

**NANO Al₂O₃ TAKVİYELİ A356 Al MATRİSLİ
NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

OĞUZHAN ÇALIŞKAN

**NANO Al₂O₃ TAKVİYELİ A356 Al MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

OĞUZHAN ÇALIŞKAN

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Aralık 2019**

Oğuzhan ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan “NANO AL₂O₃ TAKVİYELİ A356 AL MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/12/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

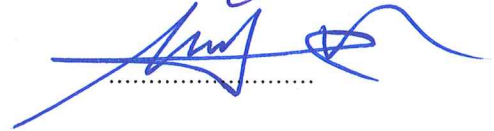
Başkan : Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE (NEÜ)



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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Oğuzhan ÇALIŞKAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO Al₂O₃ TAKVİYELİ A356 Al MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Oğuzhan ÇALIŞKAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Aralık 2019, 68 sayfa

Bu çalışmada, farklı sürelerde mekanik öğütme işlemi ile üretilen nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları incelenmiştir. İki aşamada yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında, A356 Al alaşım tozlarına bileşim (% ağı) % 1 oranda nano Al₂O₃ tozları ilave edilmiştir. Mekanik öğütme yöntemiyle farklı sürelerde (1, 2, 3, ve 4 saat) üretilmiştir. Bu aşamada, optimum öğütme süresi belirlemek amacıyla MA/MÖ yöntemi süresinin toz boyutu, sertlik, yoğunluk, mikro yapı ve aşınma davranışlarındaki etkisi incelenerek, deneysel çalışmalarda kullanılacak olan optimum MA/MÖ süresi belirlenmiştir. Aşınma testleri, 1 ms⁻¹ kayma hızında, 30 N yük altında ve dört farklı kayma mesafesinde (500, 1000, 1500 ve 2000) pin on disk cihazında yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, MA/MÖ süresi arttıkça toz boyutunda artış olduğu belirlenmiştir. Sertlik ve aşınma testleri sonucunda en yüksek değerde sertlik ve en düşük değerde ise ağırlık kaybı 1 saat mekanik öğütme yöntemi ile üretilmiş numunelerde ölçülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında, % 0,25, %0,5, % 1 ve %2 olmak üzere ayrı ayrı nano Al_2O_3 ilave edilen ve ilk aşamada belirlenen optimum mekanik öğütme süresi ile mekanik öğütülen kompozit malzemeler, 520 MPa basınç altında ön şekillendirilerek, 550 °C'de 10^{-6} milibar vakum altında sinterlenmiştir. Üretilen kompozit numunelerin aşınma davranışları incelenmiştir. A356 Al matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak nano Al_2O_3 miktarı arttıkça gözenek miktarının arttığı görülmektedir. Yapılan mikro yapı ve aşınma deneyleri sonucunda, en yüksek sertlik ve en düşük ağırlık kaybı değerini veren takviye oranı % 1 oranında ilave edilen kompozit numunelerde ölçülmüştür. En düşük sertlik değerini % 2 oranında mekanik alaşımlanan kompozitler ve en yüksek ağırlık miktarının veren % 0,25 nano Al_2O_3 ilave edilen kompozit numunelerden alınmıştır.

Anahtar Sözcükler : A356, Al_2O_3 , mekanik alaşımlama, metal matrisli kompozit, aşınma davranışları.

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AN INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOURS OF A356 Al MATRIX NANOCOMPOSITE REINFORCED BY NANO Al₂O₃

Oğuzhan ÇALIŞKAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

December 2019, 68 pages

In this study, the wear behavior of nano Al₂O₃ reinforced A356 Al matrix composite materials produced by mechanical grinding process for different periods was investigated. In the first stage of this two-step study, 1% nano Al₂O₃ powders were added to A356 Al alloy powders. It was produced in different times (1, 2, 3, and 4 hours) by mechanical grinding method. At this stage, in order to determine the optimum grinding time, the effect of the duration of the MA / MG method on the dust size, hardness, density, microstructure and wear behavior has been examined and the optimum MA / MG time to be used in the experimental studies has been determined. Abrasion tests were carried out on pin on disc device at 1 ms⁻¹ shear rate, under 30 N load and at four different shear distances (500, 1000, 1500 and 2000). As a result of the studies, it was determined that as the duration of MA / MG increases, the powder size increases. As a result of hardness and abrasion tests, the highest hardness and the lowest value weight loss were measured in samples produced by mechanical grinding method for 1 hour. In the second stage of the

study, 0,25%, 0,5%, 1% and 2% nano Al₂O₃ are added separately and the mechanical grinding composite materials with the optimum mechanical grinding time determined in the first stage are pre-shaped under 520 MPa, 550 °C in 10⁻⁶ millibars were sintered under vacuum. The wear behavior of the composite samples produced was examined. It is seen that the amount of pore increases as the amount of nano Al₂O₃ increases as a reinforcing element in A356 Al matrix composites. As a result of the microstructure and abrasion tests, the reinforcement rate, which gives the highest hardness and the lowest weight loss value, was measured in composite samples that were added at the rate of 1%. The lowest hardness value was taken from 2% mechanically alloyed composites and 0.25% nano Al₂O₃ composite samples giving the highest weight.

Key Word : A356, Al₂O₃, mechanical alloying, metal matrix composite, wear behavior.

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her safhasında desteğini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her safhasında beni destekleyen, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi Öznur DİNCEL ve ailesine teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışmasında, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonuna KBÜ-BAP-18-YL-092 numaralı proje ile desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, öğrenimim boyunca beni yalnız bırakmayan, sevgili eşim Buse ÇALIŞKAN'a göstermiş olduğu hoşgörü ve anlayışından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. GİRİŞ.....	4
2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLEŞENLERİ	5
2.2.1. Kompozit Malzemelerde Matris Malzemesi	5
2.2.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanı	5
2.2.3. Arayüzey.....	6
2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	6
2.3.1. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.3.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler	7
2.3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	8
2.3.2.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	8
2.3.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	8
2.3.2.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	8
BÖLÜM 3	10
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER MALZEMELER.....	10
3.1. GİRİŞ.....	10

3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE MATRİS MALZEMESİ.....	10
3.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Matris Malzemesi Olarak Alüminyum.....	12
3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE TAKVİYE ELEMANI	15
3.3.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanı Olarak Al ₂ O ₃	15
3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	16
3.4.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemi.....	17
3.4.2. İn-Situ Üretim Yöntemi.....	17
3.4.3. Katı Hal Üretim Yöntemi	17
3.4.3.1. Mekanik Alaşımlama / Mekanik Öğütme Yöntemi.....	18
3.5. NANO KOMPOZİTLER	21
3.5.1. Nano Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri ve Takviye Elemanları	22
3.5.2. Nano Kompozit Malzemelerde Mukavemetlendirme Mekanizmaları ...	23
3.5.2.1. Yük Transfer Etkisi.....	23
3.5.2.2. Tane Boyutu Mukavemetlenme Mekanizması	23
3.5.2.3. Termal Genleşme Katsayı Uyumsuzluğu	24
BÖLÜM 4	25
AŞINMA.....	25
4.1. AŞINMA TÜRLERİ	26
4.1.1. Adhesiv Aşınma.....	27
4.1.2. Abrasiv Aşınma	28
4.1.3. Yorulma Aşınması	29
4.1.4. Korozyon Aşınması	30
4.1.5. Erozyon Aşınması.....	30
BÖLÜM 5	31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5.1. TOZLARIN HAZIRLANMASI.....	31

	<u>Sayfa</u>
5.1.1. Nano Al ₂ O ₃ Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Üretimi	32
5.1.2. Toz Boyut Analizi.....	33
5.2. TOZ ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ	33
5.3. SİNERLEME İŞLEMİ.....	34
5.4. METALOGRAFİK İNCELEMELER İÇİN NUMUNE HAZIRLAMASI ..	36
5.5. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	36
5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	36
5.7. AŞINMA TESTLERİ.....	37
5.8. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	38
5.9. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ	39
BÖLÜM 6	40
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	40
6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	40
6.1.1. Matris Malzemesinin Mikroyapı İncelemeleri	40
6.1.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Mikroyapıya Etkisi.....	41
6.1.3. Nano Al ₂ O ₃ Miktarının Mikroyapıya Etkisi	46
6.3. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	48
6.3.1. Matris Malzemesinin Yoğunluk ve Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi ...	48
6.3.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Yoğunluk ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi	49
6.3.3. Nano Al ₂ O ₃ Miktarının Yoğunluk ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi	50
6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	51
6.4.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi	51
6.4.3. Nano Al ₂ O ₃ Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkilerinin İncelenmesi	53
BÖLÜM 7	58
SONUÇLAR	58
ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Kompozit malzeme bilşenlerinin şematik gösterimi .	5
Şekil 2. 2. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi	7
Şekil 3.1 Kompozit malzemelerde üç ayrı bölgenin şematik gösterimi; parçacık(A);,	11
Şekil 3.2. Islatılabilirlik sırasında oluşan şekil ve açılar	11
Şekil 3. 3. MA/MÖ sırasında bilye-toz-bilye çarpışması	18
Şekil 3.4. MA/MÖ sırasında başlangıç esnasında tozlarda meydana gelen.....	19
Şekil 4.1. Aşınma eğrilerinin üç tipi	25
Şekil 4. 2. Aşınma tipleri	26
Şekil 4.3. Adhesiv aşınma	27
Şekil 4.4. Adhesiv aşınmada metal transferi	28
Şekil 4.5. Abrasiv aşınma mekanizmaları; (a) iki elemanlı abrazyon, (b) üç elemanlı	28
Şekil 4.6. Yorulma aşınması .	29
Şekil 5.1. Fritsch Pulverisette marka, tek hücreli bilyeli öğütme cihazı.....	32
Şekil 5 2. Toz boyutu ölçümlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü.	33
Şekil 5.3. Soğuk presleme işleminde kullanılan kalıbın görüntüsü.	34
Şekil 5.4. Soğuk pres işleminin yapıldığı hidrolik presin görüntüsü.	34
Şekil 5.5. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtma işlem sinterleme.....	35
Şekil 5.6. Sinterleme ısıtma işleminde zaman-sıcaklık grafiği.	35
Şekil 5.7. Polisaj cihazının gösterimi.	36
Şekil 5.8. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik ölçüm cihazı.	37
Şekil 5.9. Aşınma cihazı görüntüsü.....	38
Şekil 5.10. SEM ve EDS deneylerinin yapıldığı taramalı elektron mikroskopunun .	39
Şekil 6.1. A356 Al matrisin sinterleme sonrası SEM görüntüsü.	40
Şekil 6.2. Farklı mekanik öğütme sürelerine göre parçacık boyutu değişimi.....	42
Şekil 6.3. Farklı mekanik öğütme sürelerinde üretilmiş %1 nano Al ₂ O ₃ takviyeli ...	44
Şekil 6.4. Farklı mekanik öğütme sürelerinde öğütülen %1 nano Al ₂ O ₃ takviyeli....	45
Şekil 6. 5. a) Takviyesiz A356 Al alaşımı, b) % 0,25, c) % 0,5, d) %1, e) %2 nano	46

Sayfa

Şekil 6.6. 1 saat mekanik öğütülen farklı miktarda nano Al ₂ O ₃ ilave edilen Al kompozitin XRD sonuçları.....	48
Şekil 6.7. Farklı mekanik öğütme sürelerine göre sertlik ve yoğunluk	49
Şekil 6.8. Farklı miktarlarda nano Al ₂ O ₃ ilave edilen Al matrisli kompozitlerin	50
Şekil 6.9. Farklı sürelerde mekanik öğütülmüş a) ağırlık kaybı ve aşınma hızları, b)	51
Şekil 6.10. Farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilmiş %1 nano Al ₂ O ₃ takviyeli	53
Şekil 6.11. Farklı miktarlarda nano Al ₂ O ₃ ilave edilen 1 saat mekanik öğütülen Al matrisli kompozitlerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı	54
Şekil 6.12. a) A356 Al alaşımı ve b) % 0,25, c) % 0,5, d) % 1, e) % 2 nano Al ₂ O ₃ ..	55
Şekil 6.13. 1 saat MA/MÖ ile üretilen % 1 nano Al ₂ O ₃ takviyeli Al kompozitlerin.	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri	13
Çizelge 3.2. AMK’lerde takviye elemanları ve fiziksel özellikleri verilemektedir	15
Çizelge 3.3. Al ₂ O ₃ ’ün fiziksel özellikleri.....	16
Çizelge 3.4. Nano kompozitlerin üretilme yöntemlerini gösteren bazı çalışmalar	22
Çizelge 5.1. Ticari olarak elde edilen A356 Al alaşım tozlarının kimyasal bileşimi.	31
Çizelge 5.2. Nano Al ₂ O ₃ tozlarının kimyasal bileşimi.....	32
Çizelge 6.1. A356 Al alaşımı teorik, deneysel ve göreceli yoğunluğu ile gözenek... 41	
Çizelge 6.2. Farklı sürelerde öğütülen %1 nano Al ₂ O ₃ takviyeli Al kompozitlerin ..	43
Çizelge 6.3. Farklı miktarlarda nano Al ₂ O ₃ takviye edilen Al matrisli kompozitlerin	47
Çizelge 6.4. Farklı miktarlarda nano Al ₂ O ₃ ilave edilen 1 saat mekanik öğütülen Al	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
Si	: silisyum
Zn	: Çinko
Mg	: Magnezyum
Cu	: Bakır

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
HMV	: Hardness Micro Vickers (Mikro Vickers Sertlik)
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
AMK	: Alüminyum Matrisli Kompozit
MA/MÖ	: Mekanik Alaşımlama / Mekanik Öğütme
MPa	: Mega Paskal
Al ₂ O ₃	: Alümina

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, artan ihtiyaçları karşılamak için bilinen ve hali hazırda kullanılan malzemelerin yanı sıra, karakteristik özellikleri daha üstün malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda üretilen kompozit malzemeler, birbirinden farklı birden fazla malzemenin en iyi özelliklerini bir malzemede birleştirilmesi ile elde edilen mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Özellikle yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde ağırlıkça daha hafif malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır [1]. Bu alanda yapılan bilimsel araştırmalar ile malzemelerin kullanım yerlerine göre performanslarını ve karakteristik özelliklerini geliştirmeye devam edilmektedir. Malzemelerde elde edilen kimyasal ve fiziksel gelişmeler; termal, mekanik ve termomekanik yöntemler ve kimyasal modifikasyonlar ile yapılmaktadır. Ticari olarak yeni malzeme ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yapılan çalışmalar sayesinde, üstün özelliklere sahip kaliteli malzemelerin geliştirilmesini de sağlanmaktadır [2]. Endüstriyel malzemelerde yüksek mukavemet, hafiflik ve ekonomik sürdürülebilirlik aranan özelliklerdir. Birçok endüstriyel malzemeye ısı işlem uygulanarak, karakteristik özellikleri artırılmaktadır [3]. Hali hazırda kullanılan metal ve metal alaşımları ile amorf yapıli seramik malzemeler, sadece kendilerine has özellikleri sayesinde ayrı ayrı düşünüldüğünde, gelişmiş sistemlerin ihtiyaçlarını karşılamakta zorlanmaktadır [4,5].

Al, demirden sonra en fazla üretilen ve tüketilen metaldir [6]. Al'un yoğunluğunun demirden daha düşük olması ve işlenebilirliğinin iyi olması sebebiyle endüstriyel kullanımı oldukça fazladır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte yeni metal malzemelerin geliştirilmesine olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Bu nedenle metal matrisli kompozitler (MMK) geliştirilmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte hem ekonomik hem de kaliteli malzemelerin üretilmesi için, MMK malzemeler üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Gün geçtikçe MMK'ler üstün özellikleri ile bilinen yöntemlerle üretilen malzeme ve malzeme gruplarının yerini almaktadır. Al ve Al alaşımları, üstün özellikleri nedeniyle MMK'ler için önemli bir matris malzemesidir. Al matrisli kompozit (AMK) malzemelerin üretiminde en yaygın kullanılan takviye elemanları SiC ve alüminadır. Özellikle otomotiv sektöründe SiC takviyeli AMK'ler önemli yer tutmaktadır. Uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde SiC ve Al₂O₃ ile güçlendirilmiş AMK malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. MMK üretiminde kullanılan takviye elemanları şekillerine göre incelendiğinde sürekli ve kısa fiberler, parçacıklar ve kılcal kristaller olduğu görülmektedir [7].

MMK'ler karakteristik kabiliyetleri üretim aşamasında ilave edilen bileşikleri ve oluşturdukları ara yüzey ile ilişkilidir. MMK üretiminde birçok farklı takviye malzemesi kullanılmaktadır [8].

Alüminyum matrisli metal kompozit malzemelerin (AMK) üretiminde SiC, B₄C, Al₂O₃, Si₃N₄, TiC, MgO, TiB₂, ve in-situ TiAl₃, gibi takviye elemanları kullanılmaktadır [9].

İleri teknoloji ürünleri olan seramik malzemeler içinde en çok kullanılan malzemelerden birisi Al₂O₃'dir. Dayanımı, ergime sıcaklığı ve düşük elektrik iletkenliği nedeniyle, alümina; refrakter malzemelerde, yalıtıcılığın istendiği yerlerde, kesici takımlarda, içten yanmalı motorlarda, aşınan parçalarda ve MMK malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca Al₂O₃ yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluk ve yüksek çalışma sıcaklıklarındaki karakteristik özellikleri nedeniyle, ticari olarak birçok sektörde tercih edilmektedir. Ancak 1000 °C' nin üstü çalışma sıcaklıklarında aşınma oranının yükseldiği bilinmektedir [10].

Nano teknolojinin gelişmesi ile birlikte, nano takviye elemanlarının kompozit malzeme içersinden takviye fazı olarak kullanılmasına başlanmıştır. Bu malzemeler nanokompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır [11].

Özellikle kompozit ve nano kompozit malzemelerin üretiminde son zamanlarda toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Toz metalürjisi (T/M) üretim yöntemi tozların karıştırılmasını, karıştırılan tozların sıkıştırılmasını ve sinterlemesini içeren bir katı üretim yöntemidir [12]. MA/MÖ işlemleri kompozit üretiminde en fazla kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemle kompozit tozlar, bilyeler yardımı ile yüksek devirlerde üretilmektedir [2].

Bu çalışmada, bir toz metalürjisi yöntemi olan MA/MÖ üretim yöntemi ile matris malzemesi olarak kullanılan A356 Al alaşımına, farklı miktarlarda nano boyutta Al_2O_3 ilave edilerek, elde edilen AMK'lerin mikro yapıları, sertlik sonuçları ve aşınma davranışları incelenmiştir.

Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, matris malzemesi olan A356 Al alaşımına % 1 oranında nano alümina (Al_2O_3) ilave edilerek farklı sürelerde (1, 2, 3 ve 4 saat) mekanik öğütme işlemi yapılmıştır. Böylece MMK'lerin toz boyutları en uygun MA/MÖ süresi belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, matris malzemesine farklı miktarlarda (% ağırlık) takviye fazı (Al_2O_3) ilave edilerek (%0,25, %0,5, %1, %2), önceki aşamada belirlenen ideal mekanik öğütme süresinde kompozitler üretilmiştir. Takviye fazı miktarının mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

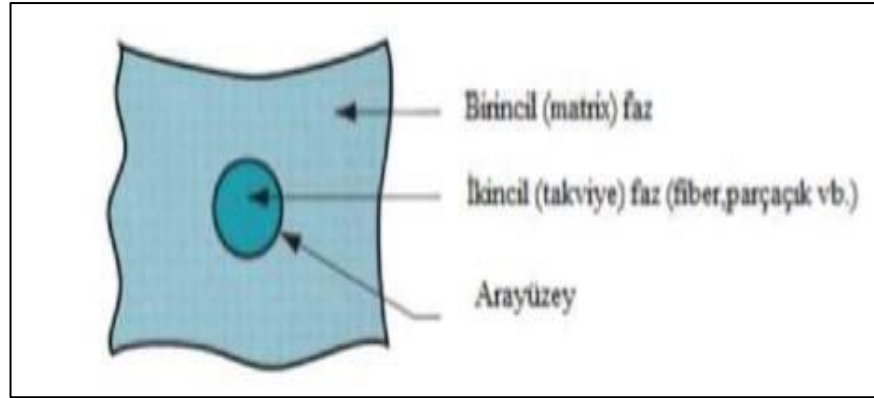
2.1. GİRİŞ

Kelime anlamı olarak kompozit, karışım demektir. Bir kompozit malzeme oluşturmak için birbirine benzemeyen ve birden fazla malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Birbirlerine kıyasla farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan ve en az iki bileşenden oluşan bu malzemeler, kullanılan bileşenlerin en iyi özelliklerini bir arada bulundurmaktadır. Bu malzemeyi oluşturan bileşenler birbirleri içerisinde çözünmeden, birbirleri arasında atom alışverişi yapmadan yapı içerisinde kendi özelliklerini korumaktadır. Bu nedenle fiziksel olarak fark edilebilir ve bileşen malzemeler arasındaki ara yüzey görülebilir [13].

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı iki ayrı malzemedan birisinin (takviye elemanı) diğeri (ana yapıyı oluşturan matris elemanı) içerisinde dağılımıyla oluşmaktadır. Bu malzemenin özelliklerini, malzeme yapısının karakteristiği, geometrisi, homojenliği ve etkileşimi doğrudan etkilemektedir. Bir kompozit malzemenin ana yapısında hacimsel çoğunluğu oluşturan zayıf olan sürekli faz matris elemanı, ana malzeme üzerinde oluşacak olan gerilimi taşıyan ve dayanımı sağlayan sağlam süreksiz faz da takviye elemanı olarak ifade edilmektedir. Ana malzemeyi oluşturan bu iki bileşenden, yapı içerisinde süreksiz olan takviye fazı, kompozitin dayanımını, yük taşıma özelliğini ve tokluğunu artırmak, yüksek sıcaklıklarda çalışma özelliğini arttırırken, ana yapıyı oluşturan matris, yük altında deformasyon sonucu çatlak ilerlemelerini yavaşlatarak kopma ve kırılmaları geciktirmektedir. Matris malzemesinin diğeri bir görevi de takviye elemanının yapı içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktır [14].

2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLEŞENLERİ

Kompozit bir malzemede belirgin üç temel faktör söz konusudur. Bunlar matris malzemesi, takviye elemanı ve bu iki malzemenin arasında oluşan bağıdır. Ana malzeme ve takviye fazı, kompozitin üretimi sırasında kullanılan üretim yöntemine ve parça şekli ile bağlantılı olarak fiziksel birliktelik sergilemektedir. Farklı birçok yöntemle bir araya getirilen matris ve takviye fazı, kendine has özelliklerinde bir kayba uğramadan, kendi aralarında temas bölgesi olan ara yüzeyi meydana getirmektedir [15]. Bir kompozit malzemenin bileşenleri, Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2. 1. Kompozit malzeme bileşenlerinin şematik gösterimi [16].

2.2.1. Kompozit Malzemelerde Matris Malzemesi

Kompozit malzemelerde matris malzemesinin görevi, takviye fazının yapısını bozmadan bütünlüğü sağlamak ve uygulanan yükü yapıda takviye elemanına ileterek ve dağıtmaktır. İdeal bir matrisde takviye fazı homojen bir şekilde dağıtılmalıdır. Matris, birleştiren bir yapıdır. Kompozitlerde yükü taşımakta olan takviye fazının işlevlerini yapabilmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü büyüktür [17].

2.2.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanı

Takviye fazları genellikle; ince plakalar, fiber, kısa fiber, kılcal kristal ve parçacık şeklindedir. Ayrıca istenen dayanım özelliklerini de yansıtan farklı şekillerde

seçilebilmektedir. Matris, takviye fazının ıslatılabilirliği ile homojen bir dağılım da sergiler [18].

Takviye fazının en önemli işlevi gelen yükü taşımak, matrisin rijitlik ve mukavemetini yükseltmektir. Yapılan literatür araştırmalarında takviye fazı matris malzemesine göre yüksek akma dayanımı, kırılma tokluğuna ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliklerine sahip olmalıdır [19].

2.2.3. Arayüzey

Ana yapıyı oluşturan bileşenlerin sınırlarındaki yüzey oluşumuna arayüzey denir. Bir kompozit malzemeye uygulanan yükün takviye fazına aktarılma görevi, bu arayüzey bağına aittir. Arayüzey bağı kompozitin dayanımını etkiler ve bağıın gücü, matris ile takviye fazı arasındaki ıslatılabilirlik ile ilgilidir [20] .

2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

2.3.1. Takviye Elemanının Şekline Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

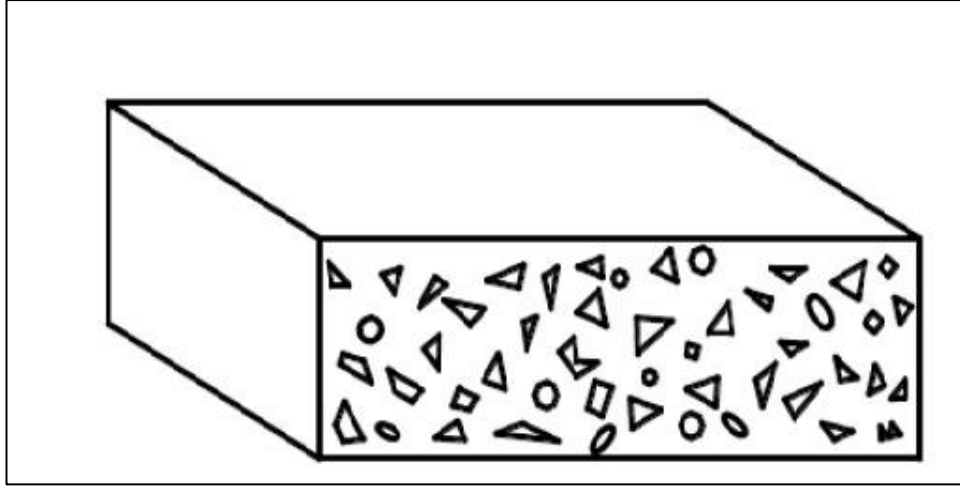
Takviye fazı, kompoziti oluşturan ve gerilimlere mukavemet gösteren bir etkidir. Matris ile takviye fazı arasında bağıın oluşması, ıslatılabilirliğe bağlıdır. Metal matris ile takviye fazı arasındaki termal genleşme farkı, yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşmasına neden olmaktadır. Bu olay kompozitin dayanımını artırır. Fakat bu iki malzeme grubunun ara yüzey enerjilerinin farklı olması nedeniyle ıslatılabilirlik için temas açısı artmakta ve matris ile takviye fazı arasındaki ara yüzey bağı kuvveti azalmaktadır. Bu yüzden, matris içerisinde takviye fazının şekli ve hacim oranı, kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediğinden dolayı takviye fazının seçimi önemlidir [21].

Takviye elemanları matris malzemesi içerisine farklı biçimlerde dizilerek matris malzemenin karakteristik özelliklerini artırmaktadır. Kompozit malzemeler, takviye elemanlarının şekillerine göre;

- Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (fiber)
- Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Flament Takviyeli Kompozit Malzemeler olarak sınıflandırılabilir.

2.3.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde takviye fazı, matriste homojen olarak dağılmış gevrek bir malzemedir. Daha sünek olan matris malzemesi ile çevrelenmektedir. Kompozit malzemelerin sertliğini, aşınma direncini yüksek sıcaklıklardaki karakteristik özelliklerini geliştirmek için oksit, nitrür veya karbür parçacıklar kullanılmaktadır. Şekil 2.2’ de parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 2. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi [22].

Malzemenin karakteristik özelliği izotropikliğini etkilemeden parçacık takviyesi ile geliştirilmektedir. Matris içerisinde takviye fazının homojen dağılımı ıslatılabilirliğe bağlıdır ve ıslatılabilirlik üretim yöntemi ile ilişkilidir. Bu olay kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Literatüre göre parçacık takviyeli kompozitler, yüksek mekanik özelliklere sahiptir [22].

2.3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

2.3.2.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozitler genellikle düşük yoğunluğa sahiptir. Kolay üretilibilmeleri ve yalıtkanlıkları nedeniyle bu kompozitler endüstriyel amaçlı kullanılmaktadır. Termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılan polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanları bor, cam ve karbon fiberlerdir. Matris olarak polimer esaslı kompozitlerin ısı dayanımları düşük olduğu için, yüksek sıcaklıklarda kullanılmaları uygun değildir [20].

2.3.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Yüksek sıcaklıktaki çalışma ortamlarında karakteristik özelliklerini kaybetmeden çalışabilen seramik matrisli kompozitler, yüksek yoğunluğa sahip metallere alternatif olarak tercih edilmektedirler. Hafif olmalarının yanı sıra, korozyon dirençleri yüksektir. Buna karşın çekme dayanımları oldukça düşük ve gevrek yapıdadır. Plastik olarak şekillendirilmesi mümkün olmayan seramik matrisli kompozitlerde ZrO, Al₂O₃ ve SiC gibi matris malzemeleri kullanılır [20].

2.3.2.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Gelişen teknolojiyle birlikte MMK malzemeler otomotiv, uzay ve havacılık sektörü ayrıca elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. MMK'ler düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve yüksek elastikiyet özellikleri taşımaktadır. MMK'ler matris olarak metalin, takviye olarak da seramiğin en önemli özelliklerinin birleşimiyle, katkısız alaşımlarından daha yüksek mukavemet ve aşınma dayanımı sergilemektedir [21].

MMK malzemeler, özgül ağırlıklarının düşük olmasına rağmen, mükemmel derecede dayanım özelliği göstermektedirler. Bu özellikleri sebebiyle de en fazla tercih edilen kompozit malzemelerdir [22].

Metallerin bilinen özellikleriyle ilgili olarak, kompozit malzemelerde metalik matrislerin kullanılmasını sağladığı özellikler;

- Darbe özellikleri ve yüksek tokluk
- Yüzeysel çatlaklara karşı minimum duyarlılık ve aşınmaya karşı maksimum dayanım
- Yüksek elektrik iletkenliği
- Isıl iletkenlik
- Çekme dayanımı ve yüksek elastik modül
- Değişik teknik uygulamalarla şekillendirme ve işlenebilmesidir [23].

MMK'lerde yapı içerisindeki çok eksenli gerilimler gözenek miktarını arttırmaktadır. Bu olay, kompozitlerin sünekliliğini azaltmaktadır [24, 25].

BÖLÜM 3

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER MALZEMELER

3.1. GİRİŞ

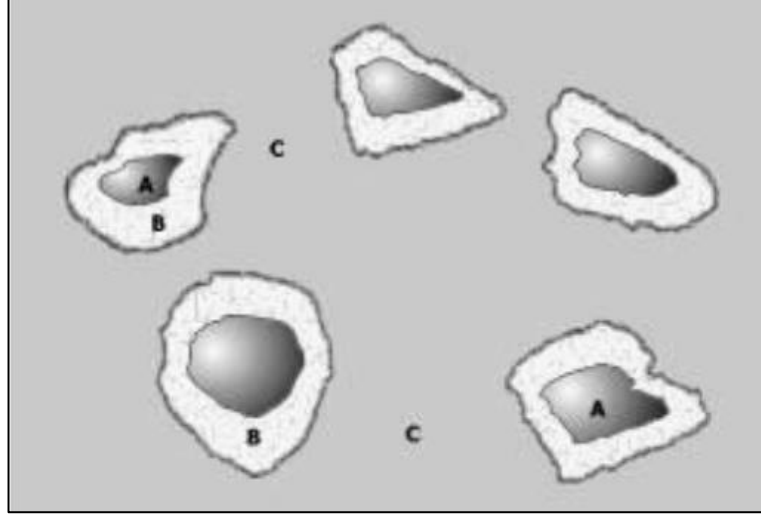
MMK'lerde, matris malzemesi takviye fazını çevreleyerek rijitlik sağlamaktadır. Aynı zamanda, kompozit malzemeye uygulanan yükleri takviye elemanına iletmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde genel olarak bütün metal ve alaşımlarını kullanmak mümkündür. Uygun olan takviye malzemesi seçildikten sonra, her türden metal ve alaşım matris malzemesi olarak kullanılabilir. Kullanım yerine uygun bir MMK üretmek için, kompozit kimsiyal ve fiziksel uygunluk sağlamalıdır. Kompozitlerde genel olarak düşük yoğunluklu, hafif ve mekanik özellikleri yüksek malzemeler matris malzemesi olarak tercih edilmektedir [26].

3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE MATRİS MALZEMESİ

Matris seçimi yapılırken dayanım, korozyon direnci, yoğunluk, termal kararlılık, boyutsal kararlılık ve aşınma direnci gibi özelliklere dikkat edilmektedir. Kompozit malzemeler yüksek dayanıma sahiptirler. Ancak gevrek yapıları ve anizotropik olmalarından dolayı, gerilme yığılmalarına karşı oldukça hassastırlar [27,28].

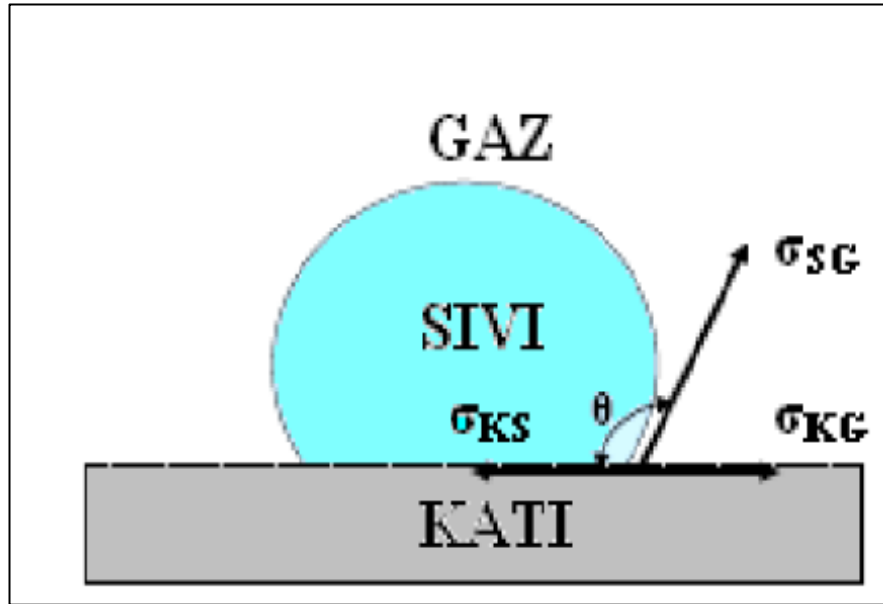
Matris malzemesi olarak pek çok metal ve alaşımı kullanılmaktadır. Matris olarak genellikle düşük yoğunluklu, korozyon direncinin yüksek ve işlenebilirliğin kolay olması sebebiyle, Al ve Al alaşımları tercih edilmektedir [29,30].

İyi bir kompozitte takviye elamanı matrise gömülmelidir. Ayrıca matris, takviye fazını ıslatabilmelidir. Matris ile parçacık takviye elamanı arasındaki ara yüzey çok önemlidir [31,32]. Bu bölgeler Şekil 3.1’te şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemelerde üç ayrı bölgenin şematik gösterimi; parçacık(A), ara yüzey (B), matris (C) [32].

Metal matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi, deformasyon boyunca yük transferini ve çatlak direncini arttırmaktadır. Bir sıvının katı yüzey üzerinde oluşan etkileşime ıslatılabilirlik denilmektedir. Islatılabilirlik sırasında meydana gelen şekil ve açılar, Şekil 3.2’te verilmiştir [33,34].



Şekil 3.2. Islatılabilirlik sırasında oluşan şekil ve açılar [34].

Matris, takviye elemanı arasında oluşan bağ kimyasal olarak da gerçekleşebilir. İslatma (iki denklemle) eşitlik 3.1’de verilen denklemlerle hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned} W_a &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{12} \\ \sigma_{12} &= \sigma_{KS} + \sigma_{SG} \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (3.1)$$

MMK’lerde ıslatmayı arttırmak için matris, reaktif elementlerle alaşımlandırılmaktadır. Reaktif elementlerin eklenmesinin asıl nedeni, kimyasal tepkimeler yoluyla kompozit bileşenlerinin birbirine tutunmasını sağlamaktır. Fakat ara yüzeyde oluşan tabakalar, kompozitin deformasyonunu başlatan çatlaklar olarak hareket etmektedir [26].

Metal matrisli kompozit malzemelerde ara yüzey bağ dayanımını geliştirmek için,

- a) Uygun kimyasal etkileşim sağlamak
- b) İslanabilirliği arttırmak
- c) Oksidasyonu önlemek gerekmektedir [26].

3.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Matris Malzemesi Olarak Alüminyum

Endüstriyel olarak alüminyum ve alüminyum alaşımları, demir alaşımlarından sonra en yaygın kullanılan malzelerdir. Ancak saf alüminyuma bakıldığında dayanımının oldukça düşük ve sünek yapılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle ticari olarak genellikle alaşımlandırılmış olarak kullanılmaktadır. Çünkü soğuk deformasyon ile alüminyum dayanımı yaklaşık iki kat artırılabilir [35,36].

Çeşitli ısı işlemleri ile Al alaşımlarının mekanik özellikleri, istenilen şekilde artırılabilir. Al alaşımlarına Mg, Cu, Si ve Zn ilave edildikten sonra, ısı işlemi ile oldukça yüksek mekanik özellikler elde edilebilir. Bu olumlu özellikler sebebiyle Al ve Al alaşımlarının kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Çizelge 3.1’de saf alüminyumun fiziksel özellikleri verilmektedir [37, 38].

Çizelge 3.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri [37].

Atom ağırlığı	26,97 akb (atomik kütle birimi)
Yoğunluk (20 °C'de)	2,7 gr/cm ³
Atom çapı	1,430 °A
Kafes yapısı	YMK
Ergime sıcaklığı	660 °C
Buharlaştırma sıcaklığı	2327 °C
Özgül ısı	0,214 cal/g
Isı iletme kabiliyeti	0,55 cal/ °C.s.cm
Lineer genişleme katsayısı	26,6x10-6 /°C
Elastisite modülü	7220 kgf/mm ²
Elektrik iletkenliği (20 °C'de)	37,6 m/mm ²

Alüminyum toz halinde, ilk olarak yirminci yüzyıl başlarında (pul parçacıklar olarak) kullanılmaya başlanmış daha sonraki yıllarda toz alüminyum parçalarının üretiminde de kullanımı devam etmiştir. Günümüzde Al tozunun yıllık üretiminin yaklaşık iki yüz bin ton olduğu tahmin edilmektedir. Genellikle gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmektedir. Alüminyum tozları oksijen ile tepkimeye girerek yüzeylerinde bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Yüzeyde oluşan oksit tabakası, tozların sinterlenmesi sırasında bazı olumsuz etkilere de sebep olmaktadır. Toz boyutuna göre hacimsel olarak oksit oranı, % 0,1–1 arasındadır. Daha küçük tozlar, yüzey alanları küçüldükleri için ağırlıkça en yüksek oksit tabakasına sahiptir. İnce oksit tabakası sayesinde Al atmosferik ortamda daha kararlıdır. Bununla birlikte, parçalanmış Al tozları ile reaksiyona girme eğilimindedir [38-40].

Metaller genellikle oksijen, klor, kükürt gibi elementlerin oluşturdukları bileşikler halindedir ve genellikle karbon yardımı ile bu bileşikler indirgenmektedir. Al üretiminde kullanılmak üzere bünyesinde alümina bulunduran minerallerin işlenmesi için birçok süreç geliştirilmiştir. Ancak bu süreçlerde bazı zorluklarda yaşanmaktadır. Bunun nedeni ise, alüminyumun aktif bir element olmasıdır. Bu yüzden alüminyum oksijenle çok kolay reaksiyona girmektedir [41].

Al alaşımlarının dayanımının artırılmasında en çok kullanılan yöntem yaşlandırma ısıl işlemidir. Çökelme sertleşmesi mekanizması ile mukavemet değerleri önemli derecede arttırılmaktadır. Yaşlandırma ısıl işleminin yapılabilmesi için alaşıma bazı alaşım elementleri ilave edilmektedir. Bu dayanım artırma mekanizması, matriste ısıl işlem ile Al_2Cu tozların, Al_3Mg ve Mg_2Si gibi tane sınırlarında sert fazların oluşturulması ve bu fazların dislokasyon hareketlerini zorlaştırması ile alaşımın dayanımı, arttırılmaktadır [42-45].

Metal matrisli kompozitlerin yeni malzemeler olarak ön plana çıkmasına sebep olan bu durum, geliştirilmiş mekanik ve fiziksel mahiyetlerinin yanı sıra enerji ve malzeme kazanımı sağlamaktadır. Hafif bir metal olma özelliğiyle alüminyum, alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yoğunlaşılmasına neden olmuştur [46].

Alüminyum ulaşılabilirliği, hafifliği ve üretim kolaylığı nedeniyle ileri bir teknoloji malzemesi olabilir. Ancak kullanım sıcaklığının artmasıyla özelliklerinde görülen azalma ise bir dezavantajdır. Alüminyumun özelliklerini geliştirme amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalara bakıldığında, özellikle Al matrisli kompozitler farklı seramik bazlı malzemeler ilave edilerek alüminyum kompozitlerin üretildiği görülmektedir. Bu uygulamalar iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- İn-situ
- Ex-situ'dur.

İlk yöntemdeki uygulamada ısıl işlemle (yaşlandırma ile) yapıda ikinci faz oluşturulmaktadır. İkincisinde ise seramik takviye fazı matrise dışarıdan ilave edilerek oluşturulmaktadır. Her iki yöntemde kompozit yapılan üretimde amaç, ikincil takviyenin matris yapı içerisindeki homojen dağılımını sağlamaktır [47].

İmalat sektöründe Al ve alaşımlarının tercih edilme sebebi yoğunluğunun düşük, elektrik ve ısı iletkenliklerinin yüksek olmasıdır. Buna karşılık aşınma dirençlerinin düşük olması, bu alaşımların uygulama alanları açısından bir dezavantajdır. Aşınma

davranışları incelendiğinde yaşlandırılabilen alaşımların aşınma dayanımlarının daha yüksek olduğu ifade edilmektedir [24].

3.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE TAKVİYE ELEMANI

AMK'lerde takviye fazı olarak fiberler, viskerler ve parçacıklar kullanılmaktadır. Takviye elemanının belirlenmesinde matris malzemesi ile uyumluluğu, üretim yöntemi ve ekonomik maliyeti gibi özellikler göz önüne alınmaktadır. Ön araştırmalar, nano parçacıkların (Al_2O_3 , SiC, B_4C , SiO_2 gibi) A356 Al alaşımına ilave edilmesinin bu alaşımlarda, mukavemet-süneklik ilişkisinin optimize edilmesinde yararlı bir etkisi olduğunu göstermektedir [48].

Genel olarak, metal matris nanokompozitler, metal matris kompozitlere kıyasla daha üstün özellikler sergilemektedir. Bunun yanı sıra zayıf süneklik, düşük kırılma tokluğu ve işlenebilirlik gibi metal matrisli kompozitlerin eksikliğini giderebildiği kabul edilmektedir [49].

AMK'lerde takviye elemanının görevi, yükü taşıyarak matrisin çekme, basma ve aşınma sırasında matrise gelen yükü üstlenmektir [41]. Çizelge 3.2'de AMK'lerde en çok kullanılan takviye elemanları ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.2. AMK'lerde takviye elemanları ve fiziksel özellikleri verilmektedir [50].

Takviye elemanı	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime derecesi ($^{\circ}C$)	Elastik modülü (GPa)
SiC	3,21	2792	410
Al_2O_3	3,96	2054	370
B_4C	2,50	2350	190-200
TiB_2	4,52	3230	550-565
TiC	4,94	3065	448-451

3.3.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanı Olarak Al_2O_3

Çizelge 3.3'te alüminanın özellikleri verilmektedir [41].

Çizelge 3.3. Al₂O₃'ün fiziksel özellikleri.

Termal iletkenlik katsayısı	28 W/mK
Yoğunluk	3,98 g/cm ³
Erime sıcaklığı	2050 °C
Kaynama sıcaklığı	2080 °C
Elastik modülü	~360 GPa
Genleşme katsayısı	7-8.8*10 ⁻⁶ m/K
Molekül Ağırlığı	101,96 g/mol
Oluşum serbest enerjisi	-1582,4 kJ/mol
Spesifik yüzey alanı	115 m ² /g
Mikrosertlik	25 GPa

Özgül ağırlığı 3,95g/cm³ olan alüminanın sahip olduğu yüksek sıcaklık direnci, yüksek elastikiyet modülü ve rijitlik, takviye elemanı olarak tercih edilme nedenleridir. Bu takviye fazının en yaygın kullanıldığı matris malzemesi ise alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Al₂O₃ ve SiC karşılaştırıldığında, Al₂O₃ daha düşük elastikiyet modülü, dayanımı, daha yüksek yoğunluğa sahip olması ve ekonomiklik açısından öne çıkmaktadır. Al₂O₃ takviyeli AMK'lerin sertlik ve aşınma dirençleri ise daha yüksektir. Yapılan bir çalışmada, 2024 Al alaşımına %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında vorteks metoduyla Al₂O₃ ilavesi yapılmış ve Al₂O₃ miktarı arttıkça çekme mukavemetinde artış, % uzama miktarında ise azalma olduğu gözlemlenmiştir [51].

3.4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MMK malzemelerde matris ve takviye elemanının birbirleriyle bağlantılı ve uyumlu olması beklenmektedir. Bu uyumun sağlanabilmesi için matrisin ıslatılabilirliği önemlidir. Matrisin takviye elemanını ıslatabilmesi ve iyi bağ oluşturması

kompozitlerin dayanımını artırmaktır [42]. Kompozitlerde bağın kuvveti üretim metodlarına bağlıdır. Üretim metodları üç grupta sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Sıvı Hal Üretim Yöntemi
- İn-situ Üretim Yöntemi
- Katı Hal Üretim Yöntemi

3.4.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemi

Sıvı hal üretim şekli, ergitilmiş malzemelerin takviye fazı ile aralarında bağ oluşturma şeklidir. Sıvı hal üretim yöntemleri şu şekildedir;

- İnfiltrasyon
- Sıkıştırılmalı döküm
- Karma döküm
- Yarı katı döküm
- Karıştırılmalı döküm
- Püskürtme çökmesi [50].

3.4.2. İn-Situ Üretim Yöntemi

İn-situ kompozitlerin üretiminde birden fazla metod kullanılmaktadır. Bunlar;

- Ötektiklerin yönlü katılaştırılması
- Tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonu
- Ekzotermik reaksiyon işlemi'dir.

3.4.3. Katı Hal Üretim Yöntemi

Katı hal üretim yönteminde en yaygın olarak kullanılan yöntem toz metalürjisidir. Bu üretim yönteminde takviye ve matris elemanı toz halinde birbirine karıştırılmaktadır. Hazırlanan tozlar bir kalıpla şekillendirilir ve daha sonra sinterleme yapılır [51-52]. Katı hal üretim yöntemleri;

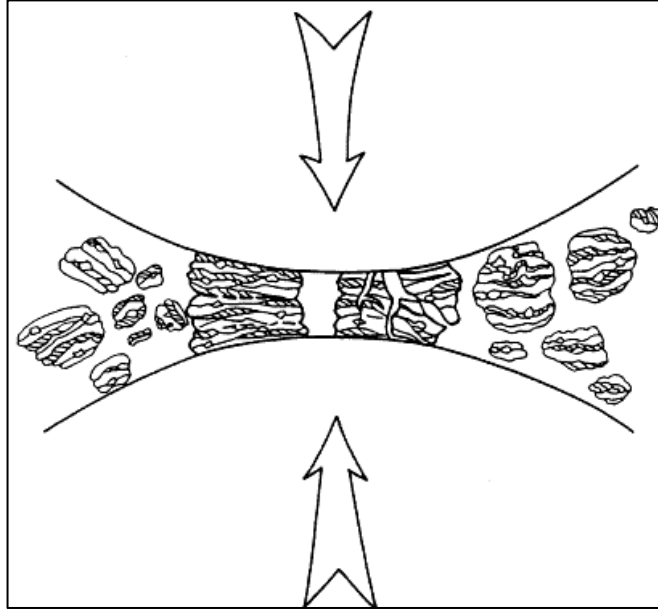
- Toz metalürjisi (T/M)

- Difüzyonla birleştirme
- Sıcak haddeleme'dir.

3.4.3.1. Mekanik Alaşımama / Mekanik Öğütme Yöntemi

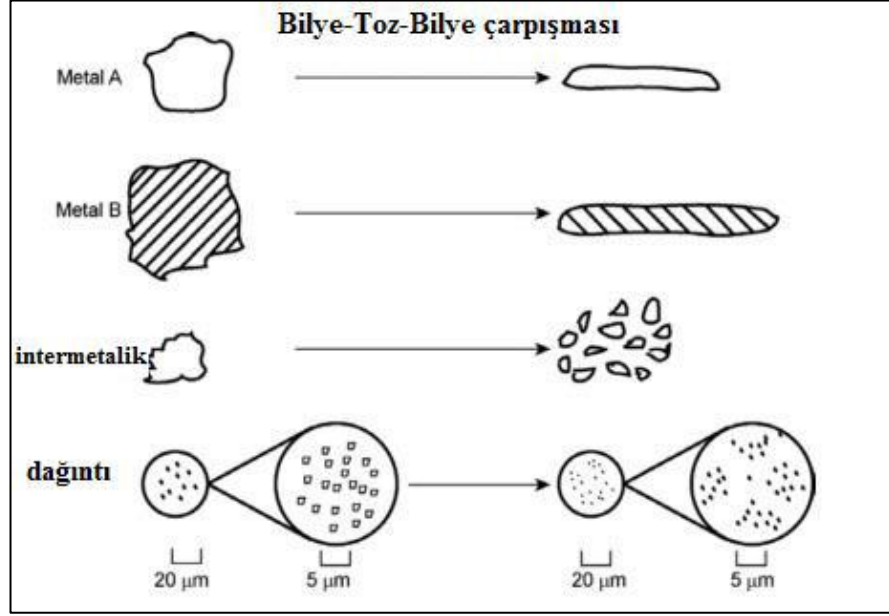
Mekanik alaşımama ve mekanik öğütme yöntemi (MA/MÖ) bir katı hal üretim yöntemidir. 1966 yılında INCO (uluslararası nikel şirketi) laboratuvarlarında Benjamin tarafından keşfedilen bu yöntem, tozların yüksek enerjili öğütme ile tekrarlı soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma aşamalarını içermektedir [53-54]. Bu yöntemin en önemli avantajı, birbiri içerisinde çözünemeyen elementlerin kolaylıkla alaşımlanabilmesidir

MA/MÖ yönteminde bilyeler ve elementel tozlar öğütme haznesinin içerisinde karıştırılmaktadır. Bu sırada meydana gelen soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma ile istenen karışım sağlanmaktadır [55]. Şekil 3.3'te, iki bilyenin çarpışması sonucu arada kalan tozların ezilerek ilk baştaki boyutlarına göre daha fazla büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 3. 3. MA/MÖ sırasında bilye-toz-bilye çarpışması [17].

Şekil 3.4'da ise, MA/MÖ sırasında başlangıç tozların uğradıkları deformasyon görülebilmektedir.



Şekil 3.4. MA/MÖ sırasında başlangıç esnasında tozlarda meydana gelen deformasyonlar [17].

Yüksek enerjili öğütme sırasında öğütme hücresi içerisindeki bilye-toz-bilye ve bilye-toz-kap duvarı arasında oluşan çarpışmaların etkisiyle, toz parçacıklarında plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu deformasyonun sonucunda tozlar küçülmektedir. Kırılma eğilimleri, soğuk kaynaklama eğiliminden daha yüksektir. Bilyelerin darbesiyle de tozlar küçülmektedir. Mekanik öğütmenin ilerleyen aşamalarında tabakalar arasındaki boşluklar azalırken parçacık tabakaları artmaktadır. Belirli bir öğütme süresinden sonra soğuk kaynaklanma ile kırılma arasında bir denge oluşmaktadır. Bu aşamada, her bir parçacık, karışımı oluşturulan malzemelerin tamamını içermektedir. Mekanik alaşımlama ve mekanik öğütme işlemi sırasında oluşan deformasyon nedeniyle, tane şekillerinde değişim ve dislokasyon boşlukları gibi kristal etkiler oluşmaktadır. Bu etkiler nedeniyle, matraste çözünen elementlerin difüzyonu da artmaktadır. Mekanik öğütme işlemi sırasında sıcaklığın artması, bu difüzyonunu daha da kolaylaşmaktadır. Bu durumda, elementler arasında bir alaşımlama (mekanik) meydana gelmektedir [17].

MA/MÖ işlemleri karmaşık bir işlemdir. Bu sebeple de bu yöntemde üretilen son ürünün bileşiminde ve mikro yapısında etkili olan pek çok değişken söz konusudur. İlave olarak bu değişkenler birbirini de ilişkilidir. Bunlar;

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

Mekanik öğütme işleminde, öğütme hücreleri önemlidir. Öğütme sırasında öğütücü malzemelerin öğütme kabına çarpmasıyla, çatlaklar ve kırılmalar oluşabilmektedir. Kırılan parçalar öğütme kabının içerisinde toz ile karışarak, üretilmek istenen alaşımın/kompozitin kimyasal bileşimini değiştirmektedir. Bu durum kirlenmelere yol açmaktadır. Bu sebeple, öğütme yapılan kapların dayanıklı malzemelerden yapılmış olması gerekmektedir [56-58].

MA/MÖ işleminde farklı değirmen tipleri kullanılmaktadır. Bu değirmenlerin öğütme kabiliyetleri, ısıtma ve soğutma, farklı toz kapasiteleri gibi ayarlanabilmektedir. Bu değirmenler,

- Speksler
- Planeterler (düzlemsel)
- Artritör tipi değirmenlerdir [59].

3.5. NANO KOMPOZİTLER

Günümüzde nano malzemelerin gelişmesiyle birlikte bu malzemelerin kompozit üretiminde kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu kompozitler, metal matrisli nano kompozitler olarak adlandırılmaktadır [17, 24].

Nano kompozitlerin üretiminde en önemli sorun, takviye elemanının ıslatabilirliğinin az olmasıdır. Bir diğer sorun ise, nano malzemelerinin boyutundan dolayı aglomerasyon meydana gelmesi ve bu nedenle takviye fazının yapıda homojen olarak dağılamamasıdır. Bu yüzden, nano takviyeli kompozit malzemelerin döküm yöntemi ile üretilmeleri oldukça zordur [27]. Yapılan bir çalışmada, ultrason destekli üretim yöntemi ile A356 alaşımına boyutu 30 nm altında nano SiC ilave edilerek, yapıda homojen bir dağılım elde edildiği belirtilmiştir. Sertlik değerlerinde ise takviyesiz alaşıma göre yaklaşık %20 artış elde edildiği ifade edilmiştir. [60].

Kompozit malzeme üretiminde, katı hal üretim yöntemleri arasında en bilineni MA/MÖ yöntemidir. Yüksek hızda dönen bilyeli öğütücüde, matris ile takviye elemanı arasında devamlı olarak soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve kırılma gerçekleşen bu yöntemde, nano takviye faz matris matris malzemesi içerisinde homojen olarak dağılabilmektedir. Hazırlanan kompozit tozlar, şekillendirilip sinterlendikten sonra, kompozit malzeme üretilmektedir [16]. MA/MÖ ile yapılan bir çalışmada, AA7075 alaşımı tozlara % 1, % 3 ve % 5 oranında nano Al₂O₃ ilave edilerek, 20 saat mekanik alaşımlandırılmıştır. 450 °C 'de 30 dakika 300 MPa yük altında sıcak şekillendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda, nano Al₂O₃ miktarı arttıkça sertlik değerlerinde artış olduğu, çekme dayanımında ise takviye elemanı ilave edilmeyen alaşıma oranla % 60,5 oranında bir artış olduğu ifade edilmektedir [55]. Başka bir çalışmada ise, takviye fazı boyutunun kafes gerilimine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, saf alüminyum içerisine (% 99) yaklaşık 5 µm ve 45-50 nm boyutlarında SiC ilave edilerek mekanik öğütme yapılmıştır. Çalışma sonucunda, nano takviye fazı ilave edilen kompozitlerde tane boyutu ve kafes geriliminin azaldığı belirtilmektedir [61,62].

3.5.1. Nano Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri ve Takviye Elemanları

Nano kompozit malzemelerde matris elemanı olarak saf Al, Mg, Ti ve Cu gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, nano kompozit malzemelerde, Al ve Al alaşımlarının matris elemanı olarak kullanıldığında olumlu bulgular elde edilmiştir [55]. Nano kompozitler malzemelerin üretiminde nano SiC, Al₂O₃, TiB₂ ve Y₂O₃ gibi takviye elemanları kullanılmaktadır. Bunun haricinde, son zamanlarda metal matrisli kompozit üretiminde karbon nano tüpler de kullanılmaya başlanmıştır. Çizelge 3.4'de AMK ve üretim yöntemleri hakkında yapılan bazı çalışmalar verilmektedir [17].

Çizelge 3.4. Nano kompozitlerin üretilme yöntemlerini gösteren bazı çalışmalar [17].

Matris	Takviye Elemanı	Miktarı (%)	Öğütme ortamı	Öğütme süresi	Öğütme devri	Bilye toz oranı	Kaynak
Al	Al ₂ O ₃	5	Planetary tipi değirmen	24 saat	250	10:1	[82]
Al	MWCNT	2	Planeter tipi değirmen	6 saat	200	10:1	[28]
7075	SiC	15	Atritör tip değirmen	12 saat	360	10:1	[83]
6061	TiO ₂	10	Planetary tipi değirmen	40 saat	280	10:1	[62]
Al	CNT	2-5	Planetary tipi değirmen	48 saat	200	10:1	[63]
Al	MWCNT	10	Spex tipi değirmen	5 saat	1200	10:1	[64]
6063	Al ₂ O ₃	5-10	Atritör tipi değirmen	20dak	400	10:1	[65]
6061	SiC	10	Atritör tipi değirmen	9	300	10:1	[66]
7010	SiC	10	Atritör tipi değirmen	21	430	5:1	[67]
Al	SiC	2,5ve 5	Planetary tipi değirmen	10	200	10:1	[60]
Al	MgB ₂	15 ve 50	Spex tipi değirmen	64		7:1	[68]

3.5.2. Nano Kompozit Malzemelerde Mukavemetlendirme Mekanizmaları

3.5.2.1. Yük Transfer Etkisi

Malzemeye uygulanan yükün, sünek matris malzemesi tarafından sert ve yüksek dayanımı olan takviye fazına iletilmesi ile kompozit malzemelerin dayanımı artmaktadır. Kompozit malzemelerde, uygulanan gerilimin matris malzemesinden takviye elemanına iletilmesi, matris ile takviye elemanının arasındaki uyumluluğuna ve ara yüzey bağının dayanımına bağlıdır. Bu bağ kuvvetli ise, uygulanan yük takviye elemanına daha kolay iletilmektedir. Ayrıca, takviye elemanının boyutu da önemli bir etkidir. Takviye elemanının boyutu küçüldükçe, toplam yüzey alanı arttığından dolayı, matristen takviye elemanına daha fazla yük aktarılabilir. Bu durumda da nano kompozitlerde dayanımı arttırmaktadır. [16].

3.5.2.2. Tane Boyutu Mukavemetlenme Mekanizması

Tane boyutu MMK'in dayanımını doğrudan etkilemektedir. Yapı içerisindeki küçük tane boyutundan dolayı, tane sınırları alanı arttığı için dislokasyon hareketleri zorlaşmaktadır. Bundan dolayı, MMK malzemelerde mukavemet artışı olmaktadır. MMK'lerde sünek ve iri taneli matris malzemesine ilave edilen nano boyuttaki takviye elemanı matris tanelerinin boyutunun büyümesini engelleyerek (artan tane sınırları alanı nedeniyle), dislokasyon hareketlerini zorlaştırmaktadır. Böylelikle mukavemet artışı meydana gelmektedir. Eşitlik 3.1'de tane boyutunun akma dayanımını arttırdığını gösteren Hall-Petch eşitliği verilmektedir [16].

$$\Delta\sigma = \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (3.2)$$

Burada;

$\Delta\sigma$ = Akma dayanımı

k_y = Malzeme sabiti

d = Tane boyutu

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak ilave edilen parçacıklar, dayanım artışını doğrudan etkilemektedir. Takviye elemanının hacim oranındaki artışla birlikte (vp) parçacık boyutunun (dp) azalması, kompozitlerde daha küçük taneli olmaktadır. Bu durum, Zener tarafından (teorik olarak) Eşitlik 3.3'de verildiği gibi modellenmiştir.

$$dm = \frac{\alpha dp}{3vp} \quad (3.3)$$

Burada;

dm = tane boyutu

dp = takviye elemanı parçacık boyutu

vp = takviye elemanı hacim oranı

α = oransal sabit.

3.5.2.3. Termal Genleşme Katsayı Uyumsuzluğu

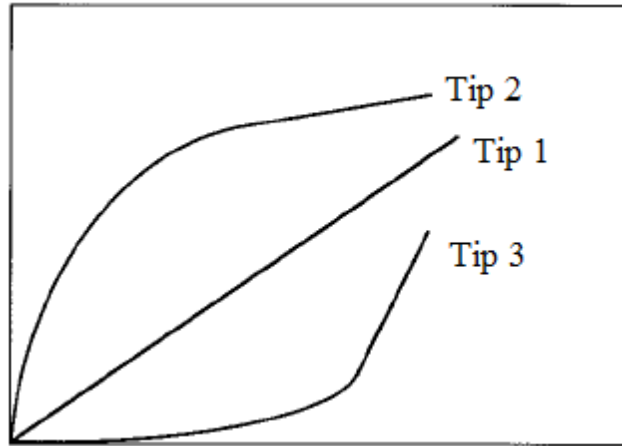
MMK malzemelerde metal olan matris malzemesi ile seramik olan takviye elemanı arasındaki ısıl genleşme farklıdır. Bundan dolayı ısıtma-soğutma sırasında meydana gelen ısıl genleşme nedeniyle, matris-takviye arasındaki bağın etrafında meydana gelen dislokasyon yığılmaları nedeniyle mukavemet artmaktadır [16].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınma, iki cismin birbirleri arasındaki temas yüzeylerinde oluşan sürtünme sonucunda cisimlerin yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı olarak adlandırılmaktadır. Aşınma, korozyon ve yorulma ile birlikte, mühendislik malzemelerinin bilimsel ve ticari olarak gücünü sınırlayan üç önemli problemden biridir. Genel bir tanım olarak aşınma, cisimlerin birbirlerine temas eden yüzeylerinde dış etkenler nedeniyle oluşan fiziksel ve kimyasal bir değişimdir [63-69].

Şekil 4.1’de aşınma hacmi eğrilerinin üç tipi, şematik olarak verilmektedir. Tip 1 aşınmada, süreç boyunca sürekli olan aşınma oranını göstermektedir. Tip 2’de aşınma, yüksek bir hızla başlayıp zamanla azalan bir aşınma hızına geçen düzenli aşınmayı göstermektedir. Tip 3’te ise ilk sürelerde aşınma düşük seviyelerde gerçekleşmekte daha sonra ivme kazanmaktadır. Bu tip aşınma metaller arasında oldukça sık görülmektedir [70].

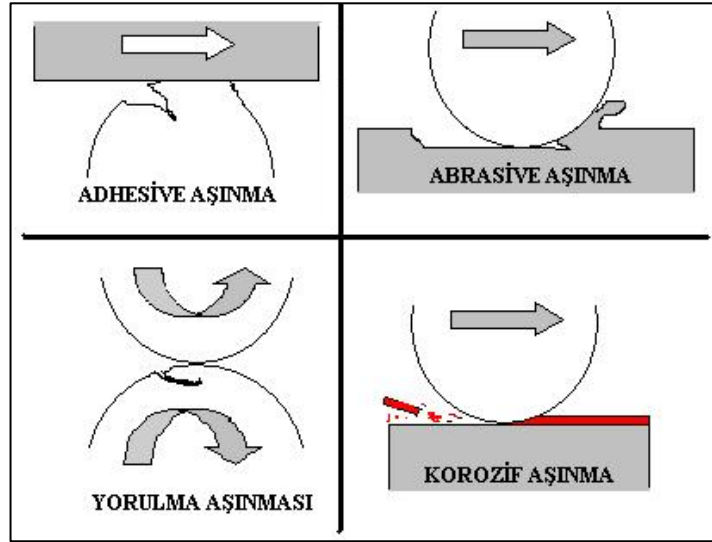


Şekil 4.1. Aşınma eğrilerinin üç tipi [70].

4.1. AŞINMA TÜRLERİ

Aşınma, birbirleri ile temas halindeki iki yüzeyin sürtünmesiyle gerçekleşen, yüzeyler arasındaki etkileşimdir. Aynı zamanda sürtünen yüzeyler arasındaki mekanik etkiyle birlikte oluşan plastik deformasyon ve malzeme kaybıdır. Bununla birlikte aşınma, plastik deformasyon nedeniyle fiziksel kayıplara neden olmaktadır. Kimyasal bozulma veya temas yüzeylerinde meydana gelen mikro çatlakların fiziksel olarak kopması ve malzeme kaldırılması da aşınma kapsamına girmektedir [71]. Şekil 4.2’de bazı aşınma tipleri şematik olarak görülebilmektedir. Dış etkenler ile fiziksel ve kimyasal değişimlerinin artması nedeniyle pratikte, birden fazla aşınma davranışı söz konusudur. Bunlar;

- Abrasiv aşınma,
- Adhesiv aşınma,
- Yorulma aşınması(statik veya dinamik),
- Difüzyon aşınması (atomik yer değiştirme),
- Erosiv aşınma
- Titreşimli (Fretting) aşınma
- Oksidasyon aşınması’dır.

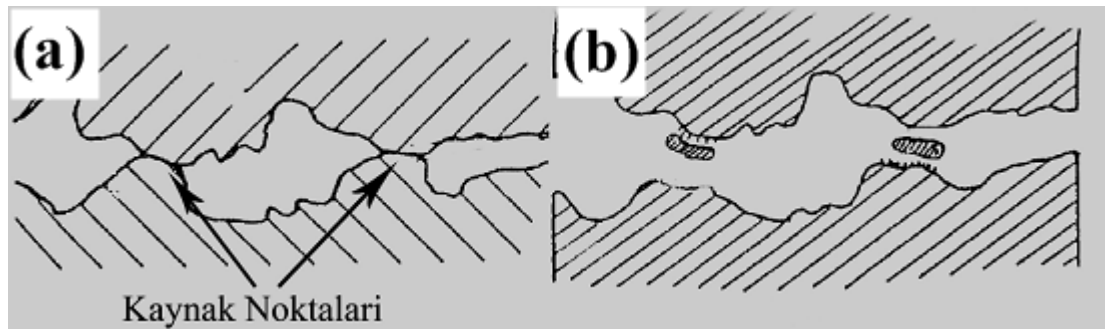


Şekil 4. 2. Aşınma tipleri [72].

4.1.1. Adhesiv Aşınma

Bir mühendislik malzemesinin yüzeyi, malzeme üzerindeki düzensizlikleri göstermektedir. İki mühendislik malzemesi temas ettiğinde gerçek temas alanı (normal de küçük olması sebebiyle) büyük bir basınca maruz kalmaktadır. Oluşan bu basınç sebebi ile temas noktalarında malzemeler, akma sınırına ulaşır ve bölgesel olarak mikro kaynaklanmalar oluşur (Şekil 4.3-a). İki cisim arasında devam eden sürtünme hareketi sonucu kaynak bağı kopar ve iki cisim birbirinden uzaklaşır. Bu nedenle de malzeme kaybı meydana gelir (Şekil 4.3-b). Bu olay adhesiv aşınma olarak tanımlanır. Mikro çatlak temas ara yüzeyine ulaştığında bir aşınma parçacığı oluşmaktadır. Oluşan bu parçacık yükün etkisiyle tekrar yüzeye yapışır. Temas yüzeyinde yeteri kadar adhesiv aşınma oluşmaktadır.

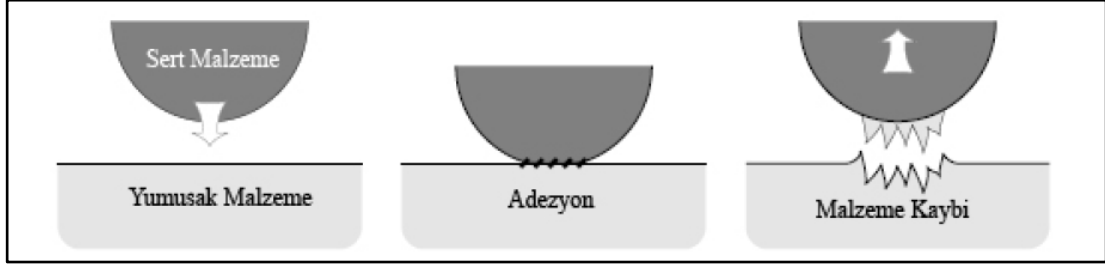
Birleşim kuvveti belirlenirken, yüzey yapısı ve iki metalin karşılıklı çözünürlülüğü de dikkate alınmaktadır. Sürtünme olayını gerçekleştiren iki metalin karşılıklı çözünürlülüğü sıfıra yakın ise, yapışma eğilimi düşüktür. Bundan dolayı birçok metalik malzeme, yapışma eğilimi sergilememektedir. Benzer veya kolay alaşımlanabilen malzemeler arasında ortaya çıkan adhesiv aşınma, kayma hızına ve uygulanan yükün bir fonksiyonuna bağlı olarak gerçekleşmektedir. Genellikle birbiri üzerinde kayan mekanizmalar, adhesiv aşınma hasarına maruz kalmaktadır [69].



Şekil 4.3. Adhesiv aşınma [69].

Özellikle metalik malzemelerde adhesiv aşınma meydana gelmektedir. Yapılan birçok çalışmada, metallerde adhesiv aşınmanın daha sünek malzemede daha sert malzemelere doğru olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, sünek malzemeden kopan parçaların bir kısmının sert malzemeye yapıştığı

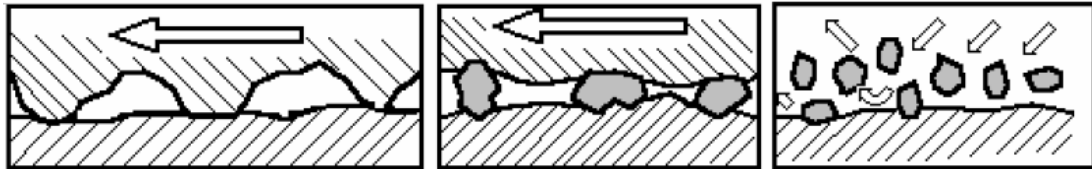
görülmektedir. Bu parçacıkların bir kısmının ise, sürtünme yüzeyinde kaldığı ve yüzeyleri aşındırmaya devam ettiği görülmektedir [73].



Şekil 4.4. Adhesiv aşınmada metal transferi [73].

4.1.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, biri diğerinden daha sert olan iki malzeme arasında gerçekleşen ve sürtüne hareketi sonucu oluşan aşınma türüdür. Temas tipi abrasiv aşınma modunu gösterirken temas, şekli aşındırıcı aşınma türünü göstermektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, bunlar iki elemanlı, üç elemanlı ve erozyon aşınması olarak üç ayrı grupta gösterilebilir.



Şekil 4.5. Abrasiv aşınma mekanizmaları; (a) iki elemanlı abrazyon, (b) üç elemanlı abrazyon, (c) Erozyon [73].

İki elemanlı abrasiv aşınma mekanizmasında sert parçacıklar karşı yüzeydeki malzemeyi aşındırmaktadır. Yüzeyin pürüzlü olması veya sabit aşındırıcı parçacıkların hareketi ile yüzeyden malzeme kaldırılması ile oluşmaktadır. İki elemanlı abrasiv aşınma, zımpara kâğıdı ile yapılan aşınma hareketi ile örneklendirilebilir. Ayrıca parçacıkların sökülerek, kaldırılarak veya kesme ile yerinde koparılması olarak da ifade edilmektedir.

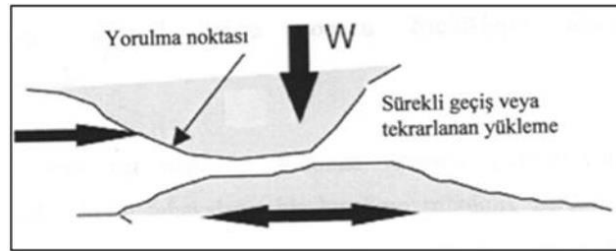
Üç elemanlı abrasiv aşınma, parçacıkları bir yüzeyden aşağıya doğru kaydığında veya yuvarlandığında oluşmaktadır. Yani aşındırıcı malzeme, iki malzeme yüzeyi

arasında kayma ve yuvarlanma ile malzeme kaldırmaktadır. Aşınma sınıflandırılmasının açık veya kapalı olup olmadığını, temas ortamı belirtmektedir. Üç elemanlı abrasiv aşınmanın, iki elemanlı abrasiv aşınmaya göre on kat daha yavaş oluşmaktadır [76].

Abrasiv aşınmayı önlemek için en çok kullanılan yöntem yüzey sertleştirmesidir. Ayrıca, dış ortamdan gelen sert malzemelerin iki yüzey arasına girerek aşınmaya yol açmaması için sızdırmazlık önemlidir.

4.1.3. Yorulma Aşınması

Bir malzemenin yorulma aşınması, sürtünme sırasındaki çevrimsel yüklemelerden kaynaklanmaktadır. Yorulma olayı, uygulanan yükün malzemenin yorulma mukavemetinden daha fazla olduğunda oluşur. Yorulma çatlakları, malzeme yüzeyinden başlayıp yüzey altı bölgelerine kadar yayılarak birbirine bağlanır. Bu nedenle, kopan parçacıklarının malzemeden ayrılmasına (delaminasyona) neden olur. Çatlaklar, yüzeye paralel olarak oluşmaktadır. Sonuç olarak uzun ve ince aşınmış tabakalar oluşmaktadır [75]. Yorulma aşınması tiplerinden biri, iki yüzeyin birbiri üzerinde küçük bir salınımda devam etmesiyle ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Sürtünme kuvveti, yüzey yorulmasına neden olur ve sıkıştırma-gerilme gerilimleri değiştirir. Şekil 4.6'da, yorulma aşınması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Yorulma aşınması [77].

4.1.4. Korozyon Aşınması

Sürtünme yüzeylerinin korozyona uğraması ile birlikte aşınma hızlanabilmektedir. Sürtünme etkisi ile yüzeylerde ısınma meydana gelmektedir. Sıcaklıkta kimyasal reaksiyonlara ve çatlaklara sebep olmaktadır. Oksit tabakalarının yüzeyden uzaklaştırılması ise korozyonu arttırmaktadır. Yüzeyden kopan sert oksit parçacıkları, üç elemanlı abrasiv aşınma mekanizması yardımıyla aşınmayı arttırmaktadır. Atmosferik ortamda iki yüzey kenarlarından ve abrasiv aşınmanın neden olduğu mikro çatlaklardan malzemeye girebilir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve atmosferle temas olduğundan dolayı, daha çok kuru kayma şartlarında oluşmaktadır. Aşındırıcı ortam ile aşınmış malzeme arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar, bu aşınmanın temel nedenini oluşturur. Korozyon aşınması oksidasyon, aşınma olarak da adlandırılmaktadır. Korozyon aşınmasını engellemek için özel yağlayıcılar kullanılmaktadır [72].

4.1.5. Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, kısa bir zamanda ve kısa kayma hareketleri ile katı/sıvı parçacıkların malzemenin yüzeyine çarptırılması ile oluşmaktadır [78]. Sürekli tekrarlanan deformasyonlar nedeniyle malzeme yüzeyinden parçacıklar kopmaktadır. Sanayide sürekli karşılaşılan bir sorundur. Parçacıkların şekli, sertliği, çarpma hızı ve çarpma açısı, aşınma yüzeyinde oluşan etkenlerin en önemli faktörlerindedir. Sünek malzemelerde çarpma açısı maksimum 30° olduğunda çarpma hızı görülürken, daha sert malzemeler için çarpma açısı yüzeye olduğu takdirde aşınma hızının maksimum olduğu görülmektedir [79].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, A356 Al alaşım tozlarına % 1 (% ağırlık) nano Al_2O_3 tozları ilave edilmiştir. Hazırlanan tozlar farklı sürelerde (1, 2, 3 ve 4 saat) mekanik (MA/MÖ) olarak öğütülmüştür. Bu aşamada, optimum öğütme süresinin belirlenmesi amacıyla MA/MÖ süresinin toz boyutu, sertlik, yoğunluk, mikro yapı ve aşınma davranışlarındaki etkisi incelenerek, deneysel çalışmalar için optimum MA/MÖ süresi belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, ilk aşamada belirlenen optimum MA/MÖ süresi kullanılarak, A356 Al alaşım tozlarına farklı miktarlarda (%0,25, %0,5, %1, %2) nano boyutta Al_2O_3 tozları ilave edilmiştir. Yapılan MA/MÖ işlemleri sonucunda elde edilen alüminyum kompozitlerin yoğunluk, sertlik, mikroyapı ve aşınma davranışları incelenmiştir

5.1. TOZLARIN HAZIRLANMASI

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak A356 Al alaşım tozları kullanılmıştır. A356 Al alaşım toz LPW-Teknoloji Ltd.'den temin (20-63 μm) edilmiştir. Ticari olarak elde edilen A356 Al alaşım tozlarının kimyasal bileşimi, Çizelge 5.1. de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Ticari olarak elde edilen A356 Al alaşım tozlarının kimyasal bileşimi.

Element	Si	Mn	Mg	Fe	N	O	Ti	Cu	Zn	Diğer	Al
% Ağırlık	7,5	0,7	0,4	0,2	0,2	0,2	0,15	0,05	0,1	0,13	Kalan

Deneysel çalışmalarda nano Al_2O_3 takviyeli olarak üretilen alüminyum kompozitlerin kimyasal bileşimi, Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Nano Al₂O₃ tozlarının kimyasal bileşimi.

Element	Fe	Na	Ca	Cr	Mn	Co	Al ₂ O ₃
% Ağırlık	<80 ppm	<70 ppm	<25 ppm	<4 ppm	<3 ppm	<2 ppm	>99 %

5.1.1. Nano Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Üretimi

Nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli alüminyum kompozitlerin üretimi için gerekli olan tozlar, 1/10000 g hassasiyetindeki hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan matris/takviye toz karışımları, Şekil 5.1’de verilen 225 ml kapasiteli Fritsch Pulverisette marka tek öğütme hücreli planeter tipi MA/MÖ cihazında mekanik öğütülmüştür. Mekanik öğütme işlemlerinde 8 mm paslanmaz çelik bilye, 10:1 bilye/toz oranı, % 50 kap doluluk oranı ve 400 rpm döndürme hızında mekanik alaşımlama/öğütme cihazı kullanılmıştır. Ayrıca öğütme sırasında topaklanmayı engellemek amacıyla işlem kontrol kimyasalı olarak ağırlıkça % 1 stearik asit kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Fritsch Pulverisette marka, tek hücreli bilyeli öğütme cihazı.

Al matrisli nano kompozitlerin üretiminin birinci aşamasında, MA/MÖ işlemleri %1 (% ağırlık) Nano Al₂O₃ ilave edilen karışım tozlar, farklı sürelerde (1, 2, 3 ve 4 saat) mekanik öğütülmüş ve optimum öğütme süresi belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, farklı miktarlarda (%0,25, %0,5, %1, %2) nano Al₂O₃ tozları ilave edilerek belirlenen optimum öğütme süresinde mekanik öğütülmüştür. MA/MÖ işlemi sırasında tozların ısınmasını engellemek amacıyla, her 15 dakikalık öğütme sonrası cihaz durdurularak 15 dakika beklemeye alınmıştır.

5.1.2. Toz Boyut Analizi

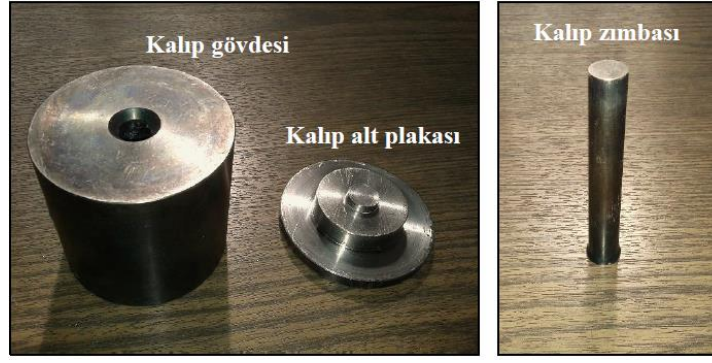
MA/MÖ işlemleri sonucunda elde edilen kompozit tozlarının mikroyapı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla üretilen kompozit tozlara toz boyut analizleri yapılmıştır. Toz boyutu analizleri, Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları'nda Malvern marka, Mastersizer 3000 model cihazda yapılmıştır. Toz boyutu ölçümlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü, Şekil 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5 2. Toz boyutu ölçümlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü.

5.2. TOZ ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ

MA/MÖ yöntemi ile üretilen nano Al_2O_3 takviyeli alüminyum kompozit tozlar soğuk preslenerek (520 MPa) $\varnothing 12 \times 8$ mm boyutlarında parçalar üretilmiştir. Soğuk presleme işlemi, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Üretim Metalujisi Laboratuvarında bulunan tek eksenli 50 ton yük kapasiteli "HİDROLİK SAN" marka preste yapılmıştır. Soğuk şekillendirme işleminde kullanılan kalıp, Şekil 5.3.'te verilmektedir. Şekil 5.4'de ise, soğuk presleme işlemlerinde kullanılan presin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.3. Soğuk presleme işleminde kullanılan kalıbın görüntüsü.



Şekil 5.4. Soğuk pres işleminin yapıldığı hidrolik presin görüntüsü.

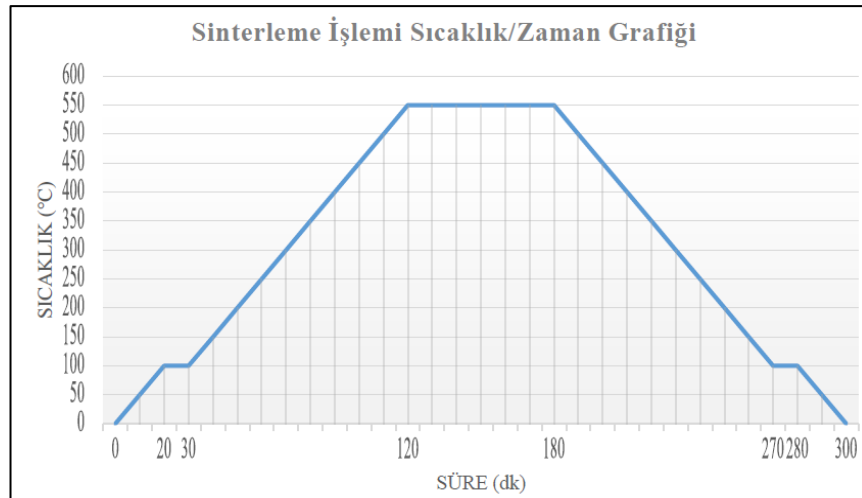
5.3. SİNERLEME İŞLEMİ

Soğuk presleme işlemi ile ön şekillendirilen nano Al_2O_3 takviyeli alüminyum kompozit numuneler, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan vakumlu ısıtma işlemi sinterleme fırınında sinterlenmiştir. Sinterleme fırınının görüntüsü, Şekil 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.5. Sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısı işlem sinterleme fırının görüntüsü.

Sinterleme işlemi 4 °C/dak ısıtma/soğutma hızı ve 550 °C sıcaklıkta yapılmıştır. 520 MPa ile ön şekillendirilen nano takviyeli alüminyum kompozit 10^{-6} milibar vakum ortamında 1 saat sinterlendikten sonra fırın ortamında oda sıcaklığında soğutulmuştur. Sinterleme işleminde gerçekleşen zaman-sıcaklık değişimi grafiği, Şekil 5.6’da verilmektedir.



Şekil 5.6. Sinterleme ısı işleminde zaman-sıcaklık grafiği.

5.4. METALOGRAFİK İNCELEMELER İÇİN NUMUNE HAZIRLAMASI

Sinterlenen nano Al_2O_3 takviyeli alüminyum kompozit numunelere standart metalografik işlemler uygulanmıştır. Numune hazırlama ve partlatma işlemleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan PRESICA marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazında yapılmıştır. Şekil 5.7’de cihazın görüntüsü verilmiştir. İstenilen yüzey kalitesine ulaşılan numuneler Keller’s reaktifi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCl , 1 ml HF) ile 40-60 sn arasında dağlanmıştır.



Şekil 5.7. Polisaj cihazının gösterimi.

5.5. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Sinterlenen nano Al_2O_3 takviyeli alüminyum kompozitlerin yoğunluk ölçümleri Archimedes prensibine göre, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan PRESICA marka XB200 h model, yoğunluk ölçüm cihazında yapılmıştır.

5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Yoğunluk ölçümlerinden sonra kompozitlerin sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan ve görüntüsü Şekil 5.8. de verilen SHIMADZU marka mikro sertlik cihazında yapılmıştır. Sertlikler (HV0,2) üçer numuneden ve 5 farklı bölgeden yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik ölçüm cihazı.

5.7. AŞINMA TESTLERİ

Aşınma testleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Laboratuvarında bulunan standart pin-on disk türü aşınma cihazında yapılmıştır. Şekil 5.9'da aşınma testlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü verilmektedir. Testlerde, 1 ms^{-1} kayma hızı, 30 N yük ve dört farklı kayma mesafesi (500, 100, 1500 ve 2000) kullanılmıştır. Sonuçların tekrarlanabilirliğinin belirlenmesi için her bir numune üç kere test edilmiştir. Karşılık malzemesi olarak $\text{Ø}230 \text{ mm}$ çapında, 20 mm kalınlığındaki (64 HRC sertliğinde) AISI 4140 çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testleri ASTM-G99-05 standardına göre ağırlık kayıpları belirlendikten sonra, aşınma oranlarının hesaplanmasında Eşitlik 5.1.'de verilen denklem kullanılmıştır. Aşınma testleri sonrasında meydana gelen ağırlık kayıplarının belirlenmesi için, $1/10000 \text{ g}$ hassasiyetindeki hassas terazi kullanılmıştır. Her test sonrasında karşılık diski yüzeyi zımparalanarak aseton ile temizlenmiştir.



Şekil 5.9. Aşınma cihazı görüntüsü.

$$W_a = \frac{\Delta G(g)}{d.P.S. \left(\frac{g}{cm^3} \cdot N.m \right)} \quad (5.1.)$$

Burada;

Wa : Aşınma oranı (mm³/Nm)

ΔG : Ağırlık kaybı (g)

P : Yükleme ağırlığı (N)

S : Kayma yolu (m)

d : Yoğunluk (g/cm³)'dur.

5.8. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM+EDS) MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Nano Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin mikroyapı değişimlerini belirlemek için SEM+EDS incelemeleri yapılmıştır. SEM ve EDS incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Laboratuvarı'nda bulunan Zeiss marka Ultra/Plus (FEG) model (Şekil 5.10) taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır.



Şekil 5.10. SEM ve EDS deneylerinin yapıldığı taramalı elektron mikroskobunun görüntüsü.

5.9. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

Üretilen nano Al_2O_3 takviyeli alimünyum kompozitlerde oluşan fazların belirlenmesi amacıyla, Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku marka XRD cihazında X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılmıştır.

BÖLÜM 6

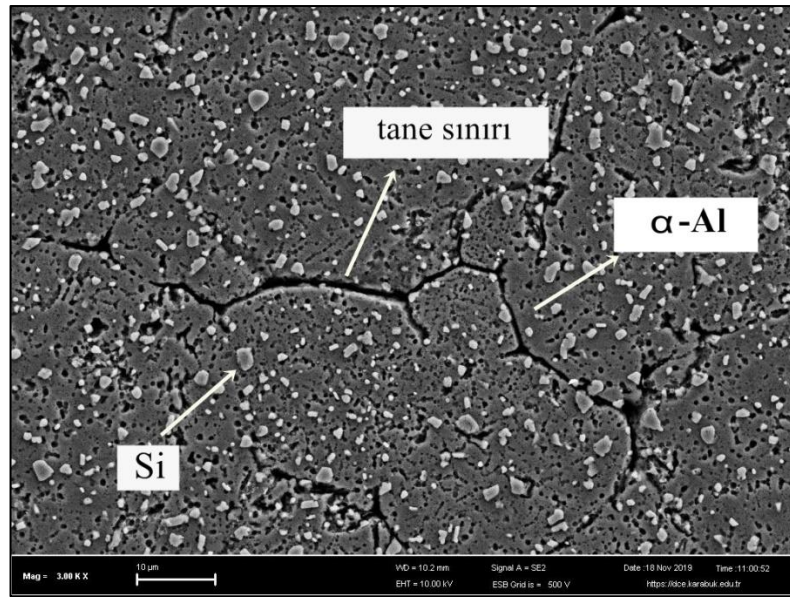
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı miktarlarda (%0,25, %0,5, %1, %2) nano Al_2O_3 ilave edilen Al matrisli kompozitler üretilerek mikroyapıları, yoğunlukları, sertlikleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular mikro yapı incelemeleri, yoğunluk ve sertlik sonuçlarının incelenmesi, aşınma deney sonuçlarının incelenmesi ve aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerinin incelenmesi, ilgili başlıklar altında verilmiştir.

6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

6.1.1. Matris Malzemesinin Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 6.1’de, ön şekillendirme sonrası sinterlenen A356 Al matris malzemesinin SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 6.1. A356 Al matrisin sinterleme sonrası SEM görüntüsü.

Çizelge 6.1’ de matris malzemesinin (A356 Al) sinterleme sonrası yoğunluğu ve gözenek miktarı verilmiştir. Sinterleme işlemi tozların yüzey enerjilerini düşürürken tane sınırlarının yüzey enerjilerini artırdığı için tane büyümesi gerçekleşir.

Çizelge 6.1. A356 Al alaşımı teorik, deneysel ve göreceli yoğunluğu ile gözenek miktarı.

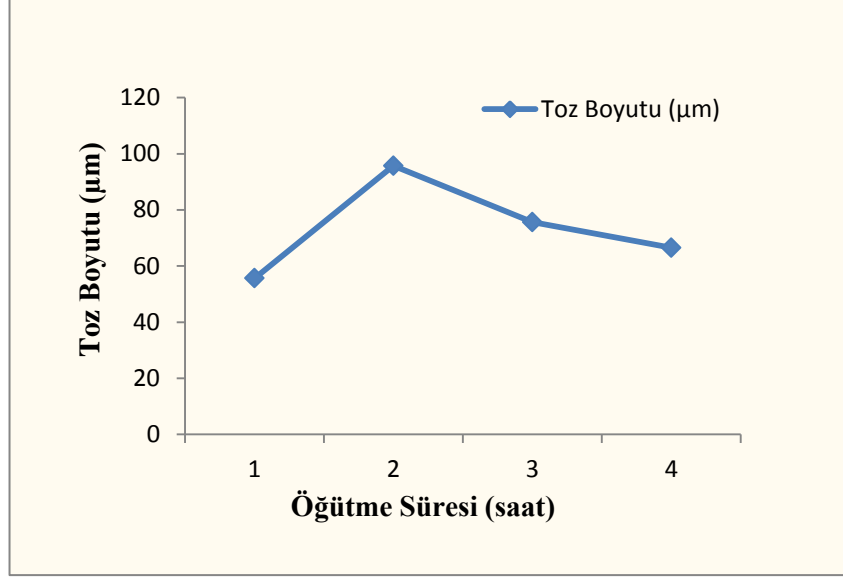
A356 Al Alaşımı	Teorik Yoğunluk(g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk(g/cm ³)	Göreceli Yoğunluk(g/cm ³)	Gözenek Miktarı(%)
	2,67	2,623	0,982	1,760

Şekil 6.1’ de, sinterlenen A356 Al alaşım matris tozların SEM görüntülerinde tane sınırları net bir şekilde görülmektedir. Sinterleme sonrasında mikroyapıda gözenek miktarının çok düşük olduğu ve yüzeyde Si parçacıklarının (Gri bölgeler) olduğu görülmektedir.

Bilindiği gibi toz boyutu ile yüzey enerjisi arasında ters orantı söz konusudur. MA/MÖ işlemi sırasında boyutları küçülen tozların yüzey alanları azaldığı için yüzey enerjileri artmaktadır. Sinterleme işlemi ile tozların yüzey enerjileri azalırken, yüksek sıcaklıklarda atomik yayınma hızlanmaktadır. Sinterleme sırasında boyun verme, boyun büyümesi ve tamamen birleşme süreçleri gerçekleşmektedir. Bu aşamaların her birinde tozların yüzey alanları artarken, yüzey enerjileri azalmaktadır. Sinterleme çekmesi (itici güç) yoğunluk artışıyla birlikte, gözenek miktarının azalmasına neden olmaktadır [31].

6.1.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Mikroyapıya Etkisi

Şekil 6.2’de, %1 oranında 20µm boyutta Al₂O₃ ile takviye edilen A356 Al matrisli kompozitin farklı mekanik öğütme sürelerine göre parçacık boyutu değişimleri verilmektedir.



Şekil 6.2. Farklı mekanik öğütme sürelerine göre parçacık boyutu değişimi.

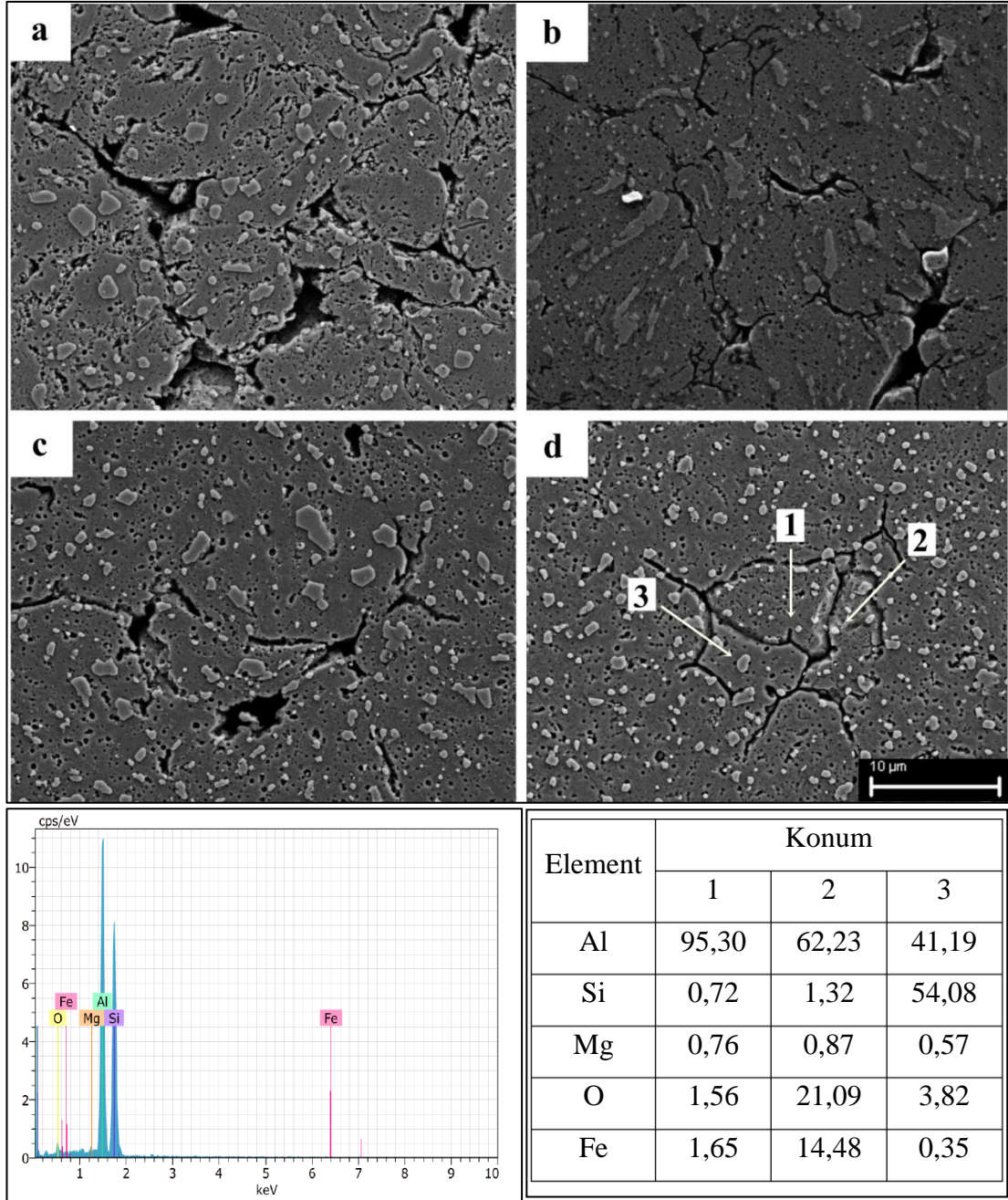
Şekil 6.2’de verilen parçacık boyut analizi sonucunda mekanik öğütme sürelerine göre toz boyularındaki değişim görülmektedir. En küçük toz boyutu, 1 saat mekanik öğütülen kompozit tozlarda (55,6 µm) elde edilirken, en büyük toz boyutu ise 2 saat mekanik öğütülen tozlarda (95,7 µm) elde edilmiştir. MÖ işlemi boyunca tozlar, bilyeler ile çarpışarak plastik deformasyona uğramaktadır. Bu işlem boyunca tozlarda, ezilme, soğuk kaynaklanma, deformasyon sertleşmesi ve bu sertleşme sonucunda ise kırılmalar meydana gelmektedir [60]. Mekanik öğütme süresi arttıkça toz boyutunda küçülme beklenmektedir. Ancak, Şekil 6.2’den anlaşıldığı gibi 2 saat mekanik öğütme süresi boyunca toz boyutundaki küçülme yerine büyüme gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, soğuk kaynaklanmadır. Mekanik öğütme işlemi sırasında hareket halindeki enerji yüklü bilyeler ve kap duvarları arasında ezilen toz parçacıkları soğuk kaynaklanarak, büyüme eğilimi sergilemektedir. Mekanik öğütmenin devam etmesiyle, soğuk kaynaklanan tozlar kırılarak küçülmeye başlamaktadır. Bunun nedeni, artan plastik deformasyon sonucunda tozların pekleşerek kırılmasıdır. Bu durum 3 ve 4 saat mekanik öğütülen tozlarda da görülmektedir. 3 saat öğütme sonrasında 75 µm olan toz boyutu, 4 saat mekanik öğütüldüğünde 67 µm olmaktadır. Çizelge 6.2’de, farklı sürelerde mekanik öğütülen % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al kompozitlerin gözeneklilik miktarı verilmektedir.

Çizelge 6.2. Farklı sürelerde öğütülen %1 nano Al₂O₃ takviyeli Al kompozitlerin kompozitin toz boyutu ve gözenek miktarları.

Öğütme Süresi	1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
Toz Boyutu (µm)	56	96	75	67
Gözenek Miktarı (%)	2,852	3,263	3,151	4,495

Mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla birlikte yapıda bulunan gözenek miktarı artmaktadır (Çizelge 6.2). 1 saat mekanik öğütülen kompozitlerde gözenek miktarında % 2,852 olduğu, 4 saatlik öğütme süresinde ise % 4,495 olduğu görülmektedir. Çizelge 6.2’de verilen parçacık boyutu verileri bunu desteklemektedir. 2 saatlik mekanik öğütülen % 1 nano takviyeli AMK numunenin gözeneklilik miktarı % 3,263 iken, 3 saat mekanik öğütülen % 1 nano takviyeli AMK numunenin gözeneklilik miktarı % 3,151’dir ve yapı içerisinde aglomerasyon ile boyutunda değişiklikler gösteren Al-Si ötektiklerinin küçüldüğü görülmektedir. Artan mekanik öğütme süresi ile birlikte toz parçacıkları, deformasyon sertleşmesine maruz kalmaktadır. Mekanik alaşımla sırasında deformasyon sertleşmesine uğrayan toz parçacıkları, toz tartım ve ön şekillendirme işlemleri sırasında yüzeyde oksijen ile tepkimeye girerek sertleşmektedir. Bu nedenden dolayı, sıkıştırma işlemi sırasında şekil değiştirmemekle birlikte, ham malzemenin paketlenmesini kısıtlamaktadır [82].

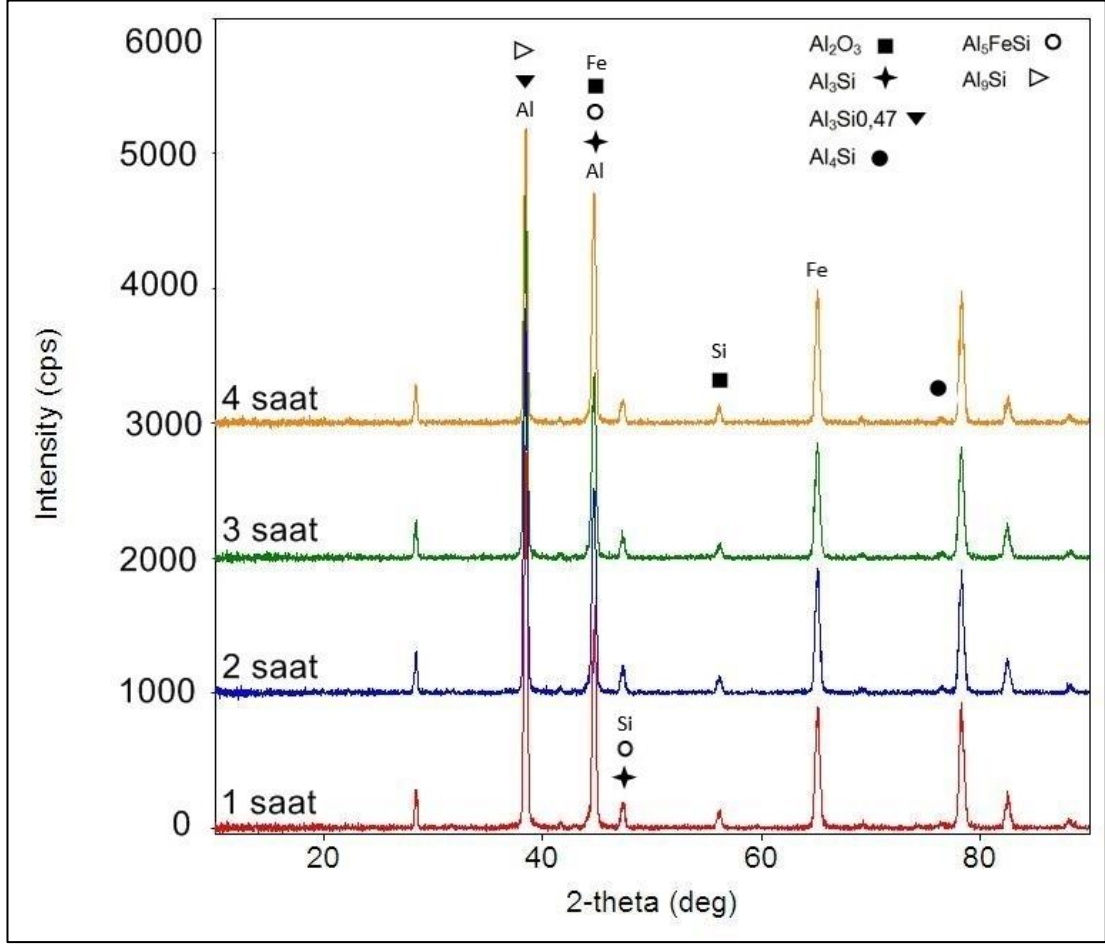
Şekil 6.3’ te dört farklı öğütme süresinde mekanik alaşımlanan %1 nano Al₂O₃ takviye edilen Al kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı mekanik öğütme sürelerinde üretilmiş %1 nano Al_2O_3 takviyeli A356 Al matrisli kompozit numunelerin a)1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat MÖ sonrası SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

Şekil 6.3'te verilen farklı sürelerde mekanik öğütülen Al kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, görüntülerdeki siyah bölgelerin gözenek olduğu net bir şekilde görülmektedir. Şekil 6.3'te verilen nokta EDS analiz sonuçlarında, Konum 1 matris, Konum 2'de takviye elemanı olan nano Al_2O_3 , Konum 3'de ise Al-Si ötektiği açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 6.4’de farklı mekanik öğütme sürelerinde öğütülen %1 nano Al_2O_3 takviyeli A356 kompozitlerin XRD sonuçları verilmektedir.

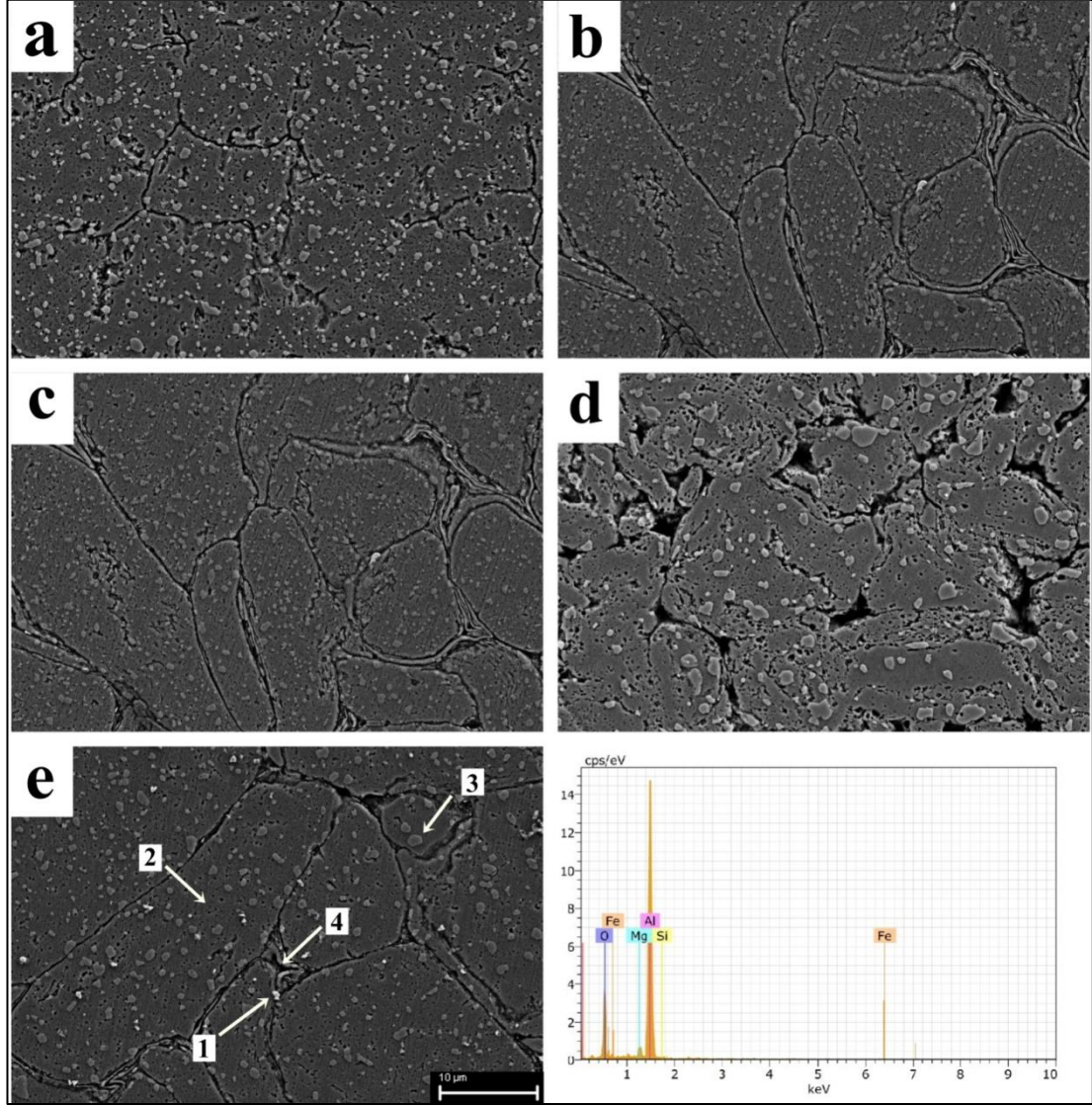


Şekil 6.4. Farklı mekanik öğütme sürelerinde öğütülen %1 nano Al_2O_3 takviyeli A356 Al kompozitin XRD sonuçları.

Şekil 6.4’de verilen XRD analizi sonuçları incelendiğinde, alüminyum 38,61 -44,83 ve nano Al_2O_3 takviye elemanı ise 43,47 – 57,95 2θ derecelerinde saptanmıştır. Şekil 6.3’de verilen SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde, yapıdaki plakamsı şekillerin Al-Si ötektiklerinin, Şekil 6.4’deki XRD sonuçlarında verilen Al_3Si , $Al_3Si_{0,47}$, Al_4Si ve Al_9Si bileşikleri olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde iğnemsı veya plaka şeklinde bulunan Al_5FeSi bileşikleri 43,92 – 46,7 2θ derecelerinde görülmektedir. Bu bileşikler malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [83] .

6.1.3. Nano Al₂O₃ Miktarının Mikroyapıya Etkisi

Şekil 6.5’de, Al alaşımı ve farklı miktarlarda nano Al₂O₃ ilave edilen ve 1 saat mekanik öğütülen Al matrisli kompozitlerin mikro yapı SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları verilmektedir.



Konum	Al	Si	Mg	O	Fe
1	10,84	81,86	0,74	6,56	0
2	97,89	0,06	0,76	1,29	0
3	7,93	89,32	0,41	0,66	1,68
4	67,82	0,89	2,41	28,88	0

Şekil 6. 5. a) Takviyesiz A356 Al alaşımı, b) % 0,25, c) % 0,5, d) %1, e) %2 nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

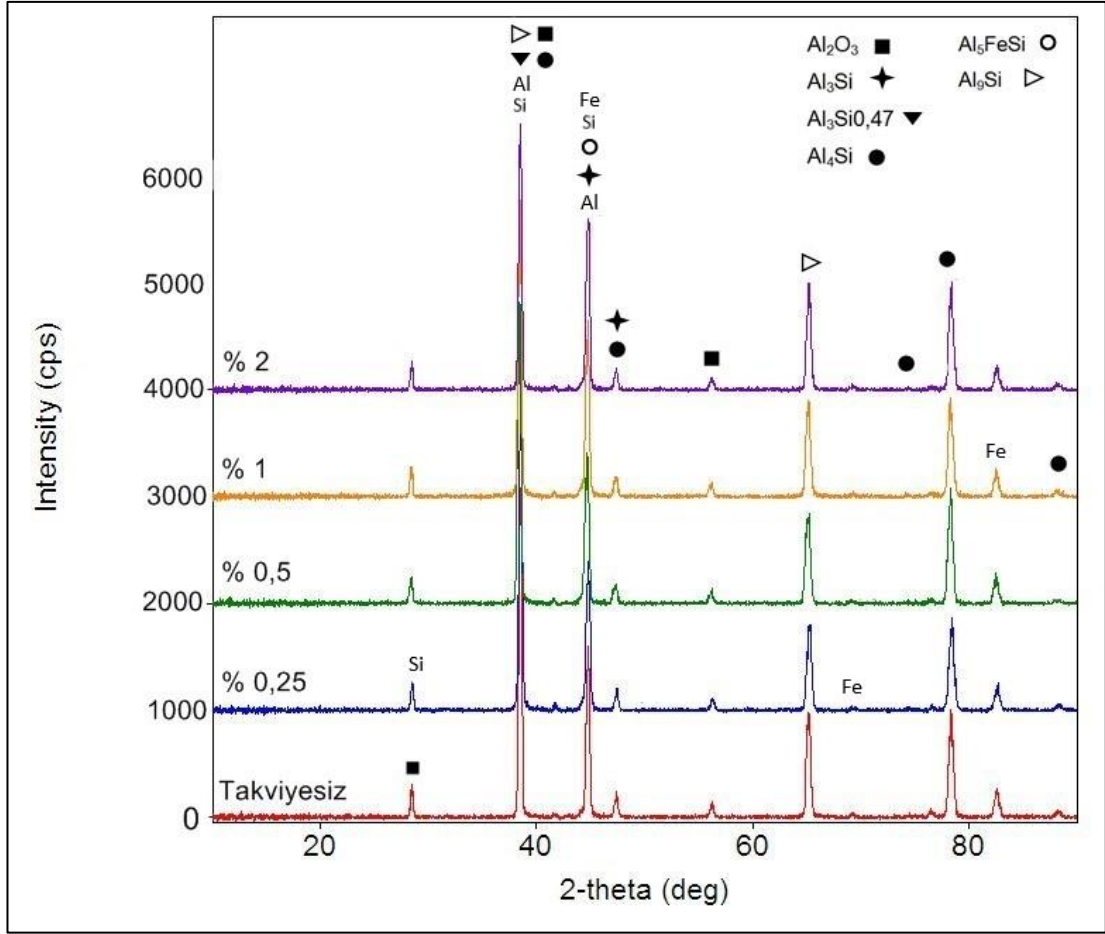
Şekil 6.5'te farklı miktarlarda ilave edilen nano Al_2O_3 parçacıklarının (beyaz noktalar) yapıda matrise gömüldüğü ve tane sınırlarına yakın bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. İlave edilen takviye elemanı miktarı arttıkça yapı içerisindeki miktarı da artmaktadır. % 0,25 oranında ilave edilen nano Al_2O_3 parçacıkları tane sınırlarında az miktarda görülmektedir. % 2 nano Al_2O_3 ilave edilen kompozitin SEM görüntüsü (e) incelendiğinde, takviye elemanı miktarının arttığı, tane sınırları ve tane sınırlarına yakın bölgelerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.5.'te farklı miktarlarda nano Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozitin EDS sonuçları verilmiştir. EDS sonuçları incelendiğinde, Konum 2 ve 4 takviye fazını göstermektedir. Konum 1 matris ve Konum 3'te ise Al-Si ötektiklerinin olduğu anlaşılmaktadır. Farklı takviye miktarına bağlı olarak AMK'lerin gözenek miktarları, Çizelge 6.3'te verilmektedir.

Çizelge 6.3. Farklı miktarlarda nano Al_2O_3 takviye edilen Al matrisli kompozitlerin gözeneklilik miktarları.

Takviye Oranı (%)	0	0,25	0,5	1	2
Gözenek Miktarı (%)	1,760	4,794	2,098	2,852	3,677

AMK malzemelerde takviye elemanı miktarı arttıkça, yapıda oluşan gözenek miktarı artmaktadır. Matris malzemesi ile seramik takviye fazı arasındaki ısı genişmesi katsayısı farkından dolayı, tam anlamı ile birleşme olmadığı ve yapıda gözenek miktarının arttığı gözlemlenmektedir. Isıl genişleme katsayısı nedeniyle nano takviyeli kompozitlerin aşınma dayanımında bir miktar azalma olması beklenmektedir. Buna karşılık tane sınırlarında oluşan dislokasyon yığılmaları ise dayanım artışına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle bu iki olay birbirini kompanze etme fonksiyonu sergilemektedir. Ayrıca nano boyutta takviye fazının aglomere olması nedeniyle temas yüzey alanı azalmaktadır. Bundan dolayı, takviye miktarı arttıkça gözenek miktarında artmaktadır [84].

Şekil 6.6'da 1 saat mekanik öğütülen farklı miktarda nano Al_2O_3 ilave edilen Al kompozitin XRD sonuçları incelendiğinde, grafiğin tepe noktaları Şekil 6.5'de verilen EDS analiz sonuçlarındaki konum 1 ve 3'te belirtilen Al-Si ötektiklerine karşılık gelmektedir. Ayrıca, konum 2'deki Al elementi ve konum 4'deki takviye elemanı çoğunlukla 38,61 2θ derecesinde saptanmıştır.



Şekil 6.6. 1 saat mekanik öğütülen farklı miktarda nano Al_2O_3 ilave edilen Al kompozitin XRD sonuçları.

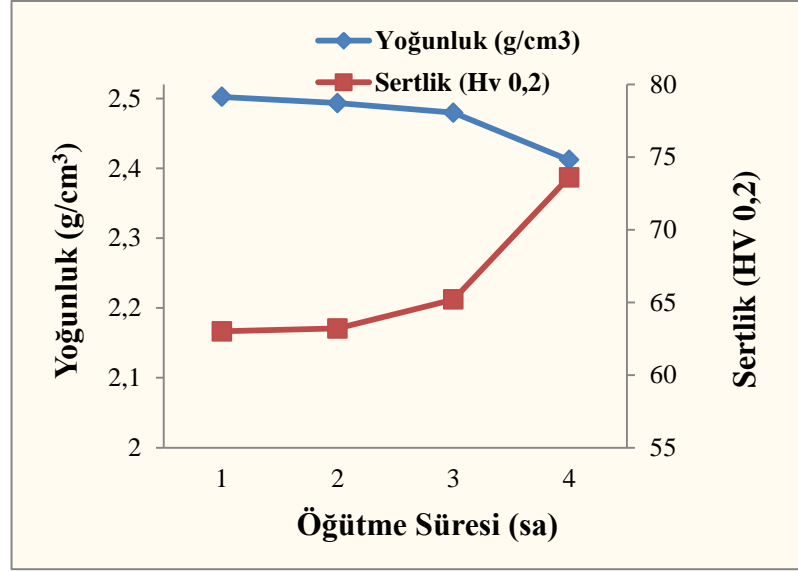
6.3. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARININ İNCELENMESİ

6.3.1. Matris Malzemesinin Yoğunluk ve Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi

MÖ yöntemiyle üretilen A356 Al alaşımının yoğunluğu $2,623 \text{ g/cm}^3$, ortalama sertliği ise 46,0 HVM(0,2) olarak ölçülmüştür. Çizelge 6.1’de, gözenek miktarı, verilmektedir. Toz şekillendirme işlemleri sırasında alaşım tozları oksijen ile tepkime girdiği için yüzeylerinde ince bir oksit tabakası oluşmaktadır. Bu nedenle, sertleşen tozların sıkıştırma ve paketlenme işlemleri zorlaşmaktadır. Bu olay, sinterleme işlemi sırasında sinterleme aşamalarını geciktirmekte ve yapıda kapalı gözeneklerin oluşmasına neden olmaktadır [62].

6.3.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Yoğunluk ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi

Şekil 6.7’de, % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al matrisli nano kompozitlerin farklı mekanik öğütme sürelerine göre sertlik ve yoğunluk değişimleri verilmiştir.



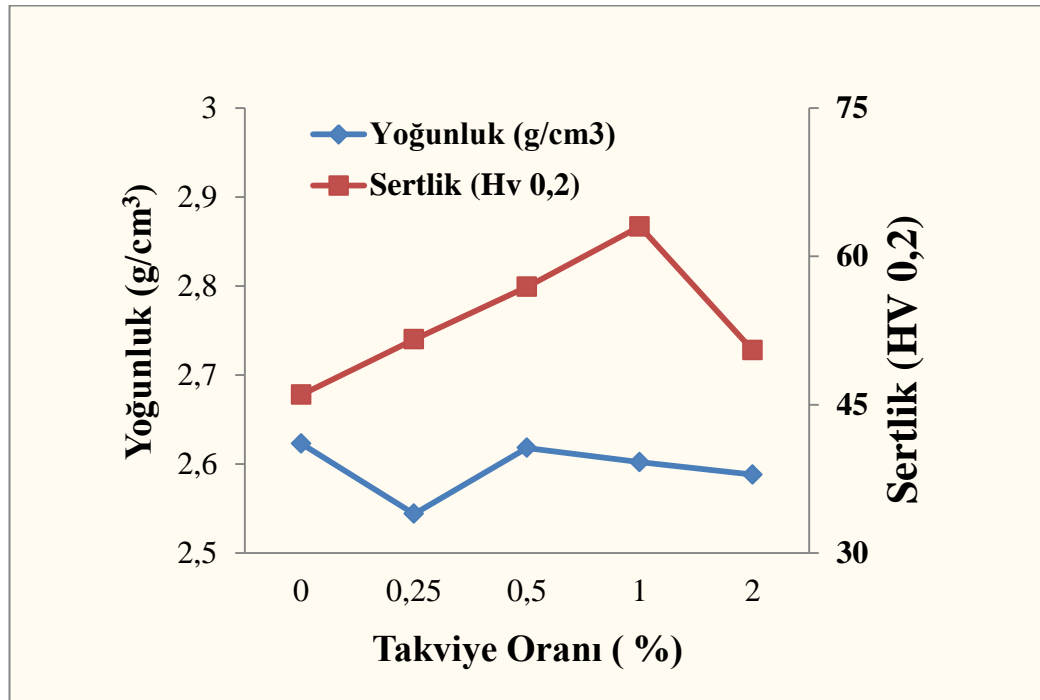
Şekil 6.7. Farklı mekanik öğütme sürelerine göre sertlik ve yoğunluk değişimleri.

Şekil 6.7’de verilen nano Al₂O₃ takviyeli alüminyum nano kompozitlerde mekanik öğütme süresi arttıkça, üretilen kompozitlerin sertliklerinin arttığı görülmektedir. En yüksek sertlik 4 saat (74 HVM), en düşük sertlik 1 saat (63 HVM) mekanik öğütme sürelerinde elde edilmiştir. 2 saat mekanik öğütülen kompozitlerde sertlik 63,2 HVM, 3 saat mekanik öğütülen kompozitlerde ise 65,2 HVM sertlik ölçülmüştür. Mekanik öğütme süresi arttıkça, tane boyutu küçülmektedir. Hall-Petch teorisine göre yapı içerisinde dislokasyon hareketine direnç gösteren tane sınır alanı arttıkça (küçük tanelerin sayısı) malzeme sertliğide artmaktadır. Şekil 6.7’de, mekanik öğütme süresi arttıkça sertliğin arttığı görülmektedir. Ancak, Çizelge 6.2’de verilen farklı MÖ süresine bağlı olarak elde edilen toz boyutları, Hall-Petch eşitliği ile açıklanamamaktadır. Mekanik öğütme süresi arttıkça, toz parçacıklarında deformasyon sertleşmesi artmaktadır. Bu durum kompozitin sertliğini ve gözenek miktarını arttırmaktadır. Şekil 6.7 incelendiğinde, mekanik öğütme süreleri arttıkça kompozitin yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. En yüksek yoğunluk değeri 1 saat (2,60 g/cm³), en düşük yoğunluk değeri 4 saat (2,41 g/cm³) mekanik öğütülen nano

Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde görülmektedir. 2 saatlik mekanik öğütülen kompozitin yoğunluğu $2,59 \text{ g/cm}^3$ iken 3 saat mekanik öğütülen kompozitin yoğunluğu $2,55 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Yapıda gözenek miktarı arttıkça kompozitin yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum, Çizelge 6.2'de verilen farklı sürelerde mekanik öğütülen nano Al_2O_3 takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin gözenek miktarları ile desteklenmektedir.

6.3.3. Nano Al_2O_3 Miktarının Yoğunluk ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi

Şekil 6.8'da, farklı miktarlarda nano Al_2O_3 ilave edilen Al matrisli kompozit malzemelerin yoğunluk – sertlik değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.8. Farklı miktarlarda nano Al_2O_3 ilave edilen Al matrisli kompozitlerin yoğunluk - sertlik değişimleri.

Şekil 6.8'de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, nano Al_2O_3 takviyeli Al kompozitlerin sertliklerinin % 1 nano Al_2O_3 ($2,602 \text{ g/cm}^3 / 63,0 \text{ HVM}$) ilavesine kadar arttığı, sonra ise azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, takviye elemanı olarak kullanılan nano boyuttaki Al_2O_3 tozlarının yoğunluğunun ($3,89 \text{ g/cm}^3$) matris malzemesinin yoğunluğundan ($2,67 \text{ g/cm}^3$) yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

% 2 nano Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve sertlik sonuçları incelendiğinde, yoğunluğunun (2,588 g/cm³) sertliği ise (50,5 HVM) olduğu görülmektedir. MA/MÖ işlemleri ile üretilen kompozit malzemelerde gözenek miktarındaki artış sertliği etkilemektedir [82]. Bu durum, yapıdaki gözenek miktarındaki artışla açıklanabilir. Çizelge 6.4’de farklı miktarlarda nano Al₂O₃ miktarına bağlı olarak, AMK malzemenin teorik yoğunluğu, deneysel ve göreceli yoğunlukları ile gözenek miktarları verilmiştir.

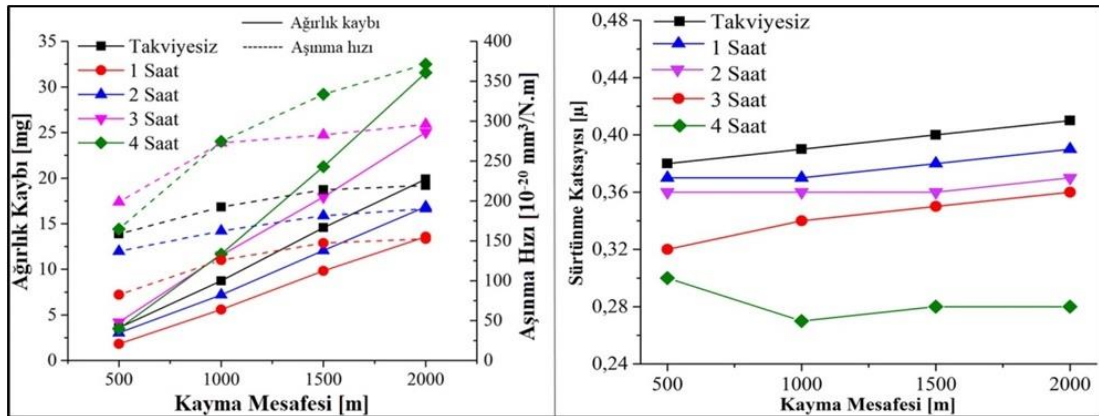
Çizelge 6.4. Farklı miktarlarda nano Al₂O₃ ilave edilen 1 saat mekanik öğütülen Al kompozitlerin yoğunluk ve gözenek değişimleri.

Al ₂ O ₃ Miktarı (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Göreceli Yoğunluk	Gözenek Miktarı (%)
0,25	2,672	2,544	0,952	4,794
0,5	2,674	2,618	0,979	2,098
1	2,678	2,602	0,971	2,852
2	2,687	2,588	0,963	3,677

6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

6.4.2. Farklı MA/MÖ Sürelerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

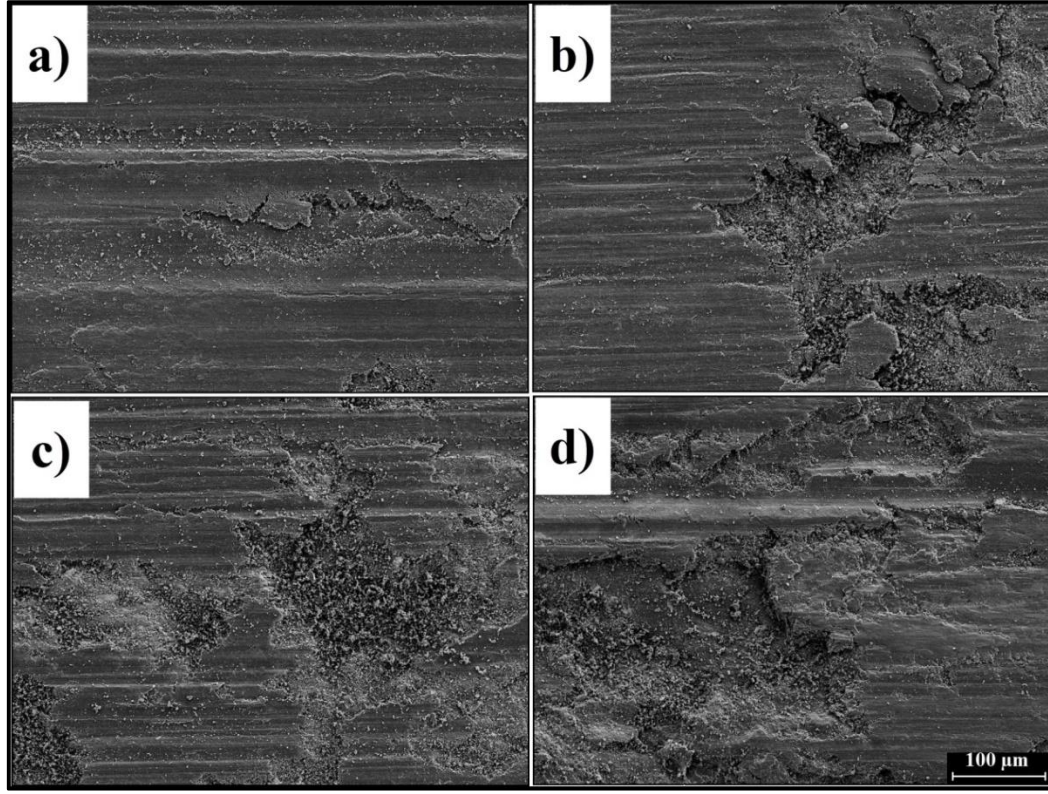
Farklı sürelerde mekanik öğütülen Al matrisli kompozitlerin 30 N yük altında ve dört farklı kayma mesafesinde yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları, Şekil 6.9’da verilmektedir.



Şekil 6.9. Farklı sürelerde mekanik öğütülmüş a) ağırlık kaybı ve aşınma hızları, b) sürtünme katsayıları.

Şekil 6.9’da verilen, farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılmış nano Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınma testi sonuçlarından elde edilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, en yüksek ağırlık kaybı 4 saat mekanik alaşımlandırılmış kompozitlerde elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı 1 saat mekanik alaşımlandırılan kompozitlerde elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen ağırlık kaybı sonuçları hesaplanan aşınma hızı sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Ancak, Şekil 6.8’de verilen sertlik sonuçları ile aşınma testleri sonucunda elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma hızları arasında bir uyumsuzluk olduğu görülmektedir. Aşınma testleri sonucunda en yüksek sertliğe sahip kompozitin en az aşınması beklenirken, en yüksek ağırlık kaybı bu kompozitte görülmektedir. Bunun nedeni, mikroyapıda yüksek miktarlarda gözeneklerden (Çizelge 6.2) kaynaklandığı düşünülmektedir. Gözenek miktarı aşınma testi sırasında deformasyon sertleşmesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum aşınma direncini düşürmekte, ağırlık kaybı ve aşınma hızını artırmaktadır.

Ayrıca, toz boyutu aşınma davranışını etkileyen önemli bir faktördür. Aşınma testi sırasında büyük parçacık kopmaları ağırlık kaybını ve aşınma oranını artırmaktadır. Mekanik öğütme süresince oluşan aglomerasyon ile birlikte toz parçacıklarında soğuk kaynaklanma oluşmaktadır. Toz boyutu büyüdükçe aşınma testi sırasında kopan parçacık boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, Şekil 6.9’da verilen sürtünme katsayıları ve Şekil 6.8’de verilen sertlik değerleri incelendiğinde, en düşük ağırlık kaybı ve aşınma hızı elde edilmesi beklenen 4 saat mekanik öğütülen kompozitlerde, mikroyapıda gözenek miktarının yüksek olması ve Şekil 6.10’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde büyük parçacık kopmalarının gerçekleşmesi sebebiyle en fazla ağırlık kaybının elde edildiği düşünülmektedir.

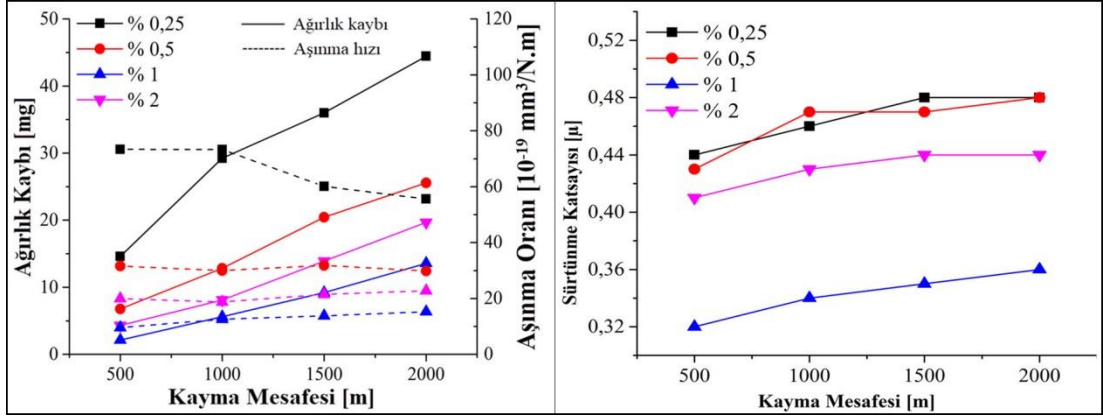


Şekil 6.10. Farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilmiş %1 nano Al_2O_3 takviyeli A356 Al matrisli kompozit numunelerin a)1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat MA/MÖ sonrası aşınma SEM görüntüleri.

Genel olarak aşınma yüzeyinde kayma yönleri oldukça belirgindir. Aşınma testi sırasındaki ısı ve sürtünme etkisi ile yüzeyde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça, numune ve disk arasındaki biriken parçacıkların tekrar numuneye yapıştığı ve gözeneklere dolarak yağlayıcı etkisi gören bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Genel olarak aşınma yüzeyleri incelendiğinde, abrasiv aşınma mekanizmasının, yanı sıra adheziv aşınma mekanizmasında olduğu görülmektedir.

6.4.3. Nano Al_2O_3 Miktarının Aşınma Davranışlarına Etkilerinin İncelenmesi

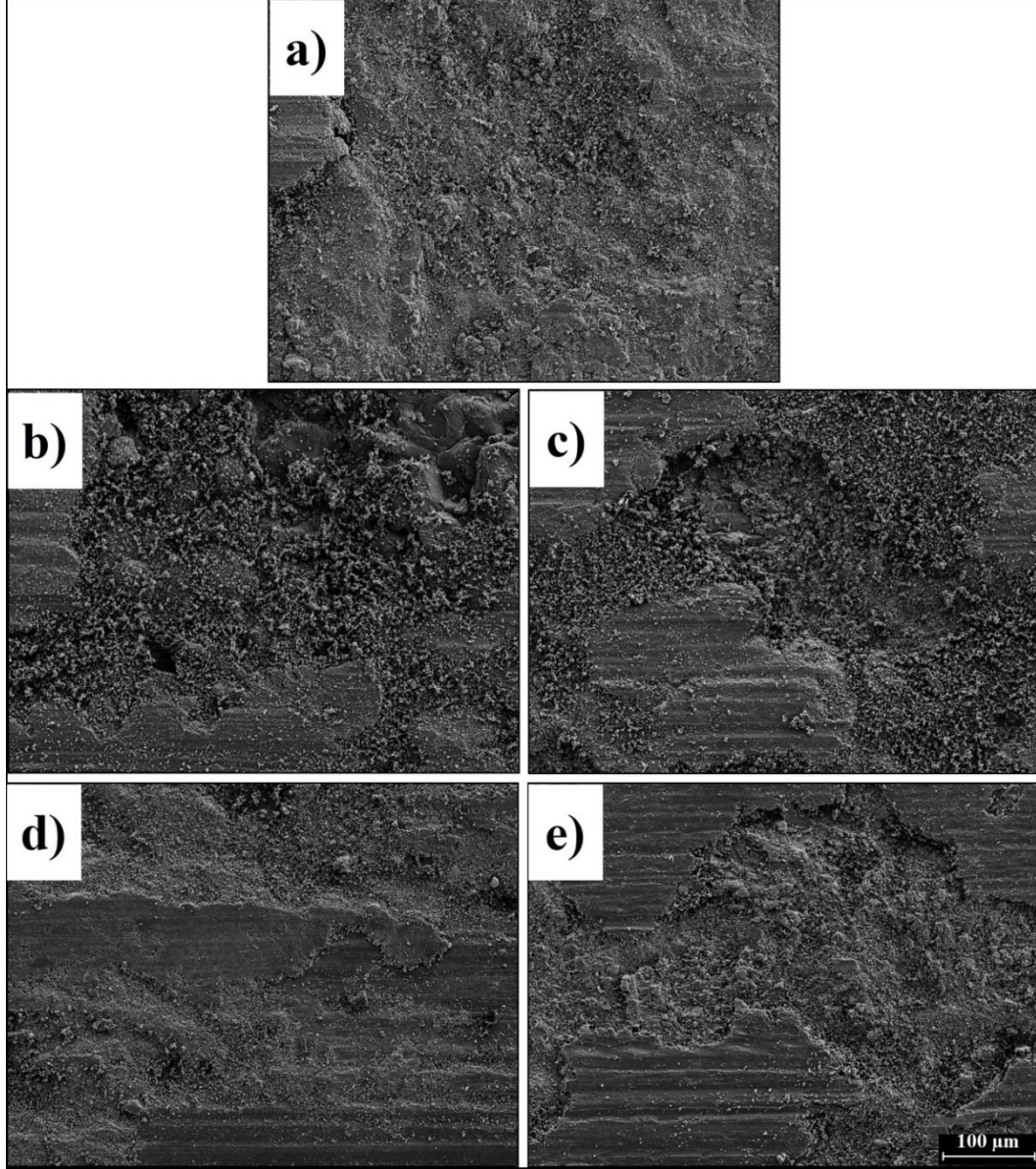
Şekil 6.11’de, farklı miktarlarda nano Al_2O_3 ilave edilen Al matrisli kompozit malzemelerin 30 N yük altında dört farklı kayma mesafesinde yapılan aşınma testleri sonucunda elde edilen ağırlık kaybı ve aşınma oranları verilmektedir.



Şekil 6.11. Farklı miktarlarda nano Al₂O₃ ilave edilen 1 saat mekanik öğütülen Al matrisli kompozitlerin ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değişimleri.

Şekil 6.11’de 30 N yük altında yapılan aşınma testleri sonucunda farklı miktarlarda Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitlerin ağırlık kaybı ve aşınma oranları karşılaştırıldığında, en düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranının ise %1 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitlerde olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 6.11’de verilen sürtünme katsayısı ile desteklenmektedir. Özyürek vd. [8] yapmış oldukları bir çalışmada takviye elemanı miktarına bağlı olarak, AMK’lerde sertlik artışının sürtünme katsayısını azaltarak, ağırlık kaybı ve aşınma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Özellikle nano takviyeli AMK’lerde, kritik takviye elemanı oranının üzerine çıktığı durumlarda, kompozitin bazı mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Şekil 6.8’de verilen farklı miktarda nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitlerin sertlik sonuçları incelendiğinde, % 0,25, % 0,5 ve % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen kompozitlerin sertlikleri takviye elemanı miktarına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 6.11’de verilen en yüksek ağırlık kayıpları, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları incelendiğinde, sırasıyla % 0,25, % 0,5 ve % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitlerde elde edildiği görülmektedir. Ancak, sertlik sonuçlarına göre en yüksek ağırlık kaybı ve aşınma oranının, % 2 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte gerçekleşmesi beklenirken, % 0,25 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte elde edilmiştir. Bunun nedeni, % 0,25 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte takviye fazı miktarının az olmasıdır. Ayrıca, Şekil 5.10’da (b) % 0,25 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeyden büyük parçacık kopmalarının gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 6.12’de farklı miktarlarda

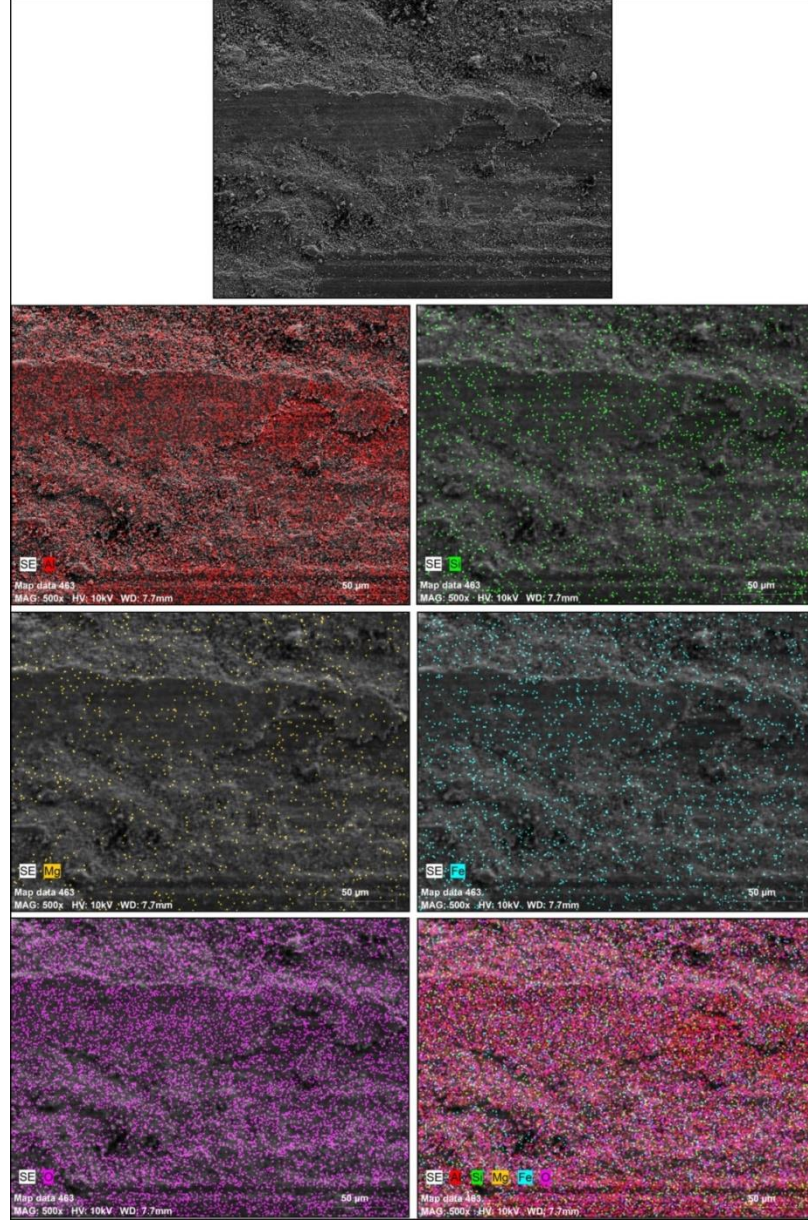
nano Al_2O_3 ilave edilen Al kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.12. a) A356 Al alaşımı ve b) % 0,25, c) % 0,5, d) % 1, e) % 2 nano Al_2O_3 takviyeli Al kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 6.12’de verilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kayma yönleri belirgin biçimde görülmektedir. Ayrıca, A356 Al alaşımının, % 0,25 ve % 0,5 nano Al_2O_3 ilave edilen Al kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, önemli derecede plastik deformasyona uğrayarak büyük parça kopmalarının gerçekleştiği de görülmektedir. Bu durum, Şekil 6. 11’de verilen

takviye elemanı miktarına bağı olarak ağırlık kaybı ve aşınma oranı değişimlerini desteklemektedir. Şekil 6.13’de 1 saat mekanik öğütülen %1 nano Al₂O₃ takviyeli Al kompozitlerin 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu verilmektedir.



Şekil 6.13. 1 saat MA/MÖ ile üretilen % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al kompozitlerin 2000 m kayma mesafesi sonrası aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonucu.

Aşınma sırasında oluşması muhtemel malzemelerin belirlenmesi için aşınmış yüzeyler üzerinde mapping EDS analizi yapılmıştır. Şekil 6.13'de %1 nano Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınmış yüzey EDS (mapping) analizi verilmektedir. Bu sonuçlar, yüzeyde oluşan oksit tabakasının varlığını ortaya koymaktadır. Oksit tabakasının varlığı yağlayıcı özelliklerine dayanarak % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozitlerin düşük sürtünme katsayısı değerini açıkça tanımlamaktadır.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli kompozit malzemelerinin aşınma davranışlarının incelenmesi konulu bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozitler, 4 farklı (1, 2, 3 ve 4 saat) öğütme sürelerinde başarılı olarak üretilmiştir. Toz boyut analizi sonuçlarına göre öğütme süresi arttıkça aglomerasyon sebebiyle tane irileşmesi görülmüştür.
- MA/MÖ üretim yöntemiyle üretilen A356 Al alaşımının yoğunluğu 2,62 g/cm³ olarak ölçülmüştür.
- Mekanik öğütme süresi arttıkça, mikroyapıda gözenek miktarının arttığı görülmüştür. Gözenek miktarına bağlı olarak yoğunluklarının azaldığı belirlenmiştir ve en yüksek yoğunluk değeri 1 saat mekanik öğütülen % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte 2,60 g/cm³ olarak ölçülmüştür.
- MA/MÖ üretim yöntemiyle üretilen A356 Al alaşımının sertliği 46 HVM olarak ölçülmüştür.
- Mekanik alaşımlama süresi arttıkça, sertliğin arttığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri, 4 saat mekanik öğütülen % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte 74 HVM olarak ölçülmüştür.
- Sertlik matris malzemesine göre % 37 oranında artmaktadır.

- 4 farklı öğütme süresinde üretilen kompozitler, 4 farklı (500, 1000, 1500, 2000 m) aşınma mesafesinde gerçekleştirilen aşınma testi sonuçlarına göre en düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranı, 1 saat mekanik öğütülen % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen kompozitlerde elde edilmiş ve optimum öğütme süresi 1 saat olarak belirlenmiştir.
- Optimum öğütme süresinde (1 saat) % 0,25, % 0,5 ve % 2 nano Al₂O₃ takviyeli A356 Al matrisli kompozit üretilmiştir. Takviye elemanı miktarı arttıkça gözenek miktarının arttığı gözlenmiştir.
- Takviye elemanı miktarı arttıkça, kompozitlerin sertliğinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek sertlik % 1 nano Al₂O₃ takviyeli Al kompozitte (63 HVM) elde edilmiştir. % 2 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitin sertliğinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- Yapılan aşınma testlerine göre takviye elemanı miktarı arttıkça kompozitlerin aşınma dirençlerinin arttığı gözlemlenmiştir. En düşük ağırlık kaybı ve aşınma oranı, sertliği en yüksek % 1 nano Al₂O₃ ilave edilen Al kompozitte elde edilmiş ve matris malzemesine göre daha fazla aşınma direnci gösterdiği görülmüştür.
- Metal matrisli kompozit malzemelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde, yüzeyde hem adhesiv hem de abrasiv aşınmanın gerçekleştiği görülmüştür.

ÖNERİLER

- Al matrisli kompozitlerin üretiminde, MA/MÖ işlemleri sırasında farklı işlem kontrol kimyasalı kullanarak aglomerasyon engellenebilir.
- Al matrisli kompozitlerin üretiminde farklı sinterleme sıcaklıkları ve süreleri kullanılarak, gözenek miktarı azaltmaya yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Takviye elemanı olarak kullanılan Al_2O_3 'lerin, korozyon davranışlarına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L. and Rohatgi, P. K., “Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - A review”, *Composites Part B: Engineering*, 77: 402-420 (2015).
2. Suryanarayana, C., “Mechanical alloying and milling”, *Progress in Materials Science*, 46: 1-184 (2001).
3. Kılıç, C., “Sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmiş ve soğuk haddelenmiş AlMg3/SiCp kompozitinin aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 1-45 (2008).
4. Durmuş, H., “CO₂ lazer kaynağıyla birleştirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 1-45 (2006).
5. Eskizeybek, Z., “Paslanmaz çelik elyaf takviyeli alüminyum kompozitlerde yorulma çatlak ilerlemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-26 (2006).
6. Dennis, W.H., “Metallurgy of The Non Ferrous Metals”, Tulgar, H. E., *İTÜ Yayınları*, İstanbul, 352 (1987).
7. Kaya, T., “Sol-jel yöntemi ile ZrO₂-Al₂O₃ seramik kompozit oksit üretimi, karakterizasyonu ve ZrO₂’nin parametrik etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-20 (2006).
8. Arık, H., Türker, M., Sarıtaş, S., “Investigation of the mechanical properties of in’situ Al4C3 reinforced aluminium based composites by mechanical alloying technique”, *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, Kyoto/ Tokyo 543-549 (2000).
9. Özyürek D., Yıldırım M., Çiftçi İ., “The tribological properties of A356-SiCp metal- matrix composites fabricated by thixomoulding technique”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 19 (4): 351-356 (2012).
10. German, R. M, “Powder metallurgy & Particulate Materials Processing 1st ed.” Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 20-40 (2007).

11. Suryanarayana, C., Al-aqeeli, N., “Mechanically alloyed nanocomposites”, *Progress in Materials Science*, 58: 383-502 (2013).
12. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 1-99 (2000).
13. İnternet: Kompozit Malzemeler, “Malzeme Bilgisi”, http://data.obitet.net/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf (2019).
14. İnternet: Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Ansys 10 Programı İle Isıl Gerilme Analizi, <http://web.deu.edu.tr/ansys/savac2.php?id=60> (2019).
15. İnternet: Polimerler ve Kompozit Malzemeler, <http://akademi.itu.edu.tr/vuralmu/DosyaGetir/65047/ch08-Polimer-Kompozit.pdf> (2019).
16. Şen, O., “TiO₂ partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 6-25 (2005).
17. Muratoğlu, M., Demirel, M., “Cu/Ni₃Al metal matrisli kompozitin kuru kayma aşınma davranışlarının araştırılması”, *5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 759-764 (2009).
18. Kılıç, C., “Sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmiş ve soğuk haddelenmiş AlMg₃/SiCp kompozitinin aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 1-45 (2008).
19. Özdin, K., “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-22 (2006).
20. Fidan, S., “Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 10-20, (2011).
21. Veeresh-Kumar, G. B., Rao, C. S. P., Selvaraj, N., “Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites – a review”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10: 59-91 (2011).
22. Ekici, R., “Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 19-47 (2004).
23. Uygur, İ., “Saruhan, H., Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1): 167-174 (2004).

24. Buytoz, S., “Al matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 35-42 (1999).
25. Kılıçkap, E., Özben, T., Çakır, O., “Al-SiCp MMK”lerde partikül takviye oranının mekanik özelliklere ve işlenebilirliğine etkisinin araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (3): 313-320 (2006).
26. Mertgenç, E.,” Savurma döküm yöntemiyle metal matrisli kompozit malzeme üretiminin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 4-24 (2004).
27. Atmaca, A., “Çelik fiber takviyeli alüminyum metal matrisli kompozit plakaların elasto-plastik gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-27 (2006).
28. Arıkan, R., “Saffil (δ - Al₂O₃) fiber takviyeli ZA-12 alaşımının sürtünme aşınma davranışları”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 22 (3): 359-368 (2007).
29. Eskizeybek, Z., “Paslanmaz çelik elyaf takviyeli alüminyum kompozitlerde yorulma çatlak ilerlemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-26 (2006).
30. Mindivan, H., Kayalı, E. S., “SiC takviyeli 2618 Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışı”, *İTÜ Dergisi*, 6 (2): 63-70 (2007).
31. Dursun, T., Özbay, M., “Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 23 (1): 65-68 (2008).
32. Mobasherpour, I., Tofigh, A. A., Ebrahimi, M., “Effect of nano-size Al₂O₃ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying”, *Materials Chemistry and Physics*, 138: 535-541 (2013).
33. Uygur, İ., Saruhan, H., “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8: 167-174 (2004).
34. Özçelik, Ö., “In-situ alümina partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretim ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-26 (2007).
35. Bahçeci, E., “Al matrisli α -Si₃N₄ takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-48, 71-76 (2006).
36. Özdin, K., “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-22 (2006).

37. Tekmen, Ç., “Metal matriksli kompozitlerin sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 3-54 (2006).
38. Kılıç, E. F., “Alüminyum alaşımlı SiC parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-35 (2007).
39. Topbaş, A., “Isıl İşlemler”, *Prestij*, İstanbul, 391-399 (1993).
40. Ekinci, V. Ş., “Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-54 (2007).
41. Sandal, R., “Al-Al₂O₃ kompozit malzeme üretimi ve difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-5 (2009).
42. Işıker, V., Ögel, B., "Al-SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi", *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 377-385 (1996).
43. Şahin, S., “Boksitlerden alümina üretiminde hidroliz prosesinin teknolojisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1):71-77 (2000).
44. Önel, K., “Süreksiz SiC katkılı alüminyum matrisli kompozitler”, *Metalurji Dergisi*, Ankara, 46-53, (1995).
45. El-Gallab, M., Sklad, M., "Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites, Part 1: Tool Performance", *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 151-158 (1998).
46. Bostan, B., “Mekanik alaşımlama ve ekstrüzyon sonrası Al₄C₃ oluşumunun incelenmesi”, *Gazi Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 23 (2): 343-348 (2008).
47. Arık, H., Özkök, Ö., “Si₃N₄ takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, *4th International Powder Metallurgy Conference*, Sakarya, 761-773 (2005).
48. El-Mahallawi, I., Abdelkader, H., Yousef, L., Amer, A., Mayer, J., Schwedt, A., "Influence of Al₂O₃ nano-dispersions on microstructure features and mechanical properties of cast and T6 heat-treated al si hypoeutectic alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, 76-87, (2012).
49. Yu, H., "Processing routes for aluminum based nanocomposites", *Worcester Polytechnic Institute*, (2010).
50. İnternet: Material Property Data, “Online Materials Information”, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836> (2019).

51. Kok, M., “Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 161: 381-387 (2005).
52. Yıldırım, M., “ Mekanik alaşımlama yöntemi ile AA7075-karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 10-40,(2019).
53. Tjong, S., “Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 29: 49-113, (2000).
54. Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., Wlosinski, W.,” The production and application of metal matrix composite materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 106: 58-67 (2000).
55. Özyürek, D., “Mekanik alaşımlama yöntemi ile titanyum bazlı metal matris kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20-40 (2002).
56. Shafiee, M. R. M., Zamani, S., Rad, H.R.B., “Effect of mechanical alloying time and ball-powder weight ratio on synthesis of MoSi₂–Mo₅Si₃ nanocomposite”, *Advanced Science Letters*, 13: 616-619 (2012).
57. Li, X., Yang, Y., Cheng, X., “ Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites”, *Journal of Materials Science*, 39: 3211-3212 (2004).
58. Saberi, Y., Zebarjad, S. M., Akbari, G. H., “ On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite”, *Journal of Alloys and Compounds*, 484: 637-640 (2009).
59. Razavi-Hesabi Z., Simchi A., Seyed-Reihani S. M., “Structural evolution during mechanical milling of nanometric and micrometric Al₂O₃ reinforced Al matrix composites”, *Material Science Engineering A*, 428 (1): 59-68 (2006).
60. Sankar, R., Singh, P., “Synthesis of 7075 Al/SiC particulate composite powders by mechanical alloying”^l, *Material Letters*, 36: 201-205 (1998).
61. Sivasankaran, S., Sivaprasad, K., Narayanasamy, R., Iyer, V. K., “Effect of strengthening mechanisms on cold workability and instantaneous strain hardening behavior during grain refinement of AA6061–10 wt.% TiO₂ composite prepared by mechanical alloying”, *Journal of Alloys and Compounds*, 507: 236-244 (2010).
62. Morsi K., Esawi A., “Effect of mechanical alloying time and carbon nanotube (CNT) content on the evolution of aluminum (Al)–CNT composite powders”, *Journal of Material Science*, 42: 4954-4959 (2007).

63. Poirier, D., Gauvin, R., Drew, R.A.L., “Structural characterization of a mechanically milled carbon nanotube/aluminum mixture”, *Composites A*, 40: 1482-1489 (2009).
64. Asgharzadeh, H., Simchi, A., Kim, H. S., “In situ synthesis of nanocrystalline Al6063 matrix nanocomposite powder via reactive mechanical alloying”, *Material Science Engineering A*, 527: 4897–4905 (2010).
65. Parvin, N., Assadifard, R., Safarzadeh, P., Sheibani, S., Marashi, P., “Preparation and mechanical properties of SiC-reinforced Al6061 composite by mechanical alloying”, *Material Science Engineering A*; 492: 134-140 (2008).
66. Bhaduri, A., Gopinathan, V., Ramakrishnan, P., Ede, G., Miodownik, A. P., “Microstructural evolution during mechanical alloying of Al (7010)–SiCp composites”, *Scripta Metallurgica Materialle*, 28: 907-912 (1993).
67. Kubota, M., Cizek, P., “Synthesis of Al₃BC from mechanically milled and spark plasma sintered Al-MgB₂ composite materials”, *Journal of Alloys and Compound*, 457: 209-215 (2008).
68. Yılmaz, M., “Kompozitlerin kuru kaymadaki aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2013).
69. Chiou, Y.C., Kato, K., Kayaba, T., “Effect of normal stiffness in loading system on wear of carbon steel — part 1: severe-mild wear transition”, *American society of Mechanical Engineers J. Tribology* , 491-495, (1985) .
70. Yıldız, T., Gür, A.K., “Aşınma Sistemleri”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, Fırat Üniversitesi, 7(1), 86-91, (2006).
71. Kato, K., Koshi, A., “Modern Tribology Handbook”, Çeviri Editörü, Ed. Bharat Bhushan, *USA: CRC Press LLC.*, (2011).
72. Akkurt, M., Makina Elemanları (Cilt: 1 – 2), *İstanbul: Birsen Yayınevi*, (2000).
73. Stachowiak, G., Batchelor, A., “Engineering Tribology”, USA: *Butterworth-Heinemann*, (2006).
74. Matik, U., “Akımsız Nikel kaplamalarda ısı işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
75. Halling, J., “Principles of Tribology”, London: *MacMillan Press*, (1975).
76. Eiss, N.S., Wood, K.C., Herold, J.A., Smyth, K.A., ”Model for the Transfer of Polymer to Rough, Hard Surfaces, Transactions ASME”, *Journal of Lubrication Technology*, (101), 212-219, (1979).

77. Aktaş, H., Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2007).
78. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W., "Engineering Tribology". USA: Elsevier, **Butterworth-Heinemann**, 235-237, (2005).
79. Sinmazcelik, T., Taskiran, I., "Erosive wear behaviour of polyphenylenesulphide (PPS) composites", **Materials in engineering**, 28(9), 2471-2477, (2007).
80. Wang, M., Sun, H., Zou, L., Zhang, G., Li, S., Zhou, Z., "Structural evolution of oxide dispersion strengthened austenitic powders during mechanical alloying and subsequent consolidation", **Powder Technology**, 272: 309-315 (2015).
81. Yavuzer, B., "Mekanik alaşım ile üretilen aısı 304 östenitik paslanmaz çeliklere alaşım elementlerinin etkisi", Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2019).
82. Bayer, R.G., "Mechanical Wear Fundamentals and Testing Second Edition", **Marcel Dekker**, New York, 16-250 (2004).
83. Tunçay, T., "A356 Alüminyum döküm alaşımlarında sıvı metal hareketinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi", **Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2012).
84. Akbari, M.K., Mirzaee, O., Baharvandi, H.R., "Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al₂O₃ particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method", **Metarial&Desing**, (46), 199-205, (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan ÇALIŞKAN 1993 yılında Ankara'da doğdu, ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. Yenimahalle Anadolu Meslek Lisesi Makina Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2011 Yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü'nde üniversite eğitimine başlayıp 2016 tarihinde mezun oldu. Şu anda imalat yapan bir firmanın "İmalat Müdürü" ünvanıyla görev almaktadır. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği ana bilim dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres :Yunus Emre Mahallesi

Yolaç Sokak 2/6

Yenimahalle/ANKARA

Tel : (507) 497 46 94

E-posta: caliskanoguzhan.93@gmail.com