

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALUMİNYUM- B<sub>4</sub>C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ  
NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ , İÇ YAPI, FİZİKSEL, MEKANİK VE  
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Serdar ÖZKAYA**

**ARALIK 2014**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME ANABİLİM DALI**

**ALUMİNYUM- B<sub>4</sub>C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ  
NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ,İÇ YAPI, FİZİKSEL, MEKANİK VE  
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh.Serdar ÖZKAYA**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.12.2014  
Tezin Savunma Tarihi : 25.12.2014**

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

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Serdar Özkaya tarafından hazırlanan**

**ALUMİNYUM- B<sub>4</sub>C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ  
NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ, İÇ YAPI, FİZİKSEL, MEKANİK VE  
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09 / 12 / 2014 gün ve 1580 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. M. Vefa Akpınar** .....

**Üye : Doç. Dr. Aykut Çanakçı** .....

**Üye : Doç. Dr. Hamdullah Çuvalcı** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, en genel ifadeyle fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki veya daha malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu çok üstün özellikli malzemelerdir. Kompozit malzemelerin sayısız kullanım alanı olmasına rağmen, her geçen gün bu malzemelerin yeni özellikleri keşfedilmekte ve gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır. Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların neticesinde, “nanokompozit” olarak adlandırılan geleneksel kompozit yapılarından daha gelişmiş ve daha üstün özellikler sergileyen kompozit sınıfı ortaya çıkmıştır. Büyük taneler içeren kristal yapıyla kıyaslandığında nanokompozit malzemeler, daha yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek difüzyon hızı içerir ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilmelerinde daha az sinterleme süreleri yeterli olmaktadır.

Bu çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli metal matrisli nanokompozitler mekanik alaşımlama yöntemi ile üretildi. Üretilen tozların karakterizasyonu ve üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri araştırıldı. Çalışmada takviye malzemesi olarak 5µm başlangıç boyutuna sahip B<sub>4</sub>C parçacıkları kullanılırken takviye oranı olarakta ağırlıkça üç farklı oran kullanılmıştır. Toz karakterizasyonu olarak öğütme süresi, takviye boyutu ve takviye oranının toz morfolojisi, toz boyutu ve toz sertliğine etkisi araştırıldı. Ayrıca kompozit özellikleri olarak öğütme süresi, takviye oranı ve elde edilen toz boyutunun kompozit malzemenin yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Silindirik olarak üretilen kompozit numunelerde ise ball-on-disk aşınma testleri yapılarak, numunelerde oluşan ağırlık kayıpları, sürtünme kuvvetleri ve aşınma karakteristiği incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya teşekkür ederim. Ayrıca yaptığım çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Temel VAROL, Arş. Gör. Fatih ERDEMİR ve Arş. Gör. Hüseyin İPEK'e, teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak hayatımın her aşamasında bana destek olan aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma, 8860 kod numaralı BAP Araştırma Projesi olarak, K.T.Ü. Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Bu nedenle fon yöneticilerine de teşekkürlerimi sunarım.

Serdar ÖZKAYA  
Trabzon 2014



## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aluminyum- B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi, İç Yapı, Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik 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.05/12/2014

Serdar ÖZKAYA

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.3. Kompozitlerin Yapısı.....	4
1.3.1. Islatılabilirlik.....	6
1.4. Metal Matrisli Kompozitler .....	8
1.4.1. Matris Malzemeleri.....	9
1.4.1.2. Alüminyum ve Alaşımları .....	10
1.4.1.3. Magnezyum ve Alaşımları.....	12
1.4.1.4. Titanyum ve Alaşımları .....	12
1.4.1.5. Bakır ve Alaşımları.....	12
1.4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri .....	13
1.4.2.1. Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	13
1.4.2.2. Silisyum Karbür (SiC) .....	14
1.4.2.3. Bor Karbür (B <sub>4</sub> C).....	14
1.5. Nanokompozitler ve Nanomalzemeler .....	15
1.5.1. Nanoparçacıklar .....	15
1.5.1.1. Nanoparçacık Üretim Yöntemleri.....	16
1.5.1.1.1. Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma Yöntemi .....	17
1.5.1.1.2. Hidrojen Redüksiyonu Yöntemi .....	18

1.5.1.1.3.	Asal Gaz Yoğunlaştırma Metodu(AGY).....	19
1.5.1.1.4.	Mikroheterojen Sistemlerden Nanopartikül Üretimi.....	20
1.5.1.1.5.	Alev Sentezi Yöntemi ile Nanopartikül Üretimi.....	21
1.5.1.1.6.	Mekanik Öğütme Yöntemi.....	21
1.5.2.	Nanokompozitler.....	23
1.5.2.1.	Nanokompozitlerin Özellikleri.....	24
1.5.2.1.1.	Sertlik ve Mukavemet.....	24
1.5.2.1.2.	Sinterlenebilirlik.....	26
1.5.2.1.3.	Termal Kararlılık.....	27
1.6.	Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	27
1.7.	Toz Metalurjisi.....	28
1.7.1.	Metal Tozlarının Üretimi.....	29
1.7.2.	Tozların Preslenmesi.....	31
1.7.3.	Sinterleme.....	33
1.7.4.	Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	35
1.8.	Mekanik Alaşımlama.....	36
1.8.1.	Mekanik Alaşımlama Prosesi.....	37
1.8.2.	Mekanik Alaşımlama Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları.....	38
1.8.3.	Mekanik Öğütme ve Alaşımlama Sistemleri.....	40
1.8.3.1.	Sünek – Sünek Sistem.....	40
1.8.3.2.	Sünek-Gevrek Sistem.....	41
1.8.3.3.	Gevrek-Gevrek Sistem.....	42
1.9.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	43
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
2.1.	Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	48
2.2.	Mekanik Alaşımlama İşlemi.....	49
2.3.	Toz Morfolojisi.....	50
2.4.	Toz Boyutu.....	51
2.5.	Partikül ve Bulk Malzeme Sertliği.....	51
2.6.	Sıcak Presleme.....	52
2.7.	Metaloğrafi Çalışmaları.....	53
2.8.	Mekanik Testler.....	54
2.8.1.	Yoğunluk ve Porozite.....	54

2.8.2.	Çekme Testi.....	55
2.9.	Tribolojik Testler.....	55
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
3.1.	Toz Karakterizasyonu.....	56
3.1.1.	Toz Morfolojisi.....	56
3.1.2.	Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojilerinin Değişimi.....	57
3.1.2.1.	Al2024 Alaşımının Öğütme Süresine Bağlı Toz Morfolojisi.....	57
3.1.2.2.	Al2024-%5 B <sub>4</sub> C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri .	60
3.1.2.3.	Al2024-%10 B <sub>4</sub> C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri	63
3.1.2.4.	Al2024-%15 B <sub>4</sub> C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri	66
3.1.2.	Takviye Parçacıklarının Matris Tozlarına Gömülmesi.....	69
3.1.3.	Toz Boyutu.....	72
3.1.4.	Partikül Sertliği.....	73
3.2.	Preslenmiş Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	74
3.2.1.	İç Yapı İncelemeleri.....	74
3.2.1.1.	Al2024 Alaşımının İç Yapı Görüntüleri.....	74
3.2.1.3.	Al2024 - %10 B <sub>4</sub> C Kompozitin İç Yapı Görüntüleri.....	78
3.2.1.4.	Al2024 - %15 B <sub>4</sub> C Kompozitin İç Yapı Görüntüleri.....	80
3.2.2.	Preslenmiş Numunelerde Gözenek Miktarının İncelenmesi.....	82
3.2.3.	Preslenmiş Numunelerin Sertliklerinin İncelenmesi.....	84
3.2.4.	Preslenmiş Numunelerin Çekme Mukavemetlerinin İncelenmesi.....	84
3.2.5.	Çekme Numunelerinde Kırılma Yüzey Görüntüsünün İncelenmesi.....	85
3.3.	Tribolojik Özelliklerin İncelenmesi.....	90
3.3.1.	Numunelerde Meydana Gelen Ağırlık Kayıpları.....	90
3.3.1.1.	Farklı Öğütme Süresi ve Yüke Bağlı Ağırlık Kayıpları.....	90
3.3.2.	Aşınma İz Genişlikleri.....	92
3.3.3.	Aşınma İzlerinin İncelenmesi.....	96
3.3.3.1.	Alaşımın Aşınma İz Görüntüleri.....	96
3.3.3.2.	Al2024-%5 B <sub>4</sub> C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri.....	98
3.3.3.3.	Al2024-%10 B <sub>4</sub> C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri.....	99
3.3.3.4.	Al2024-%15 B <sub>4</sub> C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri.....	101
3.3.4.	Sürtünme Kuvvetlerinin İncelenmesi.....	103
4.	İRDELEME.....	105

5.	SONUÇLAR.....	108
6.	ÖNERİLER.....	109
7.	KAYNAKLAR.....	110
	ÖZGEÇMİŞ	

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

#### ALUMİNYUM- B<sub>4</sub>C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ, İÇ YAPI, FİZİKSEL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Serdar ÖZKAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

2014, 116 Sayfa,

Bu çalışmada; toz metalurjisi üretim yöntemlerinden olan mekanik alaşımlama yöntemi kullanılarak AA2024-B<sub>4</sub>C kompozit ve nanokompozitleri üretildi. Ortalama tane boyutu 25µm olan AA2024 metal matrisi içerisine; ortalama tane boyutu 5 µm olan B<sub>4</sub>C parçacık takviyeleri; %5, %10, ve %15 oranlarında katılarak kompozit toz karışımları hazırlandı ve bu karışımlar farklı öğütme sürelerinde ( 25 saate kadar), gezegen tipi yüksek enerjili bilyeli öğütücüde öğütülerek toz boyutları nanometrik boyuta kadar düşürüldü. Öğütmeden sonra bu tozların fiziksel, mekanik ve mikroyapısal incelemelerinde B<sub>4</sub>C partiküllerinin yapıya homojen olarak dağıldığı görüldü. Bu tozlar sıcak presleme yöntemi ile preslenerek kompozit ve nanokompozitler üretildi. Üretilen nanokompozitlerin mikroyapı özellikleri (SEM analizleri), mekanik özellikleri (çekme ve sertlik testleri), ve tribolojik özellikleri (Ball-on-Disk aşınma testleri) belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çekme mukavemetinin 6 saatlik öğütme süresine kadar arttığı ve bundan sonra azaldığı görülmüştür. En yüksek çekme mukavemeti 6 saat öğütülmüş ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. Mikro ve makro sertlik değerleri ise artan takviye oranı ve öğütme saati ile artmıştır. Aşınma deneylerinde ise, artan takviye miktarı ve öğütme süresi ile aşınma miktarı azalırken sürtünme kuvvetinin arttığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Metal Matrisli Kompozitler, Toz Metalurjisi, Mekanik Alaşımlama, Nanokompozit, B<sub>4</sub>C, Ball-on-Disk, Aşınma

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF ALUMINUM- BORON CARBIDE( $B_4C$ ) PARTICLE REINFORCED  
METAL MATRIX NANOCOMPOSITES AND INVESTIGATION THEIR  
MICROSTRUCTURAL, PHYSICAL, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgy and Materials Engineering  
Supervisor: Asst. Dr. Aykut ÇANAKÇI  
2012, 116 Pages

In this study, AA2024 matrix  $B_4C$  reinforced composites and nanocomposites were produced by mechanical alloying technique which is one of the specific technique of powder metallurgy manufacturing methods. To prepare composite powders, different amounts of  $B_4C$  particle reinforcements (%0, %5, %10 and %15) with average particle size of  $5\mu m$  were participated into AA2024( $d_{50}=25\mu m$ ) metal matrix. After that, they were milled for different times (0 h from to 25 h) in a high energy planetary ball mill. Physical, chemical and mechanical properties of powder mixtures after milling were investigated, by scanning electron microscopy (SEM), microhardness tests and particle size analyzer. In SEM analysis, it was seen that after 3 hours of milling,  $B_4C$  particles were homogeneously distributed into AA2024 matrix. Hardness of powders increased with increasing milling time and the rate of reinforcement. Then, these milled powders were hot pressed to produce composite samples. In order to determine the composite material's microstructural properties, SEM analysis were done and to determine the mechanical properties, tensile test and hardness test was practiced. By investigating the properties of composite materials, it was seen that milling time and amount of reinforcements has important effect on hardness value and tensile strength. For example, the tensile strength increased up to 6 hours of milling and then decreased. The highest tensile strength was obtained for 10%  $B_4C$  reinforced-6h milled composite. The hardness values were increased with increasing milling time and  $B_4C$  content.

Ball-on-disk wear tests were done to investigate the tribological behavior of composites with the following parameters ; 1m/s sliding speed, different loads (1N, 2N, 5N,10N) and 300 meters of sliding distance. Wear ratios were determined as weight loss at all of the samples and frictional forces were obtained.

**Key Words:** Metal Based Composites, Powder Metallurgy, Mechanical Alloying, Nanocomposite,  $B_4C$ , Ball-on-Disk, Wear

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Matris Malzemeleri.....	3
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.3. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar.....	5
Şekil 1.4. Islatılabilirlik.....	6
Şekil 1.5. Islatmanın iyi olmadığı sistemde katı-sıvı arasındaki ıslatma açısı ve yüz enerjilerinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 1.6. 950°C’de 15 dakika ısıtma işlemi sonrası matris/takviye fazı arayüzeyinde ..... a) Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> oluşumu, b) arayüzey reaksiyon ürünlerinde oluşan mikro kırılmalar. .....	8
Şekil 1.7. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler.....	9
Şekil 1.8. Nanopartiküllere ait elektron mikroskobu görüntüleri .....	16
Şekil 1.9. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar .....	17
Şekil 1.10. Kimyasal buhar çöktürme yönteminin şematik gösterimi .....	18
Şekil 1.11. Hidrojen Redüksiyon Yöntemi ile Partikül Üretimi.....	19
Şekil 1.12. Asal Gaz Yoğunlaştırma İşleminin Şeması .....	20
Şekil 1.13. Bilyalı öğütme sisteminin şematik görünümü .....	22
Şekil 1.14. Nanokompozitlerin mikroyapıya bağlı olarak sınıflandırılması.....	23
Şekil 1.15: Bazı malzemelerin sertliği ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.....	25
Şekil 1.16: Mekanik alaşımlama yönteminde, öğütme süresine bağlı olarak kafes gerilmesi grafiği.....	25
Şekil 1.17. Toz metalurjisiyle üretilen parçaların kullanım alanları .....	28
Şekil 1.18. Geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle malzeme üretim aşamaları .....	29
Şekil 1.19. Atomizasyon yöntemleri .....	31
Şekil 1.20. Tek eksenli preslemenin aşamaları.....	32
Şekil 1.21. Sinterlemede bağ gelişimini gösteren sinterleme modeli .....	34
Şekil 1.22. Sinterleme süresinin mikro yapı ve tane büyüklüğüne etkisi .....	34
Şekil 1.23. Sünnek-Sünnek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi .....	40
Şekil 1.26. Sünnek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi .....	42
Şekil 2.1. Deneysel çalışmalar akış şeması.....	47
Şekil 2.2. Elek Sistemi .....	48
Şekil 2.3. Öğütücü Elemanlar .....	49
Şekil 2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	50
Şekil 2.4. Lazer Saçınımlı Partikül Boyut Ölçer Cihazı .....	51



Şekil 2.5.	Mikrosertlik Ölçüm Cihazı .....	51
Şekil 2.6.	Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı .....	52
Şekil 2.7.	Sıcak Pres Cihazı .....	53
Şekil 2.8.	a) Otomatik Zımpara-Parlatma Cihazı b) Bakalit Cihazı .....	53
Şekil 2.9.	Çekme ve Aşınma Numuneleri.....	54
Şekil 2.10.	MTS marka universal tip çekme test cihazı.....	55
Şekil 2.11.	Ball-on-Disk (Numune Üzeri Bilya) Aşınma Cihazı.....	55
Şekil 3.2.	Alaşım tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimi .....	57
Şekil 3.3.	Al2024-%5B <sub>4</sub> C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri .....	60
Şekil 3.4.	Al2024-%10B <sub>4</sub> C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri .....	63
Şekil 3.5.	Al2024-%15B <sub>4</sub> C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri.....	66
Şekil 3.6.	B <sub>4</sub> C partiküllerinin alaşım tozlarına gömülmesi sistematığı .....	70
Şekil 3.7.	%10 B <sub>4</sub> C içeren tozlarda takviye parçacıklarının dağılımı .....	71
Şekil 3.7.	Farklı takviye oranlarına sahip tozlarının öğütme süresi ile partikül boyutu arasındaki ilişki.....	73
Şekil 3.8.	Farklı takviye oranlarına sahip tozlarının öğütme süresi ile partikül sertliği arasındaki ilişki.....	74
Şekil 3.9.	Al2024 alaşımının farklı öğütme sürelerinde oluşan iç yapı görüntüleri .....	74
Şekil 3.10.	Al2024-%5 B <sub>4</sub> C kompozitinin iç yapıları .....	76
Şekil 3.11.	Al2024-%10 B <sub>4</sub> C kompozitinin iç yapıları .....	78
Şekil 3.12.	Al2024-%15 B <sub>4</sub> C kompozitinin iç yapıları .....	80
Şekil 3.13.	Alaşım ve farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin öğütme süresine bağlı olarak değişen (a) yoğunluk ve (b) bağlı yoğunluk (c) % porozite değerlerinin değişimi.....	82
Şekil 3.14.	Farklı takviye oranlarına sahip preslenmiş numunelerde öğütme süresine bağlı olarak sertliğin değişimi.....	84
Şekil 3.15.	Artan takviye oranı ve öğütme süresine bağlı olarak çekme mukavemeti ... değerlerinin değişimi.....	85
Şekil 3.16.	Al2024 alaşımının kırılma yüzeyleri görüntüleri .....	86
Şekil 3.17.	Al2024-%5 B <sub>4</sub> C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri .....	87
Şekil 3.18.	Al2024-%10 B <sub>4</sub> C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri .....	88
Şekil 3.19.	Al2024-%15 B <sub>4</sub> C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri .....	89
Şekil 3.17.	Farklı öğütme süreleri ve yüklerde meydana gelen ağırlık kayıpları .....	90
Şekil 3.18.	Alaşım numunelerinin aşınma iz genişlikleri.....	93
Şekil 3.19.	%10 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerinin aşınma iz genişlikleri .....	95
Şekil 3.21.	AA2024-%5 B <sub>4</sub> C kompozitinin 2N ve 10N yüklerde aşınma iz görüntüleri	98
Şekil 3.22.	AA2024-%10 B <sub>4</sub> C kompozitinin 2N ve 10N yüklerde aşınma iz görüntüleri .	99
Şekil 3.24.	Ortalama sürtünme kuvvetleri grafiği .....	104

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Aluminyum alaşımlarının simgeleme dizisi.....	10
Tablo 1.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeler ve özellikleri.....	13
Tablo 2.1. Al2024 Başlangıç Tozlarının Başlangıç Bileşimi.....	44
Tablo 2.2. Al2024 Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	. 44
Tablo 3.1. Farklı Özelliklerdeki Numunelerde Meydana Gelen Ağırlık Kayıpları.....	87
Tablo 3.2. Aşınma iz genişlikleri.....	88
Tablo 3.3. Ortalama Sürtünme Kuvveti.....	103

## SEMBOLLER DİZİNİ

MA : Mekanik alaşımlama

TM : Toz metalurjisi

PCA : Process control agent

BTO :Bilye toz ağırlık oranı

SEM :Taramalı elektron mikroskobu

MMK :Metal matrisli kompozit

AMMK: Aluminyum metal matrisli kompozit

PVD : Fiziksel Buhar Çökeltme

XRD : X-ışınları difraktometresi

d50 : Ortalama toz boyutu

BSD : Brinell sertlik değeri

HB : Brinell sertlik

HV : Vickers sertlik değeri

$\mu\text{m}$  : Mikrometre

nm: Nanometre

MPa :Mega paskal

Al : Alüminyum

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu nedenden dolayı, bilim adamları; doğal veya alaşım maddelerinden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretmek için bir çok araştırma yapmışlardır. Bu sayede diğer malzemelerden daha üstün niteliklere sahip “Kompozit Malzemeler” adı altında yeni malzemeler üretilmiştir.

Kompozit malzemeler, ileri teknolojik malzemelerinin bir türünü temsil etmektedir. Bu malzemeler insanoğlunun kendisini dış etkilerden korumak için geliştirdiği ilk malzemelerdir ve hayatımızın hemen hemen her safhasına girmeye başladıkları bu asırda kullanım alanları giderek artmaktadır. Maliyet, hafiflik, mükemmel mekanik ve termal özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır.

Son yıllarda Alüminyum matrisli kompozitler (Al-MMK), hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, yüksek elastik modülleri ve yüksek aşınma dirençleriyle otomotiv endüstrisinde özellikle motor pistonu, silindir gömleği, fren disk ve kampanaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan takviyelerin başında SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC ve B<sub>4</sub>C gibi seramikler gelmektedir. Bu seramikler arasında B<sub>4</sub>C, sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ülkemizin sahip olduğu zengin bor kaynakları nedeniyle göze çarpmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar mikron mertebesindeki takviyelerin, malzeme özelliklerini bir noktaya kadar iyileştirdiği belirli takviye oranlarından sonra malzemenin yoğunluk, porozite, aşınma davranışı ve mekanik davranışı gibi özelliklerinde düşme eğilimi olduğunu göstermiştir [1] Bu nedenle daha küçük boyutlu takviye ve matris malzemelerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

Özellikle uzay, otomotiv ve savunma sanayileri gibi endüstri kollarında daha iyi performansa ulaşmak için yeni mühendislik malzemelerine ihtiyaç duyulmuş ve bu talep metal matriksli nano kompozit (MMNK) malzemelerin geliştirilmesine neden olmuştur.

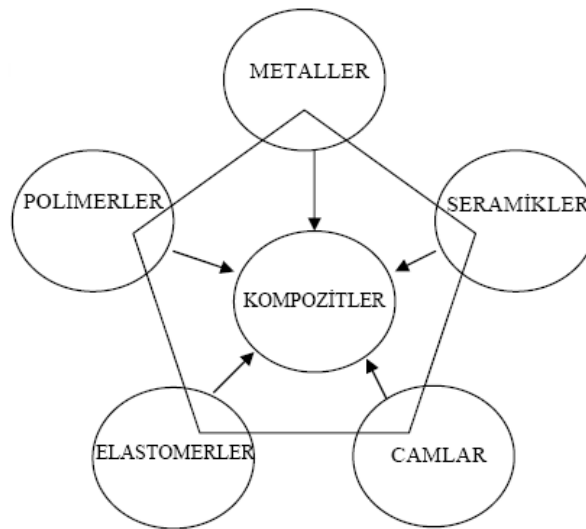
İkinci nesil metal matriksli kompozitler (MMK) olarak da bilinen bu malzemelerin metal ve diğer malzemelere alternatif hale gelmelerinin en önemli nedenleri; yüksek tokluk ve rijitlik, mükemmel aşınma direnci ve üstün yorulma dayanımı sergilemeleridir. Sahip oldukları özgül dayanımları, birçok üretim yöntemlerine uyarlanabilir olmaları ve estetik görünüşleri ise diğer dikkati çeken özelliklerindedir. Günümüzde kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunu da nano boyutlu matris ve/veya takviye fazlarını içeren kompozitler oluşturmaktadır [2]. Yaygın olarak kullanılmakta olan ve kuvvetlendirici partiküllerin dışarıdan matriks içerisine katılması (ex-situ) ilkesine dayanan MMK üretiminde en büyük problem, kuvvetlendirici fazın sıvı metal tarafından tam olarak ıslatılamaması sonucu ortaya çıkan ara yüzey problemleridir [3]. Bilindiği üzere, takviye fazı ve matriks alaşım arasındaki arayüzey MMK'lerin mekanik davranışlarında önemli bir etkiye sahiptir. Uygulanan yükün matris tarafından takviye fazına iletimi bu iki bileşen arasında güçlü bir arayüzey oluşması ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, matris ile takviye faz arasındaki adhezyon kuvvetlerinin yükseltilmesi oldukça önemlidir. Metalurjik olarak; arayüzeyde oluşabilecek eksik ıslanmalar porozitelere sebep olabilmekte ve yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, bu problemlerin MMK'lerin mekanik, tribolojik ve korozif özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. MMK'lerin üretiminde birçok farklı yöntem kullanılmasına rağmen bu yöntemlerin hepsi esasen katı ve sıvı faz yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntemde kendine has üstünlükleri olmakla birlikte takviye elemanının matris içersine homojen dağılımını sağlayan mekanik alaşımlama yöntemi MMK'lerin üretiminde katı faz yöntemini bir adım öne çıkarmıştır [4].

Mekanik alaşımlama işlemi bilyeli değirmen içerisinde tozların, yüksek enerjiyle bilye-toz-bilye ve bilye-toz-değirmen çarpışmalarına maruz kalarak sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanması içeren bir katı faz işlemidir. Bu işlem, tane boyutunun küçültülmesine, takviye malzemelerinin matris içersinde homojen dağıtılmasına, katı çözünürlüğünün artırılmasına, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkân sağlar[5].

Bu çalışmada AA2024 matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitler ve nanokompozitler mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı öğütme sürelerinin ve farklı takviye oranlarının mekanik alaşımlama işlemi, toz özellikleri ve kompozit malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Toz özellikleri olarak; toz morfolojisi, toz boyutu ve toz sertliği incelenmiş olup, kompozit özellikleri olarak ise mikro-yapı özelliklerine, yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma özellikleri incelenmiştir.

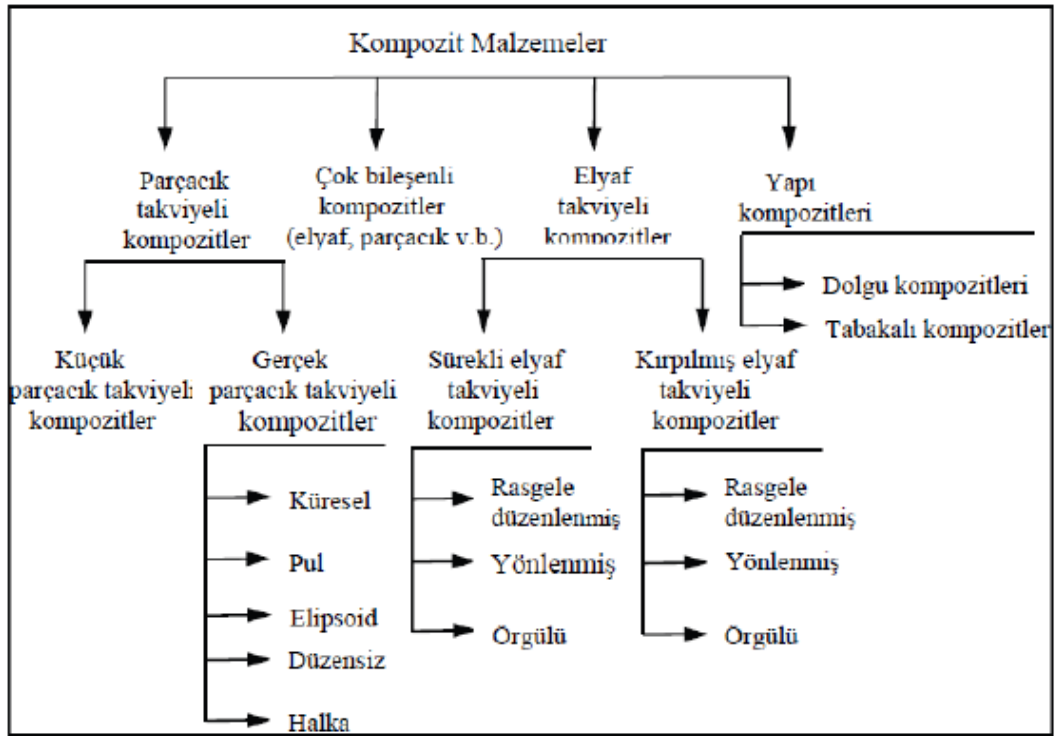
## 1.2.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı özellikte malzemenin makro ölçüde bir araya getirilmesiyle üretilir. Bu tasarım kompozitin farklı bileşenlerinden her birinin arzu edilen en iyi özelliklerini sisteme kazandıracak şekilde yapılmalıdır. Böylece malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanır. Örneğin mukavemet, mukavemet/yogunluk, elektrik ve ısı iletkenlik, yorulma ömrü, aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık mekanik özellikleri kompozit malzeme sistemleri kullanılarak geliştirilebilecek özelliklerdir. Kısaca kompozit malzemeler belirli bir amaca en uygun özelliklere sahip malzemeler uygun tekniklerle bir araya getirilmesiyle meydana gelir. Kompozit malzemeler Şekil 1.1’de görüldüğü gibi farklı malzemelerin uygun oranlarda birleştirilmesiyle oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Matris Malzemeleri [6]

Kompozit malzemeler değişik kriterler esas alınarak sınıflandırılabilir. Doğal veya yapay olmasına göre doğal kompozitler (kemik, kas, deri, ağaç) ve yapay kompozitler (cam elyaf takviyeli, karbon-karbon, kevlar-epoksi v.b.) olarak sınıflandırılır. Kompozitin ana dokusunu oluşturan matris malzemesine göre yapılan sınıflandırma ise plastik (polimer), metal ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak yapılır. Ancak uygulamada en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kompozite mukavemet kazandıran takviye malzemesine göre yapılır [7]. Bu sınıflandırma Şekil 1.2’de verilmiştir.



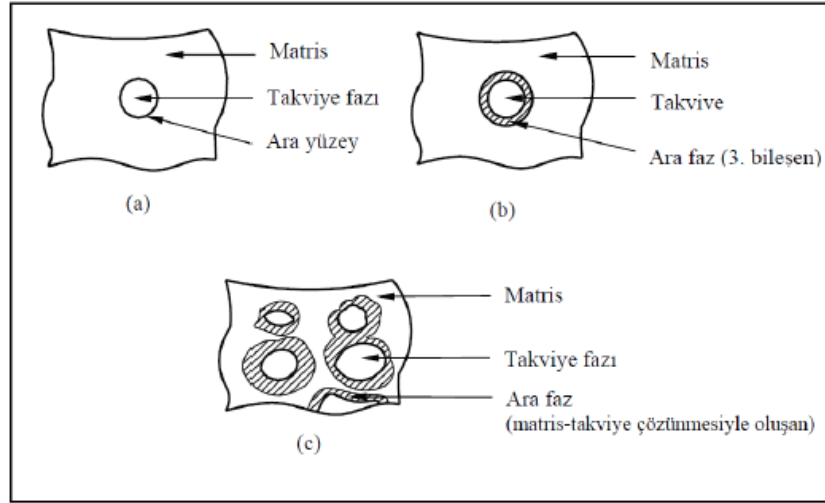
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması [7]

### 1.3. Kompozitlerin Yapısı

Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzeme yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşenlerinde görmek mümkün değildir. Kompozit malzemelerde amaç fiziksel, mekanik veya kimyasal özelliklerden herhangi birinin veya birkaçının geliştirilmesine yönelik olabilir. Kompozit sistem matris fazı ile fiber, visker veya partikül şeklinde olabilecek takviye fazı olmak üzere iki bileşenden ibarettir. Kompozit içinde genellikle daha sert ve

daha yüksek dayanıma sahip bileşen kısım takviye olarak adlandırılır. Kompozitin ana yapı malzemesi olarak da tanımlanan, nispeten daha düşük dayanıma sahip olan fakat genellikle sünekliği yüksek olan kısım matris olarak adlandırılır. Matris malzemesinin kompozit sisteminde kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını önlemek, kompozit malzemenin mukavemetine katkıda bulunmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak ve takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak gibi görevleri vardır. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kompoziti oluşturan matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, matris ve takviye malzemelerinin hacim oranları, matris takviye arasındaki bağın özellikleri, takviye malzemesinin şekli, yapısı ve kompozit içerisindeki yönelmesi etkili olmaktadır.

Kompozitin tarifine göre matris ve takviye fazı birbiri içinde çözünmemelidir. Ancak çok az miktarda çözünürlük matris-takviye arasında güçlü bir bağın oluşumunu olumlu yönde etkiler (Şekil 1.3c).

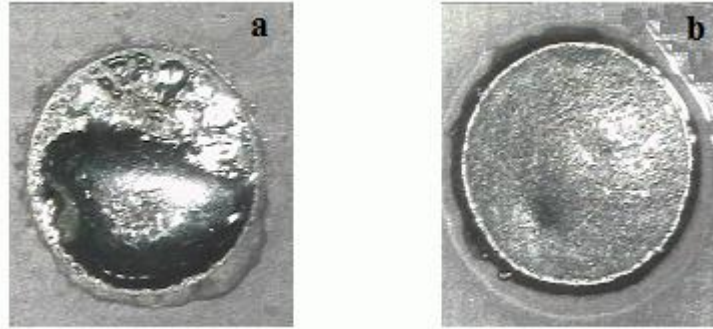


Şekil 1.3. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve arafazlar[7] a) Doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu



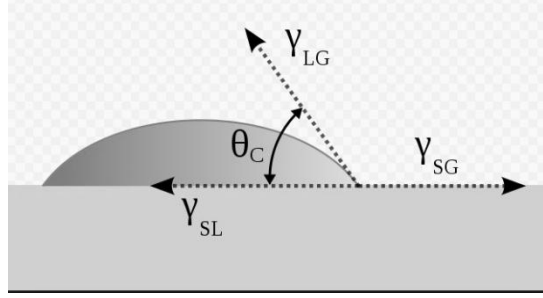
### 1.3.1. Islatılabilirlik

Aristotle, ince altın sac veya maun ağacından küçük bir tahta parçasının su yüzeyinde batmadan yüzdüğünü keşettikten yüzyıl sonra, Archimedes özgül ağırlık kavramını keşfetmiştir. Altın ve maun ağacının özgül ağırlıkları suyunkinden daha büyük olduğundan suyun üzerinde yüzen bu katıların içinde buldukları şartlar aynı olamazdı. Aristotle ve Archimedes arasındaki bu tezatlık uzun süren bir tartışmaya neden olmuştur. Bu tezatlık 1612 yılında Galileo'nun, düz ve ince bir katı cismin suda yüzerken katı cismin üst yüzeyinin su yüzeyinin altında kaldığını fark etmesiyle son bulmuştur. Galileo, yüzey gerilmesi ile ilgili kavramı bilmediğinden ve ayrıca katı ve sıvı arasındaki temas açısını ölçemediğinden savunması yetersizdi ancak, yayılma ve ıslanabilirlik ile ilgili fikirleri doğrudur. Galileo'nun o tarihte keşettiği kavram bugün bildiğimiz "kapiler çökme" (batma) idi. Galileo'dan yaklaşık 200 yıl sonra temas açısı üzerine yapılan bilimsel araştırmalar neticesinde , Young'ın da adını aldığı denklem ile bugüne kadar gelinmiştir[8].



Şekil 1.4. Islatılabilirlik, a) Kötü ıslatma b) İyi ıslatma [9]

Islatılabilirlik, genel anlamda, sıvının katı yüzeyinde yayılabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Şekil 1.5'de görüldüğü üzere, katı altık üzerinde duran bir sıvı damlasının katı yüzeyi ile yaptığı temas açısı ( $\Theta$ ) ıslanabilirliğin fiziksel bir ölçüsüdür [10].



Şekil 1.5. Islatmanın iyi olmadığı sistemde katı-sıvı arasındaki ıslatma açısı ve yüz enerjilerinin şematik gösterimi

Şekil 1.5.'de görüldüğü gibi, ıslanabilirliğin bir ölçüsü olan  $\Theta$  değeri;

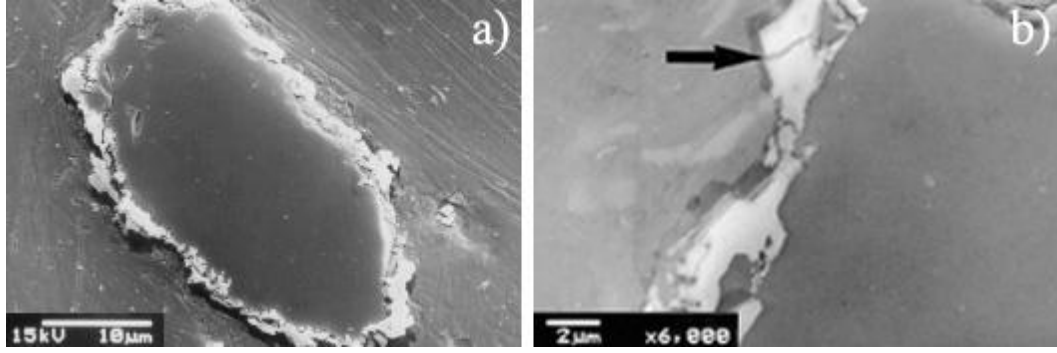
- $\Theta = 0^0$  ise mükemmel ıslatılabilirlik
- $0^0 < \Theta < 180^0$  ise kısmen ıslatılabilirlik
- $\Theta = 180^0$  ise ıslatılabilirliğin olmadığını göstermektedir.

Şekil 1.5'de,  $\Theta$  : temas açısını,  $\gamma_{SG}$ : katı-buhar arayüzey enerjisi,  $\gamma_{SL}$ : katı-sıvı arayüzey enerjisini ve  $\gamma_{LG}$ : sıvı-buhar arayüzey enerjisini göstermektedir. Young-Dupré denklemine göre [11] bu ifadeler arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir:

$$\sigma_{KB} = \sigma_{KS} + \sigma_{SB} \cdot \cos\Theta \quad (3.1)$$

Aluminyum metal matrisli kompozitlerde (AMMK) ıslatma olayını incelersek, AMMK'ler genellikle temel iki bileşenden oluşurlar. Bunlardan birisi metal matris (Al alaşımı), diğeri de takviye malzemesidir (genel olarak bir oksit, karbür veya nitrür)[12]. AMMK'lerin üretiminde sıklıkla  $B_4C$ ,  $SiC$  ve  $TiC$  gibi düşük yoğunluklu seramik karbürler kullanılmaktadır. Seramik malzemelerin sıvı metaller tarafından ıslatılabilirliği, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları açısından önemlidir. Bilindiği üzere, iyi bir arayüzey uygulanan yükün matristen katkı fazına transferini ve dağılımını sağlayan en önemli

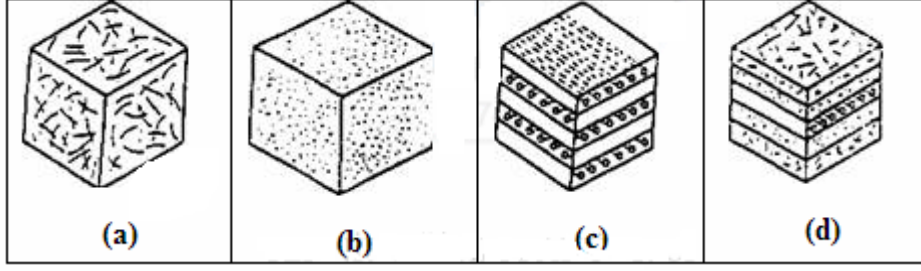
unsurdur ve kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir. Kompozitlerin üretimi veya tekrar-ergitilmesi esnasında arayüzeyde meydana gelen çoğu karbür karakterli kimyasal reaksiyon ürünleri, katkı fazının bozunması ve ıslatabilirliğin azalması için başlıca problemlerdir. Yüksek sıcaklıklarda bu karbür fazları sıvı alüminyum ile reaksiyona girerek matris/takviye fazı arayüzeyinde (Şekil 1.6. a) kompozit özelliklerini olumsuz etkileyen  $Al_4C_3$  reaksiyon ürünü meydana gelmektedir [13,14,15].  $Al_4C_3$ , kompozitlerin kullanılabilirliği ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir, çünkü oldukça gevrek bir faz olması nedeniyle kompoziti kırılgan hale sokabilir (Şekil 1.6. b) ve su ile etkileşerek de kompozitin korozyona karşı duyarlı hale gelmesine neden olabilir.[15, 16,17]



Şekil 1.6. 950°C’de 15 dakika ısıtılma sonrası matris/takviye fazı arayüzeyinde a) $Al_4C_3$  oluşumu, b) arayüzey reaksiyon ürünlerinde oluşan mikro kırılmalar [18]

#### 1.4. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler ve özellikle de süreksiz (parçacık, kısa fiber, whisker) parçacık takviyeli MMK’in, havacılık ve otomotiv uygulamalarındaki kullanım alanları giderek artmaktadır. Son yıllarda yapısal kompozit alanında alüminyum esaslı süreksiz parçacık takviyeli MMK’lere ait pratik uygulamalar ve araştırmalar üzerinde durulmaktadır. Araştırmaların büyük çoğunluğu bu ileri malzemelerin üretim işlemi ve özelliklerinin tahmini üzerine olmakla birlikte ikincil üretim teknolojileri olan talaşlı işleme, birleştirme, plastik şekil verme üzerine de araştırmaların yapılması gerekmektedir [19].



Şekil 1.7. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler,  
 a)Elyaf Takviyeli b)Parçacık Takviyeli c)Tabakalı Kompozit  
 d) Karma Kompozit

Metal matrisli kompozitlerin, metallere göre sağladığı avantaj ve dezavantajları inceleyecek olursak, avantaj olarak;

- Mukavemetlerinin çok daha yüksek olması,
- Sıcaklık değişikliklerine ve termal şoklara karşı düşük hassasiyet göstermeleri,
- Özgül mukavemetlerinin çok yüksek olması,
- Aşınmaya karşı yüksek direnç göstermeleri,
- Yüksek elastik modüle sahip olmaları,
- Daha yüksek yorulma ve sürünme direncine sahip olmaları

Dezavantaj olarak ise;

- Üretimde kullanılan partiküllerin yüksek fiyatı,
- Üretim esnasında oluşan istenmeyen reaksiyon ürünlerinin, malzemenin korozyon özelliklerini kötüleştirilmesi,
- Metallere göre sünekliğin belli oranda azalması,
- Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat,
- Zor ve karmaşık bir üretim işlemleri şeklinde sıralanabilir.

#### 1.4.1. Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle, istenilen spesifik özellikleri sağlamak ve daha üstün malzemeler üretmek amacıyla düşük yoğunluklu, hafif metaller kullanılmaktadır. Sanayide ve yapılan bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan matris malzemeleri Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Zn gibi metaller ve alaşımlarıdır.

Bunların başında ise düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilirlik, düşük ergime sıcaklığı ve yüksek ıslatabilirlik gibi karakteristik özelliklere sahip alüminyum ve alüminyum alaşımları gelmektedir [20-22]. Alüminyum saf olarak kullanıldığı gibi alaşım olarak da kullanılabilir. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilir [23-26]. Kompozit malzemeden istenilen özellikleri elde etmek için matris malzemesi, takviye fiberleri veya parçacıkları iyi ıslatabilmeli, iyi bir arayüzey bağı oluşturmalı, mümkün olan en düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı bir şekilde katılaşmalıdır. Ayrıca üretim esnasında ve daha sonraki ikincil işlemler esnasında matris ve takviye malzemesi arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olmamalı ve matris kararlı olmalıdır. Matrisin temel görevi bağlayıcılara yükü transfer etmek ve dağıtmaktır. Belirli uygulama alanı için matris seçimi; yoğunluk, çekme dayanımı, yüksek sıcaklık özelliği ve süneklik gibi faktörler yanında üretim metodu ve bunlar arasındaki uyumda bağlıdır.

#### **1.4.1.2. Alüminyum ve Alaşımları**

Alüminyum, yeryüzünde en yaygın olarak bulunan elementlerden biridir ve yerkabuğunun %8'ini oluşturmaktadır. Alüminyumun keşfi ve üretim teknolojisinin geliştirilmesi, diğer pek çok metale göre oldukça yeni olmasına rağmen günümüzde diğer tüm demir dışı metallere daha fazla miktarlarda üretilmektedir [27]. Alüminyum alaşımları; düşük yoğunlukları, çökme sertleşmesi ile dayanımlarını artırabilme kabiliyetleri, tuzlu su da dahil olmak üzere pek çok ortamdaki üstün korozyon dirençleri, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri ve tedarik kolaylıkları sebebiyle, rekabet halinde olduğu malzemelere kıyasla avantaj sağlayarak gelişmiş uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Bu özellikler içinde ilk göze çarpanı düşük yoğunluğudur ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) ki bu değer, çelik ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), bakır ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ) ve pirinç ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ) gibi malzemelerin yaklaşık üçte birine eşittir [28-31]. Saf alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu ve mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı alaşımlama yaparak özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. İşlenmiş alüminyum ve alaşımları için dünyada en yaygın olarak kullanılan simgeleme dizisi, Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen simgeleme dizisidir. Daha önceleri Amerikan Alüminyum Birliği tarafından kullanılan bu simgeleme 1957 yılında

standart yapılmıştır. Bu simgeleme dört rakam kullanan bir kodlama üzerine Tablo 1.1 de açıklandığı biçimde kurulmuştur. Buna göre dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtmektedir [32].

Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarının simgeleme dizisi [33]

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

1XXX dizisi, arı alüminyum (% 99,00) belirtir. Son iki rakam ise % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını ve alüminyum en az saflık değerini belirtir. 1XXX dizisinde soldan ikinci rakam ise özel olarak denetlenen empurite elementlerinin sayısını belirtir ve 1'den 9'a değişebilir. 1072 simgesini örnek verirse alaşımın arı alüminyum ve saflık değerinin de en az % 99,72 olduğunu belirtir. 1072'deki 0 ise geri kalan % 1,00- % 0,72 = % 0,28 içinde özellikle denetlenen hiçbir elementin bulunmadığını gösterir.

2XXX den 8XXX e kadar olan diziler Tablo 1.1 de belirtilen alaşımları simgeler. İlk rakam alaşım türünü, ikinci rakam ise değişimleri simgeler. Özellikle denetlenen alaşımların sayısı, 1 ile 9 arasında bir rakamla simge sayısının ikinci rakamı olarak kullanılır. 5065 örneğinde özellikle denetlenen hiçbir alaşım elementi bulunmayan bir Al-Mg alaşımını simgeler.

İşlenmiş alüminyum alaşımları ısı işlem davranışlarına göre iki bölüme ayrılırlar: Isıl işlem uygulanabilenler ve ısıl işlem uygulanamayanlar. Genellikle 2XXX, 4XXX, 6XXX, 7XXX dizileri ısıl işlemle özellikleri yükseltilebilen alaşımlardır. 3XXX ve 5XXX dizilerine ise ısıl işlem uygulanmaz. Bunların dayanımları bileşimlerdeki mangan ve magnezyumdan kaynaklanır. Bu son iki dizi alaşım soğuk işlem ile deformasyon sertleşmesine uğrarlar [31].

### 1.4.1.3. Magnezyum ve Alaşımları

Hafif metal alaşımlarından olan magnezyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalardaki kullanım alanlarının gelecekte oldukça yaygınlaşacağı ve buna bağlı olarak da magnezyum esaslı kompozit malzemelerin kullanımının da artacağı beklenmektedir. Magnezyumun yoğunluğu 1.74gr/cm<sup>3</sup> olup, yapısal uygulamalarda kullanılan en hafif metaldir. Düşük ergime sıcaklığı (650°C) ve iyi kaynak kabiliyetine sahip olan magnezyumun ağırlığı alüminyumun üçte ikisi demirin dörtte biri bakır ve nikelin ise beşte biridir. Magnezyum alaşımları, yüksek özgül dayanıma iyi dökülebilirlik özelliğine ve yüksek sönümlenme kapasitesine sahiptirler. Bununla birlikte oksijene olan ilgisinin fazla olması, düşük elastik modülü ve düşük yorulma direncine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımının düşük olması gibi nedenler kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. Alaşım elementi olarak Alüminyum (%2.5-8) ve çinko (%0.5-4) katılarak dayanımları arttırılabilmektedir [32].

### 1.4.1.4. Titanyum ve Alaşımları

Ti ve alaşımları metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Titanyum matrisli MMK'lerin yüzeyinde oluşan ince TiO<sub>2</sub> tabakası kompozitin korozyon direncini önemli derecede arttırmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının korozyon dirençlerinin yüksek olması ve insan vücuduna toksik etkisinin olmamasından dolayı biyomalzeme olarak da kullanılmaktadır (Ni-Ti alaşımları). Isıl genleşme katsayılarının düşük olması ve mukavemet/özgül ağırlık oranının yüksek olmasından dolayı uzay ve uçak sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır[33].

### 1.4.1.5. Bakır ve Alaşımları

Bakır matrisli kompozit malzemeler genellikle, yüksek elektrik iletkenliği özelliklerinden dolayı genellikle elektrik devre elemanları gibi elektronik sistemlerde görülmektedir. Bakır matris içersine grafit parçacıklar ilave edilerek düşük termal genleşme katsayısına sahip ve elektriksel iletkenliği iyi olan malzemeler elde edilebilir. Ayrıca yağlayıcı özelliğe sahip olan grafitin kullanıldığı bakır matrisli kompozit malzemelerin yatak malzemesi olarak kullanımı kurşun kullanımından kaynaklanan zehirleyici etkiyi ortadan kaldırmaktadır[34-35].

### 1.4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin üretiminde matris malzemesi kadar takviye elemanı da önemli yer tutar. Takviye elemanları matris malzemesi ile uyumlu ve matris tarafından kolay ıslatılabilme özelliğine sahip olmalıdır. Bu elemanlar kompozit malzeme üzerindeki yükü taşıyarak matris malzemesinin dayanımını arttırmaktadırlar. MMK'larda genellikle seramik esaslı takviye elemanları yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ ,  $TiB_2$ , TiC, WC, W, C ve MgO'dur [36]. Takviye elemanı seçiminde dikkate alınması gereken hususlar; elastikiyet modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, kimyasal kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, matris malzemesiyle uyumluluk, maliyet şeklinde sıralanabilir [36-40]. Doğada birçok seramik parçacık halinde bulunduğundan, bunlar parçacık takviyeli kompozitler için geniş bir aralıkta takviye potansiyeline sahiptir. Parçacık takviyeli kompozitlerin; uzun veya kısa fiberlilere göre daha ucuz olması, toz metalurjisi ve döküm gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeleme, dövme, ekstrüzyon gibi geleneksel ikincil işlemlere uygunluğu, rijitlikleri ve aşınma dayanımlarının yüksek olması gibi avantajları vardır.

Bütün bu üstünlüklerine rağmen seramik takviyelerin en önemli sakıncaları gevrek karakterde olmaları ve sıvı metaller tarafından ıslatılmalarının kötü olmasıdır. Seramikler kendi aralarında oksit esaslı alümina ( $Al_2O_3$ ), silisyum oksit ( $SiO_2$ ), magnezya (MgO), bariya (BaO), berilya (BeO), yitriya ( $Y_2O_3$ ), torya ( $ThO_2$ ), zirkonya ( $ZrO_2$ ), v.b. ve oksit olmayan seramikler (nitrür ve karbürler); bor nitrür (BN), alüminyum nitrür (AlN), silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), v.b., bor karbür ( $B_4C$ ), silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC), v.b. olmak üzere sınıflandırılırlar. Bunların yanı sıra bor (B), karbon (C) ve silisyum (Si) elementel malzemeler de, takviye malzemesi olarak kullanılabilir[41].

#### 1.4.2.1. Alumina ( $Al_2O_3$ )

Günümüzde alümina kimyasalları dünyanın birçok bilimsel, teknolojik ve endüstriyel uygulamalarında araştırılmakta ve kullanımı günden güne artmaktadır. Alüminanın bilimsel keşfi geçen yüzyıl içindedir fakat ticari olarak kullanımı, 1907 yılında yüksek alümina seramik üretimine ait bir patentle başlamıştır. Alümina, bir oksit malzemesidir. Değişik modifikasyonları olmasına rağmen ticari kullanım alanına sahip olan  $\alpha-Al_2O_3$  tür.



Alümina bazlı malzemelerde diğer ürünler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  olup spinel ve silikat formunda bulunurlar. Alüminanın ilk ticari kullanım alanı buji ve laboratuvar malzemeleridir. Bugün alümina özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında geniş çapta kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kesici takım, yatak malzemesi, tekstil endüstrisinde iplik kılavuzu olarak ayrıca elektronik endüstrisinde, zırh yapımında, tıpta implant ve protezlerde kullanılmaktadır[42].

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

Metal matrisli kompozit malzemelere katılan önemli takviye elemanlarından birisi de silisyum karbürdür. Silisyum karbür, silisyum dioksitin kok kömürü ile elektrikli fırında indirgenmesi sonucu gerçekleşen saf olarak silisyum eldesi sırasında gerekenden daha fazla karbon kullanılması durumunda oluşan bileşiktir. Yüksek mukavemet, yüksek oksitlenme direnci ve termal şok direnci gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca silisyum karbür sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımından dolayı da pişirme fırınlarında kullanılan refrakterler içinde önemli bir yere sahiptir. Balistik zırh plakalar, aşınmaya dirençli nozul, döküm filtresi, döküm potası ve seramik fırın malzemelerinde silisyum karbür bazlı malzemeler kullanılır[43].

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

$\text{B}_4\text{C}$ , elmas ve kübik yapılı bor nitrürden sonra bilinen en sert (9.5+ Mohs skalasında) üçüncü malzemedir. Nötron absorpsiyonu, sürünme direnci ve darbe dayanımı isteyen uygulamalar için farklı avantajlara sahip, kovalent bağlı seramik yapıdadır. Ayrıca seramiklerin en hafifidir. Bu yüzden kompozitin toplam ağırlığını arttırmadan mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabilir.  $\text{B}_4\text{C}$  ile çalışılırken dikkat edilmesi gereken dezavantajı,  $\text{B}_4\text{C}$ 'nin yüksek sertliğinden dolayı kompozitin ekstrüzyon yapabilme kabiliyetinin limitli olmasıdır. Tamamen yoğun mikroyapıların üretiminde karşılaşılan sorunlar ve gevrek kırılmaya karşı  $\text{B}_4\text{C}$ 'ün aşırı hassasiyeti bu takviye malzemesinin sahip olduğu sınırlılıklardır[44].

Tablo 1.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye malzemeler ve özellikleri

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ( $\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$ )	Isıl Genleşme Katsayısı ( $10^{-6} \text{C}^{-1}$ )	Ergime Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mukavemet (Mpa)	Elastiklik Modülü (GPa)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.98	7.92	2100	221 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )	379 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
SiC	3.21	5.40	2750	-	324 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
C	2.18	-1.44		-	690
$\text{SiO}_2$	2.66	<1.08	1710	-	73
AlN	3.26	4.84	2375	2069 (24 $^{\circ}\text{C}$ )	310 (1090 $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{B}_4\text{C}$	2.52	6.08	2420	2759 (24 $^{\circ}\text{C}$ )	448 (24 $^{\circ}\text{C}$ )

### 1.5. Nanokompozitler ve Nanomalzemeler

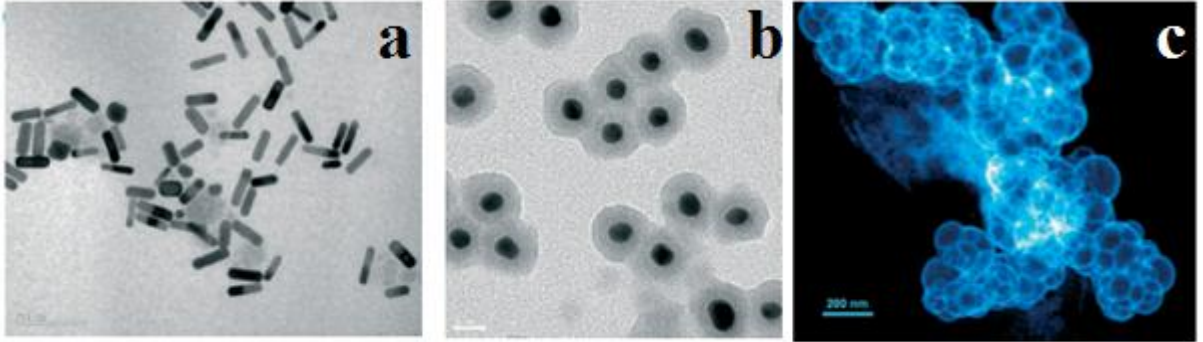
Nanomalzemeler çok çeşitlidir. Bunların bir çoğu doğada bulunmaktadır. Deniz serpintisi, erozyon gibi süreçler nanoparçacık üreten doğal süreçlerdir. Nanomalzemelerle üretilen sağlam kompozitlerden hafif bisikletler yapılmaktadır. Nanoyapılı katalizörler kimyasal imalat süreçlerini etkin kılarak enerji tüketimini ve atık üretimini düşürmektedir. Yeni transistörlerde, hızlı bağlantı elemanlarında ve bilgisayar yongaları gibi elektronik aygıtlarda nanomalzemeler kullanılmaktadır. Nanoteknoloji konut, otomobil ve enerjiyi verimli kullanan yakıt hücrelerinin yapımında, pil ve güneş paneli üretiminde, içme suyunun arıtılmasında, çevresel atık ve hasarların saptanması ve temizlenmesinde bilim adamlarına bazı çözüm yolları sunmaktadır [45-50].

Örneğin göz alıcı güzellikte eski vitray camlardaki çeşitli renkler, camın karışımında nano boyuttaki çinko ve kadmiyum sülfatlar, bakır oksit, kobalt, krom, altın ve demir gibi nanoparçacıklardan oluşmuştur. Bu nanoparçacıkların büyüklüğü yansıtılan ışığın dalga boyunu ve dolayısıyla rengini oluşturur. Doğada nano boyutta bulunan parçacıklara bir örnek olarak montmorillonit kilini gösterebiliriz. Fransa'da çok çeşitli kullanım alanına sahip olan bu bentonit türünün (montmorillonit kilinin) normal tane büyüklüğü 50-500 nm dir.

#### 1.5.1. Nanoparçacıklar

Nanoparçacıklar, çapları 100 nm'nin altında olan parçacıklardır ve aynı malzemenin kütle halindeki göre üstün özelliklere sahiptirler. Nanoparçacıklar doğada yaygın halde bulunmaktadır. Örneğin volkanik faaliyetler ve bitkiler tarafından üretilmiş olabilirler.

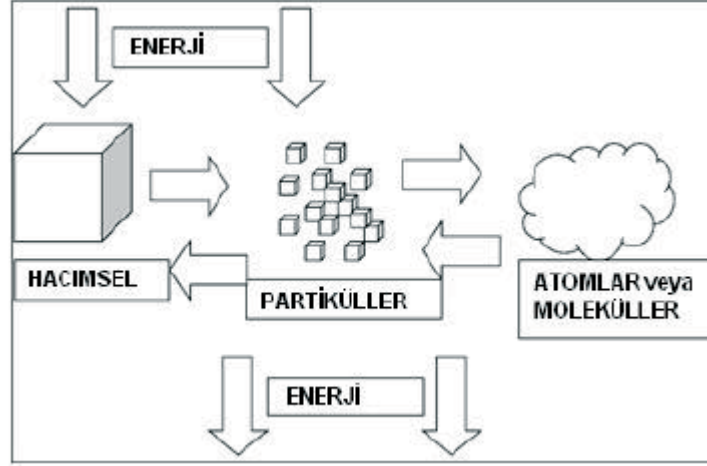
Binlerce yıldır süregelen yanma sonucu ortaya çıkan yan ürünler ve oto eksozundan çıkanları da bu gruba dahil edebiliriz. Nanopartiküller, nanoteknolojinin başlıca sınıflarından olan nanomalzemelerin en önemli ürünlerinden biridir. Diğer nanomalzemeler gibi boyutlarına göre sınıflandırılmaktadırlar. 2500nm'den büyük partiküller kaba partiküller olarak adlandırılmakla birlikte nanopartikül kategorisine sokulmamaktadır. Boyutları 100–2500 nm arasında olan partiküller ince taneli olarak geçse de nanoteknolojinin sağladığı özelliklere tam anlamıyla ulaşamamaktadır. Boyutlar 100 nm'nin altına indiğinde partiküllerin mekanik, optik, elektriksel vb. özelliklerinde kayda değer gelişmeler olduğu görülmektedir. Gümüş, TiO<sub>2</sub> gibi malzemelerin de nano boyutta boyutları küçültüldükçe anti bakteriyel özellik kazandığı bilinmektedir. Bunun yanı sıra, daha düşük boyutlarda anti viral özelliklerin de kazandırılabilceği ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Makina ve malzeme mühendislerinin en çok üzerinde durduğu konulardan biri de bilindiği üzere dayanımdır. Malzemelerin nano ölçekte boyutlarının azaltılmasıyla oldukça yüksek yüzey enerjisine sahip olduğu ve elastiklik modülü ve dayanım özelliklerinin arttığı bilinmektedir. Nanopartiküllerin takviye elemanı olarak kullanılması ile kompozit malzemelerin de özellikleri iyileştirilebilmektedir. Makina sektöründen dış hekimliğine kadar birçok disiplinde uygulama alanı bulan bu malzemelerin geliştirilmesi ile bir çok ihtiyacımız karşılanabilecektir [51-53].



Şekil 1.8.Nanopartiküllere ait elektron mikroskobu görüntüleri

### 1.5.1.1. Nanoparçacık Üretim Yöntemleri

Nanopartikül üretiminde kullanılan yöntemler Şekil 1.9'da görülen “aşağıdan yukarıya” ve “yukarıdan aşağıya” olmak üzere iki temel esasa dayanmaktadır.



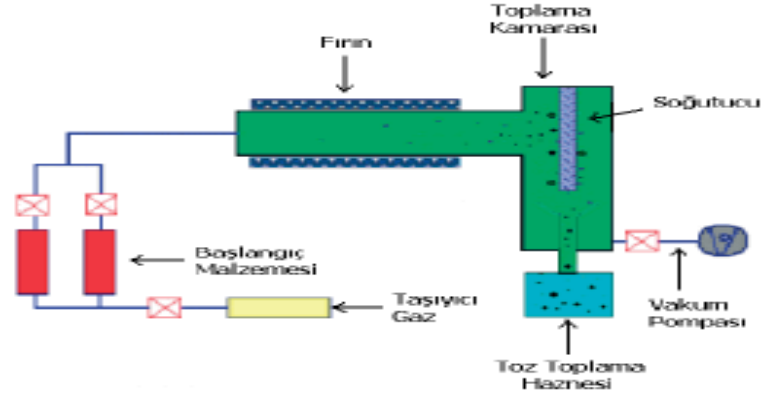
Şekil 1.9. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar[54]

Yukarıdan aşağıya yaklaşımına dahil olan yöntemlerde hacimsel malzemeye dışarıdan mekaniksel ve/veya kimyasal işlemler ile enerji verilmesi sonucunda malzemenin nano boyuta kadar inebilecek küçük parçalara ayrılması esas alınmaktadır. Yukarıdan aşağıya yaklaşımı ile çalışan yöntemlere verilebilecek en genel örnekler; mekanik öğütme ve aşındırma olabilir [55-56]. Bu tekniklerde klasik öğütme işlemlerinden çok daha fazla enerji tüketimi gerçekleştiğinden yüksek enerjili öğütme olarak da adlandırılmaktadırlar. Aşağıdan yukarıya yaklaşımına dahil yöntemler ise; atomik veya moleküler boyuttaki yapıları kimyasal reaksiyonlar ile büyütürük partikül oluşumunun gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Nanokristalin metal ve alaşımlarının üretiminde kullanılan ilk yöntem olan gaz yoğunlaştırma tekniği aşağıdan yukarıya yaklaşımıyla çalışmaktadır. Kimyasal buhar kaplama, kimyasal buhar yoğunlaştırma, sol jel ve sprey piroliz yöntemleri de bu yaklaşımın en çok bilinen diğer üyeleridir [57]. Partikül üretiminde kullanılan yöntemlerin yukarıda açıklanan ayırım dışında fiziksel veya kimyasal temelli olarak da iki ayrı sınıflandırılması mümkündür. Mekanik enerjinin kullanıldığı gibi fiziksel özelliklerin ön plana çıktığı yöntemler fiziksel ve kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yöntemler ise kimyasal temelli olarak kabul edilmektedir [54].

#### 1.5.1.1.1. Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma Yöntemi

Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi (CVC) ilk olarak 1994'de Almanya'da geliştirilmiş olup, yüksek miktarda nanopartikül üretimi için ideal bir yöntemdir [58-60]. Bu yöntemde başlangıç malzemesi olarak metalorganikler, karboniller, klorürler ve

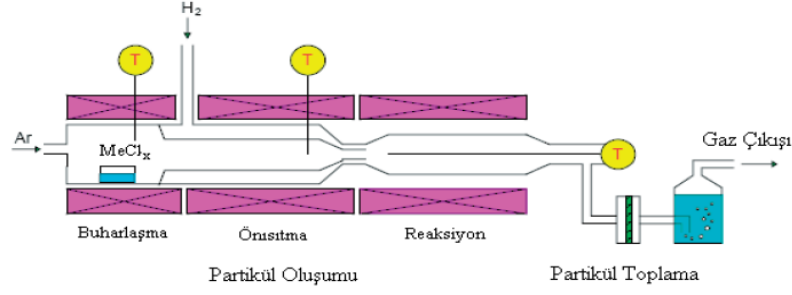
hidrürler gibi buhar fazına kolaylıkla geçebilen bileşikler kullanılmaktadır [61]. Yöntem temel olarak gaz fazındaki malzemenin ısı parçalanma ile partiküle dönüşümüne dayanmaktadır. İşlem akışı; kısaca başlangıç malzemesinin gaz fazına geçtiği bölgeye gaz akışı verilerek buharın reaktör olarak da adlandırılan fırın içine taşınıp burada ısı parçalanması sağlanır. Taşıyıcı gaz olarak He, Ar veya N<sub>2</sub> gibi inert gazlar kullanılmakla birlikte bileşiğin redüklenmesi için H<sub>2</sub>, CO veya CH<sub>4</sub> gibi gazlar da taşıyıcı gaza ilaveten kullanılabilir. Isıl parçalanma sonucu oluşan atom kümeleri veya nanopartiküller fırın çıkışındaki farklı toz toplama yöntemleriyle toplanmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanı içerisinde sıvı azot geçen bir çubuğun kapalı bir bölme içerisinde partiküllerin çöktürülmesidir[58].



Şekil 1.10. Kimyasal buhar çöktürme yönteminin şematik gösterimi[58]

#### 1.5.1.1.2. Hidrojen Redüksiyonu Yöntemi

Gaz fazında redüksiyon ile metalik nanopartiküllerin üretimini gerçekleştiren bir yöntem olup, yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle demir grubu metal (Fe, Ni ve Co) nanopartiküllerinin laboratuvar ölçekli sentezlenmesinde kullanıldığı görülmektedir. Şekil1.11’de de görüldüğü gibi yöntem; partikül oluşumu, partikül toplanması ve gaz yıkama adımlarından oluşmaktadır [62].

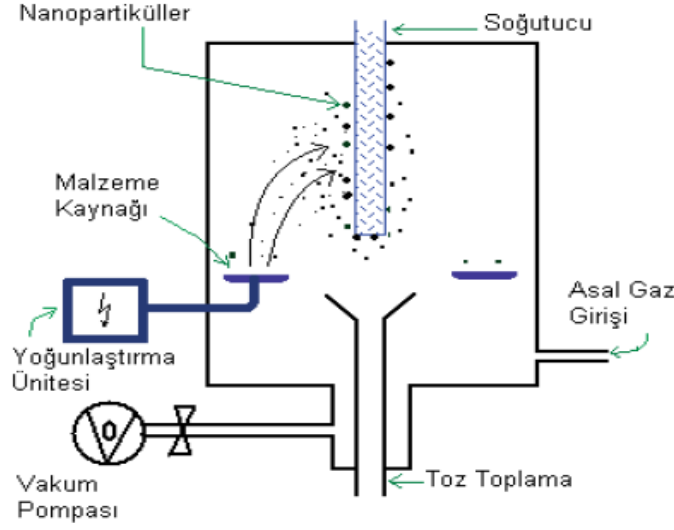


Şekil 1.11. Hidrojen Redüksiyon Yöntemi ile Partikül Üretimi[62]

Yöntemin ilk aşamasında kullanılan başlangıç çözeltisi buharlaştırılarak taşıyıcı ve/veya redükleyici bir gazla ön ısıtılmış bölgeye ve daha sonra redüksiyonun gerçekleşeceği daha sıcak bölgeye taşınarak partikül oluşumu gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında hidrojen gazı tek başına hem redükleyici hem de taşıyıcı olarak kullanılabilir gibi bununla birlikte azot ve argon gibi inert gazlarda taşıyıcı olarak kullanılabilirler. Reaktanların konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı, ön ısıtılmış bölgenin sıcaklığı ve buhar/partikülün fırın içerisinde kalış süresi partikül boyutunu kontrol eden başlıca faktörlerdir.

### 1.5.1.1.3. Asal Gaz Yoğunlaştırma Metodu (AGY)

Birringer ve arkadaşları [63] tarafından ilk defa 1984 yılında nanopartikül üretimi için kullanılan asal gaz yoğunlaştırma (IGC) yöntemi, nanokristalin metal ve alaşımlarının direkt olarak aşırı doymuş buhar fazından üretiminde kullanılan en eski tekniktir. AGY yöntemi çok yönlü olduğundan dolayı günümüzde laboratuvar ölçekli nano-yapılı tozların sentezinde kullanılmaktadır [64]. Yöntemde metalik, seramik ve kompozit nanopartiküller üretilbildiği gibi oksijen gibi bir reaktif gaz kullanılarak oksitler veya diğer bileşikler de üretilir [63-64]. Yöntem, teknik olarak soğuk bir günde suyun ısıtılmasına benzemektedir. Isınan su buharlaşarak bulunduğu ortamla etkileşiminden dolayı ısı kaybetmeye başlar ve soğuk cam yüzeyinde su damlacıklarının yoğunlaşması gerçekleşir. Şematik görünümü Şekil 1.12'de verilen asal gaz yoğunlaştırma tekniği aşağıdaki işlemlerden oluşmaktadır.



Şekil 1.12. Asal Gaz Yoğunlaştırma İşleminin Şeması[58]

Buhar oluşumundan önce sistem vakuma alınıp 1– 50 mbar asal gaz ile doldurulduktan sonra başlangıç malzemesi ısı, lazer veya elektron demeti gibi herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak buharlaştırılmaktadır. Buharlaşma W, Ta veya Mo potalarda gerçekleştirilir. Buharlaşan atomlar veya moleküller homojen olarak toplanarak ısı kaynağının hemen yakınlığında atom kümelerini oluştururlar. Buhar kaynağının üzerinde aşırı doygunluğa ulaşılır ve başlangıç malzemesinin buharlaşan atomları ile sistem içinde var olan gaz moleküllerinin çarpışması sonucu enerjilerini kaybetmeleriyle çekirdeklenme ve partikül oluşumu sıvı metale yakın bölgede gerçekleşir. Bu sebepten yüksek gaz basıncının varlığı çarpışma sayısını artıracığından daha hızlı soğuma ile çok ince partiküllerin oluşmasını sağlamaktadır .

#### 1.5.1.1.4. Mikroheterojen Sistemlerden Nanopartikül Üretimi

Aşağıdan yukarıya yaklaşımla moleküler seviyeden nanopartikül üretimi için kullanılan sentetik metotlar, farklı mikroheterojen sistemlerin kullanımını temel alır. Bahsedilen mikroheterojen sistemler sıvı kristaller, jeller, misel çözeltileri ve mikroemülsiyonlar formunda olabilirler. Bunlar hızlı ve düşük maliyetli teknikler olup, metaller, oksitler, sülfatlar ve suda çözünmeyen maddeler ile birlikte suda çözünabilir inorganik ve organik malzemelerin nano boyutta sentezlenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca yöntem, çekirdek-kabuk, katkılı, sandviç veya poroz nanopartiküllerin üretiminde

kolaylıkla kullanılabilir. Mikroheterojen sistemler son ürün olarak pratik uygulamalara sahiptir. Manyetik, elektrik, ısıtma ve/veya yağlayıcı özelliklere sahip olabilen ve günden güne ilginin arttığı bu tür sistemlere nano akışkanlar denmektedir. Özellikle manyetik nano akışkanlar günümüzde medikal sektörden otomotiv sektörüne kadar geniş kullanım alanı bulmuştur [65].

#### **1.5.1.1.5. Alev Sentezi Yöntemi ile Nanopartikül Üretimi**

Nanopartiküllerin ticari miktarlarda üretimi için yaygın olarak kullanılan alev sentezi tekniği diğer metotlardan farklı avantajlara sahiptir. Bunlar kimyasal bileşim aralığı, partikül morfolojisinin kontrolü, partikül boyut dağılımının kontrolü ve düşük maliyettir. Alev ortamının yüksek oksitleyici etkisinden dolayı yöntem özellikle oksit nanopartiküllerin üretimi için de uygundur. Buhar fazından sentez yöntemleri arasında bulunan alev sentezi tekniğinde kolay uçuculuğa sahip metal halojenürler başlangıç malzemesi olarak kullanılırken, oluşan buhar fazının hava, hidrojen veya oksijen gibi bir gazla alev ortamına taşınmasıyla gerçekleşen gaz fazındaki reaksiyonlar sonucu atom kümelerinin oluşumu ve bunların birleşimiyle de nanopartikül oluşumu gerçekleşmektedir. [66].

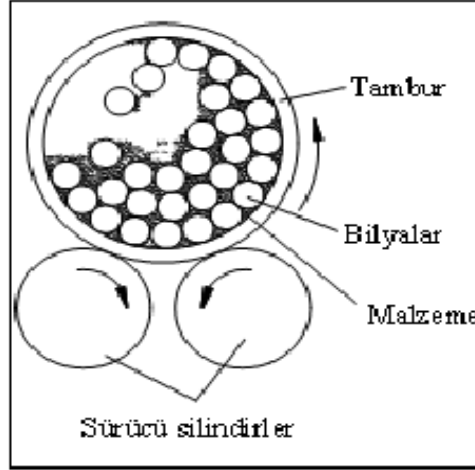
#### **1.5.1.1.6. Mekanik Öğütme Yöntemi**

Toz partiküllerin mekanik öğütme yöntemiyle üretimi 1970'li yıllarda endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiş olup, yeni alaşımlar ve faz karışımlarının üretimi bu teknik sayesinde başarıyla gerçekleştirilmektedir. Yukarıdan aşağıya üretim yaklaşımına sahip bu yöntemde, nanoyapılar kaba taneli veya bulk yapıların plastik deformasyonu sonunda ayrışmasıyla oluşur. Mekanik öğütme yönteminde alaşım, intermetalik, seramik ve kompozit gibi amorf veya nano-yapılı malzemelerin geniş bir bileşim aralığında üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Tekniğin endüstriyel kullanımı işlem sırasında kolaylıkla kırılabilen sert ve gevrek özellikli malzemeler ile sınırlıdır. Bu amaç için kullanılan birçok farklı bilyalı öğütücüler aşağıda listelenmiştir;

- Aşındırıcı öğütücüler
- Gezeggen tipi öğütücüler
- Titreşimli öğütücüler
- Yüksek enerjili bilyalı değirmenler



Tozların ince partikül boyutuna inebilmesi için gerekli enerji kullanılan yüksek frekans ve düşük genlikli titreşimlerden elde edilir. Kırılgan malzeme tozlarının üretiminin yapıldığı bu yöntemde, temel prensip parçalanacak malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana gelmesini sağlamaktır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyelerin bulunduğu kaba, önceden kaba bir biçimde kırılmış olarak yerleştirilir. İri taneli öğütülecek malzeme öğütücü kap içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyeler ile birlikte döndürülerek veya titreştirilerek darbe etkisiyle çok küçük tozlara bölünür. Eğer öğütülen malzeme gevrek ise, bilyelerle çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünür ve öğütme şartları ve toz özelliklerine bağlı olarak nano boyutlu tozlar üretilebilir. Şekil 1.13’de bilyalı öğütme sisteminin şematik görünümü verilmiştir [35].

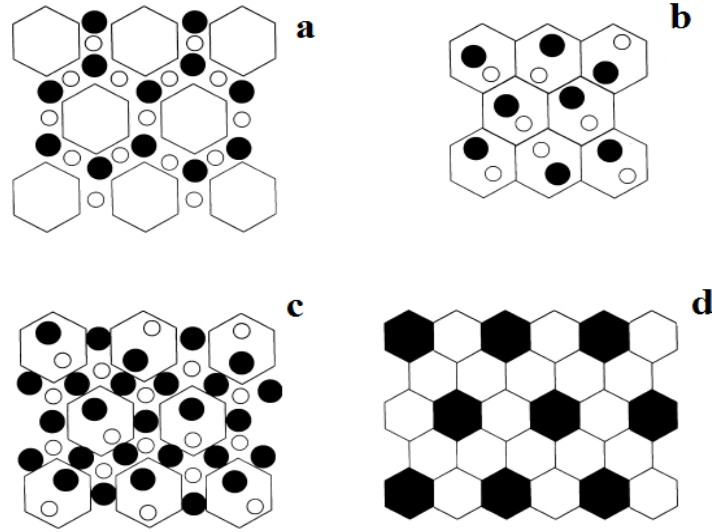


Şekil 1.13. Bilyalı öğütme sisteminin şematik görünümü[35]

Mekanik öğütme işleminin en büyük dezavantajı, öğütme sırasında öğütülen malzeme bileşimine kullanılan bilya bileşiminden safsızlık karışmasıdır. Ayrıca açık atmosferde gerçekleşen proseslerde metalik partiküller oksitlenmekte veya yüzeyde azotlu yapılar oluşmaktadır. Fakat bu sorun öğütücü haznesinin asal gaz ile doldurulması ve sızdırmaz uygun contaların kullanılmasıyla zorda olsa ortadan kaldırılabilmektedir.

### 1.5.2. Nanokompozitler

Nano kompozitler en az bir fazı (matris,takviye elemanı) nanometrik boyutlarda olan yeni bir malzeme çeşididir. Nano kompozitler matris yapısına göre metal matrisli kompozitler (MMNK), seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler, olarak sınıflandırılabilir. Diğer bir sınıflandırma şekli olan mikroyapıya göre sınıflandırma Niihara tarafından yapılmıştır. Niihara'ya[67] göre nanokompozitler, partiküllerin yapıda bulunduğu yere göre tane içi, taneler arası, hibrit ve nano-nano kompozitler olarak dörde ayrılır(Şekil 1.14). İlk üç sınıfta, takviye elemanı nanometrik ölçülerde olmasına rağmen matris fazı nanometrik ölçüde değildir. Ancak son sınıfta, matris ve takviye elemanının her ikisi de nanometrik boyutlardadır ve yapıya rastgele dağılmışlardır. Taneler arası nanokompozitlerde (Şekil 1.14a), nanometrik ölçülerdeki takviye elemanı, mikron mertebesindeki matris fazında tane sınırları boyunca dağılır. Tane içi nanokompozitlerde (Şekil 1.14b) ,takviye elemanı kaba matris tanelerinin içinde bulunur, hibrit şeklindeki nanokompozitlerde (1.14c) ise takviye elemanı,hem matris taneleri içinde hemde tane sınırlarında bulunur.



Şekil 1.14. Nanokompozitlerin mikroyapıya bağlı olarak sınıflandırılması  
a)tanelerarası b)tane içi c)nano hibrit d)nano/nano yapılar

Nanokompozitlerin mukavemet, kırılma tokluğu, eğilme mukavemeti, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık özelliklerinin iri taneli yapılarından daha yüksek olması beklenir [68]. Bu özelliklerinden dolayı nanokompozitler, uzay araçlarında, jet

motorlarında ve yapısal uygulamalarda kullanım için aday malzemelerdir. Günümüzde nanokompozitlere olan ilgi artmaktadır.

Kemik ve sedef gibi doğal nanokompozitler yıllardan beri bilinmektedir. Kemik çok yüksek mukavemet ve tokluğa sahip bir yapıdır. Kemiğin yapısında kollajen liflerin içerisine dağılmış, tabakalı yapıya benzer, nanometrik ölçülerde hidroksiapatit  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  bulunmaktadır. Tek başına hidroksiapatit ve kollajen lifler yeterli derecede yapısal özellik içermezler. Ancak bunlar ve diğer katkı malzemeleri kemiğin yapısını bir araya getirmek için bir araya geldiklerinde, ortaya çıkan nanokompozit yapı, sentetik malzemelerle kıyaslanamayacak kadar yüksek özelliklere sahiptir.

### 1.5.2.1. Nanokompozitlerin Özellikleri

Nanokompozitlerin tane boyutunun çok küçük olmasından dolayı, iri taneli malzemelerle kıyaslanamayacak kadar yüksek ve farklı özellikler sergilerler. Bu özellikler; yüksek mukavemet, sertlik, yüksek difüzyon kabiliyeti, gelişmiş tokluk/süneklik, düşük yoğunluk, düşük elastisite modülü, yüksek elektrik direnci, yüksek kullanım sıcaklığı, yüksek termal genlik, düşük ısıl iletkenlik ve üstün manyetik özellikler olarak örneklendirilebilir. Bunların arasında en önemli üstünlük malzemenin mekanik özelliklerinde görülmektedir [69].

#### 1.5.2.1.1. Sertlik ve Mukavemet

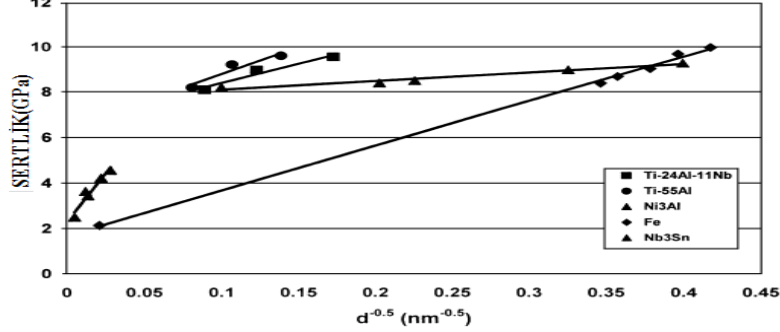
Genel olarak nanoboyutlu malzemelerin sertlik ve mukavemet değerlerinin iri taneli yapılarından daha fazla olması beklenir. Sertlik ve mukavemet değerlerindeki bu artışın sebebi birkaç parametreye bağlı olmakla birlikte bunların başında Hall-Petch bağıntısıyla açıklanan tane boyutunun etkisi gelmektedir [55].

$$\delta = \delta_0 + kd^{-1/2} \quad (3.2)$$

Burada  $\delta$ ; malzemenin akma mukavemeti,  $d$ ; tane boyutu  $\delta_0$  ve  $k$  malzeme sabitleridir.

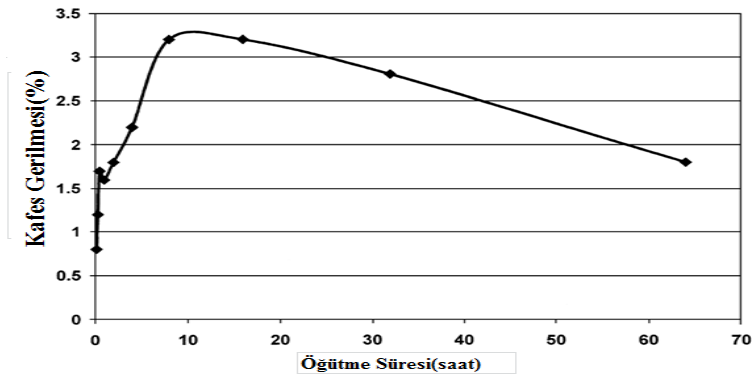
Bu bağıntı tane boyutunun, malzemelerin sertlik ve mukavemeti üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Sertlik ve mukavemet azalan tane boyutu ile artmaktadır. Bu eşitlik nanokristalin malzemeler içinde geçerlidir. Şekil 1.15 MA yöntemiyle üretilen farklı

malzemelerin sertliklerini göstermektedir. Bu grafikte anlaşılacağı üzere Hall-Petch bağıntısı nanokristalin yapılar için doğrulanmaktadır.



Şekil 1.15: Bazı malzemelerin sertliği ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik[57]

Mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen nanokristalin malzemelerin sertlikleri, iri taneli geleneksel yapılarından 4-5 kat daha fazladır. Öğütülmüş tozların sertlik ve mukavemetini arttıran diğer bir faktörde, tozlarda meydana gelen kafes gerilmeleridir. Kafes gerilmeleri, öğütme süresiyle artar ve belirli bir öğütme süresinden sonra pik noktasına ulaşarak öğütmenin son aşamalarına doğru azalır.(Şekil 1.16) Kafes gerilmelerinin büyük çoğunluğunu, öğütme sırasında oluşan dislokasyonlar oluşturduğu için, artan dislokasyon yoğunluğuyla beraber kafes gerilmeleri de öğütme süresiyle artar. Ancak belirli bir öğütme süresinden sonra, tane boyutu daha fazla küçülmez çünkü boyutu çok küçülen tanelerde artık daha fazla dislokasyon oluşamaz.



Şekil 1.16: Mekanik alaşımlama yönteminde, öğütme süresine bağlı olarak kafes gerilmesi grafiği [57]

Nanokristalin malzemelerde sertlik değeri, tozlardaki atomik gerilme miktarlarıyla orantılıdır. Şunu da hatırlatmakta fayda vardır ki, bilinen bir tane boyutu için dislokasyon hareketi öğütme şartlarına bağlı olarak farklı bir değere kadar devam edebilir ayrıca gerilme değerleri de farklılık gösterebilir. Mekanik alaşımlanmış tozların sertliğini incelerken tane boyutu ve kafes gerilmelerinin ikisi birlikte dikkate alınmalıdır. Bu iki esas etkenin yanında, katı çökelti sertleşmesi ve dispersiyon sertleşmesi olayları da malzemelerin sertlik ve mukavemet değerlerini artırır. Nano kristalin malzemeler kritik bir tane boyutuna kadar Hall-Petch bağıntısına uygun davranış sergilerler. Bu kritik değer altında, sertlik, mukavemet değerleri ile tane boyutu arasında ters bir ilişki vardır. Tane boyutu azaldıkça sertlik ve mukavemet değerleri de azalır. Bu kritik değer malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir ama genellikle 10-20 nm arasındadır. Nanokristalin malzemelerin deformasyon mekanizmaları geleneksel kristal yapı malzemelerden daha farklı olabilir. Bazı durumlarda malzemenin sertliğinin tane boyutunun karesiyle ters orantılı olduğu görülsede bazı durumlarda ise tane boyutuyla lineer bir orantı olduğu görülmüştür. [70]

#### **1.5.2.1.2.Sinterlenebilirlik**

Nanokristalin malzemeler yüksek sinterlenebilme özelliği sergilemektedir. Bu da sinterlenme sıcaklığını düşürürken sinterlenme hızını artırır. Nanokristalin malzemelerin, tane sınırlarının da yüksek miktarda atom bulunmasından dolayı, arayüzeyler yoğun bir şekilde kısa mesafeli difüzyon gerçekleşmesini sağlar. Artan difüzyon kabiliyetinin en önemli katkısı, sinterleme sıcaklığının geleneksel iri taneli yapılardan çok daha düşük olmasıdır. Örneğin tane boyutu 12nm olan  $TiO_2$ , tane boyutu  $1.3\mu m$  olan  $TiO_2$ ' den 400-600<sup>0</sup>C daha düşük sıcaklıklarda, bağlayıcı ve sinter katkıları kullanılmadan sinterlenebilir. [71]. Aynı şekilde nano boyutlu TiAl'yi sinterlemek için gereken sıcaklık, iri taneli TiAl'yi sinterlemek için gereken sıcaklıktan 400 <sup>0</sup>C daha düşüktür [72].

İnce taneli yapının sağladığı bir diğer özellik ise, değişik alaşım sistemlerinde katı çözünürlüğün artmasıdır. Örneğin bir biri içinde çözünmeyen Cu-Hg sisteminde nanokristalin yapıda %17 Hg çözünürlüğü elde etmek mümkündür [72]. Aynı şekilde denge şartlarında magnezyumun Ti içinde çözünürlüğü sıfır iken, nanokristalin yapıda çözünürlük artmaktadır.

### 1.5.2.1.3. Termal Kararlılık

Polikristalin malzemelerde tane büyümesi, sistemin yüksek enerjisinden dolayı, ara yüzeylerdeki enerjiyi azaltmak için meydana gelir. Nanokristalin malzemelerin ara yüzeylerde yüksek enerjili, düzensiz bileşikler içermesinden dolayı, tane büyümesini sağlayan kuvvetin büyük olması beklenir. Bu yürütücü kuvvet, tane sınırlarının miktarıyla doğru tane büyüklüğüyle de ters orantılıdır.

Nanokristalli malzemelerin termal kararlılığı teknolojik ve bilimsel açıdan önemlidir. Teknolojik açıdan bakıldığında, yapı termal kararlı olmalı ve ısı artışından etkilenmemeli, ısı artışıyla tane büyümesi gerçekleşmemelidir. Bilimsel açıdan bakıldığında, nanokristalin malzemelerde tane büyümesinin iri taneli yapılara benzer olup olmadığını incelemekte fayda vardır. Beklentilere uygun olarak, hangi yöntemle üretilmiş olursa olsun bütün nanokristalin malzemelerde, tane büyümesi çok yüksek sıcaklıklara kadar önemsiz miktarlarda gerçekleşir. Nanokristalin malzemelerde görülen tane büyümesi direnci, tane büyümesini kolaylaştıran bir itici kuvvet olmamasından kaynaklanır [72]. Bu durum, küçük tane boyutları, eş eksenli tane yapısı, düşük enerjili tane sınırları, diğer yapılara kıyasla daha yassı tane sınırları ve yapıdaki düşük porozite ile açıklanabilir.

## 1.6. Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri

Nanokompozitlerin geniş bir araştırma alanının olması ve nanokompozitlere olan ilginin her geçen gün artmasında dolayı, nanokompozitlerin üretiminde birçok farklı matris ve takviye elemanları kullanılmaktadır. Farklı özelliklerde matris ve takviye malzemelerinin kullanılıyor olması MMNK'lerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine sebep olmuştur ancak genel olarak metal matrisli nanokompozit üretimi ile metal matrisli kompozit üretimi arasında önemli farklılıklar yoktur, en temel fark üretimde kullanılan partiküllerin boyutudur. Üretim sırasında matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre MMNK'lerin üretim yöntemleri şekilde gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür;

### Katı-Faz Üretim Yöntemleri

- Difüzyonla Bağlama
- Toz Metalurjisi (TM)

### Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri

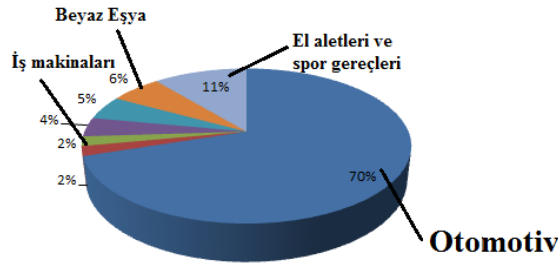
- Sıvı-Metal infiltrasyon
- Püskürtme
- Karıştırmalı döküm
- Kompo döküm
- Reaktif (In-situ) yöntemi
- Sıkıştırırmalı döküm

### Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compocasting Döküm Yöntemleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

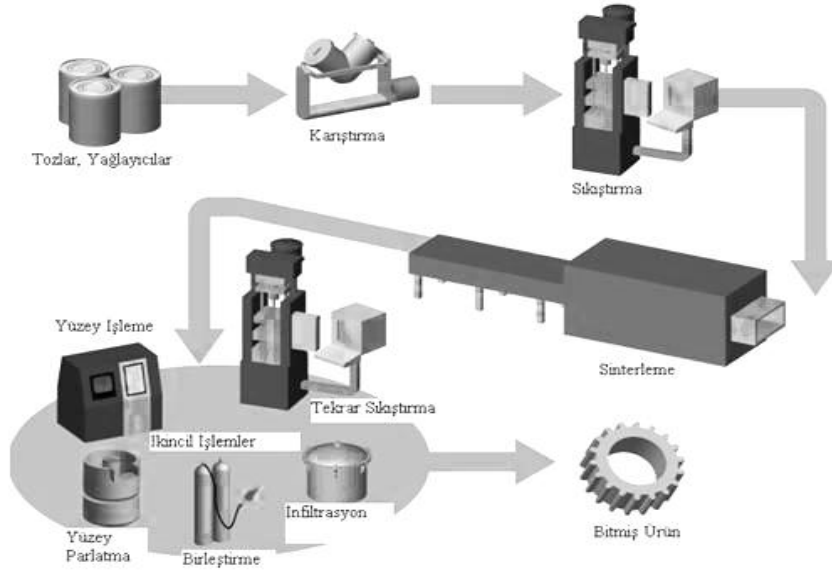
## 1.7.Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi, çok küçük boyutlu partikülleri birbirine bağlayarak kompleks şekilli parçaların yüksek kalite ve düşük boyutsal toleransta üretimine olanak sağlayan bir üretim yöntemidir. Toz metalurjisi yöntemi ile birçok farklı alaşımlar, seramikler, metaller ve polimer malzemeler yüksek boyut hassasiyetiyle üretilebildiği için diğer metal üretim tekniklerine göre avantajlı bir işlemdir. Bu nedenle toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin pazar payları hızlı bir şekilde artmakta ve bu malzemeler bir çok sektörde kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 1.17’de toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin kullanım alanları verilmektedir. Toz metalurjisi sektörünün en büyük müşterisi % 70 pay ile otomotiv sektörüdür. El aletleri ve spor gereçleri sektörü ise, % 11’lik payla ikinci sırayı almaktadır [73].



Şekil 1.17. Toz metalurjisiyle üretilen parçaların kullanım alanları

Toz metalurjisi yöntemi metal matrisli kompozit ve nanokompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Seramik partiküllerin sıvı metal tarafından ıslatılmasındaki güçlükler nedeniyle toz metalurjisi ile kompozit üretimi yöntemi ilk geliştirilmiş tekniklerden birisidir. Bu teknikte genel olarak partikül veya whisker formunda takviye elemanları ile toz haldeki metal kullanılarak, metal matrisli kompozit malzeme oluşturulur. Yaygın kullanılan takviye elemanları silisyum karbür, grafit, titanyum karbür, en çok kullanılan matris malzemeleri ise alüminyum, titanyum ve bakırdır. Toz metalurjisi işleminde metalin ergitilmesi ve döküm işlemleri olmadığı için diğer yöntemlere göre daha az maliyetlidir, ayrıca elde edilen ürün doğrudan istenilen boyutlarda ve çok düşük yüzey hatalarında üretildiği için son yüzey işleme maliyetide çok azdır.



Şekil 1.18. Geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle malzeme üretim aşamaları

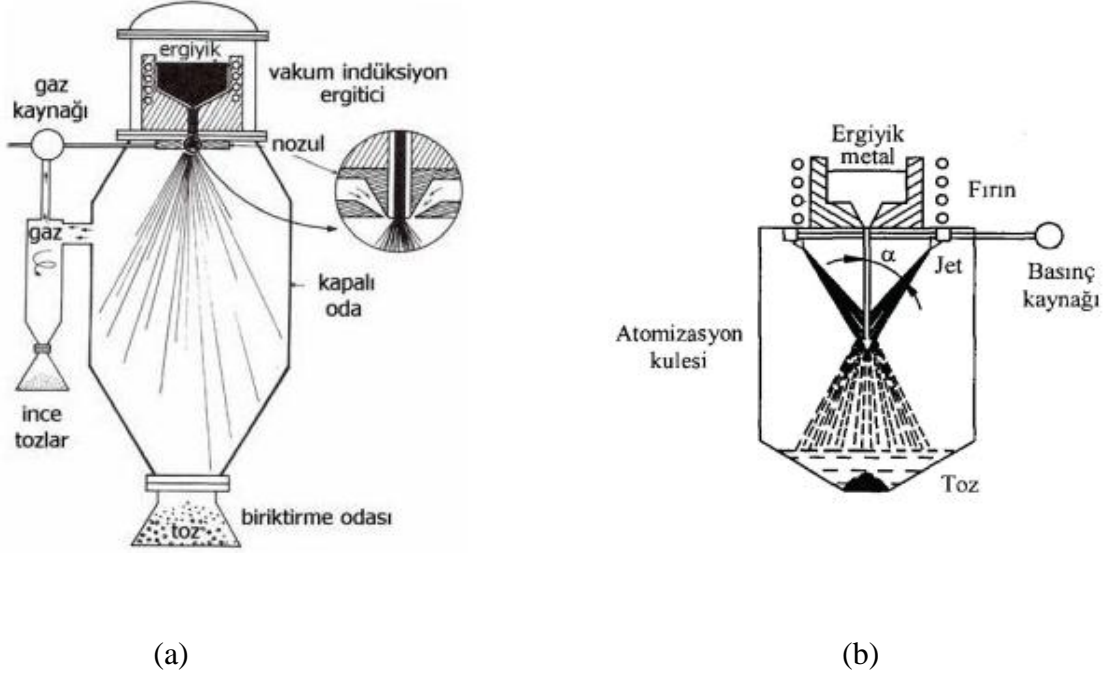
### 1.7.1. Metal Tozlarının Üretimi

Toz metalurjisinde başarılı bir son ürün elde edebilmek için başlangıç malzemeleri çok önemlidir. Tozların kimyasal bileşimi ve saflığının yanında parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve tozların yüzey yapısında dikkat edilmesi gereken



konulardır. Tüm toz metalurjisi yöntemleri hangi tip parça üretilecek olursa olsun ham madde olarak toz formunda malzemedan başlamaktadır. Toz ince olarak parçalanmış katılardır. Bu boyut genel olarak 1 mm'den daha küçük boyutludur. Metal tozlarının üretiminde 4 temel yöntem vardır. Bunlar mekanik küçültme, kimyasal indirgeme, elektrolitik biriktirme ve sıvı metal atomizasyonudur. Metal tozları üretim yöntemine göre şekilleri küreselden karmaşık yapıya kadar değişebilir. Parçacık toz yüzeyi, tozun akış özelliklerini, yüzey alanını ve presleme sonrası yoğunluğunu etkileyen bir parametredir. Kimyasal bileşim ve saflıkta tozların preslenmesini etkileyen faktörlerdir.

Genel olarak her türlü malzeme toz haline getirilebilir. Bulk malzemedan toz üretme işlemi üç farklı yol ile gerçekleştirilir: atomizasyon, kimyasal ve elektrolitik yöntem. Atomizasyon yöntemi bu yöntemlerin arasında en çok tercih edilen toz üretim yöntemidir. Atomizasyon ergimiş metalin basınçlı sprey ile aniden soğutulmasıyla toz haline getirilmesidir. Bunun için çeşitli yöntemler vardır. Birisi ergimiş metal akarken su püskürtülerek ani soğutma ile küçük parçacıklar elde edilmesidir. Su atomizasyonu metali çok hızlı soğutur bu sebeple daha düzensiz şekilli parçalar elde edilir. Su aynı zamanda bazı metalleri oksitler. Daha uygun bir atomizasyon yöntemi ergimiş metale inert bir gaz püskürtülmesidir. Bu yöntemle malzeme daha yavaş soğutulur böylece daha yuvarlak şekilli tozlar elde edilebilir. Bir başka yöntem de ergimiş metali dönen bir disk üzerine dökülmesi ile yapılır. Bu şekilde malzeme dönen diskten fırlayarak toz toplayıcı haznenin duvarına çarpar ve hızlı bir şekilde soğutulur toz elde edilir. Kimyasal indirgeme metal tozları üretimi için bir başka yöntemdir. Farklı kimyasal reaksiyonlar içeren bu yöntem metalin elementel toz haline indirgenmesi esasına dayanmaktadır. Elektroliz yöntemi de çok yüksek saflıkta tozlar üretmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem elektriksel akım kullanarak metali çözüp çok ince toz haline getirme esasına dayanmaktadır. Sistemde elde edilmek istenilen toz malzemesi, anot kutbuna bağlanır. Elektrolit sıvısına verilen akım malzemeyi anottan katoda taşır ve kolayca yıkanabilen bir film şeklinde katod üstüne yapıştırır. Bu filmler temizlenip kurutulur istenilen toz elde edilmiş olunur [74].



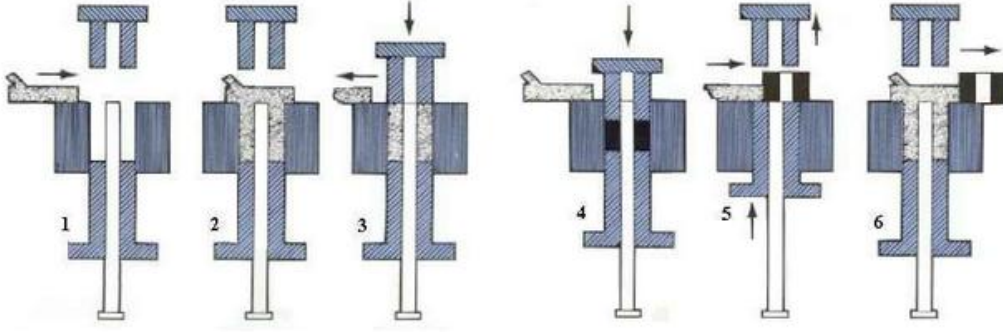
Şekil 1.19. Atomizasyon yöntemleri a)Gaz atomizasyonu b)Su atomizasyonu [74]

### 1.7.2. Tozların Preslenmesi

Tozların preslenmesinde ana amaç, ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Sıkıştırma, bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Değişik sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın sıkıştırma yöntemi, bir çelik veya sert bir metal kalıp içerisinde istenilen basınç altında aksenal preslemedir. Presleme sonrası parça kalıptan çıkarılabilecek yeterli mukavemete sahiptir. T/M üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı presleme ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir.

Presleme esnasında tozlar, kalıba doldurulma sırasında sadece yerçekiminin etkisi altında serbest, düzensiz ve gelişigüzel köprücükler kurarak yığılırlar. Bu arada toz partikülleri arasında büyük boşluklar vardır. Kalıbın titreştirilmesi sonucu tozlar kalıp içerisinde daha yüksek yoğunluklu olarak düzene girerler. Bu birinci safha "paketlenme safhası" olarak adlandırılır. Bundan sonra kalıbın ve presin hareketleri sonucunda tozlar sıkışmaya başlarlar. Belirli bir basınçtan sonra toz partikülleri ilk önce elastik daha sonra plastik şekil değişikliğine uğrarlar. Şekil değiştirme kabiliyeti olmayan metal tozları ise kırılırlar. Toz taneciklerinin yüzeylerindeki kayma deformasyonu sonucu meydana gelen

bu şekil değişiklikleri toz partiküllerine etki eden simetrik ve asimetrik kuvvetler sonucudur. Bu deformasyonlar sonucu toz partikülleri birbirlerine kenetlenerek kümeler oluştururlar. Bir yandan da oksit tabakaları kırılır. Bu safhaya “elastik ve plastik şekil değiştirme safhası” adı verilir. Mekanik kenetlenme olayı esnasında şekil değiştirmiş olan toz partiküllerinin birbirlerine değme alanları yani paketlenme faktörleri de artmıştır. Sıkıştırma sonucu partiküller arası adhezyon kuvveti artar ve şekil değiştirme yeteneği kalmayan tozlar soğuk kaynak olur ve sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur[75]. Presleme tek etkili ya da çift etkili yapılabilir. Şekil 1.20’de tek etkili preslemenin aşamaları görülmektedir [76].



Şekil 1.20. Tek eksenli preslemenin aşamaları [75]

Tek etkili presleme yönteminde üst zımba hareketli ve alt zımba sabittir. Tozlar kalıba doldurulduktan sonra kuvvet, sadece bir yönden uygulanır. Kuvvetin en az iletilebildiği kısım kalıbın ortasında bulunur. Dolayısıyla bu bölgede düşük yoğunluklu koniye benzer toz katmanları oluşur. Maksimum yoğunluk basıncın uygulandığı tarafta, üst zımbanın alt yüzeyi çevresince oluşur. Bu, tek etkili preslemenin dezavantajıdır. Bu nedendir ki, bu tip presleme tekniği, ince ve tek kademeli parçaların imalatında kullanılır. Kalınlığı (yüksekliği) fazla olan parçaları bu yöntemle imal etmek uygun değildir [76]

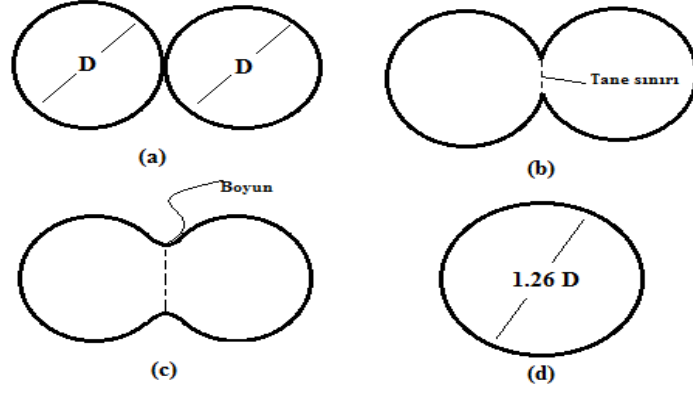
Metal kalıplarda preslemede dikkate alınması gerekli faktörlerden bir tanesi, toz ve kalıp duvarı arasındaki sürtünmedir. Tek eksenli presleme de dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz-kalıp duvarı arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına neden olmaktadır. Sonuç olarak uygulanan yük düzenli olarak kalıp içerisindeki toza uygulanmamaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk

homojen bir dağılım göstermemektedir. Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yoğun olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Bu amaçla sürtünmeyi en aza indirmek, üniform bir yoğunlaşma elde edebilmek ve sıkıştırabilirliği arttırmak için yağlayıcılar kullanılır. En çok kullanılan yağlayıcılar çinko stearat, stearik asit ve asetondur. Kalıp duvarlarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gereklidir. Bundan dolayı genellikle çok sert metal kalıplar kullanılmaktadır [77].

Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk alırlar. Bu görünür yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlıdır. Basınç arttıkça, malzemenin yoğunluğu da artar veya alternatif olarak gözeneklilik azalır. Sonuç olarak tozlarda, uygulanan yükten dolayı deformasyonla birlikte ham yoğunluk meydana gelir. Ancak bu durumda malzeme uygulamalarda kullanılabilir durumda değildir, çünkü tozlar arasındaki bağ kuvveti bu haliyle yetersizdir. Tozların birbirine daha iyi bağlanmasını sağlamak, malzemenin mukavemetini ve yoğunluğunu arttırmak için şekillendirilmiş numunenin sinterleme denilen pişirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir.

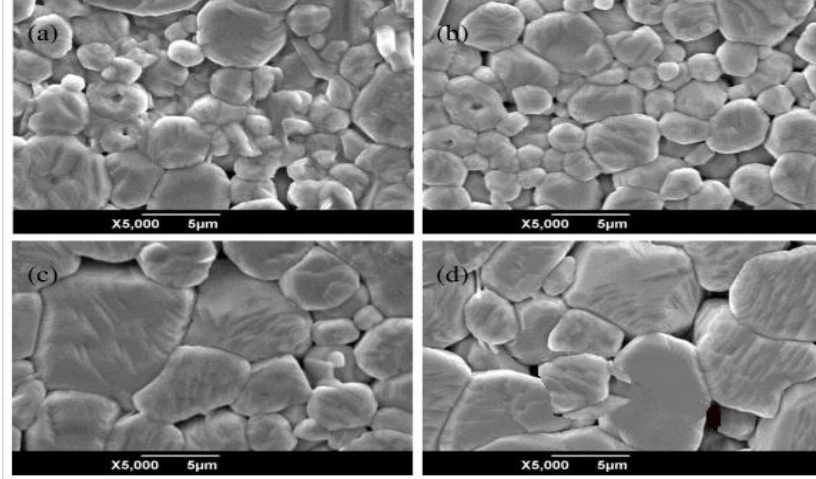
### **1.7.3.Sinterleme**

Tüm toz metal ve seramik parçalar, mukavemet kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda sinterleme işleminin tabi tutulurlar. Sinterleme TM'nin en önemli üretim süreçlerinden birisidir ve bir ısıl işlemdir. Bu işlemde ön şekil verilmiş tozların belli bir sıcaklık ve sürede birbirlerine bağlanması, rijit bir kütleye dönüşmesi sağlanır. Ön şekillendirilmiş toz kütlelerine en az iki fazlı bir malzeme diye, yani katı ve gözenek diye yaklaşım yapılabilir. Bunların her biri kendi morfolojisine, boyut dağılımına, şekil ve miktarlara sahiptirler. Sinterleme, gözenekli yapıda bir şekil kazandırılmış tozların spesifik yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısıl olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olayı olarak tanımlanabilir. Sinterleme ile partikül temas noktaları artmakta ve atomlar ile iyonlar arasında fiziksel bir bağ oluşmaktadır (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. Sinterlemede parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren sinterleme modeli.

Sinterleme, malzemenin cinsine, numunenin şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak değişik metodlarla gerçekleştirilebilir. Sinterleme metodları, genel olarak; katı, sıvı ve reaksiyon sinterlemesi olarak üç grupta toplanmıştır. Ayrıca sinterleme sıcaklığı, sinterleme atmosferi, sinterleme süresi gibi sinterleme parametreleri de sinterleme sonucunu etkileyen önemli faktörlerdendir.



Şekil 1.22. Sinterleme süresinin mikro yapı ve tane büyüklüğüne etkisi  
a)0,5h b)1h c)1.5h d)2h sinterlenmiş seramik malzeme [79]

Sinterleme işleminde esas amaç gözenekleri azaltmak ve malzemeye mukavemet kazandırmaktır. Sinterleme sıcaklığı en genel olarak malzemenin ergime sıcaklığının 0,3-

0,5 katı aralığında seçilir ve bu sıcaklıkta ısıl aktive olmuş difüzyon yardımıyla tane sınırlarından malzeme taşınımı gerçekleşerek taneler arası bağ oluşumu sağlanır.

#### **1.7.4. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları**

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemleriyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Özellikle partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

➤ Toz metalurjisi (TM) ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi diğer yöntemlere göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda matris ve takviye elemanı arasında daha az kimyasal etkileşim olmaktadır. Böylece mekanik özelliklerin azalmasına neden olan istenmeyen arayüzey reaksiyonları en aza indirgenmiş olmaktadır.

➤ Takviye elemanının matris içinde homojen dağılımının sağlanabilmesi ancak TM yöntemiyle gerçekleştirilebilmektedir. Döküm metotlarında tam homojen olmayan parçacık dağılımı elde edildiğinden TM yöntemi tercih edilmektedir.

➤ Döküm tekniği yerine toz metalurjisi yöntemi tercih edilen parçacık ve Whisker takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde hem daha homojen partikül dağılımı hem de daha homojen yoğunluklu ürünler elde edilir.

➤ TM yönteminde daha yüksek takviye hacim oranının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bundan dolayı da yüksek elastisite modülüne ve düşük termal genleşme katsayısına sahip kompozitler üretilmektedir.

Toz metalurjisi yönteminin yukarıda yazıldığı gibi diğer üretim yöntemlerine göre bir çok üstünlüğü olmasına rağmen, bazı eksik ve yetersiz yönleri de vardır, bunlardan bazıları;

➤ Kısa fiber takviyelerin kullanıldığı kompozitlerde, toz karıştırma işlemi sırasında kısa fiberlerin kırılması yapıdaki homojenliği bozmaktadır. Farklı boyutlardaki fiberler yoğunluk gradyanı başta olmak üzere malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen birçok sorunu beraberinde getirmektedir.

➤ Yoğunlukları birbirinden çok farklı olan malzemelerin üretiminde, tozların preslenmesi sırasında düşük basınçlı tozların yüzeye doğru çıkması ürün özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

➤ Büyük parçaların homojenliği küçük parçalara göre daha düşüktür, çünkü üretilen parça büyüdükçe uygulanan basıncın her tarafa homojen olarak iletilmesi zorlaşır ve malzemenin çeşitli bölgelerinde yoğunluk, sertlik gibi özelliklerinde farklılıklar görülür.

➤ İlk yatırım maliyeti fazladır ve kullanılan kalıplar pahalı olmasına rağmen ömürleri çok fazla değildir, çünkü periyodik olarak uygulanan yüksek basınçlar kalıbın deforme olmasına ve kırılmasına sebep olmaktadır.

### **1.8.Mekanik Alaşımlama**

Döküm, plastik şekillendirme gibi geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan parçaların üretiminde yaygın olarak toz metalurjisi yöntemleri kullanılmaktadır ve bu yöntemler son yıllarda teknolojinin de gelişmesiyle hızlı bir gelişme göstermiştir. Ancak bu geleneksel yöntemlerde karşılaşılan üretim zorlukları, son üründe görülen hatalar, son yıllarda nano teknolojiye olan ilginin artması ve nano teknolojideki hızlı gelişme toz metalurjisini, özellikle de toz metalurjisinin yeni yöntemlerinden biri olan mekanik alaşımlama (MA) yöntemini çok önemli hale getirmiştir. MA normalde kuru ve yüksek enerjili bilyeli öğütme tekniğidir. Aynı zamanda son derece ince ve homojen mikro yapılar üretmek için toz malzemelerin inert bir ortamda yoğun öğütme işlemiyle sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynaklanmaya ve yeniden kırılma ile yeniden kaynamaya maruz bırakılan düşük sıcaklıkta yapılan alaşım sentezleme yöntemidir. Bir başka ifadeyle mekanik alaşımlama, tozların sertleştirilmiş çelik bilyeler veya tungstenkarbür bilyeler ile istenilen sürelerde öğütülerek ve karıştırılarak yapılan bir katı hal alaşımlama işlemidir. Bu teknik bilimsel ve ticari olarak kullanılabilen malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Klasik alaşımlama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, heterojenlik, işlemler sırasında meydana gelen istenmeyen reaksiyonlar, mekanik alaşımlama ile ortadan kaldırılabılır. Aynı zamanda ekonomik ve uygulama alanının geniş olması büyük avantaj sağlar. Bunların başında geleneksel yöntemlerle birbirleriyle karışması ve alaşım oluşturması mümkün olmayan elementlerin karıştırılabilmesi gelir. Bunu başka tekniklerle gerçekleştirmek mümkün değildir [1-10].

Ciddi mühendislik malzemeleri olan kompozit ve seramiklerin devreye girmesi ile metal ve alaşımlarının gelecekteki rolü işlem gelişiminin etkisine ve kalitesine bağımlı olacaktır. Alaşım gelişimi için mevcut çizgiler, yeni ve kaliteli bir teknoloji olan mekanik alaşımlama, normalde uyumsuz olan bileşenlerin elde edilmesinde önemli bir yeterlilik arz eder. İşlemin esnekliği, klasik alaşımların yanında yarı kararlı fazlar, amorf fazlar, intermetalikler ve hatta sermetler ve organik-seramik metalik malzeme sistemlerine uzanmaktadır [80,81].

### **1.8.1. Mekanik Alaşımlama Prosesi**

Mekanik alaşımlama işlemi yüksek enerjili bilyeli değirmen içerisinde metal ve seramik tozlarının sürekli olarak kırılması ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanmasını içeren bir katı faz işlemidir. Yüksek hızda meydana gelen bilye-toz-bilye ve bilye-toz-öğütücü kap çarpışmaları, tane boyutunun küçülmesine, takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen dağılmasına, katı çözünürlüğünün artmasına, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkân sağlar. Yüksek enerjili öğütme de dışarıdan hiçbir etki olmaksızın yeni fazlar oluşabilir. Öğütme sırasında toz karakterizasyonunu etkileyen iki temel mekanizma vardır bunlardan birincisi; ortalama toz boyutunu artıran soğuk kaynak işlemi diğeri ise tozların küçülmesini sağlayan kırılma işlemidir. Yüksek enerjili öğütmede tozlar sürekli olarak bilye-toz-bilye veya bilye-toz-öğütme potası arasında yüksek enerjili çarpışmalara maruz kalırlar. Bu çarpışmalar esnasında bilye-bilye veya bilye-öğütme potası arasında kalan tozlar plastik deformasyona uğrayarak ya birbirlerine kaynak olurlar ya da kırılırlar[70,71].

Öğütülen tozların son özelliklerini ve öğütme sistemini etkileyen birçok değişken vardır. Bunların en önemlileri; öğütme hızı, toz-bilye ağırlık oranı, işlem kontrol katkısı oranıdır. Bunlardan başka öğütücü kabın büyüklüğü, bilye çapı, öğütme ortamı sıcaklığı ve öğütme ortamı gibi değişkenler de vardır.

Yüksek enerjili öğütmede soğuk kaynak ve kırılma olaylarının dengede olması işlemin başarılı olmasını sağlar. Birçok malzeme sistemlerinde bu denge kendiliğinden sağlanmaz. Bu nedenle bu tür sistemlere yağlayıcı bir malzeme olan işlem kontrol katkısı (İKK) katılır. İşlem kontrol katkısı hem tozların birbirine aşırı soğuk kaynağını engeller hem de tozların öğütme potası ve bilye yüzeylerine yapışmasını önleyerek öğütme veriminin düşmesini engeller [82]. Alüminyum gibi sünek malzemelerin İKK olmaksızın



öğütülmeleri imkansızdır. Metanol, stearik asit, ve etanol en çok kullanılan işlem kontrol katkısı malzemeleridir [82].

### 1.8.2. Mekanik Alaşımlama Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

MA tekniği özellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi için uygun bir metottur. Çünkü diğer metotlarla elde edilen özelliklerden daha iyi özelliklerin eldesine müsaade eder. Bu metotla, takviye parçacıklarının topaklanması önlenir ve matris içinde takviye parçacıklarının homojen dağılması sağlanır. Bunun ötesinde, bu sürekli çarpma, takviye elemanın içinde hata mevcutsa onu yok eder ve kompozit malzemenin ani kırılmasını geciktirir. Bu tekniğin kullanımı ile ve üretilen mekanik alaşımlanmış tozlarla, diğer geleneksel üretim yöntemlerinde oluşan problemler en aza indirilmekte hatta ortadan kaldırılmaktadır[83]. Genel olarak bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarına bakacak olursak;

Avantajları:

- Mekanik alaşımlama işlemi, gelişmiş malzemelerin tasarlanmasını sağlayan yeni işleme tekniklerinden bir tanesidir.

- MA işlemi, bir katı hal işlemi olmasından dolayı normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve veya imkansız olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesine imkan sağlar.

- Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanabiliyor olması

- Oldukça farklı ergime sıcaklığına sahip malzemelerden intermetaliklerin üretilebilmesi.

- MA temelde katı malzemelerin bilyeli bir değirmende asal bir ortamda işlendiği bir toz metalurjisi tekniğidir. İşlem içerisinde sıvılar bir kontrol eleman veya reaktant olarak bulunabilirler.

- MA işlemi bir katı hal difüzyon işlemi olmasından dolayı alaşımlar sıvı halde bulunmayan karışımlardan yapılabilirler.

- Mekanik alaşımlama da dayanım için en önemli rolü, matris içerisine homojen olarak dağılmış oksit parçacıkları üstlenmektedir. Bu parçacıklar; dislokasyon hareketleri için önemli bir bariyer teşkil etmektedir. Yeterli dayanım elde edebilmek için oksit parçacıklarının çok küçük (5-50 nm) ve birbirine oldukça yakın (100-150 nm) dağılmış olması gerekir. MA ile bunu sağlamak mümkündür.

- Matris içerisine homojen olarak dağılmış oksit parçacıklar, toparlanmayı ve yeniden kristalleşmeyi engeller veya yavaşlatır, böylece bu malzemelerin yüksek sıcaklıkta kararlı bir yapıda olmalarını sağlar.

- MA işleminden sonraki termo mekanik işlemler neticesinde oldukça iri uzun ve birbirine geçmiş taneler elde etmek mümkündür. İri tane yapısı, ikinci yeniden kristalleştirme işleminden sonra ortaya çıkmakta ve malzemenin yüksek sıcaklıkta tane sınırı kaymasını engellemektedir.

- Mekanik alaşımlama ile elde edilen tozların yapısı tamamen homojen olarak elde edilebilir, böylece segregasyon problemi ortadan kaldırılmış olur.

- Dış etkilere karşı dayanıklı malzeme üretmek mümkündür.

- Nano kristalli malzeme üretimine elverişlidir.

- Bir seferde oldukça fazla miktarda toz üretmek ve alaşımlamak mümkündür.

- Performans/birim fiyat dikkate alındığında ucuz malzeme üretimini mümkün kılmaktadır.

Dezavantajları;

- Tozların çok fazla plastik deformasyona maruz kalmasından dolayı artan öğütme süresiyle birlikte tozlar gevrekleşmekte ve sünekliği azalmaktadır, dolayısıyla son ürün kırılganlaşmaktadır. Bunu gidermek için üretilen malzemeye ekstra bir ısıl işlem yapmak gerekebilir.

- Toz partiküllerinin çok küçük boyutu, geniş yüzey alanının mevcudiyeti ve öğütme sırasında yeni yüzeylerin oluşması gibi etkenlerin bir araya gelerek tozun kirlenmesi.

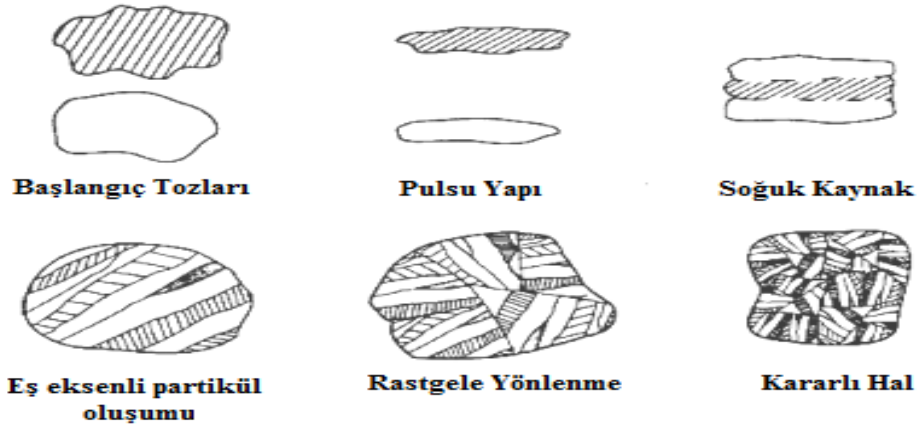
- Enerji verimi düşüktür, enerjinin büyük bir kısmı toz çarpışmaları sırasında ısı olarak açığa çıkar.

### 1.8.3. Mekanik Öğütme ve Alaşımlama Sistemleri

Mekanik alaşımlama sisteminde kullanılan toz özellikleri ve toz kombinasyonuna bağlı olarak üç ana öğütme sistemi mevcuttur; sünek-sünek sistem (Al-Cu), sünek-gevrek sistem (Al-SiC) ve gevrek gevrek sistem (Mn-Bi).

#### 1.8.3.1. Sünek – Sünek Sistem

Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan tozlardan en az bir tanesi kaynaklaşmayı kolaylaştırmak amacıyla yumuşak olmalıdır. Mekanik alaşımlanan başlangıç tozları ve bu tozların alaşımlama boyunca deformasyon karakteristikleri şekil 1. 23’de gösterilmiştir.



Şekil 1.23 Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [84]

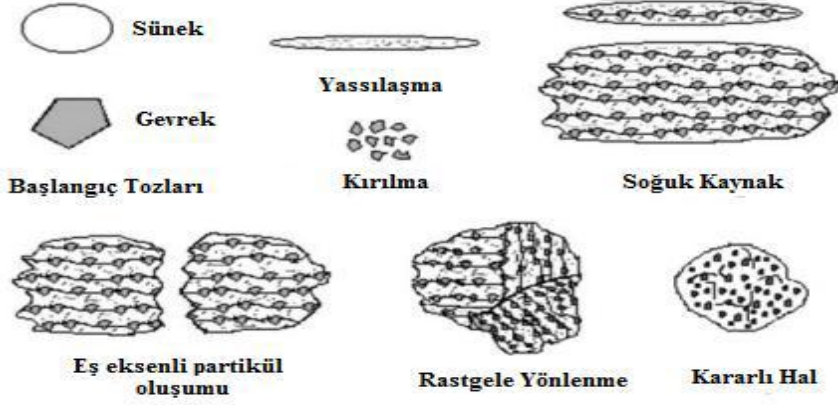
Alaşımlama işlemi sırasında bilyelerin birbirleriyle çarpışması sırasında bilyelerin merkezleri doğrultusunda arada kalan tozlar, darbe etkisiyle plastik deformasyona maruz kalırlar. Bunun sonucunda tozlarda ezilme olur ve tozlar yassılaştırmış hal alır. Bu çarpışmalar esnasında arada kalan toza bir miktar darbe enerjisi yüklenir. Yüklenen darbe enerjisi sebebiyle toz parçacıkları levhalaşır, birbiriyle kaynaklaşır, kırılır ve tekrar kaynaklaşır. Bu darbe kuvveti toz parçacıklarını deformasyona uğratarak sertleşmelerine ve kırılmalarına sebep olur.

Öğütmenin ilk aşamalarında toz parçacıkları sünektir. (eğer sünek-sünek veya sünek-gevrek toz kombinasyonları kullanılıyorsa) ve birbirleriyle kaynaklaşarak büyük toz partikülleri oluşturma yönelimleri yüksektir. Bu aşamada parçacık boyutu büyüyerek başlangıç parçacık boyutunun üç katına kadar ulaşabilir. Bu durumu kontrol etmek amacıyla bileşime işlem kontrol katkıları (Process Control Agent-PCA) ilave edilir. Öğütmenin bu aşamasında kompozit parçacıklar başlangıç toz karışımlarının çeşitli kombinasyonlarını içeren tabakalaşmış bir yapıya sahiptir. Devam eden deformasyonlarla birlikte, bir yorulma mekanizmasıyla veya kırılma levhalaşmış toz parçacıklarının tekrar kırılmasıyla sertleşme devam eder. Güçlü aglomerasyon kuvvetlerinin olmaması durumunda bu mekanizmanın oluşturduğu toz parçacıklarının boyutu azalmaya devam eder. Öğütücü bilyelerin devam eden darbe etkisinden dolayı, parçacıkların yapısı kararlı ve başlangıç kompozisyonu açısından homojen bir hale dönüşür. Fakat parçacık boyutu aynı kalmaya devam eder. Sonuçta, her bir toz parçacığı içerisinde bulunan alaşım tabakaları arasındaki boşluklar azalırken, aynı zamanda bu alaşım tabakalarının sayısı artar. Belirli bir süre öğütmenin ardından, ortalama parçacık boyutunu arttıran kaynaklaşma ve ortalama kompozit parçacık boyutunu azaltan kırılma miktarları arasında bir dengeye varıldığında kararlı hal durumuna ulaşılır. Kararlı aşamaya gelinceye kadar mekanik alaşımlama sırasında toz parçacıkları ağır bir deformasyona maruz kalırlar. Toz parçacıklarındaki dislokasyonlar, boşluklar ve tane sınırlarındaki artma gibi pek çok kristal hatalarının varlığı bu durumu açıklamaktadır. Bu kusurların varlığı bir katı hal çözeltisini oluşturacak olan element veya elementlerin matris içerisine difüzyonunu arttırır. Devam eden mekanik alaşımlamayla birlikte, homojen ve incelen mikro yapı sebebiyle difüzyon mesafeleri azalır. Bununla beraber, öğütme sırasındaki çok az sıcaklık artışı difüzyona yardımcı olur ve sonuçta bileşenler arasında gerçek alaşımlama ortaya çıkar [35,86].

### **1.8.3.2. Sünek-Gevrek Sistem**

Sünek-Gevrek sistemde ilk önce sünek metal tozları bilye-toz-bilye çarpışmaları ile yassılaştırılmış hale gelirken gevrek tozlar ise kırılırlar. Kırılan gevrek tozlar sünek bileşen içerisine gömülürler. Gevrek bileşenler katmanlar arası boşluklar boyunca yerleşirler. İlerleyen öğütme süreleri sonucunda tozlar deformasyon sertleşmesine uğrar katmanlar çoğalır ve daha küçük boyutlara inerler. Devam eden öğütme ile tabakalar daha da küçülür

tabakalar arası boşluk artar ve gevrek tozlar çözünmezse düzenli olarak sünek matrise içine dağılırlar[22].



Şekil 1.26 : Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [86]

### 1.8.3.3. Gevrek-Gevrek Sistem

İki veya daha çok gevrek malzemeden oluşan bir sistemde alaşımlamanın olması beklenmeyebilir. Çünkü sünek bileşenin olmaması kaynak oluşumunu veya tozların birleşmesini engeller ve kaynaklanmanın olmadığı durumda da alaşımlamanın olması beklenmez. Bununla beraber, Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlamanın olduğu da belirlenmiştir. Gevrek tozlar, öğütme sırasında parçalanır ve parçacık boyutları sürekli azalır. Bununla beraber çok küçük boyutlardaki toz parçacıklar sünek bir davranış gösterir ve daha sonra boyut azalması mümkün değildir. Buna öğütülebilme sınırı da denir [87].

## 1.9.Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

MMK sistemlerinde farklı matris-takviye kombinasyonları kullanılabilir. Matris malzemeleri içinde alüminyum ve alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet ve tokluk değerleri, korozyon dirençleri ve kolay işlenebilirlikleri ile en çok tercih edilen malzeme grubunu oluşturmaktadır. Sözü edilen bu özellikleri sayesinde alüminyum matrisli kompozitler özellikle otomotiv ve havacılık-uzay uygulamalarında tercih edilmekte; otomobil silindir gömleklerinden helikopter kanat bileziklerine kadar geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [88].

Parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitler ise yüksek spesifik mukavemet ve elastik modül, iyi aşınma direnci ve düşük termal genleşme özelliklerinden dolayı yaygın bir şekilde araştırma konusu olmuştur. Ayrıca düşük yoğunluğuna rağmen yüksek mukavemet değerlerine sahip olması bu malzemeleri hafif ve dayanıklı olarak kabul edilmesini sağlamıştır. Bor karbür, çok yüksek sertlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek ısıl kararlılık, mükemmel kimyasal inertlik, yüksek korozyon direnci, yüksek darbe mukavemeti, yüksek aşınma direnci gibi üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip, rombohedral kristal yapısında kovalent bağlı bir bileşiktir [89]. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri olan SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemelerine göre üstün özelliklere sahip olmasına rağmen B<sub>4</sub>C tozlarının maliyetlerinin diğer takviye malzemelerine göre yüksek olması sebebiyle Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri üzerine yapılan çalışmalar, Al-SiC ve Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerine göre sınırlı sayıda [90-92]. Ancak, Al-SiC ve Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi rakiplerine göre daha düşük yoğunluk, daha yüksek elastiklik modülü, daha yüksek spesifik rijitlik gibi özellikleri ile Al-B<sub>4</sub>C kompozitleri, özellikle aşınma ve hafifliğin birlikte istendiği uygulamalar için cazip bir malzemedir. Düşük özgül yoğunluğu (2.52 g/cm<sup>3</sup>) sayesinde B<sub>4</sub>C, spesifik özellikleri (spesifik mukavemet ve elastik modülü gibi) iyileştirmede benzerlerine göre daha verimlidir. Örneğin; Topçu[93] ve arkadaşları Al matrisli B<sub>4</sub>C katkılı kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlar. 10 µm boyutundaki B<sub>4</sub>C'lerin ağırlıkça %5,10,15 ve 20 oranlarında katılan, 650 °C'de sinterlenerek üretilen kompozitlerin yüksek sıcaklıktaki deformasyon davranışları ve sürünme özellikleri (400-450°C) incelenmiştir. Çalışma sonucunda alüminyum alaşımının sürünme dayanımının B<sub>4</sub>C katkısı ile iyileştiği gözlemlenmiştir. Darbe deneyi ve sertlik ölçümleri sonucu ağırlıkça katkı oranının artması ile darbe değerlerinin düştüğü; sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür[94].

Üstün aşınma direnci MMK'lerin dikkat çekici özelliklerinden biridir. Bazı yük aralığında parçacık takviyeli MMK'lerin takviyesiz kompozitlere göre 10 kat daha fazla aşınma dayanımı gösterir. Parçacık takviyeli alüminyum matrisli malzemelerin aşınma dayanımları üzerine parçacık boyutu, yük ve kayma hızı gibi çeşitli faktörlerin etkisi araştırılmıştır. Katkı malzemesi olarak daha çok SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır. Ancak B<sub>4</sub>C, parçacık takviyeli kompozit üretiminde kullanılan en önemli katkı malzemesidir. B<sub>4</sub>C, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e göre daha serttir ve yoğunluğu düşüktür. Ayrıca alüminyum matris ile B<sub>4</sub>C takviye arasındaki arayüzey bağının alüminyum ve SiC (veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) arasındaki bağdan daha iyi olduğu bildirilmiştir.[94]

Tang ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada [95] ağırlıkça %5 ve 10 oranlarında B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli Al-5083 matrisli kompozitler üretilmiş, bu numuneler kuru ortamda pin-on-disk 0,6-1,25 m/s kayma hızlarında, 3.98- 6.37MPa (50–80 N) yük altında aşınma testine tabi tutulmuştur. Aynı test şartlarında ağırlıkça %10 B<sub>4</sub>C katkılı kompozitin aşınma değerinin %5 katkılı kompozite göre %40 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bir başka çalışmada Akın; Al-B<sub>4</sub>C nanokompozitleri, T/M yöntemiyle üretilmiş, aşınma ve korozyon dirençleri araştırılarak optimum üretim parametreleri saptanmaya çalışılmıştır [96]. Yapılan deneylerin sonucunda, B<sub>4</sub>C takviye oranının artması ile aşınma direnci de artmıştır; fakat belirli bir takviye oranından sonra (%9 B<sub>4</sub>C) kompozitin sertliği artmasına rağmen aşınma direnci düşmüştür. %9 B<sub>4</sub>C içeren kompozite uygulanan ara deformasyon ile korozyon direnci artmıştır. B<sub>4</sub>C içeriğinin artmasıyla korozyon direnci azalmıştır. Sertlik kriter alınarak yapılan değerlendirmede; optimum üretim parametrelerine 570°C'de atmosferik ortam koşullarında, 12 saat süre ile yapılan sinterleme neticesinde ulaşılmıştır.

TM üretim tekniği, parçacıkların homojen dağılımın yanı sıra üretilen parçaların yoğunlukları da MMK'lerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme (SIP) ile takviye malzemeleri ilave etmeksizin düşük maliyetle %90'ın üzerindeki yoğunluklarda numuneler üretilebilmektedir [97].

Nanokompozitlerin kırılma tokluğu, mukavemeti, eğilme mukavemeti, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık özelliklerinin iri taneli yapılardan daha yüksek olması beklenir. Örneğin, Kang ve Chan hacimce %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al nanokompozitin çekme dayanımının %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13µm)-Al mikro kompoziti ile benzer olduğu ve nano kompozitin akma dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir [98]. Ayrıca alümina takviyeli alüminyum kompozitinin %4 oranına kadar akma ve çekme dayanımlarının

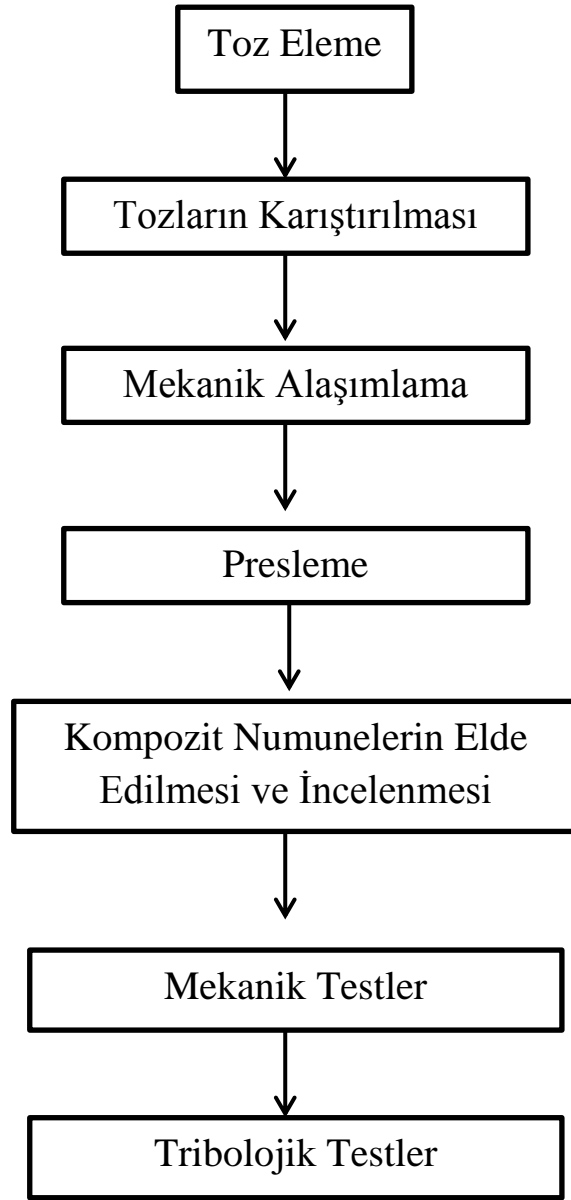
arttığı gözlemlenmiştir. Bu oranın üzerinde nano parçacıkların aglomerasyonundan dolayı kuvvetlendirme mekanizmasının durduğu düşünülmektedir[ 99].

Literatür incelemelerinde anlaşılacağı gibi genellikle mikroboyutlu takviye ve matris fazları üzerine çalışmalar yapılmıştır ancak nanokompozitler üzerine henüz yeterli çalışma yapılmamıştır. Toz metalurjisiyle yapılan çalışmalar mikro boyuttaki kompozitler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca, mekanik alaşımlama ile üretilmiş nanokompozitlerin tribolojik incelemeleri üzerine yapılmış olan çalışmalar yetersizdir. Özellikle alüminyum matrisli nanokompozitler üzerine yapılmış çalışma yoktur. Bu doğrultuda yapılan çalışmada mikroboyutlu tozlardan öğütme ve mekanik alaşımlama yöntemleriyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisli B<sub>4</sub>C katkılı nanokompozit malzemeler üretilerek mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.



## 2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada mekanik alaşımlama yöntemi kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C kompozitleri ve nanokompozitlerinin üretimi ve toz boyutu ile takviye oranının üretilen kompozit özelliklerin etkisi araştırılmıştır. Öncelikle kompozit ve nanokompozit tozları mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiş ve bu tozların morfolojisi, boyutu ve mikrosertliği ölçülerek toz karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesi olarak ortalama partikül boyutu 5µm olan B<sub>4</sub>C ve takviye oranı olarak da ağırlıkça üç farklı oran (% 5, % 10 ve % 15) seçilmiştir. MA yöntemi ile üretilen kompozit tozlarının karakterizasyon çalışmaları, taramalı elektron mikroskobu (SEM), lazer parçacık boyutu analiz cihazı (Mastersizer 2000e, Malvern Instruments) ve Instron mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Toz karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra mekanik olarak alaşımlanmış mikro ve nano boyutlu kompozit tozları 560° sıcaklıkta 600MPa basınç uygulanarak vakum altında preslenmiş ve yapılacak olan incelemelere uygun olarak çekme numuneleri ve aşınma numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin, yoğunluk, porozite, makro-mikro sertlik incelemeleri, iç yapı incelemeleri, çekme mukavemeti, ve aşınma davranışı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışma boyunca uygulanan işlem akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalar akış şeması

## 2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Matris malzemesi olarak Al2024 alaşım tozları ( $\rho=2.8$ ) seçilmiştir. Bu tozlar Gündoğdu Exoterm Sanayinden (GES) temin edilmiştir. Al2024 tozlarının spektral analizi Tablo 2.1’de verilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan B<sub>4</sub>C tozları (Saflık %99.5,  $\rho=2.52$ ) ise Alfa-Aesar firmasından temin edilmiştir.

Tablo 2.1. Al2024 Başlangıç Tozlarının Başlangıç 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. Al2024 Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Yoğunluk( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti(MPa)	Kopma Uzaması(%)	Sertlik (BSD)
2,8	185	75	20	55

Al2024 alaşım tozları ilk olarak eleme işlemine (Şekil 2.1) tabi tutularak D<sub>50</sub> değeri 25,49 $\mu\text{m}$  olan başlangıç tozları elde edilerek çalışmalarda bu tozlar kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak D<sub>50</sub> değeri 5 $\mu\text{m}$  olan B<sub>4</sub>C tozları kullanılmıştır. Al2024 alaşım tozları ve B<sub>4</sub>C takviye tozlarının başlangıç morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.



Şekil 2.2. Elek Sistemi

## 2.2. Mekanik Alaşımlama İşlemi

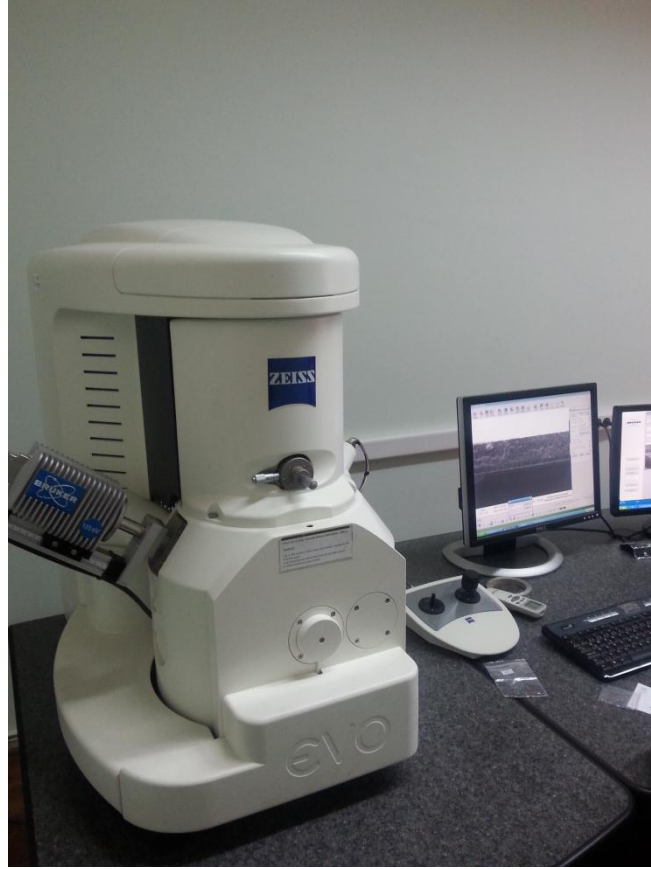
Bu çalışmada toz karışımları gezegen tip bilyeli öğütücüde (Retsch PM200) (şekil 2.2) 400 dv/dak öğütme hızında mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Öğütme süresi olarak 0.5, 1, 3, 6, 10, 15, 20 ve 25 saat seçilmiştir. Öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap hacmi 125ml ve bilye boyutu ise 5 mm dir. Öğütücü kaba şarz edilen toz miktarı 23,4gr ve bilye-toz ağırlık oranı 10:1 olarak seçilmiştir. Öğütme cihazı, öğütücü kap ve bilye resimleri şekil 2.2'de verilmiştir.



şekil 2.3. Öğütücü Elemanlar

### 2.3. Toz Morfolojisi

Başlangıç tozlarının ve MA yöntemi ile üretilen kompozit ve nanokompozit tozlarının morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Yapılan morfolojik incelemelerde öğütme zamanı ve takviye oranının partikül morfolojisine olan etkileri araştırılmıştır.



Şekil 2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu

## 2.4. Toz Boyutu

Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern Instruments™ marka Mastersizer 2000e (Şekil 2.4) model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 2.4. Lazer Saçınımlı Partikül Boyut Ölçer Cihazı

## 2.5. Partikül ve Bulk Malzeme Sertliği

Üretilen kompozit tozların mikrosertlik değerleri(Vickers) Struers marka mikrosertlik ölçüm cihazı ( Şekil 2.5 ) ile 25gr yük altında 10 sn süre ile gerçekleştirilmiş olup en az 5 başarılı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Batıcı uç olarak tepe açısı 136 derece olan elmas konik uç kullanılmıştır.



Şekil 2.5. Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

Kompozit sertlikleri ise aşağıda şekli verilen Brinell sertlik ölçüm cihazı yardımıyla ölçülmüştür. Cihazdan alınan iz çapları Brinell sertlik ölçüm formülünde yerine konarak kompozit sertlikleri bulunmuştur.

$$HB = \frac{2P}{\pi.D.(D-\sqrt{D^2-d^2})} \text{ Kg/mm}^2$$

Burada HB: Brinell sertlik değeri

P: Uygulanan yük, d: Oluşan izin çapı, D: Kullanılan bilyanın çapı(mm)'dir.



şekil 2.6. Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı

### 2.6.Sıcak Presleme

Üretilen kompozit ve nanokompozit tozların daha iyi paketlenmesini ve sinterlenmesini sağlamak amacıyla kalıpta ilk olarak ön şekil verme uygulanmıştır. Ön şekil verme basıncı 600MPa dır. Ön şekil verilen numuneler, vakum altında 560°C sıcaklıkta üç saat süreyle bekletildikten sonra tekrar 600MPa basınç uygulanarak 100 ton kapasiteli tek eksenli preste (şekil 2.7) preslenerek numuneler üretilmiştir. Presleme işleminin yapıldığı sıcaklık ve süre sinterleme işlemi için yeterli olduğu için numunelere

ekstradan bir sinterleme işlemine gerek kalmamıştır. Presleme esnasında kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak çinko stearat sürülmüştür.



Şekil 2.7. Sıcak Pres Cihazı

## 2.7. Metalografi Çalışmaları

MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların ve kompozitlerin sertlik ölçümleri ve kompozitlerin içyapı incelemeleri için gerekli metalografik işlemleri tam otomatik zımparalama ve parlatma cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ihtiyaç duyulan numuneler için bakalite alma işlemi de yapılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 2.8. a) Otomatik Zımpara-Parlatma Cihazı b) Bakalit Cihazı



## 2.8. Mekanik Testler

### 2.8.1. Yoğunluk ve Porozite

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre bulunmuş deneysel yoğunlukları ise hem geometrik şekle göre hem de piknometre ile ölçülmüştür. Bulunan deneysel yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünerek bağıl yoğunluk bulunmuştur. % Porozite ise deneysel yoğunluğun teorik yoğunluğa bağlı oranından bulunmuştur.

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

Burada;

$\delta_t$  : Kompozitin teorik yoğunluğu

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

$\delta_n$  : Her bir takviyenin yoğunluğu

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



Şekil 2.9. Çekme ve Aşınma Numuneleri

Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi, çekme numunesi 80x10 mm boyutlarında çubuk numune, aşınma numunesi ise 30mm çapında dairesel numune şeklinde üretilmiştir.

### 2.8.2. Çekme Testi

Çekme numunelerine MTS marka çekme test cihazında, 0,2mm/sn çekme hızında test yapılmıştır. Her bir numune için üç kez çekme testi yapılmış olup ortalama değer, sonuç değer olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.10. MTS marka universal tip çekme test cihazı

### 2.9. Tribolojik Testler

Üretilen aşınma numunelerine Ducom marka, universal tip aşınma test cihazında Ball-on-Disk (numune üzeri bilya) aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testleri 1N, 2N, 5N ve 10N'luk yüklerde 0,1 m/sn kayma hızında ve her bir numune için 300m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda aşınma miktarı, ağırlık kaybı olarak alınmış ve sürtünme kuvveti grafiksel olarak elde edilmiştir.



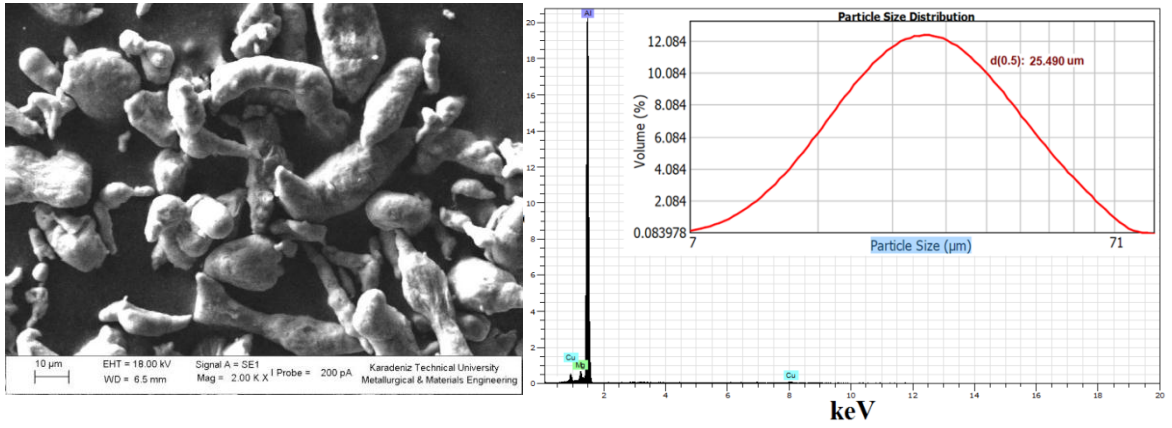
Şekil 2.11. Ball-on-Disk (Numune Üzeri Bilya) Aşınma Cihazı

### 3.BULGULAR VE TARTIŞMA

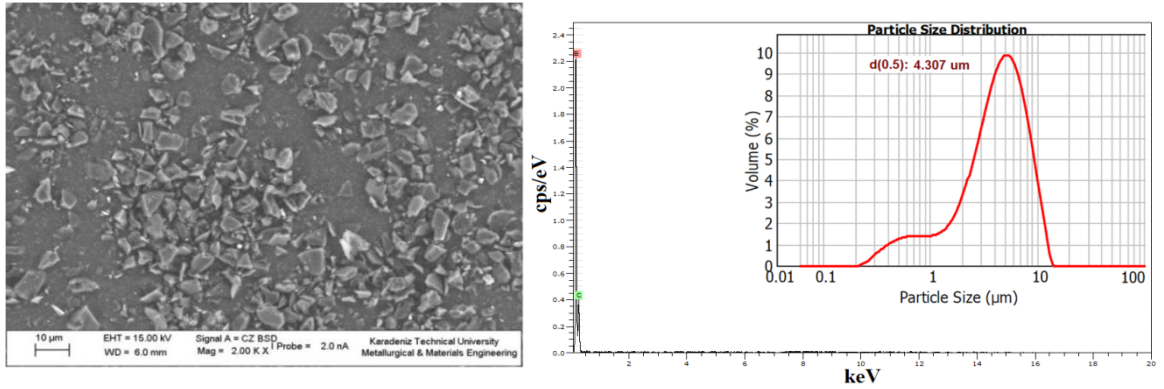
#### 3.1. Toz Karakterizasyonu

##### 3.1.1. Toz Morfolojisi

Aşağıda verilen SEM resimlerinden de görüldüğü üzere, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının başlangıç morfolojisi düzensiz ve çubuksu (irregular shape) iken, B<sub>4</sub>C tozlarının morfolojisi poligonal yapıdadır.



(a)



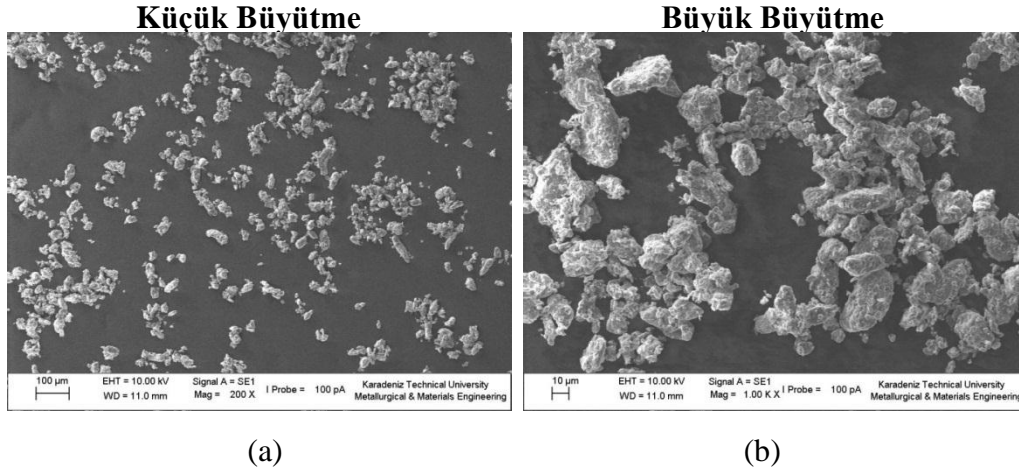
(b)

Şekil 3.1. Başlangıç toz morfolojisi ve boyutları

### 3.1.2. Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojilerinin Değişimi

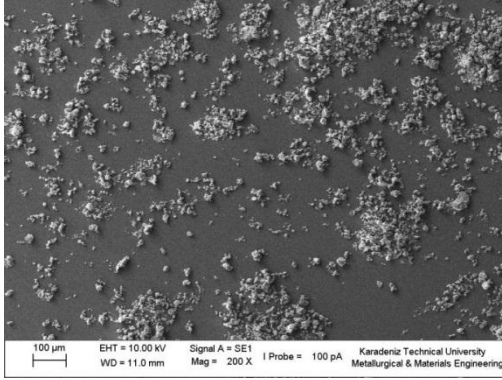
Mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan tozlarda, toz morfolojisinin zamana bağlı olarak değişimi incelendiğinde öğütmenin işleminin ilk aşamalarından itibaren, tozların bilye-toz-bilye, bilye-toz-öğütücü kap ve toz-toz çarpışmaları sonucu hızlı bir şekilde plastik deformasyona uğradığı görülmektedir. 0.5 saatlik öğütme sonrasında alaşım tozlarında pulsu morfoloji görülürken kompozit tozlarda pulsu morfolojiye rastlanmamıştır. Bunun nedeni, oldukça sert bir yapıya sahip olan bor karbürün yapıda öğütücü bir eleman gibi davranması ve “cutting effect” denilen kesme etkisi yaparak plastik deformasyonu dahada hızlandırması ve etkin hale getirmesidir. Artan öğütme süresiyle birlikte bütün tozlarda plastik deformasyon ve kırılma sonucu oluşan düzensiz morfoloji görülmüştür. Öğütme işleminin son aşamasında ise (20-25 saatlik öğütmeler) bütün tozlar eş eksenli morfolojiye ulaşmıştır. Ayrıca, artan takviye oranıyla birlikte kararlı yapıda daha kısa sürede ulaşıldığı hem toz morfolojisinden hem de partikül boyutu incelemelerinden açıkça görülmüştür.

#### 3.1.2.1. Al2024 Alaşımının Öğütme Süresine Bağlı Toz Morfolojisi

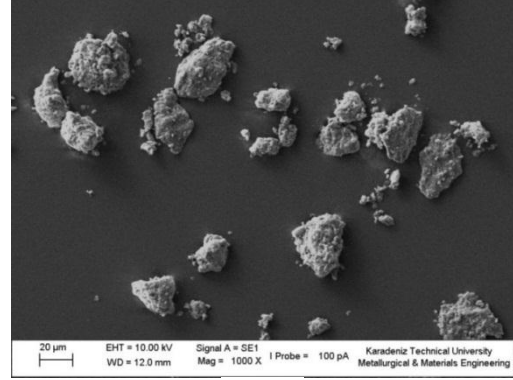


Şekil 3.2. Alaşım tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimi (a-b) 0.5 saat , (c-d) 1 saat, (e-f) 3 saat, (g-h) 6 saat, (i-i) 10 saat, (j-k) 15 saat, (l-m) 20 saat, (n-o) 25 saat öğütülmüş tozlar

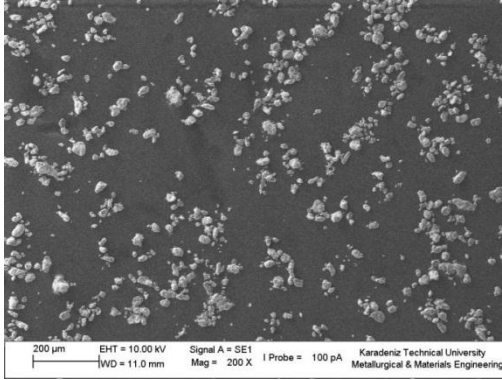
## Şekil 3.2'nin devamı



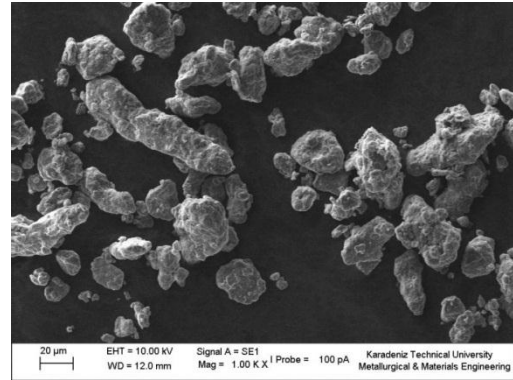
(c)



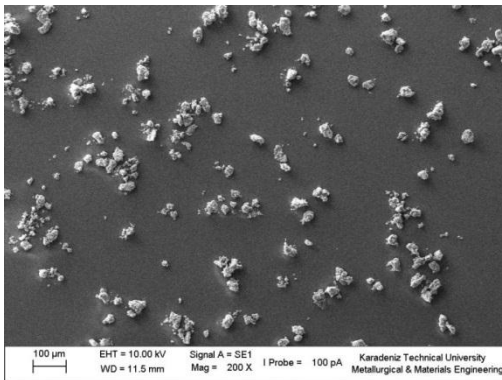
(d)



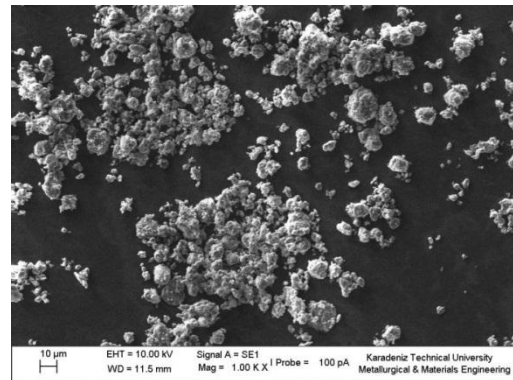
(e)



(f)

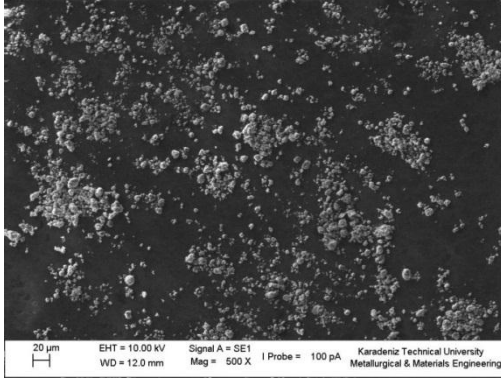


(g)

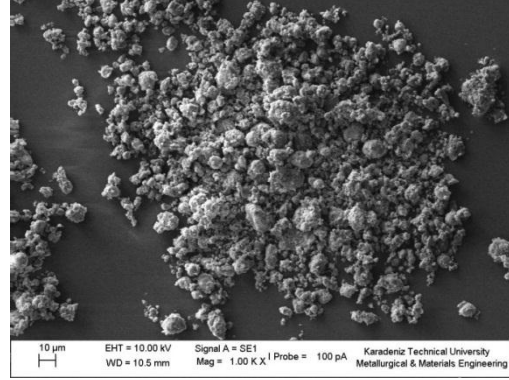


(h)

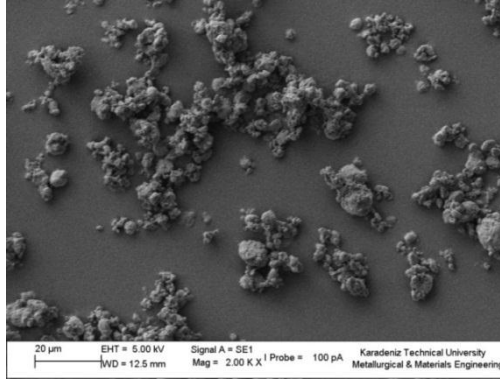
Şekil 3.2'nin devamı



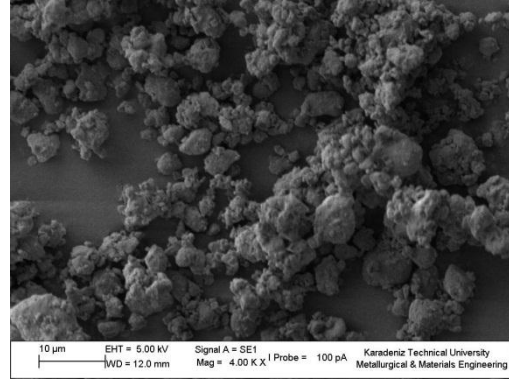
(i)



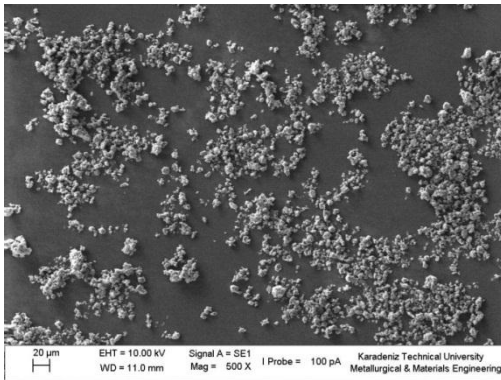
(i)



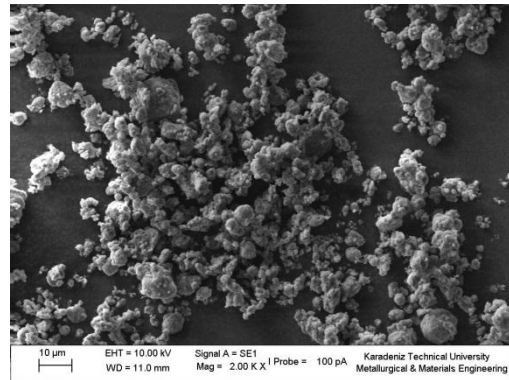
(j)



(k)

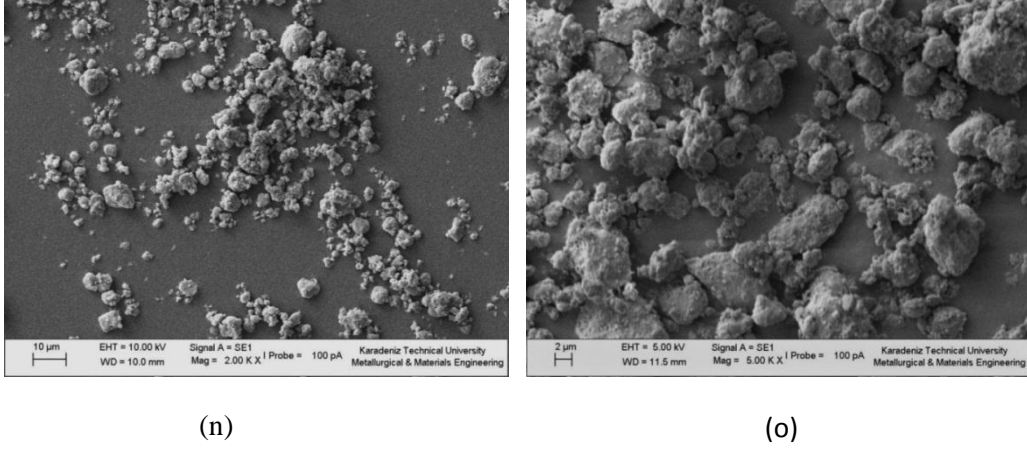


(l)



(m)

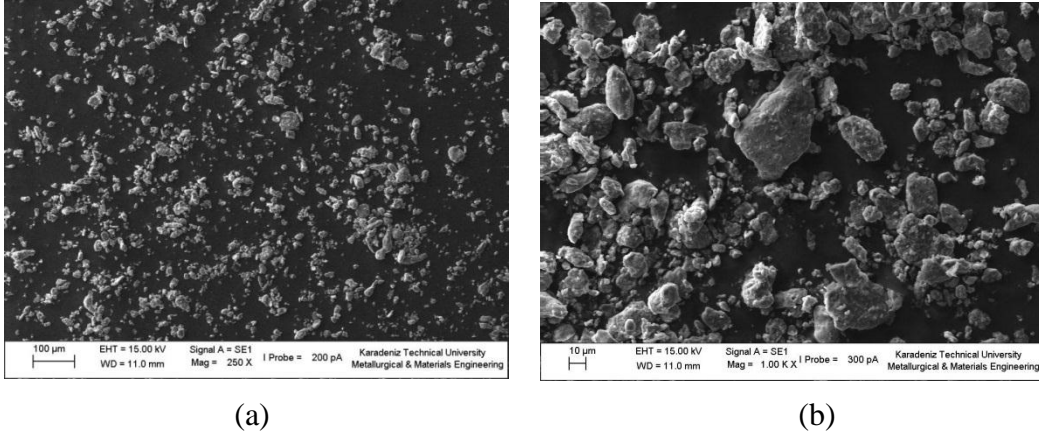
Şekil 3.2'nin devamı;



### 3.1.2.2. Al2024-%5 B<sub>4</sub>C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri

**Küçük Büyütme**

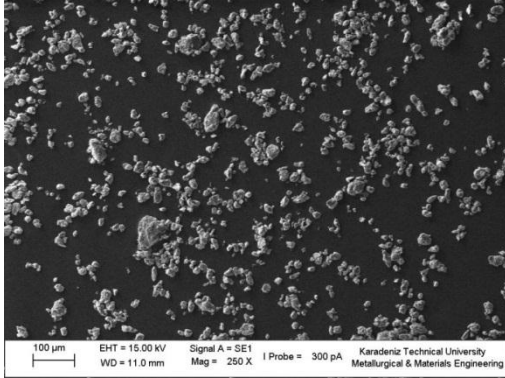
**Büyük Büyütme**



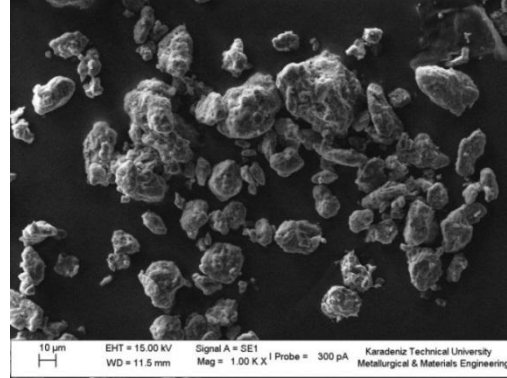
Şekil 3.3. Al2024-%5B<sub>4</sub>C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri  
(a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 3 saat, (g-h) 6 saat, (i-i) 10 saat, (j-k) 15 saat,  
(l-m) 20 saat, (n-o) 25 saat



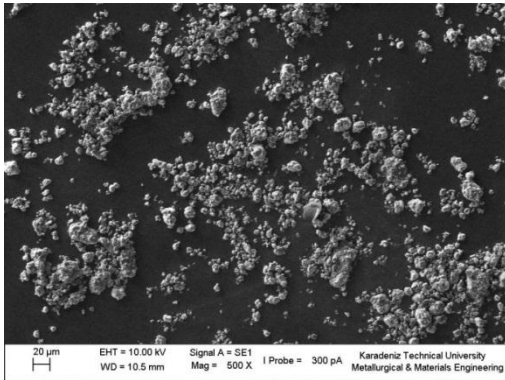
## Şekil 3.3'ün devamı



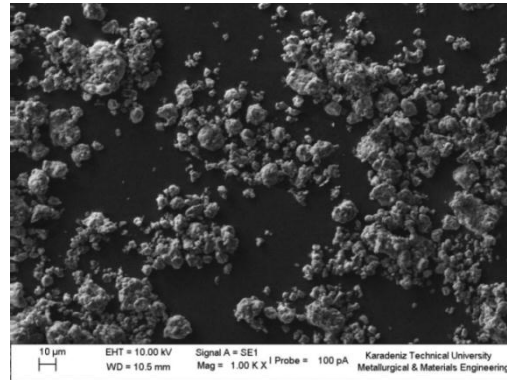
(c)



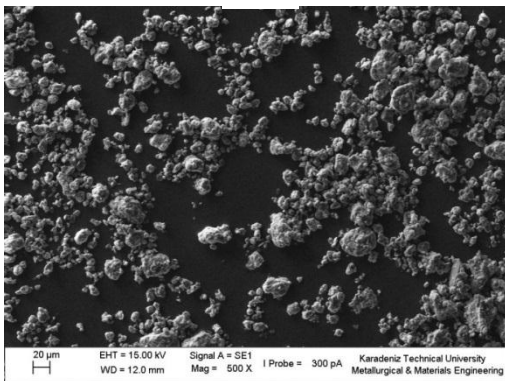
(d)



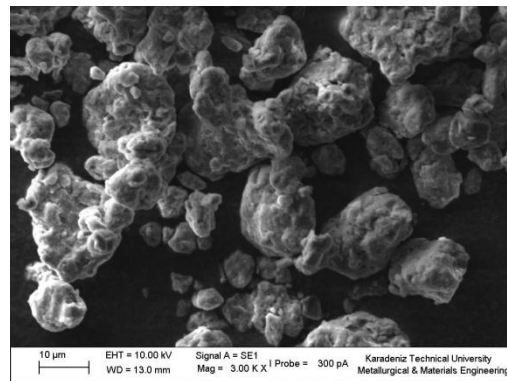
(e)



(f)



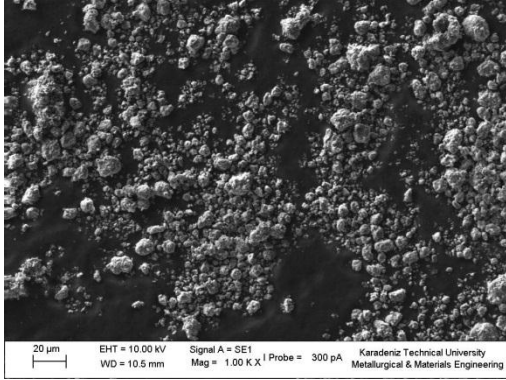
(g)



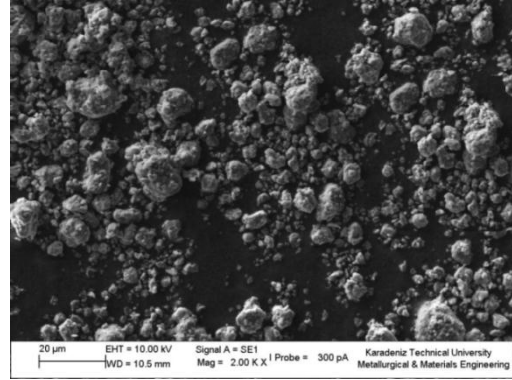
(h)



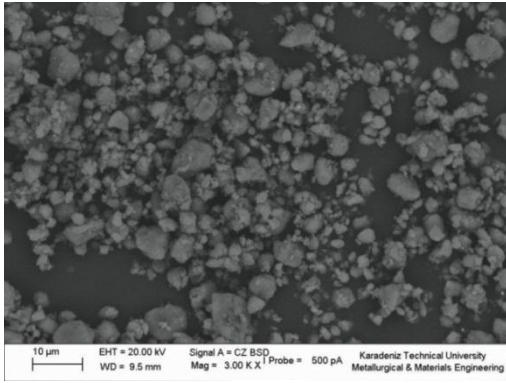
Şekil 3.3'ün devamı



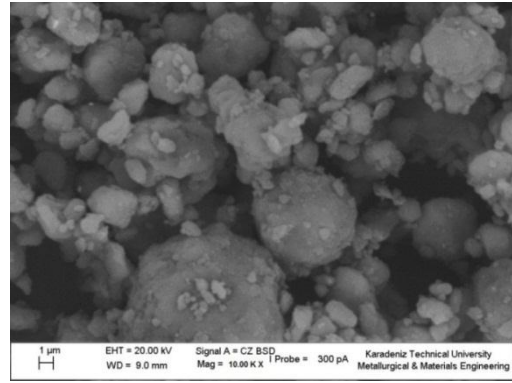
(i)



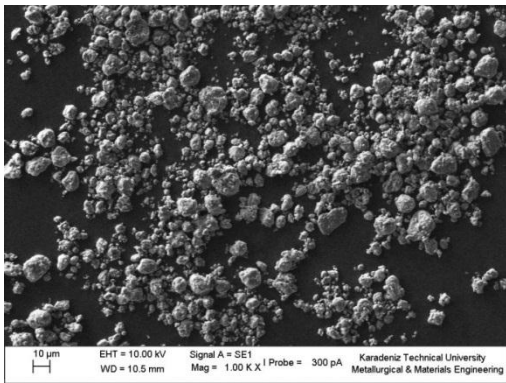
(i)



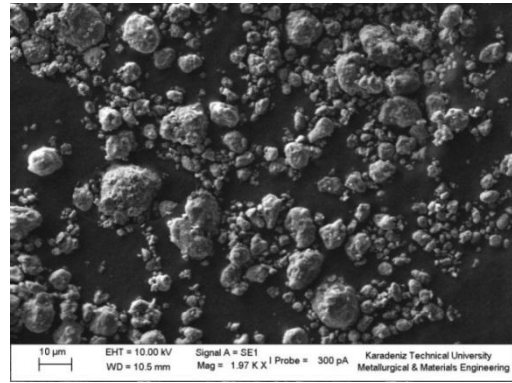
(j)



(k)

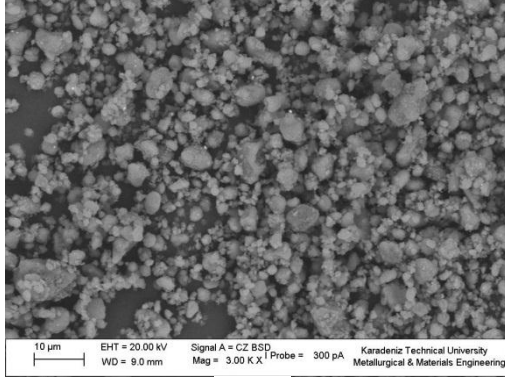


(l)

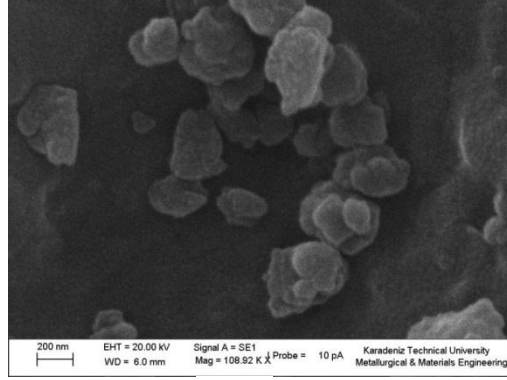


(m)

Şekil 3.3'ün devamı



(n)

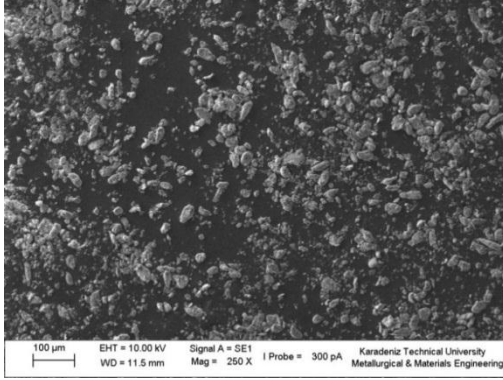


(o)

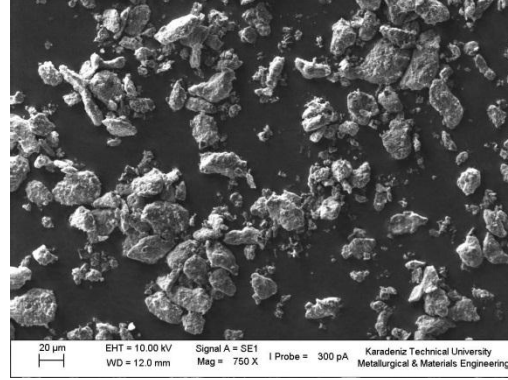
### 3.1.2.3. Al2024-%10 B<sub>4</sub>C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri

**Küçük Büyütme**

**Büyük Büyütme**



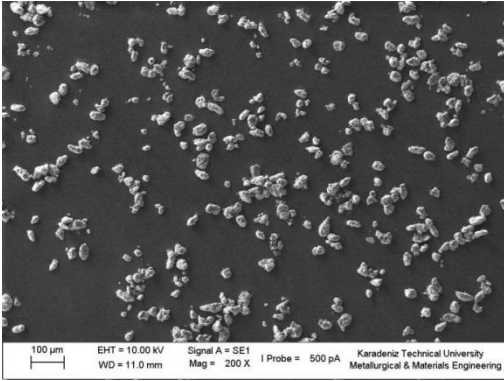
(a)



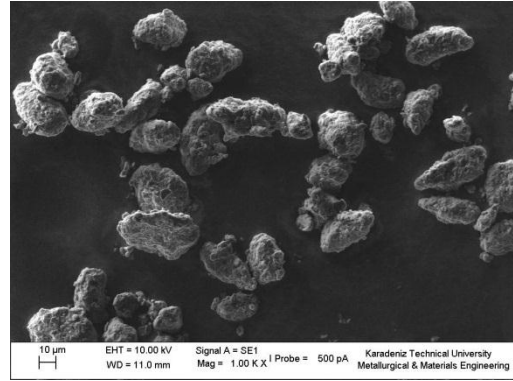
(b)

Şekil 3.4. Al<sub>2024</sub>-%10B<sub>4</sub>C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 3 saat, (g-h) 6 saat, (i-i) 10 saat, (j-k) 15 saat, (l-m) 20 saat, (n-o) 25 saat

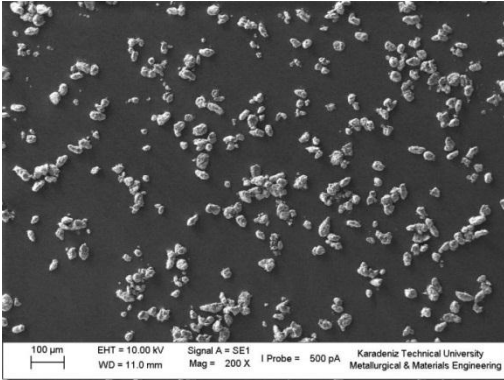
Şekil 3.4'ün devamı



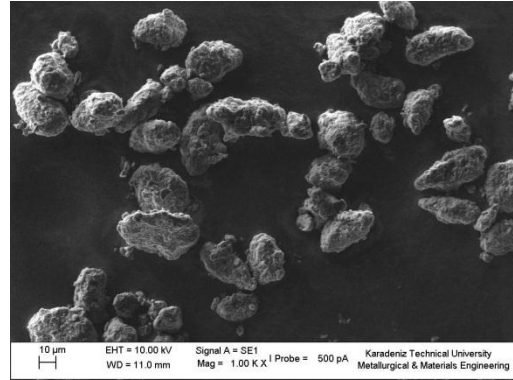
(c)



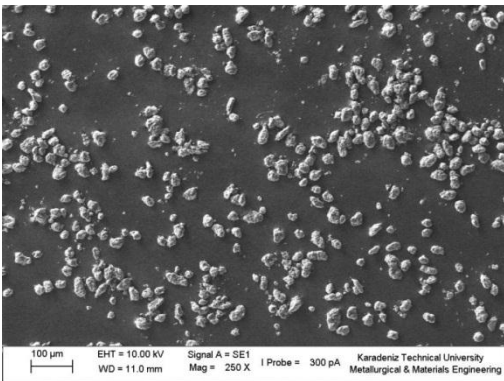
(d)



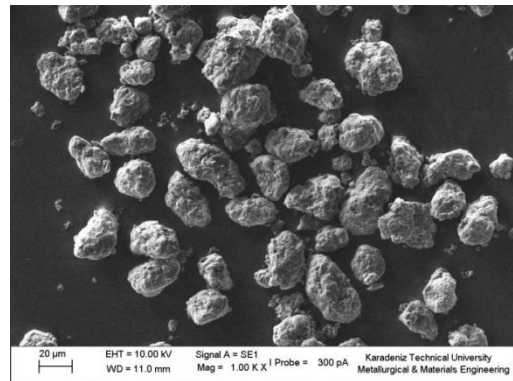
(e)



(f)

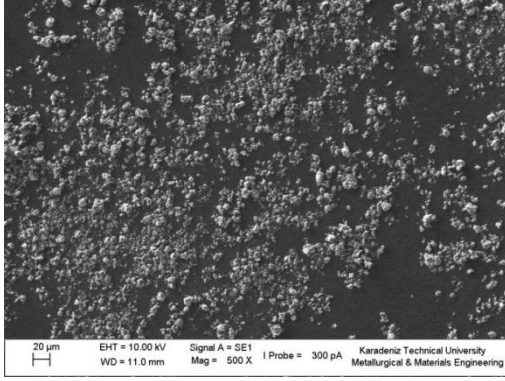


(g)

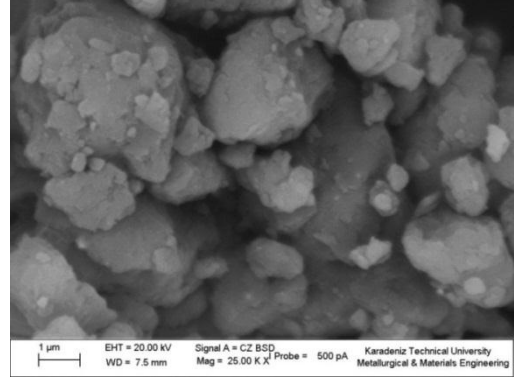


(h)

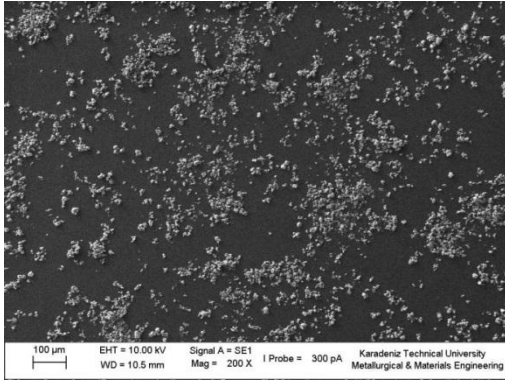
## Şekil 3.4'ün devamı



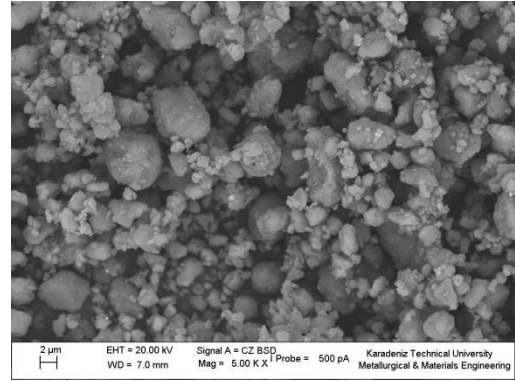
(i)



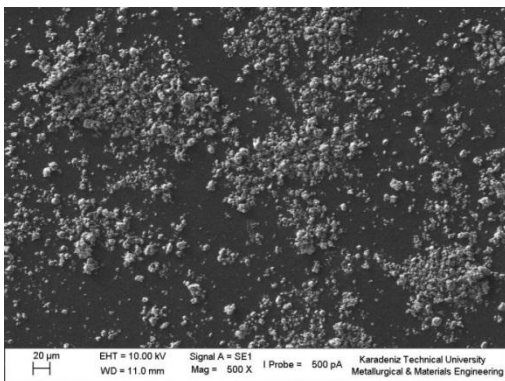
(i)



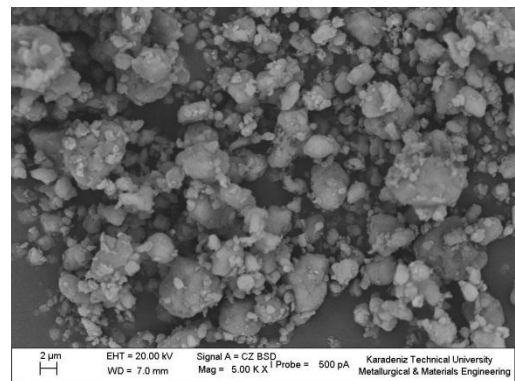
(j)



(k)

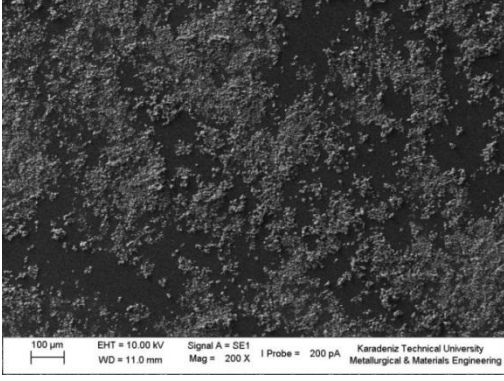


(l)

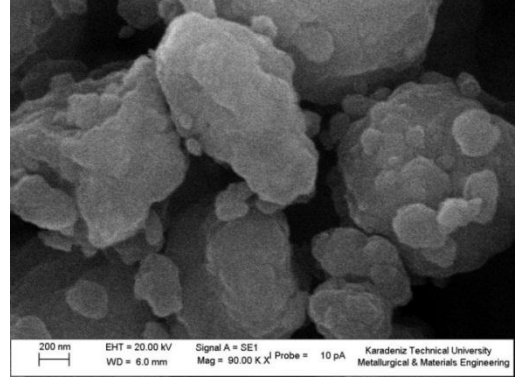


(m)

Şekil 3.4'ün devamı



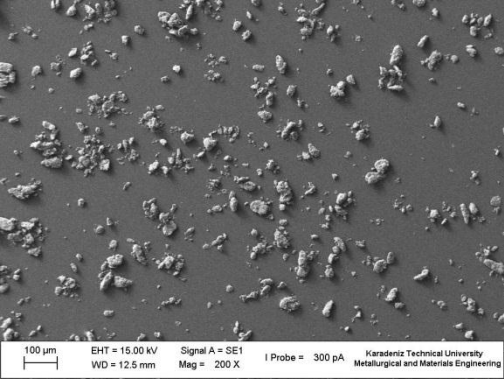
(n)



(o)

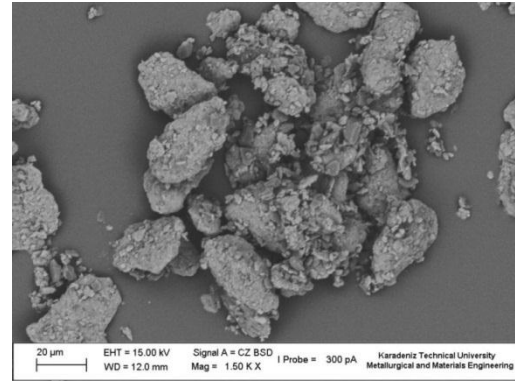
### 3.1.2.4. Al2024-%15 B<sub>4</sub>C Kompozit Tozlarının Öğütme Süresine Bağlı Morfolojileri

**Küçük Büyütme**



(a)

**Büyük Büyütme**

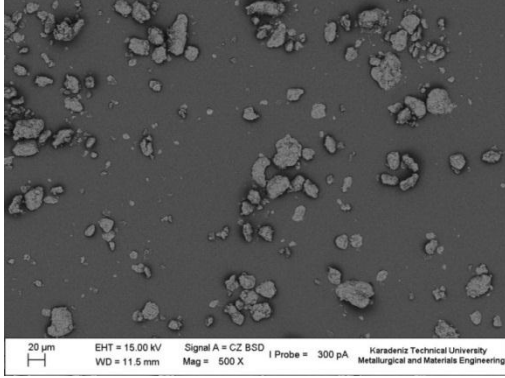


(b)

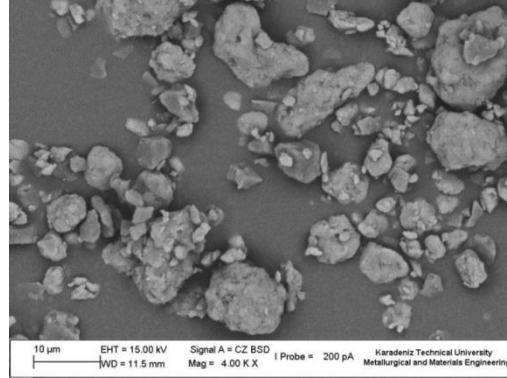
Şekil 3.5. Al<sub>2024</sub>-%15B<sub>4</sub>C kompozit tozlarının öğütme süresine bağlı morfolojik değişimleri (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 3 saat, (g-h) 6 saat, (ı-i) 10 saat, (j-k) 15 saat, (l-m) 20 saat, (n-o) 25 saat



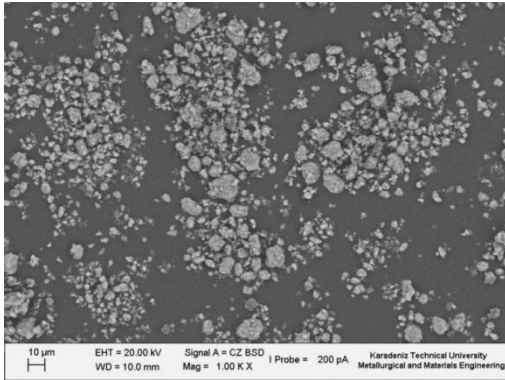
Şekil 3.5'in devamı



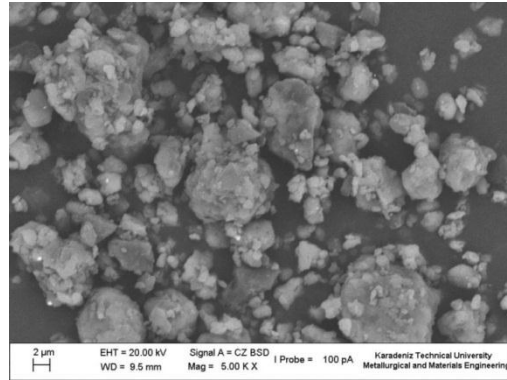
(c)



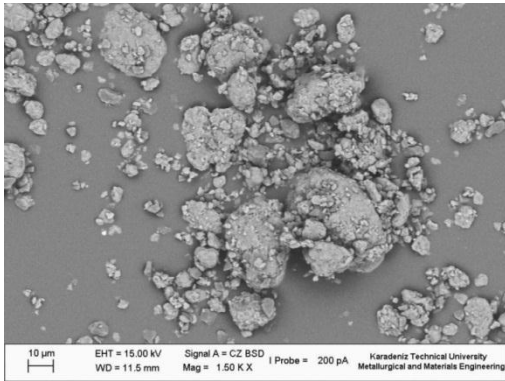
(d)



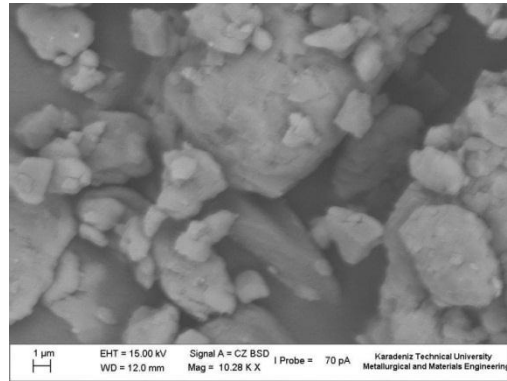
(e)



(f)

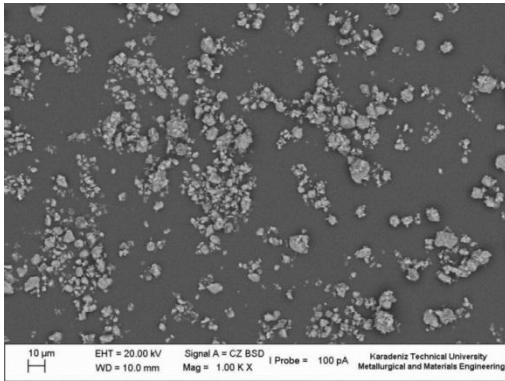


(g)

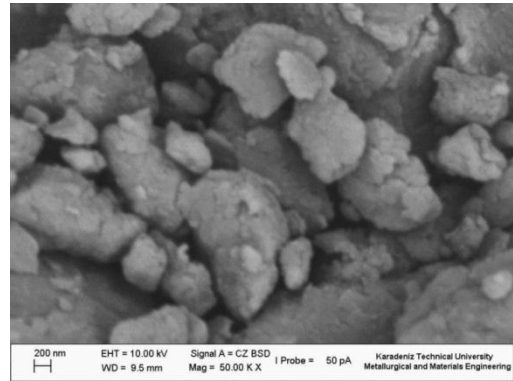


(h)

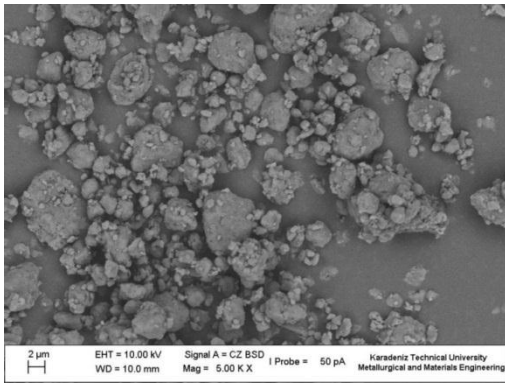
Şekil 3.5'in devamı



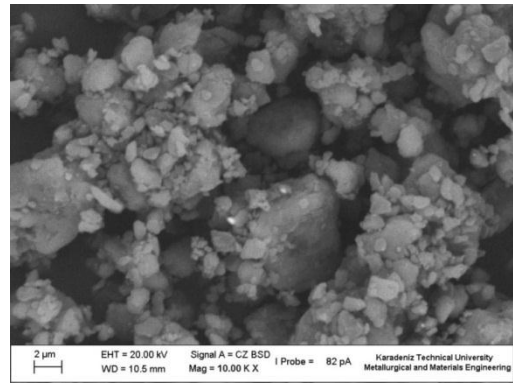
(i)



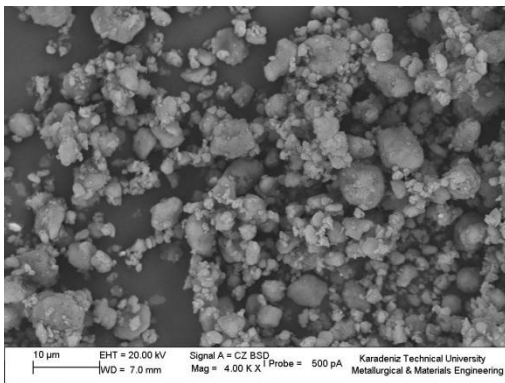
(ii)



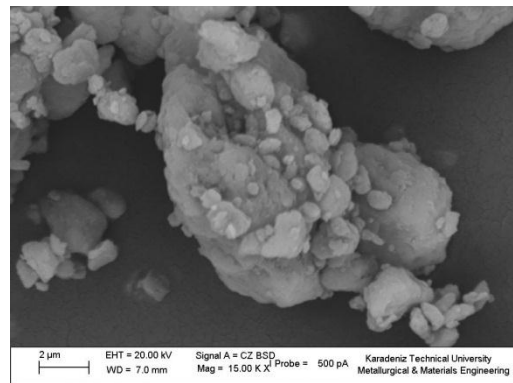
(j)



(k)

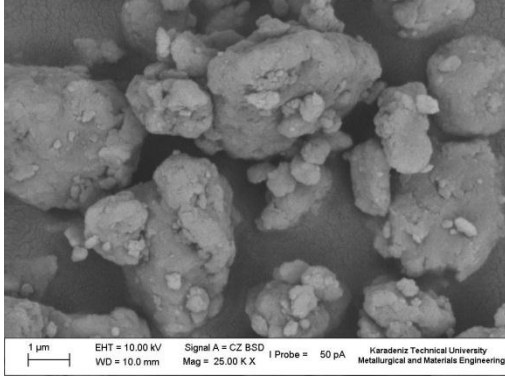


(l)

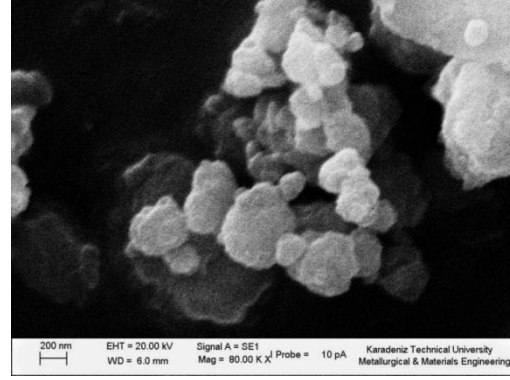


(m)

Şekil 3.5'in devamı



(n)



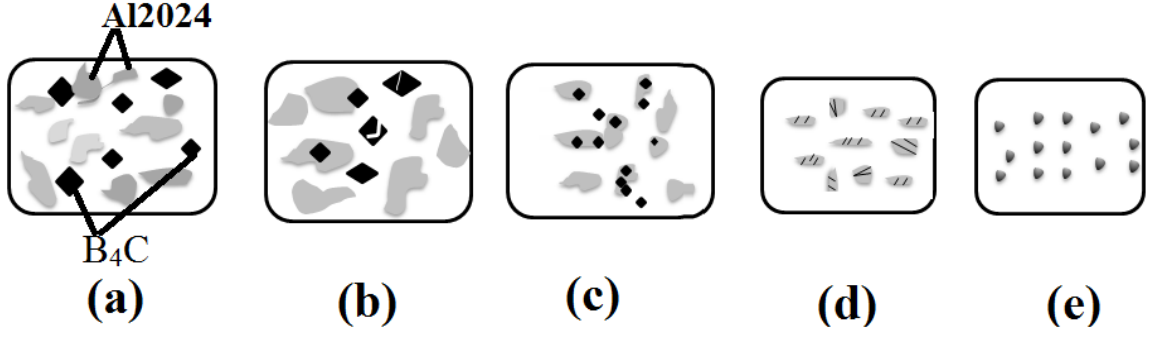
(o)

Toz morfolojisi olarak bütün karışımların aynı morfolojik değişimleri gösterdiği, aynı morfolojik dönüşümlerden sonra kararlı yapılarına ulaştıkları yukarıdaki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Takviye parçacıklarının miktarı, kırılma ve soğuk kaynak işlemlerini etkileyerek toz morfolojisini değiştirmişlerdir. Bu değişiklik farklı takviye oranlarındaki tozların kararlı hal şartlarına daha kısa öğütme sürelerinde ulaşması ve daha küçük toz boyutunun elde edilmesi sonuçlarını meydana getirmiştir. Bununla birlikte toz özellikleri incelenirken toz morfolojisi, toz sertliği ve partikül boyutları birbirinden bağımsız düşünülemez. Takviye miktarındaki farklılıklar, takviye parçacıklarının matris içersine gömülmesi, toz sertliği ve toz boyutunu önemli derecede etkilemektedir.

### 3.1.2. Takviye Parçacıklarının Matris Tozlarına Gömülmesi

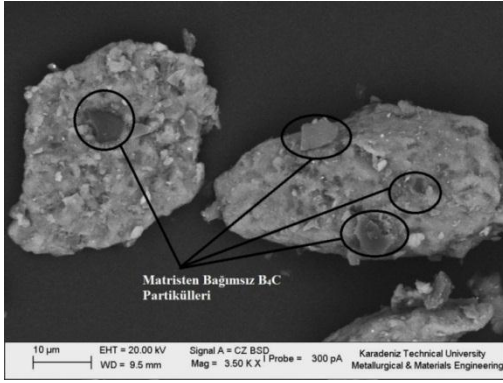
Öğütme süresine bağlı olarak toz morfolojisi incelendiğinde, matris malzemesinden oldukça sert ve bir o kadar da küçük başlangıç boyutlarına sahip olan takviye fazının artan öğütme süresiyle birlikte matris fazın içine gömüldüğü ve kompozit yapısını oluşturduğu görülmektedir. Şekil 3.6'da sert  $B_4C$  partiküllerinin  $Al_{2024}$  alaşımına gömülmesi sistematiği görülmektedir.



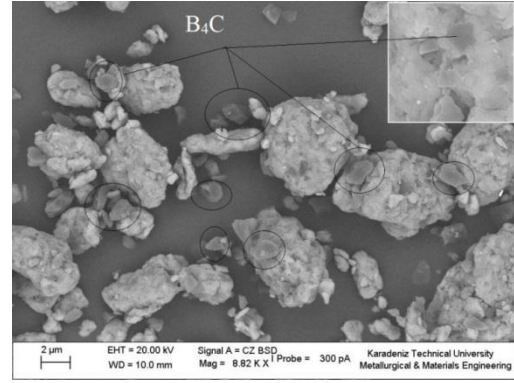


Şekil 3.6. B<sub>4</sub>C partiküllerinin alaşım tozlarına gömülmesi sistematığı

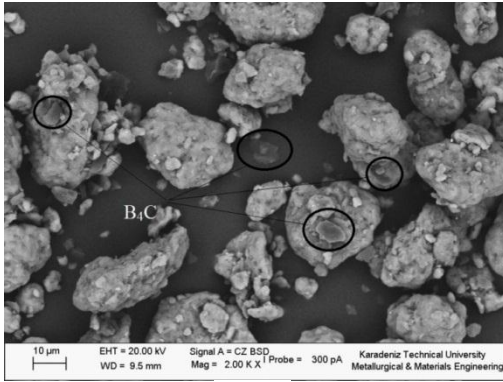
Şekil 3.6 (a)'da görüldüğü üzere henüz öğütülmemiş olan B<sub>4</sub>C ve Al2024 tozları yapıda birbirlerinden bağımsız halde bulunmaktadır. Öğütmenin ilk saatlerinde (Şekil 3.6 b) tozlar soğuk kaynak ve kırılma mekanizmalarının etkisi altındadır ve sünek Al2024 tozları yassılaşıp boyutları bir miktar büyürken, B<sub>4</sub>C partikülleri kırılmaya ve deforme olmaya başlamışlardır. Öğütmenin ilerleyen saatlerinde ise yüksek enerjili çarpışmalar nedeniyle hem Al2024 tozları hem de B<sub>4</sub>C tozları kırılırlar. Bu çarpışmaların sürekli olmasından ve devam ediyor olmasından dolayı B<sub>4</sub>C partikülleri, yassılaştıran alüminyum tozlarına çakılmaya başlarlar (Şekil 3.6 c). B<sub>4</sub>C partiküllerinin çakılması ve yüksek deformasyon neticesinde oluşan yeni alaşımlanmış yapı oldukça gevrek ve sert bir yapıdadır (Şekil 3.6d) ve bu aşamadan sonra tozlar hızlı bir şekilde kırılarak eş eksenli, kararlı yapıya dönüşmüşlerdir (Şekil 3.6e).



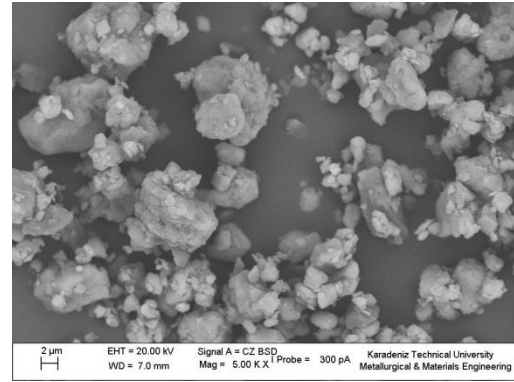
(a)



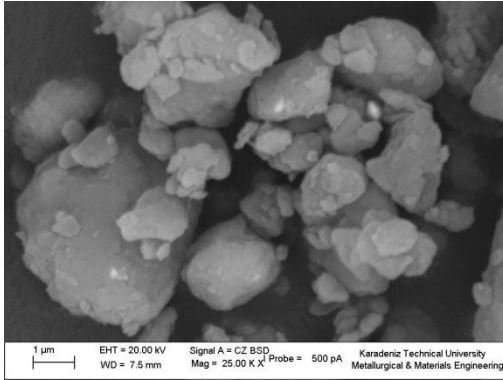
(b)



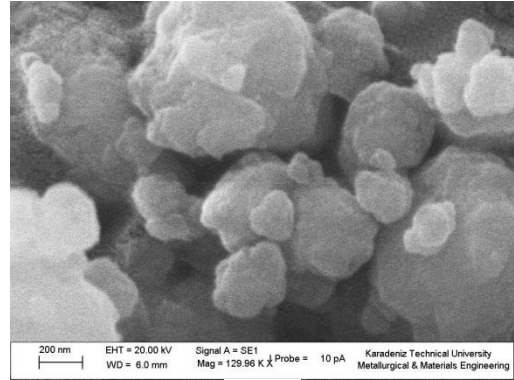
(c)



(d)



(e)



(f)

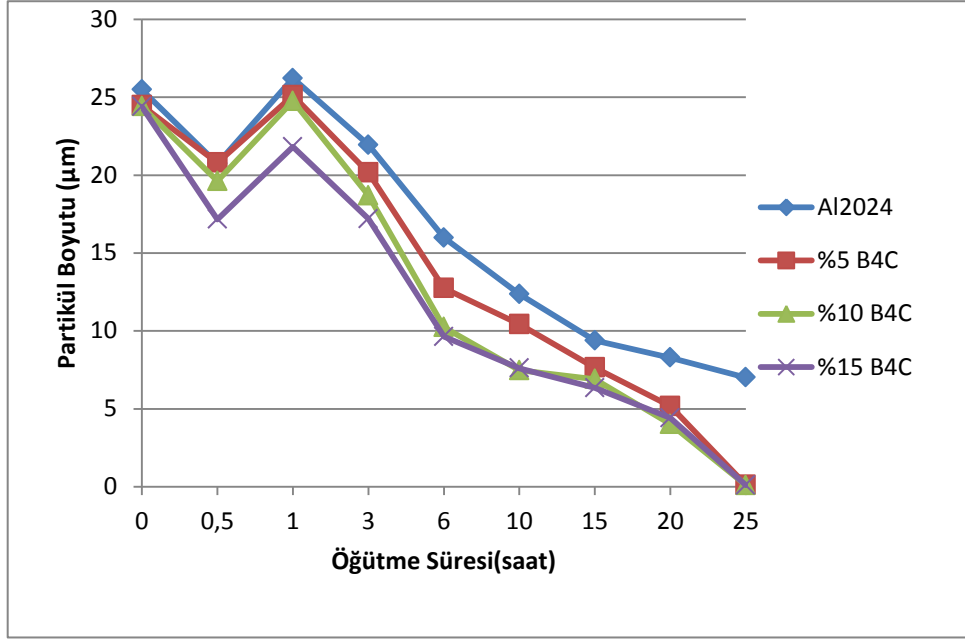
Şekil 3.7. %10 B<sub>4</sub>C içeren tozlarda takviye parçacıklarının dağılımı a) 0.5 saat b) 1 saat c) 3 saat d) 6 saat e) 10 saat f) 25 saat öğütülmüş tozlar

Şekil 3.7.'de görüldüğü üzere mekanik alaşımlama işleminin ilk saatlerinde (0.5 ve 1 saat) B<sub>4</sub>C partikülleri matris fazından bağımsız olarak yapıya dağılmış halde veya matris fazın yüzeyine tutunmuş halde görülmektedir. Ancak 3 saatlik öğütmede ise takviye tozları, alüminyum partikülleri üzerine kısmen gömülmüş haldedir. 3 saatlik öğütme süresinden sonra ise matris fazından bağımsız halde bulunan B<sub>4</sub>C partikülleri görülmemektedir (Şekil 3.7 d,e,f). Bu durum, takviye partiküllerinin matris fazı içine gömülerek başarılı bir mekanik alaşımlama işleminin gerçekleştiğini ve homojen dağılımın sağlandığını göstermektedir.

### 3.1.3. Toz Boyutu

Mekanik alaşımlama işleminde yüksek enerjili öğütme işlemine maruz kalan toz partikülleri bilye-toz-bilye, bilye-toz-değirmen yüzeyi arasında meydana gelen yüksek enerjili çarpışmalar sonucunda hem morfolojik hem de boyutsal anlamda değişim gösterirler. Mekanik alaşımlama ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan genel görüş öğütmenin ilk aşamalarında toz boyutunun soğuk kaynak sonucunda arttığı ileren öğütme sürelerinde ise azalarak kararlı hale ulaştığıdır . Bununla birlikte bu oluşum başlangıç boyutu, başlangıç tozlarının morfolojisi, işlem kontrol katkısının miktarı ve uygulanma biçimi gibi faktörlere de bağlıdır. Öğütülen tozların boyutu değişimleri incelendiğinde 0.5 saatlik öğütme süresinde toz boyutunda bir azalma olduğu, 0.5 saat ile 1 saat arasında ise soğuk kaynak nedeni ile boyut artışının olduğu gözlemlenmiştir. 0.5 saate kadar geçen süredeki boyut azalmasının nedeni başlangıç tozlarının düzensiz ve çubuksu morfolojiye sahip olmaları gösterilebilir. Bu tozlar bilye-toz-bilye çarpışmaları sonucunda ince bölgelerinden (boyun bölgesi) koparak öğütmenin başlangıcında toz boyutunun azda olsa düşmesine neden olmaktadır. Öğütme işleminin 1 saatinden 25 saat sonuna kadar toz boyutunda sürekli bir azalma hali görülmüştür, ancak şunu da belirtmek gerekir ki yaptığımız ön çalışmada öğütme işlemi 30 saate kadar devam ettirilerek 30 saat sonrasında toz boyutu ve morfolojisi incelenmiştir. 25 saatten sonra toz boyutunda önemli bir değişim olmadığı ve 30 saatlik öğütme süresinin maliyeti arttırmasına karşılık toz özelliklerine önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Dolayısıyla öğütülen bütün tozlarda 25 saatlik öğütme süresinde kararlı hale ulaşıldığı ve toz boyutunun da minimum değerlerine ulaştığı görülmüştür. Toz boyutu değerleri incelendiğinde artan takviye oranının kırılma etkinliğini artırdığı ve aynı öğütme sürelerinde artan takviye oranıyla birlikte daha küçük boyutlu tozların elde edildiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan

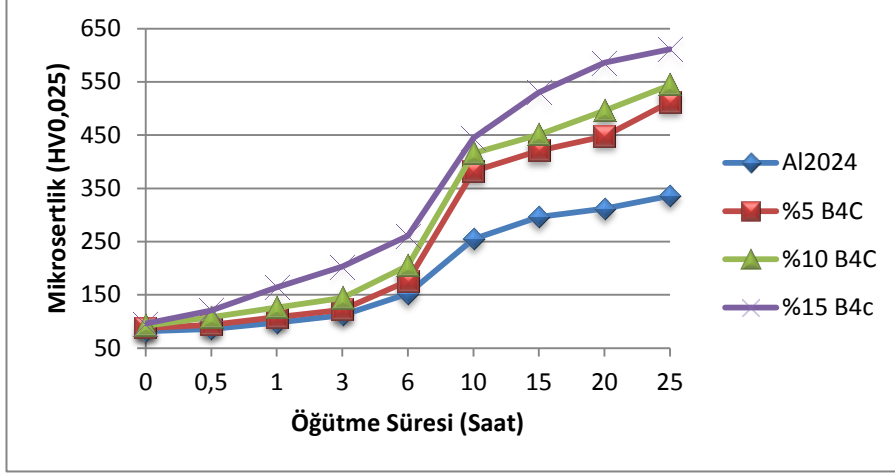
başlangıç tozlarının ortalama tane boyutu  $\sim 24\text{-}25\mu\text{m}$  olmasına rağmen 25 saatlik öğütme sonrasında kompozit tozlarında toz boyutu  $89\text{ nm}$ 'ye kadar azalmıştır. Toz boyutunun mikro mertebesinden nanometrik boyutlara kadar düşmüş olması, mekanik alaşımlama yönteminin yeni bir avantajı olarak, mekanik alaşımlanmış nanokompozit tozu üretiminin gerçekleşmesini sağlamıştır.



Şekil 3.7. Farklı takviye oranlarına sahip tozlarının öğütme süresi ile partikül boyutu arasındaki ilişki

### 3.1.4. Partikül Sertliği

Öğütülen tozların mikro sertlikleri incelendiğinde alaşım tozlarında artan öğütme süresi ile oluşan deformasyon sertleşmesi sonucunda toz sertliklerinin arttığı, sert takviye fazı  $\text{B}_4\text{C}$  içeren kompozit tozlarında ise hem artan öğütme zamanı hem de artan takviye oranı ile kompozit toz sertliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Takviye malzemesinin toz sertliğini arttırmasında iki etkin sebep vardır; birincisi  $\text{B}_4\text{C}$  fazının oldukça sert olması ve matris fazın içine gömülmesiyle birlikte ortalama toz sertliğini arttırmakta, diğeri ise  $\text{B}_4\text{C}$  partiküllerinin öğütme sisteminde öğütmeye yardımcı eleman gibi davranış göstermesiyle ilgilidir. Başka bir deyişle,  $\text{B}_4\text{C}$  partikülleri matris fazdan oldukça sert olduğu için, toz-toz çarpışmaları neticesinde matris fazın daha fazla deformasyona uğramasına ve dolayısıyla daha fazla deformasyon sertleşmesinin oluşmasına neden olmuştur.



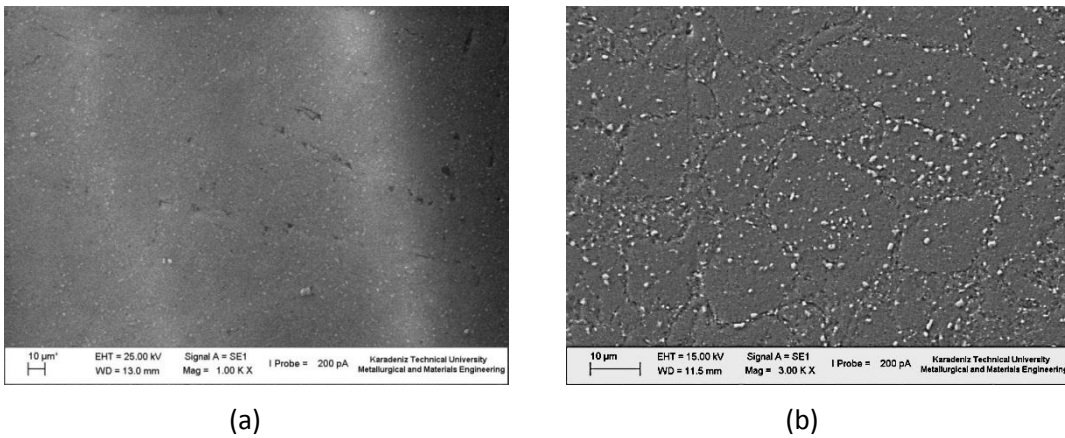
Şekil 3.8. Farklı takviye oranlarına sahip tozların öğütme süresi ile partikül sertliği arasındaki ilişki

## 3.2. Preslenmiş Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

### 3.2.1. İç Yapı İncelemeleri

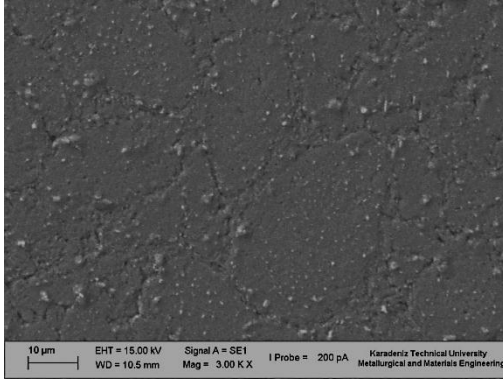
Artan öğütme zamanı ile alaşım ve kompozitlerin genel iç yapı incelemeleri ve takviye elemanlarının dağılımı taramalı elektron mikroskopunda incelenerek elde edilen SEM resimleri aşağıda verilmiştir.

#### 3.2.1.1. Al2024 Alaşımının İç Yapı Görüntüleri

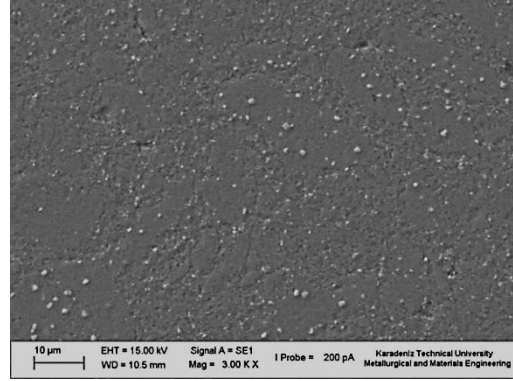


Şekil 3.9. Al2024 alaşımının farklı öğütme sürelerinde oluşan iç yapı görüntüleri (a)0 saat, (b) 0.5saat, (c) 1 saat, (d) 3 saat, (e) 6 saat, (f) 10 saat, (g) 15 saat, (h) 25 saat

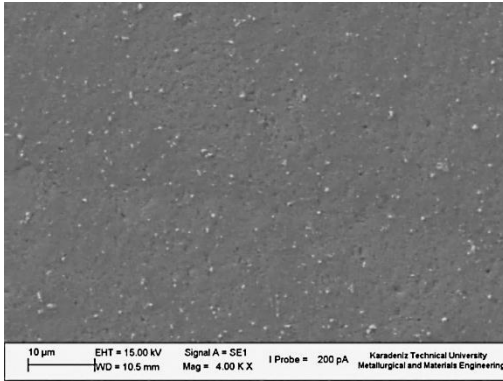
## Şekil 3.9'un devamı



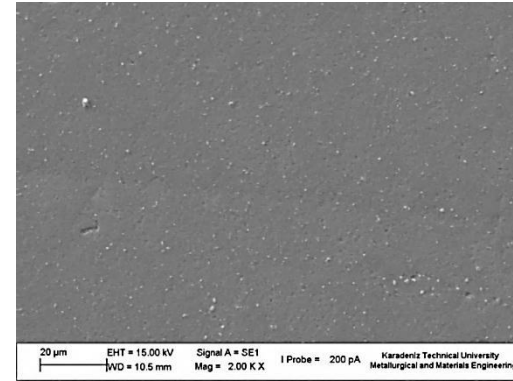
(c)



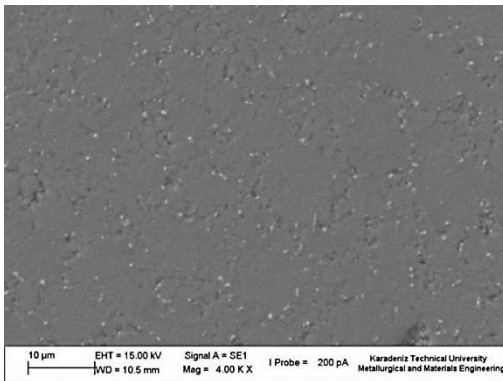
(d)



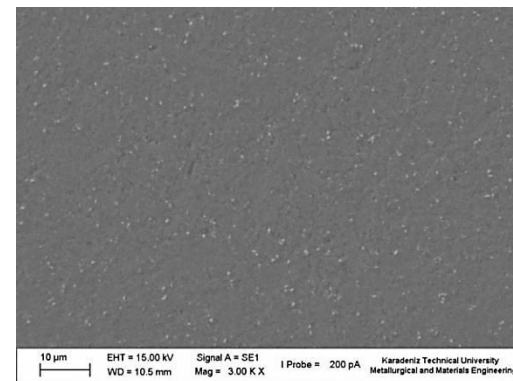
(e)



(f)



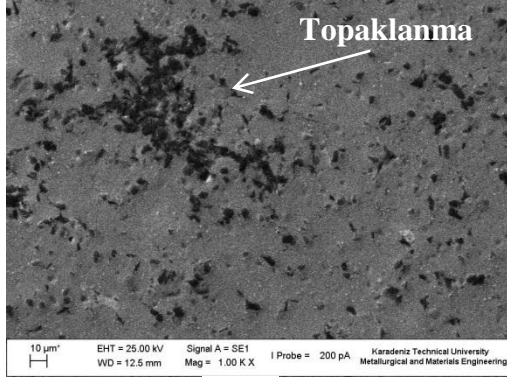
(g)



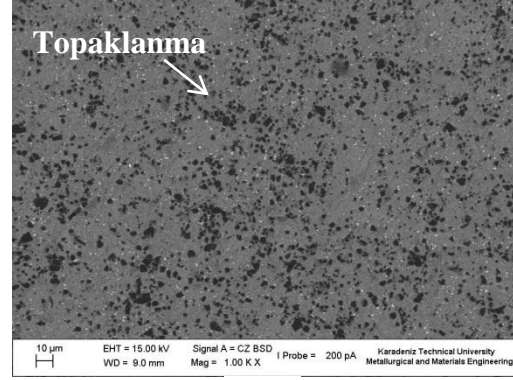
(h)

### 3.2.1.2. Al2024 - %5 B<sub>4</sub>C Kompozitin İç Yapı Görüntüleri

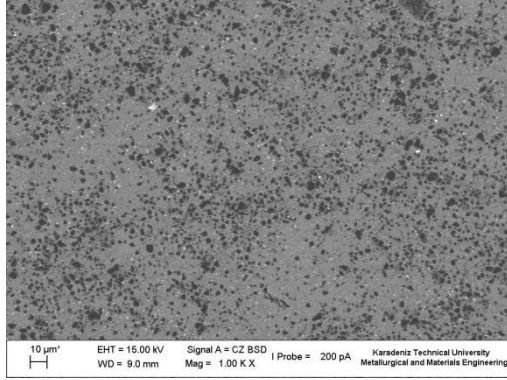
%5 B<sub>4</sub>C içeren kompozitin iç yapısı incelendiğinde, özellikle öğütülmemiş tozlardan üretilen ve öğütmenin ilk saatlerindeki tozlardan üretilen kompozitlerde topaklanma görülmüştür. Ancak öğütmenin ilk saatlerinde birbirleriyle temas halinde olan partikül tozları artan öğütme süresiyle birlikte yapıya homojen olarak dağılmıştır.



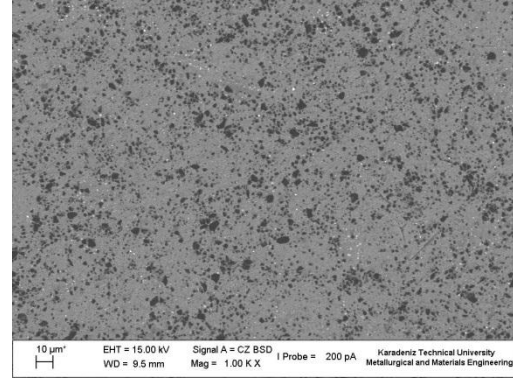
(a)



(b)



(c)

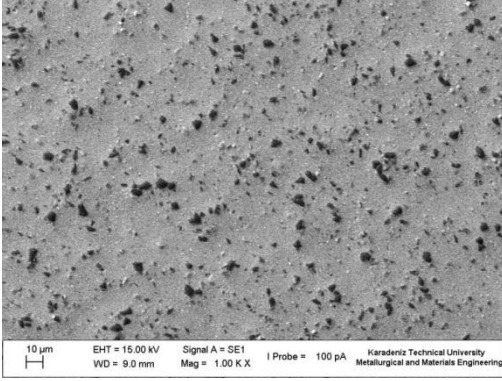


(d)

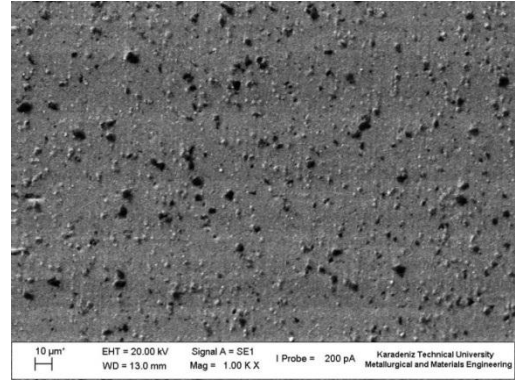
Şekil 3.10. Al2024-%5 B<sub>4</sub>C kompozitinin iç yapıları (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 3 saat, (e) 6 saat, (f) 10 saat, (g) 15 saat, (h) 20 saat, (i) 25 saat



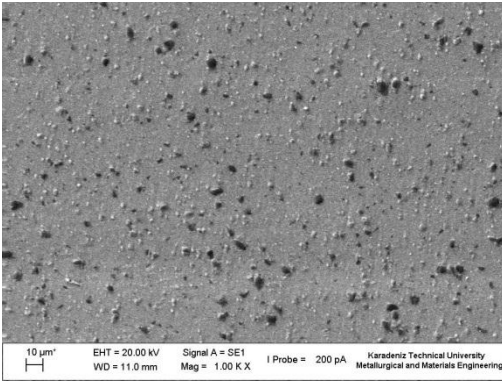
Şekil 3.10'un devamı



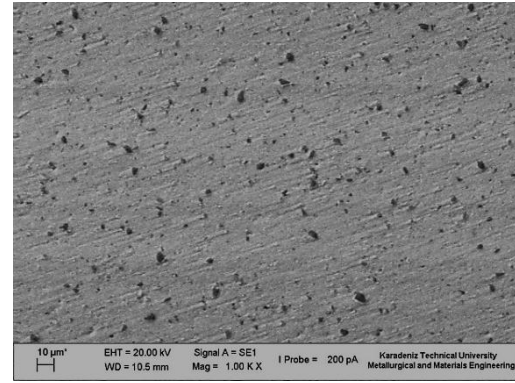
(e)



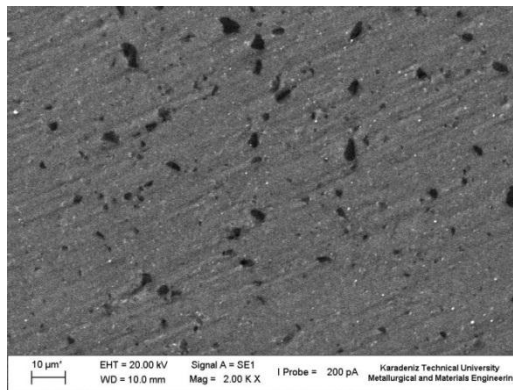
(f)



(g)



(h)

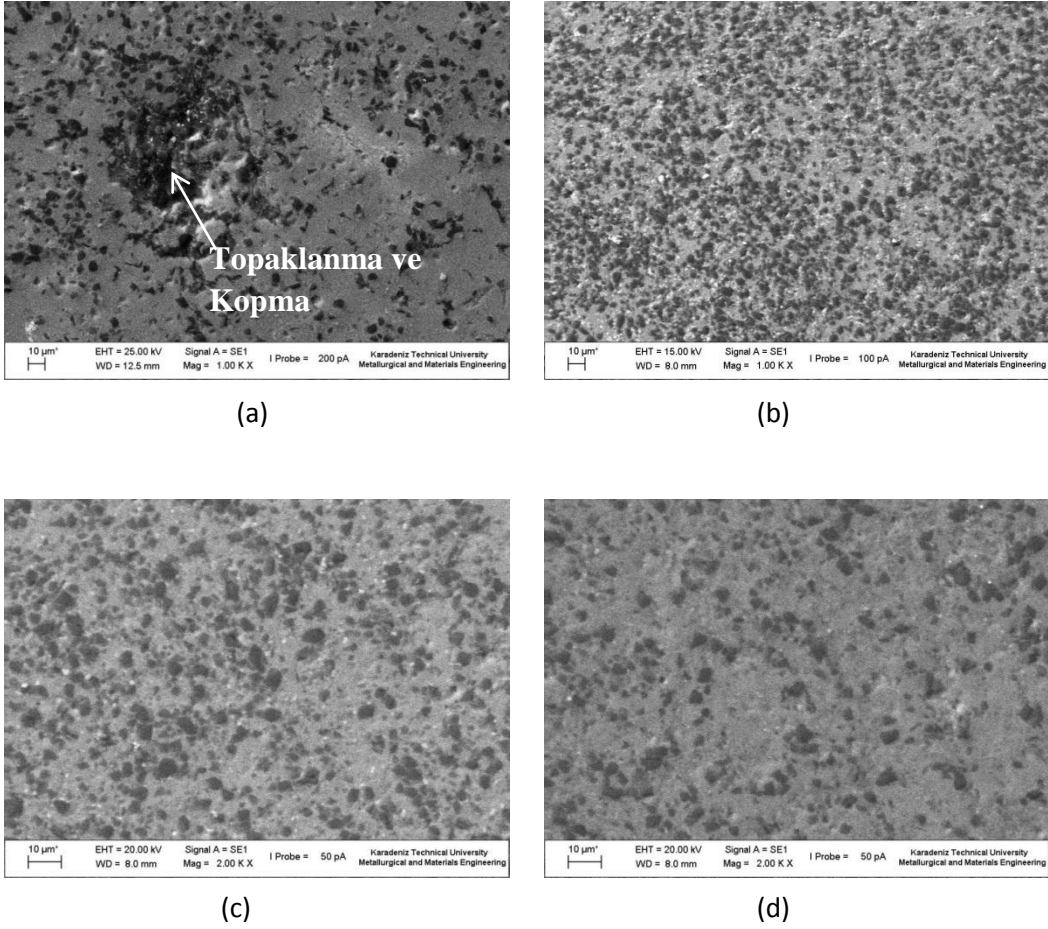


(i)



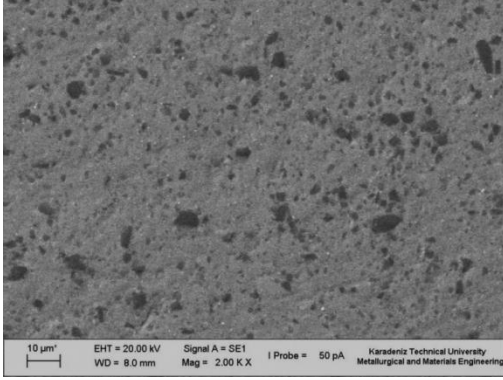
### 3.2.1.3. Al2024 - %10 B<sub>4</sub>C Kompozitin İç Yapı Görüntüleri

Ağırlıkça %10 B<sub>4</sub>C içeren kompozitte de aynı şekilde öğütmenin ilk saatlerinde homojen olmayan bir dağılım ve topaklanma görülmüştür. Bu topaklanmalar Şekil 3.11 (a)'da görüldüğü gibi, özellikle zımparalama ve parlatma sırasında topaklanma olan bölgelerden kopmalara neden olmaktadır. Artan öğütme süresiyle birlikte, yapıda homojenliğin sağlanmasının yanı sıra, B<sub>4</sub>C partiküllerinin boyutunda küçüldüğü iç yapı resimlerinde görülmektedir.

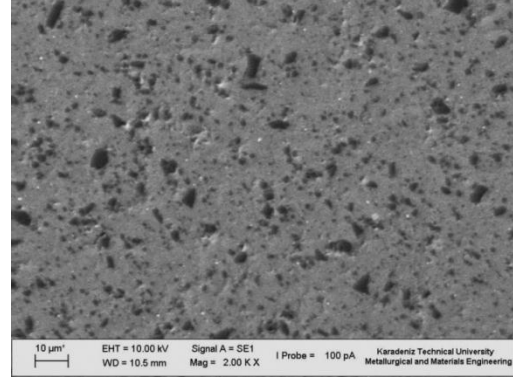


Şekil 3.11. Al2024-%10 B<sub>4</sub>C kompozitinin iç yapıları (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 3 saat, (e) 6 saat, (f) 10 saat, (g) 15 saat, (h) 20 saat, (i) 25 saat

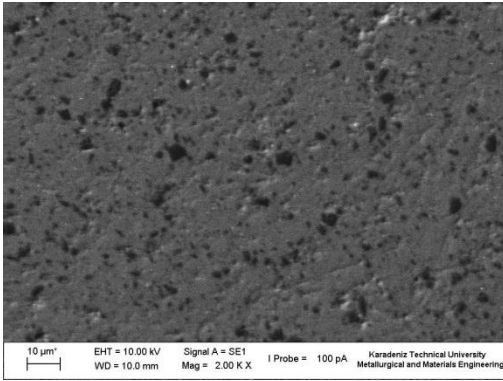
Şekil 3.11'in devamı



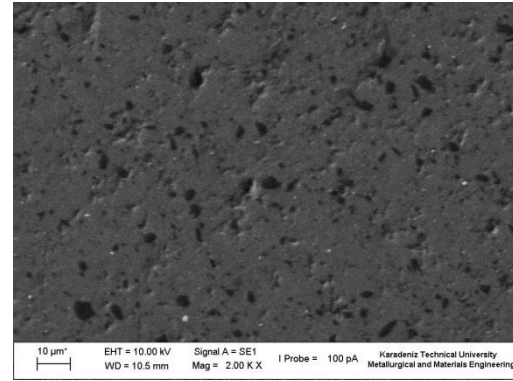
(e)



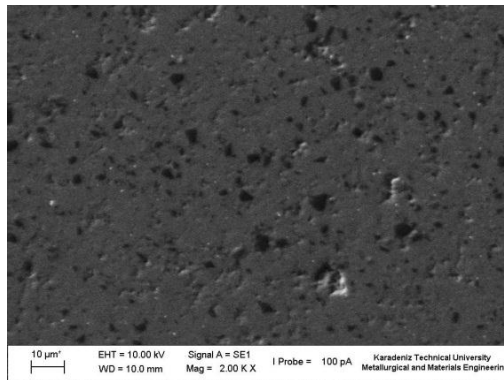
(f)



(g)



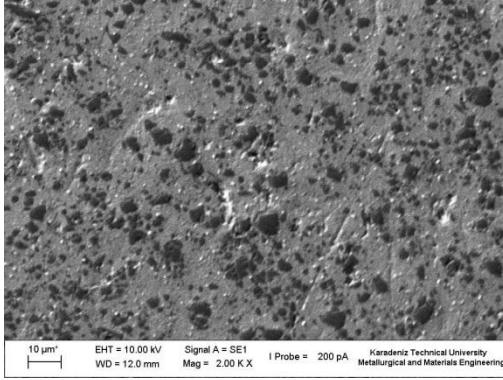
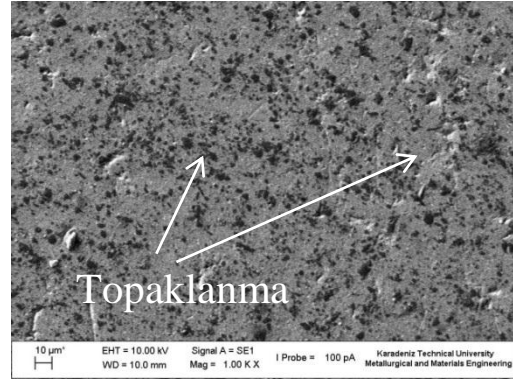
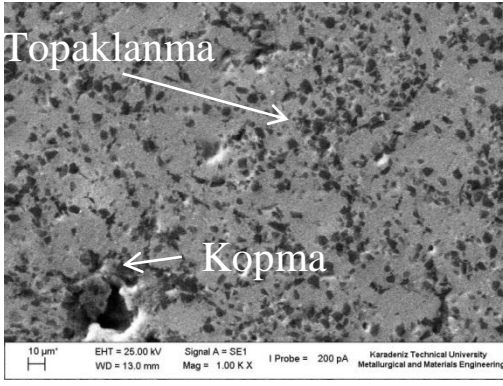
(h)



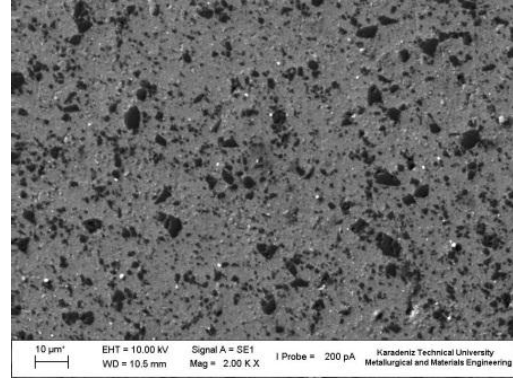
(i)

### 3.2.1.4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - %15 B<sub>4</sub>C Kompozitin İç Yapı Görüntüleri

Bu gruptaki kompozitlerde, takviye miktarının fazla olması iki önemli sonucu beraberinde getirmiştir. Bunlardan birincisi, takviye miktarının artmasıyla birlikte topaklanma miktarı artmıştır. Diğeri ise artan takviye miktarı ile birlikte kompozit malzemenin sertliği oldukça artmıştır, bunun neticesinde numune hazırlama (zımparalama-parlatma) işlemlerinde diğeri grup numunelere kıyasla başarılı bir numune yüzeyi elde edilememiştir. Bu durum iç yapı fotoğraflarında açıkça görülmektedir.



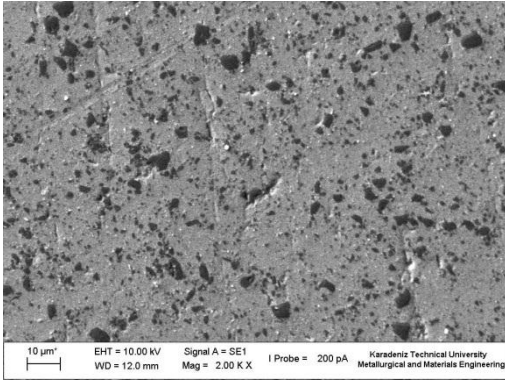
(c)



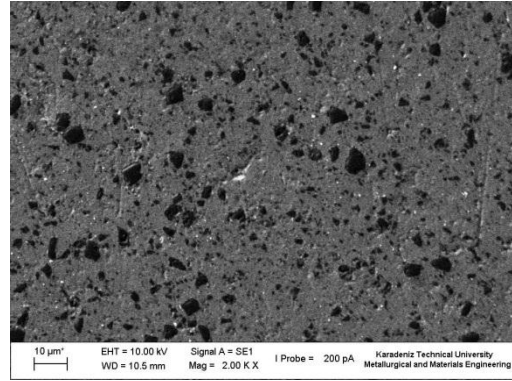
(d)

Şekil 3.12. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%15 B<sub>4</sub>C kompozitinin iç yapıları (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 3 saat, (e) 6 saat, (f) 10 saat, (g) 15 saat, (h) 20 saat, (i) 25 saat

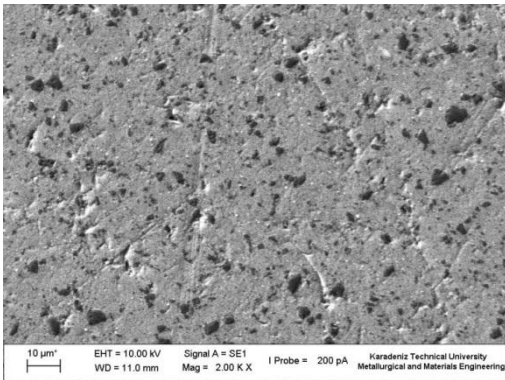
Şekil 3.12'nin devamı



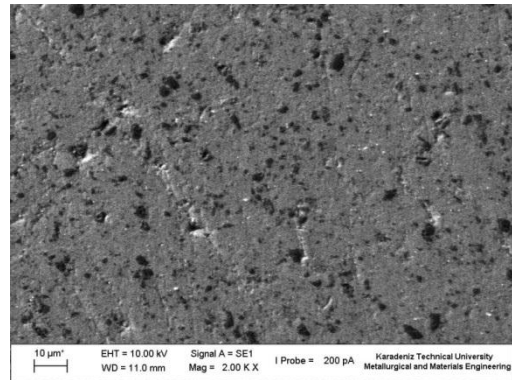
(e)



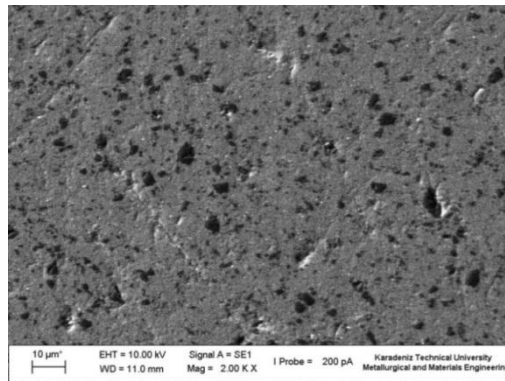
(f)



(g)



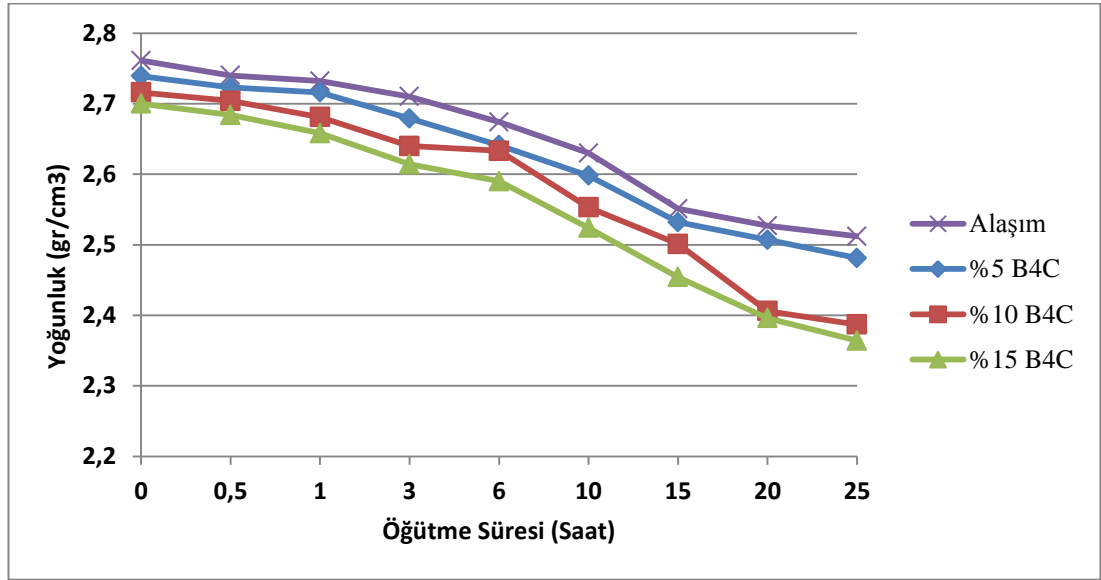
(h)



(i)

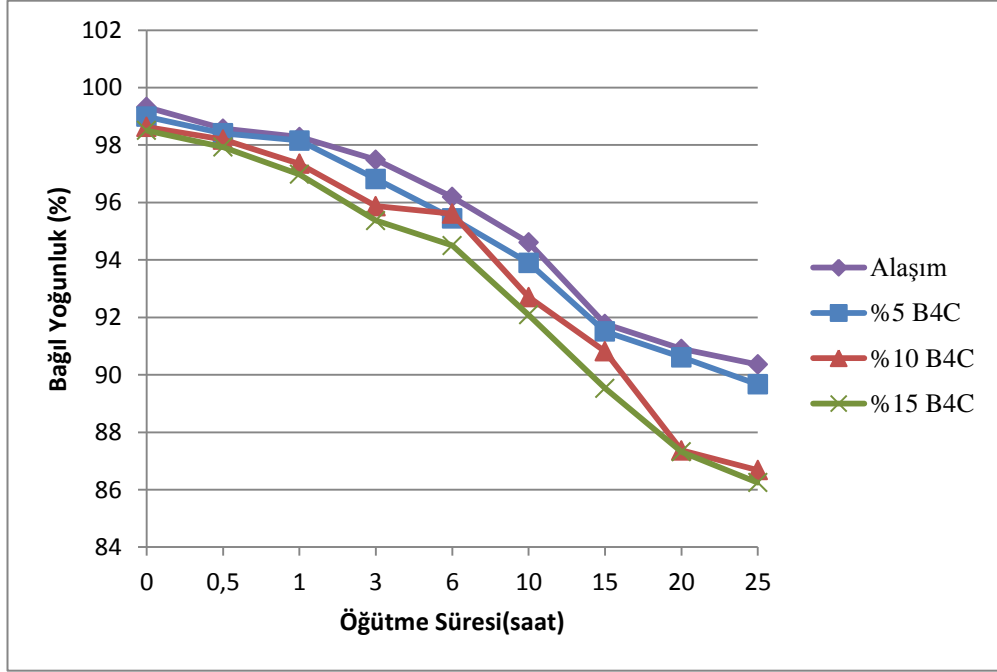
### 3.2.2. Preslenmiş Numunelerde Gözenek Miktarının İncelenmesi

Tozların sıkıştırılma işleminde meydana gelen preslenme mekanizması kısaca şöyledir; sıkıştırmanın ilk aşamasında toz parçacıkları birbiri içerisinde hareket ederek yer değiştirirler. Bu aşamada tozun paketlenmesini etkileyen faktörlerin başında toz morfolojisi, parçacık boyutu ve parçacıklar arası sürtünme gelmektedir. Tozların sıkıştırılmasında ikinci aşamada ise elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları etkindir. Bu aşamada parçacıklar arası mekanik bağ oluşmaktadır. Sıkıştırma işleminin son aşamasında ise tozların kırılması ve plastik deformasyon ile poroziteler azalmakta ve toz parçacıkları basıncın ve sıcaklığın etkisiyle birbirine soğuk kaynak olmaktadır. Artan öğütme zamanı ile deformasyon sertleşmesine maruz kalan toz parçacıklarının sıkıştırılması (paketlenmesi) zorlaşır. Buna bağlı olarak yoğunluk değeri artan öğütme zamanı ile azalır. Tozun preslenme ve paketlenme kabiliyetini azaltan bir diğer faktörde artan takviye oranı ile birlikte yapıdaki sert partiküllerin artması nedeniyle kompozit tozlarının sertliğinin artmış olmasıdır. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi artan öğütme süresi ve takviye oranı ile yoğunluk değerleri azalmış, porozite miktarı artmıştır. Üretilen kompozitlerin yoğunluk ve porozite değişimi Şekil 3.13'te verilmiştir.

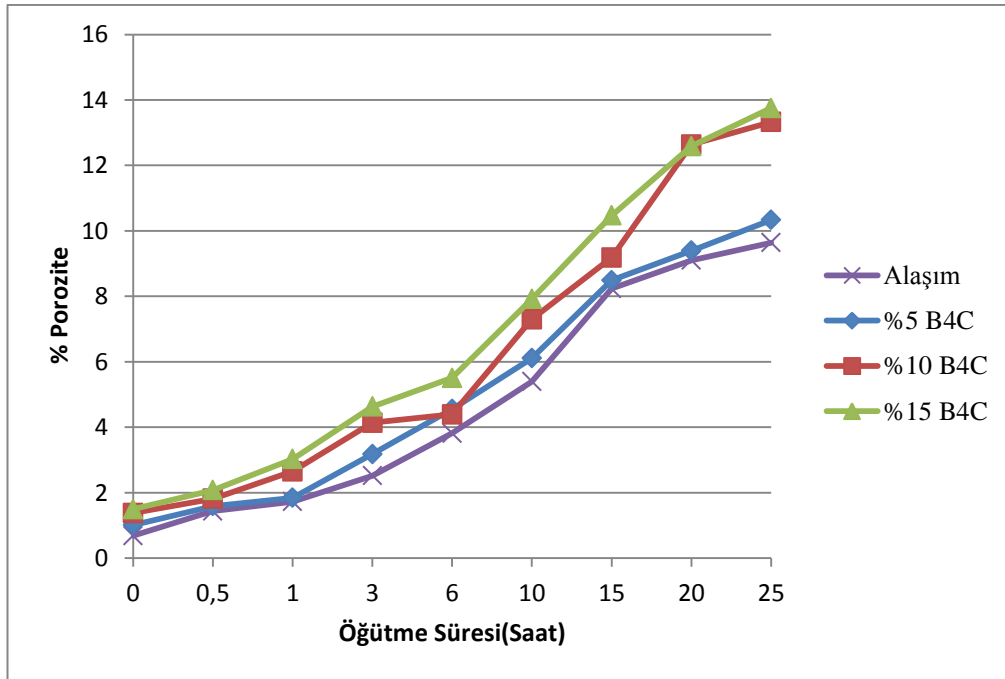


(a)

Şekil 3.13. Alaşım ve farklı takviye oranlarına sahip kompozitlerin öğütme süresine bağlı olarak değişen (a) yoğunluk ve (b) bağıl yoğunluk (c) % porozite değerlerinin değişimi



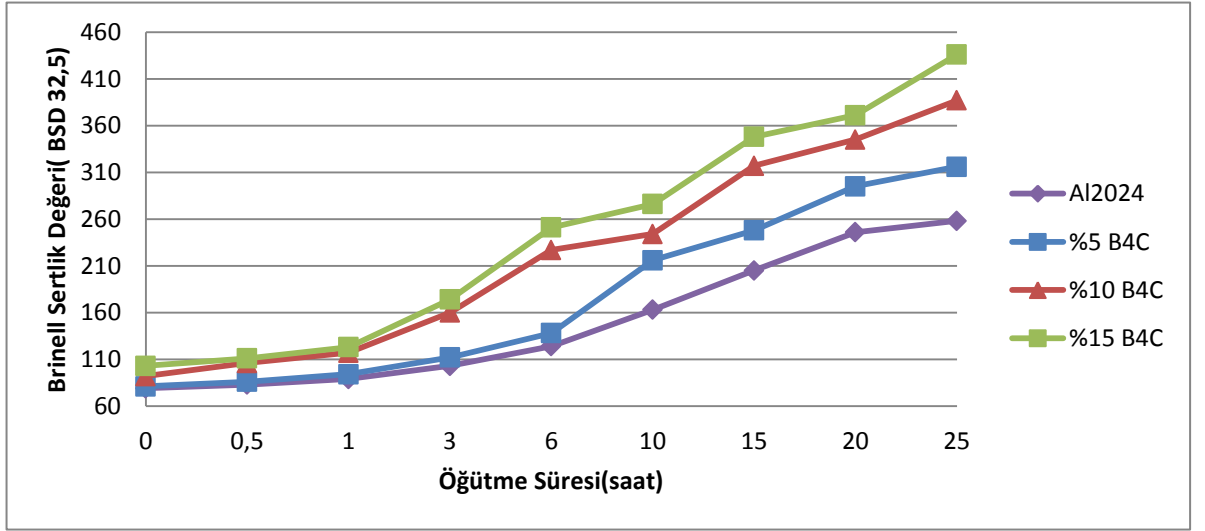
(b)



(c)

### 3.2.3. Preslenmiş Numunelerin Sertliklerinin İncelenmesi

Artan öğütme süresi ve takviye miktarı ile sertlik değerlerinde belirgin bir şekilde artış görülmüştür. Buna neden olan birinci faktör deformasyon sertleşmesi ile toz sertliğinin artmış olması yani bulk numune üretiminde kullanılan hammaddenin sertliğinin artmış olması ikinci faktör ise oldukça sert bir faz olan B<sub>4</sub>C miktarının artmış olmasıdır. Şekil 3.14’de görüldüğü gibi artan öğütme zamanı ve artan takviye miktarı ile sertlik değerleri önemli derecede artmıştır.

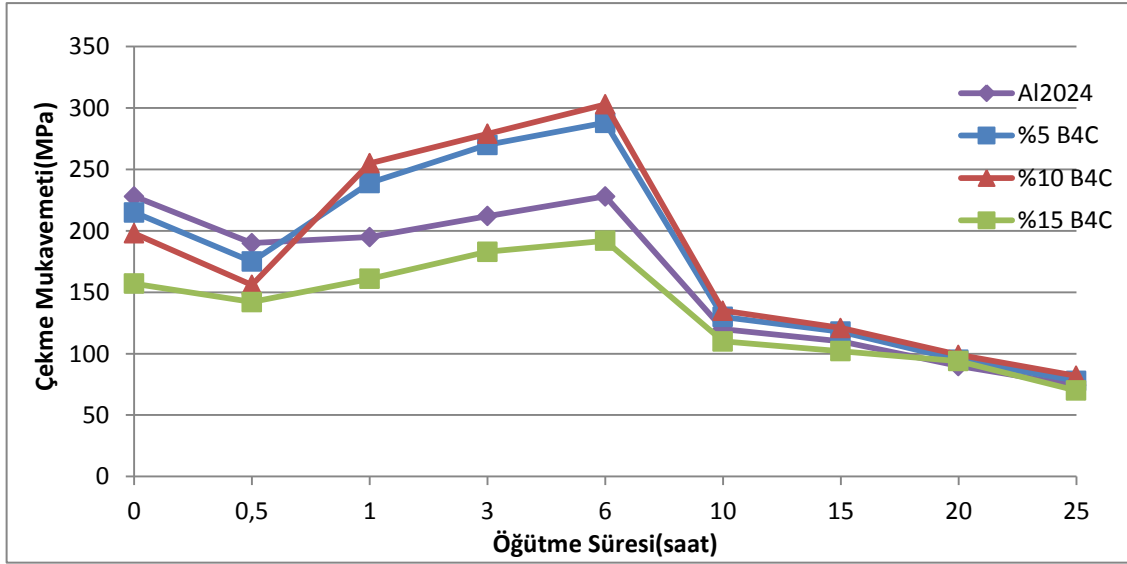


Şekil 3.14. Farklı takviye oranlarına sahip preslenmiş numunelerde öğütme süresine bağlı olarak sertliğin değişimi

### 3.2.4. Preslenmiş Numunelerin Çekme Mukavemetlerinin İncelenmesi

0.5 saatlik öğütme sürelerine sahip tozların preslenmesiyle üretilen numunelerin çekme mukavemeti değerleri, öğütülmemiş kompozitlere göre daha düşüktür. Bunun nedeni, öğütmenin ilk safalarında tozların hızlı bir plastik deformasyona uğrayarak paketlenme kabiliyeti pek iyi olmayan pulsu yapı veya pulsu yapıya yakın yüzey alanı genişlemiş bir morfolojiye sahip olmalarıdır. 1 saatlik öğütmeden sonra yapılan incelemede ise toz boyutu büyümesine rağmen tozlar pulsu morfolojiden kısmen uzaklaşmıştır. Toz boyutunun büyümesinin çekme mukavemetini düşürmesi beklensede artan öğütme süresiyle birlikte takviye fazları yapıya daha homojen olarak dağılmış hatta takviye partikülleri kısmen matris fazına gömülmüştür. Bu durum numunenin hem

sertliğini hem de çekme mukavemetini arttırmıştır. Çekme mukavemetleri, partikül boyutunun küçülmesi ve takviye fazlarının dağılımının homojenliğinin artmasıyla birlikte bütün takviye oranlarında 6 saatlik öğütme süresinde maksimum değerine ulaşmıştır. 6 saatten sonraki öğütme sürelerinde ise çekme mukavemeti değerleri hızlı bir düşüş göstermiştir. Hall-Petch bağıntısına göre azalan tane boyutuyla birlikte çekme mukavemetinin artması beklenmektedir. Ancak bu durum mekanik alaşımlama, aşındırma gibi yüksek deformasyon uygulanan ve yüksek enerji uygulanarak üretilen tozlar ve bu tozlardan üretilen malzemeler için geçerli değildir. Bu tür üretim yöntemleriyle üretilen malzemeler, belirli bir partikül boyutuna kadar Hall-Petch bağıntısına uygun davranış sergilese de belirli bir kritik partikül boyutundan sonra Hall-Petch bağıntısına ters bir davranış sergilerler.



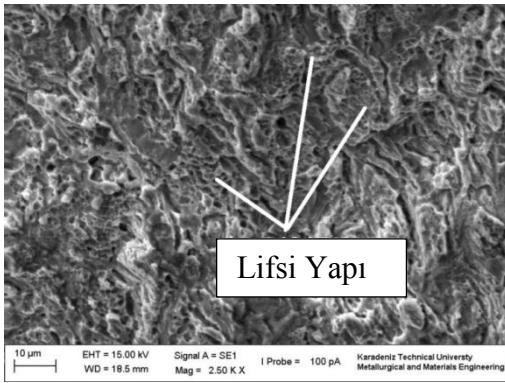
Şekil 3.15. Artan takviye oranı ve öğütme süresine bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinin değişimi

### 3.2.5. Çekme Numunelerinde Kırılma Yüzey Görüntüsünün İncelenmesi

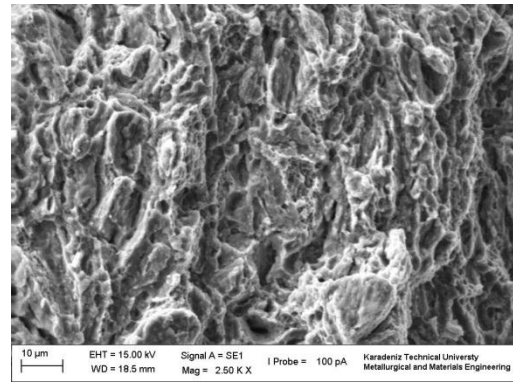
Kırılma davranışının belirlenmesinde kırılma yüzeyinin görünüşü, kırılma enerjisi, büzülme miktarı, kırılma yüzeyinin pürüzlülüğünün incelenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kırılma yüzeyinin görünüşü kırılma davranışının belirlenmesinde (sünek-gevrek, taneler arası-tane içi) önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.15'te görüldüğü üzere ürettiğimiz malzemelerin çekme mukavemetleri 6 saatlik öğütme süresine kadar



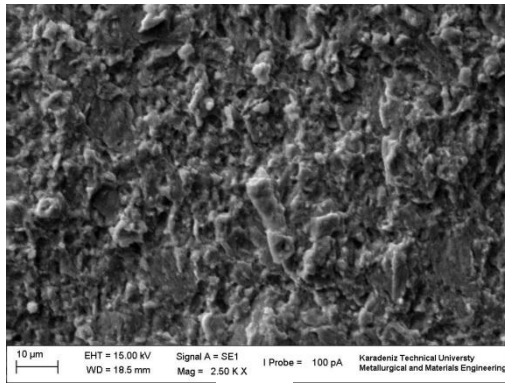
artmıştır, ondan sonra ise hızlı bir düşüş görülmüştür. Bunun esas sebebi, öğütülen tozun gevrekleşmesi ve ani kırılmalara neden olmasıdır. Ayrıca kırılma yüzeylerinde görülen gözenekler malzemenin çekme mukavemeti ve kırılma davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Numunelerin kırılma davranışını belirlemek için incelenmiştir kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir ve elde edilen fraktografi görüntüleri aşağıda verilmektedir.



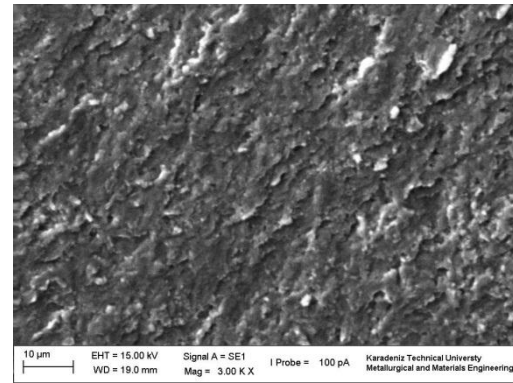
(a)



(b)

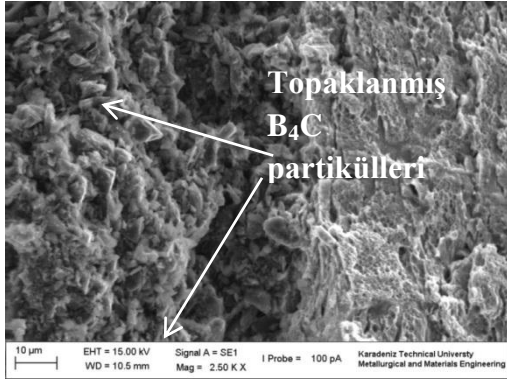


(c)

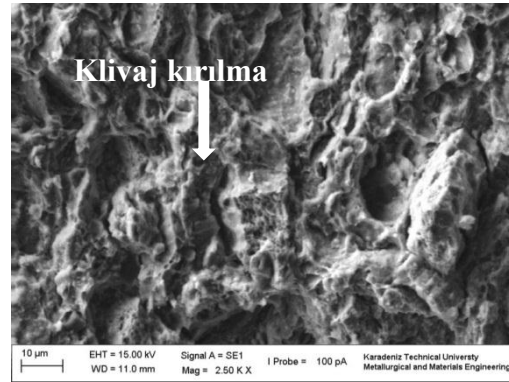


(d)

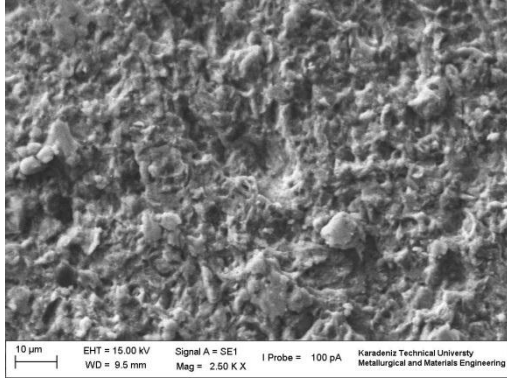
Şekil 3.16. Al2024 alaşımının kırılma yüzeyleri görüntüleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler



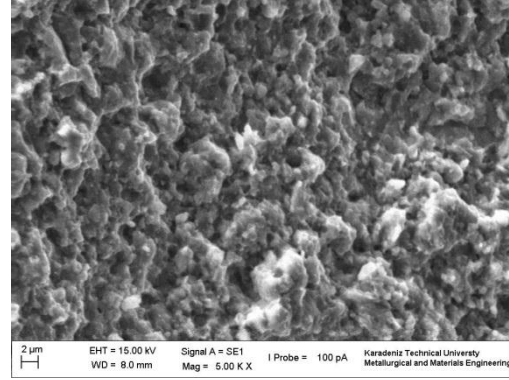
(a)



(b)

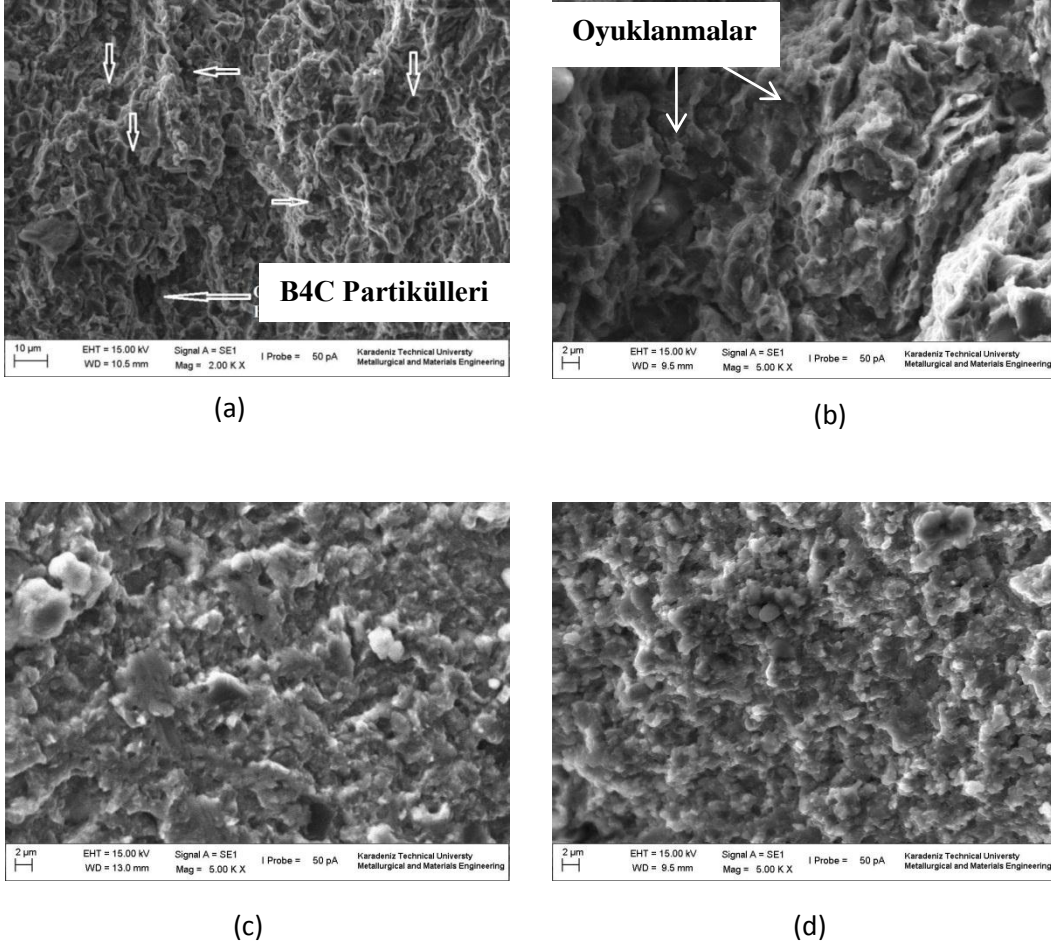


(c)

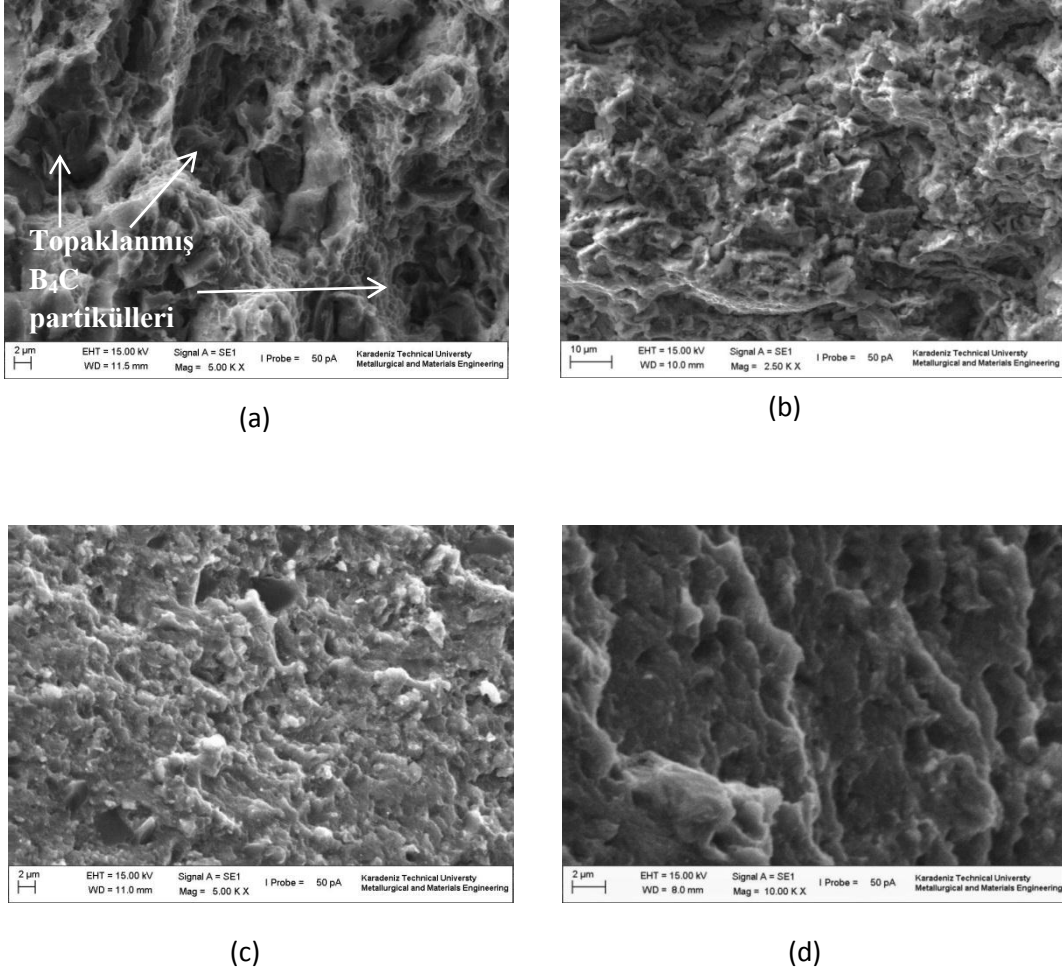


(d)

Şekil 3.17. Al2024-%5 B<sub>4</sub>C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler



Şekil 3.18. Al2024-%10 B4C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler



Şekil 3.19. Al2024-%15 B4C kompozitlerinin kırılma yüzeyleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde öğütmenin ilk saatlerinde görülen lifsi yapıların, artan öğütme süresiyle birlikte kaybolduğu ve yerini düzleşmiş, daha pürüzsüz bir kırılma yüzeyine bıraktığı görülmektedir. Çekme mukavemetinin en iyi olduğu %10 B<sub>4</sub>C içeren numunelerde, kırılma yüzeyinde meydana gelen oyukların boyutları irili ufaklıdır ve bu oyuklanma boyutlarının irili ufaklı olması malzemenin çekme mukavemetini olumlu yönde etkiler. %5 takviyeli kompozitlerde çekme mukavemeti, alaşıma göre bir miktar artarken, %15 takviyeli kompozitte azalmıştır. Bunun nedeni, yapıya katılan partikül miktarının %10 takviye miktarına kadar homojen dağıtılabiliyor olması ve %10 takviye miktarından sonra ise B<sub>4</sub>C partiküllerinin toplanma eğilimi göstermesidir.

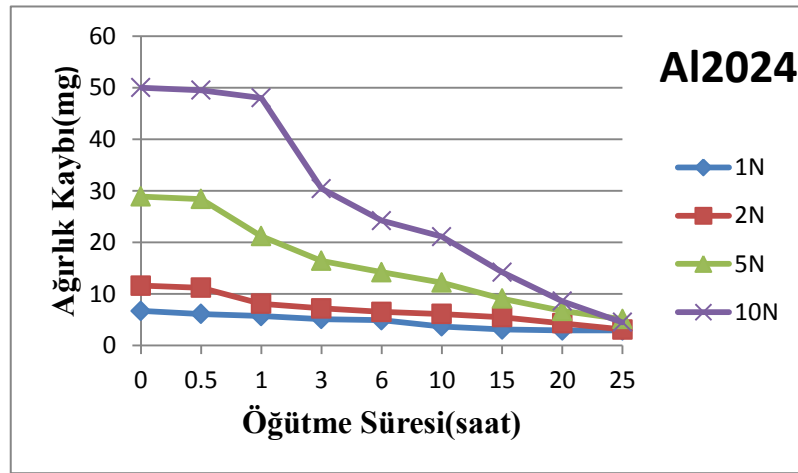
### 3.3. Tribolojik Özelliklerin İncelenmesi

Bu çalışmada ürettiğimiz gibi parçacık takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerinden bahsederken, kompozitin tribolojik özelliklerinden de mutlaka bahsedilmelidir. Çünkü, yapıya katılan partikül takviyeleri kompozitin mekanik özelliklerinin yanı sıra tribolojik özelliklerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada daha öncede bahsedildiği üzere dört farklı bileşimde malzeme üretilmiştir. Bu numunelere Ball-on-Disk (numune üzeri bilya) aşınma testi uygulanmıştır. Elde edilen ağırlık kayıpları, aşınma izleri ve sürtünme kuvvetleri aşağıda verilmektedir.

#### 3.3.1. Numunelerde Meydana Gelen Ağırlık Kayıpları

##### 3.3.1.1. Farklı Öğütme Süresi ve Yüke Bağlı Ağırlık Kayıpları

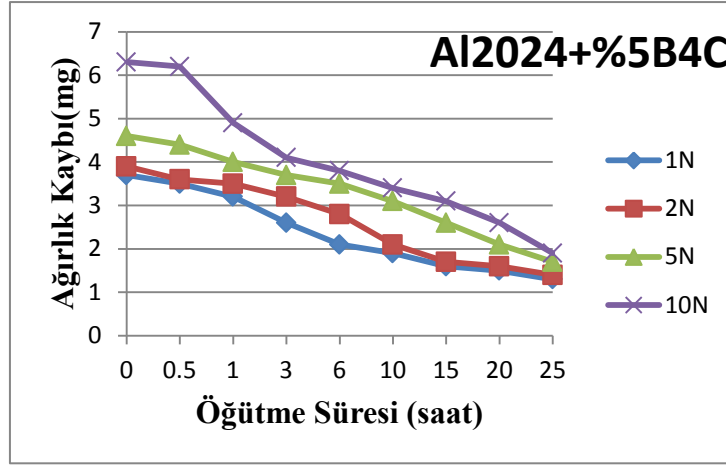
Farklı takviye oranlarına ve öğütme sürelerine sahip kompozit malzemelerde 300 metre aşınma mesafelerinde meydana gelen ağırlık kayıpları ölçülmüş ve ağırlık kayıpları miligram cinsinden Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodan ve Şekil 3.17’den görüldüğü üzere artan öğütme süresi ve takviye oranıyla birlikte ağırlık kayıpları azalmıştır, ancak artan yüklerle birlikte ağırlık kayıpları artmıştır. Bütün numunelerde en az ağırlık kaybı 25 saatlik öğütmelerde görülmüştür. Farklı takviye oranlarındaki numuneler karşılaştırıldığında ise en az ağırlık kayıplarının ağırlıkça %15 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde meydana geldiği görülmüştür.



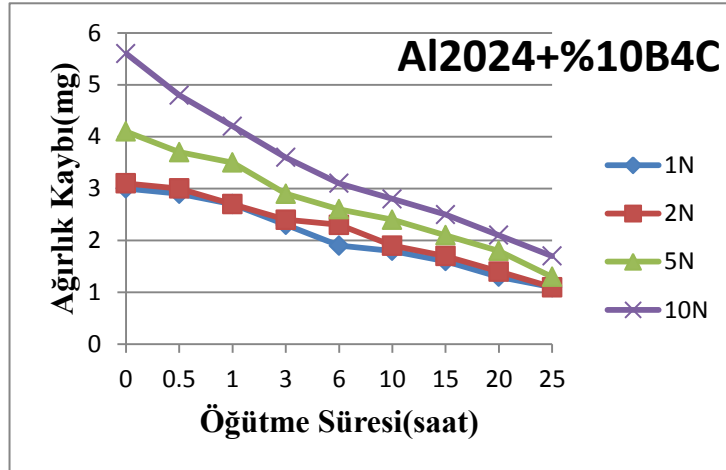
(a)

Şekil 3.17. Farklı öğütme süreleri ve yüklerde meydana gelen ağırlık kayıpları (a) Alaşım, (b) %5 B<sub>4</sub>C, (c) %10 B<sub>4</sub>C (d) %15 B<sub>4</sub>C

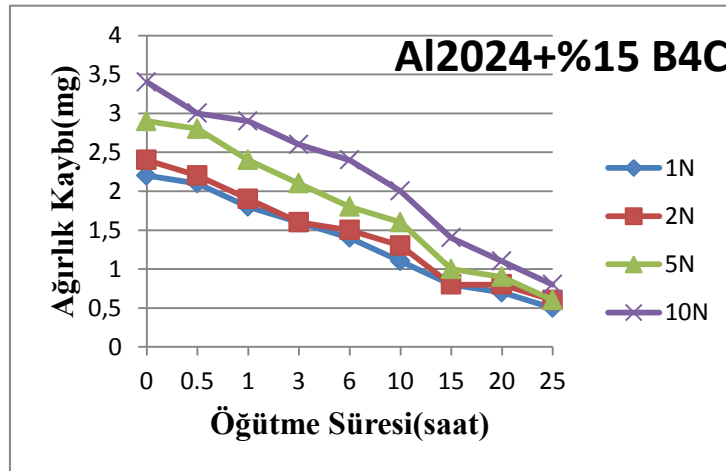
Şekil 3.17'nin devamı



(b)



(c)



(d)

Tablo 3.1. Farklı Özelliklerdeki Numunelerde Meydana Gelen Ağırlık Kayıpları

		Öğütme Süresi(saatt)	0	0.5	1	3	6	10	15	20	25
		Ağırlık Kaybı (mg/300m)									
<b>Alaşım</b>	1N	6,7	6,1	5,7	5,1	4,9	3,7	3,1	2,9	2,9	
	2N	11,6	11,2	8,1	7,2	6,5	6,1	5,5	4,3	3,1	
	5N	28,9	28,4	21,2	16,4	14,2	12,2	9,1	6,7	5,1	
	10N	50	49,5	48	30,4	24,2	21,1	14,2	8,6	4,5	
<b>%5 B4c</b>	1N	3,7	3,5	3,2	2,6	2,1	1,9	1,6	1,5	1,3	
	2N	3,9	3,6	3,5	3,2	2,8	2,1	1,7	1,6	1,4	
	5N	4,6	4,4	4	3,7	3,5	3,1	2,6	2,1	1,7	
	10N	6,3	6,2	4,9	4,1	3,8	3,4	3,1	2,6	1,9	
<b>%10 B4C</b>	1N	3	2,9	2,7	2,3	1,9	1,8	1,6	1,3	1,1	
	2N	3,1	3	2,7	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4	1,1	
	5N	4,1	3,7	3,5	2,9	2,6	2,4	2,1	1,8	1,3	
	10N	5,6	4,8	4,2	3,6	3,1	2,8	2,5	2,1	1,7	
<b>%15 B4C</b>	1N	2,2	2,1	1,8	1,6	1,4	1,1	0,8	0,7	0,5	
	2N	2,4	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	0,8	0,8	0,5	
	5N	2,9	2,8	2,4	2,1	1,8	1,6	1	0,9	0,6	
	10N	3,4	3	2,9	2,6	2,4	2	1,4	1,1	0,8	

### 3.3.2. Aşınma İz Genişlikleri

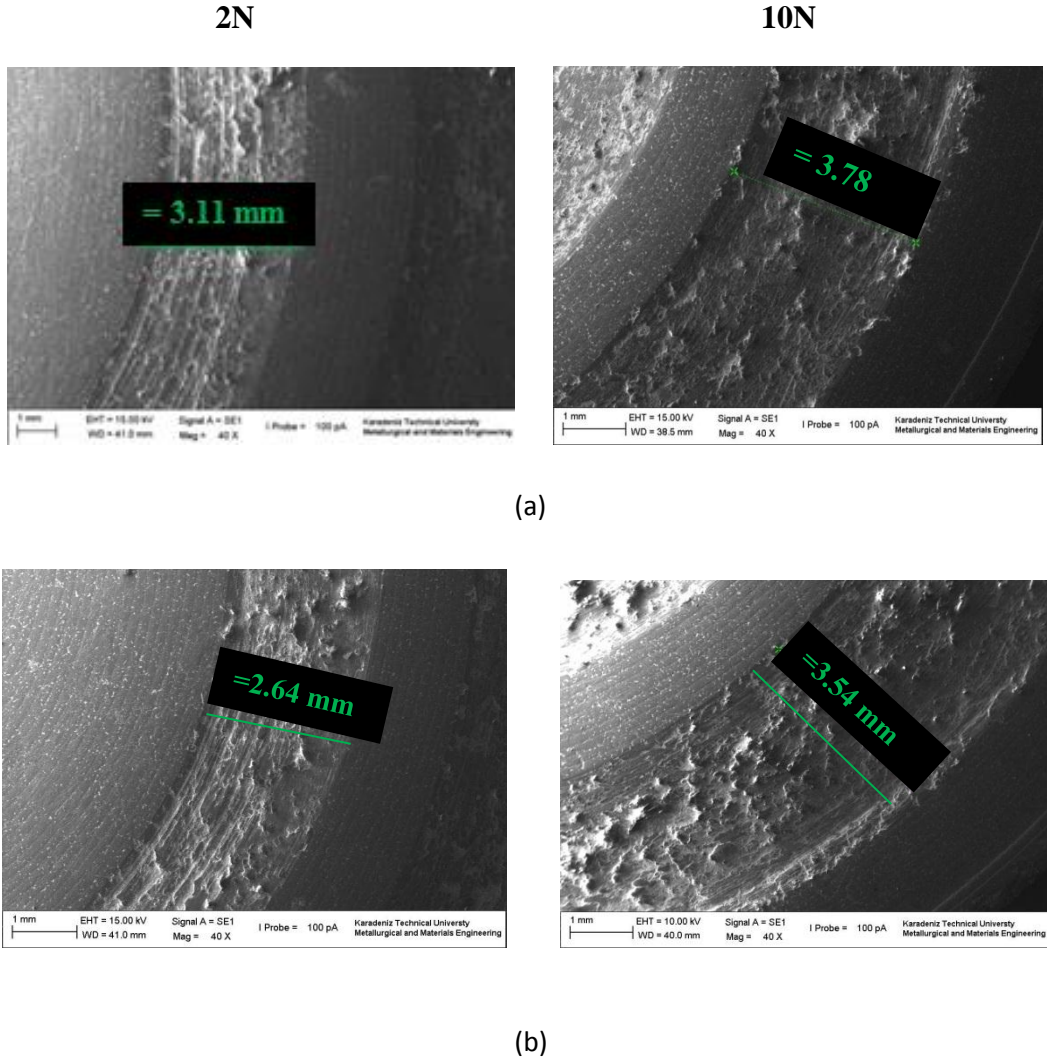
Numunelerde oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiş ve iz genişlikleri milimetre cinsinden Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2. Aşınma iz genişlikleri

		Öğütme Süresi(saatt)	0	0.5	1	3	6	10	15	20	25
		Aşınma İz genişliği(mm)									
<b>Alaşım</b>	2N	3,11	2,98	2,64	2,34	2,04	1,87	1,63	1,27	1,26	
	10N	3,78	3,68	3,54	3,16	2,98	2,34	1,96	1,48	1,41	
<b>%5 B4C</b>	2N	2,78	2,43	2,41	2,12	2,05	0,97	0,58	0,56	0,51	
	10N	3,63	3,32	3,15	2,31	2,2	1,43	0,973	0,892	0,74	
<b>%10 B4C</b>	2N	1,16	1,07	0,96	0,87	0,74	0,63	0,39	0,27	0,21	
	10N	1,68	1,54	1,21	1,16	1,02	0,84	0,66	0,51	0,43	
<b>%15 B4C</b>	2N	0,51	0,45	0,42	0,38	0,30	0,21	0,19	0,16	0,14	
	10N	1,13	1,08	0,98	0,98	0,82	0,72	0,65	0,52	0,35	



Tablo 3.2’de görüldüğü üzere artan öğütme süresiyle birlikte aşındırıcı bilyanın oluşturduğu izin genişliği giderek küçülmüştür. Ağırlık kayıplarında da olduğu gibi 25 saatlik öğütme sürelerine sahip numunelerde aşınma iz genişliği minimum değerdedir. Farklı takviye oranlarına sahip numunelerin kıyaslanmasında ise, artan takviye oranıyla birlikte aşınma iz genişliklerinin küçüldüğü ve %15 takviye oranına sahip kompozitin ise minimum iz genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Aynı öğütme süresine ve aynı yüklemelere sahip alaşım ve %15 takviye oranındaki kompozitin kıyaslanması sonucu iz genişliğinin yaklaşık olarak 1:10 mertebesine kadar düştüğü görülmüştür. Artan yük miktarı ile de iz genişliği artış göstermiştir. Alaşım numuneleri ve %10 takviyeli kompozitlerin aşınma iz genişlikleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da görülmektedir.

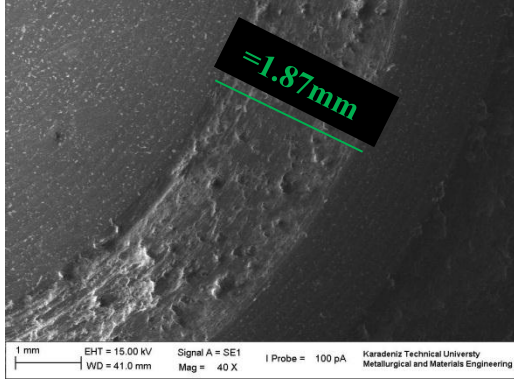


Şekil 3.18. Alaşım numunelerinin aşınma iz genişlikleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler

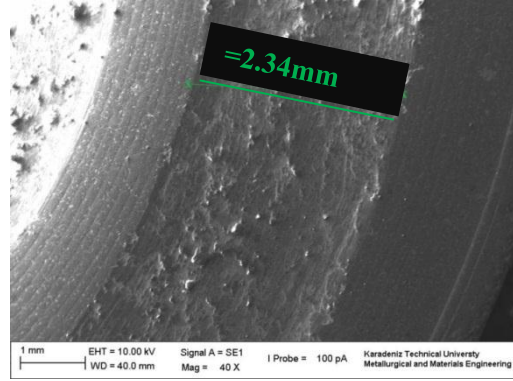


Şekil 3.18'in devamı

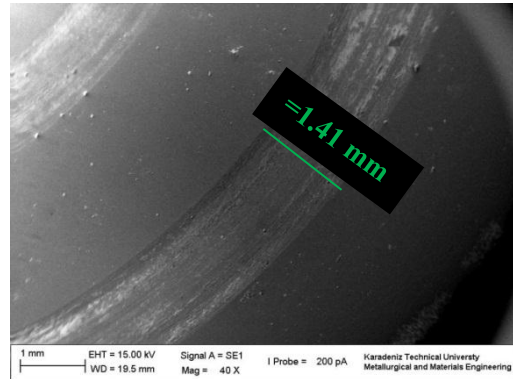
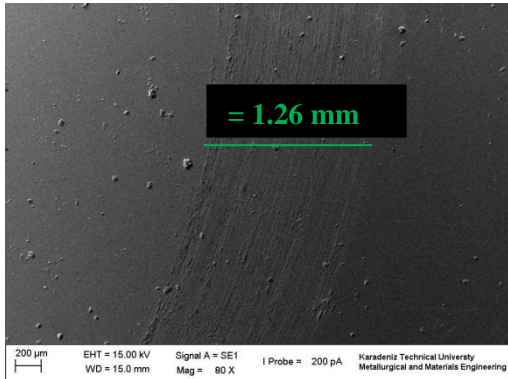
2N



10N



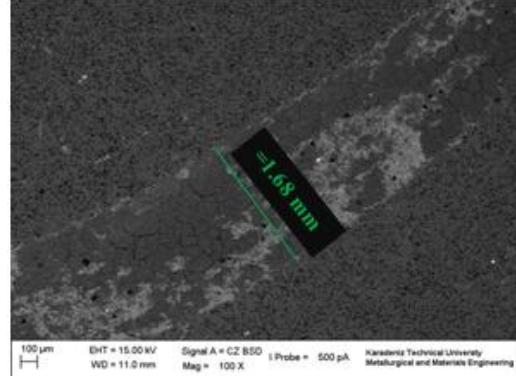
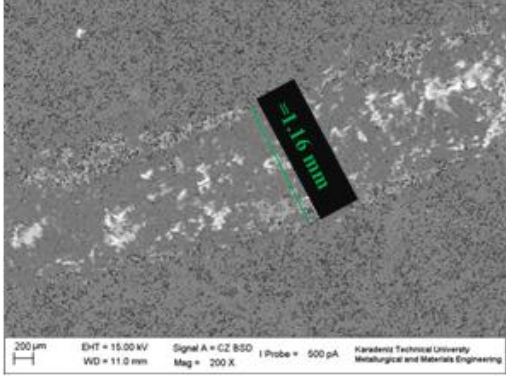
(c)



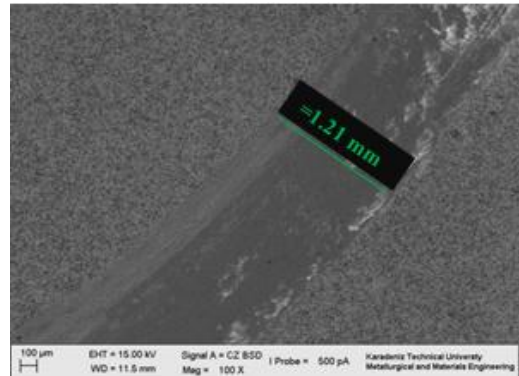
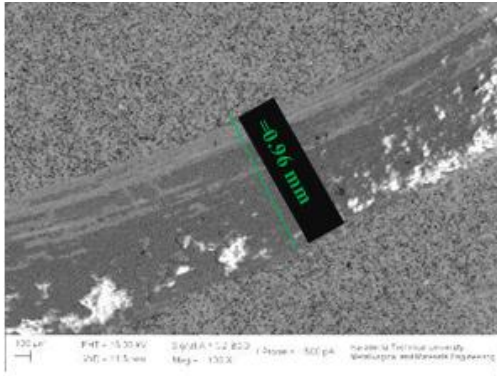
(d)

2N

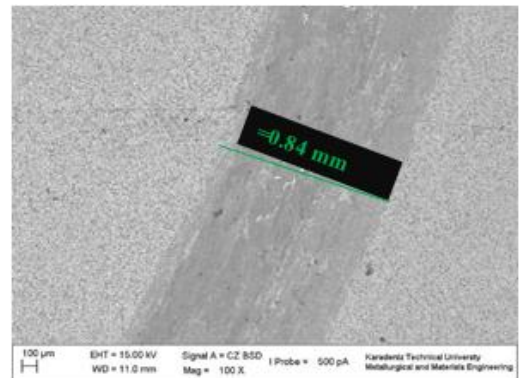
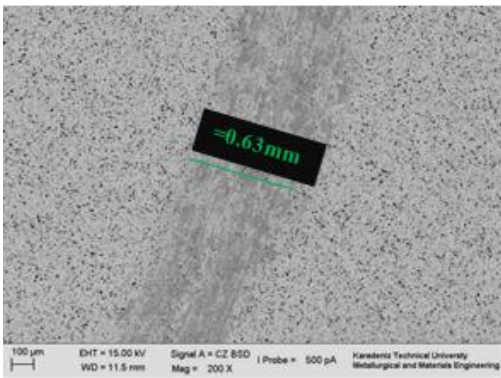
10N



(a)



(b)



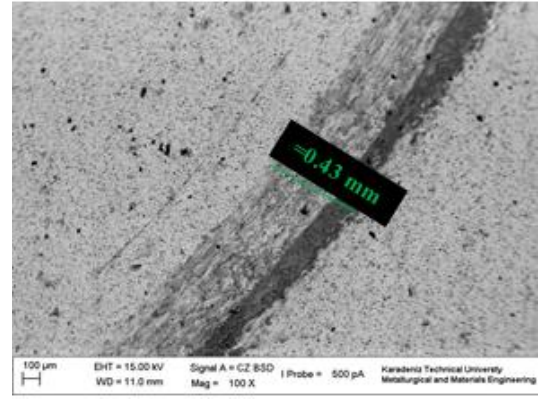
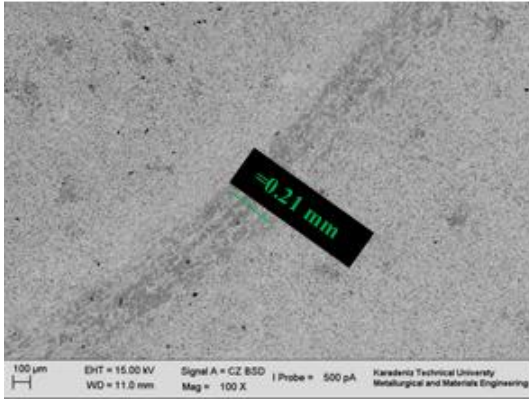
(c)

Şekil 3.19. %10 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerinin aşınma iz genişlikleri (a)0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler

Şekil 3.19'un devamı

2N

10N



(d)

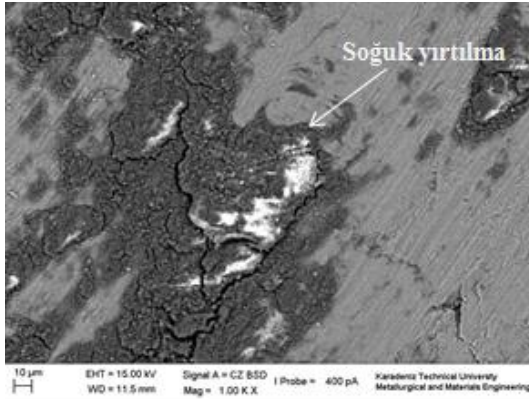
### 3.3.3. Aşınma İzlerinin İncelenmesi

Numunelerde oluşan aşınma izleri aşınma davranışını belirlemek için taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir ve aşınma izleri aşağıda görülmektedir.

#### 3.3.3.1. Alaşımın Aşınma İz Görüntüleri

2N

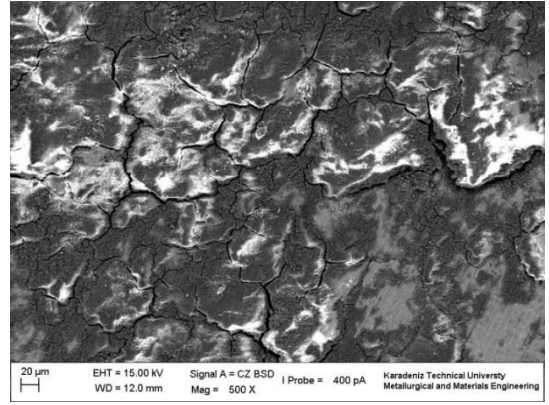
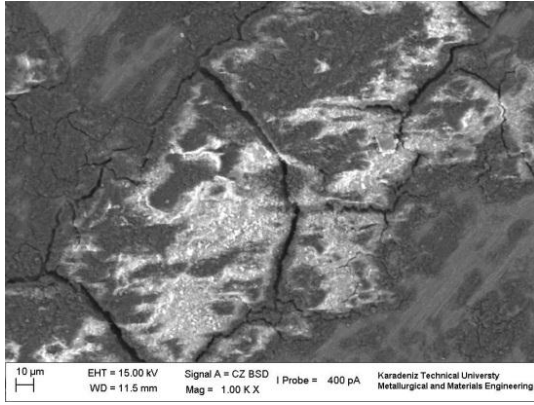
10N



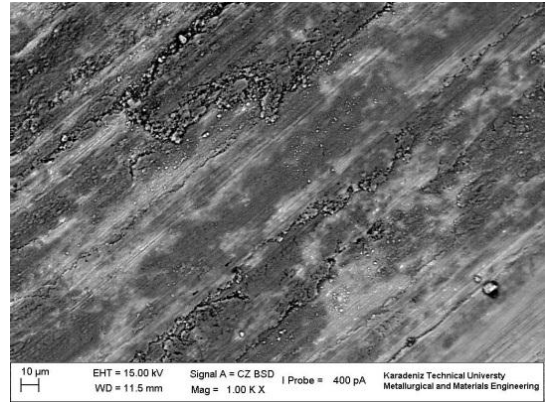
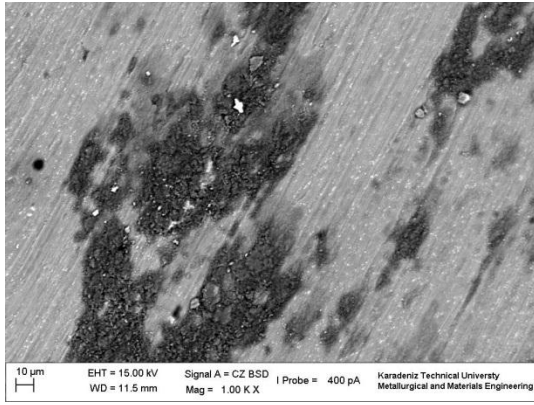
(a)

Şekil 3.20. Al2024 alaşımının 2N ve 10 N yüklerde, aşınma iz görüntüleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler

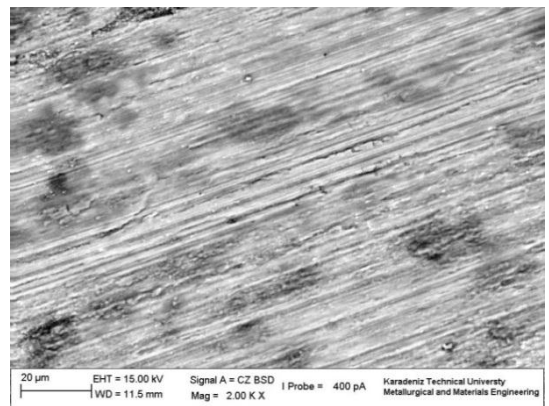
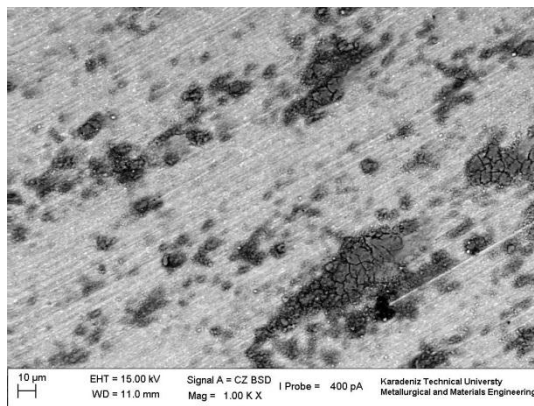
Şekil 3.20'nin devamı



(b)



(c)



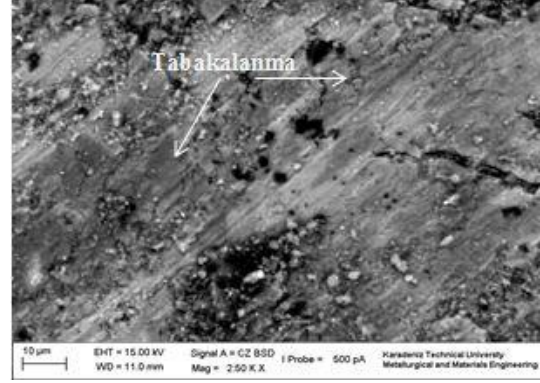
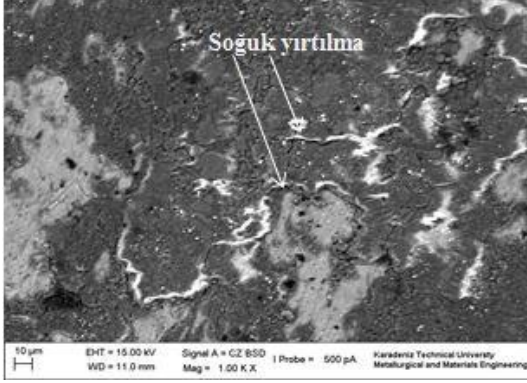
(d)



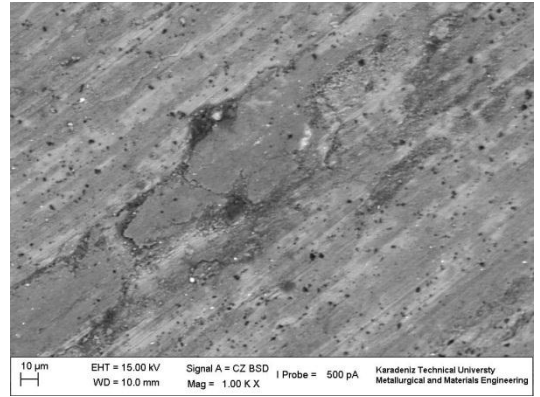
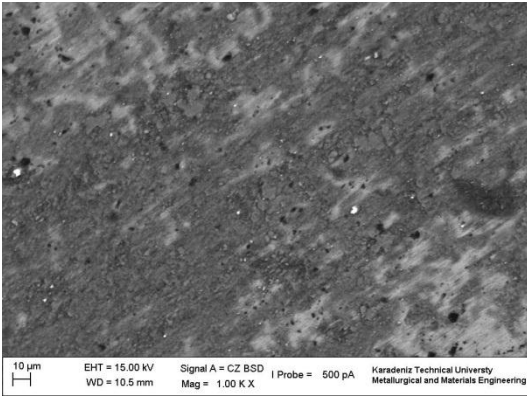
### 3.3.3.2. AA2024-%5 B<sub>4</sub>C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri

2N

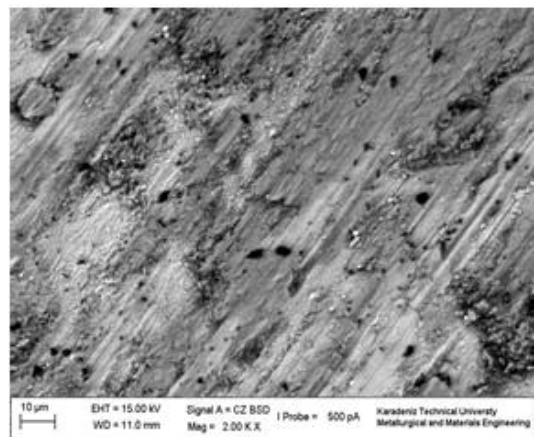
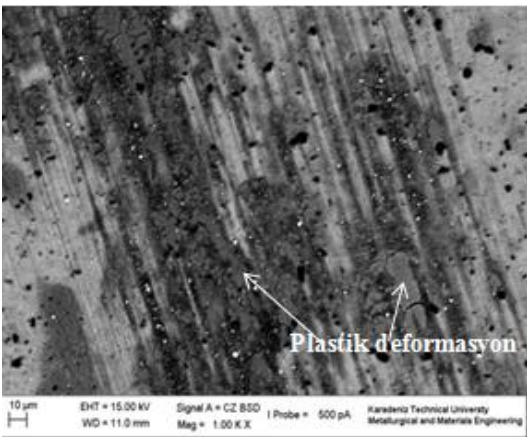
10N



(a)



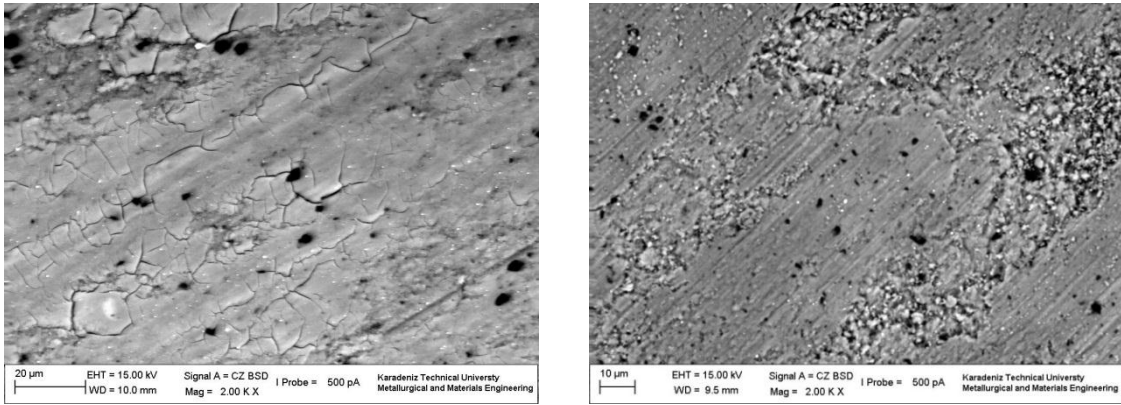
(b)



(c)

Şekil 3.21. AA2024-%5 B<sub>4</sub>C kompozitinin 2N ve 10N yüklerde aşınma iz görüntüleri  
(a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütülmüş numuneler

Şekil 3.21'in devamı

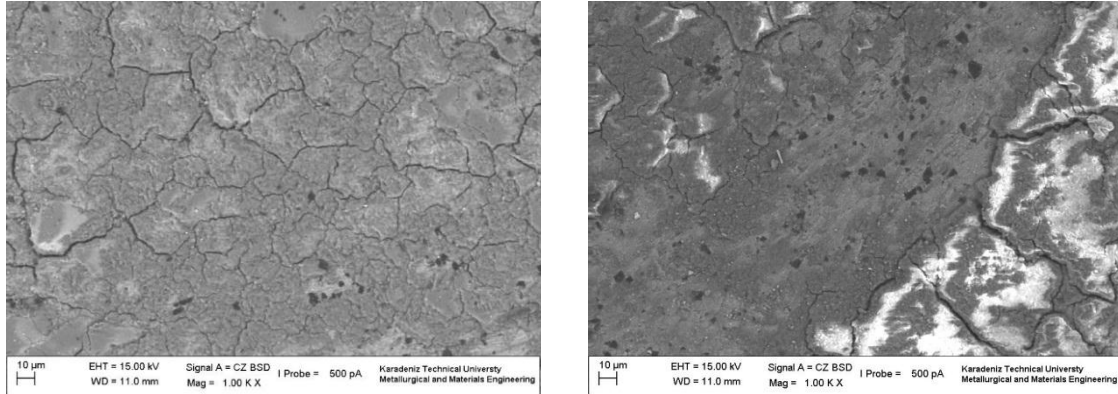


(d)

### 3.3.3.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%10 B<sub>4</sub>C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri

2N

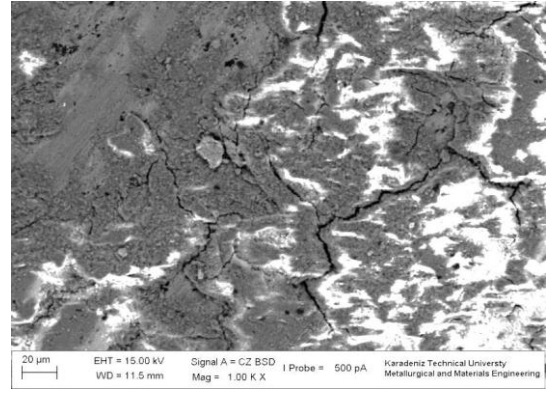
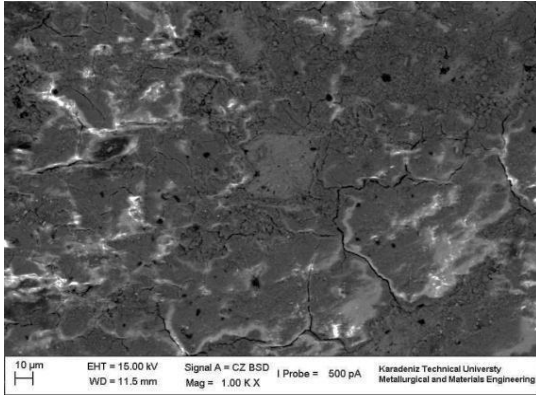
10N



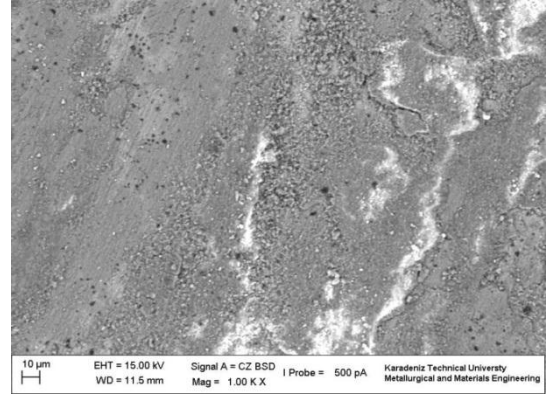
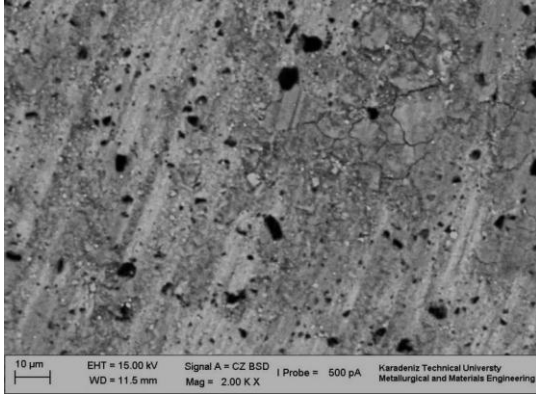
(a)

Şekil 3.22. AA2024-%10 B<sub>4</sub>C kompozitinin 2N ve 10N yüklerde aşınma iz görüntüleri (a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütme süresine sahip numuneler

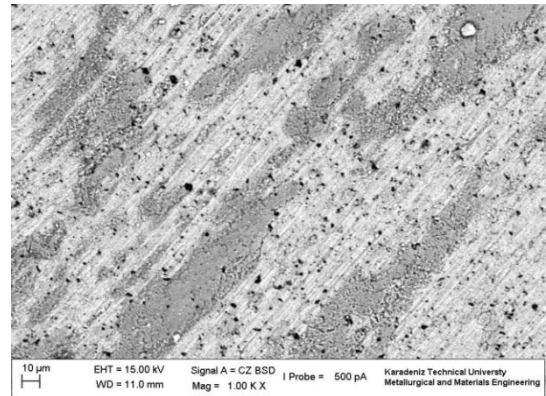
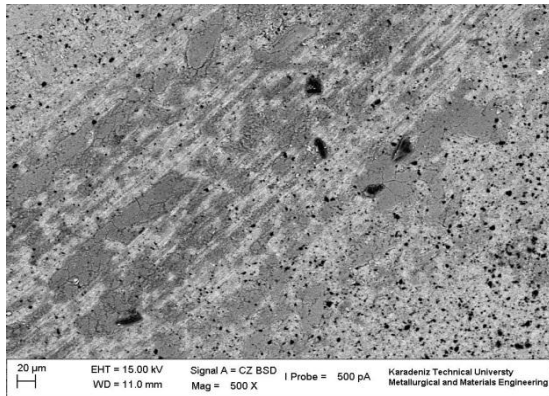
Şekil 3.22'nin devamı



(b)



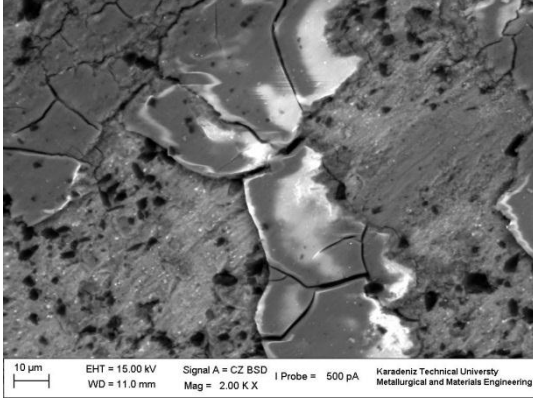
(c)



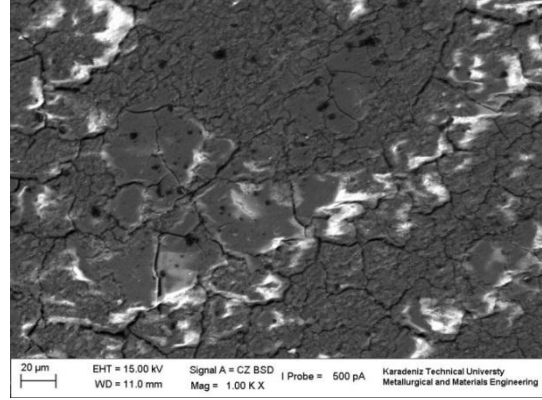
(d)

### 3.3.3.4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%15 B<sub>4</sub>C Kompozitinin Aşınma İz Görüntüleri

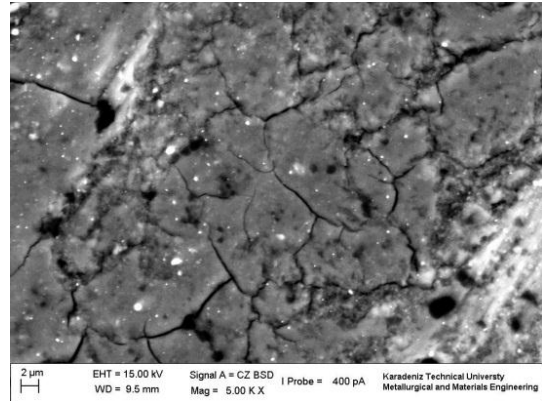
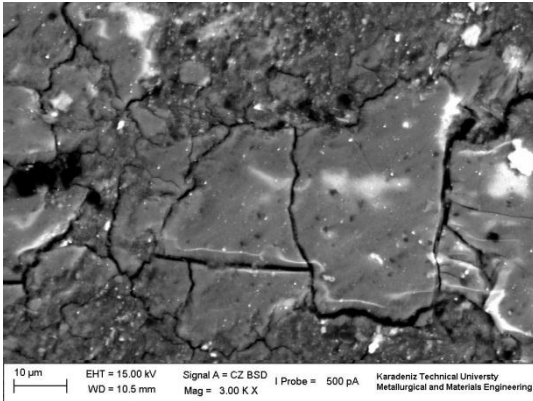
2N



10N



(a)



(b)

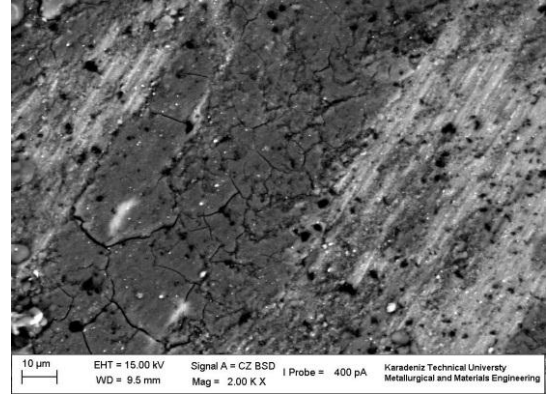
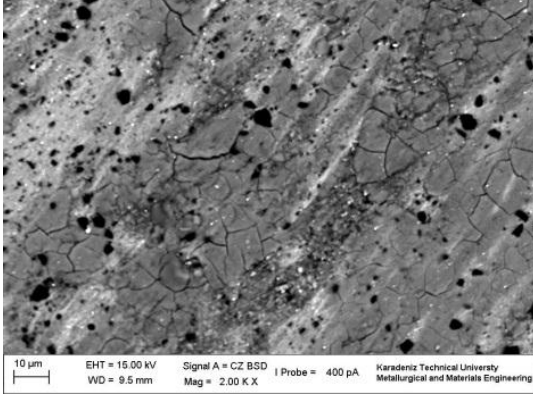
Şekil 3.23. AA2024-%10 B<sub>4</sub>C kompozitinin 2N ve 10N yüklerde aşınma iz görüntüleri  
(a) 0 saat, (b) 1 saat, (c) 10 saat, (d) 25 saat öğütme süresine sahip numuneler



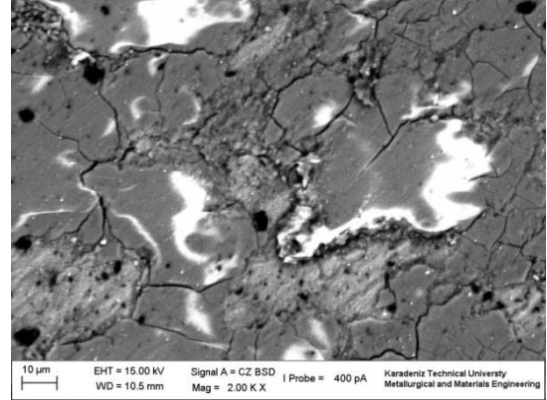
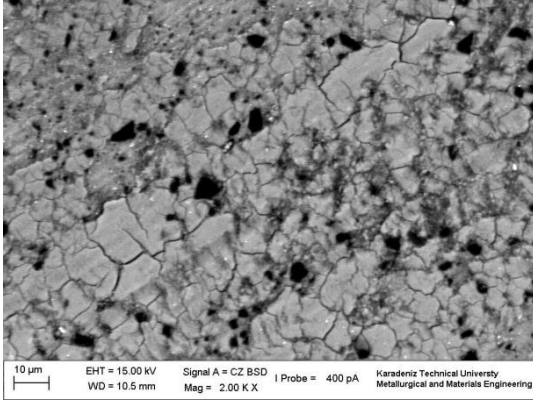
Şekil 3.23'ün devamı

2N

10N



(c)



(d)

Aşınma yüzeyleri incelendiğinde, tüm aşınma yüzeylerinde aşınma yönüyle aynı doğrultuda aşınma izleri görülmüştür. Yüksek büyütmelemede yapılan incelemelerde aşınma yüzeylerinde tabakalanmalar, plastik deformasyonlar, kopan ve kopmak üzere olan partiküller, çatlaklar ve adhere olmuş partiküller görülmüştür. Düşük yüklerde tabakalanma ve soğuk yırtılmalar daha fazla görülmektedir. Bunun sebebi, düşük yüklerde yapılan deneylerde, numune yüzeyinden kopan partiküllerin ortamdaki uzaklaştırılmaması sonucunda, devam eden deney süresince numune yüzeyine kısmen yapışmış olmasıdır. Büyük yüklerde ise aslında daha fazla partikül kopmuş olmasına rağmen, kopan partiküller daha kuvvetli bir şekilde yüzeye tekrardan yapışmış ve soğuk kaynak olmuştur. Yani aslında malzeme yüzeyinden kopan partikül miktarı ile ağırlık kaybı miktarı eşit değildir.

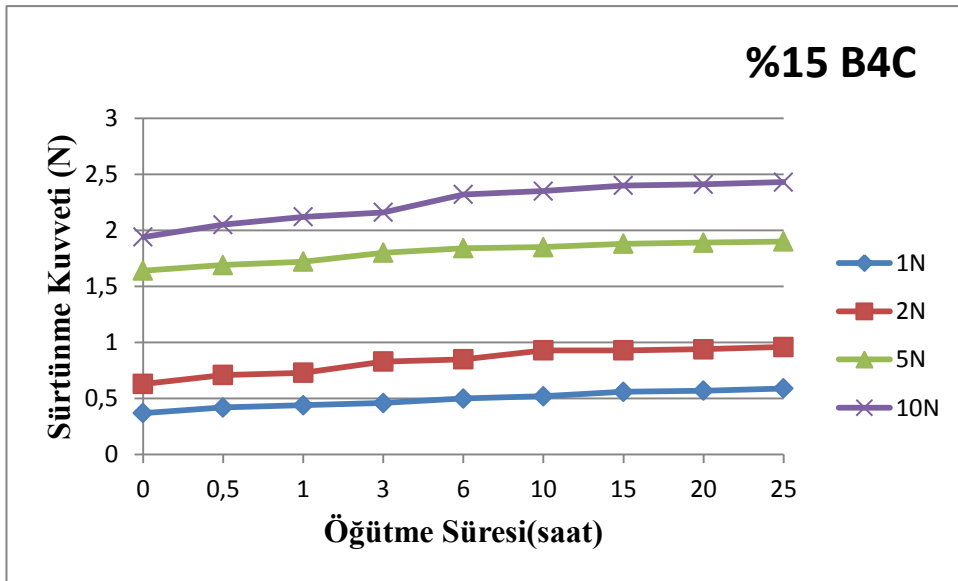
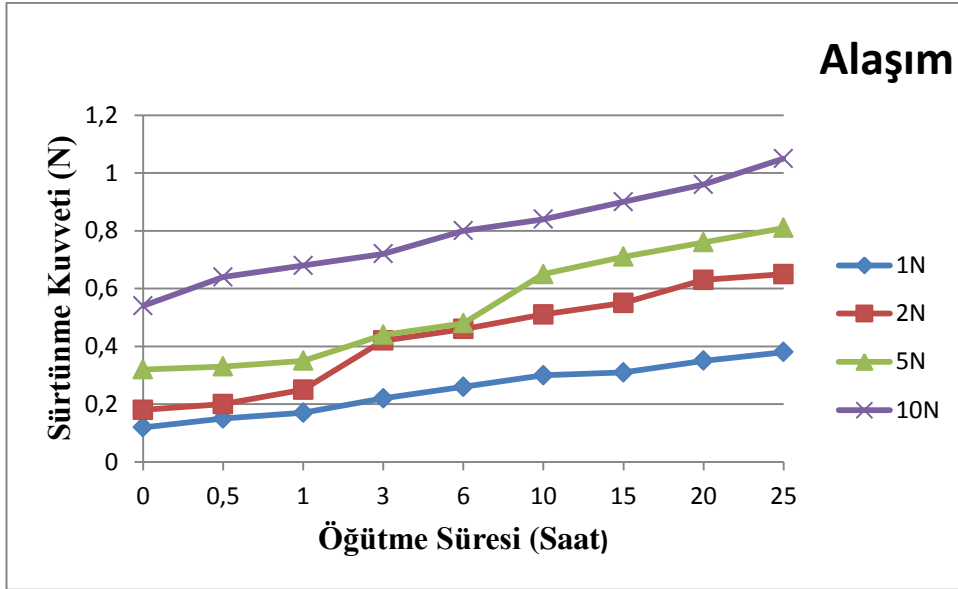
Yine aynı şekilde büyük yüklerde yapılan deneylerde, yüzey daha pürüzsüz daha az çıkıntılı görünmektedir. Bunun nedeni de artan yük miktarı ile sürekli uygulanan yükün yüzeyde düzleşme yapması ve kopan partikülleri bir nevi yama yapıyor olmasıdır.

### 3.3.4. Sürtünme Kuvvetlerinin İncelenmesi

Farklı öğütme süreleri ve farklı takviye oranlarına sahip kompozitlere uygulanan aşınma testleri sonucunda elde edilen ortalama sürtünme kuvveti değerleri Tablo 3.3'de görülmektedir. Tablodan görüldüğü gibi, artan öğütme süresi ve takviye oranı ile birlikte sürtünme kuvveti değerleri artmıştır.

Tablo 3.3. Ortalama Sürtünme Kuvveti

		Öğütme Süresi(saat)	0	0.5	1	3	6	10	15	20	25
		Ortalama Sürtünme Kuvveti (N)									
Alaşım	1N	0,12	0,15	0,17	0,22	0,26	0,30	0,31	0,35	0,38	
	2N	0,18	0,20	0,25	0,42	0,46	0,51	0,55	0,63	0,65	
	5N	0,32	0,33	0,35	0,44	0,48	0,65	0,71	0,76	0,81	
	10N	0,54	0,64	0,68	0,72	0,80	0,84	0,90	0,96	1,05	
%5 B4c	1N	0,17	0,28	0,33	0,34	0,37	0,42	0,44	0,44	0,46	
	2N	0,34	0,38	0,42	0,45	0,48	0,54	0,55	0,57	0,61	
	5N	0,48	0,62	0,75	0,81	0,92	0,96	1,14	1,19	1,30	
	10N	0,80	0,85	0,92	0,96	1,06	1,15	1,24	1,32	1,34	
%10 B4C	1N	0,21	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	
	2N	0,60	0,64	0,65	0,66	0,70	0,72	0,76	0,76	0,80	
	5N	1,1	1,14	1,25	1,26	1,34	1,40	1,42	1,45	1,46	
	10N	1,42	1,54	1,56	1,60	1,65	1,67	1,70	1,72	1,76	
%15 B4C	1N	0,47	0,62	0,68	0,76	0,80	0,82	0,86	0,87	0,95	
	2N	0,63	0,71	0,73	0,83	0,85	0,93	0,93	0,94	0,96	
	5N	1,64	1,69	1,72	1,80	1,84	1,85	1,88	1,89	1,90	
	10N	1,94	2,05	2,12	2,16	2,32	2,35	2,4	2,41	2,43	



Şekil 3.24. Ortalama sürtünme kuvvetleri grafiği

#### 4.İRDELEME

Üretilen tozların morfolojileri incelendiğinde elde edilen toz morfolojilerinin mekanik alaşımlama sistemindeki sünek-gevrek bileşimin karakteristiği ile aynı olduğu görülmektedir.. Öğütmenin ilk saatlerinde ulaşılan pulsu yapı devam eden öğütme süresince soğuk kaynak ve kırılma mekanizmaları etkisiyle 25 saatlik öğütme sonunda kararlı hale ulaşılmıştır. Takviye partiküllerinin, toz morfolojisine iki temel etkisi olmuştur bunlar matris malzemesine gömülme ve kırılma davranışını kolaylaştırmaktır [1-3]. Matris alaşımına göre oldukça sert olan takviye partiküllerinin öğütme işlemi sırasında sürekli olarak matris partiküllerle etkileşim halinde olması sert B<sub>4</sub>C partiküllerinin öğütücü bilyalar gibi öğütmeye yardımcı bir eleman gibi davranış göstermesine neden olmuştur [35]. Başka bir deyişle, sünek-gevrek sistemde sert partikül miktarı ne kadar fazla olursa mekanik alaşımlama ve öğütme işlemleri o oranda etkili olmakta ve bunun sonucu olarak kararlı hal şartlarına daha erken ulaşılmaktadır. Bu doğrultuda farklı takviye oranlarındaki kompozitlerin aynı öğütme süresindeki toz boyutları incelendiğinde ise artan takviye oranıyla birlikte partikül boyutlarının azaldığı görülmüştür. Başlangıç tozlarının ortalama partikül boyutu 25µm iken öğütme işleminin sonunda %15 takviye oranına sahip kompozitlerde 89nm'lik toz boyutuna ulaşılmıştır. Yani mekanik alaşımlama ve öğütme işlemleriyle nano boyutlu kompozit tozları üretilmiştir.

Toz sertlikleri incelendiğinde artan öğütme süresi ve takviye oranıyla birlikte partikül sertliğinin önemli derecede artış gösterdiği görülmüştür. Bunun temel olarak iki sebebi vardır, birincisi ortamdaki sert partikül miktarının artması ve matris faza gömülmesiyle birlikte sertliğin doğrudan artışıdır [14-15]. Diğeri ise, sürekli deformasyon etkisi altında olan tozların deformasyon sertleşmesi mekanizmasıyla birlikte dahada sertleşmesidir.

Preslenen numunelerden alınan SEM görüntülerinde, öğütme süresine bağlı olarak partikül dağılımı görülmektedir. Başlangıç saatlerinde aglomere olmuş şekilde görülen B<sub>4</sub>C partikülleri, artan öğütme süresi ile matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmakta ve topaklanmalar ortadan kaldırılmaktadır. Geleneksel toz metalurjisi yönteminin en önemli dezavantajı olan aglomerasyonlar iç yapı görüntülerinde görüldüğü gibi mekanik alaşımlama yöntemi ile ortadan kaldırılmıştır.

Kompozit yoğunlukları incelendiğinde, artan takviye miktarıyla birlikte porozite miktarının arttığı ve bağıl yoğunluk miktarının azaldığı görülmüştür. Artan takviye miktarı, tozların paketlenme kabiliyetini düşürerek porozitenin artmasına sebep olmuştur. Yoğunluğu

etkileyen bir diğ er parametrenin de öğütme süresi olduğ u grafiklerden açıkca görölmektedir. Yukarıda bahsedildiğ i üzere artan öğütme süresiyle hem toz morfolojisi değ işmekte hem de toz sertliğ i önemli ölçüde artmaktadır. Toz sertliğ inin artması, tozların birbiri üzerinden kaymasını zorlaştırmıştır dolayısıyla paketlenme kabiliyetini de olumsuz yönde etkilemiştir [20]. Sıkıştırma yöntemi olarak seçilen sıcak presleme yöntemi ile elde edilen en yüksek bağı l yoğunluk değerleri % 99 değerine yaklaştırmıştır. Geleneksel sıkıştırma ve presleme yöntemi ile toz metalurjisi ürünlerde bu değerlere çıkmak oldukça zordur.

Kompozitin sertliğ i ise, partikül sertliğ inde olduğ u gibi artan öğütme süresi ve artan takviye miktarıyla orantılı olarak artış göstermiştir. Birim alana düş en sert parçacık sayısının daha fazla olması ve öğütme sonucu oluş an deformasyon sertleşmesi sertlik artışının temel nedenleridir [22].

Çekme mukavemeti değerleri incelendiğ inde, %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin çekme mukavemetinin, %5 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitten ve alaşımdan daha yüksek olduğ u, % 15 parçacık oranında ise artan porozite ve topaklanma nedeniyle çekme mukavemeti değerinin minimum değerde olduğ u görölmüştür. Artan öğütme süresiyle birlikte, toz boyutundaki azalma Hall-Petch bağıntısında ifade edildiğ i gibi kompozitlerin çekme mukavemetini bir miktar arttırmıştır. Ancak nano kristalin malzemeler kritik bir tane boyutuna kadar Hall-Petch bağıntısına uygun davranış sergilerler. Bu kritik değerin altında, sertlik ve mukavemet değerleri ile tane boyutu arasında ters bir ilişki vardır. Tane boyutu azaldıkça sertlik ve mukavemet değerleri de azalır [57]. Nanokristalin malzemelerin deformasyon mekanizmaları geleneksel kristal yapılı malzemelerden daha farklıdır. Yapılan çalışmalarda, bazı durumlarda malzemenin sertliğ inin tane boyutunun karesiyle ters orantılı olduğ u görölsede bazı durumlarda ise tane boyutuyla lineer bir orantı olduğ u görölmüştür [55]. Kırılma yüzeyleri incelendiğ inde öğütmenin ilk saatlerinde görölen lifsi yapıların, artan öğütme süresiyle birlikte kaybolduğ u ve yerini düzleşmiş, daha pürüzsüz bir kırılma yüzeyine bıraktığ u görölmektedir. Lifsi yapıdan, daha az pürüzlü yapıya doç ru olan bu geçiş sünek davranıştan gevrek davranışa doç ru bir geçiş olduğ unu göstermektedir. Çekme mukavemeti değerinin en yüksek olduğ u %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin kırılma yüzeyi incelendiğ inde, B<sub>4</sub>C partiküllerinin oyuklaşmaların içinde olduğ u ve homojen olarak dağ ıldığ u görölmektedir. Yani takviye partikülleri matris fazı tarafından sarılmış ve kopma esnasında matris faz ile takviye faz arasındaki bağ , çekme mukavemetini arttırıcı yönde etki yapmıştır. %15 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin kırılma yüzeyleri, incelendiğ inde ise oyuklanmaların daha büyük olduğ u ve oyuklanma bölgelerinde yüksek oranda topaklanma

olduğu görülmüştür. Yani %15 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitte matris ve takviye partiküllerinin oluşturduğu bağlar, topaklanmalar nedeniyle gcsz kalmıştır [27]. Dolayısıyla çekme mukavemetleri de düşmüştür.

Kompozitlerin aşınma davranışları incelendiğinde, artan öğütme süresi ve takviye miktarı ile aşınma sonucunda meydana gelen ağırlık kayıplarının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi artan öğütme süresi ve takviye miktarı ile kompozitin sertliğinin artmasıdır. Çünkü malzemenin sertliği ne kadar fazla olursa aşınma miktarı o kadar azalır [27]. Artan yük ile birlikte ağırlık kayıpları ve aşınma iz genişlikleri artmıştır ancak şunu da belirtmekte fayda vardır ki bu ağırlık kaybı malzeme yüzeyinden koparılan malzeme miktarından daha az ölçülmüştür, çünkü sürekli olarak devam eden deney süresince kopan partiküller aşınma yüzeyine tekrar soğuk kaynak olmuştur.

Ortalama sürtünme kuvvetleri değerleri incelendiğinde ise, artan öğütme süresi ve takviye oranıyla birlikte sürtünme katsayılarında artış gözlenmiştir. Bunun nedeni, artan takviye miktarının numuneyi sertleştirmesi ve aşınma sırasında, B<sub>4</sub>C partiküllerinin numunede tepe bölgeleri oluşturmasıdır. Yani B<sub>4</sub>C partikülleri aşındırılmadığı için, numunenin pürüzlülüğünü arttırmıştır dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü ile ilişkili olarak değişen sürtünme kuvvetleri de artmıştır.

## 5.SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

1- Morfolojik incelemeler sonucunda sünek-gevrek bileşimde (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C), 0-1 saat aralığında soğuk kaynak, 1-15 saat aralığında kırılma ve soğuk kaynak görülmüş ve 20-25 saat aralıklarında ise kararlı hal aşamasına ulaşılmıştır.

2- Başlangıç saatlerinde yapıdan bağımsız olan B<sub>4</sub>C partikülleri, 3 saatlik öğütme süresinden sonra matris faza gömülmüştür.

3- 25 saatlik öğütme süresi sonucunda kararlı toz boyutlarına ulaşılmıştır. Elde edilen en düşük partikül boyutu 89nm'dir. Artan öğütme süresi ve partikül miktarı ile partikül boyutu azalmıştır.

4- Toz sertlikleri artan öğütme süresi ve takviye miktarı ile artmıştır.

5- Artan öğütme süresi ile birlikte takviye partikülleri yapıya daha homojen olarak dağılmıştır.

6-Yoğunluk değerleri artan öğütme süresi, artan takviye oranı ile azalmıştır. Artan öğütme süresi toz partiküllerinin homojen dağılmasını sağlamasına rağmen tozların sertliğini arttırmıştır. Artan toz sertliği paketlenme kabiliyetini olumsuz yönde etkileyerek yoğunluk değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Elde edilen en yüksek bağıl yoğunluk, %99,32 değerindedir.

7- Sıcak presleme ilde elde edilen yoğunluk değerleri, soğuk presleme ile elde edilebilen değerlerden oldukça yüksektir.

8-En yüksek çekme mukavemeti değeri, %10 B<sub>4</sub>C takviyeli, 6 saat öğütülmüş numunede elde edilmiştir. Bu değer 332 MPa'dır ve döküm yöntemi ile üretilen alaşımın iki katı kadardır.

9- Artan öğütme süresi ve takviye miktarı ile aşınma sırasında meydana gelen ağırlık kaybı miktarı azalmıştır. En az ağırlık kaybı %15 B<sub>4</sub>C takviyeli, 25 saat öğütülmüş numunede meydana gelmiştir.

10-Artan yük ile birlikte aşınma sırasında ağırlık kaybı artmıştır.

11- Artan yük miktarı ve takviye oranıyla birlikte sürtünme kuvvetleri artmıştır.

## **6.ÖNERİLER**

1-Üretilen kompozitlere gerilme giderme tavlaması yapılarak, deformasyon sertleşmesinin olumsuz etkileri giderilebilir.

2-Kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında daha iyi bilgi sahibi olabilmek için basma ve eğme deneyleri yapılabilir.

3-Kompozitlere yaşlandırma ısıl işlemi yapılarak, mekanik özellikleri iyileştirilebilir.



## 7.KAYNAKLAR

1. Varol T., Canakci A., Effect of particle size and ratio of B<sub>4</sub>C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C composite powders, Powder Technology 246, 462–472, 2013.
2. A. Alizadeh, E. Taheri-Nassaj, Mechanical properties and wear behavior of Al–2 wt.% Cu alloy composites reinforced by B<sub>4</sub>C nanoparticles and fabricated by mechanical milling and hot extrusion Materials characterization 67, 119-128 , 2012.
3. Al/ TiC Metal Matriksli Nano Kompozitlerin Sıcak Pres Yöntemiyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Burak DİKİCİ, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2008 Doktora Tezi, Erzurum 2008
4. Ramazan Dalmış, Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Nano-Parçacık Takviyeli Zn-Al Esaslı Nano-Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, İÇyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
5. Çanakçı, A. ve Varol, T., Aşamalı İşlem Kontrol Katkısı Tekniğinin Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Üzerine Etkisi, 1. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, Haziran 2011, İstanbul Bildiriler Kitabı, 8-16.
6. Mertgenç E., Savurmalı Döküm Yöntemiyle Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimini Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2004.
7. 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
8. Tekmen Ç., 2006, Metal Matrisli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
9. Ma, G.F., Zhang, H.F., Li, H. ve Hu, Z.Q., Wetting behavior of CuZr-based BMGs/alumina system, Journal of Alloys and Compounds, 462, 343–346, 2008.
10. Liu, G.W., Muolo, M.L., Valenza, F. ve Passerone, A., Survey on wetting of SiC by molten metals, Ceramics International, 36, 1177–1188, 2010.
11. Sanghaleh, A. ve Halali, M., Effect of magnesium addition on the wetting of alumina by aluminium, Applied Surface Science, 255, 8202–8206, 2009.
12. Huda 1995; Huda, M.D., Hashmi, M.S.J., and El-Baradie M.A., MMCs: Materials, manufacturing and mechanical properties. Key Engineering Materials, 104-107, 1995.
13. Cocen, U., Onel, K., The production of Al-Si alloy-SiCp composites via compocasting some microstructural aspects. Materials Science and Engineering, A221, 187-191, 1996

14. Salvo, L., and Suery, M., Legoux, J.G., and l'Esperance, G., Influence of particle oxidation on age-hardening behaviour of as-fabricated and remelted SiC reinforced Al- 1%Mg alloys. *Materials Science and Engineering*, A135, 129-133, 1991.
15. Burak Dikici, Al/TiC Metal Matriksli Nano Kompozitlerin Sıcak Pres Yöntemiyle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi,2008.
16. Trowsdale, A.J., Noble, B., Haris, S.J., Gibbins, I.S.R., Thompson, G.E., and Wood G.C., The influence of silicon carbide reinforcement on the pitting behaviour of aluminium. *Corrosion Science*, 38,177-191., 1996.
17. Yaghmaee, M.S., and Kaptay, G., On the stability range of SiC in ternary liquid Al-Si-Mg alloy. *Materials Worlds, Proceeding of Hungarian Materials Science Society*, e-journal:http://materialworld.fw.hu, ,2001.
18. Tham, L.M., Gupta, M., and Cheng, L., 2001. Effect of limited matrix–reinforcement interfacial reaction on enhancing the mechanical properties of aluminium–silicon carbide composites. *Acta Materialia*, 49, 3243-3253, 2001.
19. Zhang X.P., Ye L., Mai Y.W., Quan G.F. ve Wei W., Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC., *Composites: Part A*, 30, 1415-1421., 1999.
20. Filiz Kumdalı, Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi,2008.
21. Sur G., “Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
22. Özgün, E.C., “Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Sentezlenen Al-TiC ve Al-Ti-C Toz ve Sinter Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
23. Clyne,T.W., Withers, “An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University pres, USA, 1993.
24. Güneş Kılıçarslan, Alüminyum Matrisli Alümina Seramik Takviyeli Kompozit Malzemelerin Zırh Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2011.
25. Can Güler, Alüminyum Matrisli Sic Takviyeli Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
26. M. Sherif El-Eskandarany, Mechanical solid state mixing for synthesizing of SiC /Al nanocomposites, *Journal of Alloys and Compounds* 279, 263–271, 1998.
27. Fatih Toptan, Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi, Doktora Tezi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı ,Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012.

28. 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-0.5 Ag Squeeze-Cast Composites, Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
29. Froyen, L. ve Verlinden, B., Aluminium Matrix Composites Materials, TALAT Lecture 1402, EAA European Aluminum Association, University of Leuven,Belgium, 1994.
30. Rooy, E.L., "Introduction to aluminum and aluminum alloys", ASM Metals Handbook, Vol. 2, 10. Baskı, ASM International, Metals Park, Ohio, 3–14,1990.
31. 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, 97,23-32, 1995.
32. Burgucu, S., "7075 Alüminyum Alaşımlarının Üretimi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28-39., 2011.
33. Deschams, A., Dumont, D., Brechet, Y., Siğli, C. ve Dubost, B., Process modeling of age-hardening aluminum alloys from microstructure evolution to mechanical and fracture properties, ASM International, Materials Park, OH, 298-305,2001.
34. Cihad Nazik, Alüminyum Matrisli B4c Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya,2013.
35. Temel Varol, AA2024 Matrisli B<sub>4</sub>C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Trabzon, 2012.
36. Taha Alper Yılmaz AA 2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrisli Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretimi ve Yaşlandırılabilme Özelliklerinin Araştırılması, Metal Eğitimi,Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.
37. Durmuş, S., Akgün, S. ve Şahin, S., "Çökeltme Sertleştirilmesi uygulanmış AA 7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikroyapı ile Değişiminin İncelenmesi", 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük,2009.
38. Kerti, I.Ç.,Gaz Enjeksiyon ve Elementel Karbon İlavesi Yöntemleri ile TiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
39. Mindivan, H., Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2007.
40. 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, 436:375- 382.,2007.

41. Ümmügül Çavuşoğlu, 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.
42. Metin Önal, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ve TiC İçeren Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı ,Erzurum ,2010.
43. Can Güler, Alüminyum Matrisli Sic Takviyeli Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 2012.
44. Ufuk Taşçı, AA2014-B<sub>4</sub>C Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi Ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilebilirliği, Karakterizasyonu Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi ,Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
45. Akdoğan A., Küçükyıldırım B.O., “Nanomalzemeler ve Uygulamaları,” MakinaTek, sayı 99, s.114-117, 2006
46. Kucukyildirim B.O., Akdogan Eker A., A Novel Technique for Carbon Nanotube Reinforced Metal Matrix Composite Fabrication, Academic Journal of Science, 1, s.171-181., 2012.
47. Goldstain, A., Handbook of Nanophase Materials, Marcel Dekker Inc, New York., 1997.
48. Sergeev, B. E., 2006, Nanochemistry, Elsevier ,B. V., Amsterdam, Netherlands.
49. Wang, Z. H., Choi, C. J. Kim, B. K., Kim J. C. and Zhang Z. D., Characterization of Fe-Co alloyed nanoparticles synthesized by chemical vapor condensation, Materials Letters, 57, 3560-3564, 2003.
50. Bernard, K. and Ganesh. S., 1998. Nanostructured Bulk Materials: Synthesis, Processing, Properties and Performance.
51. S.K.Mukherje, G.S.Upadhyaya, “Effect Of Milling Variables on Powder Character and Sintering Behavior of 434L Ferritic Stainless Steel-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites” Inter. J of Pow. Metall. 19, 1983.
52. S.Lal, G.S.Upadhyaya, “Modern development in powder metallurgy.” Vol 18, 1988.
53. S.N.Patankar, M.J.Tan, “Role of reinforcement in sintering of SiC/316L stainless steel composite”, Powder Metal. 43(4., 2000.
54. Y. Ziya KAYIR, Etem G. BAÇÇIL, “Nanoteknoloji nedir?”, 15. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2010.
55. C. Suryanarayana ,Nasser Al-Aqeeli, Mechanically alloyed nanocomposites, Progress in Materials Science 46 (2001. 1-184.
56. Hellstern, E., Fecht, H. J., Garland, C., Johnson, W. L., In: McCandlish, L. E., Polk, D. E., Siegel, R. W., Kear, B. H., eds. Multicomponent Ultrafine Microstructures. Vol. 132. Pittsburgh, PA: Mater. Res. Soc. pp. 137–142., 1989.

57. C. Suryanarayana, Mechanical Alloying and Milling, ISBN: 0-8247-4103-X, New York, 2004
58. Kevin, M., 1997. Gas Phase Synthesis. <http://www.rpi.edu/dept/materials/COURSES/NANO/moraes/page2.html>, 2007.
59. Markus, W. 2007. Nanoparticles Process Technoogy. [http://www.uni-duisburg-essen.de/ivg/nano/synthesis\\_nppt.shtml](http://www.uni-duisburg-essen.de/ivg/nano/synthesis_nppt.shtml), 2007.
60. Zaki, A. Processing and Synthesis Techniques for the Preparation of Nanomaterials. <http://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=1710> , 2007.
61. Wang, Z. H., Choi, C. J. Kim, B. K., Kim J. C. and Zhang Z. D., 2003. Microstructure and magnetic property of Fe-Co nanoparticles prepared by chemical vapor condensation process, *J. of All. And Comp.*, 351, 319-323.
62. Jang, H. D., Hwang, D. W., Kim, D. P., Kim, H. C., Lee, B. Y. and Jeong, I. B., Preparation of cobalt nanoparticles by hydrogen reduction of cobalt chloride in the gas phase, *Mater. Res. Bull.*, 39, 63-70, 2004.
63. Bernard, K. and Ganesh. S., Nanostructured Bulk Materials: Synthesis, Processing, Properties and Performance. <http://www.wtec.org/loyolaano/US.Review/05-02.html>
64. Swihart, M. T., Vapor-phase synthesis of nanoparticles, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 8, 127-133, 2003.
65. Liveri, V. T., Controlled Synthesis of Nanoparticles in Microheterogeneous Systems, Springer Science+Business Media, Inc., New York, 2006.
66. Roth, P., 2007. Particle synthesis in flames, *Proceedings of Combustion Institute*, 31, 1773-1788.
67. Niihara, K. *J. Ceram. Soc. Jpn.* 99:974–982, 1991.
68. Bhaduri, S., Bhaduri, S. B., *JOM* 50(1):44–51.1998.
69. Morris, D. G., *Mechanical Behavior of Nanostructured Materials*. Zurich: TransTech, 1998.
70. Suryanarayana, C., *Int. J. Non-Eqm. Process.* 11:325–345, 2002.
71. Suryanarayana, C., Korth, G. E., Froes, F. H. *Metall. Mater. Trans.* 28A:293–302, 1997.
72. Siegel, R. W., In: Wolf, D., Yip, S., eds. *Materials Interfaces: Atomic Level Structure and Properties*. London: Chapman & Hall, pp. 431–460, 1992.
73. Sedat Tomruk, *Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmiş AA2014 Alüminyum Alaşımının Mikroyapısal Karakterizasyonu Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak 2010.

74. Söyler, A.U., Mekanik Alaşım Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
75. Palacı Y., Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
76. Filiz Kumdalı, Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmesi, Yıldız Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 2008.
77. Sağır, A., Mekanik Ekzantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1990.
78. Ekşi, A., Kurt, A.O. (1999., "Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollü Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi", 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 15-17 Eylül 1999, İstanbul, 557-563.
79. Zixiong Sun, Yonping Pu, The effects of soaking time on the grain growth, dielectric and ferroelectric properties of BaTi<sub>0.95</sub>Zr<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub> ceramics prepared by microwave sintering, Vacuum, Volume 101, Page 228-232, March 2014.
80. Kennedy, A.R. ve Brampton, B., "The Reactive Wetting and Incorporation of B<sub>4</sub>C Particles into Molten Aluminium", Scripta Materiala, 44:1077-1082, 2001.
81. Ozben, T., Kilickap, E. ve Çakır, O., "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC", Journal of Materials Processing Technology, 198:220-225, 2008.
82. Canakci, A. ve Varol, T., The Effect of Gradual Process Control Agent Technique on the Morphology of Al Powders Fabricated by High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 701-710.
83. Aktaş, H., Alüminyum Matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
84. Adamiak, M., Mechanical alloying for fabrication of aluminium matrix composite powders with Ti-Al intermetallics reinforcement, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 31, 191-196, 2008.
85. Güler, Ö., "Oksit Takviyeli Bakır Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
86. Canakci, A., Varol, T. ve Nazik, C., The Effect of amount of Methanol on the Properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Powders, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara, Bildiriler Kitabı, 122-129, 2011.
87. Cebeci, H.A., 2008, "Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2008.

88. Hunt, Jr. W. ve Herling, D.R., "Aluminum Metal Matrix Composites", *Advanced Materials & Processes*, 162, 39-42, 2004.
89. Kennedy, A.R. ve Brampton, B., "The Reactive Wetting and Incorporation of B4C Particles into Molten Aluminium", *Scripta Materiala*, 44:1077-1082, 2001.
90. Canakci, A., Arslan, F. ve Yasar, I., "Pre-treatment process of B4C particles to improve incorporation into molten AA2014 alloy", *Journal of Materials Science*, 42:9536-9542, 2007 .
91. Zhang, H., Ramesh, K. T. ve Chin, E.S.C., "High Strain Rate Response of Aluminium 6092/B4C Composites", *Materials Science and Engineering, A* 384:26- 34, 2004.
92. Mohanty, R.M., Balasubramanian, K. ve Seshadri, S.K., "Boron carbide reinforced aluminium 1100 matrix composites: Fabrication and properties", *Materials Science and Engineering, A* 498:42–52, 2008.
93. I. Topcu, H.O. Gulsoy, N. Kadioglu, A.N. Gulluoglu, Processing and mechanical properties of B4C reinforced Al matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 482 516–521, 2009.
94. Cunzhu Nie, Jiajun Gu, Junliang Liu, Di Zhang, Investigation on microstructures and interface character of B4C particles reinforced 2024Al matrix composites fabricated by mechanical alloying., *Journal of Alloys and Compounds* 454 ,118–122, 2008.
95. Feng Tang ,Xiaoling Wu, Shirong Gec, Jichun Ye a, Hua Zhuc, Masuo Hagiwara , Julie M. Schoenung, Dry sliding friction and wear properties of B4C particulate-reinforced Al-5083 matrix composites, *Wear* 264 ,555–561, 2008.
96. Akın, G., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
97. Ekici, E., Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 187, Ankara, 2012.
98. Lee, B., S., Kang, S., Low-temperature Processing of B4C-Al Composites Via Infiltration Technique, *Materials Chemistry and Physics*, 255, 67-249, 2001.
99. Tjong S.,C., Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties, *Advanced Engineering Materials*, No. 8, 2007.

## ÖZGEÇMİŞ

Serdar ÖZKAYA 1988 yılında Alanya'da doğdu. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Lisans eğitiminin ardından, ara vermeden Karadeniz Teknik Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı ve yine aynı yıl içerisinde K.T.Ü Mühendislik Fakültesi 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı ve halen bu görevi yürütmektedir. Göreve başladığı günden beri ulusal ve uluslar arası toplantılarda sunulmuş olan 15 adet bildirisi, bilimsel dergilerde yayınlanmış olan 8 tane makalesi bulunmaktadır.