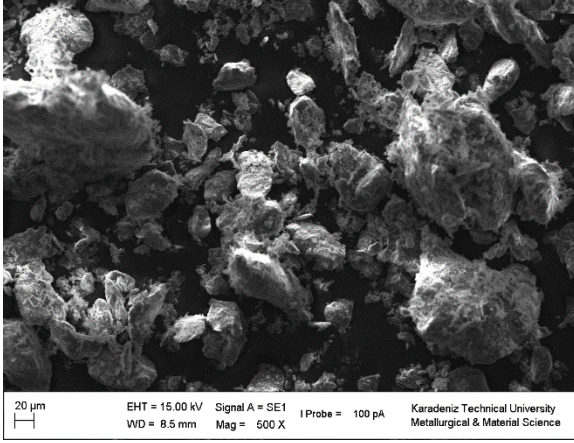


(b)

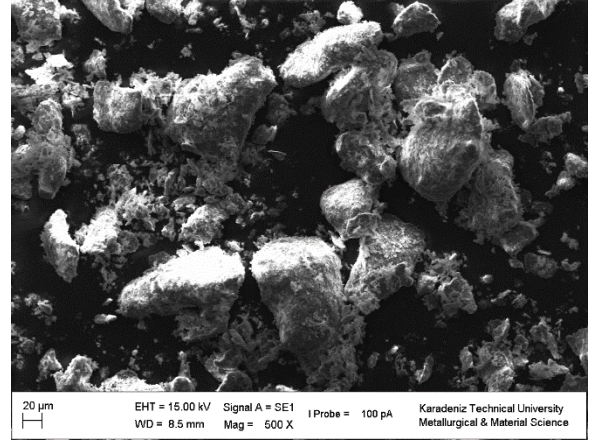
Şekil 3. 5. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>3,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>C<sub>3,0</sub>



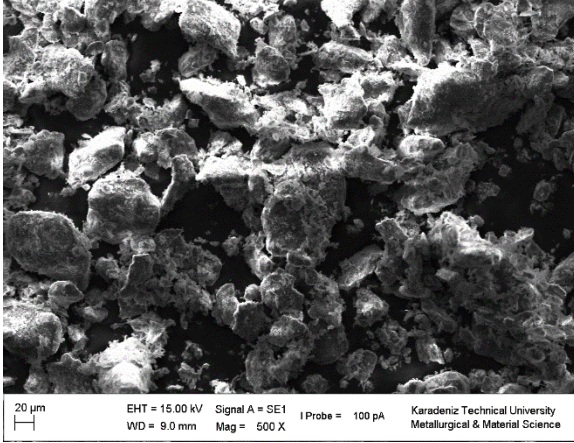
Şekil 3.5' in devamı



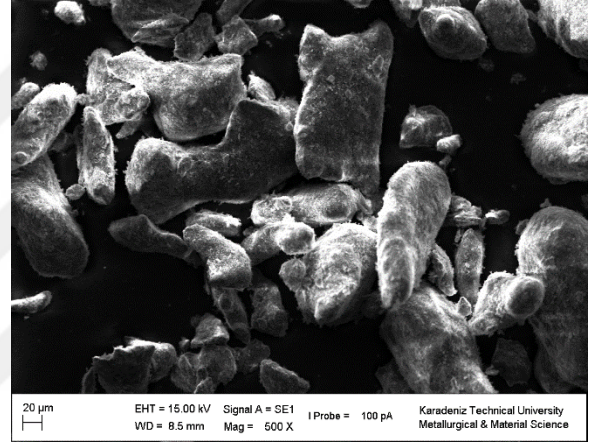
(c)



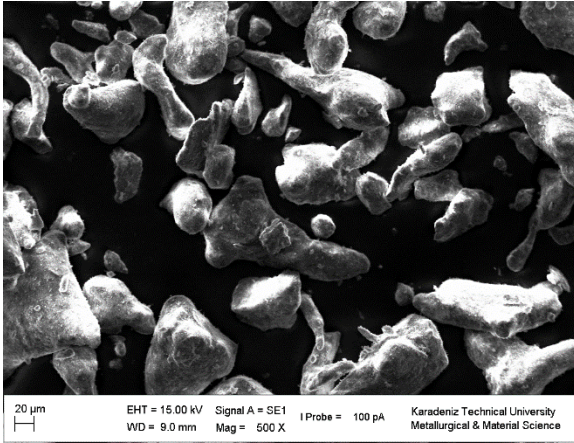
(d)



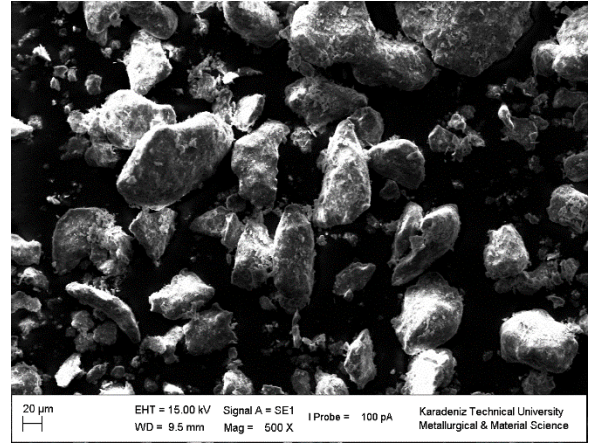
(e)



(f)



(a)

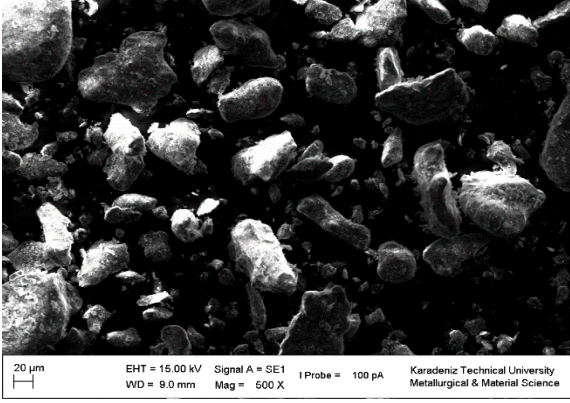


(b)

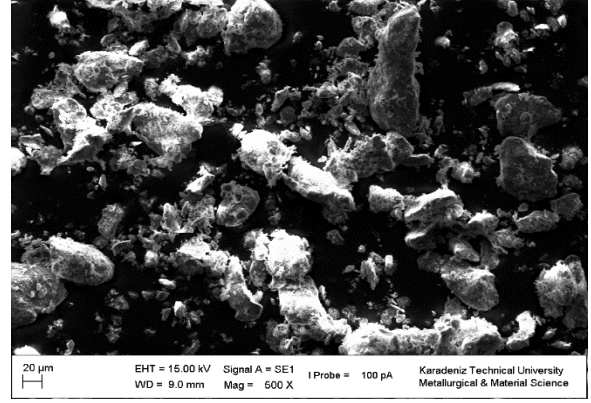
Şekil 3. 6. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası takviye miktarındaki artışa bağlı morfoloji değişimleri (a)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>4,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>



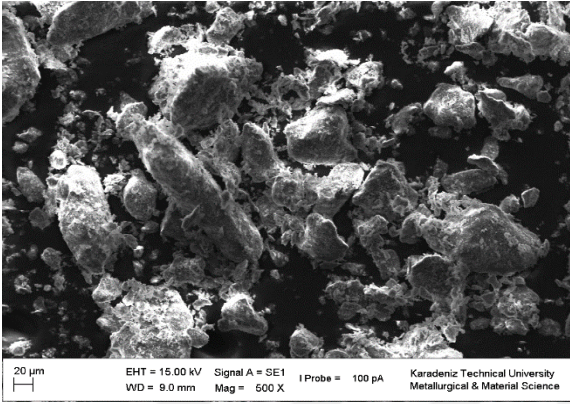
Şekil 3.6' nin devamı



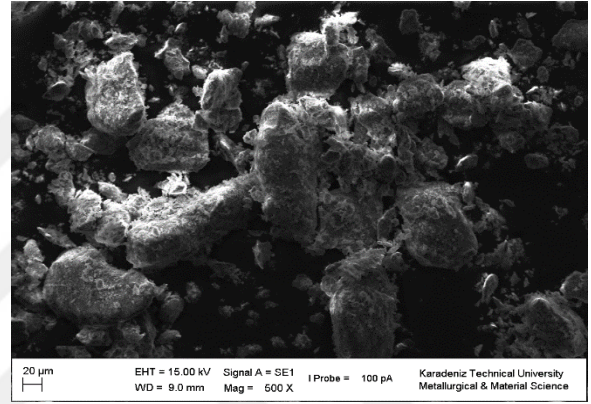
(c)



(d)



(e)

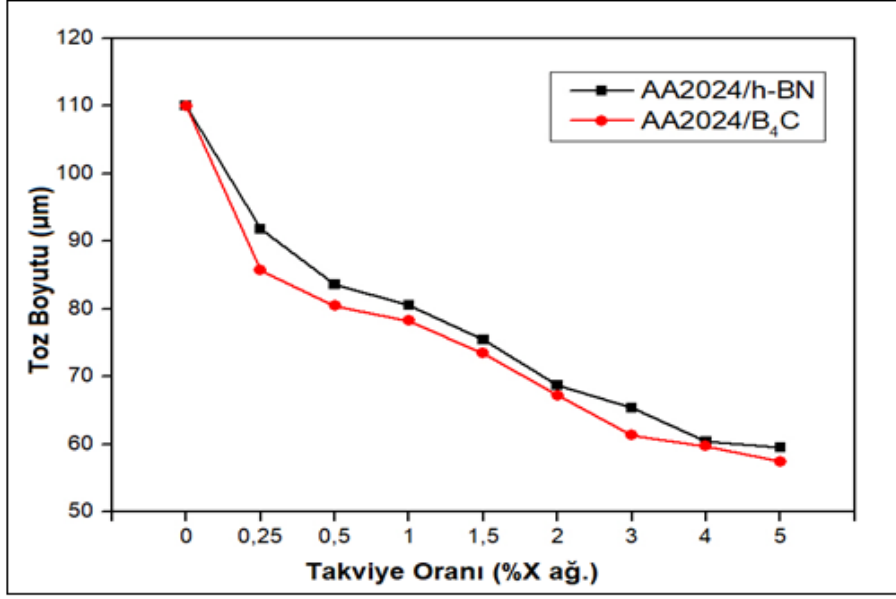


(f)

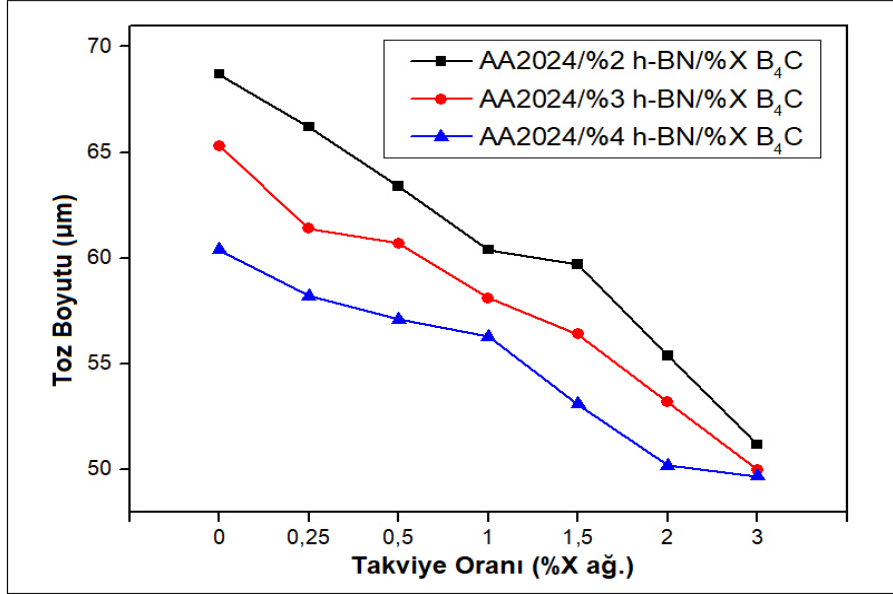
### 3.1.3. Partikül Boyutu

MA' da yüksek enerjili öğütme işlemi yapılan toz parçacıkları bilye:toz:değirmen ve bilye:toz:bilye yüzeyleri arasında oluşan çarpışmalarla birlikte toz partikülleri morfolojik ve boyutsal olarak değişim gösterirler. MA işlemi ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen sonuç öğütmenin ilk aşamalarında toz boyutunun soğuk kaynak sonucunda arttığı, ilerleyen öğütme sürelerinde ise azalıp kararlı hale ulaştığıdır. Ayrıca bu durumun oluşması için tozların başlangıç boyutları ve morfolojileri, işlem kontrol katkısının miktarı ve uygulama şekli gibi etkenler de oldukça önemlidir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8' de görüldüğü gibi mekanik alaşımlama işlemi sonrası matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 alaşımının toz boyutunda takviye elemanlarının da ilave edilmesiyle bir azalma olduğu görülmektedir.





Şekil 3. 7. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası partikül boyutlarının takviye oranı ile değişimi

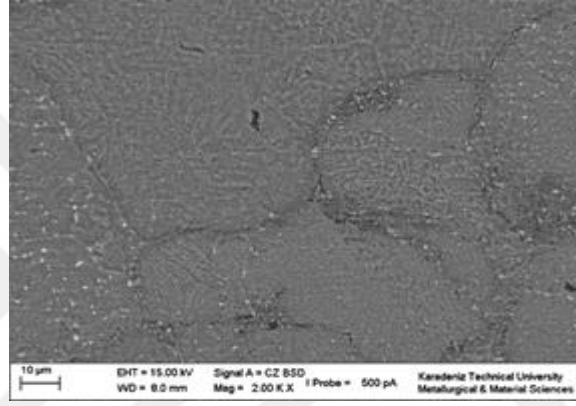


Şekil 3. 8. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit tozlarının 1 saatlik öğütme sonrası partikül boyutlarının takviye oranı ile değişimi

### 3.2. Üretilen Nanokompozitlerin İç Yapı İncelemeleri

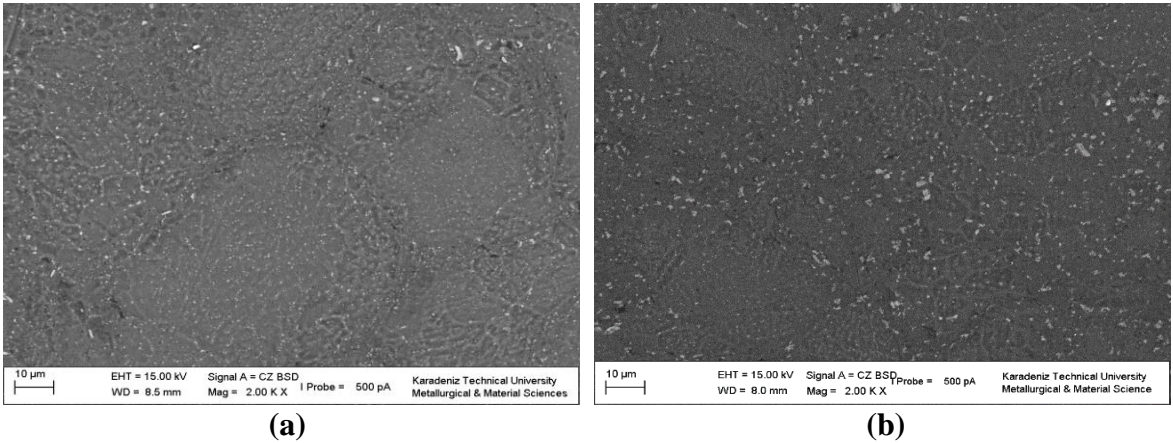
Sabit öğütme süresi ile nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin genel iç yapı incelemeleri ve takviye malzemesinin yapı içerisinde dağılımı SEM kullanılarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir. Preslenen numunelerden alınan SEM görüntülerinde, takviye partiküllerinin tane sınırlarında biriktiği görülmüştür.

#### 3.2.1. AA2024 Alaşımının İç Yapı Görüntüleri



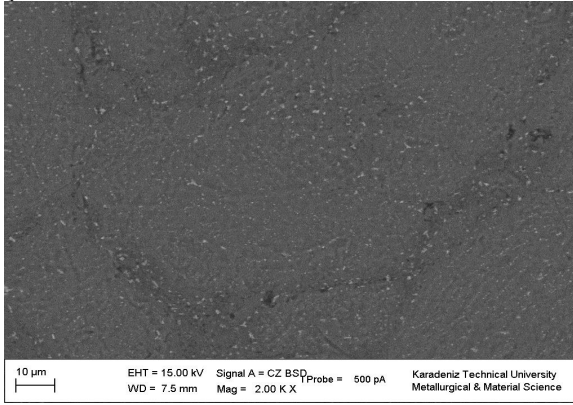
Şekil 3. 9. Sinterlenmiş AA2024 alaşım numunesinin mikro yapısı

#### 3.2.2. AA2024/h-BN Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri

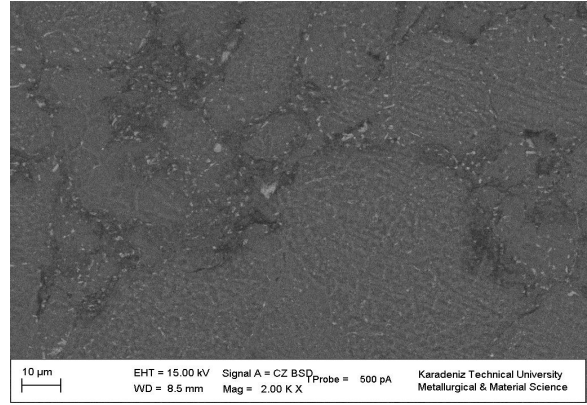


Şekil 3. 10. AA2024/h-BN nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>, (g)AN<sub>4,0</sub>, (h)AN<sub>5,0</sub>

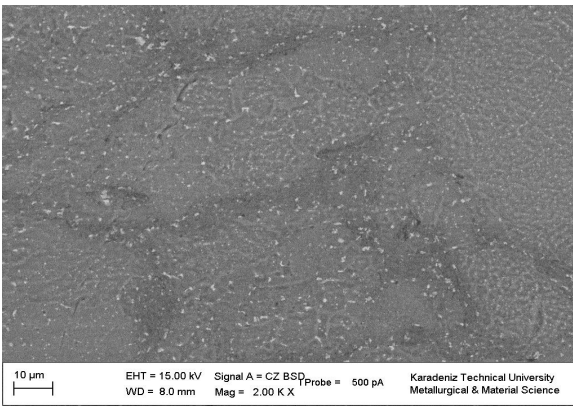
Şekil 3.10' un devamı



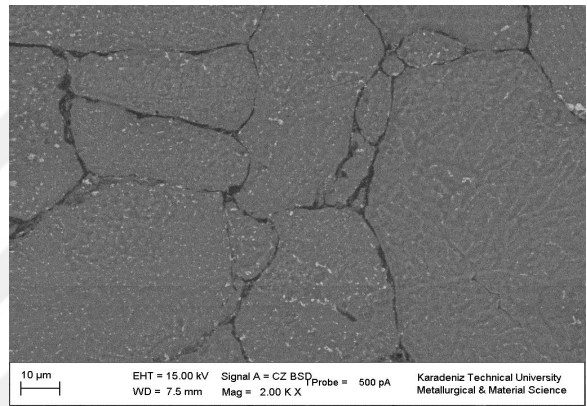
(c)



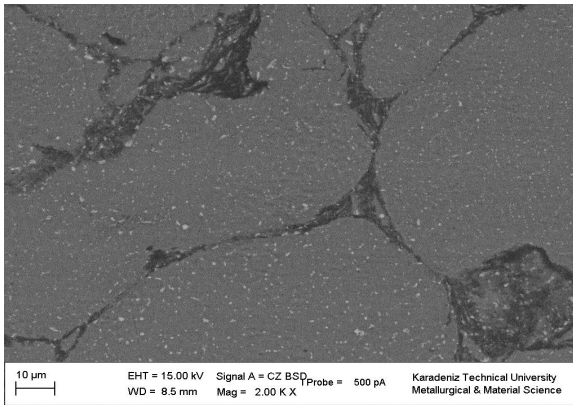
(d)



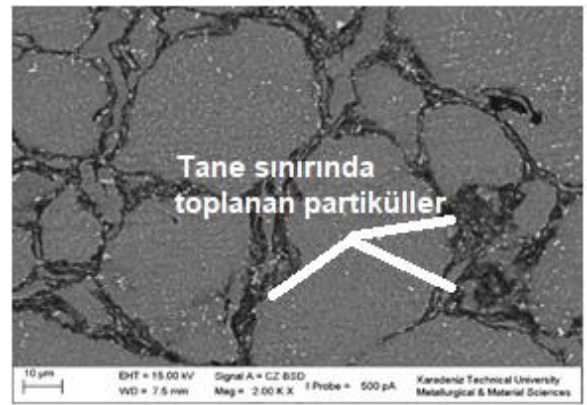
(e)



(f)



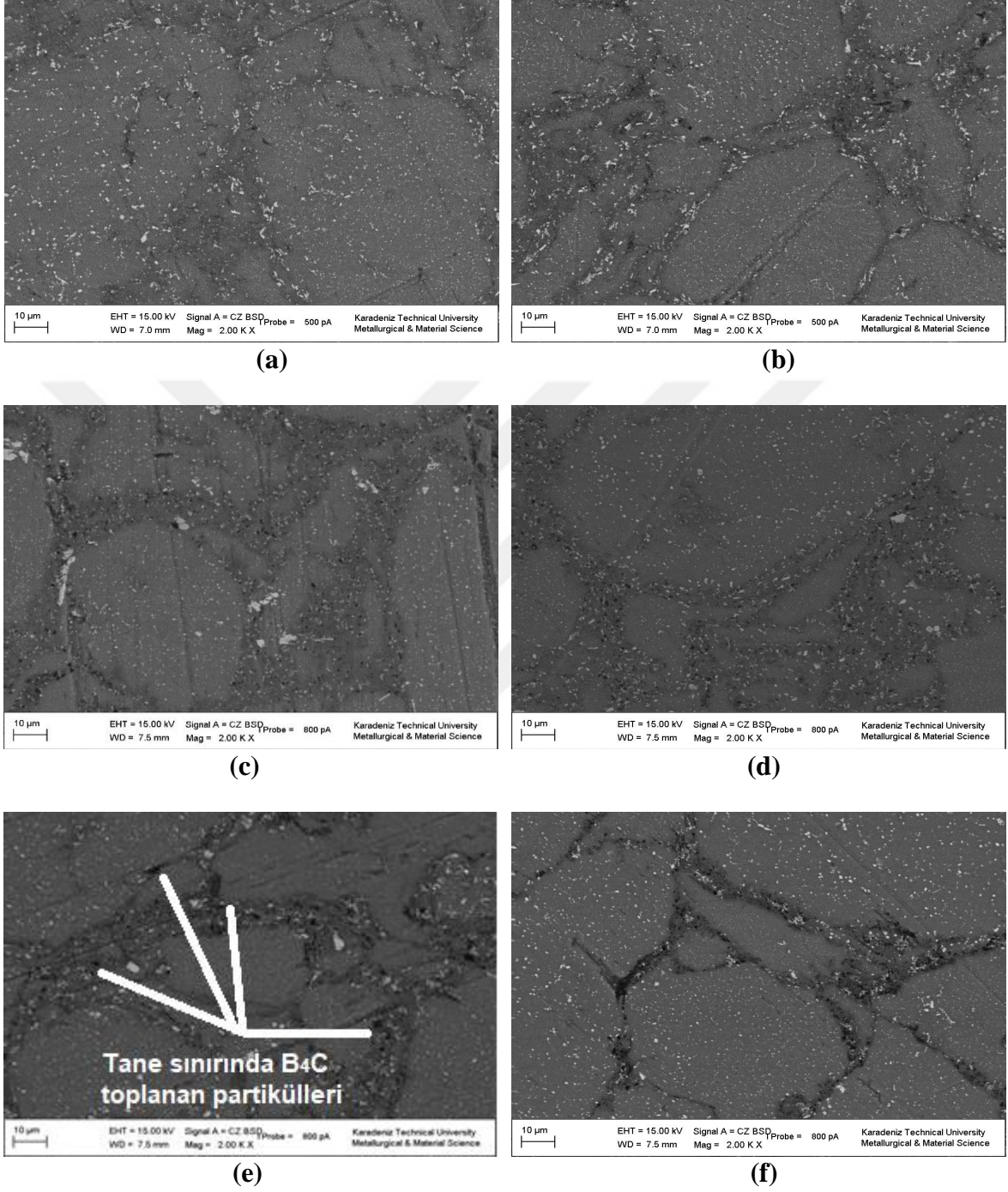
(g)



(h)

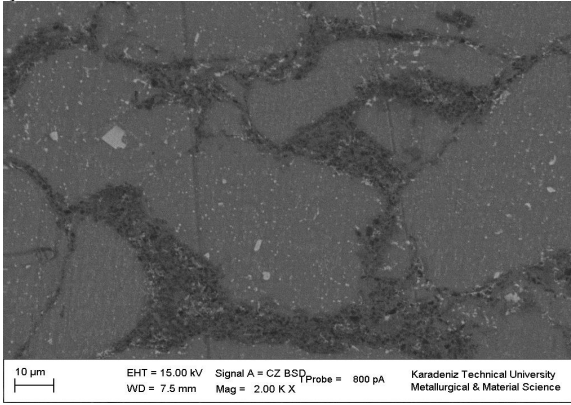


### 3.2.3. AA2024/B<sub>4</sub>C Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri

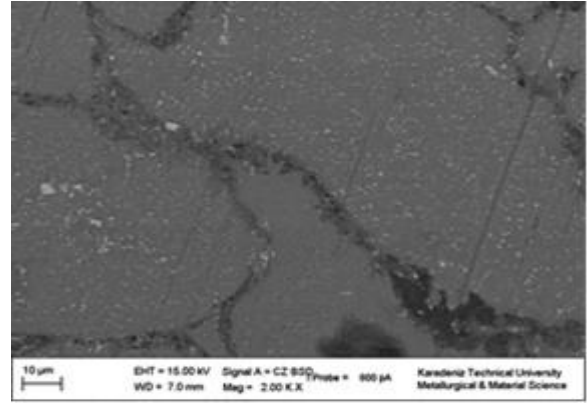


Şekil 3. 11. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a) $AC_{0,25}$ , (b) $AC_{0,5}$ , (c) $AC_{1,0}$ , (d) $AC_{1,5}$ , (e) $AC_{2,0}$ , (f) $AC_{3,0}$ , (g) $AC_{4,0}$ , (h) $AC_{5,0}$

Şekil 3.11' in devamı

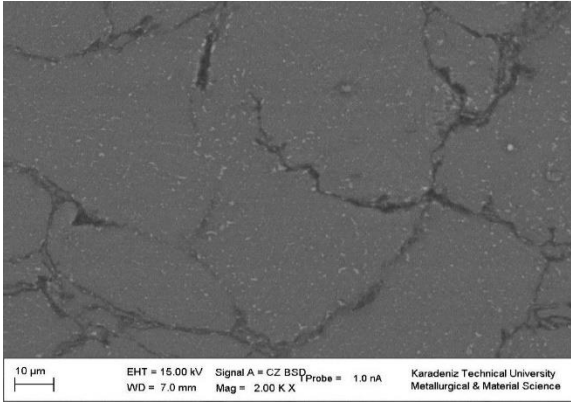


(g)

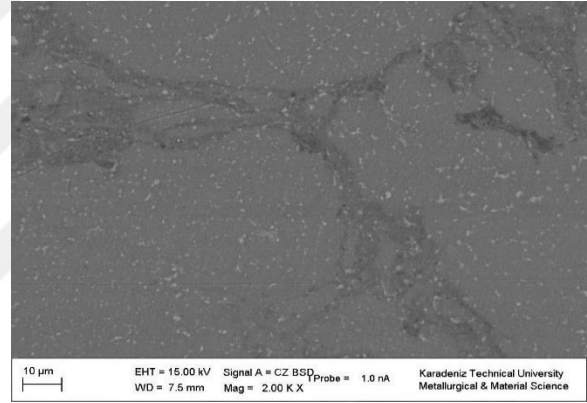


(h)

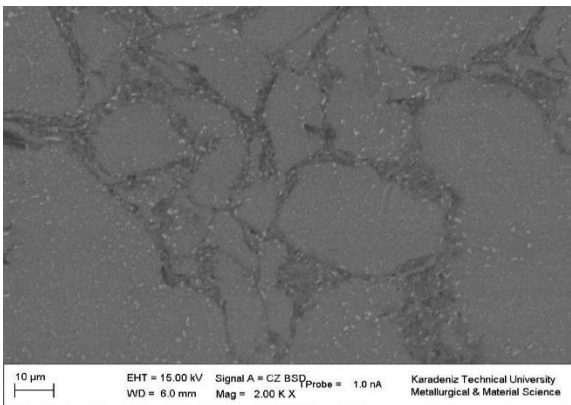
### 3.2.4. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C Hibrit Nanokompozitlerinin İç Yapı Görüntüleri



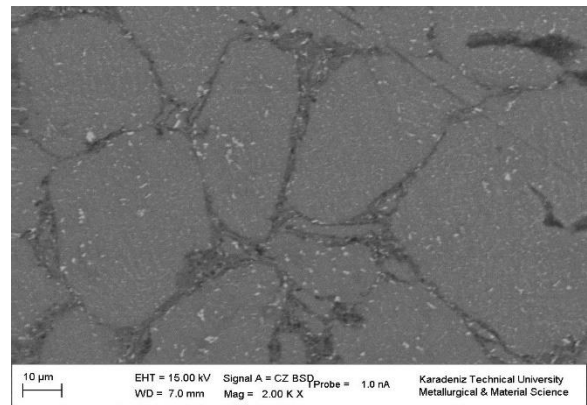
(a)



(b)



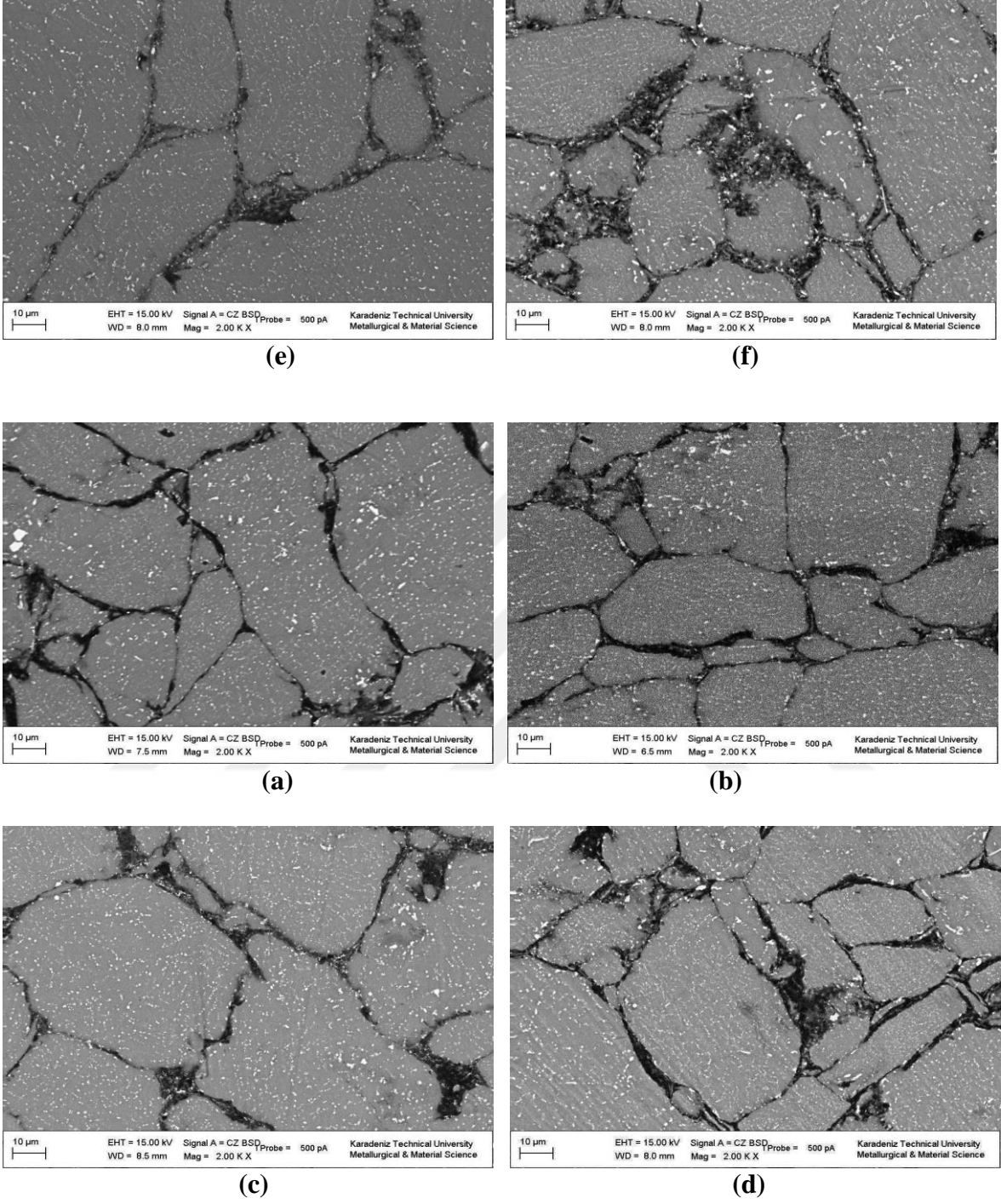
(c)



(d)

Şekil 3. 12. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri  
(a)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>,  
(f)AN<sub>2,0</sub>C<sub>3,0</sub>

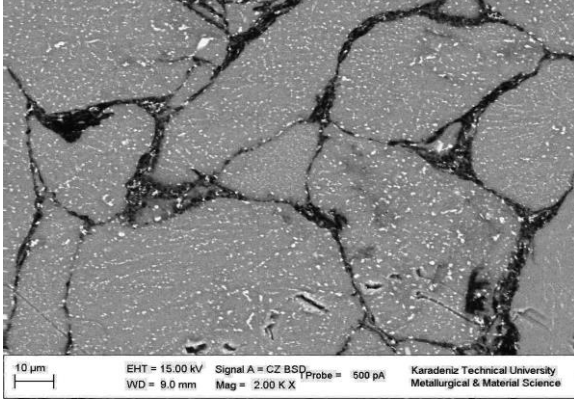
Şekil 3.12' nin devamı



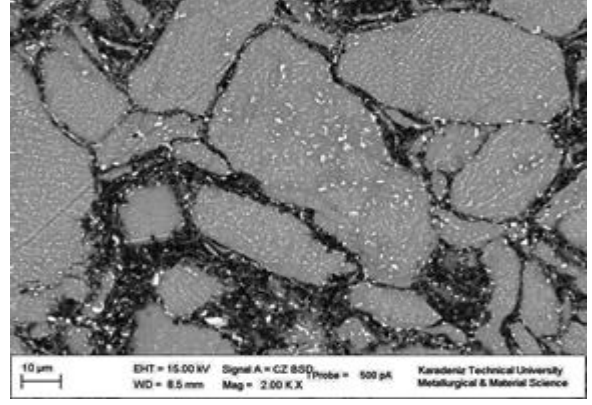
Şekil 3. 13. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>3,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>C<sub>3,0</sub>



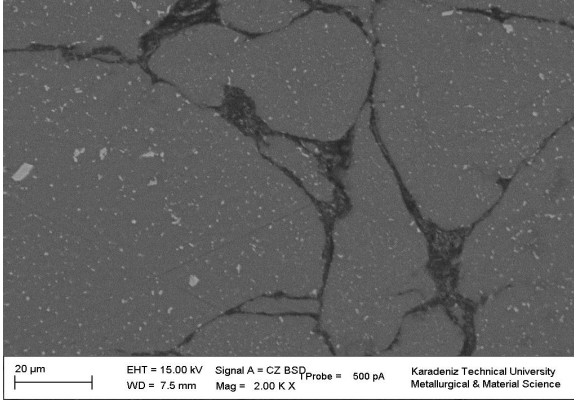
Şekil 3.13' ün devamı



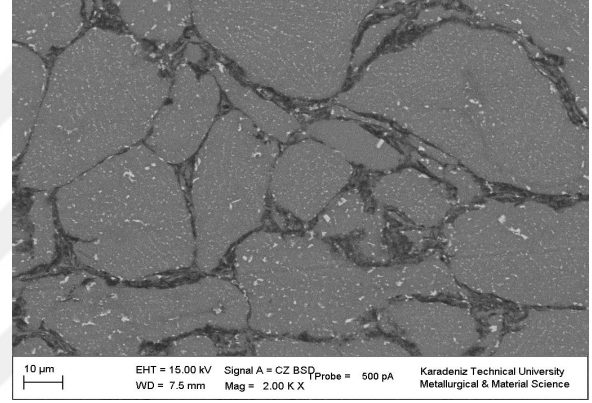
(e)



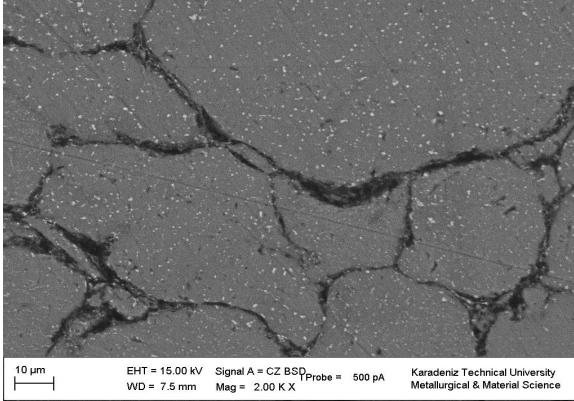
(f)



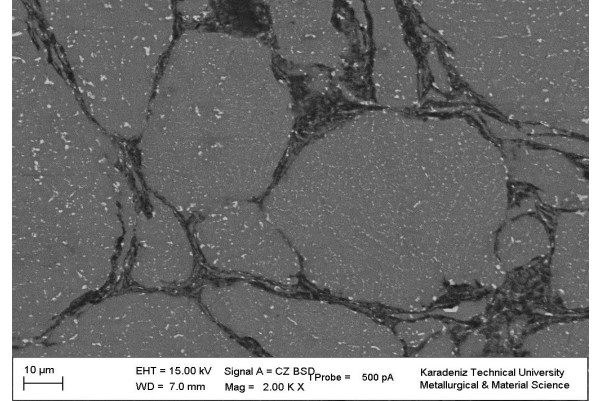
(a)



(b)



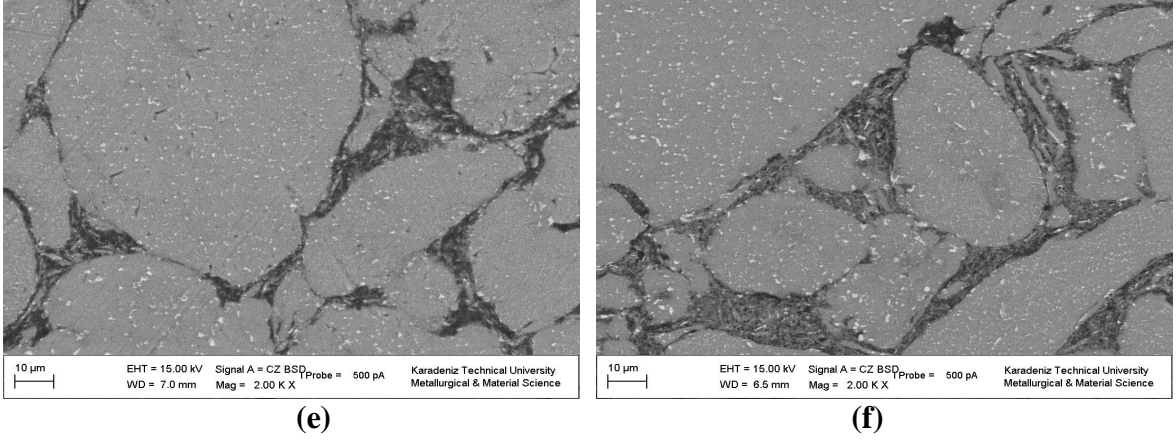
(c)



(d)

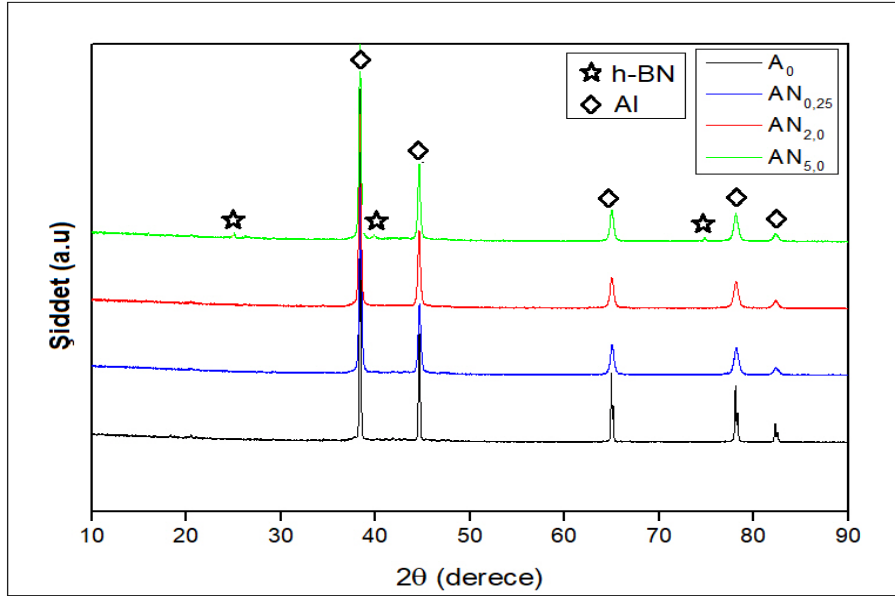
Şekil 3. 14. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>4,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>

Şekil 3.14' ün devamı



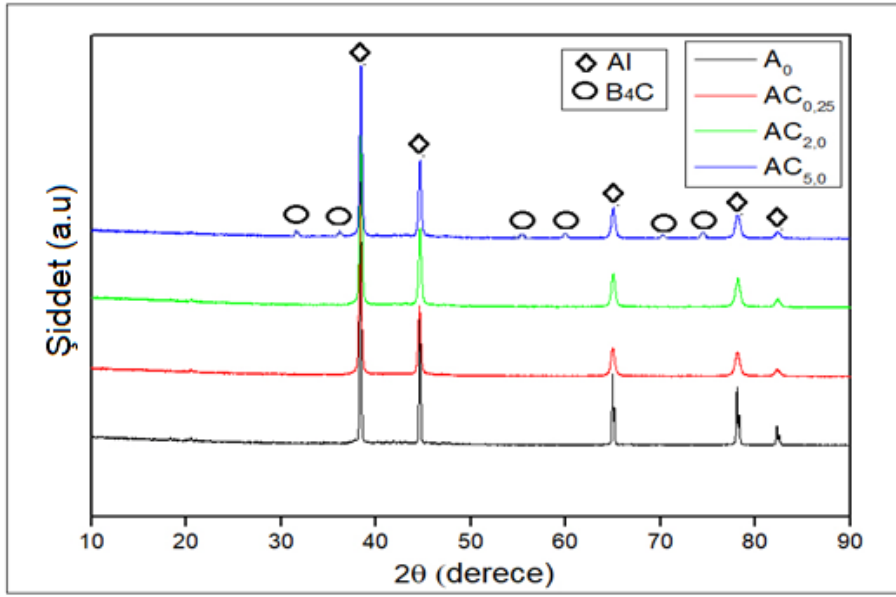
### 3.3. Üretilen Nanokompozitlerin XRD Analizleri

AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerine ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerine ait XRD spektrumunda Al, h-BN ve B<sub>4</sub>C fazlarına rastlanmıştır (Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17). Takviye miktarı arttıkça piklerin daha görünür hale geldiği görülmektedir.

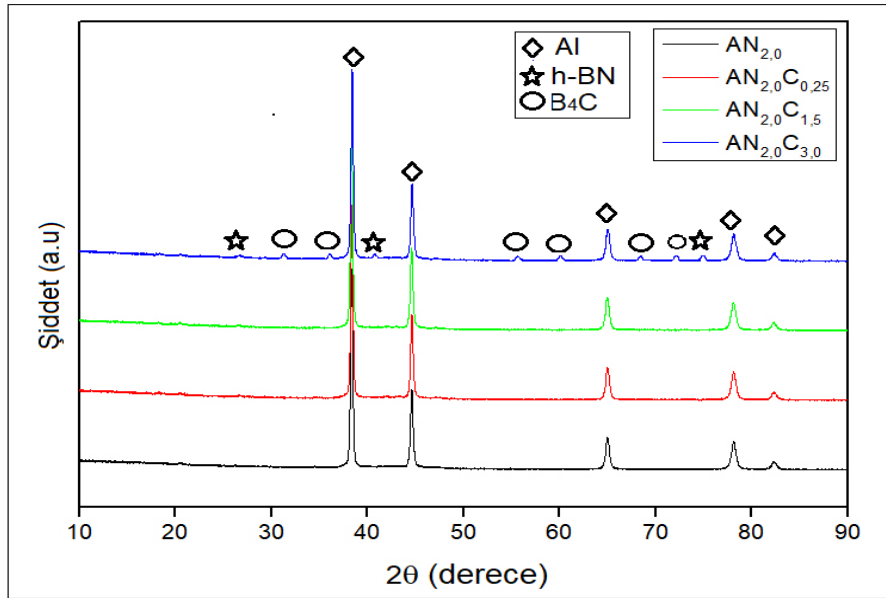


Şekil 3. 15. AA2024/h-BN nanokompozit numunelerinin XRD analizi



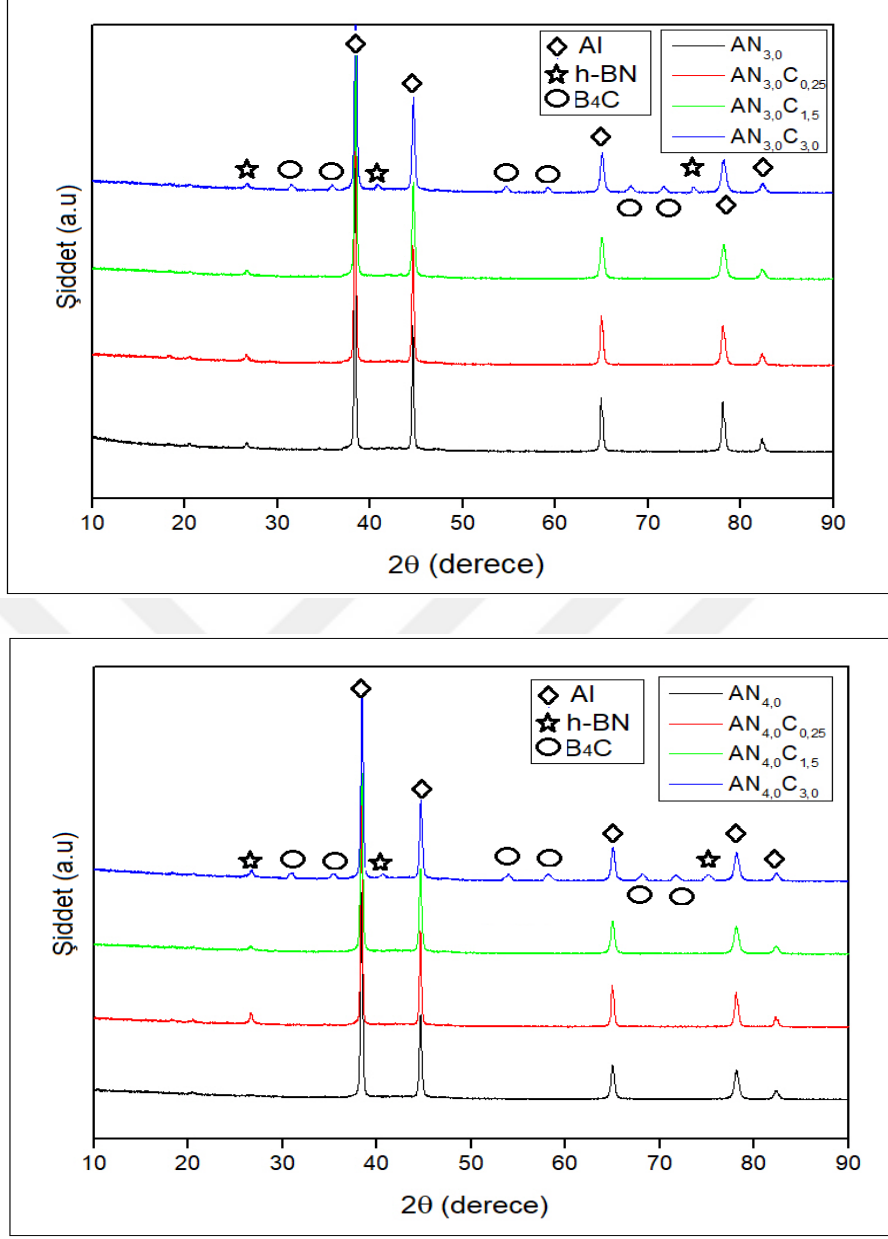


Şekil 3. 16. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit numunelerinin XRD analizi



Şekil 3. 17. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit numunelerinin XRD analizi

Şekil 3.17' nin devamı



### 3.4. Üretilen Kompozitlerin Özellikleri

#### 3.4.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Tozların sıkıştırılmasıyla oluşan presleme mekanizması kısaca üç aşamadan meydana gelmektedir; ilk olarak sıkıştırma ile toz parçacıkları hareket ederek yer değiştirmektedirler. Bu aşamada toz morfolojisi, parçacık boyutu ve parçacıklar arası sürtünme gibi parametreler tozların paketlenmesini önemli ölçüde etkilemektedir. İkinci aşamada tozların sıkıştırılması

ile birlikte elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları etkili hale gelir ve parçacıklar arası mekanik bağ oluşur. Son aşamada ise tozlar kırılır ve plastik deformasyonla gözenekler azalarak toz parçacıkları basınç ve sıcaklık etkisiyle birbirine soğuk kaynak olmaktadır. Takviye miktarının artması sonucunda yapıdaki sert parçacıkların artmasıyla kompozit tozlarının sertliğinin artmış olması, tozun presleme ve paketlenme kabiliyetini azaltan bir etkidir. Bu durum Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’ de görüldüğü gibi bağıl yoğunlukta azalma ve gözeneklilikte artış olarak gözlemlenmektedir. Üretilen numunelerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’ de belirtilmiştir.

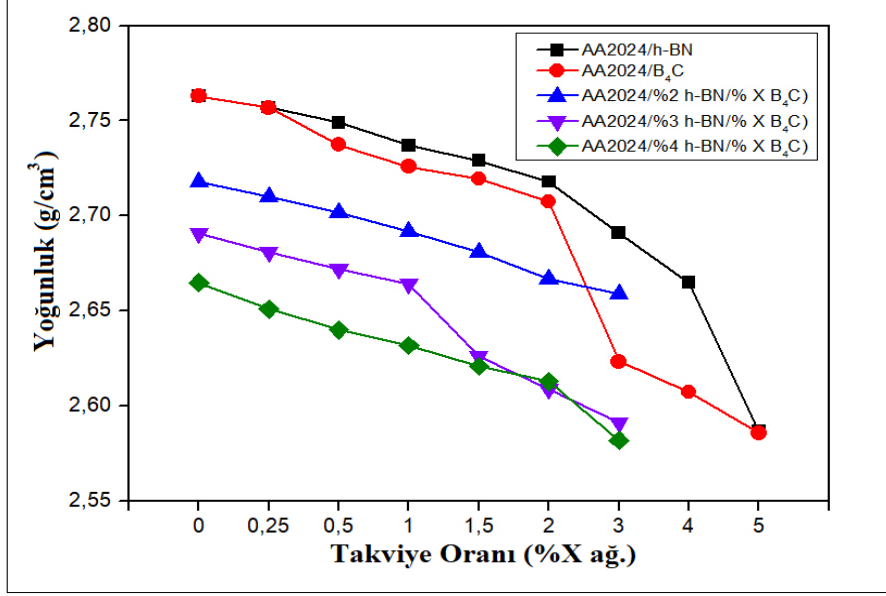
Tablo 3. 1. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk	Teorik Yoğunluk
A <sub>0</sub>	99,39	0,61	2,763	2,7800
AN <sub>0,25</sub>	99,22	0,78	2,757	2,7788
AN <sub>0,5</sub>	98,97	1,03	2,749	2,7776
AN <sub>1,0</sub>	98,62	1,38	2,737	2,7752
AN <sub>1,5</sub>	98,42	1,58	2,729	2,7728
AN <sub>2,0</sub>	98,11	1,89	2,718	2,7704
AN <sub>3,0</sub>	97,30	2,70	2,691	2,7656
AN <sub>4,0</sub>	96,53	3,47	2,665	2,7608
AN <sub>5,0</sub>	93,87	6,13	2,587	2,7560
AC <sub>0,25</sub>	99,19	0,81	2,757	2,7793
AC <sub>0,5</sub>	98,51	1,49	2,737	2,7787
AC <sub>1,0</sub>	98,15	1,85	2,726	2,7774
AC <sub>1,5</sub>	97,96	2,04	2,719	2,7761
AC <sub>2,0</sub>	97,57	2,43	2,708	2,7748
AC <sub>3,0</sub>	94,63	5,37	2,623	2,7722
AC <sub>4,0</sub>	94,14	5,86	2,607	2,7696
AC <sub>5,0</sub>	93,46	6,54	2,586	2,7670

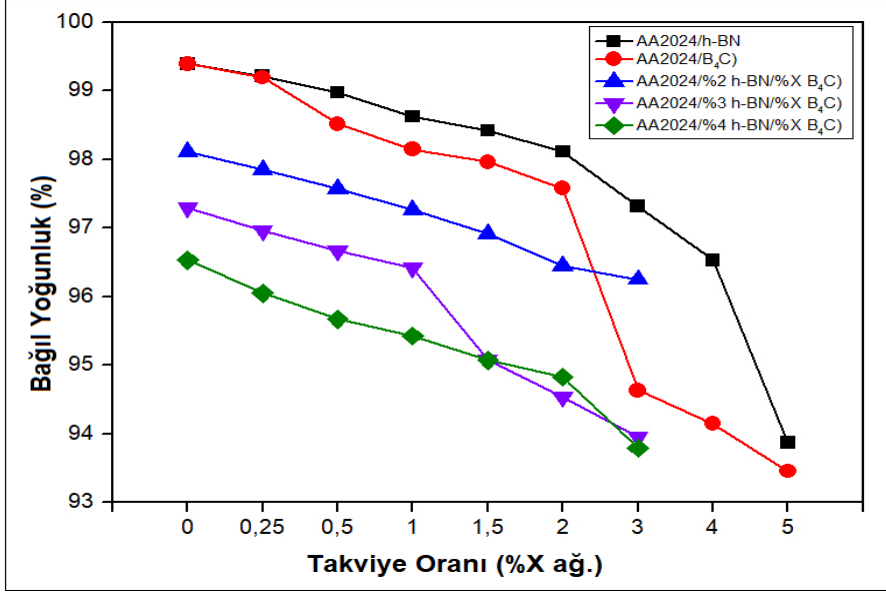
Tablo 3. 2. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk	Teorik Yoğunluk
AN <sub>2,0</sub>	98,11	1,89	2,718	2,7704
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>	97,84	2,16	2,710	2,7698
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>	97,58	2,42	2,702	2,7691
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>	97,26	2,74	2,692	2,7678
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>	96,91	3,09	2,681	2,7665
AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>	96,45	3,55	2,667	2,7652
AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	96,25	3,75	2,659	2,7626
Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk	Teorik Yoğunluk
AN <sub>3,0</sub>	97,30	2,70	2,691	2,7656
AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	96,99	3,01	2,681	2,7641
AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	96,69	3,31	2,672	2,7634
AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	96,45	3,55	2,664	2,7621
AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	95,12	4,88	2,626	2,7608
AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	94,55	5,45	2,609	2,7595
AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	93,98	6,02	2,591	2,7569
Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk	Teorik Yoğunluk
AN <sub>4,0</sub>	96,53	3,47	2,665	2,7608
AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	96,05	3,95	2,651	2,7601
AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	95,67	4,33	2,640	2,7595
AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	95,42	4,58	2,632	2,7582
AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	95,07	4,93	2,621	2,7569
AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	94,83	5,17	2,613	2,7556
AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	93,79	6,21	2,582	2,7530

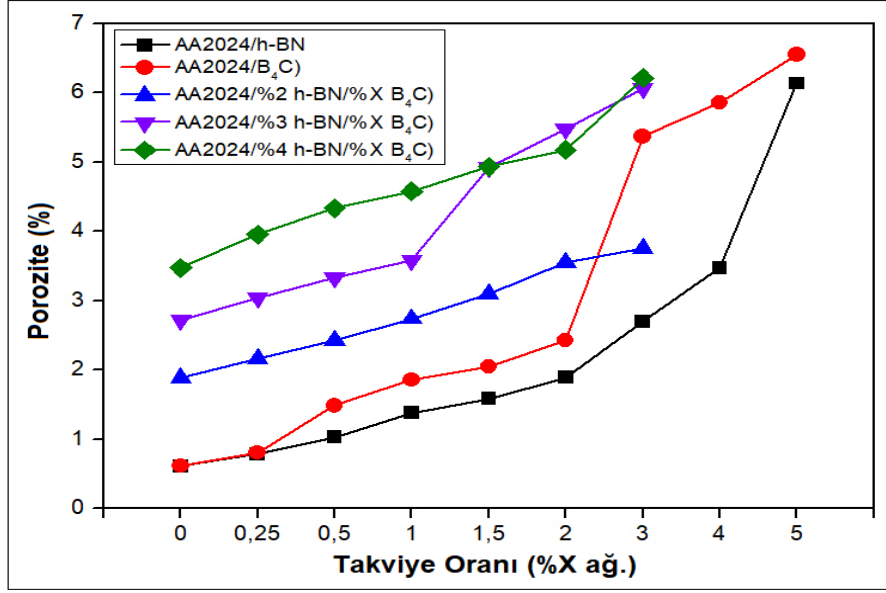
Artan takviye oranıyla birlikte bağıl yoğunluk bütün kompozitlerde azalma göstermiştir. Bunun temel nedeni yapıya katılan takviye malzemesinin presleme esnasında gösterdiği dirençtir. Yani presleme esnasında, takviye partikülleri direnç oluşturarak paketlenmeyi olumsuz etkilemektedir. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde %3 takviye oranına kadar daha yüksek bağıl yoğunluk değerleri elde edilirken, AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarında bu değerler daha da azalmıştır. Ancak %3 takviye oranından sonra AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeni yapıya katılan takviye malzemelerinin topaklanması ve yapıda porozite oluşturmasıdır.



Şekil 3. 18. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi



Şekil 3. 19. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının bağıl yoğunluklarının takviye oranı ile değişimi



Şekil 3. 20. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin gözeneklilik oranının takviye oranı ile değişimi

### 3.4.2. Çekme Mukavemeti Testi

Sinterlenmiş nanokompozit ve hibrit nanokompozitlere uygulanan çekme mukavemeti test sonuçları Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’ de verilmiştir.

AA2024/h-BN nanokompozitlerde artan takviye oranı ile birlikte sürekli bir azalma meydana gelmiştir. Bunun nedeni h-BN’ ün karakteristik yapısından kaynaklanmaktadır. h-BN yağlayıcı özelliği ve tabakalı yapısından dolayı presleme esnasında ve çekme testi esnasında tabakalanarak ayrılmaktadır. Bu da çekme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. AA2024/h-BN nanokompozitlerinde en yüksek çekme mukavemeti AN<sub>0,25</sub> numunesinde görülmüştür ve 227,85 MPa’ dır. Daha sonra artan takviye ile bu değer AN<sub>5,0</sub> numunesinde 134 MPa’ a düşmüştür (Şekil 3.21).

AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde ise literatüre uygun şekilde artan takviye oranı ile birlikte mukavemette artış meydana gelmiştir. Çekme mukavemeti %2 takviye oranına sahip AC<sub>2,0</sub> numunesinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Ancak %2 takviye oranından sonra tane sınırlarında topaklanma bölgelerinin artması, matris ve takviye partikülleri arasındaki bağın zayıflaması mukavemet değerinin azalmasına neden olmuştur. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinde en yüksek çekme mukavemeti değeri 384,20 MPa olup AC<sub>2,0</sub> numunesine aittir (Şekil 3.21).

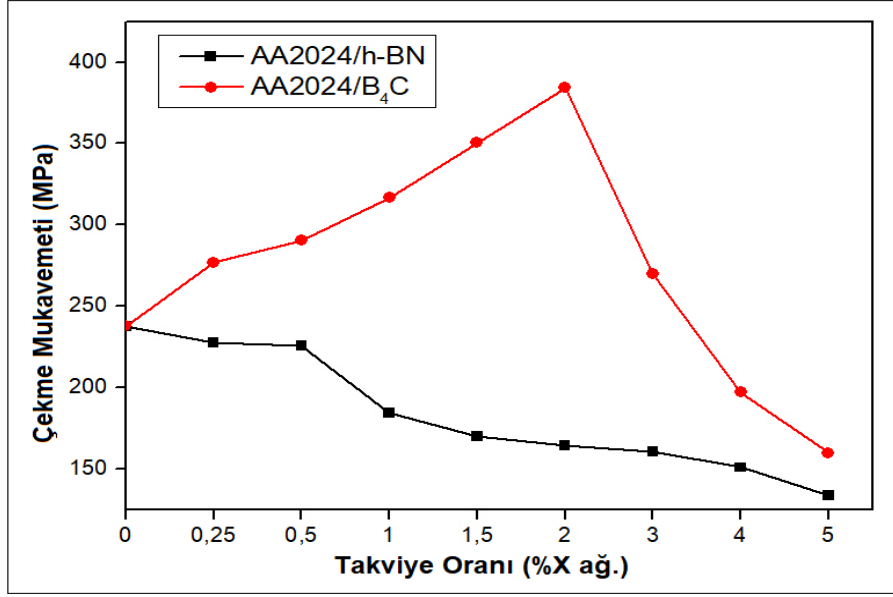
AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitler incelendiğinde AA2024/h-BN nanokompozitlere paralel olarak artan h-BN ile çekme mukavemeti azalmış, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerdeki gibi artan B<sub>4</sub>C takviyesi ile de çekme mukavemeti artış göstermiştir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitleri arasında en iyi çekme değeri ise 236,70 ile AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>' dir (Şekil 3.22).

Tablo 3. 3. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit gruplarının çekme mukavemeti değerleri

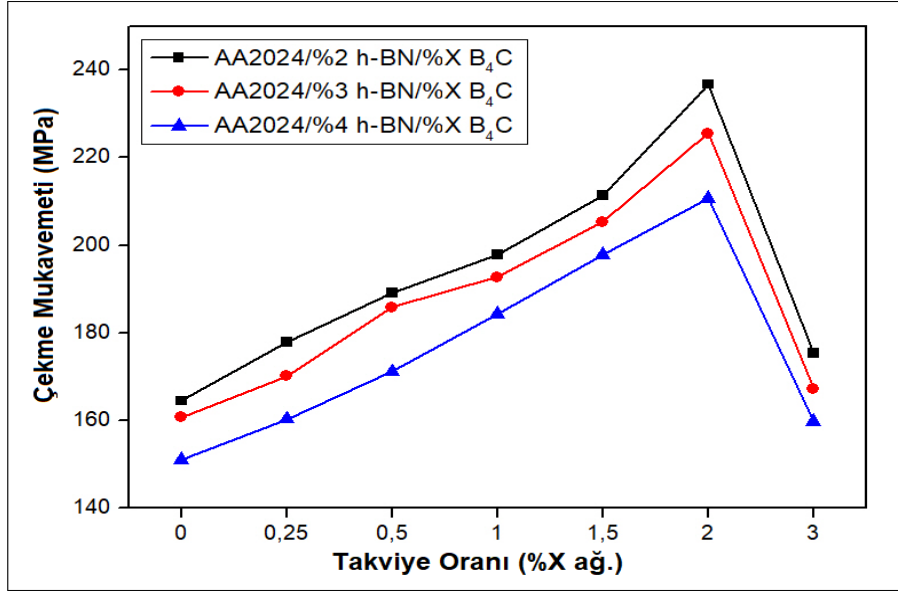
Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)
A <sub>0</sub>	237,70	A <sub>0</sub>	237,70
AN <sub>0,25</sub>	227,85	AC <sub>0,25</sub>	277,10
AN <sub>0,5</sub>	225,95	AC <sub>0,5</sub>	290,30
AN <sub>1,0</sub>	184,45	AC <sub>1,0</sub>	316,70
AN <sub>1,5</sub>	170,00	AC <sub>1,5</sub>	350,40
AN <sub>2,0</sub>	164,48	AC <sub>2,0</sub>	384,20
AN <sub>3,0</sub>	160,72	AC <sub>3,0</sub>	270,10
AN <sub>4,0</sub>	151,05	AC <sub>4,0</sub>	197,30
AN <sub>5,0</sub>	134,00	AC <sub>5,0</sub>	159,80

Tablo 3. 4. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının çekme mukavemeti değerleri

Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)
AN <sub>2,0</sub>	164,48	AN <sub>3,0</sub>	160,72	AN <sub>4,0</sub>	151,05
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>	177,80	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	170,10	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	160,30
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>	189,10	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	185,80	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	171,20
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>	197,9	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	192,70	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	184,30
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>	211,30	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	205,30	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	197,90
AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>	236,70	AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	225,50	AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	210,70
AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	175,30	AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	167,30	AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	159,80



Şekil 3. 21. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin çekme mukavemetinin takviye oranı ile değişimi



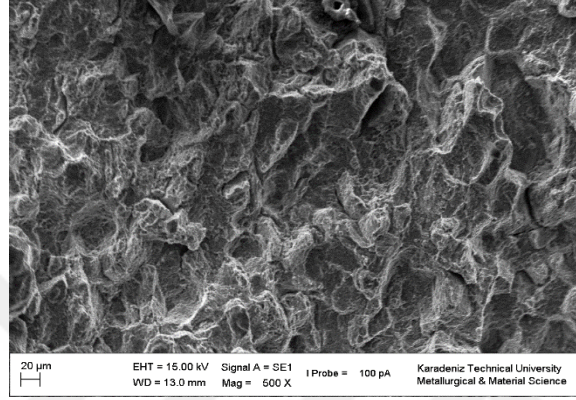
Şekil 3. 22. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının çekme mukavemetinin takviye oranı ile değişimi

Kırılma davranışının belirlenirken; kırılma yüzeyinin görünüşü ve pürüzlülüğünün incelenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kırılma yüzeyinde oluşan görüntüler kırılma şeklinin (sünek-gevrek, taneler arası-tane içi) belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Ayrıca kırılma yüzeylerinde oluşan gözenekler kırılma davranışı ile ilgili önemli bilgiler verir.



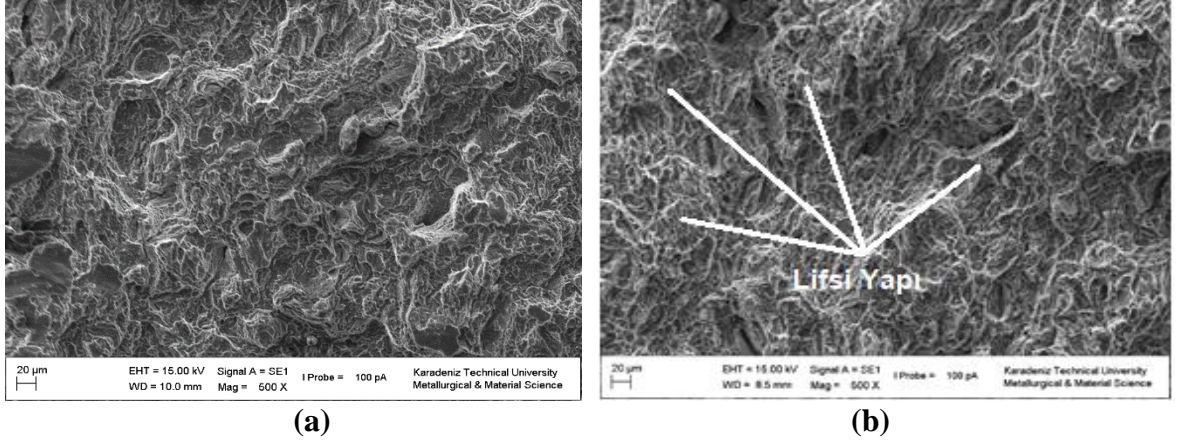
Numunelerin kırılma davranışının belirlenebilmesi için çekme testi sonrası kopmanın olduğu yüzeyler SEM ile incelenmiştir ve elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 3.23 Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’ de verilmiştir.

### 3.4.2.1. AA2024 Numunesinin Kırılma Yüzeyi



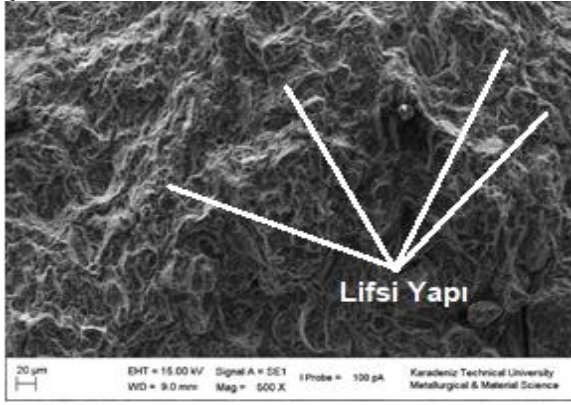
Şekil 3. 23. Saf AA2024 numunesinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyi

### 3.4.2.2. AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri

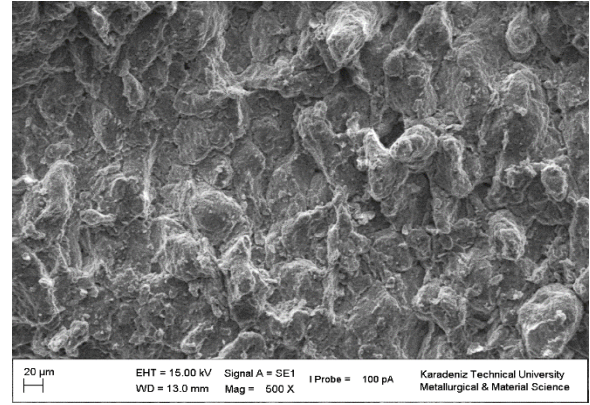


Şekil 3. 24. AA2024/h-BN nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)AN<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>, (g)AN<sub>4,0</sub>, (h)AN<sub>5,0</sub>

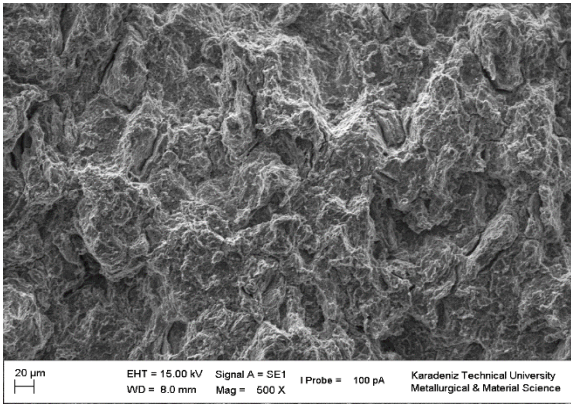
Şekil 3.24' ün devamı



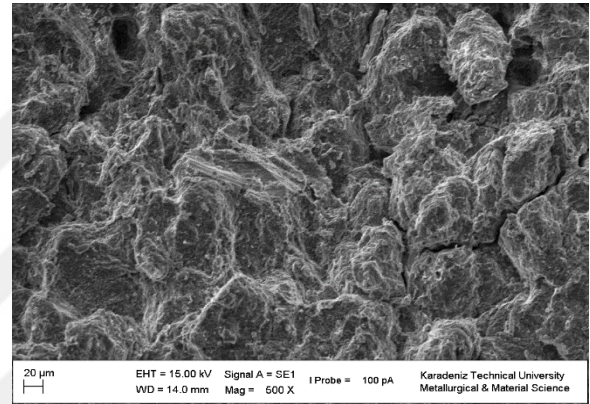
(c)



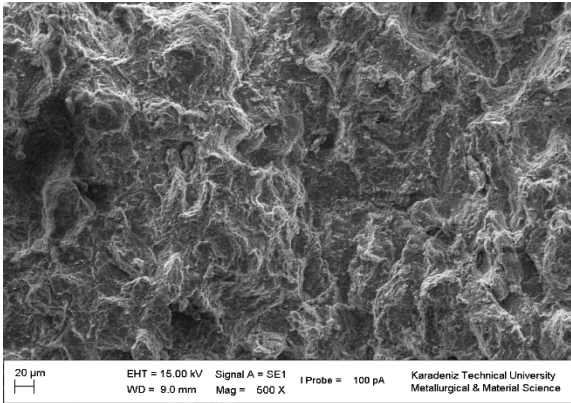
(d)



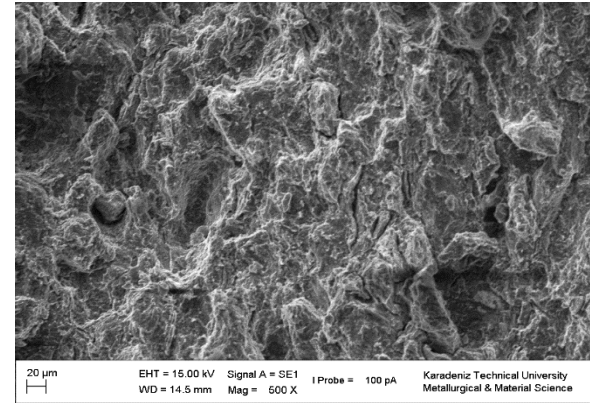
(e)



(f)



(g)

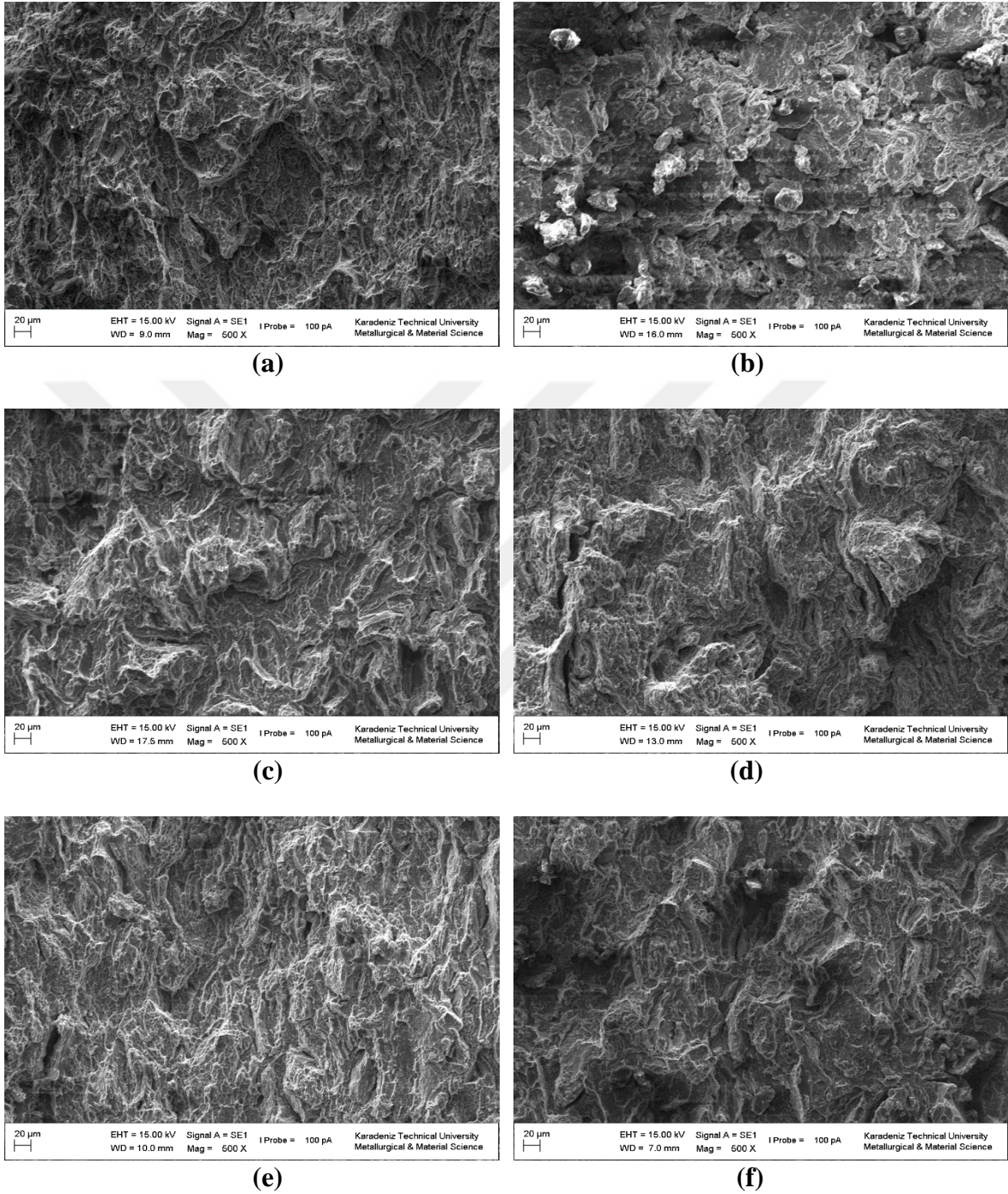


(h)

AA2024/h-BN nanokompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde bütün yüzeylerin lifsi ve ağsı yapıda olduğu görülmektedir. Zaten çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde değerlerde önemli bir düşüş olmadığı görülmüştür.



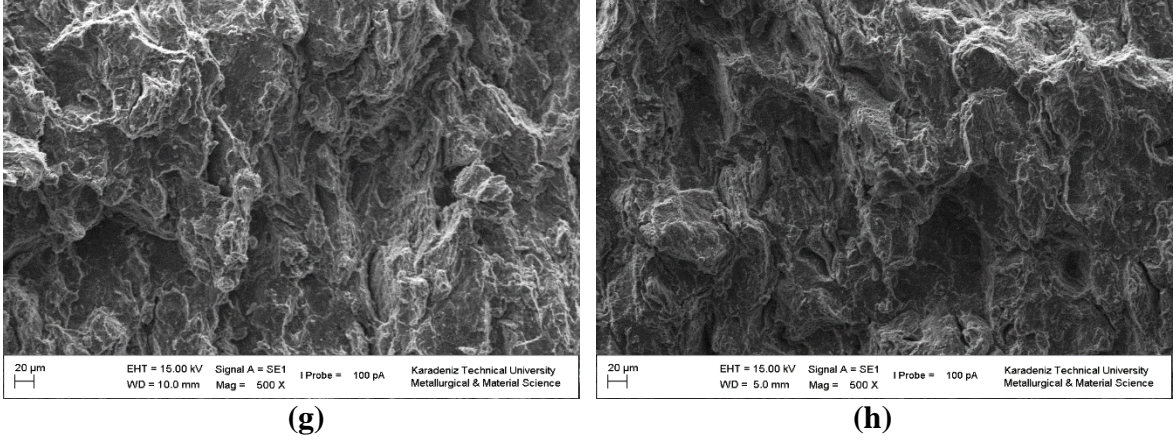
### 3.4.2.3. AA2024/B<sub>4</sub>C Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri



Şekil 3. 25. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a) $AC_{0,25}$ , (b) $AC_{0,5}$ , (c) $AC_{1,0}$ , (d) $AC_{1,5}$ , (e) $AC_{2,0}$ , (f) $AC_{3,0}$ , (g) $AC_{4,0}$ , (h) $AC_{5,0}$

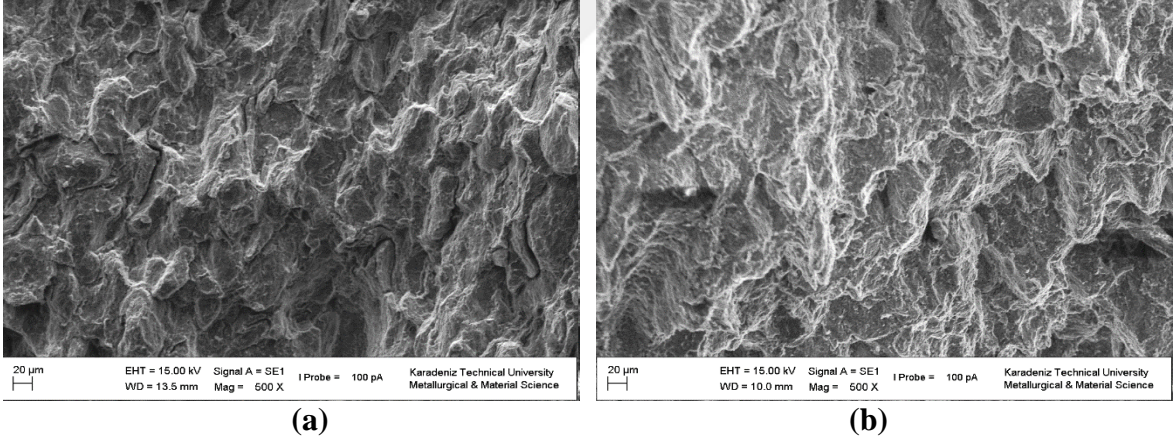


Şekil 3.25' in devamı



AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde artan takviye ile %2 takviye oranına kadar çekme mukavemetinin arttığı belirtilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde lifsi yapıların %2 takviyeye kadar mevcut olduğu ve %2' den sonra azaldığı görülmüştür.

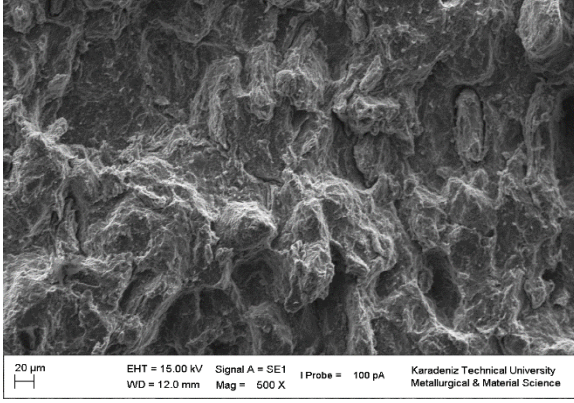
#### 3.4.2.4. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C Hibrit Nanokompozitlerin Kırılma Yüzeyleri



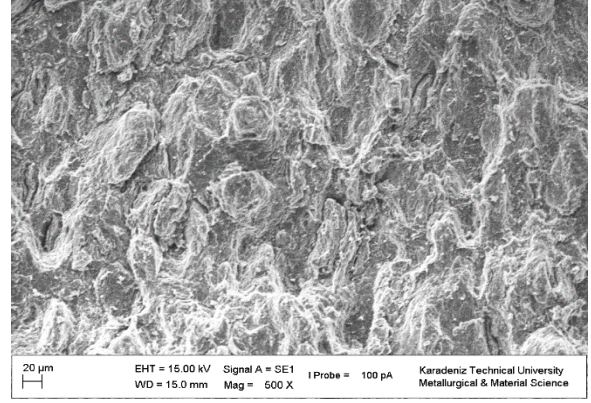
Şekil 3. 26. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri (a)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>2,0</sub>C<sub>3,0</sub>



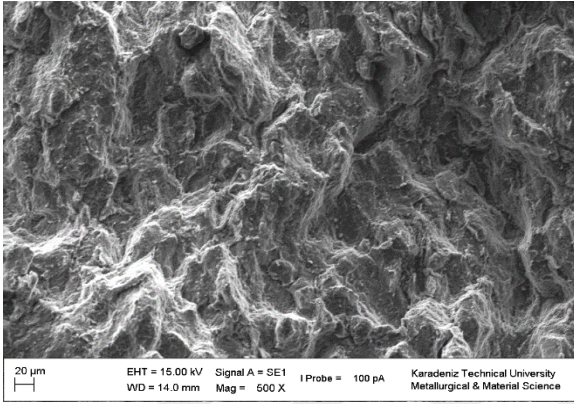
Şekil 3.26' nin devamı



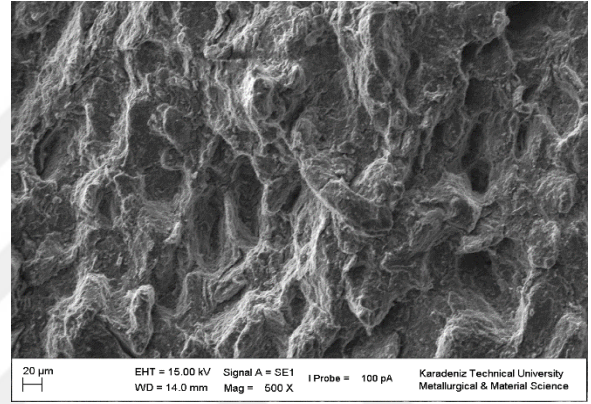
(c)



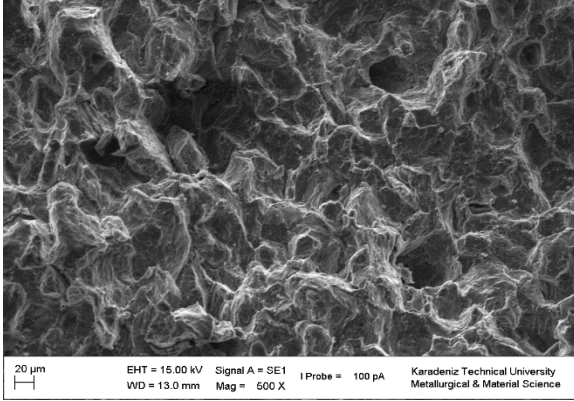
(d)



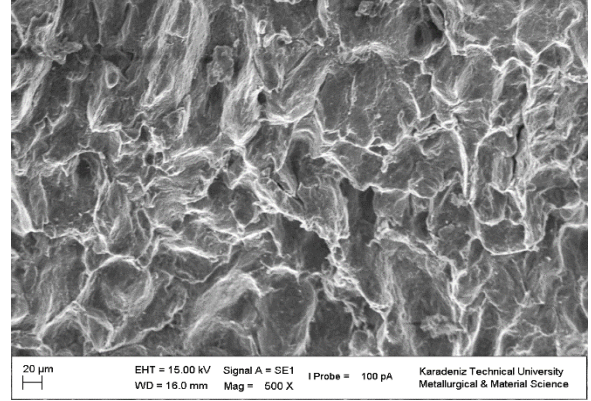
(e)



(f)



(a)

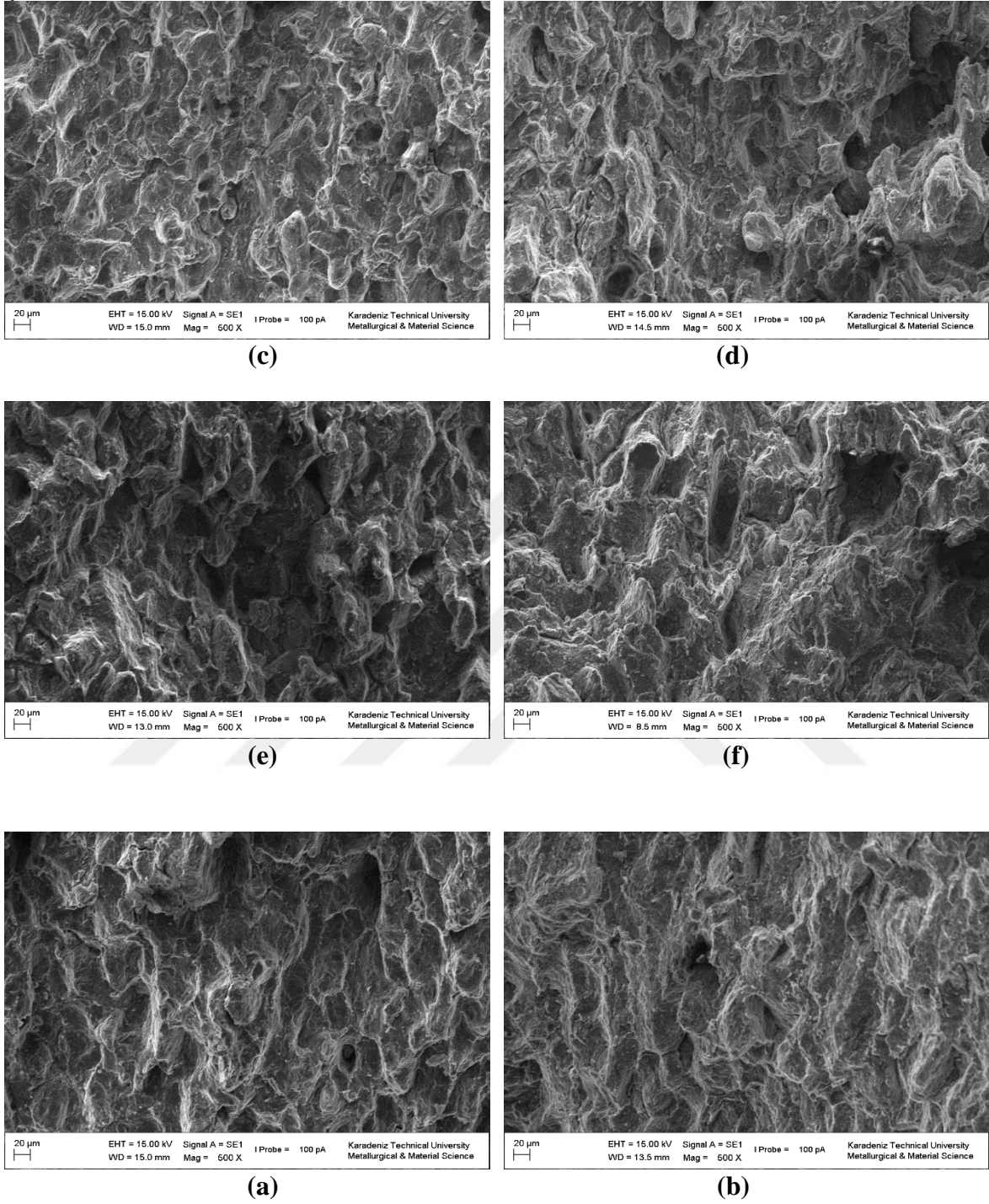


(b)

Şekil 3. 27. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>3,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>C<sub>3,0</sub>



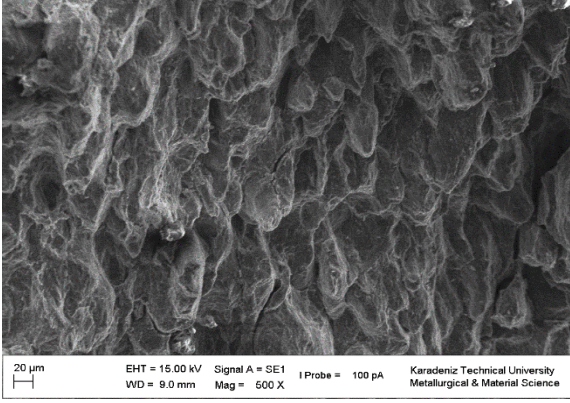
Şekil 3.27' nin devamı



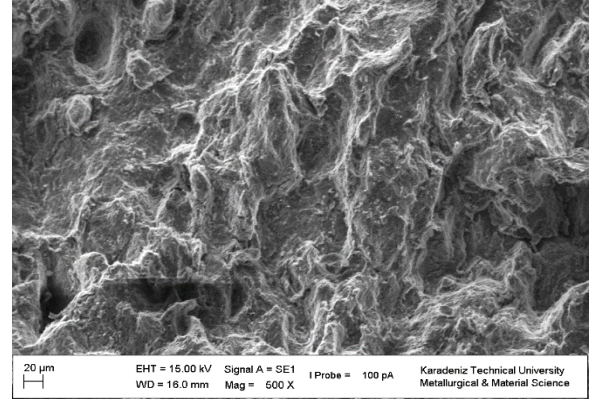
Şekil 3. 28. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit numunelerinin çekme mukavemeti deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>4,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>



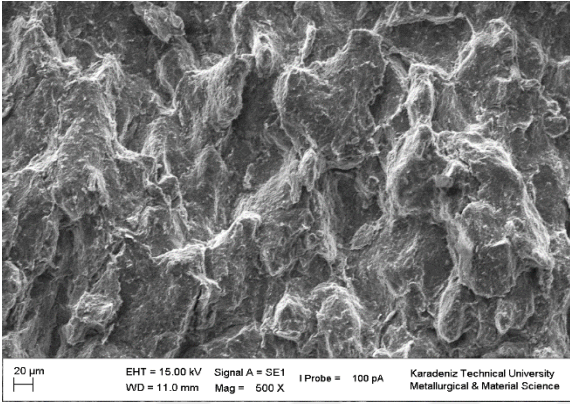
Şekil 3.28' in devamı



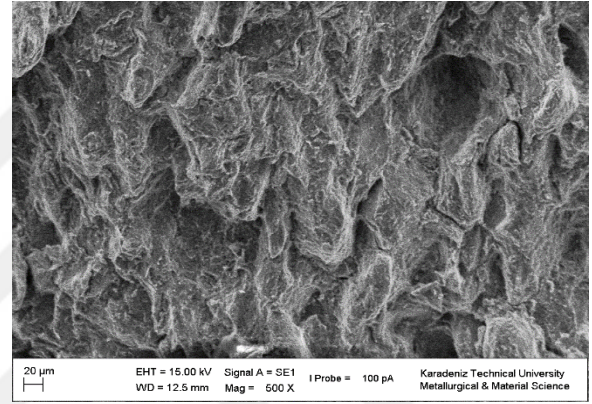
(c)



(d)



(e)



(f)

### 3.4.3. Sertlik Değerleri

Üretilen numunelerin sertliğini ölçmek için Brinell sertlik testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre AA2024/h-BN nanokompozitlerinin artan takviye miktarı ile sertlik değerlerinde çekme mukavemetiyle aynı eğilimde azalma olduğu görülmüştür. Bunun nedeni h-BN' ün karakteristik olarak tabakalı bir yapıya sahip olması ve yağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinde ise takviye malzemesi B<sub>4</sub>C' ün matris malzemesinden daha sert olduğu için ise artan takviye miktarı ile sertlik değerlerinde sürekli artış görülmüştür (Tablo 3.5). AA2024 / B<sub>4</sub>C nanokompozit gruplarında diğer gruplara göre daha iyi BSD değerleri görülmektedir ve en yüksek BSD değeri AC<sub>5,0</sub> numunesine aittir. Presleme esnasında bu numunenin yüksek takviye miktarına sahip olması nedeniyle AA2024 tozları daha fazla plastik deformasyona uğradığı için takviye ile matris arasındaki gerilmeler artmıştır ve bu da bir dislokasyon mekanizması olan pekleşme sertleşmesi olarak da bilinen mekanizma ile tanımlanabilir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinde

sertlik değerleri h-BN takviye oranının artmasıyla azalırken, artan B<sub>4</sub>C takviye oranı ile sürekli artış göstermiştir.

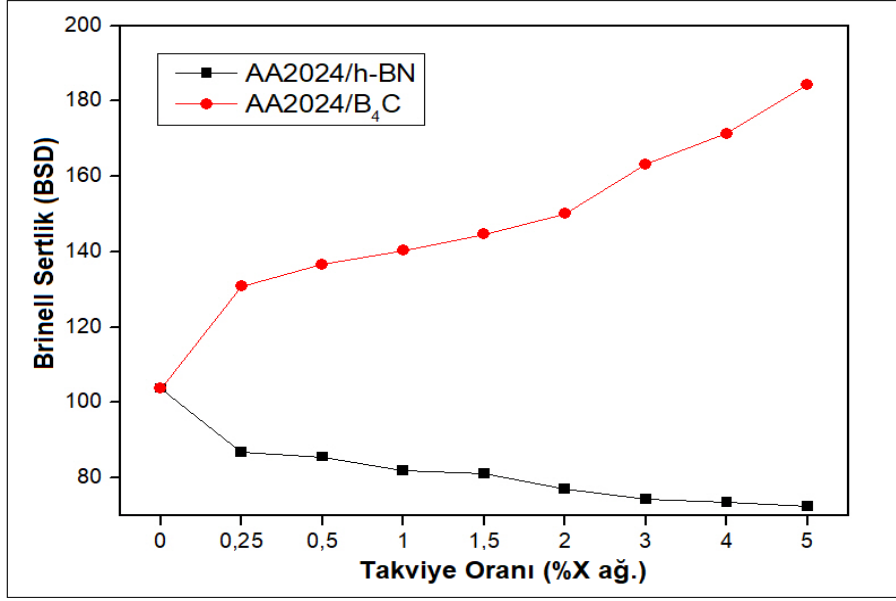
Tablo 3. 5. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin sertlik değerleri

Numune Kodu	BSD	Numune Kodu	BSD
A <sub>0</sub>	103,78	A <sub>0</sub>	103,78
AN <sub>0,25</sub>	86,80	AC <sub>0,25</sub>	130,80
AN <sub>0,5</sub>	85,59	AC <sub>0,5</sub>	136,70
AN <sub>1,0</sub>	82,01	AC <sub>1,0</sub>	140,30
AN <sub>1,5</sub>	81,21	AC <sub>1,5</sub>	144,70
AN <sub>2,0</sub>	77,05	AC <sub>2,0</sub>	150,10
AN <sub>3,0</sub>	74,40	AC <sub>3,0</sub>	163,20
AN <sub>4,0</sub>	73,60	AC <sub>4,0</sub>	171,40
AN <sub>5,0</sub>	72,57	AC <sub>5,0</sub>	184,40

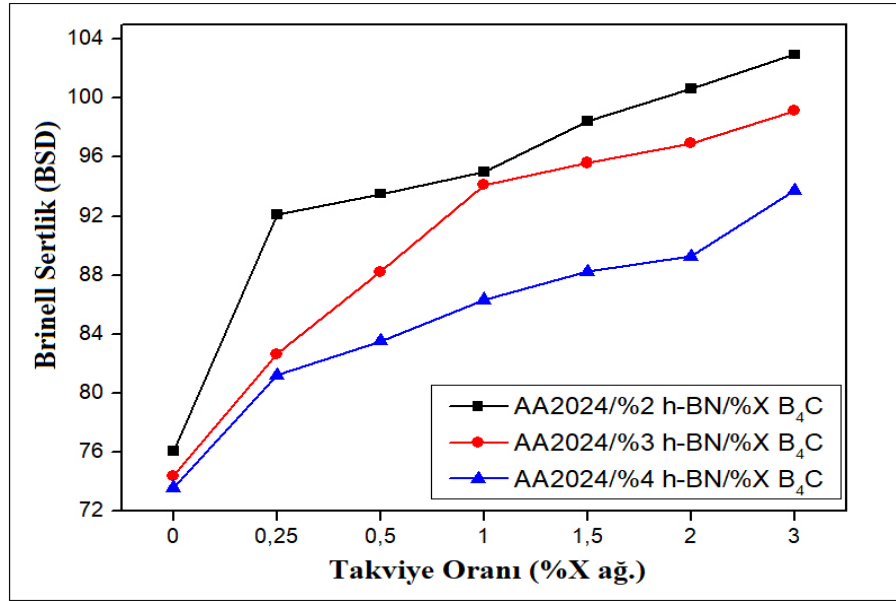
Tablo 3. 6. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının sertlik değerleri

Numune Kodu	BSD	Numune Kodu	BSD	Numune Kodu	BSD
AN <sub>2,0</sub>	76,05	AN <sub>3,0</sub>	74,40	AN <sub>4,0</sub>	73,60
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>	92,08	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	82,67	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	81,22
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>	93,51	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	88,23	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	83,53
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>	94,98	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	94,11	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	86,34
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>	98,44	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	95,61	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	88,23
AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>	100,62	AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	96,95	AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	89,25
AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	102,94	AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	99,15	AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	93,72





Şekil 3. 29. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin sertliğin takviye oranı ile değişimi



Şekil 3. 30. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının sertliğinin takviye oranı ile değişimi

#### 3.4.4. Aşınma Testi

Kullanılan takviye miktarı kompozit malzemenin aşınma özelliklerini de büyük oranda etkilemektedir. Üretilen nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemelere Ball-on-Disk

(numune üzeri bilye) aşınma testi uygulanmış ve aşınma testi sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma izleri aşağıda verilmiştir. Aşınma testi öncesi bütün numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri alınmış ve bütün numunelerin hemen hemen yakın pürüzlülük değerlerine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 3.7 ve Tablo 3.8).

Farklı takviye oranlarına sahip nanokompozitlerde 400 metre aşınma mesafesi için ağırlık kayıpları ölçülüp miligram cinsinden Tablo 3.9’ da gösterilmiştir. Şekil 3.31 ve Şekil 3.32’ de görüldüğü gibi takviye miktarının artmasıyla birlikte ağırlık kaybındaki miktar azalmış, ama artan yüklerle beraber ağırlık kaybı artmıştır. AA2024/h-BN nanokompozitlerindeki numuneler karşılaştırıldığında, en az ağırlık kaybına uğrayan numune AN<sub>5,0</sub>’ dir. Artan h-BN miktarıyla birlikte aşınma miktarında meydana gelen bu azalmanın nedeni, bor nitrür tozlarının yüksek yağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinde ise en az ağırlık kaybına uğrayan numune AC<sub>5,0</sub>’ dir. Artan B<sub>4</sub>C miktarıyla birlikte aşınma miktarında meydana gelen azalmanın sebebi ise B<sub>4</sub>C tozlarının çok sert olmasıdır. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit grupları karşılaştırıldığında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde ağırlık kaybının daha az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin sertliğinin yüksek olmasıdır. Yani yapıdaki sert faz miktarının artması aşınma miktarının da azalmasına sebep olmuştur. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde artan takviye miktarı ile aşınma direnci artmıştır ve en iyi aşınma direncine sahip numune AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>’ dir.

Tablo 3. 7. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin pürüzlülük değerleri

Numune Kodu	Pürüzlülük (Ra) (µm)	Numune Kodu	Pürüzlülük (Ra) (µm)
A <sub>0</sub>	0,127	A <sub>0</sub>	0,127
AN <sub>0,25</sub>	0,116	AC <sub>0,25</sub>	0,114
AN <sub>0,5</sub>	0,110	AC <sub>0,5</sub>	0,102
AN <sub>1,0</sub>	0,095	AC <sub>1,0</sub>	0,097
AN <sub>1,5</sub>	0,081	AC <sub>1,5</sub>	0,083
AN <sub>2,0</sub>	0,079	AC <sub>2,0</sub>	0,081
AN <sub>3,0</sub>	0,076	AC <sub>3,0</sub>	0,079
AN <sub>4,0</sub>	0,067	AC <sub>4,0</sub>	0,061
AN <sub>5,0</sub>	0,060	AC <sub>5,0</sub>	0,055

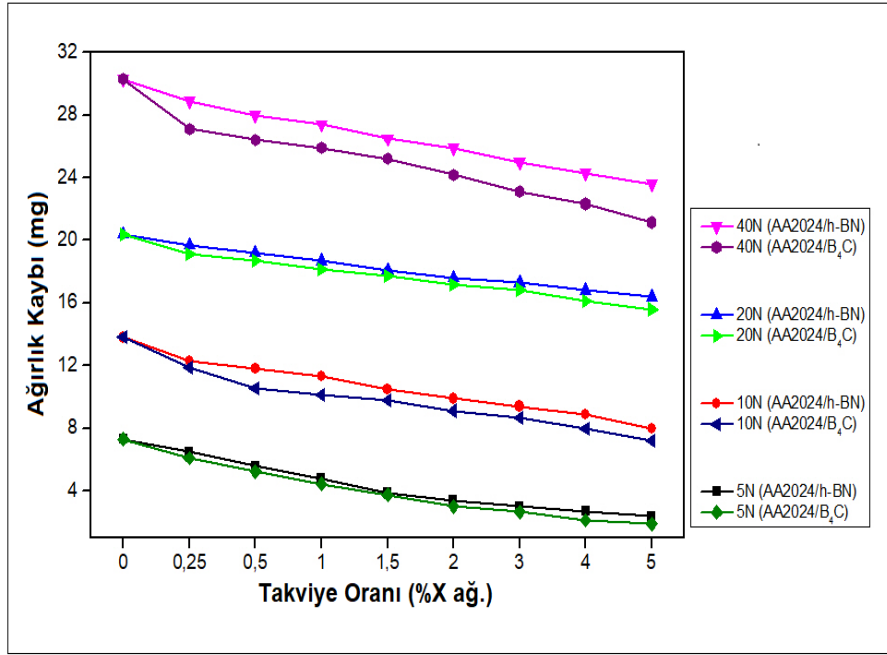
Tablo 3. 8. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının pürüzlülük değerleri

Numune Kodu	Pürüzlülük (Ra) (µm)	Numune Kodu	Pürüzlülük (Ra) (µm)	Numune Kodu	Pürüzlülük (Ra) (µm)
AN <sub>2,0</sub>	0,087	AN <sub>3,0</sub>	0,096	AN <sub>4,0</sub>	0,067
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>	0,079	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	0,077	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	0,089
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>	0,069	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	0,070	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	0,091
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>	0,071	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	0,062	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	0,077
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>	0,062	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	0,090	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	0,081
AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>	0,082	AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	0,081	AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	0,071
AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	0,068	AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	0,066	AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	0,062

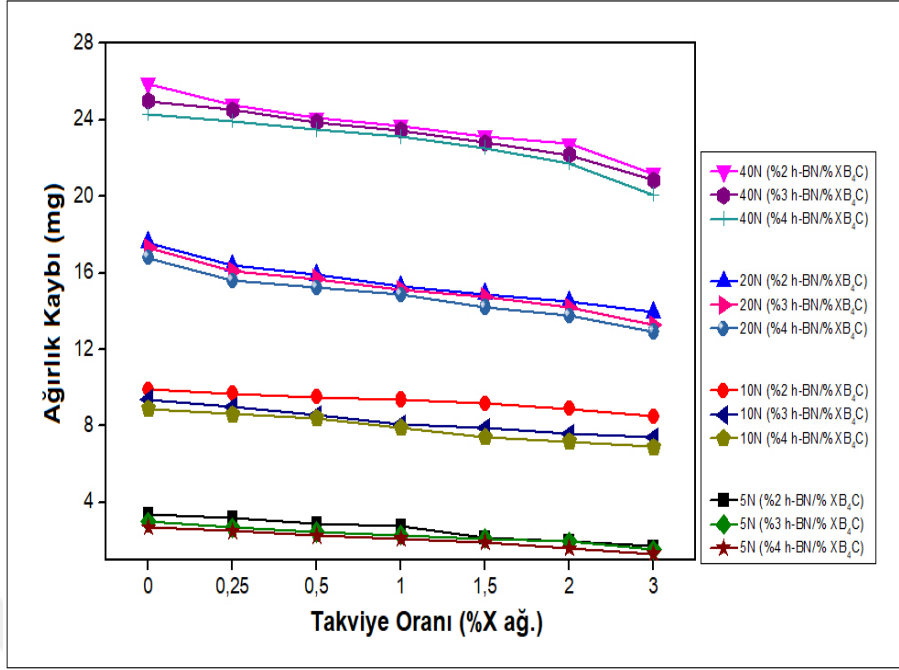
Tablo 3. 9. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin farklı yüklere bağlı ağırlık kayıpları

		Numunelere Uygulanan Yük Miktarı					
		40N	20N	10N	5N		
Ağırlık Kaybı (mg)	A <sub>0</sub>	30,3	20,4	13,8	7,3	Numune Kodu	A <sub>0</sub>
		28,9	19,7	12,3	6,5		AN <sub>0,25</sub>
		28,0	19,2	11,8	5,6		AN <sub>0,5</sub>
		27,4	18,7	11,3	4,8		AN <sub>1,0</sub>
		26,5	18,1	10,5	3,9		AN <sub>1,5</sub>
		25,9	17,6	9,9	3,4		AN <sub>2,0</sub>
		25,0	17,3	9,4	3,0		AN <sub>3,0</sub>
		24,3	16,8	8,9	2,7		AN <sub>4,0</sub>
		23,6	16,4	8,0	2,4		AN <sub>5,0</sub>
Ağırlık Kaybı (mg)	A <sub>0</sub>	30,30	20,40	13,80	7,30	Numune Kodu	A <sub>0</sub>
		27,12	19,10	11,90	6,10		AC <sub>0,25</sub>
		26,42	18,71	10,55	5,24		AC <sub>0,5</sub>
		25,91	18,12	10,12	4,45		AC <sub>1,0</sub>
		25,20	17,75	9,76	3,76		AC <sub>1,5</sub>
		24,17	17,19	9,12	3,00		AC <sub>2,0</sub>
		23,10	16,85	8,67	2,65		AC <sub>3,0</sub>
		22,32	16,12	8,00	2,12		AC <sub>4,0</sub>
		21,14	15,60	7,19	1,90		AC <sub>5,0</sub>
Ağırlık Kaybı (mg)	A <sub>0</sub>	25,90	17,6	9,90	3,40	Numune Kodu	AN <sub>2,0</sub>
		24,80	16,4	9,70	3,20		AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>
		24,10	15,9	9,51	2,90		AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>
		23,70	15,28	9,37	2,75		AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>
		23,16	14,9	9,16	2,16		AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>
		22,74	14,52	8,90	2,00		AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>
		21,19	13,95	8,50	1,70		AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>

Ağırlık Kaybı (mg)	25,00	17,30	9,40	3,00	AN <sub>3,0</sub>	Numune Kodu
	24,52	16,10	9,00	2,70	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	
	23,90	15,70	8,60	2,46	AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	
	23,46	15,12	8,10	2,28	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	
	22,81	14,77	7,90	2,12	AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	
	22,17	14,19	7,61	1,96	AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	
	20,85	13,27	7,42	1,53	AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	
Ağırlık Kaybı (mg)	24,30	16,80	8,90	2,70	AN <sub>4,0</sub>	Numune Kodu
	23,92	15,59	8,61	2,50	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	
	23,48	15,22	8,40	2,26	AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	
	23,12	14,85	7,90	2,12	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	
	22,55	14,19	7,41	1,90	AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	
	21,72	13,76	7,19	1,60	AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	
	20,10	12,92	6,90	1,30	AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	

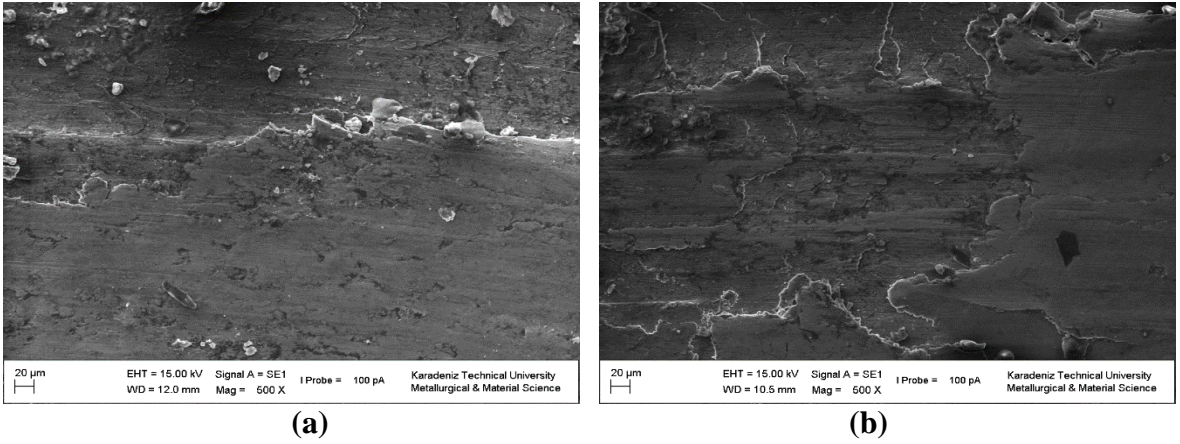


Şekil 3. 31. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin farklı yüklere bağlı ağırlık kayıplarının takviye miktarına bağlı değişimi



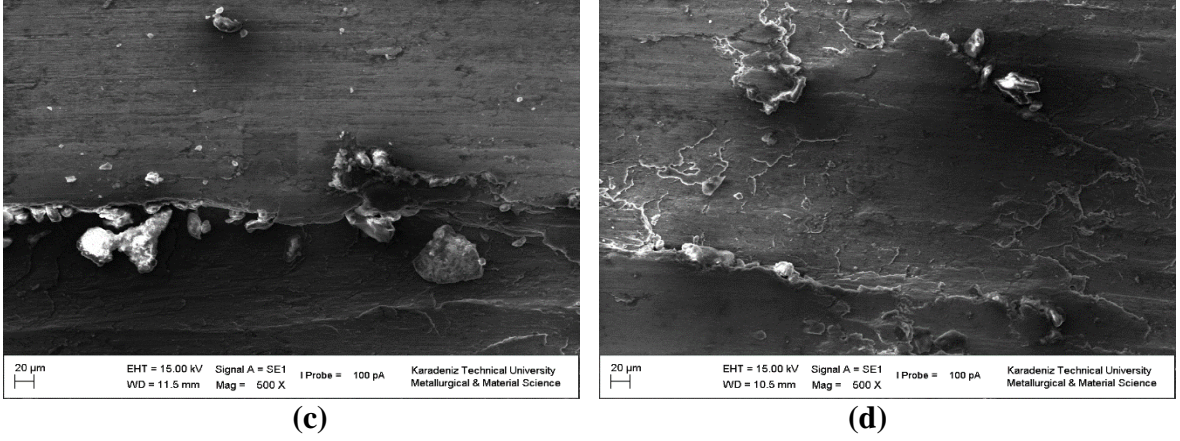
Şekil 3. 32. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozit gruplarının farklı yüklerle bağlı ağırlık kayıplarının takviye miktarına bağlı değişimi

#### 3.4.4.1. AA2024 Numunesinin Aşınma Yüzey İncelemesi



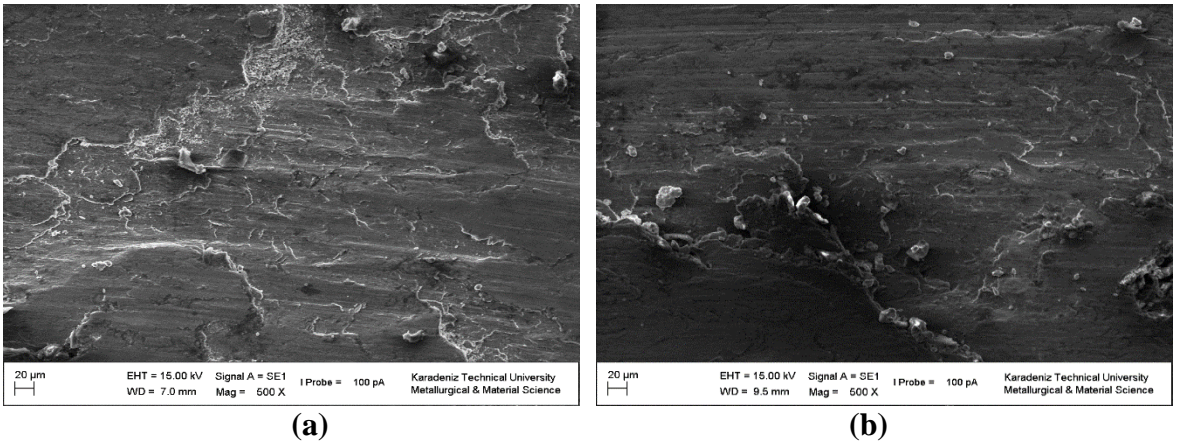
Şekil 3. 33. A<sub>0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.

Şekil 3.33' ün devamı



Yapılan incelemelerde aşınma yüzeylerinde kopan ve kopmak üzere olan partiküller, tabakalanmalar, plastik deformasyonlar, çatlaklar ve adhere olmuş partiküller görülmüştür. Küçük yüklerde soğuk yırtılma ve tabakalanmalar daha çok görülmektedir. Çünkü küçük yüklerde yapılan testlerde, numune yüzeyinden kopan parçacıkların ortamdaki uzaklaştırılmamasından dolayı, devam eden deney boyunca numune yüzeyine kısmen yapışmıştır. Büyük yüklerde ise daha fazla parçacık kopmuş olmasına rağmen, kopan parçacıklar daha kuvvetli bir şekilde yüzeye tekrardan yapışarak soğuk kaynak olmuştur. Bu yüzden malzeme yüzeyinden kopan partikül miktarı ile ağırlık kaybı miktarı eşit değildir.

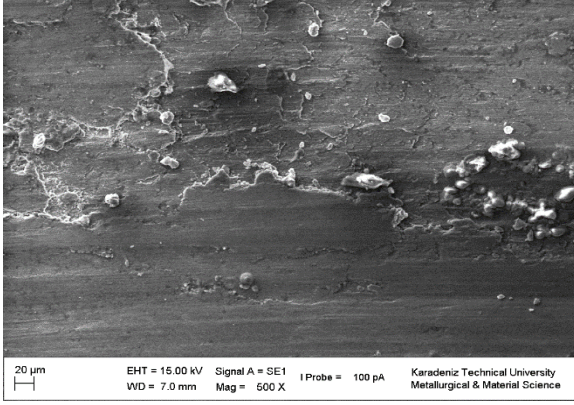
#### 3.4.4.2. AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi



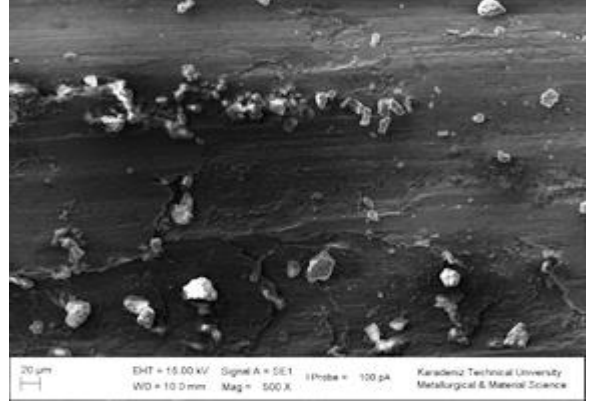
Şekil 3. 34. AN<sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



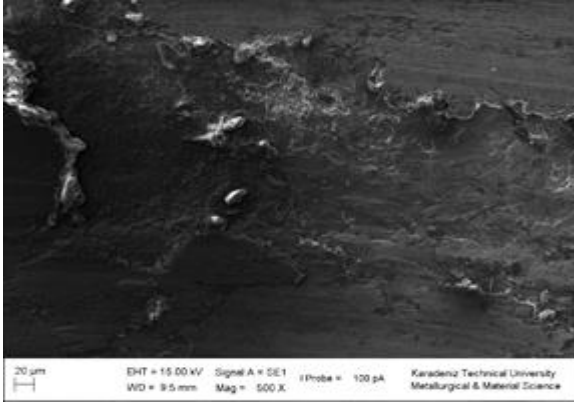
Şekil 3.34' ün devamı



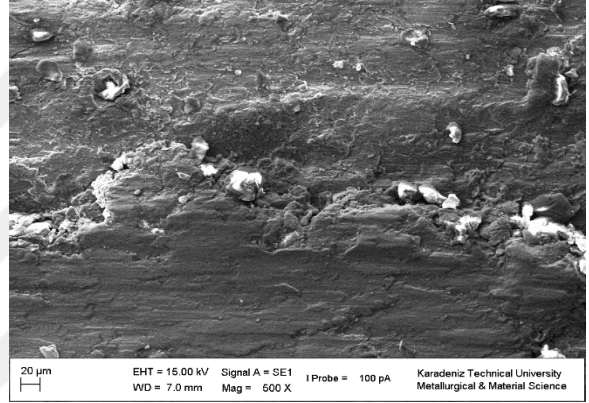
(c)



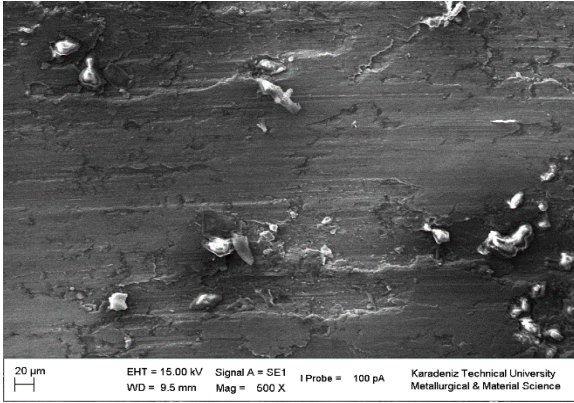
(d)



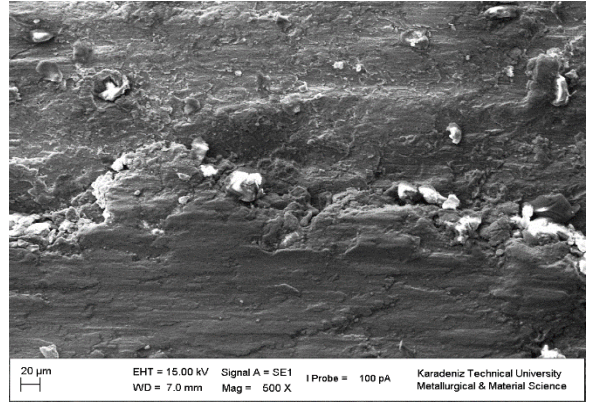
(a)



(b)



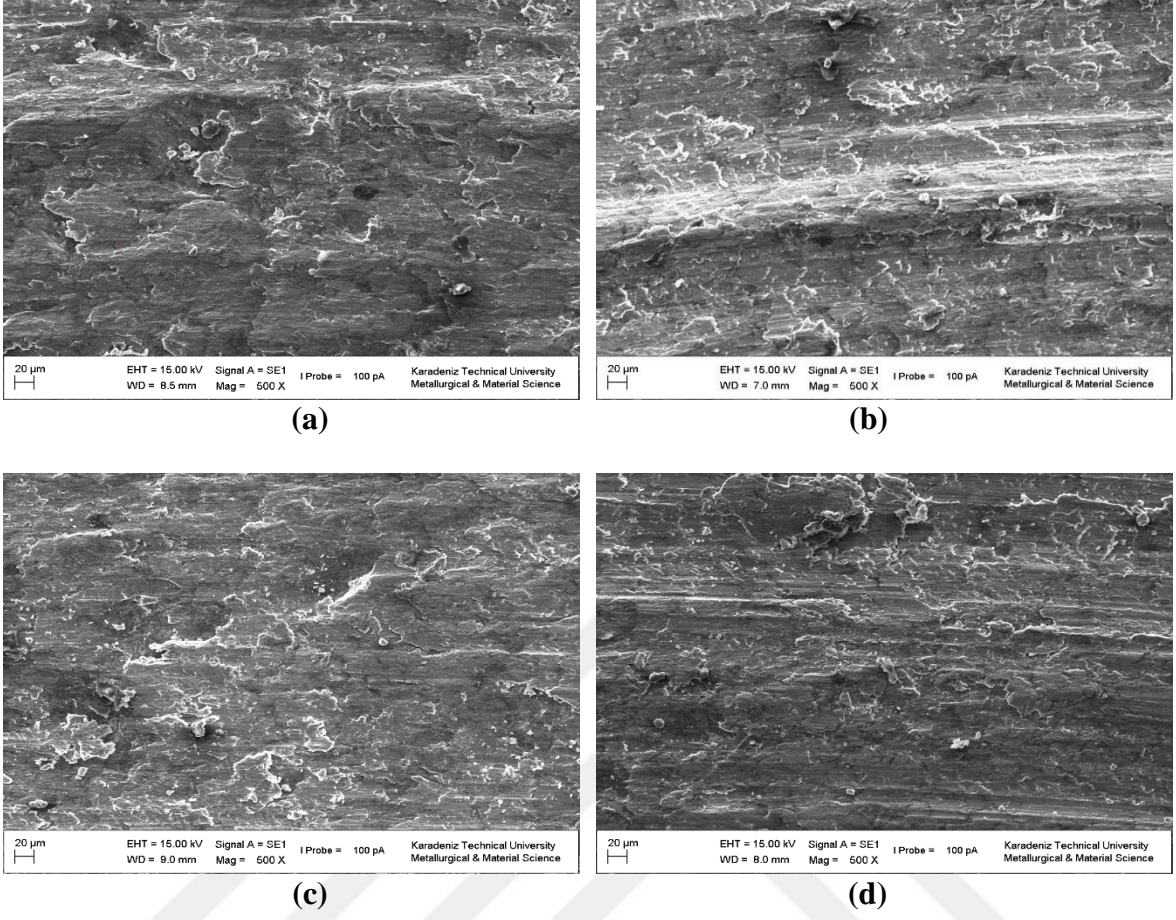
(c)



(d)

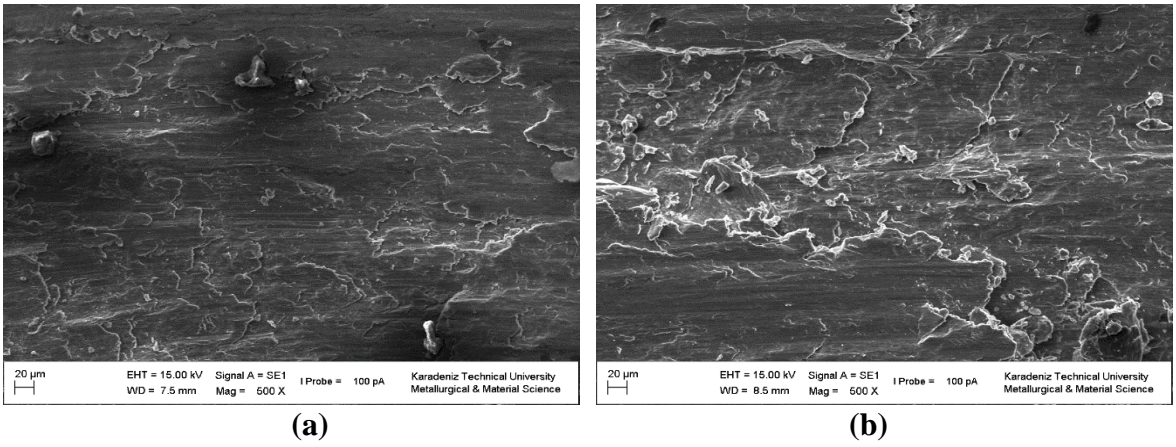
Şekil 3. 35. AN<sub>2.0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.





Şekil 3. 36. AN<sub>5,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.

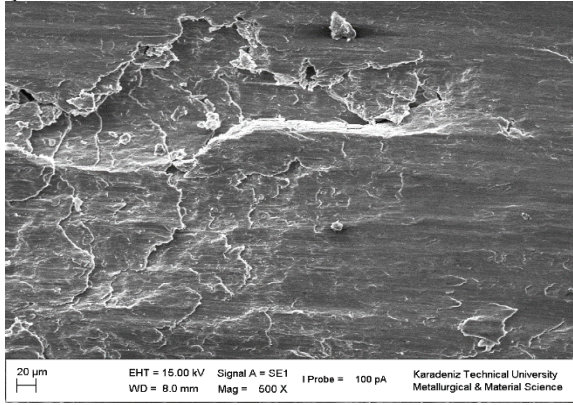
#### 3.4.4.3. AA2024/B<sub>4</sub>C Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi



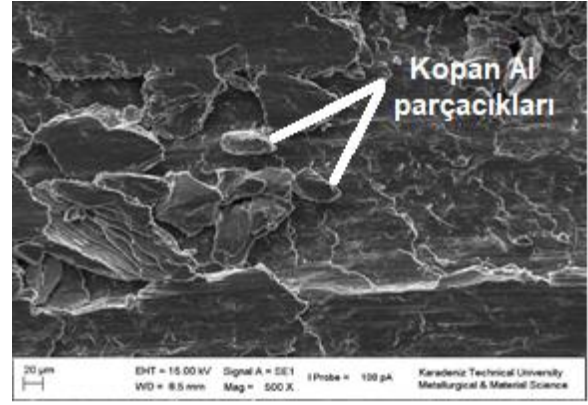
Şekil 3. 37. AC<sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



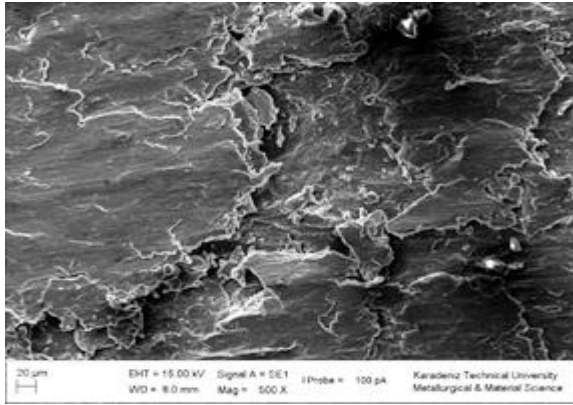
Şekil 3.37' nin devamı



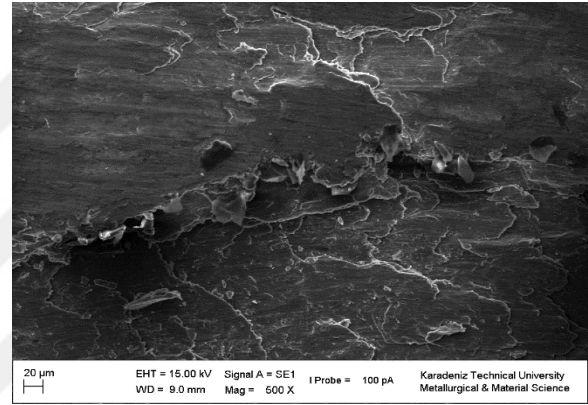
(c)



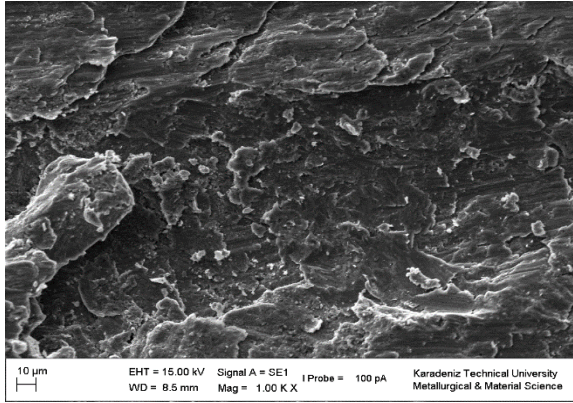
(d)



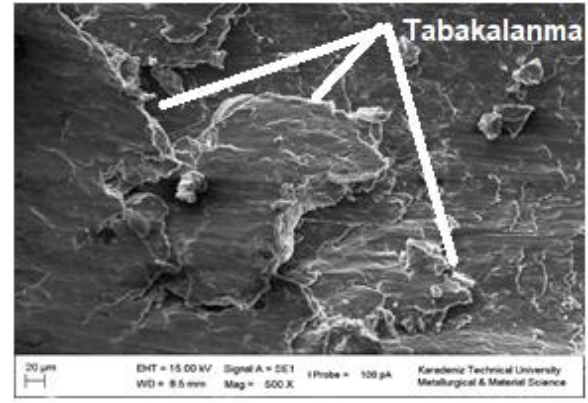
(a)



(b)



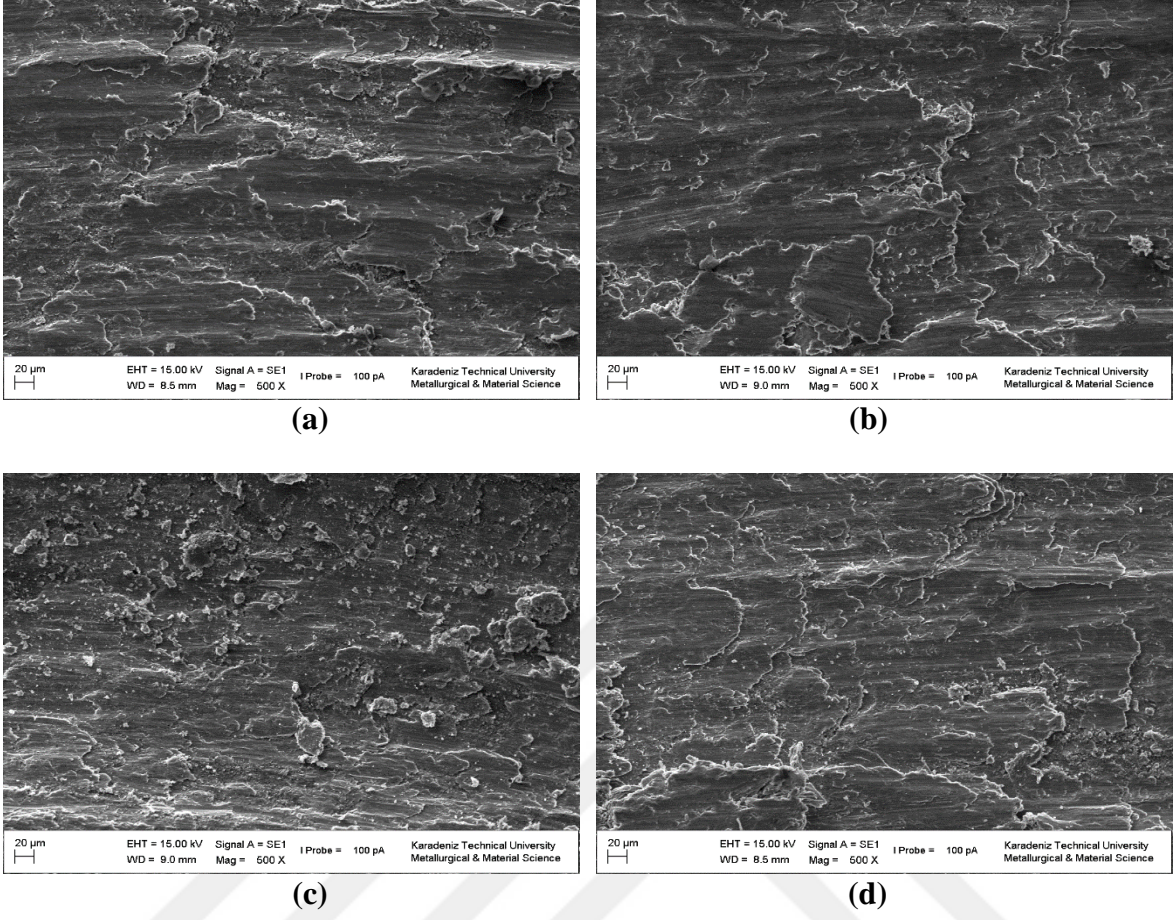
(c)



(d)

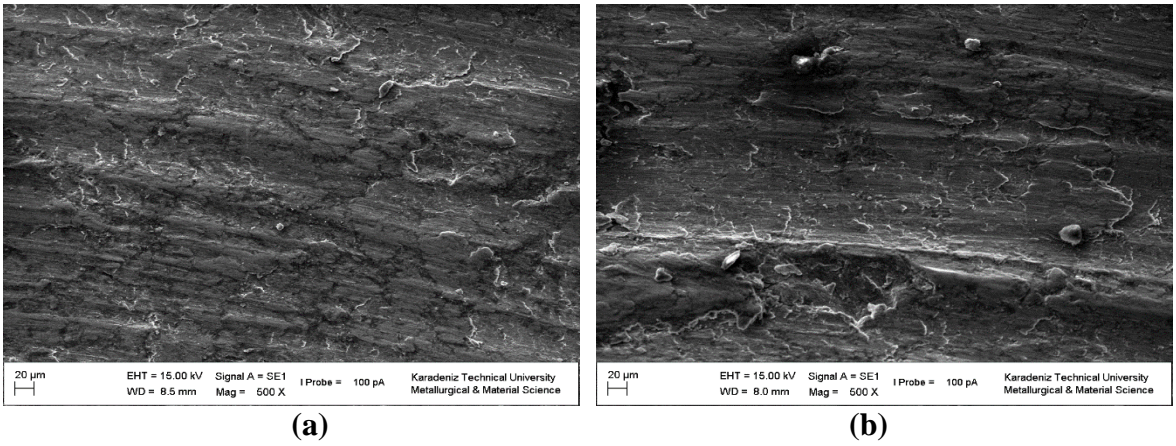
Şekil 3. 38.  $AC_{2,0}$  numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.





Şekil 3. 39. AC<sub>5,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.

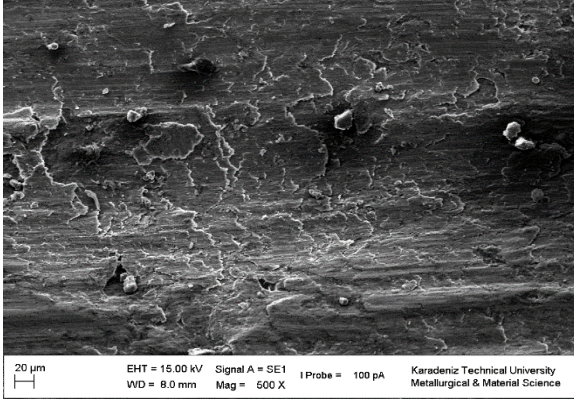
#### 3.4.4.4. AA2024/h-BN-B<sub>4</sub>C Hibrit Nanokompozitlerin Aşınma Yüzey İncelemesi



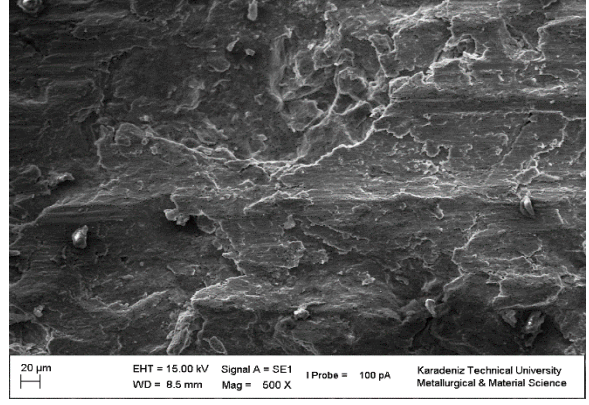
Şekil 3. 40. AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



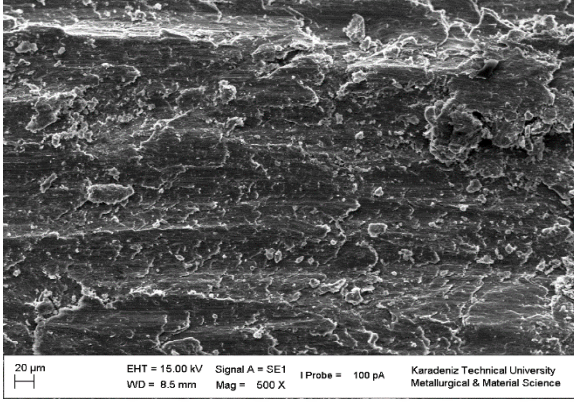
Şekil 3.40' in devamı



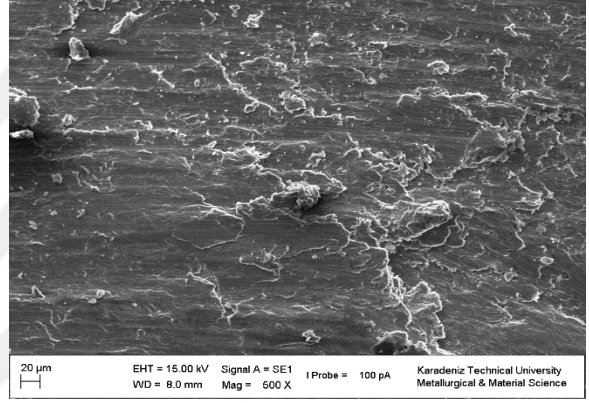
(c)



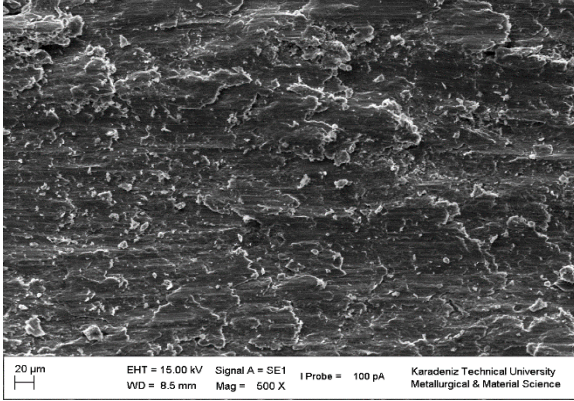
(d)



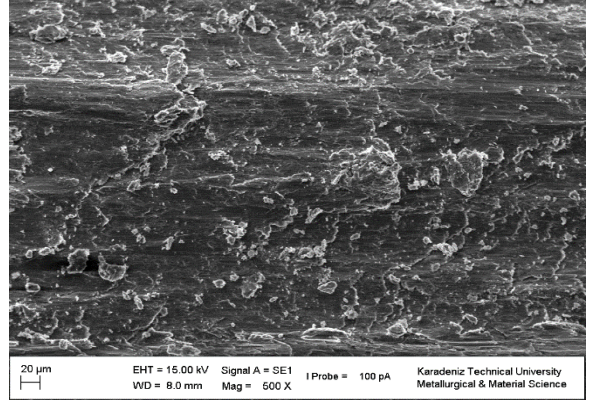
(a)



(b)



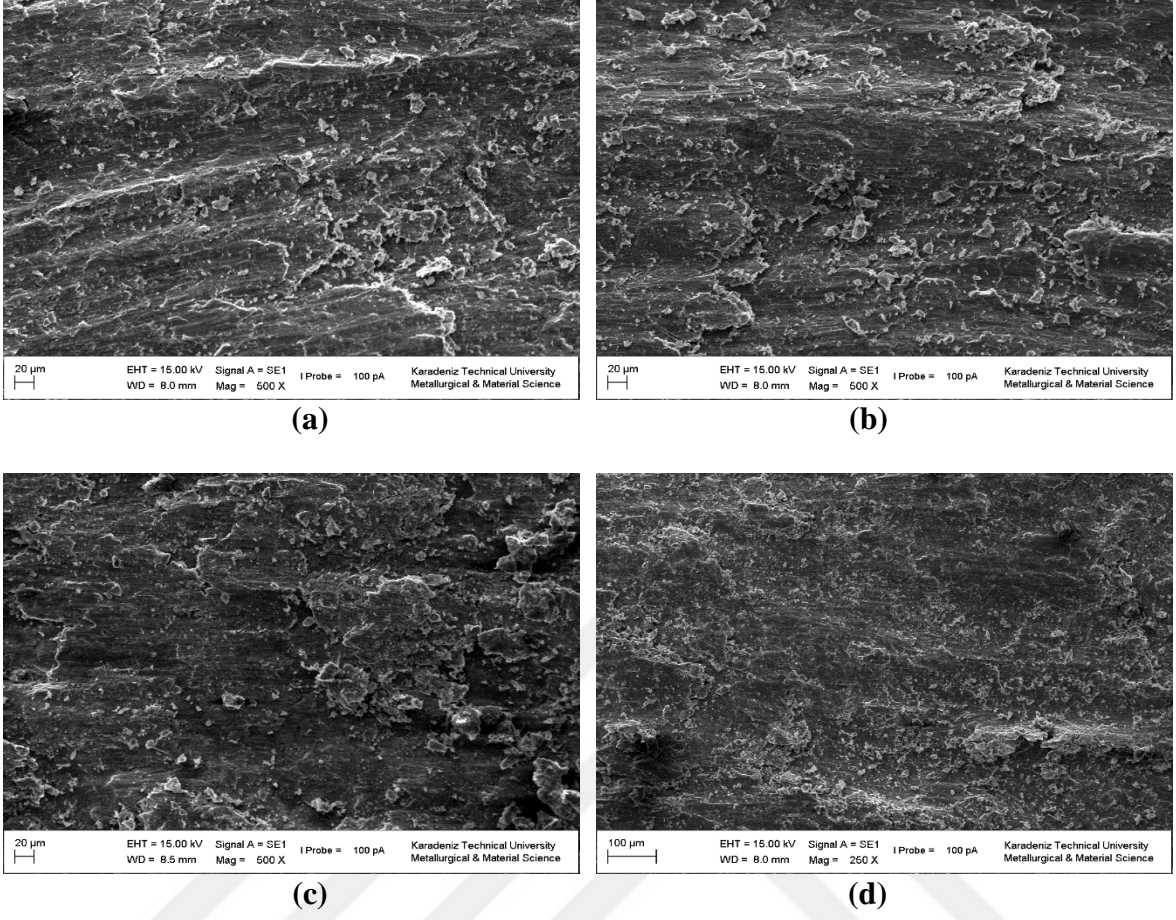
(c)



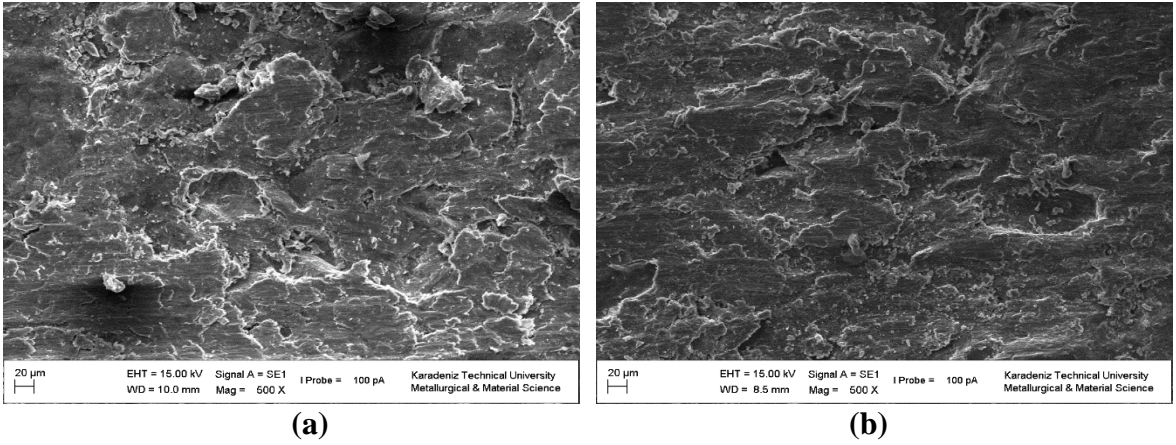
(d)

Şekil 3. 41. AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.





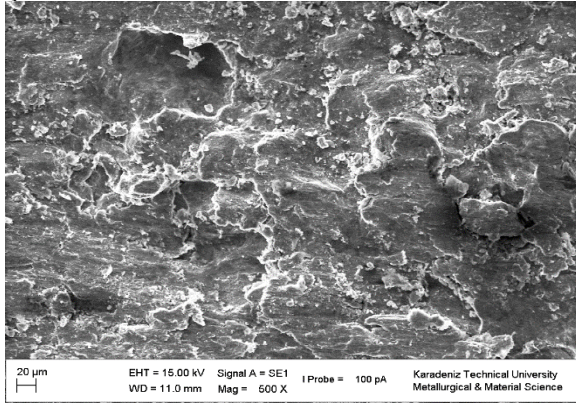
Şekil 3. 42.  $AN_{2,0}C_{3,0}$  numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



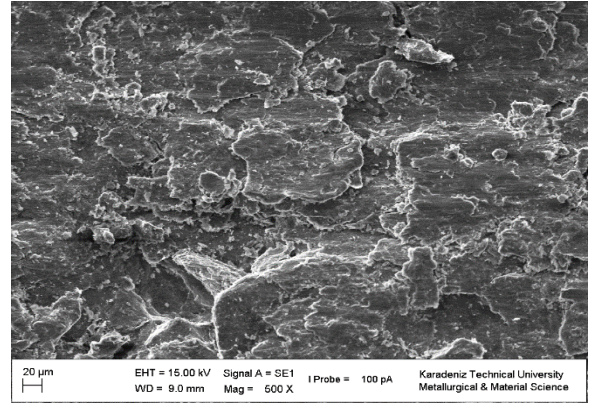
Şekil 3. 43.  $AN_{3,0}C_{0,25}$  numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



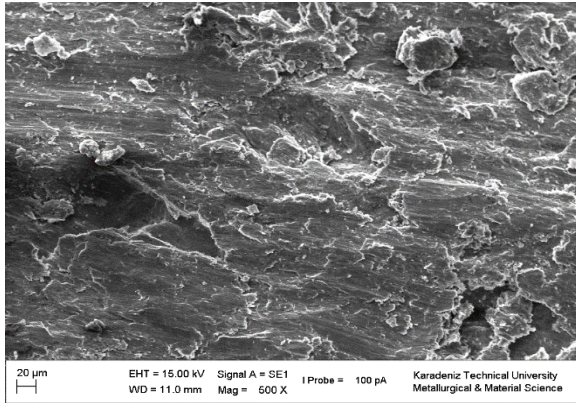
Şekil 3.43' ün devamı



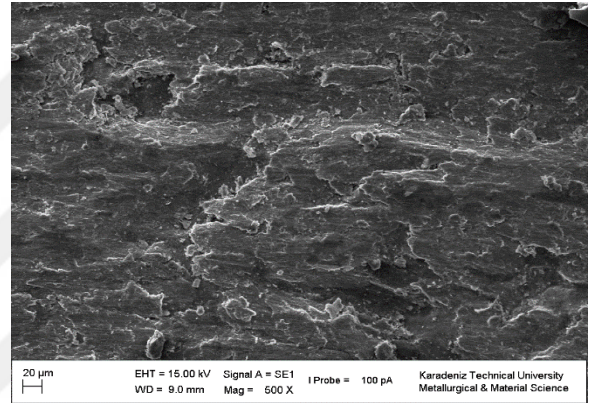
(c)



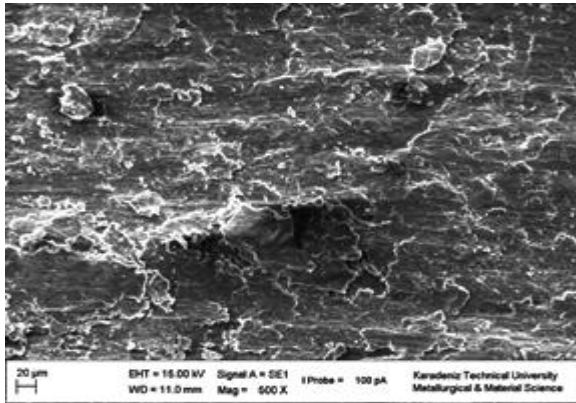
(d)



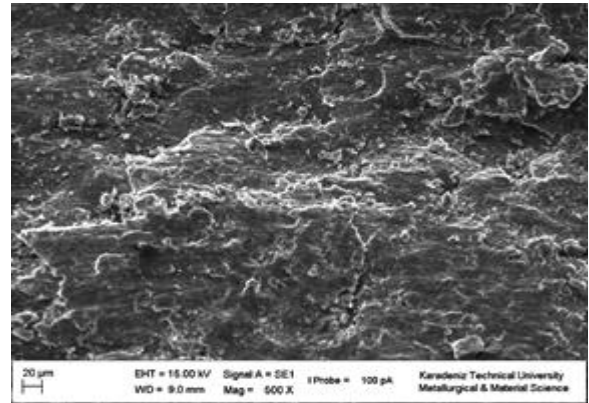
(a)



(b)



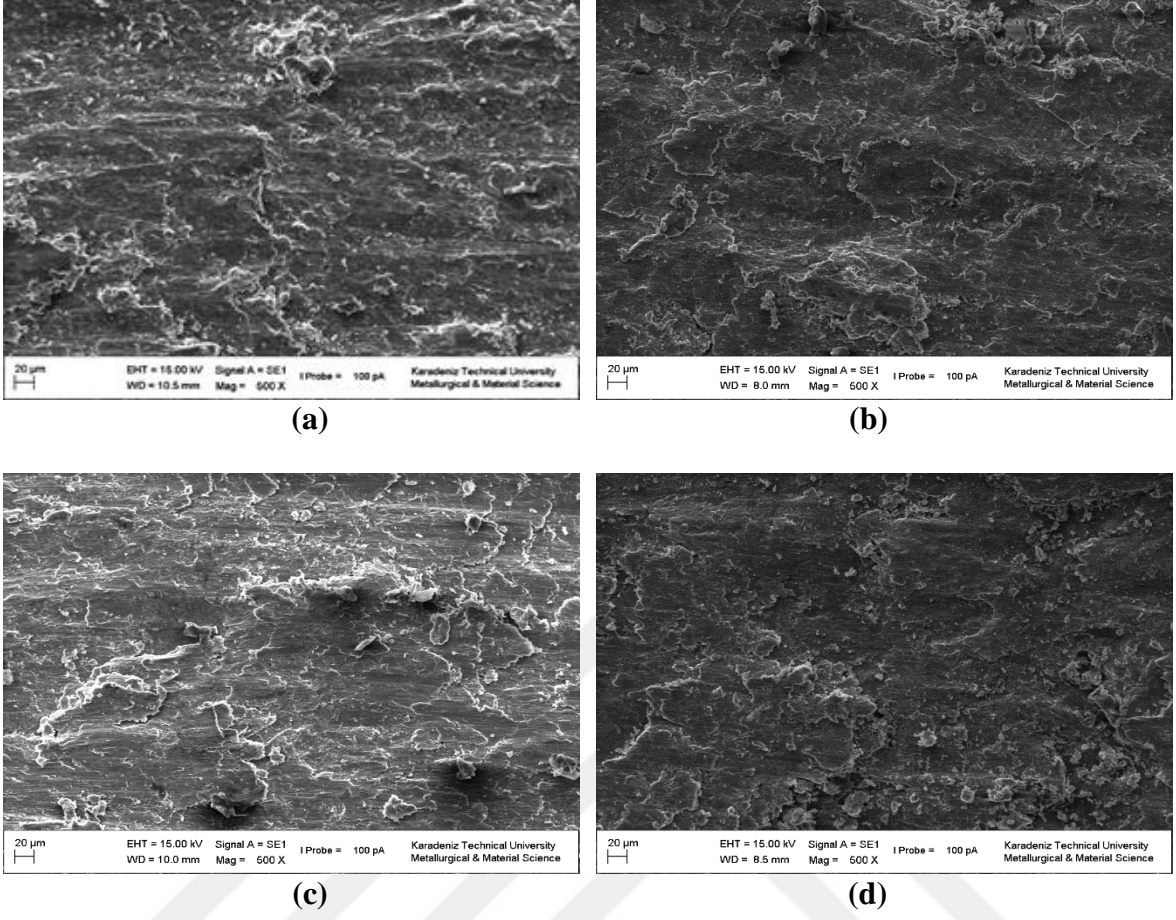
(c)



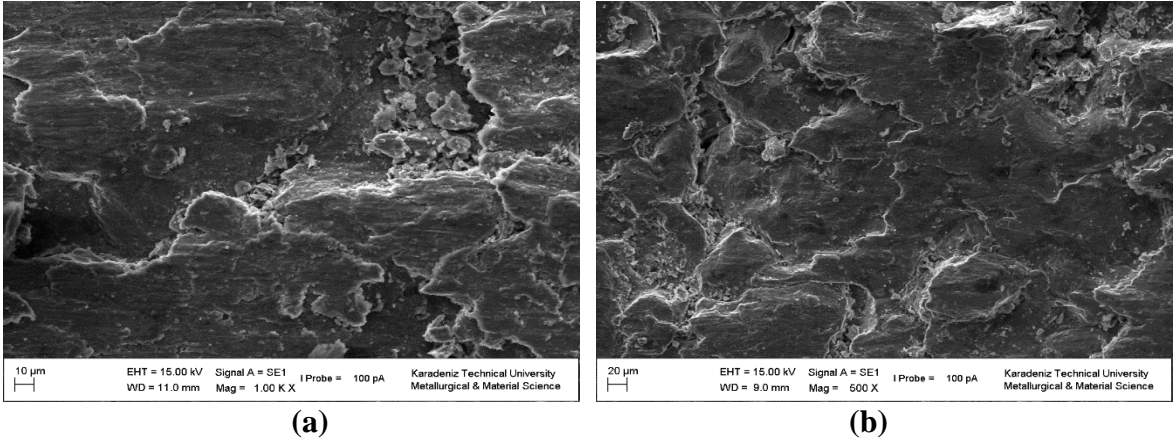
(d)

Şekil 3. 44. AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.





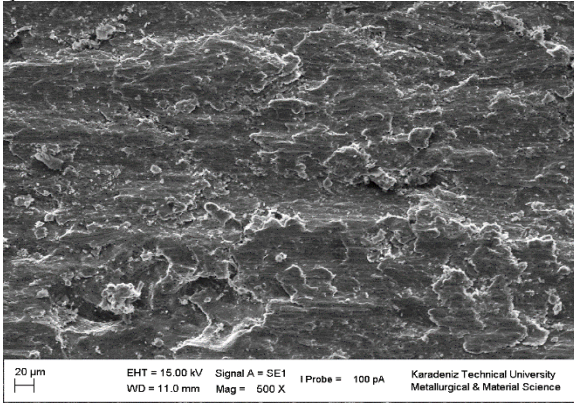
Şekil 3. 45.  $AN_{3,0}C_{3,0}$  numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



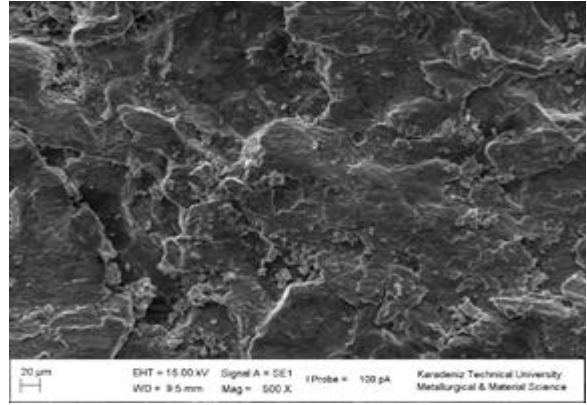
Şekil 3. 46.  $AN_{4,0}C_{0,25}$  numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.



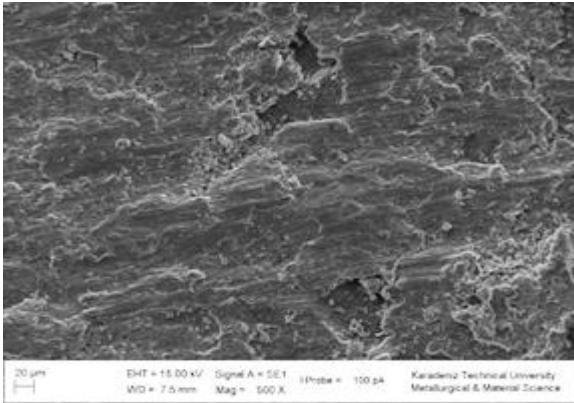
Şekil 3.46' nin devamı



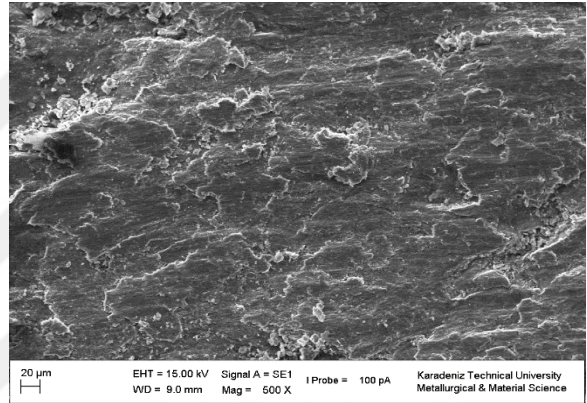
(c)



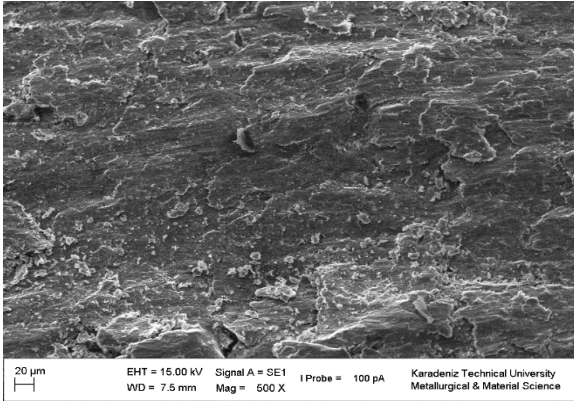
(d)



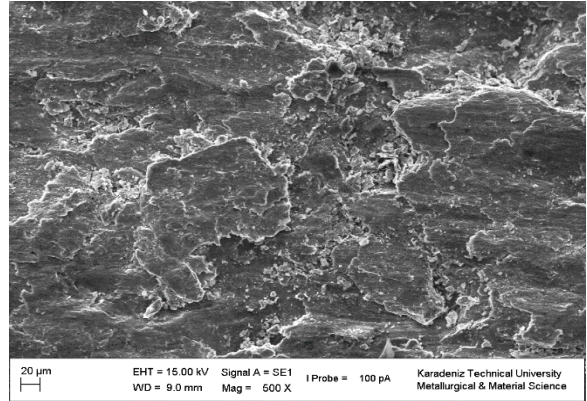
(a)



(b)



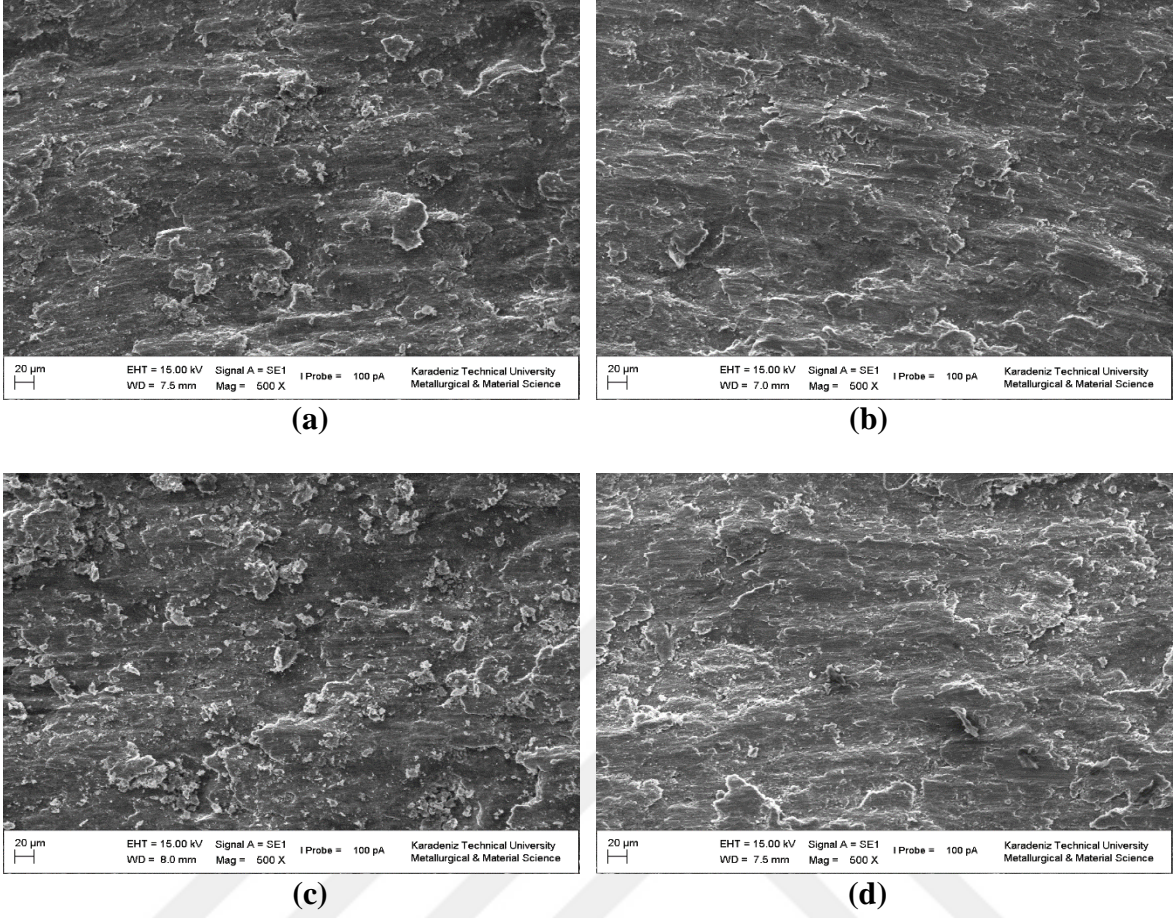
(c)



(d)

Şekil 3. 47. AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.





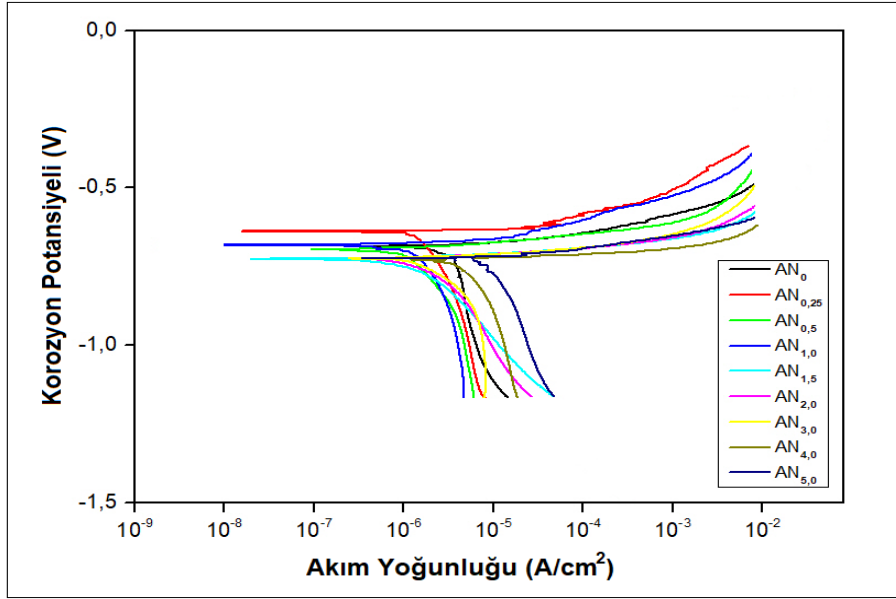
Şekil 3. 48. AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub> numunesine uygulanan artan kuvvet ile meydana gelen aşınma sonucu oluşan yüzey görüntüleri (a) 5N, (b) 10N, (c) 20N, (d) 40N.

### 3.4.5. Korozyon Testi

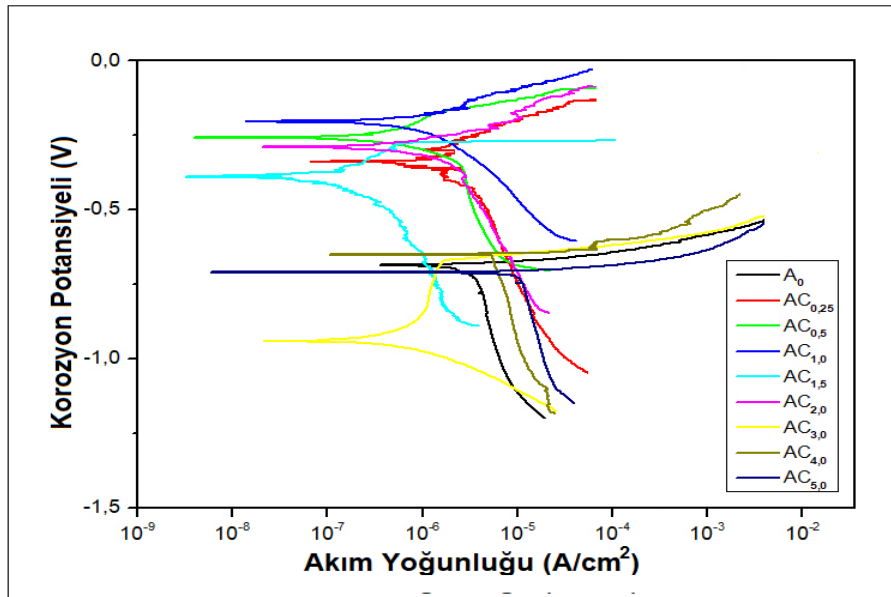
Alüminyum matrisli h-BN ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemelerin korozyon davranışlarını takviye miktarı, takviyenin matris içerisine dağılımı ve matrisin mikroyapısı gibi parametreler etkilemektedir.

AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin korozyon testi sonuçları (Ekor, Ikor, korozyon hızı) Tafel eğrilerinden elde edilmiştir ve Tablo 3.10' da gösterilmiştir. Şekil 3.49, Şekil 3.50 ve Şekil 3.51' de AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri verilmiştir.

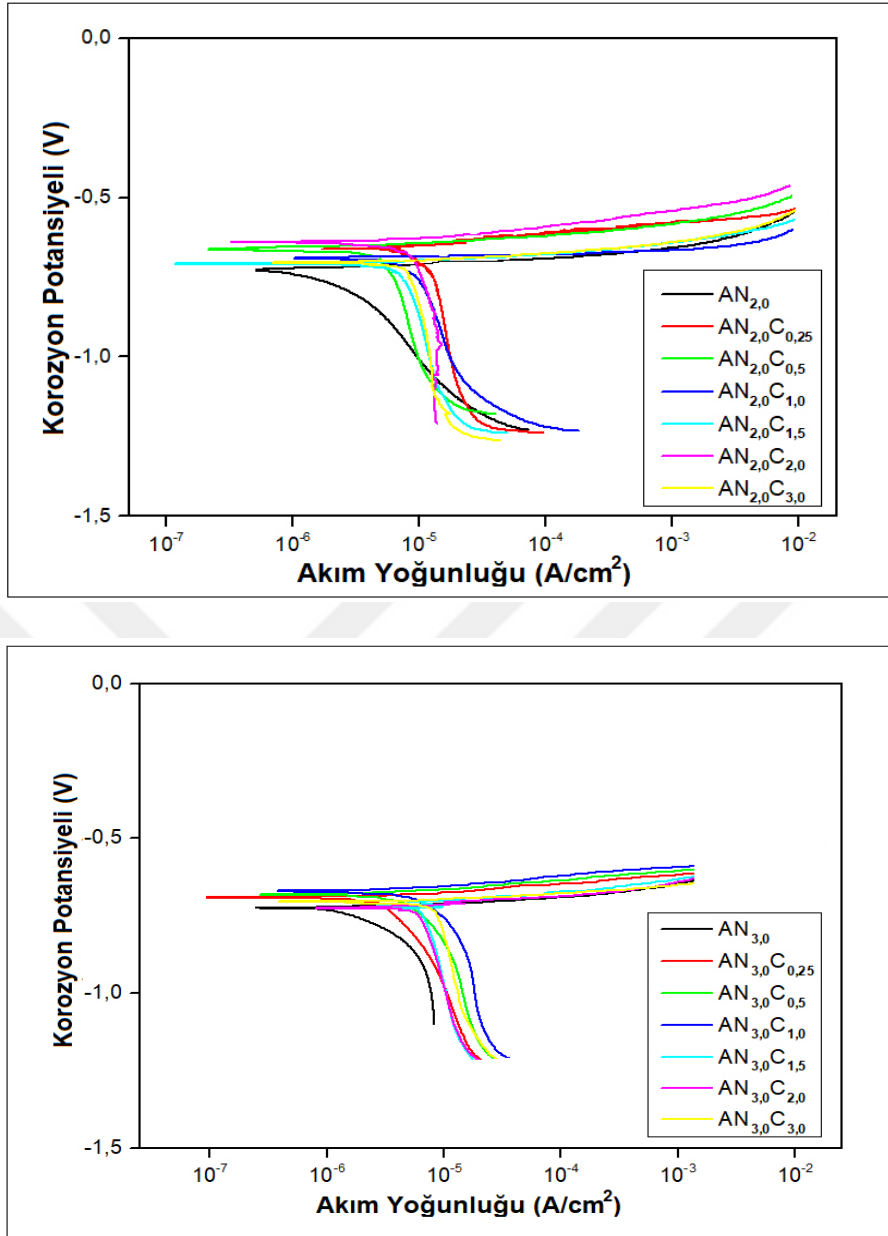




Şekil 3. 49. AA2024/h-BN nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri

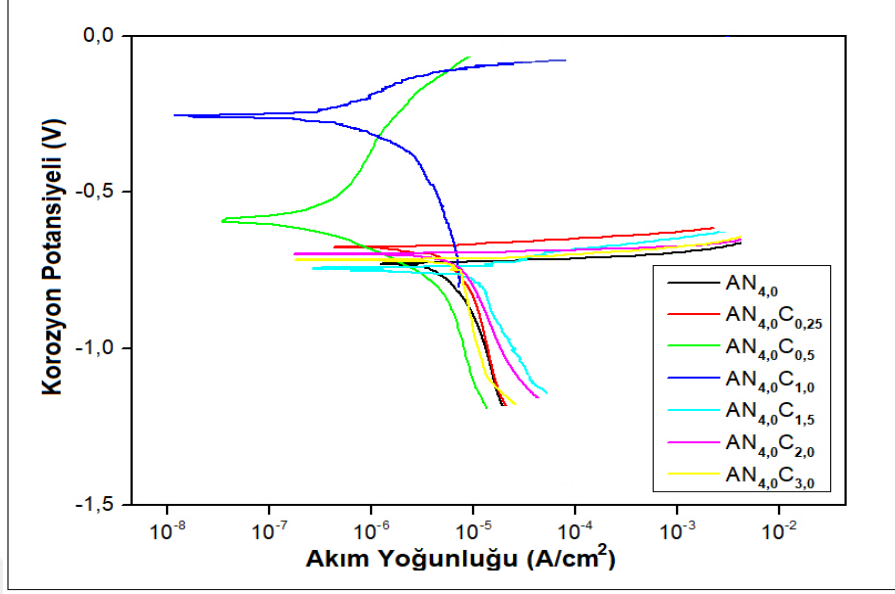


Şekil 3. 50. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri



Şekil 3. 51. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrileri

Şekil 3.51' in devamı

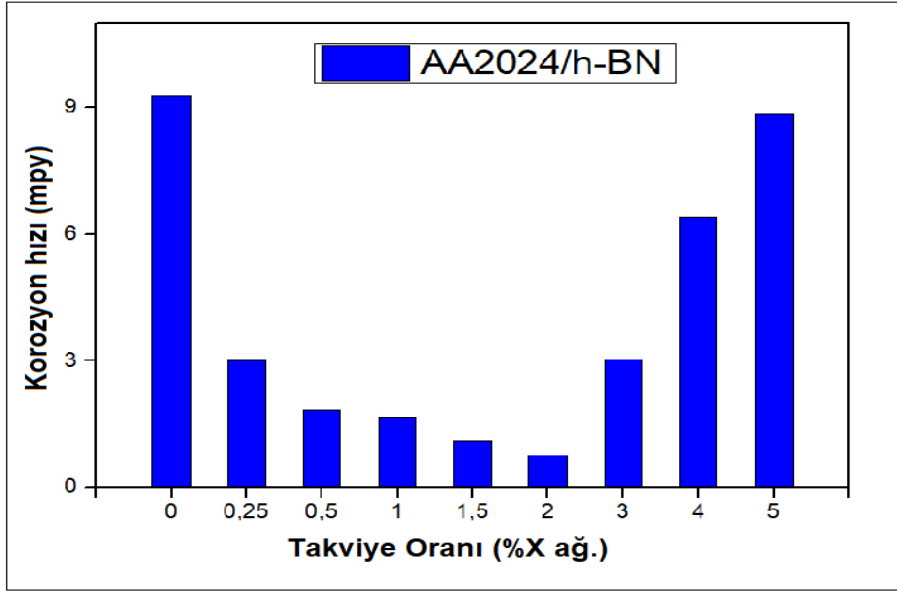


AA2024/h-BN nanokompozitlerde % 0,25 h-BN takviyesi ile korozyon dayanımı üç katına çıkmıştır ve %0,5 h-BN takviyesi ile  $I_{Kor}$  değeri 4,59  $\mu A$ ' den 1,65  $\mu A$ ' e düşerken korozyon dayanımı da beş kat artmıştır. %2 h-BN takviyeye kadar korozyon dayanımının arttığı Şekil 3.?' de açıkça görülmektedir. %2 h-BN takviyeden sonra artan takviye miktarı ile korozyon dayanımında azalmalar gözlenmiştir. En iyi korozyon dayanımı AN<sub>2,0</sub>' de elde edilmiştir. Bunun nedeni h-BN partikülleri bariyer etkisi yaparak korozyonu önlemesidir. %2 h-BN takviyeden sonra %1,89' dan %6,13' e artan porozite miktarı nedeniyle korozyon dayanımı azalmaktadır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitler arasında ise AC<sub>1,5</sub> numunesi 0,351 mpy korozyon hızı ile en iyi korozyon direncine sahiptir. Artan B<sub>4</sub>C takviye oranı ile korozyon direnci %1,5 B<sub>4</sub>C takviyesi içeren AC<sub>1,5</sub> numunesine kadar artmış daha sonra ise azalma göstermiştir. Bu orana kadar B<sub>4</sub>C iyi bariyer görevi görürken bu orandan sonra artan porozite miktarı ile korozyon direnci azalmıştır. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub> numunesi 0,232 mpy korozyon hızıyla en yüksek korozyon direncine sahiptir. Genel olarak artan takviye oranı korozyon direncini belli bir orana kadar arttırmıştır.

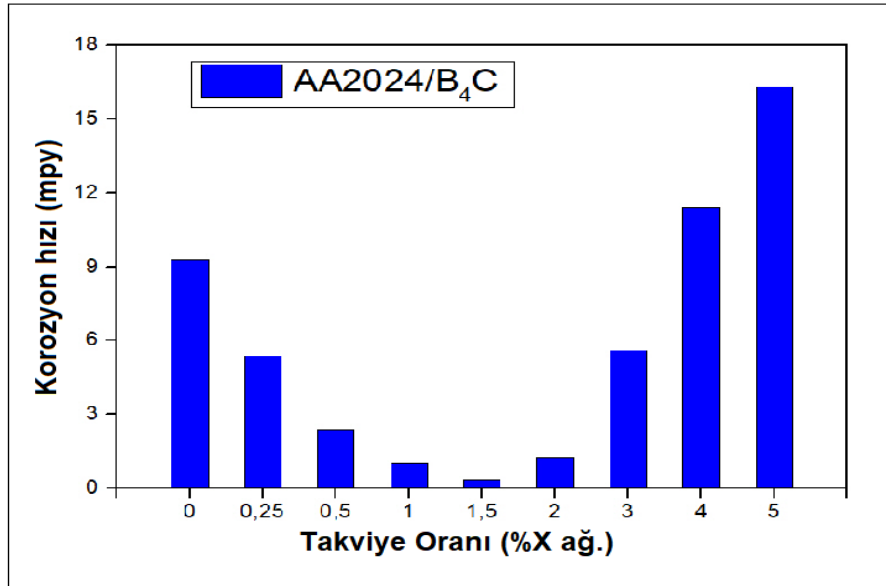
Tablo 3. 10. AA2024/h-BN, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin korozyon testleri sonucu E<sub>kor</sub>, I<sub>kor</sub> ve korozyon hızı değerleri

Numune Kodu	E <sub>kor</sub> (mV)	I <sub>kor</sub> (μA)	Korozyon Hızı (mpy)
A <sub>0</sub>	-685	4,590	9,270
AN <sub>0,25</sub>	-638	2,690	3,016
AN <sub>0,5</sub>	-696	1,650	1,852
AN <sub>1,0</sub>	-681	1,390	1,649
AN <sub>1,5</sub>	-726	1,050	1,098
AN <sub>2,0</sub>	-643	0,637	0,768
AN <sub>3,0</sub>	-724	2,650	3,035
AN <sub>4,0</sub>	-729	5,420	6,401
AN <sub>5,0</sub>	-723	7,990	8,827
AC <sub>0,25</sub>	-339	4,290	5,380
AC <sub>0,5</sub>	-257	1,660	2,370
AC <sub>1,0</sub>	-204	0,904	1,010
AC <sub>1,5</sub>	-390	0,276	0,351
AC <sub>2,0</sub>	-289	0,876	1,245
AC <sub>3,0</sub>	-940	1,560	5,596
AC <sub>4,0</sub>	-650	8,730	11,44
AC <sub>5,0</sub>	-710	15,50	16,29
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,25</sub>	-629	0,323	0,232
AN <sub>2,0</sub> C <sub>0,5</sub>	-661	2,400	3,089
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,0</sub>	-690	6,170	7,231
AN <sub>2,0</sub> C <sub>1,5</sub>	-707	9,870	11,820
AN <sub>2,0</sub> C <sub>2,0</sub>	-639	10,300	12,400
AN <sub>2,0</sub> C <sub>3,0</sub>	-703	10,900	14,130
AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,25</sub>	-691	1,680	1,906
AN <sub>3,0</sub> C <sub>0,5</sub>	-297	0,309	0,485
AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,0</sub>	-670	2,890	3,284
AN <sub>3,0</sub> C <sub>1,5</sub>	-719	5,860	6,929
AN <sub>3,0</sub> C <sub>2,0</sub>	-725	8,520	10,880
AN <sub>3,0</sub> C <sub>3,0</sub>	-703	9,990	13,300
AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,25</sub>	-676	3,140	3,556
AN <sub>4,0</sub> C <sub>0,5</sub>	-588	1,410	1,662
AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,0</sub>	-255	0,619	0,784
AN <sub>4,0</sub> C <sub>1,5</sub>	-742	1,360	1,623
AN <sub>4,0</sub> C <sub>2,0</sub>	-697	4,120	4,691
AN <sub>4,0</sub> C <sub>3,0</sub>	-716	9,730	11,740

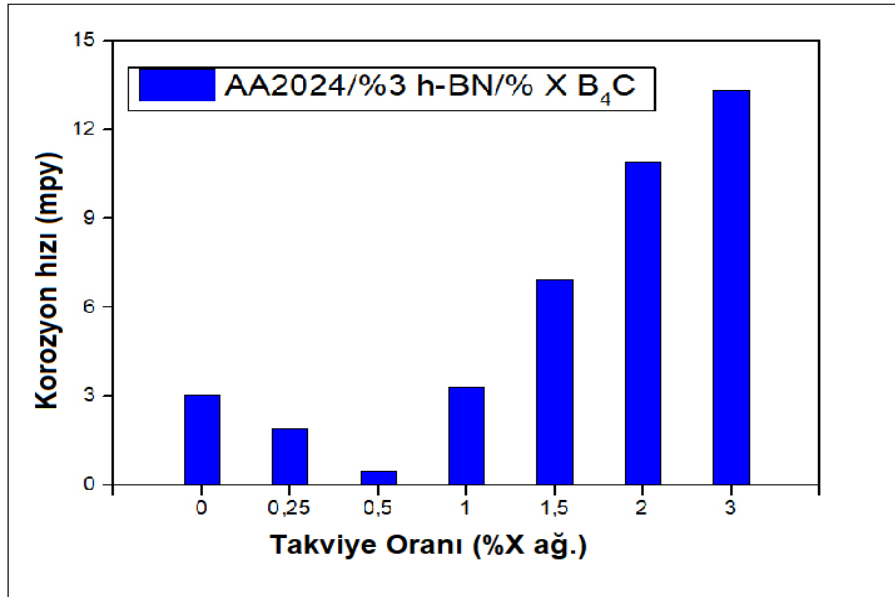
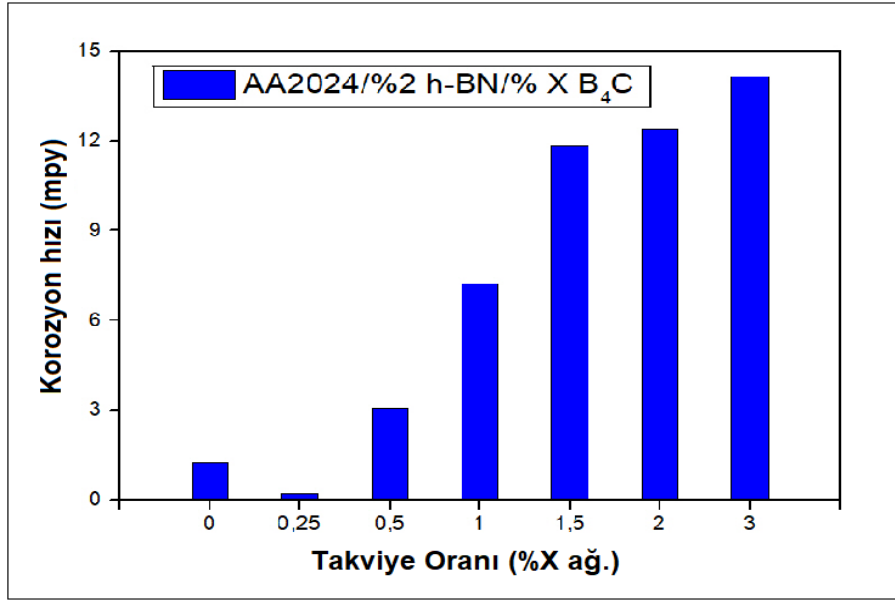




Şekil 3. 52. AA2024/h-BN nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi

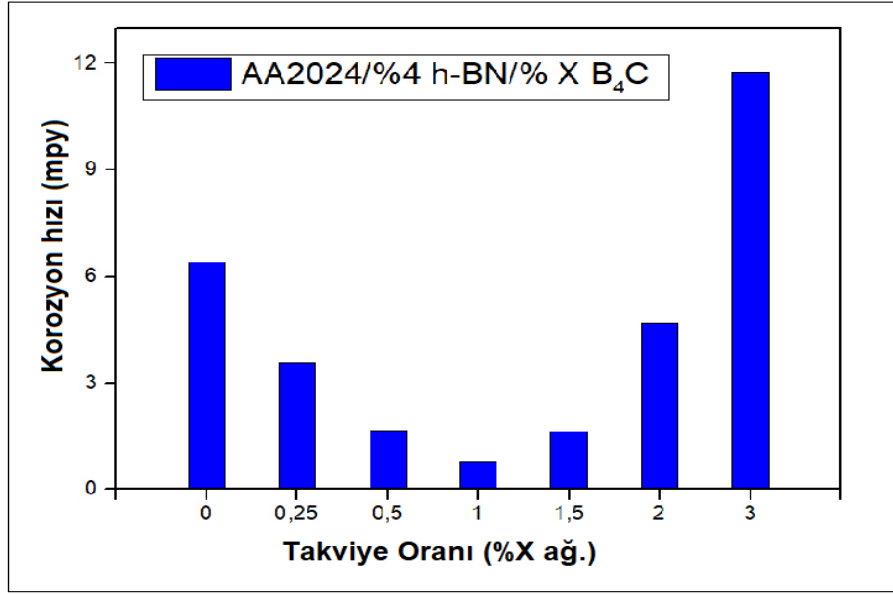


Şekil 3. 53. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi

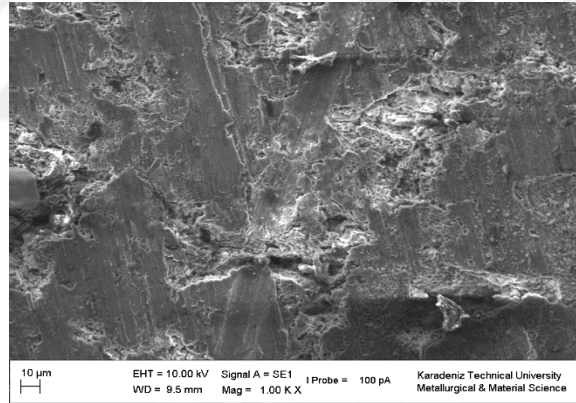


Şekil 3. 54. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerin korozyon hızlarının takviye oranı ile değişimi

Şekil 3.54' ün devamı

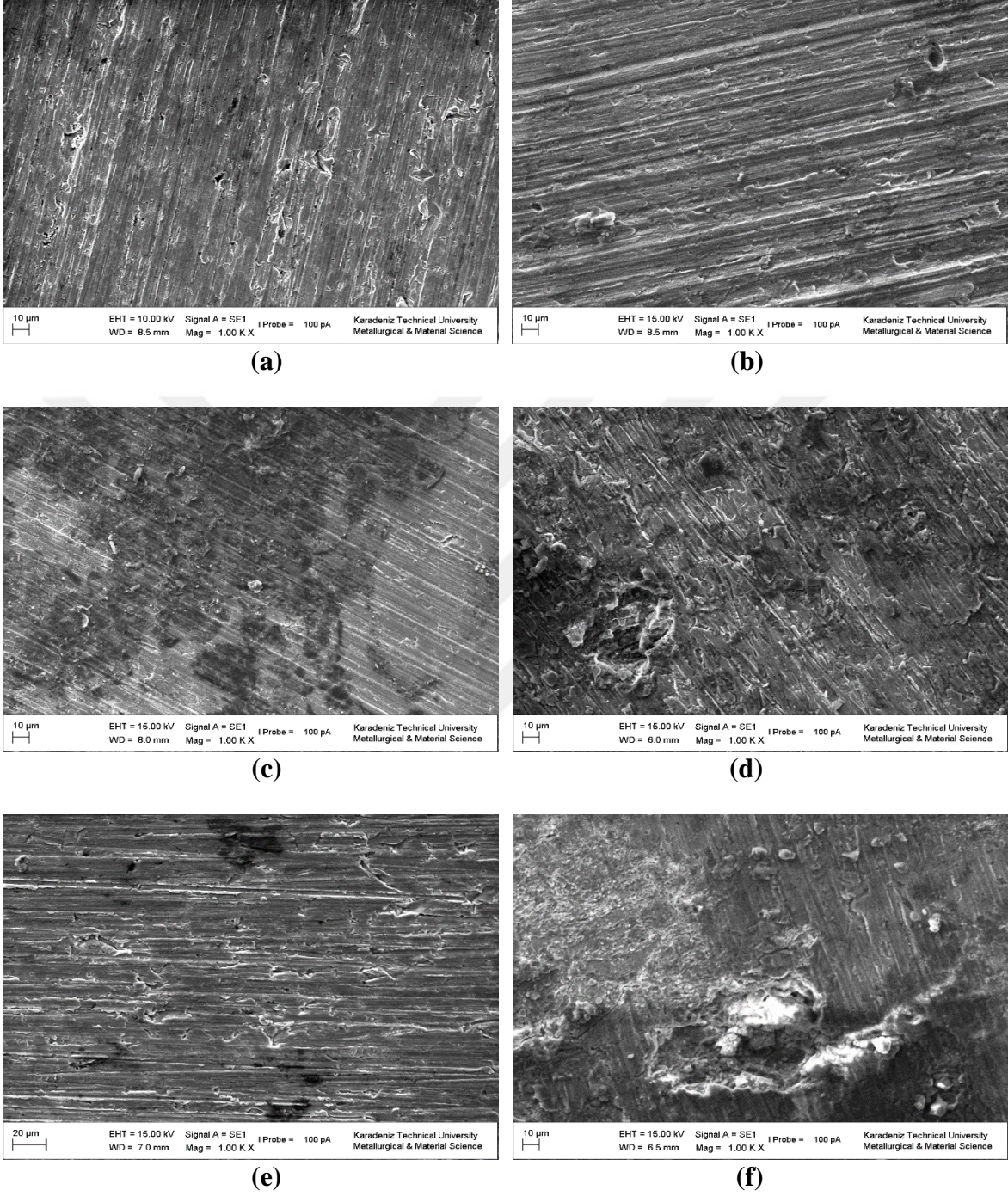


### 3.4.5.1. AA2024 Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi



Şekil 3. 55. Saf AA2024 numunesinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyi

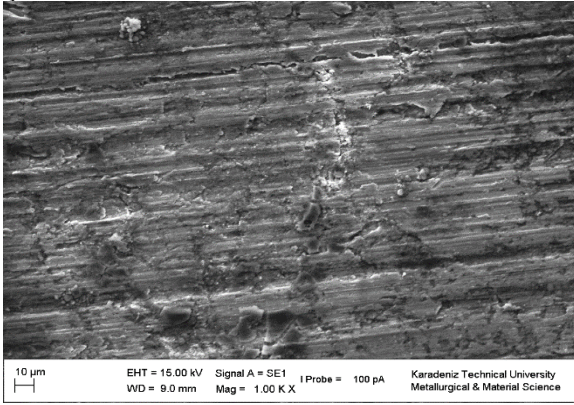
### 3.4.5.2. AA2024/h-BN Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi



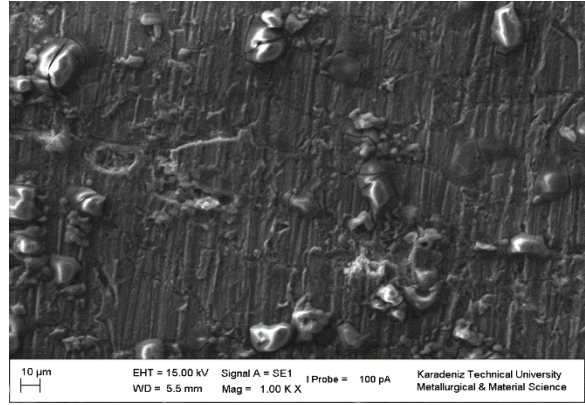
Şekil 3. 56. AA2024/ $B_4C$  nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a) $AN_{0,25}$ , (b) $AN_{0,5}$ , (c) $AN_{1,0}$ , (d) $AN_{1,5}$ , (e) $AN_{2,0}$ , (f) $AN_{3,0}$ , (g) $AN_{4,0}$ , (h) $AN_{5,0}$



Şekil 3.56' nın devamı

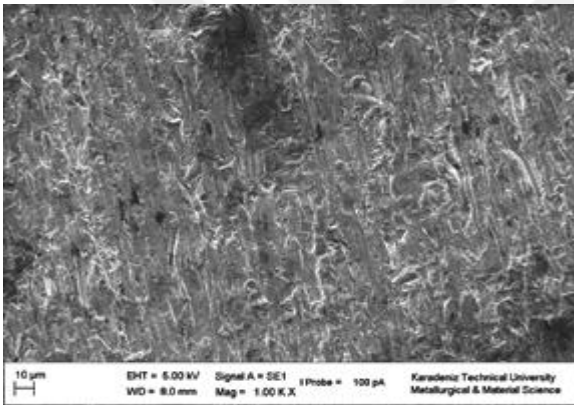


(g)

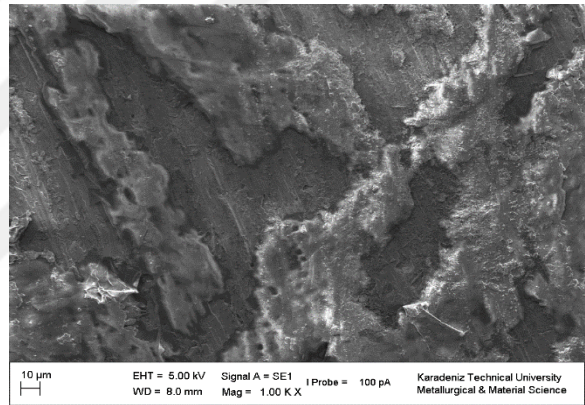


(h)

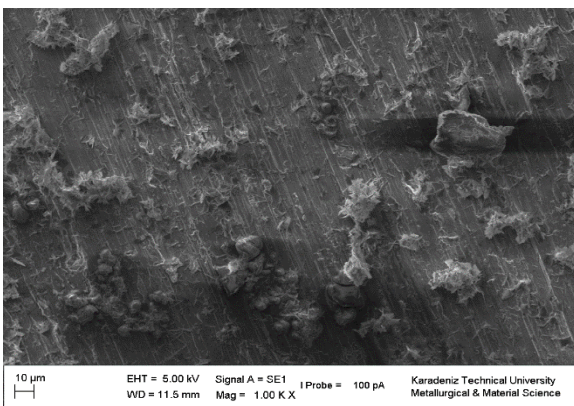
### 3.4.5.3. AA2024/B<sub>4</sub>C Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi



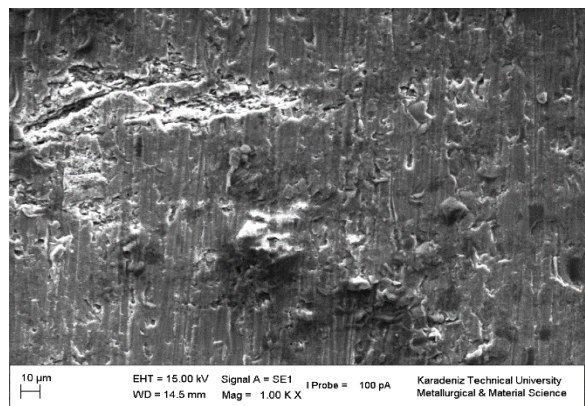
(a)



(b)



(c)

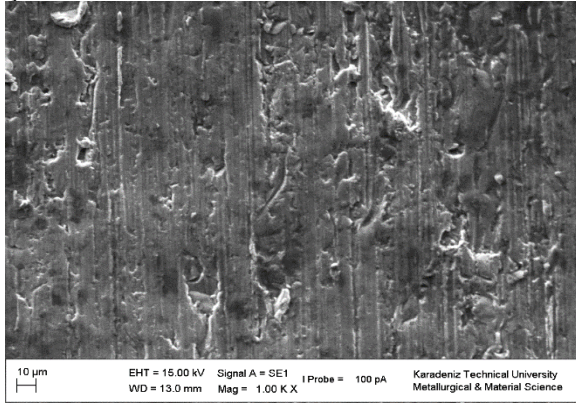


(d)

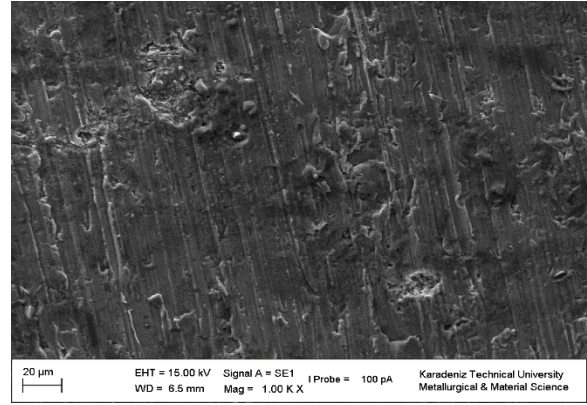
Şekil 3. 57. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AC<sub>0,25</sub>, (b)AC<sub>0,5</sub>, (c)AC<sub>1,0</sub>, (d)AC<sub>1,5</sub>, (e)AC<sub>2,0</sub>, (f)AC<sub>3,0</sub>, (g)AC<sub>4,0</sub>, (h)AC<sub>5,0</sub>



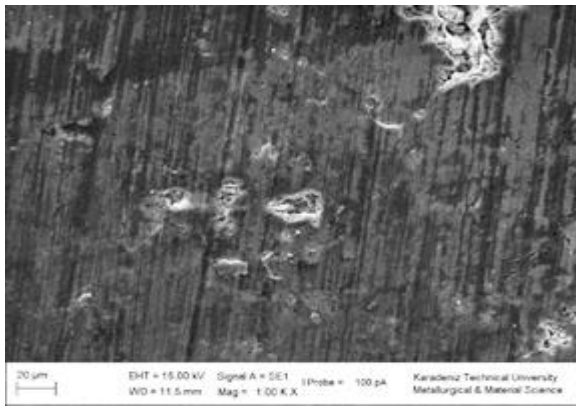
Şekil 3.57' nin devamı



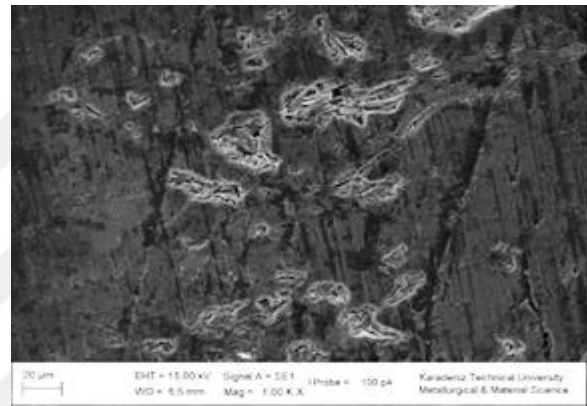
(e)



(f)

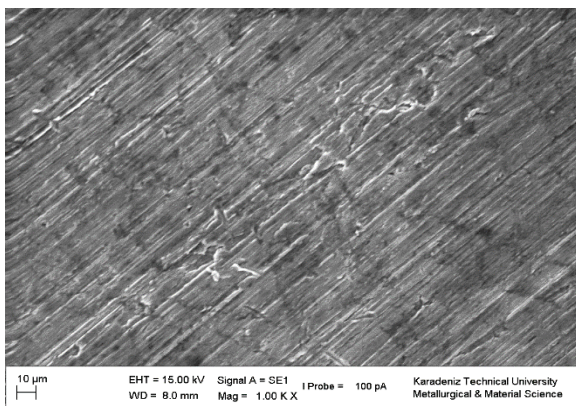


(g)

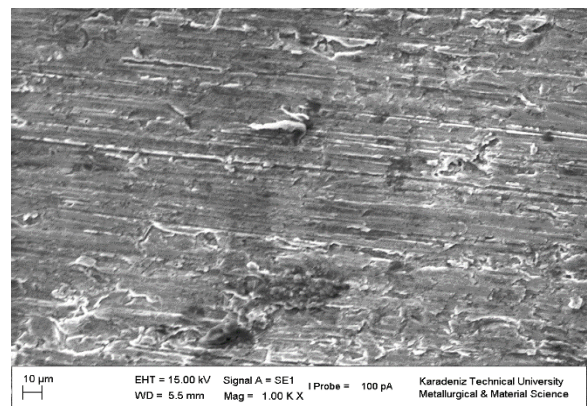


(h)

#### 3.4.5.4. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C Hibrit Nanokompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi



(a)

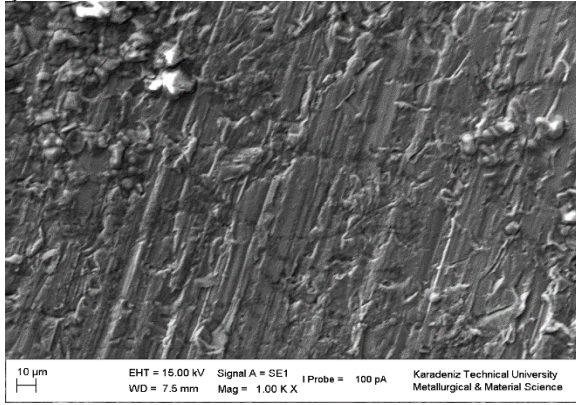


(b)

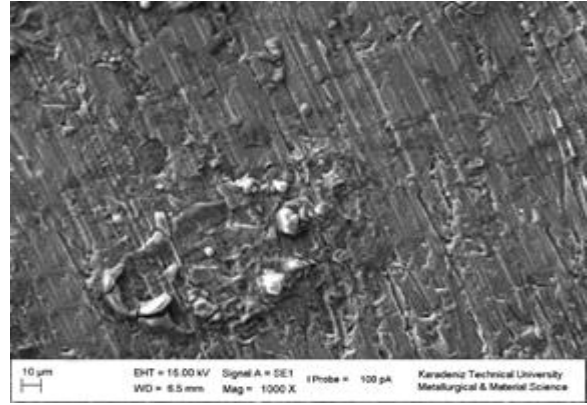
Şekil 3. 58. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>2,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>2,0</sub>C<sub>3,0</sub>



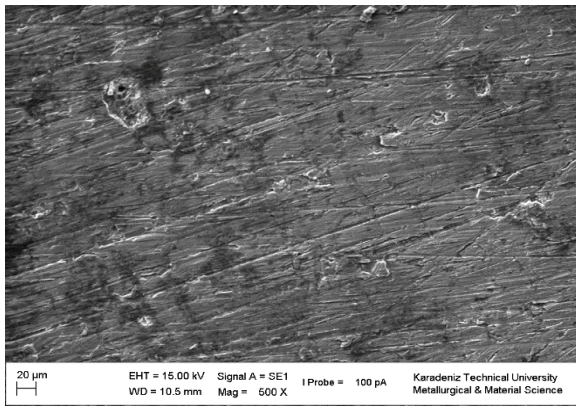
Şekil 3.58' in devamı



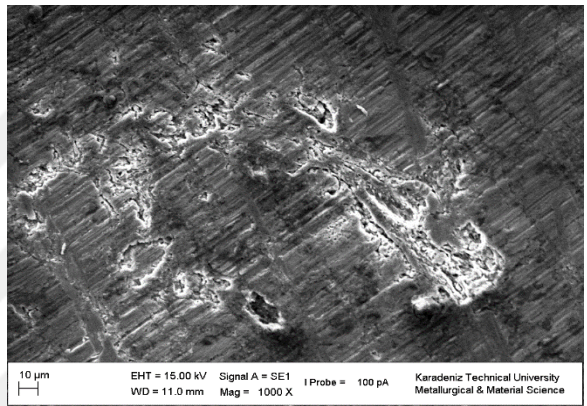
(c)



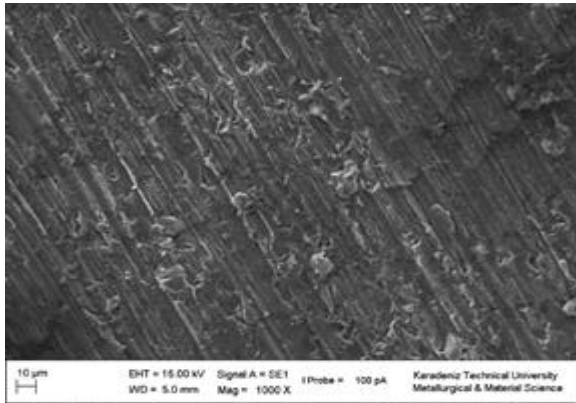
(d)



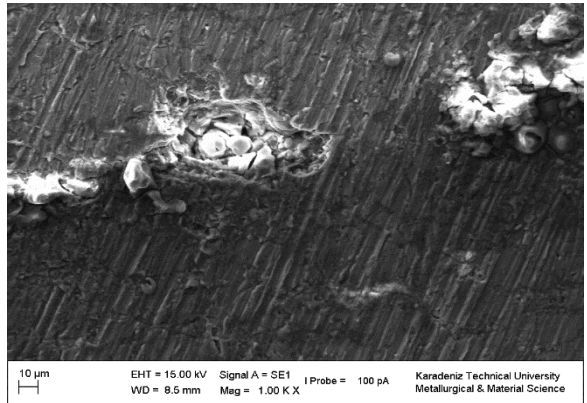
(e)



(f)



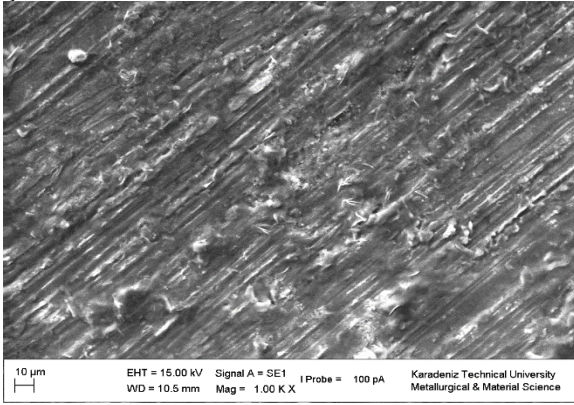
(a)



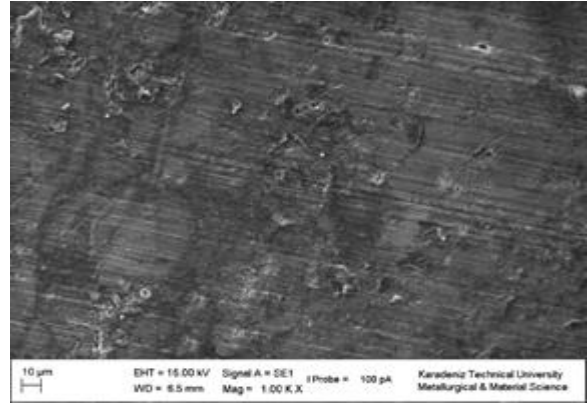
(b)

Şekil 3. 59. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>3,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>3,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>3,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>3,0</sub>C<sub>3,0</sub>

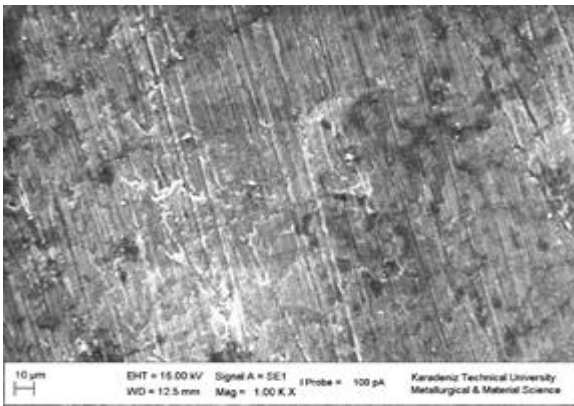
Şekil 3.59' un devamı



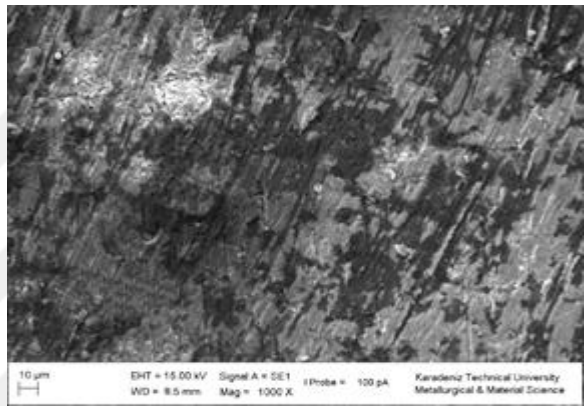
(c)



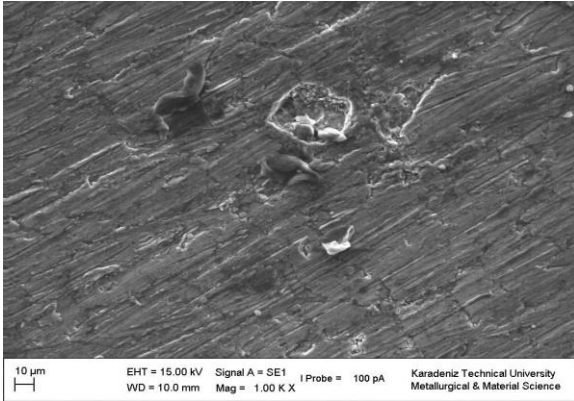
(d)



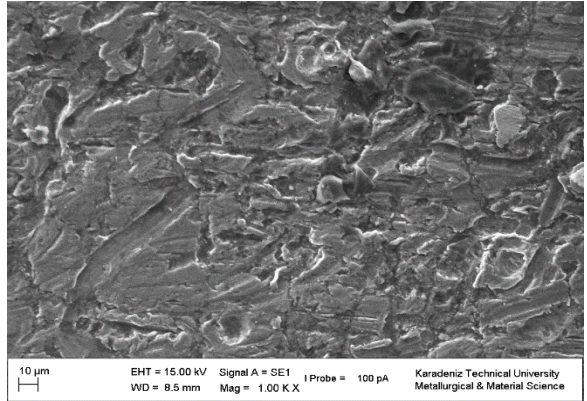
(e)



(f)



(a)

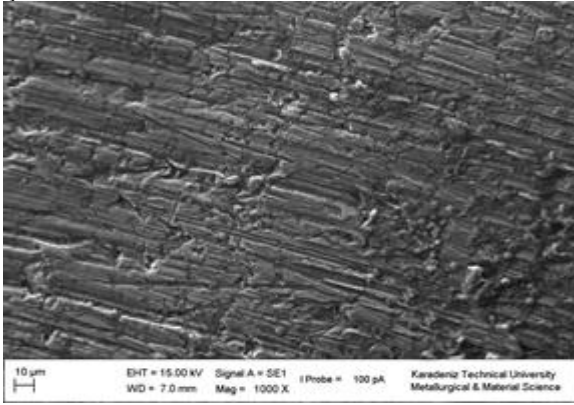


(b)

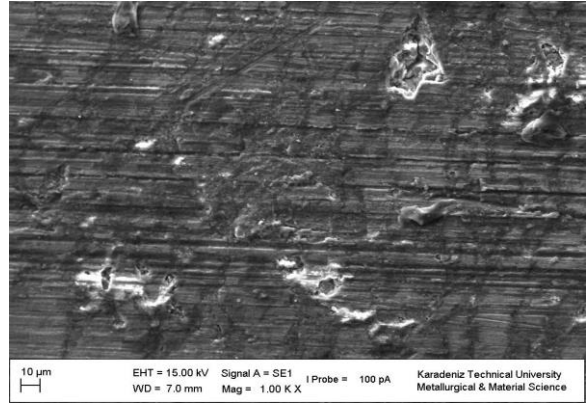
Şekil 3. 60. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinin korozyon testi sonrası oluşan korozyona uğrayan yüzeyleri (a)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,25</sub>, (b)AN<sub>4,0</sub>C<sub>0,5</sub>, (c)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,0</sub>, (d)AN<sub>4,0</sub>C<sub>1,5</sub>, (e)AN<sub>4,0</sub>C<sub>2,0</sub>, (f)AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>



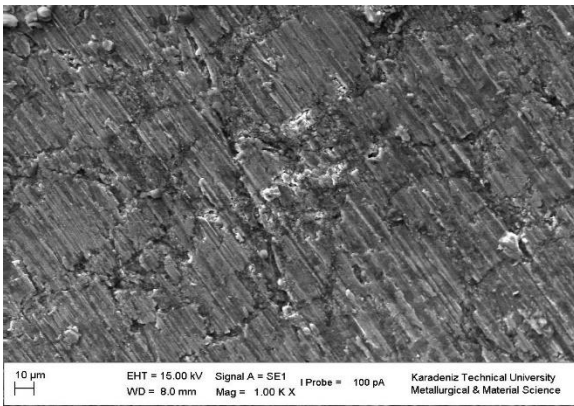
Şekil 3.60' in devamı



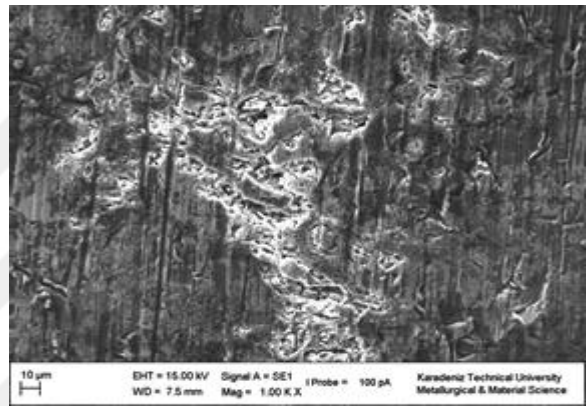
(c)



(d)



(e)



(f)

#### 4. İRDELEME

Üretilen tozların morfolojileri incelendiğinde 1 saatlik mekanik alaşımlama işlemi sonucunda tozların hızlıca kırılarak deforme olduğu görülmüştür. Ayrıca farklı takviye oranlarındaki kompozitlerin 1 saatlik öğütme süresindeki toz boyutları incelendiğinde ise artan takviye oranıyla birlikte partikül boyutlarının azaldığı görülmüştür. Başlangıç tozlarının ortalama partikül boyutu 110  $\mu\text{m}$  iken öğütme işleminin sonunda toplam %7 takviye oranına sahip  $\text{AN}_{4,0}\text{C}_{3,0}$  numunesinde 49,7  $\mu\text{m}$  lik toz boyutuna ulaşılmıştır.

XRD analizlerine bakıldığında elde edilen XRD spektrumlarında Al, h-BN ve  $\text{B}_4\text{C}$  fazları bulunmuştur. Takviye miktarı arttıkça piklerin daha görünür hale geldiği görülmüştür.

Preslenen numunelerden alınan SEM görüntülerinde, takviye partiküllerinin tane sınırlarında biriktiği görülmüştür.

Nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerde artan takviye oranıyla birlikte bağıl yoğunluk azalma göstermiştir. Bunun temel nedeni yapıya katılan takviye malzemesinin presleme esnasında gösterdiği dirençtir. Yani presleme esnasında, takviye partikülleri direnç oluşturarak paketlenmeyi olumsuz etkilemektedir bu yüzden takviye partikülleri paketlenme kabiliyetini düşürerek porozitenin artmasına sebep olmuştur [36]. Sıkıştırma yöntemi olarak seçilen sıcak presleme yöntemi ile elde edilen en yüksek bağıl yoğunluk değerleri %99 değerine yaklaşmıştır. Geleneksel sıkıştırma ve presleme yöntemiyle toz metalurjisi ürünlerde bu değerlere çıkmak oldukça zordur.

AA2024/h-BN nanokompozitlerde artan takviye oranı ile çekme mukavemetinde sürekli bir azalma meydana gelmiştir. Bunun nedeni h-BN'ün karakteristik yapısından kaynaklanmaktadır. h-BN yağlayıcı özelliği ve tabakalı yapısından dolayı presleme esnasında ve çekme testi esnasında tabakalanarak ayrılmaktadır. Bu da çekme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. AA2024/h-BN nanokompozitlerinde en yüksek çekme mukavemeti  $\text{AN}_{0,25}$  numunesinde görülmüştür ve 227,85 MPa'dır. Daha sonra artan takviye ile bu değer  $\text{AN}_{5,0}$  numunesinde 134 MPa' a düşmüştür. AA2024/ $\text{B}_4\text{C}$  nanokompozitlerde ise literatüre uygun şekilde artan takviye oranı ile birlikte mukavemette artış meydana gelmiştir. Çekme mukavemeti %2 takviye oranına sahip  $\text{AC}_{2,0}$  numunesinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Ancak %2 takviye oranından sonra tane sınırlarında



topaklanma bölgelerinin artması, matris ve takviye partikülleri arasındaki bağın zayıflaması mukavemet değerinin azalmasına neden olmuştur. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinde en yüksek çekme mukavemeti değeri 384,20 MPa olup AC<sub>2,0</sub> numunesine aittir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitler incelendiğinde AA2024/h-BN nanokompozitlere paralel olarak artan h-BN ile çekme mukavemeti azalmış, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerdeki gibi artan B<sub>4</sub>C takviyesi ile de çekme mukavemeti artış göstermiştir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitleri arasında en iyi çekme değeri ise 236,70 ile AN<sub>2,0</sub>C<sub>2,0</sub>' dir. AA2024/h-BN nanokompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde bütün yüzeylerin lifsi ve ağısı yapıda olduğu görülmektedir. Zaten çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde değerlerde önemli bir düşüş olmadığı görülmüştür. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde artan takviye ile %2 takviye oranına kadar çekme mukavemetinin arttığı belirtilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde lifsi yapıların %2 takviyeye kadar mevcut olduğu ve %2' den sonra azaldığı görülmüştür.

AA2024/h-BN nanokompozitlerde artan takviye miktarı ile sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Bunun nedeni h-BN' ün karakteristik olarak tabakalı bir yapıya sahip olması ve yağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerinde ise takviye malzemesi B<sub>4</sub>C' ün matris malzemesinden daha sert olduğu için artan takviye miktarı ile sertlik değerlerinde sürekli artış görülmüştür. Presleme esnasında numunenin yüksek takviye miktarına sahip olması AA2024 tozları daha fazla plastik deformasyona uğradığı için takviye ile matris arasındaki gerilmeler artmıştır ve bu da bir dislokasyon mekanizması olan pekleşme sertleşmesi olarak da bilinen mekanizma ile tanımlanabilir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerinde sertlik değerleri h-BN takviye oranının artmasıyla azalma gösterirken, artan B<sub>4</sub>C takviye oranı ile sürekli artış göstermiştir.

AA2024/h-BN nanokompozitlerde, artan takviye miktarı ile ağırlık kaybı azalmış ve aşınma direnci sürekli artmıştır. Artan h-BN miktarıyla birlikte aşınma miktarında meydana gelen bu azalmanın nedeni, bor nitrür tozlarının yüksek yağlayıcı özelliğe sahip olması ve tabakalı bir yapıya sahip olmasıdır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde de artan B<sub>4</sub>C miktarıyla birlikte aşınma dayanımı sürekli olarak artmıştır ve bunun sebebi ise B<sub>4</sub>C tozlarının çok sert olmasıdır. Çünkü malzemenin sertliği arttıkça aşınma miktarı azalmaktadır [41]. AA2024/h-BN ve AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit grupları karşılaştırıldığında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde ağırlık kaybının daha az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin h-BN' e göre daha sert olmasıdır. Yani yapıdaki sert faz miktarının artması aşınma miktarının da azalmasına sebep olmuştur. AA2024/h-

BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde artan takviye miktarı ile aşınma direnci artmıştır ve en iyi aşınma direncine sahip numune AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>' dir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde, yüzeylerde aşınma yönüyle aynı doğrultuda aşınma izleri görülmüştür. Yapılan incelemede aşınma yüzeylerinde kopan ve kopmak üzere olan partiküller, tabakalanmalar, plastik deformasyonlar, çatlaklar ve adhere olmuş partiküller görülmüştür. Küçük yüklerde soğuk yırtılma ve tabakalanmalar daha çok görülmektedir. Çünkü küçük yüklerde yapılan testlerde, numune yüzeyinden kopan parçacıkların ortamdan uzaklaştırılmamasından dolayı, devam eden deney boyunca numune yüzeyine kısmen yapışmıştır. Büyük yüklerde ise daha fazla parçacık kopmuş olmasına rağmen, kopan parçacıklar daha kuvvetli bir şekilde yüzeye tekrardan yapışarak soğuk kaynak olmuştur. Bu yüzden malzeme yüzeyinden kopan partikül miktarı ile ağırlık kaybı miktarı eşit değildir.

AA2024/h-BN nanokompozitlerde %0,25 h-BN takviyesi ile korozyon dayanımı üç katına çıkmıştır ve %0,5 h-BN takviyesi ile I<sub>Kor</sub> değeri 4,59 µA' den 1,65 µA' e düşerken korozyon dayanımı da beş kat artmıştır. %2 h-BN takviyeye kadar korozyon dayanımının arttığı Şekil 3.' de açıkça görülmektedir. %2 h-BN takviyeden sonra artan takviye miktarı ile korozyon dayanımında azalmalar gözlenmiştir. En iyi korozyon dayanımı AN<sub>2,0</sub>' de elde edilmiştir. Bunun nedeni h-BN partikülleri bariyer etkisi yaparak korozyonu önlemesidir. %2 h-BN takviyeden sonra %1,89' dan %6,13' e artan porozite miktarı nedeniyle korozyon dayanımı azalmaktadır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitler arasında ise AC<sub>1,5</sub> numunesi 0,351 mpy korozyon hızı ile en iyi korozyon direncine sahiptir. Artan B<sub>4</sub>C takviye oranı ile korozyon direnci %1,5 B<sub>4</sub>C takviyesi içeren AC<sub>1,5</sub> numunesine kadar artmış daha sonra ise azalma göstermiştir. Bu orana kadar B<sub>4</sub>C iyi bariyer görevi görürken bu orandan sonra artan porozite miktarı ile korozyon direnci azalmıştır. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub> numunesi 0,232 mpy korozyon hızıyla en yüksek korozyon direncine sahiptir. Genel olarak artan takviye oranı korozyon direncini belli bir orana kadar arttırmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle bulunan sonuçlar aşağıda verilmektedir.

1. Morfolojik incelemeler sonucunda 1 saatlik öğütme sonucunda tozların hemen kırıldığı ve plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.
2. 1 saatlik öğütme işleminden sonra artan takviye miktarı ile toz boyutunun azaldığı görülmüştür.
3. Bütün nanokompozit ve hibrit nanokompozit gruplarının bağıl yoğunluk değerleri artan takviye oranı ile azalmıştır. A<sub>0</sub> numunesi elde edilen en yüksek bağıl yoğunluk değerine sahiptir (%99,39).
4. Bütün nanokompozit ve hibrit nanokompozit gruplarının gözeneklilik oranları artan takviye oranı ile artmıştır. AC<sub>5,0</sub> numunesi elde edilen en yüksek gözeneklilik oranına sahiptir (%6,54).
5. Artan h-BN takviye oranıyla AA2024/h-BN nanokompozitlerde sertlik azalmıştır. En yüksek sertlik değerine h-BN takviyeli AN<sub>0,25</sub> numunesidir (86,8 BSD). AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozitlerde artan B<sub>4</sub>C takviye oranı ile sertlik artmıştır. AC<sub>5,0</sub> numunesi 184,4 BSD değeriyle en yüksek sertlik değerine sahiptir. AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde artan h-BN oranıyla sertlik düşerken artan B<sub>4</sub>C oranıyla sertlik artmıştır ve en yüksek sertliğe sahip numune 93,72 BSD değeriyle AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub>' dir.
6. AA2024/h-BN nanokompozitlerde çekme mukavemeti h-BN' ün tabakalı yapısından dolayı artan h-BN oranı ile sürekli azalmıştır. AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde çekme mukavemeti takviye miktarının artmasıyla artmış fakat %2 takviye oranından sonra topaklanma miktarının artması nedeniyle azalmıştır. AA2024/h-BN nanokompozitlerde elde edilen en yüksek çekme mukavemeti değeri 227,85 MPa iken, AA2024/B<sub>4</sub>C nanokompozit ve AA2024/h-BN/B<sub>4</sub>C hibrit nanokompozitlerde en

iyi çekme mukavemeti değerini %2 takviyeli numuneler göstermiştir ve sırasıyla 384,20 MPa ve 236,7 MPa' dır.

7. Bütün kompozitlerde artan takviye miktarı ile aşınma sırasında meydana gelen ağırlık kaybı miktarı azalmıştır. En az ağırlık kaybı AN<sub>4,0</sub>C<sub>3,0</sub> numunesinde meydana gelmiştir.

8. Artan yük miktarı ile birlikte aşınma sırasında meydana gelen ağırlık kaybı miktarı artmıştır.

9. Tüm nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testleri sonuçlarına göre en iyi korozyon dayanımına sahip AN<sub>2,0</sub>C<sub>0,25</sub> numunesinin korozyon hızı 0,232 mpy olarak bulunmuştur. Genel anlamda takviye oranı arttıkça tüm gruplarda korozyon dayanımında bir noktaya kadar artış görülürken daha sonra ise sürekli bir düşüş görülmüştür.



## 6. ÖNERİLER

1. Nanokompozitlere ve hibrit nanokompozitlere yaşlandırma ısıl işlemi yapılarak, mekanik özellikler iyileştirilebilir.
2. Üretilmiş olan nanokompozitlerin mikroyapısal tayininde geçirimli elektron mikroskopundan (TEM) faydalanılabilir.
3. Farklı öğütme süreleri denenebilir.
4. Nanokompozitlerin NaCl dışında farklı ortamlarda da korozyon davranışları incelenebilir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Cornie, J. A., et al., Solidification Processing of Metal Matrix Composites, American Ceramic Society Bulletin, 65,2 (1986) 293-304.
2. Jain, S., Nano-Scale Events with Macroscopic Effects in Polypropylene/Silica Nanocomposites, Phd Thesis, Tue, Eindhoven, The Netherlands, 2005.
3. Askeland, D.R., The Science and Engineering of Materials, Çeviri Dr. Erdoğan, M., 1. Cilt, 3.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1998.
4. Berthelot, J. M. ve Cole, J. M., Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analyses. Springer, New York, 1999.
5. Akovali, G., Handbook of Composite Fabrication. iSmithers Rapra Publishing, Shrewsbury, Shropshire, 2001.
6. Demirel, M., Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni<sub>3</sub>Al Metallerarası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
7. Mertgenç, E., Savurmalı Döküm Yöntemiyle Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimini Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2004.
8. Çanakçı, A., AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Vortex Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
9. Hull, D. ve Clyne, T. W., An Introduction to Composites Materials, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
10. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, 91-134, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
11. Kumral, Ç., Sıkıştırma Döküm ile Üretilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli AA6061 Kompozit Malzemesinin Mekanik Özellikleri ve Isıl İşlem Davranışlarının Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
12. Ögel, B., Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Şubat 1997, İstanbul, Bildiriler Kitabı 1: 639-644.
13. Altınsoy, İ., Alümina Takviyeli Bakır Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.

14. Taşçı, U., AA2014-B<sub>4</sub>C Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilirliği, Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
15. Huda, M. D., Hashmi, M. S. J., ve El-Baradie, M. A., MMCs: Materials, Manufacturing and Mechanical Properties, In Key Engineering Materials, 104 (1995) 37-64.
16. 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: Applied Science and Manufacturing, 30 (1999) 1415-1421.
17. Ma, Q. S., Chen, Z. H., Zheng, W. W. ve Hu, H. F., Processing and Characterization of Particles Reinforced Si-O-C Composites via Pyrolysis of Polysiloxane with SiC or/and Al Fillers, Ceramics International, 31, 8 (2005) 1045-1051.
18. Bostan, B., Özdemir, A. T. ve Kalkanlı, A., Microstructure Characteristics in Al-C System After Mechanical Alloying and High Temperature Treatment, Powder Metallurgy, 47, 1 (2004) 37-42.
19. Stefanescu, D. M., Dhindaw, B. K., Kacar, S. A. ve Moitra, A., Behavior of Ceramic Particles at the Solid-Liquid Metal Interface in Metal Matrix Composites, Metallurgical Transactions A, 19, 11 (1988) 2847-2855.
20. Zhou, W., Hu, W. ve Zhang, D., Study on The Making of Metal-Matrix Interpenetrating Phase Composites, Scripta Materials, 39, 12 (1998) 1743-1748.
21. Yılmaz, M., Altıntaş, S., Parçacık SiC Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mikroyapı ve Aşınma Özellikleri, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Mayıs 1993, Ankara, Bildiriler Kitabı: 1175-1181.
22. Gedeon, S. A. ve Tangerini, I., A New Method for Bonding Metal Matrix Composite During Casting, Mat. Sci. & Eng., Elsevier Sequoia A, 144 (1991) 237-241.
23. Berghezan, A., Basic Design Concepts and Specific Methods for the Fabrication of Metal Matrix Composites Materials, Advance in Composite Materials, (1978) 5-17.
24. 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.
25. Kreider, K. G., In Composite Materials, Ed By K. G. Kreider, 4:1, Elsevier, 1974.
26. Kamat, S. V., Fracture Toughness of Particulate-Reinforced Aluminium Matrix Composites, Ph.D. Thesis, The Ohio State University, Columbus, 1988.

27. Alpas, A. T. ve Zhang, J., Effect of Microstructure (Particulate Size and Volume Fraction) and Counterface Material on the Sliding Wear Resistance of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites, Metallurgical and Materials Transactions A, 25 (1994) 969-983.
28. Gonzalez-Doncel, G. ve Sherby O. D., High Temperature Creep Behavior of Metal Matrix Aluminum- SiC Composites, Acta Metal Materials, 41 (1993) 2797-2805.
29. Song, S. G., Shi, N., Gray, G. T. ve Roberts, J. A., Reinforcement Shape Effects on the Fracture Behavior and Ductility of Particulate-Reinforced 6061-Al Matrix Composites, Metallurgical and Materials Transactions A, 27 (1996) 3739-3746.
30. Hadianfard, M. J., Healy, J. ve Mai, Y. W., The Influence of Temperature on the Mechanical and Fracture Properties of a 20V% Ceramic Particulate-reinforced Al Matrix Composites, Journal of Materials Science, (1994) 3906-3912.
31. Waku, Y., Suzuki, M., Oda, Y. ve Kohtoku, Y., Influence of Particle Size and Volume Percent of Flaky Mo Particles on the Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Mo Composites, Metallurgical and Materials Transactions A, (1996) 3307-3317.
32. Lilholt, H., Mechanical Behavior of Composites, Advance in Composites Materials, (1978) 209.
33. Eker, A. A., Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul, 2008.
34. Contreras, A., Lopez, V. H. ve Bedolla, E., Mg/TiC Composites Manufactured by Pressureless Melt Infiltration, Scripta Materialia, 51, 3 (2004) 249-253.
35. 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.
36. Kumdalı, F., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
37. Burgucu, S., 7075 Alüminyum Alaşımlarının Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
38. 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, November 2001, Oh, 298-305.
39. Nazik, C., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.



40. Varol, T., AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
41. Toptan, F., Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, İstanbul, 2012.
42. Cayron, C., 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-0.5Ag Squeeze-Cast Composites, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2000.
43. Froyen, L., Verlinden, B., Aluminium Matrix Composites Materials, Talat Lecture 1402, Eaa European Aluminum Association, University of Leuven, Belgium, 1994.
44. Rooy, E. L., Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Asm Metals Handbook, 2, 10. Baskı, 3-14, Asm International, Metals Park, Ohio, 1990.
45. Bonollo, F., Urban, J., Bonatto, B. ve Botter, M., Gravity and Low Pressure Die Casting of Aluminium Alloys: A Technical and Economical Benchmark, La Metallurgia Italiana, 97, 6 (2005) 23-32.
46. 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.
47. Doğan, M., Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1989.
48. Meyveci, A., Yaşlandırılmış 2xxx ve 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Karabük, 2007.
49. Karakışlak, M., Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1978.
50. Patır, A., AA2024-B<sub>4</sub>C Kompozitlerin Özelliklerine Yaşlandırma Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
51. Askeland, D. R., The Science and Engineering of Materials, 3rd. Edition, 812, Wadsworth Publishing Company, 1994.
52. Altenpohl, D. G., Aluminum: Technology, Applications, and Environment, The Minerals, Metals and Materials Society, (1998) 59-71.
53. Yılmaz, T. A., AA2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Üretimi ve Yaşlandırılabilme Özelliklerinin Araştırılması, Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.

54. Durmuş, S., Akgün, S. ve Şahin, S., Çökeltme Sertleştirilmesi Uygulanmış AA7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikroyapı ile Değişiminin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats'09), Karabük, 2009.
55. Kerti, I. Ç., Gaz Enjeksiyon ve Elementel Karbon İlavesi Yöntemleri ile TiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
56. Mindivan, H., Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
57. 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.
58. Çavuşoğlu, Ü., Magnezyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
59. Ying, D. Y., ve Zhang, D.L., Processing of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrix Nanocomposite Materials by Using High Energy Ball Milling, Materials Science and Engineering A, 286 (2000) 152-156.
60. Zahid, G. H., Azhar, T., Musaddiq, M., Rizvi, S. S., Ashraf, M., Hussain, N. ve Iqbal M., In Situ Processing and Aging Behaviour of An Aluminium/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite, Materials And Design, 32 (2011) 1630-1635.
61. Anvari, S. Z., Karimzadeh, F. ve Enayati, M. H., Synthesis and Characterization of NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Powder by Mechanical Alloying, Journal of Alloy and Compounds, 477 (2009) 178-181.
62. Çanakçı, A., Varol, T. ve Ertok, Ş., The Effect of Reinforcement Ratio on Hardness of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Fabricated by Mechanical Alloying Technique, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ekim 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı: 232-240.
63. Güler, C., Alüminyum Matrisli SiC Takviyeli Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 2012.
64. Greenwood, N. N., Earnshaw, A., Chemistry of The Elements, Second Edition, 129-213, Burglinton: Butterworth-Heinemann, 2012.
65. Karakoç, H., TM Yöntemi ile B<sub>4</sub>C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.

66. <http://www.nnt.com.tr/bor/bor-kullanım-alanlari.php> 11.04.2017
67. <https://www.bilgiustam.com/bor-madeni-nedir-onemi-ve-kullanım-alanlari-nelerdir/> 11.04.2017
68. <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/kullanım-alanlari> 11.04.2017
69. Ebin, B., Hexagonal Boron Nitride, Hard Metal Compounds Lecture, İ.T.Ü., İstanbul, 2007.
70. Haubner, R., Wilhelm, M., Weissenbacher, R. ve Lux, B., High Performance Non-Oxide Ceramics II, 102, Springer, Berlin, 2003.
71. Wentorf, R. H. Jr., Cubic Form of Boron Nitride, The Journal of Chemical Physics, 26, 4 (1957) 956.
72. Jansen, M., Jäschke, B. ve Jäschke, T., Amorphous Multinary Ceramics in the Si-B-N-C System, High Performance Non-Oxide Ceramics I, Springer, Berlin, 2002.
73. Bundy, F. P., Wentorf Jr, R. H., Direct Transformation of Hexagonal Boron Nitride to Denser Forms, The Journal of Chemical Physics, 38, 5 (1963) 1144-1149.
74. Töre, İ., Hegzagonal Bor Nitrür Toz Sentezi ve Sinterleme Davranışları, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
75. Pease, R. S., An X-Ray Study of Boron Nitride, Acta Crystallographica, 5, 3 (1952) 356- 361.
76. Pease, R. S., 1950. Crystal Structure of Boron Nitride, Nature, 165 (1950) 722.
77. Paine, R. ve Narula, C. K., Synthetic Poutes to Boron Nitride, Chemical Reviews, 90, 1 (1990) 73-91.
78. Gardinier, C. F., Physical Properties of Superabrasives, American Ceramic Society Bulletin, 67, 6 (1988) 1006-1009.
79. Greick, R. ve Perry, C. H., Normal Modes in Hegzagonal Boron Nitride, Physical Review, 146, 2 (1966) 543- 546.
80. Hagiwara, H., Tanji, H. ve Tamaki, S., Inorganic Synthetics Containing Boron (BN, B<sub>4</sub>C, Lab6) and Their Application, Ceramic Data Book, (1986) 201- 213.
81. Kempfer, L., The Many Faces Of Boron Nitride, Materials Engineering, 3 (1990) 41-44.
82. Lipp, A., Shwetz, K. A. ve Hunold, K., Hegzagonal Boron Nitride: Fabrication, Properties and Applications, Journal of European Ceramic Society, 5 (1989) 3-9.

83. Kimura, Y., Wakabayashi, T., Okada, K. Wada, T. ve Nishikawa, H., Boron Nitride As a Lubricant Additive, Wear, 232, 2 (1999) 199- 206.
84. Saito, T. ve Honda, F., Chemical Contribution to Friction Behaviour of Sintered Hexagonal Boron Nitride in Water, Wear, 237, 2 (2000) 253-260.
85. Osborne, T. W., New Application for Boron Nitride Coatings, Ceramic Industry, 9 (1999) 55-57.
86. Lelonis, D. A., Boron Nitride Powder a High Performance Alternative for Solid Lubricants, Ge Advanced Ceramics, (2003).
87. Jones, B. R., Prunier, A. R. Jr. ve Pyzik, A. J., Brake or Clutch Components Having a Ceramic-Metal Composite Friction Material, United States Patent, No: 5957251, 1999.
88. Rallini, M., Torre, L., Kenny, J. M. ve Natali, M., Nanofillers in Polymers, 1-9, Elsevier, 2015.
89. Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P. ve Froyen, L., Microstructure and Interface Characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Al Matrix Composites: A Comparative Study, 4th International Conference On Mechanical Engineering, Ağustos 2001, In Proc. ICME 175-181.
90. Crouch, I. G., Appleby-Thomas, G. ve Hazell, P. J., A Study of the Penetration Behaviour of Mild-steel-cored Ammunition Against Boron Carbide Ceramic Armour. International Journal of Impact Engineering, (2015) 203-211.
91. Park, J. J., Hong, S. M., Lee, M. K., Rhee, C. K. ve Rhee, W. H., Enhancement in the Microstructure and Neutron Shielding Efficiency of Sandwich Type of 6061Al-B<sub>4</sub>C composite material via hot isostatic pressing. Nuclear Engineering and Design, 282 (2015) 1-7.
92. Prasad, S. V. ve Asthana, R., Aluminum Metal-matrix Composites for Automotive Applications: Tribological Considerations, Tribology Letters, 17, 3 (2004) 445-453.
93. <http://www.bortechnic.com/tr/urunlerimiz/bor-karbur-savunmada-kullanim.html> 20.11.2017
94. <http://www.boroptik.com/index.php/tr/urun/urun/k/5/u/1/ad%C4%B1/Bor+Karb%C3%BCr> 20.11.2017
95. <http://www.nurolteknoloji.com/tr/urunler/balistik-zirh-plakalari.html> 20.11.2017
96. Karabacak, A. H., Al<sub>2024</sub>/B<sub>4</sub>C/SiC Nanokompozit ve Hibrit Nanokompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2018.
97. Ramsden, J. J., Applied Nanotechnology: The Conversation of Research Results to Products, Elsevier Press Burlington, 2009.

98. Çıracı, S., Süzer, Ş., Erdemir, A., Dağ, Ö., Bengü, E., Bayındır, M., İlday, Ö., Senger, T., Dana, A., Aydınli, A., Gemici, Z., Yılıgör, İ., Özgür, H., Yeşilyurt, Ö., Durgun, E., Kocabaş, A., Köylü, Ö. ve Gürsen, İ., Türkiye' de Nanoteknoloji, Bilim ve Teknik Dergisi -Yeni Ufuklara, 469 (2006) 1-23.
99. Gürmen, S., Stopic, S. ve Frederich, B., Synthesis of Nanosized Spherical Cobalt Powder by Ultrasonic Spray Pyrolysis, Material Research Bulletin. 41 (2006) 1882-1890.
100. Pozas, R., Ocana, M., Morales, M, P., Bonville, P. ve Serna C. J., Improving Co Distrubiton in Acicular Fe-Co Nanoparticles and Its Effect on Their Properties, Nanotechnology, 18, 20 (2007) 205601.
101. Dalmış, R., Mekanik Alaşım 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, 2014.
102. Bilici, İ., Ti-Fe Alaşımından Basınçsız İnfiltrasyon Yöntemiyle Seramik Metalik Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
103. Candan, E., Effect of Alloying Additions on the Porosity of SiCp Preforms Infiltrated by Aluminum, Materials Letters, 60 (2006) 1204-1208.
104. Tekmen, Ç., Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
105. Xing, C., Chengxiao, Y., Leding, G. ve Biao, Y., Tib<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Particle Reinforced Aluminum Fabricated by Spray Deposition, Materials Science And Engineering: A, 496 (2008) 52-58.
106. Manchang, G., Jianmin, H. ve Peiyong, L., Fabrication and Characterization of Cast Magnesium Matrix Composites by Vacuum Stirr Casting Process, Journal of Material Science, 12 (2003) 128-134.
107. Abbasipour, B., Niroumand, B. ve Monir, Vaghefi, S. M., Compcasting of A356-CNT Composite, Trans Nonferrous Met. Soc., 20 (2010) 1561-1566.
108. Sasaki, G., Yoshida, M., Fuyama, N. ve Fujii, T., Modeling of Compcasting Process and Fabrication of AZ91D Magnezyum Alloy Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002) 151-155.
109. Dikici, B., Bedir, F. ve Gavgalı, M., Al-TiC In-Situ Nano Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Mayıs 2009, Karabük, Bildiriler Kitabı: 13-15.



110. Özçelik, Ö., In-situ Alumina Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
111. Arık, H., Production and Characterization of In-Situ Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> Reinforced Aluminum-Based Composite Produced by Mechanical Alloying, Materials and Design, 25 (2004) 31-40.
112. Hongming, W., Guirong, L., Yutao, Z. ve Gang, C., In-Situ Fabrication and Microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 2881-2885.
113. Maleki, A., Shafyei, A. ve Niroumand, B., Effects of Squeeze Casting Parameters on the Microstructure of LM13 Alloy, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 3790-3797.
114. Kılıç, C., Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilmiş ve Soğuk haddelenmiş AlMg<sub>3</sub>/SiCp Kompozitinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2008.
115. Goh, C. S., Soh, K. S., Oon, P. H. ve Chua, B. W., Effect of Squeeze Casting Parameters On The Mechanical Properties of AZ91-Ca Mg Alloys, Materials And Design, 31 (2010) 50-53.
116. Gündüz, O., Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Zn Kaplamaların Farklı Bias Voltajlarında Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
117. Ekerer, F.A., Alumina-SiC Parçacık Destekli T/M Al Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
118. Jacobs, A. J., ve Kilduff, T.F., Engineering Materials Technology: Structure, Processing, Properties and Selection, 645, 5. Edition, 357-397, Prentice-Hall Inc., USA, 2003.
119. 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.
120. Özkaya, S., Alüminyum-B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi, İç Yapı, Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
121. Söyler, A. U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.

122. Newkirk, J. W. ve Kosher, R. A., Designing with Powder Metallurgy Alloys, Handbook of Mechanical Alloy Design, (2004).
123. Hale, R., Powder Metallurgy Process and Applications, AE 510 Research Project, University of Kansas, Lawrence, 2003.
124. Sağırılı, A., Mekanik Ekzantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1990.
125. Palacı, Y., Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
126. Upadhyaya, G. S., Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties, and Applications, Wiley, New York, 2000.
127. Kang, S. J. L., Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure, Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam 2005.
128. German, R. M., Powder Metallurgy Science, Princeton, New Jersey, 1994.
129. Suryanarayana, C., Ivanov, E. ve Boldyrev, V. V., The Science and Technology of Mechanical Alloying, Materials Science and Engineering A, 304-306 (2001) 151-158.
130. Keçeli, Z., Characterization Investigations of Powder and Sintered Al-SiC and Al-B<sub>4</sub>C Composites Developed via Mechanical Alloying, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
131. Aktaş, H., 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, 2007.
132. Özyürek, D., Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Titanyum Bazlı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
133. 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.
134. 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.
135. Abdollahi, A., Alizadeh, A. ve Baharvandi, H. R., Dry Sliding Tribological Behavior and Mechanical Properties of Al<sub>20</sub>24-5 wt.%B<sub>4</sub>C Nanocomposite Produced by Mechanical Milling and Hot Extrusion, Materials and Design, 55 (2014) 471-481.

136. Firestein, K. L., Corthay, S., Steinman, A. E., Matveev, A. T., Kovalskii, A. M., Sukhorukova, I. V., Golberg, D. ve Shtansky, D.V., High Strength Aluminum Based Composites Reinforced with BN, AlB<sub>2</sub> and AlN Particles Fabricated via Reactive Spark Plasma Sintering of Al-BN Powder Mixtures, Materials Science & Engineering A, 681 (2017) 1-9.
137. Firestein, K. L., Steinman, A. E., Golovin, I. S., Cifre, J., Obratsova, E. A., Matveev, A. T., Kovalskii, A. M., Lebedev, O. I., Shtansky, D. V. ve Golberg, D., Fabrication, Characterization and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Al-BN Nanoparticle Composites, Materials Science & Engineering A, 642 (2015) 104-112.
138. Patil, B. P. ve Deshmukh, P. V., Prediction of Wear Characteristics of Stir-Cast Aluminium 2024 Alloy Reinforcing Hexagonal Boron Nitride, International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, (2017) 686-691.
139. Gostariani, R., Asadabad, M. A., Paydar, M. H. ve Ebrahimi, R., Morphological and Phase Evaluation of Al/15 wt.% BN Nanocomposite Synthesized by Planetary Ball Mill and Sintering, Advanced Powder Technology, 28 (2017) 2232–2238.
140. Zheng, R., Chen, J., Zhang, Y., Ameyama, K. ve Ma, C., Fabrication and Characterization of Hybrid Structured Al Alloy Matrix Composites Reinforced by High Volume Fraction of B<sub>4</sub>C Particles, Materials Science & Engineering A, 601 (2014) 20-28.
141. Gökmen, U., Sıcak Ekstrüze Edilmiş Al2024 Matrisli B<sub>4</sub>C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Politeknik Dergisi, 19, 4 (2016) 445-453.
142. Harichandran, R. ve Selvakumar, N., Microstructure and Mechanical Characterization of (B<sub>4</sub>C + h-BN)/Al Hybrid Nanocomposites Processed by Ultrasound Assisted Casting, International Journal of Mechanical Sciences, (2017) 1–13.
143. Çanakçı, A. ve Varol, T., Production and Microstructure of AA2024 – B<sub>4</sub>C Metal Matrix Composites by Mechanical Alloying Method, Usak University Journal of Material Sciences, 1 (2012) 15-22.
144. Varol, T. ve Çanakçı, A., Effect of Particle Size and Ratio of B<sub>4</sub>C Reinforcement on Properties and Morphology of Nanocrystalline Al2024-B<sub>4</sub>C Composite Powders, Powder Technology 246 (2013) 462-472.

## ÖZGEÇMİŞ

Kürşat Alp ARPACI 1992 yılında Çorum' da doğdu. 2010 yılında Amasya Anadolu Lisesi' nden mezun olduktan sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı ve 2015 yılında mezun oldu. Lisans eğitiminin ardından, ara vermeden Karadeniz Teknik Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince uluslararası sempozyumlarda sunulmuş 3 adet bildirisi bulunmaktadır.

