

Mg-SiO₂ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
Ayhan ÜRER
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
ŞUBAT – 2009

Mg-SiO₂ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

AYHAN ÜRER

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN

ŞUBAT - 2009

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ayhan ÜRER'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı Mg-SiO₂ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

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

Üye : Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM

Üye : Doç. Dr. Osman ŞAN

Üye : Yrd.Doç. Dr .Mustafa AYDIN (Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../.....gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Mg-SiO₂ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ayhan ÜRER

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2009

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN

ÖZET

Bu çalışmada, SiO₂ parçacık takviyeli magnezyum metal matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit malzemeler ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 SiO₂ ilave edilerek elde edilmiştir. Toz karışımlar koruma atmosferli glow-box içerisinde tartılarak hazırlanmış ve karıştırma kabı (vial'e) içerisine burada konulmuştur. Hazırlanmış tozlar TURBO SPEX 8000D cihazında karıştırılmıştır. Toz karışımlar 550 MPa'da tek yönlü bir kalıpta preslenerek blok numuneler halinde üretilmiştir. Elde edilen bütün numuneler, 45 dakika süreyle 550 °C vakum kontrollü difüzyon fırınında argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin mikroyapı incelemeleri, sertlik, yoğunluk ve gözenek ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, aşınma deneyleri farklı hız ve yüklerde pin-on-disk türü deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeylerin karakterize edilmesi için tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemesi yapılmıştır.

Sonuç olarak, üretilen kompozitin sertliği ve yoğunluğu artan ilave oranının artışına paralel olarak arttığı görülmüş ve kompozit malzeme içerisindeki seramiğin tane boyutu küçüldükçe aşınma miktarının arttığı kompozit malzeme içerisindeki seramiğin oranı arttıkça aşınma miktarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca yük arttıkça hem matris hem de kompozitte aşınma miktarı arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Magnezyum, Kompozit, Mg₂Si, Mikroyapı ve Mekanik Özellikler

THE INVESTIGATION OF THE PROPERTIES AND PRODUCTION OF Mg-SiO₂ METAL MATRIX COMPOSITES

Ayhan ÜRER

Mechanical Engineer, M.S.Thesis, 2009

Thesis Supervisor: Ass. Prof. Dr. Mustafa AYDIN

SUMMARY

In this study, SiO₂ particle reinforced pure magnezyum based composites were produced by powder metallurgy method (P/M). The weight fractions of SiO₂ particles were varied from 5%, 10% and 15% in the mixtures. The mixed powders were pressed under a pressure of 550 MPa in a cylindrical die and the cylindrical specimens were produced. The produced samples were sintered at 550 °C for 45 minutes in a vacuum control led diffusion oven under argon inert gas. Optical microscopic examination, hardness, density and porosity measurement were carried out. In addition, wear tests were performed in a pin-on-disc type of wear machine under different loads and speeds. Furthermore, scanning electron microscope (SEM) were used to characterize the worn surfaces of the composites.

The experimental results indicated that hardness and density increased with increasing particle contents. It was found that wear rate of the composite and its mixture increased with increasing load while it decreased with increasing the particle size. The wear rate decreased significantly with increasing SiO₂ content in the composite. Furthermore, the wear rate also increased with increasing applied load for both mixture and the composite.

Key Words : Magnezyum, Composite, Mg₂Si, Microstructure and Mechanical Properties

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları boyunca hiçbir şekilde yardımlarını ve deneyimleri esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN'a ve Makine Mühendisliği bölümü tüm öğretim elemanlarına araştırma ve çalışmalarımda destek olan O.Ü. Metalürji Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK ve Yrd. Doç. Dr. Hakan GAŞAN, bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Bedri BAKSAN, Elektron Mikroskobu çalışmalarının yapıldığı Anadolu Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünün tüm öğretim elemanlarına, D.P.Ü Seramik Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. Osman ŞAN ve Arş. Gör. Cem Özgür ve aşınma testi için yardımlarını bizden esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına ve araştırma görevlisi Hakan YETGİN hocama teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALÜRJİSİ	2
2.1. Toz Metalürjisinin Tarihçesi.....	2
2.2. Toz Metalürjisi Yönteminin Temel Basamakları	3
2.3. Toz Metalürjisinde Kullanılan Toz Üretim Yöntemleri	4
2.3.1. Mekaniksel metot	5
2.3.2. Atomizasyon.....	6
2.3.2.1. Su atomizasyonu	7
2.3.2.2. Gaz atomizasyonu	9
2.3.2.3. Döner disk atomizasyonu.....	10
2.3.2.4. Döner elektrot atomizasyonu	11
2.3.3. Elektrokimyasal yöntemler	11
2.3.4. Kimyasal yöntemler	12
2.4. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu	13
2.4.1. Toz akıcılığı.....	13
2.4.2. Görünür yoğunluk	14
2.4.3. Sıkıştırılabilirlik	15
2.4.4. Tane büyüklüğü.....	15
2.4.5. Tane şekli	16
2.5. Tozların Karıştırılması.....	17
2.6. Kullanılan Yağlayıcılar.....	17
2.7. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması).....	18
2.8. Sinterleme.....	20

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

	<u>Sayfa</u>
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	22
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
3.1.1 Polimer matrisli kompozitler (PMK)	23
3.1.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK).....	23
3.1.3 Metal matrisli kompozitler (MMK)	24
4. MAGNEZYUM	27
4.1. Magnezyumun Genel Özellikleri.....	27
4.1.1. Fiziksel özellikleri	27
4.1.2. Mekanik özellikleri	28
4.2. Kullanım Alanları	29
4.3. Magnezyum Alaşımları.....	31
4.3.1. Genel özellikleri	31
5. KUVARS (SiO ₂).....	33
5.1. Kullanım Alanları	33
5.2. Üretim Yöntemi ve Teknoloji.....	34
6. MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	35
6.1. Hammadde.....	35
6.2. Değirmen Tipleri.....	36
6.3. İşlem Parametreleri.....	37
6.3.1 Öğütme kabı	37
6.3.2. Öğütme hızı	38
6.3.3. Öğütme süresi.....	38
6.3.4. Öğütücü malzemelerin tipi	39
6.3.5. Bilye-toz ağırlık oranı	39
6.3.6. Kabın doluluk oranı.....	40
6.3.7. Öğütme atmosferi.....	40
6.3.8 İşlem kontrol kimyasalları (İKK).....	40
6.3.9. Öğütme sıcaklığı	41

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

	<u>Sayfa</u>
7. SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	42
7.1. Sürtünme.....	42
7.2. Aşınma Mekanizmaları.....	42
7.2.1. Abrasiv aşınması	43
7.2.2. Adhesiv aşınma	44
7.2.3. Erozyon aşınması	45
7.2.4. Kavitasyon aşınması.....	47
7.2.5. Korozyon aşınması.....	47
7.2.6. Oksidasyon aşınması.....	48
7.2.7. Yorulma aşınması.....	48
7.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	49
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	50
8.1. Giriş	50
8.2. Malzeme	50
8.3. Alaşım Hazırlama	50
8.4. Test Numunelerinin Hazırlanması	51
8.5. Test Numunelerinin Karakterizasyonu	54
8.5.1. Yoğunluğunun ölçülmesi	54
8.5.2. Mikroyapılarının incelenmesi.....	54
8.5.3. Malzemelerin sertlik değerlerinin belirlenmesi.....	55
8.6. Aşınma Deneyleri	56
8.6.1. Aşınma miktarının ölçümü.....	57
9. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	59
9.1. Giriş	59
9.2. Presleme ve Sinterleme Sonrası Fiziksel Özellikler	63
9.3. Sertlik Ölçümü.....	65
9.4. Mikroyapı İncelemesi	67

İÇİNDEKİLER (DEVAM)

	<u>Sayfa</u>
9.4.1. Deneş numunelerinin optik mikroskop görüntüleri	67
9.4.2. Deneş numunelerinin SEM mikroskop görüntüleri	72
9.5. Aşınma	75
9.5.1. Aşınmış yüzeylerin SEM ile incelenmesi	82
10. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	92
EK-1 Karışım miktarlarının formüllerle bulunması.	93

ŞEKİLLERİN DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Toz Metalürjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları	3
2.2 Mekanik metotla öğütme	5
2.3 Çarpışmanın etkisi: a) Gevrek parçacık, b) Sünek parçacık	6
2.4 Su atomizasyon işlemi	8
2.5 Gaz atomizasyonu ile üretim şeması	9
2.6 Döner disk atomizasyonu	11
2.7 Döner elektrot atomizasyonu	11
2.8 Hall akış hunisi	13
2.9 Hall hunisiyle şev açısının ölçümü	14
2.10 Küresel ve pul şeklindeki parçalar	16
2.11 Toz tane şekilleri	17
2.12 Tek hareketli presleme	20
2.13 Çift etkili presleme	20
3.1 Metal matrisli kompozitlerde tipik takviye geometrileri	25
5.1 Beyaz kuvarsit.....	33
6.1 Mekanik alaşımlama yönteminde kullanılan değirmenlere tipleri.....	37
a) Salınımlı, b) Planeter, c) Atritör.....	37
6.2 Tungsten karbür' den yapılmış SPEX tipi (Salınımlı) karıştırıcının; Öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme hücresi	38
7.1 Abrasiv aşınma mekanizmaları	44
7.2 Adhezyondan dolayı malzeme taşınımı	45
7.3 Erozyon aşınma mekanizmaları	46
7.4 Kavitasyon aşınma mekanizmasında kabarcık çökme mekanizması	47
7.5 Korozyon oluşturmalar ve aşınan yüzey arasındaki etkileşim modelleri	48
7.6 Yorulma aşınma mekanizmasının şematik görüntüsü	49
8.1 Alaşım hazırlamada işlem basamakları.....	51
8.2 Argon gazı yüklü glow-box cihazının görüntüsü.....	52
8.3 Karıştırma işleminde kullanılan yüksek devirli SPEX TURBO 8000D titreşimli cihazı.	52
8.4 SPEX tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme hücresi.....	53
8.5 Vakum kontrollü difüzyon fırını.....	54
8.6 Optik Mikroskop cihazı.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.7 Sertlik test cihazı.....	56
8.8 Aşınma deneylerinde kullanılan pim disk aşınma cihazı.....	57
9.1 Sinterleme öncesi ve sonrası hazırlanmış % 5 karışım oranı kompozitin DSC analizi sonuçlarını.....	59
9.2 %95 saf Mg -%5'si SiO ₂ olan karışımının sinterleme öncesi XRD analizi.....	60
9.3 %95 saf Mg -%5'si SiO ₂ olan karışımının sinterleme sonrası XRD analizi sonuçları.....	61
9.4 % 85 saf Mg -% 15'si SiO ₂ olan karışımının sinterleme sonrası XRD analizi sonuçları.....	62
9.5 Sinterleme öncesi MMK, -10 µm, -500 µm tane boyutuna sahip olan SiO ₂ takviyeli kompozit malzemenin XRD analiz sonuçları.....	63
9.7 Saf Mg ve % 5-10-15 karışım oranına farklı tane boyutlu SiO ₂ takviyeli kompozit malzemenin sertlik değeri – karışım oranı grafiği.....	66
9.8 Saf haldeki Mg' un optik görüntüsü (X200).....	67
9.9 Saf haldeki Mg' un optik görüntüsü (X500).....	68
9.10 Mg matris % 5 SiO ₂ (-125 µm) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X 200).....	69
9.11 Mg matris içerisindeki % 5 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500).....	69
9.12 Mg matris içerisindeki % 10 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X200).....	70
9.13 Mg matris içerisindeki % 10 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500).....	71
9.14 Mg matris içerisindeki % 15 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X200).....	71
9.15 Mg matris içerisindeki % 15 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500).....	72
9.16 Mg matris içerisindeki % 5 SiO ₂ (-10 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (X500).....	73
9.17 Mg matris içerisindeki % 5 SiO ₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (X500).....	74
9.18 Mg matris içerisindeki % 5 SiO ₂ (-500 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (500X).....	75
9.19 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin hız-sürtünme katsayısı grafiği.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAMI)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.20 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-sürtünme katsayısı grafiği.	77
9.21 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-aşınma miktarı grafiği.	78
9.22 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin hız-aşınma miktarı grafiği.	79
9.23 0.5 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği.....	80
9.24 1 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği.....	80
9.25 Mg matris içindeki % 5 SiO ₂ (-10 µm tane boyutlu) takviyeli numune 1.0 m/sn hız uygulandığında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği.....	81
9.26 Mg matris içindeki % 5 SiO (-10 µm tane boyutlu) takviyeli numune 10 N yük uygulandığında sıcaklık-kayma mesafesi grafiği.....	82
9.27 Sinterleme ve aşınma işleminden sonra çekilen SEM görüntüsü (X200).....	83
a) Saf mg, b) -10 µm tane boyutuna sahip % 5 SiO ₂ takviyeli kompozit	
c) -500 µm tane boyutuna sahip % 5 SiO ₂ takviyeli kompozit.	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Standart elek takımı	16
2.2 Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörleri.....	19
4.1 Saf magnezyumun özellikleri	28
4.2 1998'deki magnezyum tüketimi	30
4.3 Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları	32
8.1 İz çapına göre devir sayıları.....	58
9.1 Numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları.....	64
9.2 Numunelerin gözenek miktarları.....	65
9.3 Saf Mg'a -250 µm tane boyutuna sahip SiO ₂ takviyeli MMK malzemelerin Vickers sertlik değerleri.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°C	Santigrad, (derece)
d	Çap, (mm)
F	Yük, (Newton)
W	Ağırlık, (gram)
m	Uzunluk, (metre)
N	Devir sayısı, (dev/dak)
P	Basınç, (MPa)
t	Yol, (km)
V	Kayma hızı,(m/s)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
Mg	Magnezyum elementi
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Mg ₂ Si	Magnezyum Silisid
MgO	Magnezyum Oksit
HV	Vicker's Sertlik Değeri
MA	Mekanik Alaşımlama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu
DSC	Diffraction Scanning Calorimeter
T/M	Toz Metalürjisi
BTO	Bilye-Toz Oranı
İKK	İşlem Kontrol Kimyasalları
XRD	X-Ray Diffraction

1. GİRİŞ

Magnezyum ve alaşımları $1,8 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ile hafif metal grubunun (Al, Mg, Ti) en düşük yoğunluğa sahip endüstriyel malzemesidir. Çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olan bu malzeme, otomotiv ve uzay endüstrisi gibi sektörlerde, ayrıca makinelerde ve el takımlarının yapımında tercih edilen alternatif malzeme durumundadır ve kullanım alanları giderek artmaktadır.

Magnezyum, nispeten düşük ergime sıcaklığına ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) sahiptir ve bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kullanımı oldukça zordur. Oda sıcaklığının $100\text{-}150^\circ\text{C}$ üstünde sürünme direnci düşer. Ayrıca oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda oksitlenme problemi mevcuttur ve oluşan gözenekli oksit tabakası otokatalitik etkiyle oksitlenmeyi giderek hızlandırmaktadır. Ancak, bu problemlerin giderilmesi amacıyla geliştirilen çeşitli magnezyum ürünleri ile korozyon ve sürünme problemleri nispeten azaltılarak oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikler geliştirilmiştir. Günümüzde, sağladığı birçok avantaj ile kullanım alanları giderek artan magnezyum esaslı kompozit malzeme ürünleri, ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımlarından daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda ($\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$) daha kullanışlıdır. Bu nedenle magnezyum esaslı kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanım alanı genişlemektedir.

Takviye malzemesinin reaksiyon yoluyla oluştuğu (in-situ) magnezyum esaslı kompozitler, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kararlı takviye/matris ara yüzey özellikleri nedeniyle yüksek avantajlar sağlamaktadır. Bu kompozit malzemelerden birisi olan AZ31 (%9Al-%1Zn)/ Mg_2Si kompozit malzemede Mg_2Si fazı istenen şekle ve boyutlara getirildiğinde ana malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

Bu çalışmada, toz halinde temin edilen saf Mg matris içerisine yine toz halinde temin edilen SiO_2 takviye edilerek bir alaşım hazırlanmıştır. Hazırlanan bu alaşım preste belirlenen kalıplarda preslenerek tozların sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler vakum kontrollü difüzyon fırınlarında argon gazı atmosferinde Diffraction Scanning Calorimeter (DSC) analizinden çıkan sonuçlar neticesinde sinterleme işlemi yapılmıştır. Bunun yanında, karşılaştırma yapılabilmesi için takviye malzemesi olarak farklı tane boyutuna sahip SiO_2 bileşikleri kullanılmıştır. Burada aşınma direnci yüksek, fakat mukavemeti düşük olan Mg' a mukavemet değeri Mg' a göre yüksek olan bir malzeme katılarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

2. TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi (T/M); kütleli gereçler ve şekilli objeler elde etmek için metal tozları üretme ve üretilen tozları kullanma sanatıdır. Malzeme imalat yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi; ileri teknoloji malzemelerinin üretilmesinde oldukça uygun ve çok sayıda küçük parçaların ekonomik üretimini sağlayan önemli bir teknolojidir. “Son şekle yakın” (near-net shape) parça üretim teknolojisi olan (T/M), diğer imalat yöntemlerinden oldukça farklı üretim aşamalarına sahiptir. Son şekle yakın ürünler elde etmede kullanılan süreçler; sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme, toz metal enjeksiyonu, nano parçacık teknikleri ve mekanik alaşımlamalardır. Kısaca bu metod çok karmaşık şekilli ve küçük boyutlara sahip ürünlerin elde edilmesinde uygulanan ileri bir teknolojidir [1].

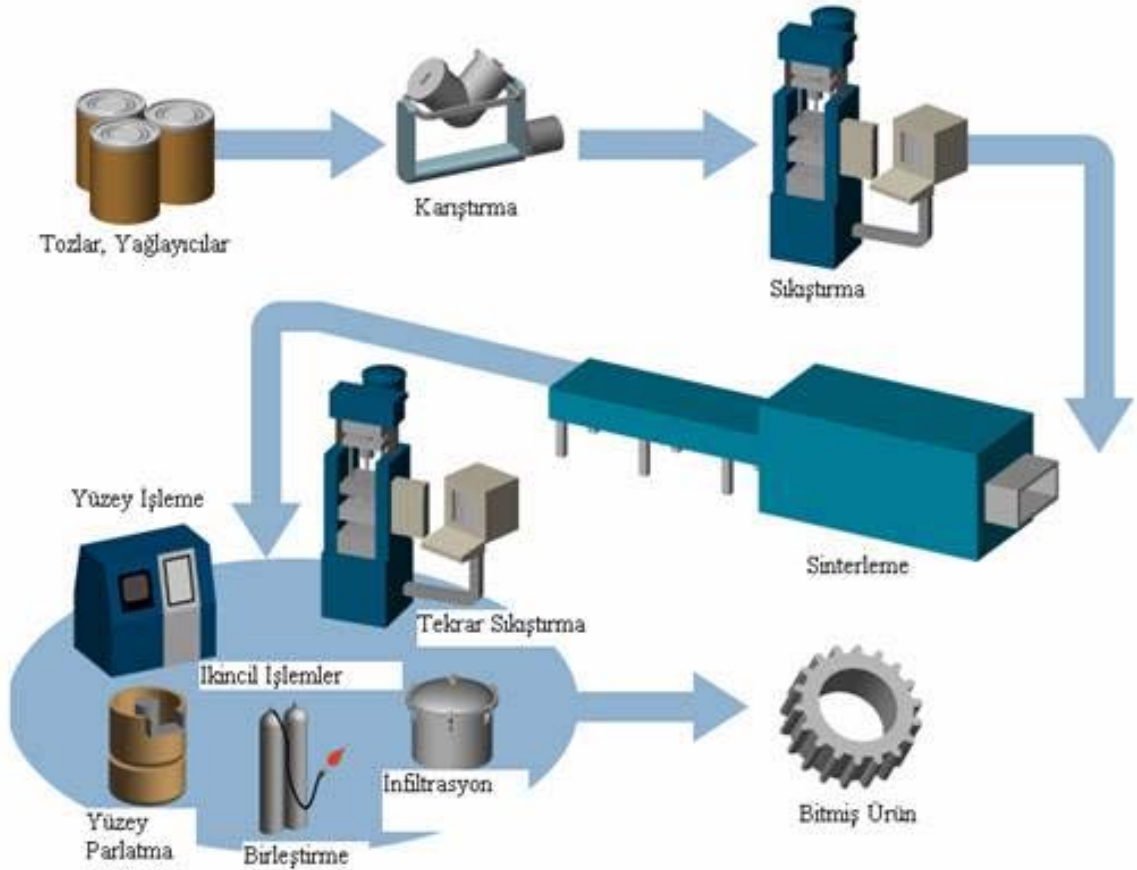
Toz metalürjisi (T/M) yöntemiyle yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik üretilebilmesi, bu üretim tekniğini cazip kılmaktadır. T/M tekniği farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem temel olarak; tozların şekillendirilmesi (preslenmesi) ve daha sonra sinterleme yoluyla, ısı yoldan bağlanması basamaklarını içerir. T/M yöntemi ile üretim; malzeme kaybını en aza indirmesi, iyi bir boyut toleransı sağlaması, geniş alaşım sistemlerine izin vermesi, kendinden yağlama amacıyla kontrollü gözenek imkanı ve diğer imalat yöntemleriyle üretilmesi zor olan küçük boyutlu ve karışık şekilli parçaların üretebilmesi gibi bir çok avantaja sahiptir. Bu avantajları ile verimlilik, ekonomiklik, az enerji kullanımı, hammaddeden tasarruf ve çevreye daha az zarar verme bakımından önemini gittikçe artırmaktadır. Bunların sonucu olarak T/M teknolojisi sürekli gelişmekte ve bir çok alanda diğer geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır. Başta otomotiv endüstrisi olmak üzere elektronik, tıbbi cihaz ve çeşitli makine parçalarının imalatında T/M teknolojisinin kullanımı giderek genişlemektedir.

2.1. Toz Metalürjisinin Tarihçesi

İnsanoğlu metallerin ergime noktalarına kadar çıkan fırınları geliştirmeden önce, toz metalürjisi yöntemini kullanmıştır. Yaklaşık M.Ö. 3000 yılında Mısırlılar el aletlerinin yapımında günümüz “sünger demiri” ne benzer tozlar ve parçacıklar kullanmışlardır. T/M’sinin 1800’lü yılların başında Amerika’da flaman şekilli parçaların üretiminde kullanılması ile endüstriyel olarak uygulamaya girmiş ve 1826 yılında Rusya’da tedavüle çıkarılan bir platin paranın T/M ile üretilmesiyle, ilk kez geniş çaplı endüstriyel uygulama alanı bulmuştur [2].

2.2. Toz Metalürjisi Yönteminin Temel Basamakları

T/M uygulamalarında genel işlemler şematik olarak Şekil 2,1'deki akış şemasında gösterilmiştir. Parçayı oluşturan tozlar ve yağlayıcılar homojen bir karışım elde edinceye kadar karıştırılırlar. Elde edilen karışım daha sonra istenilen parçanın boyutlarının verildiği kalıbın içerisine doldurulur ve basınç altında sıkıştırılır. Son işlem olarak parçalar sinterlenir. Küresel ve iri bronz tozlarından imal edilen filtre elemanlarının, basınç kullanılmadan üretimi, istisnai bir durumdur. Bu işlemden tozlar uygun şekilli kalıp içerisine doldurulur ve kalıpla birlikte sinterlenir. Tozları sıkıştırmanın tek eksenli presleme, haddeleme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, izostatik presleme gibi bir çok metotlar vardır. Bu metotların seçimi parça geometrisine ve üretim miktarına bağlıdır [4].



Şekil 2.1 Toz Metalürjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları [3]

Kompoziti oluşturan tozun boyutu kompozitin özelliklerini belirlemede en önemli elemandır. Toz; boyutu 1 mm'den daha küçük, ince olarak bölünmüş katı parçacıklardır. Tozlar genel olarak metaliktir. Bir tozun en önemli karakteristiği; yüzey alanının hacmine göre yüksek olmasıdır [3].

Toz metal parça üretiminde genellikle tozlar öncelikle soğuk sıkıştırma ile şekillendirilir ve sinterleme işleminden sonra bitirme işlemleri uygulanır. T/M yöntemi ile tozların soğuk şekillendirilmesi ve kalıptan çıkarılması sırasında metal tozları ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltarak kalıp ömrünü artırmak amacıyla yağlayıcılar kullanılır. Malzemeye uygun yağlayıcılar ağırlık olarak % 0.5-2 oranlarında ilave edilerek karıştırılırlar [2]. Karışımı hazırlanan tozlar istenilen geometrideki kalıplarda preslenir. Presleme işlemi esnasında dağınık halde bulunan tozlar kalıp içerisinde parçanın şeklini alır. Bu aşamada elde edilen parçalar düşük mukavemet değerine sahiptir. Bu mukavemet değerine ham mukavemet (green strength) denir. Ham mukavemet değeri parçanın kalıptan çıkartılıp sinterleme ortamına yerleştirilmesine olanak verecek değerlerde olmalıdır. Fakat bu değer, parça üzerine uygulanacak yüksek değerlerdeki kuvvetleri taşımak için yeterli değildir. Kalıptan çıkartılan parçaların mukavemet değerlerini artırmak için parçalara sinterleme işlemi uygulanır [3].

Sinterleme genellikle atomik ölçekte gerçekleşen, kütle taşınımı yoluyla katı parçacıkları birbirine yoğun bir yapı oluşturacak şekilde bağlayan ısı işlem veya süreçtir. Sinterlenecek malzeme tek çeşit saf metal veya seramik gibi bir malzemeden oluşuyorsa tek bileşenli sistem, birden çok malzemeden oluşuyorsa çok bileşenli sistem adını alır. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı Kelvin cinsinden malzemenin ergime sıcaklığının 0,8 katıdır. Çok bileşenli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı bileşimde en düşük ergime sıcaklığına sahip malzemenin ergime sıcaklığının hemen altındadır. Ergime sıcaklığının altında yapılan sinterlemeye katı faz sinterlemesi, çok bileşenli sistemlerde ise bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerinde yapılan sinterlemeye ise sıvı faz sinterlemesi denir [5].

2.3. Toz Metalürjisinde Kullanılan Toz Üretim Yöntemleri

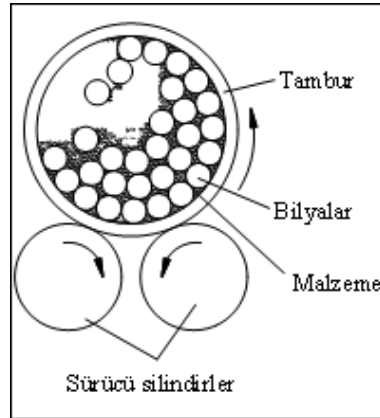
Kompozit malzemeler imal edilirken değişik metotlarla hazırlanmış tozlar kullanılır. Metal tozlarının üretiminde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliklerini tayin edeceğinden; genellikle tozlardan söz edilirken, karakter ve özelliklerine ait deneysel bilgi vermek yerine, üretim tekniklerine değinilir. Toz özellikleri direkt olarak; tozların preslenme davranışlarını, sinterleme davranışlarını ve son ürün özelliklerini etkiler. Bu nedenle, uygun tipte toz ve sinter parçalar üretmek için kullanılan değişik toz üretim teknikleri hakkında bilgi sahibi olmak, çok önem teşkil etmektedir [6].

Temel olarak dört değişik toz üretim tekniği vardır. Bunlar;

- Mekaniksel metot,
- Atomizasyon metotları,
- Elektrokimyasal metot,
- Kimyasal metot.

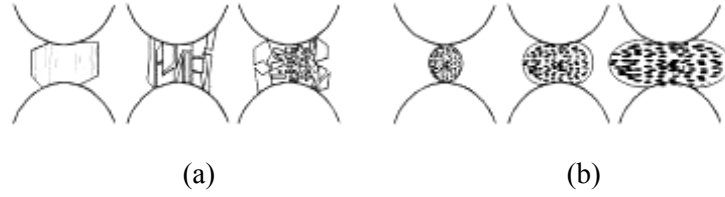
2.3.1. Mekaniksel metot

Bu yöntemle metal tozlarının üretilmesi, bir darbeli öğütücü içerisinde metal tel ve tanelerinin kırılması esasına dayanır. Elde edilen metal tozların şekli pul puldur ve bunların kullanılmadan önce tavlanaarak gerginliğinin giderilmesi gerekir. Öğütme, parçalanacak ana malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana getirilmesiyle yapılan bir işlemdir. Bu yöntem, hem bir metal tozu üretim tekniğidir ve hem de diğer tekniklerle üretilmiş ancak kümeleşmiş olan tozların kırılma işlemidir. Öğütme, Şekil 2,2’de verildiği gibi en çok bilyeli değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı ve aşınmaya dirençli bilyelerin bulunduğu kaba önceden iri taneli olarak yerleştirilir. Kap dönerek veya titreştirilerek bilyeleri harekete geçirir. Bilyelerin çarpışması sırasında tozlara ne olacağı parçacığın şekline bağlıdır [2].



Şekil 2.2 Mekanik metotla öğütme [7].

Şekil 2,3’de görüldüğü gibi, parçacık gevrek ise çarpışma neticesinde çok küçük tozlara bölünür. Ancak, iri taneli sünek taneler çarpışma sonucunda parçacık şeklini değiştirerek yassılaşıır. Küçük taneli sünek malzemeler ise, öğütücü cidarına ve bilyelere yapışır.



Şekil 2.3 Çarpışmanın etkisi: a)Gevrek parçacık, b) Sünek parçacık [8]

Mekanik metotla öğütülerek elde edilen tozun özelliğini kabın dönme hızı önemli ölçüde etkiler. Dönme hızının fazla olması, malzeme ve bilyeler arasındaki relatif hareketlerin azalmasına neden olur. Hızın çok yavaş olması ise, kabın alt kısmında hareketin yavaş olmasına neden olur. İdeal dönme hızı; bilyelerin ve malzemenin kabın en üst kısmına kadar yükselerek, geriye kalan malzemenin üzerine düşmesini sağlar. Bu tekniğin dezavantajlarından biri de elde edilen tozun bilyelerin ve öğütücünün çeperlerine yapışarak kirletmesidir. Öğütücülerin alaşımlamanın veya karıştırmanın daha homojen olmasını sağlamak amacıyla titreştirilmesi de mümkündür. Titreşimli öğütücüler döner tiplere nazaran çok daha kısa zamanda, eşdeğerde bir öğütme sağladıklarından daha verimlidirler. Öğütme süresince, sıcaklık artmasından dolayı, aşırı derecede oksitlenme meydana gelebilir. Oksitlenmeyi önlemek için öğütücüye konulan sıvılar ve asal atmosferler kullanılır. Bu hem öğütme süresini kısaltır hem de ince toz elde edilmesini sağlar [2].

2.3.2. Atomizasyon

Bu işlemde ergiyik şeklindeki metal, birbirleri ile veya katı yüzeylerle temas etmeden çok küçük damlacıklara parçalanır ve soğutulurlar [9]. Temel prensip, ergiyik haldeki metalin çok ince şerit halinde akıtılması ve bu esnada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulması esasına dayanır. Burada ayırıcı olarak hava, azot (N_2) ve argon gazı kullanılırken, su veya gazyağı-parafinde sıklıkla tercih edilen sıvılardır. Atomizasyon, metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir.

Bu üretim tekniği üç ana bölüme ayrılır;

1. Ergitme,
2. Atomizasyon (eriyik metal damlalarını daha küçük boyutlarda parçalamak),
3. Katılaşma ve soğuma.

Bu işlemlerden sonra çoğu zaman yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen niteliklere getirilmesi için ek işlemler yapılmaktadır. Enerjinin sıvı metali parçalama yöntemi atomizasyonda ana sınıflama kriterini teşkil etmektedir.

Bunlar; kılcal kuvvetler (ergiyik damla olayı), mekaniksel darbe (darbe ile parçalama yöntemi), elektro statik kuvvetler (elektrodinamik atomizasyon), sıvı, gaz akışı veya jeti (sıvı veya gaz atomizasyonu), santrifüj kuvvetler (santrifüj atomizasyonu), ergiyiğin aşırı gaz doygunluğu (vakum atomizasyonu) yöntemleri veya ultrasonik (ultrasonik atomizasyon) yöntemidir. Bu sistemlerde ergiyik banyo için bir potaya ihtiyaç duyulup duyulmadığı çok önemlidir. Potalar, atomizasyonlu sistemlerde yapı kirlenmelerinin ana kaynaklarından biridir. İkinci önemli kriter ise ısı kaynağıdır. Metalürjik uygulamalarda bilinen tüm ergitme teknikleri (örneğin, indüksiyon, ark, plazma ve elektron ışını ergitmesi yöntemi) uygulanabilir. Arkla ergitmede olduğu gibi bunlardan bazıları da yeni kirlenmelere yol açabilir. Soğuma hızı, katılma ve soğuma aşamalarında en önemli faktörleridir. Katılma esnasında çekirdeklenmeye müteakip alt soğuma ve soğuma hızı ile damlaların temas etmeden katılmasına izin veren atomizasyon ünitesinin tasarımı ve boyutları partikül mikro yapısını belirleyen faktörlerdir. Jet tasarımı ve konfigürasyonu, atomize tozun basıncı ve hacmi, akan sıvının kalınlığı ve diğer bazı parametreler değiştirilmek suretiyle partikül boyut dağılımını istenilen oranlarda değiştirmek mümkün olabilmektedir. Katılma hızı ağırlıklı olarak partikül şekline etki etmektedir. Prensipite ergitilebilen tüm metallere uygulanabilmekle beraber daha çok ve yaygın olarak demir ve bakıra ve ayrıca takım çelikleri, alaşımli çelikler, pirinç, bronz ve düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyum, kalay, kurşun ve kadmiyum gibi hafif metallere de uygulanmaktadır. Kolayca oksitlenebilen krom burç ve yatak alaşımları koruyucu pasif gaz özellikle argon ortamında atomize edilmektedir. İçeriği oluşturan tüm bileşiklerin ergiyik halde bulunması nedeniyle atomizasyon yöntemi, özellikle alaşımli tozların üretiminde çok kullanışlıdır. Bu yolla tüm toz partikülleri aynı kimyasal bileşime sahiptir. Ayrıca bu yöntemle bakır-kurşun bileşimli tozlar da oluşturulabilir. Atomize tozun en önemli özelliği; ortalama toz boyut dağılımı, toz şekli, kimyasal bileşimi ve mikro yapının uygunluğudur. Bu temel toz özellikleri; tozun görünen yoğunluk, akıcılık, sinterlenebilirlik gibi teknolojik özelliklerini etkiler.

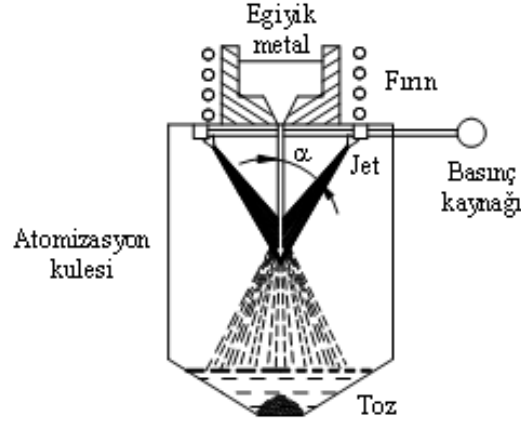
Atomizasyon işlemi temel olarak 4'e ayrılır. Bunlar;

1. Su atomizasyonu,
2. Gaz atomizasyonu,
3. Döner disk atomizasyonu,
4. Döner elektrot atomizasyonu'dur [10].

2.3.2.1. Su atomizasyonu

Endüstriyel manada düşük kuruluş ve işletme giderleri nedeniyle, atomizasyonla toz üretim yönteminde su jeti sıvı atomizasyonu üretim miktarı açısından kullanılan en yaygın toz

üretim yöntemidir. Su atomizasyonunda kimyasal çökelme problemi yoktur. Ancak toz yüzeyinde oluşan oksitlenme bu metodun problemi olarak görülebilir. Şekil 2,4’de su atomizasyonda yaygın şekilde kullanılan iki jet sistemi görülmektedir. Bu iki sisteme yassı huzmeli V jetleri denir [11].

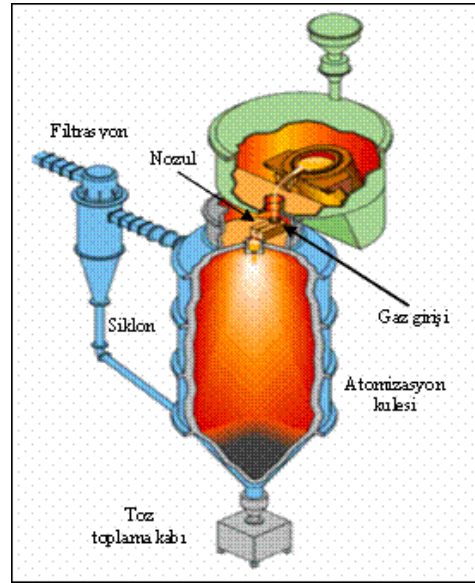


Şekil 2.4 Su atomizasyon işlemi [12].

Bu sistemde, pota çıkış ağzını terkeden ergiyik metal düşey yönde akıtılırken yüksek basınçlı ve özel tasarımlı su jetleri metal ergiyi parçalara ayırır. Suyun basıncı genellikle 6-21 MPa arasındadır. Bu değerler saniyede 70-250 m/s`lik bir hız sağlar. 10-100 kg/dk metal akışı için 0.1-0.4 m³/dk`lık sıvı akışı tüketimi söz konusudur. Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen ampirik ilişkiler bu yöntemle elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına; suyun basıncı ve hızı, metal ergiyik akış açısı, ergiyik viskozitesi, ergiyik yoğunluğu, ergiyik yüzey gerilimi ve sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Yöntem parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle toz şekli farklılık gösterebilir. Tipik toz şekli düzensizdir. Tozların sıkıştırılma sonrası ham dayanımları yüksektir ve yapısal parçaların imalinde kullanılır. Atomize edilen metal ve kullanılan suyun reaksiyonu ise sistemin dezavantajlarındanadır. Bu nedenle yöntem, oksijenin sorun olmadığı veya küçük miktarlarda oksijenin önemsenmediği ya da sistemden atomizasyon sonrası işlemlerle kolayca uzaklaştırılabildiği metal ve alaşımlarda kullanılabilir. Örneğin demir ve düşük alaşımlı çelik tozları sulu atomizasyon sonrası hidrojen içeren atmosfer ortamlarında redüklenir. Sıvı atomizasyonu ile üretilen tozların sıkıştırılabilirliği çok yüksektir. Oksijen problemine karşı son zamanlarda sentetik yağlar suyun yerini almıştır.

2.3.2.2. Gaz atomizasyonu

Gaz atomizasyonu en çok tercih edilen atomizasyonla toz üretim sistemleri arasında ikinci sıradadır. Hava, azot (N_2), argon ve helyum arzu edilen özellikler göz önünde bulundurularak metal ergiyik sıvısının parçalanması ve soğutulması için kullanılırlar. Atomizasyon düşey ve yatay pozisyonda uygulanabilir. Ortalama toz boyutu ve partikül şekli su atomizasyonuna benzer şekilde değişik işlem parametrelerine bağlıdır. Gaz atomizasyonunun verimliliği su atomizasyonu ile aynı düzeyde olmakla birlikte işletim ve ürün maliyeti daha fazladır. Atomizasyon tankı içerisindeki gaz, sisteme bağlı bir siklon aracılığıyla toplanır. Beraberinde çok ince tozları da taşıyan gaz siklon içerisinde tozlardan arındırılarak tekrardan kullanılır. Gaz suya oranla daha düşük soğutma hızı sağladığından atomizasyon tankı daha büyük boyutlarda imal edilmek durumundadır. Şekil 2,5'de gaz atomizasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Ergimiş metal tandiş adı verilen bölgeye dökülür. Tandiş, sıvı metali kısa süreli dinlendiren bir haznedir. Ergiyiğin uniform ve kontrollü olarak lüle içine akmasını sağlar. Tandişin hemen altında yer alan lüle, metal akımının şekil ve boyutunu kontrol eder [13].



Şekil 2.5 Gaz atomizasyonu ile üretim şeması [14].

Gaz sıvı metal arası enerji transferinin çok etkili olmasından dolayı yaygın olarak gaz atomizasyonunda uygulama alanı bulan "sınırlanmış" lülelerde orifis içerisinden yerçekimi etkisi ile akan sıvı metal hüzmesi, çevresel atomizasyon ortamı ile hemen orifis ağzında atomize edilmektedir. Serbest akma düzeneklerinde ise lüle, tandişin altında metalin serbestçe aktığı bir

delik halinde bulunan orifis ve metal hüzmesine yüksek basınçlı atomizasyon ortamı fişkırtan iki ya da çoklu üfleçlerden oluşur. Böylece bir düzenekte, sıvı metalin orifis ağzından atomizasyon ortamı ile çarpışana kadar kat ettiği 5-20 cm'lik serbest düşüş miktarı göz önünde tutulduğunda, üfleçler ile sıvı metal ara mesafesi büyük olduğundan yüksek katılma hızlarına neden olan sıvı ortamları, yani su kullanılır [15].

Lüle içinde sıvı metalin aktığı meme olan orifisin yapısı da toz özellikleri için belirleyici olabilmektedir. Orifis geometrisi, silindirik ve yüksek sıcaklıkta aşınmaya dayanıklı refrakter malzemelerden yapılır. Küçük çaplı orifisler metal akış miktarının düşük olmasına neden olacağından ince toz parçacıklarının üretilmesine yol açacaktır. Bu durum düşük üretim hızlarının seçiminin temel nedenidir.

Lüleden akan yüksek hızlı ergiyik metal kütlesi, atomizasyon ortamı ile karşılaşınca ısı enerjisini vererek soğurken kinetik enerjisini vererek de damlacıklara parçalanır ve atomizasyon tankı dibinde toplanır. Gaz atomizasyonunda toz, kuru toz olarak toplanabileceği gibi, tank dibinde toz parçacıklarının birbirlerine, atomizasyon tankına ve toplayıcı çeperlerine yapışmasını önlemek için su içinde de toplanır. Sürekli çalışan ya da büyük çaplı üretim yapan sistemlerde atomizasyon tankının alt kısmı dıştan soğutmalı olabilir.

Gaz ve su ile atomizasyonun toz şekline ve tozun mikro yapısına olan etkileri farklıdır. Gaz atomizasyonunda en çok azot gazı kullanılır. Su ile sıvı metal arasındaki ısı geçişinin gazlar ile sıvı metal arasındaki ısı geçişinden daha şiddetli oluşu nedeniyle; su atomizasyonunda su, sıvı metali daha hızlı katılaştırabilmektedir. Su basıncı artırılırsa, ortamın soğutma gücü de artacak ve tozun katılma zamanı kısılacaktır. Gaz ya da su atomize tozların mikroyapısı, amorf tan eş eksenli tanelere veya dendrite kadar değişmektedir. Mikroyapı karakteristiğini belirleyen ana etken soğuma hızıdır. Artan soğuma hızı ile kristaleşen bölgede, katılan metal tozlarında dendritik kollar arasındaki mesafe kısalmır. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların tipik mikroyapıları dendritiktir.

2.3.2.3. Döner disk atomizasyonu

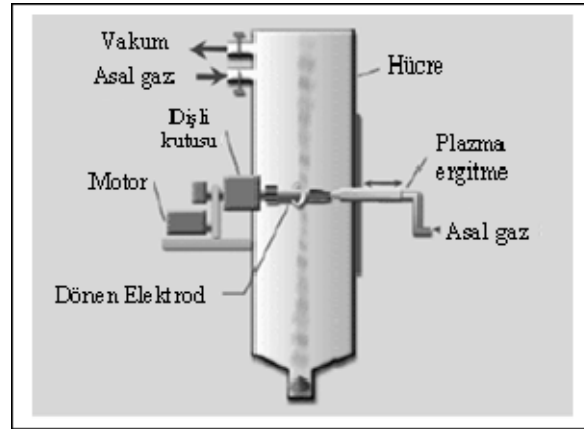
Bu yöntemde sıvı metal, bir potadan, dönmekte olan bir disk üzerine akar. Diskin dönme hareketinden dolayı metal hüzme merkez kaç kuvveti etkisi ile saçılacak bir potaya toplanır. Döner disk atomizasyonunda düz disk, çanak disk ve kanat disk gibi değişik diskler kullanılır. Bu metodun tek problemi sıvı metal ile disk arasındaki sürtünmenin kontrol güçlüğüdür. Şekil 2,6'de döner disk modeli görülmektedir [13].



Şekil 2.6 Döner disk atomizasyonu [16].

2.3.2.4. Döner elektrot atomizasyonu

Tozu üretilecek metal elektrot bir ark plazma ile ısıtılır. Isıtılan çubuğun çok hızlı döndürülmesi ile (1000 dev/dak veya daha fazla) ergimiş damlacıklar yine merkezkaç kuvvet etkisiyle savrulurlar. Bunlar özel bir odacıkta toplanır. Bu metotta tane iriliği 30-500 mikron arasında olan tozlar elde edilir [17]. Şekil 2,8’de döner elektrot yöntemi ile toz üretimi görülmektedir.



Şekil 2.7 Döner elektrot atomizasyonu [16].

2.3.3. Elektrokimyasal yöntemler

Bu yöntemlerde metal tozu üretimi sulu çözeltilerden veya sıvı tuz banyosundan metallerin elektroliz yöntemi ile ayrıştırılmasıyla yapılmaktadır. Sulu çözeltilerin elektrolizi, özellikle Cu, Fe, Ni, Co, Zn, S ve Pb tozlarının üretilmesi için uygundur. Reaksiyon sulu çözeltiler için düşük sıcaklıklarda (~ 60 °C) gerçekleşiyor olmakla birlikte, ikili veya üçlü ötektik tuz banyoları için çok daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu yöntemle tozlar

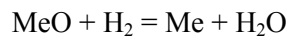
doğrudan veya elektrotta birikmiş gevrek kütle öğütülmek suretiyle dolaylı olarak elde edilebilir. Yöntemi etkileyen ana parametreler; ortamdaki metal iyonlarının konsantrasyonu, elektrotun iletkenliği, sıcaklık, gerilim değeri ve akım yoğunluğu, sıvı banyonun kinetiği ve tane büyümesini engellemeye yönelik olarak çekirdeklenme için parçacık ilavesi olarak sıralanabilir.

Tozlar elektrolitin hareket etmesi nedeniyle veya katodun toplanması suretiyle tank tabanında toplanır. Yeteri miktarda toz, tank tabanında biriktikten sonra elektrolit tanktan uzaklaştırılır ve tozlar asitten yıkanarak temizlenir. Son olarak tozlar hava içerisinde 100 °C`de kurutulur. Bu yöntemle yüksek saflıkta gözenekli tozlar değişik toz boyutlarında imal edilebilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların sıkıştırılabilirlikleri ve presleme sonrası dayanımları yüksek olmaktadır [9].

2.3.4. Kimyasal yöntemler

Toz metalürjisinde ana kimyasal işlemleri metal oksit, karbonatlar, nitratlar veya halojenli (VII Grup Element, F, Cl, Br, I) bileşiklerin bir gaz (genellikle H₂) veya katı (karbon veya yüksek oranda reaktif metal) yardımıyla indirgenmesi oluşturur. Çoğu kez indirgenecek bileşik katı haldedir. Bununla özellikle nikel ve kobalt çözeltilerinin basınçlı hidrojenle indirgenmesi amacıyla hidrometalurjik yöntemler de geliştirilmiştir. Reaksiyonun katı faz veya katı-gaz fazda gerçekleştirilmesi sonrası saflaştırma yapılamadığından reaksiyona yeterince saf hammadde girişi sağlanmalıdır. Kinetik nedenlerden dolayı indirgemesi yapılacak bileşim yeterince ince tanelerden (tozlardan) oluşmalıdır. Aksi halde reaksiyon süresince difüzyon sürecinin kontrolü istenmeyen şekilde uzar. İndirgeme süreci negatif olan reaksiyon serbest enerjisi tarafından kontrol edilir. Bileşiğin kararlılığı arttıkça daha güçlü indirgeme ortamı seçilmelidir.

Hidrojen indirgemesi oksitlerin veya diğer bileşiklerin hidrojen ile indirgemesi metallerin ergime sıcaklığının çok altında gerçekleşebilmektedir. Teknik önem arz eden orta derecede kararlı olan refrakter metaller, tungsten ve molibden ile ferro alaşımları ve bakır malzemeler bunlara birer örnektir. Bu yöntemle çok ince ve saf tozlar elde edilebilir. İşlem genellikle tüp fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Bir konteyner içerisine yerleştirilen oksit tozları tüp içerisinden geçirilirken, aksi yönde hidrojen akışı sağlanır. Genel reaksiyon basit şekilde aşağıdaki gibidir [18].



2.4. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Toz metalürjisi ile imal edilen parçaların özelliklerini büyük oranda bu parçaların imalinde kullanılan tozların sahip olduğu özellikler belirlemektedir. Bu nedenle tozların özelliklerinin önemi ve aldıkları rolün iyi anlaşılması ve bazı uygun nicelikli karakterizasyon metotlarının uygulanması önemlidir. Toz özellikleri iki ana alt bölümde ele alınabilir.

Teknolojik özellikler:

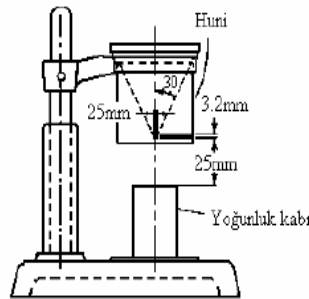
- Toz akıcılığı,
- Görünür yoğunluk,
- Sıkıştırılabilirlik.

Fiziksel özellikler:

- Toz şekli,
- Toz boyutu dağılımı,
- Özgül yüzey alanı,
- Saflıkları (oksijen, karbon, Na, Ca, Fe miktarı) [9].

2.4.1. Toz akıcılığı

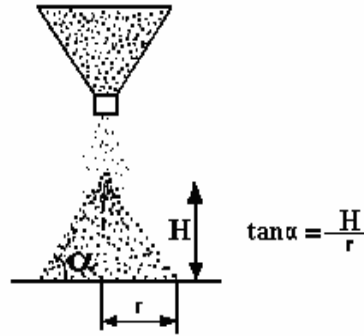
Bir tozun akıcılık özelliği o tozun doldurma davranışı ile belirlenir. Akıcılık, bir kaba doldurmak için gerekli zamana ve özellikle dar aralıklara dolum derecesine bakılarak belirlenir. Akış hızı; 50 g kuru tozun Şekil 2,9'da görülen Hall akış hunisinden kendi halinde akış zamanıdır [19]. Akış hızı seri parça imalinde kalıbın doldurma zamanı ile doğrudan ilgili olduğundan önemlidir. En iyi akış özelliğini küresel tozlar verir. Pul şeklinde tozlar kolay akmazlar ve kalıpları bu tozlarla doldurmak zordur [1].



Şekil 2.8 Hall akış hunisi [20].

Toz taneciklerinin şekli, boyutlu, dağılımı, üretim metodu, tozun nemli veya kuru olması ve toz yüzeyinde oluşan oksitler akma özelliğini büyük ölçüde etkiler. Örneğin toz

yüzeyindeki alüminyum oksit kaymaya etki ederken, magnezyum oksit tutucu tesir yapar. Tozun akıcılık özelliğini artırmak için toza yağlayıcılar ilave edilir. Tozun akma özelliği şev açısından yararlanılarak da tayin edilebilir. Genellikle akış özelliği iyi olmayan tozlar bu yöntemle akış hızları bulunur. Sev açısı; Şekil 2,10'de görüldüğü gibi tozun belli şartlar altında yatay bir yüzey üzerine bir huniden serbestçe döküldüğünde oluşturduğu yığının taban açısıdır [20].



Şekil 2.9 Hall hunisi ile şev açısının ölçümü [20].

2.4.2. Görünür yoğunluk

Belirli hacimde sıkıştırılmamış toz kütlelerinin ağırlığıdır ve g/cm^3 olarak ifade edilir. Pres kalıbı tasarımında bilinmesi gereken en önemli toz özelliğidir. Görünen yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve metalin yoğunluğuna bağlıdır. Küçük taneli ve karmaşık taneli tozlar görünür yoğunluğu azaltır.

Görünür yoğunluğun tespiti ASTM B212 ye göre Şekil 2,8'de verilen Hall hunisi ile yapılır. $30-35 cm^3$ kuru toz Hall hunisine doldurulur ve altına yerleştirilen $25 cm^3$ hacimli kaba belli yükseklikten akıtılır, kap dolunca düz bir cetvel ile silinir $25 cm^3$ 'lük kaptaki tozlar tartılır, ve g/cm^3 olarak görünür yoğunluk tespit edilir [3 ve 21].

Maddeler halinde özetlenirse;

- Yüksek görünür yoğunluklu tozlar, yüksek yoğunlukta ve büyük yükseklik gerektiren parçaların üretildiği durumlarda tercih edilir.

- Yüksek görünür yoğunluklu tozlar daha çok kalıp hassasiyeti gerektirirler.

- Düşük görünür yoğunluklu tozlar sıkıştırma sırasında daha iyi yoğunluk dağılımı yaparak kalıp setine daha az hassasiyette tolerans tanınabilir.

- Düşük görünür yoğunluklu tozlar daha büyük kalıp yüksekliği ve daha uzun pres hareketi gerektirirler. Bu nedenle yüksek yoğunluk ve büyük parçaların yapımına uygun değildir [22].

2.4.3. Sıkıştırılabilirlik

Sıkıştırılabilirlik veya preslenebilirlik, ASTM B243-94 standartlarına göre metal tozun kapalı bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak yoğunluk kazandırılabilme kapasitesi şeklinde tanımlanmaktadır. Sayısal olarak istenilen yoğunluğu elde etmek için gerekli basınç değeri veya verilen basınç değeri için elde edilen yoğunluk olarak belirtilir. Yüksek sıkıştırılabilirlik, presleme (yoğunluk kazandırma) ve sinterleme (pişirme) yöntemi ile yapılan parça imalatında birincil öneme sahip faktördür. Bir tozun sıkıştırılabilirliği tozun şekline, tane büyüklüğüne, dağılımına, tozun sertliğine ve yağlayıcılara bağlıdır. Sıkıştırılabilirlik yoğunlaşma parametresi ile belirlenir.

$$\text{Yoğunluk Parametresi} = \frac{\text{Parça Yoğ.-Görünür Yoğ.}}{\text{Teorik Yoğ.-Görünür Yoğ.}}$$

Toz metalürjisiyle parça imalinde görüldüğü gibi görünür yoğunluğu yüksek tozlar kullanmak daha uygundur. Böylece daha yüksek parça yoğunluğu elde edilir. Çoğunlukta düşük sıkıştırma oranı tercih edilir.

Düşük sıkıştırma oranlarının tercih sebepleri:

- a) Kalıp boşluğu ve takım boyutları küçüktür.
- b) Takımın kırılması ve aşınması azalır.
- c) Pres hareketi azalır.
- d) Kalıbın daha hızlı doldurulması ve sonuçta daha hızlı üretim sağlanır [23].

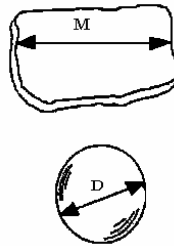
2.4.4. Tane büyüklüğü

Metal tozların tane büyüklüğü genellikle elek analizi ile yapılmaktadır. Tane büyüklüğünde esas olan parçacık boyutlarının belirlenmesidir. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez, ancak ortalama tane boyutundan söz edilebilir. 1970'de ASTM tarafından kabul edilen standart elek Çizelge 1.1.'de verilmiştir. Deney döküm kumu tane büyüklüğü tespiti ile yapılmaktadır. 45 µm'nin altındaki tane büyüklüğü için elek metodu iyi sonuç vermez. Çok ince tozlar için sedimentasyon, ışık dağılımı ve Fischer elek metotları kullanılır.

Çizelge 1.1 Standart elek takımı [24].

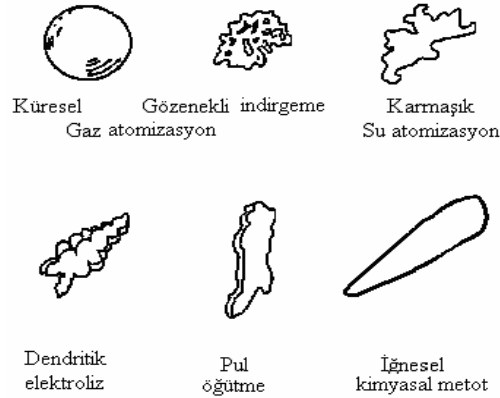
Mesh	Delik (μ)
30	600
40	425
50	300
60	250
80	180
100	150
140	106
200	75
230	63
325	45

Tozun şekli tane büyüklüğünün tespitine çok etki eder. Küresel tozlarda sadece çapın bilinmesi yeterli iken pul şeklindeki toz parçacıklarının pul kalınlığı ile düzlem yönündeki boyutun ölçülmesi gerekir.

**Şekil 2.10** Küresel ve pul şeklindeki parçalar.

2.4.5. Tane şekli

Metal tozlarının en önemli iki özelliği toz tane şekli ve büyüklüğüdür. Tozların tane şeklinin tayini ışık ve elektron mikroskobu ile yapılmaktadır. Taneciklerin şekli tozların akış, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet gibi özellikleri etkileyen önemli bir etkidir. Şekil 2,12’de üretim metotlarına göre toz tane şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.11 Toz tane şekilleri [7].

2.5. Tozların Karıştırılması

Tozlar dengeli homojen karışım verecek şekilde karıştırılmalı ve bu karışım, kalıbın bütün bölgelerinden akacak şekilde olmalıdır. Bunu başarmak için toz karışımının içerisine grafit gibi metal olmayan element katılıp hassas bir şekilde tartılarak bir karıştırıcıya konulmalı ve ilave edilecek yağlayıcı da oran itibarıyla % 0,5-1,5 arasında bulunmalıdır. Karıştırma zamanı, sonradan gelecek işlemlerdeki malzeme davranışlarına ve üretilecek parçanın özelliklerine etki eder. Kalıp aşınmasını en aza indirmek ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelere yapıştırılması gerekir [25].

Tozların karıştırılması V veya Y tipi karıştırıcılar adıyla bilinen çift konili karıştırıcılarda yapılır. Karıştırma; tozların tane boyutuna ve şekline göre birikmesini önlerken, akış karakteristiğini ve görünen yoğunluğunu da değiştirir. Ayrıca taneciklerin nispeten kırılmasına, yuvarlatılmasına ve yüzey pürüzlülüğünün giderilmesine sebep olur. Gerektiğinden fazla karıştırma taneciklerin plastik deformasyonuna sebep olur. Bu da tozun sıkıştırılabilir özelliğini azaltıp, şekillendirme sırasında gereğinden fazla soğuk işlem gerektirir.

Karıştırma genellikle toza yağlayıcı veya alaşım elemanı ilavesi gerektiğinde yapılır. Temel amaç farklı yapıdaki malzemelerden tek düze bir karışım elde edilmesidir. Sinterleme dahil bütün işlem kademelerindeki değerlendirmeler yapılmadan yeteri derecede karıştırma yapıp yapılmadığına karar vermek oldukça güçtür [23].

2.6. Kullanılan Yağlayıcılar

Toz ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle, şekillendirme enerjisinde büyük kayıplar oluşur. Bunun yanı sıra bitişik tanecikler arasında, toz ile zımbalar ve masalar arasında, zımbalar ile kalıp yüzeyi arasında da sürtünme vardır. Ayrıca kalıptan çıkarma sırasında parça

ile kalıp iç yüzeyleri arasındaki sürtünme de önemlidir. Bundan dolayı hem şekillendirme hem de kalıptan çıkarmada etkili olacak ve sinterlemeyi bozmayacak bir yağlama düzenine ihtiyaç vardır.

Metal tozuna toz şeklinde yağlayıcı karıştırıldığında bu yağlayıcı, tozun her tarafına dağılmış olur. Ancak bu durumda yağlayıcının toz kütlesi içinde kaldığı ve etkisiz olduğu görülmüştür. Ayrıca yağlayıcılar sıkıştırılmış tozun özelliklerini kötü yönde etkiler.

Metal stearatlar, stearik asit ve balmumu olarak kullanılan yağlayıcılar, ergime sıcaklığı düşük organik bileşiklerdir. Bu bileşiklerin yoğunlukları düşük olduğundan, yüzde ağırlıkça küçük miktarlarda ilave edilmeleri büyük hacimlere karşılık gelir [23].

2.7. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)

Toz metalurjisinde imalat sürecinde parçanın imalat süresi ve oranı önemli bir faktördür. Sıkıştırma bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir.

T/M üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı presleme ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Sinterleme de esas olan istenilen yoğunluğun (çoğu zaman tam yoğunluk) ve dolayısıyla fiziksel dayanımın elde edilmesidir. İdeal yoğunluk % 100 teorik yoğunluğa erişmektir [9].

Sıkıştırma üç aşamada ele alınabilir:

1. Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip partiküllerin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlenmesi gerçekleşir. Plastik şekil değiştirme yoktur. Kısmi olarak bazı partiküllerde mekanik kırılmalar olabilir. Bu aşamada partikül boyutu, toz boyut dağılımı, partikül şekli ve yüzey özellikleri ile partiküller arası sürtünme önemli rol oynar.

2. Toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında elastik ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Bu aşamada tanecikler arası soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca partiküllerin mekanik kilitlemeleri ile partikül-partikül etkileşimleri bu aşamada önem kazanan durumlardır.

3. Presleme basıncının arttığı sıkıştırmanın son aşamasında toz taneciklerinin kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanmış olur. Bu aşamada toz tanecikleri arasında soğuk kaynak olabilir.

Kalıp içerisindeki tozun ham yoğunluğa bağlı başlangıç yüksekliği, onun sıkıştırılabilirliğinde belirleyici rol oynar. Tozun kalıp içerisine sorunsuz ve hızlı akması da önemlidir. Toz boyutu ve şekli tozun kalıba akış hızına etki eder.

Bağıl yoğunluk, ham yoğunluk değerinin teorik yoğunluk değerine oranı olarak tanımlanabilir. Tozların yüzey şekli akıcılık davranışlarını etkilemektedir. Genel olarak tozların yüzey şekli düzensizdir. Burada belirtilenlerin dışında tozların fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin de presleme yolu ile sıkıştırılabilirliğe (yoğunlaştırılmaya) etkileri vardır. Çizelge 2,2’de tozların önemli özellikleri ve bunların etki ettiği faktörler özetlenmiştir [26].

Çizelge 2.2 Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörleri.

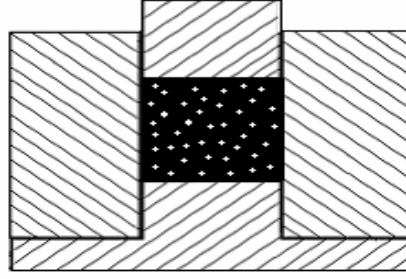
Önemli Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu (tanecik boyutu)	Görünen (ham) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli (tanecik şekli)	Ham dayanım
Kimyasal bileşim	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikroyapı	Şekillendirilebilirlik, tokluk

Metal tozların kalıp içersinde preslenmesi;

a- Tek hareketli sıkıştırma,

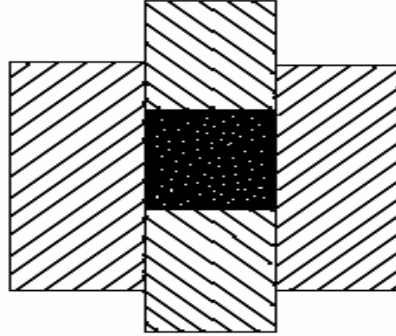
b- Çift hareketli sıkıştırma olarak iki guruba ayırabiliriz.

a- Tek hareketli sıkıştırma: Tek hareketli sıkıştırmada dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla tozlar arası ve toz kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme boy ve çap arasındaki düzensiz bir basınç dağılımına sebep olur. Sonuç olarak uygulanan yük, iş parçasına düzenli olarak uygulanmaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermektedir [27].



Şekil 2.12 Tek hareketli presleme [27].

b- Çift hareketli sıkıştırma: Çift hareketli sıkıştırmada toz, birbirine zıt yönde hem alt hem de üst zımba tarafından ayrı ayrı sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemde, her bir yünden eşit veya farklı miktarda hareket veya basınç uygulanabilir [21]. Çift hareketli sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir. Kalıp alttan bir yayla desteklenerek çift yönlü sıkıştırma gerçekleştirilebilir. Buradaki yay kuvveti pres kuvvetine adapte edilmektedir. Preslenecek parçaların dik kesitlerinin kademeli olması preslemede güçlük çıkarır. Bir parçanın kalıptan rahatlıkla çıkarılması da parçanın şekline bağlıdır. Çift hareketli sıkıştırmanın en önemli avantajı, briket kesitinin her yüksekliği için pres kontrolü uygun kalıp hareketinin olabirliği [28].



Şekil 2.13 Çift etkili presleme [27].

2.8. Sinterleme

Preslenmiş toz malzemeye istenilen fiziksel ve mekaniksel özellikler kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda yapılan bir işlemdir. Tek bileşik sistemin sinterleme sıcaklığı ergime noktasının veya katılma sıcaklığın Kelvin cinsinden değerinin $2/3-4/5$ 'i kadardır. Çok bileşikli toz karışımlarında ise sinterleme sıcaklığı genellikle en düşük ergime noktasına sahip bileşiğin ergime noktasının hemen altında veya civarında seçilir. Sinterleme işlemi genellikle

kontrollü atmosfer ortamında yapılır. Sinterlenen parçaların sinterleme sıcaklığına çıkış hızları, sinterleme sıcaklığında kalma süreleri ve soğuma hızları ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir [29 ve 30].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, en geniş anlamıyla, iki veya daha fazla malzemenin, kendilerinden daha iyi özelliklere sahip olacak yeni bir malzeme oluşturmak amacıyla birleştirilerek üretilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Bir malzemenin kompozit olarak değerlendirilmesi için, kabaca şu özellikleri taşıması gerekmektedir:

- i) Kimyasal olarak birbirlerinden farklı en az iki bileşenin kombinasyonu ile üretilmesi,
- ii) Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin üç boyutlu olarak birleşmeleri,
- iii) Nihai malzemenin, bileşenlerinin tek başlarına sahip olamayacağı özellikleri göstermeleri.

Atomik seviyede, iki veya daha fazla sayıdaki farklı atomun bir arada bulunması durumunda, malzeme kompozit olarak ifade edilirken, mikroyapısal seviyede, kristal, faz, molekül ve bileşenlerin, iki veya daha fazla sayıdaki kristal, molekül ve faz yapılarından meydana gelmesiyle oluşan yapılar kompozit malzeme olarak tanımlanabilirler. Ne var ki, geleneksel olarak homojen ve monolitik olarak sınıflandırılan pek çok malzeme bu tanımlama ile kompozit sınıfına girebilmektedir. Buna rağmen, pirinçler, bronzlar gibi tek fazlı alaşımlar, monolitik malzeme olarak ele alınmaktadır. Çok fazlı bir karbon alaşımı olan çelikler ve dökme demirler ise kompozit malzemeler sınıfına girmektedirler.

Ayrıca hem yapısal olarak, hem de malzeme bileşenlerinin kompozisyonu açısından, kompozit malzemelerin tanımı şu şekilde yapılmaktadır: “Bir kompozit malzeme, temel olarak birbiri içinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makrobileşenin karışımından veya birleşmesinden meydana gelen malzeme sistemidir [31].”

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler ile ilgili, metal-organik, metal inorganik gibi malzeme kombinasyonları; matris sitemleri, tabaka yapılar gibi bileşen fazların karakteristikleri; sürekli, süreksiz gibi bileşenlerin dağılımları; elektriksel, yapısal gibi fonksiyonlar ve özellikleri göz önünde bulundurularak çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Yapısal bileşenlerin şekline göre yapılan genel bir sıralama şöyledir:

1. Fiberli kompozitler,
2. Levhasal kompozitler,
3. Partikül kompozitler,
4. Doldurulmuş (veya iskelet) kompozitler,
5. Tabakalı kompozitler.

Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesinin türüne göre sınıflandırmalar yapılmaktadır. Matris malzemesi üzerine yapılan sınıflandırmada kompozitler genel olarak, polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler olmak üzere üç ana sınıfta incelenmektedir [31 ve 32].

3.1.1 Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimerler, metal ve seramiklere göre daha karmaşıktırlar. Matris malzemesi olarak kullanılan polimerler, düşük maliyetli ve nispeten kolay çalışılabilir malzemeler olmakla birlikte, bu malzemelerin düşük elastiklik modülü ve düşük kullanım sıcaklıklarına sahip olmaları, kullanım alanlarını sınırlamaktadır. PMK'lerde, matris yapısı termoset veya termoplastik polimerlerden oluşur. Kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları ise; cam fiber, kevlar fiber, bor ve karbon fiberlerdir.

Polimer matrisli kompozitlerin (PMK) üretiminde en çok kullanılan yöntemler, elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum yöntemleridir [31].

Polimer matrisli kompozitlerin (PMK) başlıca kullanım alanları ise, korozyon direnci sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafifliği sebebiyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri ile spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen, otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar olarak gösterilebilir [32].

3.1.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklık ve aşırı korozif ortamlara çok uygun olmasına karşın, yük altında gevrek davranış göstermektedir. Seramik malzemelerin gevrek davranış göstermeleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Son yıllarda seramik malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için seramik matrisli kompozitlerin (SMK) kullanımı gündeme gelmiştir. Seramik matrisli kompozitlerin üretimindeki amaç, takviye ve matris malzemesi olarak iki ayrı malzeme bir araya getirilerek seramik matrisin tokluğunu artırmaktır. Takviye malzemesi olarak genelde elyaf şeklinde malzemeler kullanılmaktadır. SMK'lerin tokluğunun

artmasındaki en önemli etken takviye malzemesi olarak kullanılan çatlak ilerlemesini engellemesi ve geciktirmesidir. Yük altında seramik matris içindeki çatlak, elyaf ile karşılaştığında yön değiştirmek ve çatlağın ilerlemesi durmaktadır. Mekanik yüklere karşı dayanımı sağlayan elyaf korozif ortamdan etkilenmeyen seramik matris içerisine gömülmekte, matris malzemesi elyafı korozif ortama karşı korurken, elyaf malzeme de kompozite uygulanan yükü taşımaktadır. Yaygın olarak kullanılan SMK'ler: SiC/Cam, SiC/Si₃N₄ ve Karbon/SiC karışımlarıdır (sıralama Elyaf/Matris olarak verilmiştir) [32].

SMK'lerin üretimi iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. İlk aşamada takviye malzemeleri matris içine verilir ve ikinci aşamada matris yoğunlaştırılır. İnfiltrasyon, sıcak izostatik presleme, sol-jel, polimer piroliz, kimyasal reaksiyon ve toz metalürjisi kapsamında incelenebilecek tüm yöntemler, SMK'lerin üretim yöntemlerine örnek olarak gösterilebilir.

SMK'lerin kullanım alanları ise, roket ve turbojet motorlarda egzoz çıkışları, uydularda boyutsal kararlılık istenilen parçalar ve bazı biyomedikal malzemeler olarak örneklenebilir [31 ve 32].

3.1.3 Metal matrisli kompozitler (MMK)

Enerji, iletişim, ulaşım, havacılık, uzay gibi alanlarda yaşanan teknolojik gelişmeler, güvenilirlik, ekonomik zorluklar ve çevresel kaygıların da bunlara eklenmesiyle, geleneksel malzemelerin ötesinde yeni malzemelere ihtiyaç duymaktadırlar [33].

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da seramik ya da refrakter bir takviye elemanın kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin seçiminde hemen hemen hiçbir sınırlama yoktur. Deneysel çalışmalara bakıldığında çok farklı türlerin kullanıldığı göze çarpar. Son 45-50 yıldır MMK'ler ile ilgili pek çok araştırma yapılmış ve literatürde olumlu şekilde yer almıştır [35-36]. Ancak hepsinden önce, MMK'lerin, monolitik alaşımlara göre esas üstünlüğünün, bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, mikroyapıları üzerinde yapılan değişikliklerle, mühendislik uygulamalarının ihtiyaç duyduğu seviyeye çıkarılabilmesi olduğu vurgulanmaktadır [37]. Ancak bunların optimum kullanım şartlarının belirlenmesinde ve pratikte kullanılmasında temel bazı şartlar aranır. MMK'lere üstünlük sağlayan ana noktalar şu başlıklarda toplanabilir:

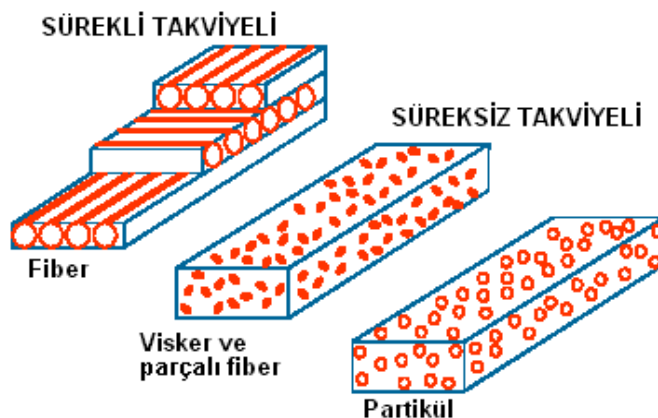
- a) Yüksek elastiklik modülüne sahiptirler,
- b) Yüksek mukavemete (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma) sahiptirler,
- c) Yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler,

- d) Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahiptirler,
- e) Düşük yoğunluğa sahiptirler,
- f) Sıcaklık değişimlerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- g) Yüksek yüzey dayanıklılığına sahiptirler,
- h) Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik özelliklerine sahiptirler [31].

Seramiklerin yüksek elastiklik modülü ve metallerin yüksek süneklik özelliklerini bir araya getiren MMK'ler, havacılık, askeri endüstri ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen özelliklere, bu malzemelerin yüksek aşınma dirençleri de eklendiğinde, MMK'ler, modern mühendislik malzemeleri içinde önem kazanmaktadır [31].

MMK'ler yapısal olarak, tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere metal alaşımlı matris içinde sürekli veya süreksiz (kısa) fiber, visker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir (Şekil 3,1). Takviye fazına göre MMK'ler başlıca üç grupta incelenmektedir:

- i) Rijitliğin ve çoğunlukla da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bir bağlayıcı matris içine tane şeklindeki takviyelerin ilavesi ile elde edilen partikül esaslı kompozitler,
- ii) Yüksek uzunluk/çap oranı nedeniyle daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, dolayısıyla yüksek dayanımlı visker, kısa fiber veya lamel esaslı kompozitler,
- iii) Fiberlerin yüksek yeterlikli tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı kompozitler.



Şekil 3.1 Metal matrisli kompozitlerde tipik takviye geometrileri [38].

Partikül takviyeli MMK'ler, diğerlerine göre düşük maliyet, yüksek rijitlik ve hemen hemen izotropik özellikler gösterirken, mukavemetteki gelişmenin az olduğu ve kopmadaki şekil değişimi ile kırılma tokluğunun düşük olduğu görülmektedir. Visker veya kısa fiber

takviyeli MMK'ler ise, partikül takviyelilere göre daha yüksek maliyetli iken daha mukavim olduğu görülmektedir. Sürekli fiber katkılı MMK'ler, mukavemetin en iyi bileşimini verirken, özelliklerinin anizotropik olması ve daha da önemlisi, kullanılan fiberlerin ve üretim prosesinin maliyetinin yüksek olması, bu malzemelerin dezavantajları olarak öne çıkmaktadır [32 ve 33].

Metal matrisli kompozitler için hemen hemen bütün mühendislik malzemeleri matris olarak kullanılabilir. Bunların başlıcaları Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo, ve Ni gibi metaller ile bunların alaşımlarıdır. Bu durumlarda titanyum ve alaşımları çok kullanılan matris malzemelerdir. Ayrıca özellikleri takviye elemanı sayesinde daha da geliştirerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, termal kararlılık, kolay üretilebilirlik özelliklerinin artırılması söz konusudur. Magnezyumun da matris malzemesi olarak kullanılması her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Mg ve alaşımları düşük yoğunluklarından dolayı otomotiv ve uzay sanayinde kullanılmaktadır. Mekanik ve fiziksel özellikleri kullanılmasına sınırlama getirmekle birlikte, seramik parçacıklarla kullanılarak bu sınırlamalara rağmen aşınma direnci ve genleşme özellikleri geliştirilerek mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır [39].

4. MAGNEZYUM

4.1. Magnezyumun Genel Özellikleri

Son yıllarda, performans gelişiminde ağırlık tasarrufunun kritik olduğu mühendislik uygulamalarında hafif malzeme kullanımının artması ile birlikte otomotiv, uzay ve makine gibi üretim sektörlerinin magnezyum ve alaşımlarına olan ilgisi artmıştır. Diğer metaller (Al, Ti, Zn, Fe) ile karşılaştırıldığında oldukça düşük yoğunluğa sahip saf magnezyum 1.74 g/cm^3 yoğunluğu ile yaklaşık olarak alüminyum alaşımlarından % 35, titanyum alaşımlarından ise % 65 daha hafiftir. Oda sıcaklığında yüksek dayanım-yoğunluk ve yüksek elastik modülü-yoğunluk oranı ile magnezyum, alüminyum ve titanyum gibi hafif malzemelere göre daha avantajlıdır. Mükemmel dökülebilirlik, kaynak yapılabilme ve yüksek ısıl iletkenlik ise diğer avantajlarıdır. Ancak, bir kaç kayma sistemi ile sıkı paket hegzagonal (sph) kafes yapıya sahip olması, sınırlı sünekliğe ve dolayısıyla tokluğa yol açmaktadır. Magnezyumda soğuk şekillendirmenin yapılması zordur ve bu nedenle şekillendirmenin yüksek sıcaklıklarda yapılması gereklidir. Ayrıca zayıf korozyon direncine sahiptir ve en önemlisi üretim maliyeti yüksektir.

Döküm uygulamalarında genellikle Mg-Al serisi, Mg-9Al-0,8Zn-0,2Mn (AZ91) ve Mg-6Al-0,25Mn (AM60) gibi çok iyi dökülebilen, oda sıcaklığında iyi mekanik özelliklere sahip ve düşük maliyetli magnezyum alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımlar makinelerde, uzay sanayisinde, otomobillerde ve el takımlarının yapımında kullanım alanı bulmaktadır [40 ve 41].

4.1.1. Fiziksel özellikleri

Çizelge 3.1'de saf magnezyumun özellikleri verilmektedir. Magnezyumun kimyası genel olarak bu metalin indirgen niteliğine dayanır. Uranyum florürden (UF_4) uranyum üretiminde, özellikle bu metalden yararlanılır. Elementlerin önemli sınıflandırılmasında IIA kolonunun ilk sırasında yer alır ve aynı kolonda bulunan toprak alkali metallerle yakın benzerlikler taşır. Magnezyum kuru havadan etkilenmemesine karşın nemli ortamlarda yükseltgenir. İnce şerit, tel ya da toz halindeyken, $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda parlak bir alevle yanarak magnezyumoksiti (MgO) verir. Kütle durumunda tutuşma sıcaklığı ergime sıcaklığının üzerine çıkar. Kızıl derecede azot ve halojenlerle birleşir, kaynama sıcaklığındaki suyu ayırıştırır, oksitlerin çoğunu indirger ve asitleri bozundurur [42].

Çizelge 4.1 Saf magnezyumun özellikleri [40].

Atomik numara	12
Atomik kütle	24.31 g/g.mol
Renk	Gümüşümsü gri metal
Yoğunluk	20 °C'de 1.738 g.cm-3 650 °C'de 1.58 g.cm-3
Ergime sıcaklığı	650 °C
Kaynama derecesi	1103 °C
Kristal yapısı	Sıkı-paket hegzagonal
Yanma ısısı	25020 kJ.kg ⁻¹
Parlama sıcaklığı	2800°C
Buharlaşma ısısı	5272 kJ.kg ⁻¹
Özgül ısısı	20°C'de 1025 J.K ⁻¹ .kg
Buhar basıncı	527 °C'de 20 Pa 650 °C'de 360 Pa 1727 °C'de 400 Pa
Viskozite	650°C'de 1.25 cp
Isıl iletkenlik	27 °C'de 156W/m K 527 °C'de 146W/m K

Magnezyumun kullanımındaki en önemli problemi korozyon direncinin düşük olmasıdır. Magnezyum, alüminyum gibi hemen yüzeyinde oksit filmi oluşturur ve bu oksit filminin korozyon direncini artırmış olması beklenir. Ancak, alüminyumda gelişen geçirmez bariyer tipi oksit filminden farklı olarak bu oksit tabakası magnezyumda gözeneklidir ve koruyucu değildir. Aksine oksitlenmeyi daha da hızlandırmaktadır. Bu durum, hem saf magnezyum hem de alaşımlarının korozyonuna neden olmaktadır. Magnezyumda oluşan oksit filmi aynı zamanda suda çözünmeye ya da ortamdaki klorür, bromür, sülfat, nitrat ve kromat gibi kimyasallar ile kimyasal olarak bozunmaya eğilim gösterir. Bu yüzden her ne kadar magnezyum alaşımları kuru ve serbest klorür ortamlarında kullanılmış olsa da özellikle klorürlü ortamlarda zayıf korozyon direnci mühendislik uygulamalarında kullanımını oldukça sınırlamıştır [43].

4.1.2. Mekanik özellikleri

Saf magnezyum, 45 GPa elastikiyet ve 26 GPa kesme modülüne [44], ve 33 HB Brinell sertliğe sahiptir. Zayıf sürünme direnci ile oda sıcaklığının 150-230 °C üstündeki sıcaklıklarda dayanımını büyük ölçüde kaybetmektedir. Bu nedenle ticari magnezyum alaşımlarının sahip olduğu zayıf sürünme direnci nedeniyle, motor blokları ve otomatik şanzıman kutusu gibi çoğunlukla güç ileten ya da aktaran parçalarda (işlem sıcaklığının 170 -250 °C olduğu yerlerde) kullanımını sınırlanmıştır. Son zamanlarda böyle uygulamalar için sürünme direncinin

geliştirilmesine yönelik çabalar, deneysel alaşımların artmasına neden olmuştur. Bu alaşımların çoğu Mg-Al-Ca esaslı sistemdir. Yakın zamanda, küçük miktarlarda stronsiyum ve/veya silisyum ihtiva eden yeni Mg-Al-Ca alaşımları serisi (ACX alaşımları, alüminyum için A, kalsiyum için C ve stronsiyum ya da silisyum için X olarak belirtilmiştir) General Motors Araştırma ve Geliştirme Merkezinde geliştirilmiştir. Üçlü intermetalik faz (Mg,Al)₂Ca, ACX alaşımlarının mikro yapısında gözlemlenmiş ve alaşımların sürünme direncinin gelişmesine neden olmuştur. Yeni ACX alaşımları, mükemmel sürünme direnci (hem çekme hem de basma gerilimi altında) ile otomotiv güç aktarma parçalarında kullanılmakla birlikte düşük maliyetli malzeme gereksinimini de sağlamaktadır [45].

Magnezyum ve alaşımları tüm yapısal malzemelerden daha yüksek işlenebilirliğe sahiptir. Normalde kuru olarak işlenebilir, fakat çok yüksek kesme hızları gerektirdiğinden yanma meydana gelebilir. Bu gibi durumlarda soğutucu kullanmak gereklidir. Su bazlı soğutucuların reaksiyon oluşturma ihtimali nedeniyle mineral yağlar soğutucu olarak kullanılmalıdır. Magnezyum alaşımları HNO₃ ya da HCl seyreltik çözeltisinde veya % 5'lik H₂SO₄'de dağlanarak kimyasal olarak ta işlenebilmektedir [46].

İyi darbe ve çentik direnci ile sonuçlanan elastik enerji soğurma (absorbe) özelliğine sahip magnezyum ve alaşımları, sahip olduğu bu üstün özellikleri nedeni ile hava yastığı sistemleri gibi güvenlik ilişkili otomotiv uygulamalarında, mekanik sarsıntı direnci gerektiren taşınabilir araçlarda ve elektronik paketleme işlemlerinde tercih edilmektedir [47].

4.2. Kullanım Alanları

Endüstride magnezyum kullanımı ile ilgili olarak artan ihtiyaç Kanada ve Hindistan'da yeni tesislerin kurulmasına, Brezilya ve Japonya'da mevcut tesislerin genişletilmesine neden olmuştur. 1992 yılında desülfürizasyon (kükürt giderme) ve yüksek basınçlı döküm alanlarında büyük bir artış olmuştur. Ancak 1997 yılında en büyük kullanım alanı 146.150 ton/yıl ile alüminyum alaşımlandırma, 95.300 ton/yıl ile basınçlı döküm ve 47.950 ton/yıl ile desülfürizasyondur. Çizelge 4.2'de 1998 yılına ait magnezyum tüketimi verilmektedir [48].

Çizelge 4.2 1998'deki magnezyum tüketimi [49].

Kullanımı	1998'deki üretimi	Üretimdeki yüzdesi (1000 ton)
Alüminyum alaşımlama	154	49
Basınçlı döküm	75	24
Demir ve çelik desülfürizasyonu	50	16
Nodüler demir (KGDD)	11	3
Elektrokimyasal (korozyon koruyucuları, bataryalar)	10	3
Kimyasal (yağlayıcılar, silikonlar, eczacılık, vitaminler)	7	2
Metal indirgeme (titanyum, zirkonyum, hafniyum, uranyum, berilyum ve bor)	5	2
Dövme ürünler	4,5	1

Magnezyum metalinin kullanımındaki üç temel özelliği;

- Diğer metallerle intermetalik bileşik oluşturmaya yatkınlığı,
- Yüksek kimyasal aktifliği,
- Düşük yoğunluğu.

Diğer önemli kullanımları; kum ya da basınçlı döküm metal parçaların üretiminde (özellikle şimdiki ve gelecekteki yakıt tasarruf standartlarını karşılama amacıyla magnezyuma ihtiyaç duyulan en kuvvetli alandır).

Magnezyum alaşımı korozyon anotları, çeliğin korunması ve desteklenmesi için genellikle gemi ambarları, yağ ve gaz boru hatları ve meskenlerde sıcak su ısıtıcıları gibi yapıların katodik olarak korunmasını sağlamada, havai fişek ve yangın çıkartan araçların yapılmasında, kurşundan bizmutun temizlenmesinde kullanılmaktadır [40].

Mg alaşımlarının üretiminde yıllara göre önemli artışlar kaydetmiştir. Hafifliği yanında bu artışlardaki en önemli etkenlerden birisi de magnezyumun zehirleyici özelliğinin az olmamasıdır. Ayrıca bu malzemelerin çeşitli alanlardaki kullanılabilirliğinin artması da üretimin hızla artmasına neden olmaktadır. Özellikle son yıllarda otomobil endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanılmasının artması, doğrudan magnezyum alaşımı kullanımını da artırmaktadır. Otomobillerde, motor destekleri, motor gövdesi, pedal destekleri, devir kutuları, direksiyon parçaları, vites kutusu, distribütör parçaları, gösterge paneli destekleri ve koltuk

kısımları gibi bölümler de kullanılır. Uçaklarda ise motor parçalarında ve uçak gövdesinde kullanılır. Daire ve zincir testere gövdesi, havalı çivileyciler, bagaj, diz üstü bilgisayarlar, hücreli telefonlar, spor araçları ve kameralar da diğer kullanım alanlarıdır [47 and 49].

4.3. Magnezyum Alaşımları

4.3.1. Genel özellikleri

Alüminyum ve çelik gibi büyük kullanım alanına sahip metallere olduğu gibi magnezyum da birçok alaşımı mevcuttur. Bu alaşımlar, birçok yapısal uygulamada kullanılmaktadır ve giderek kullanılan alanları artmaktadır. Magnezyum döküm alaşımları genellikle ötektik sisteme dayanır ve birçoğuna ısı işlem uygulanabilir. Alaşımlar dağılım mukavemetlenmesi veya yaşlandırma ile mukavemetlendirilebilir. Zirkonyum, toryum, gümüş, veya nadir toprak elementi gibi alaşım elementleri içeren bazı yaşlandırılmış magnezyum alaşımları 300 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda aşırı yaşlanma karşı iyi dirence sahiptir [53].

Magnezyum % 99,8'i geçen saflığı ile ticari olarak mühendislik uygulamalarında nadiren kullanılmıştır. Hegzagonal kafes yapısı ve alaşımlama davranışı katı eriyik oluşturacağı elementlerin çeşitliliği için önemlidir. Ticari metallere ikili alaşım sistemleri iki kategori şeklinde ayrılmıştır. Bunlar azalan atomik çözünürlük sırasına göre parantez içindeki yüzde ağırlık ile aşağıda verilmektedir.

Peritektik sistemler	: Mn (% 3,4), Zr (% 3,8)
Ötektik sistemler	:Li (% 5,7), Al (% 12,7), Ag (% 15,5), Zn(%8,4), Nd (~ %3), Th (% 4,5), Ce (% 0,85)

Çizelge 3.3.' de önemli magnezyum alaşımlarından bazılarının özellikleri verilmektedir. Standart ASTM magnezyum alaşımları, içerilen elementin yüzdesine göre harf semboller ile gösterilmiştir. Alüminyum için A, manganez için M, silisyum için S, zirkonyum için Z, toryum için H, gümüş için Q ve nadir toprak elementinin sırasıyla yüzdesi kullanılmaktadır [44]. Rakamlar ise içerilen alaşım elementinin yüzdesini ifade etmektedir. En eski ticari alaşım elementleri alüminyum, çinko ve manganezdır ve Mg-Al-Zn dökümleri II. Dünya savaşı sırasında Almanya'da geniş ölçüde kullanılmıştır. Bu alaşımlarda ıslak ve rutubetli ortamlarda korozyon problemi ortaya çıkmıştır ve 1925 yılında küçük miktarlarda manganez ilavesi ile (% 0,2) bu problem azalmıştır. Bu ilavenin sıvıdan demire ve zararsız intermetalik bileşikler içerisindeki diğer kalıntıları uzaklaştırdığı belirlenmiştir. Mg-Al-Zn sistemine dayanan alaşımlar ortam sıcaklıklarında kullanılmak üzere magnezyum döküm alaşımları için temel

malzemeler olarak kalmıştır. En eski dövme alaşımı Mg-1,5 Mn alaşımıdır ve levha, ekstrüzyon ve dövme ürünler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları [39].

Alaşım adı	Alaşım ilaveleri	Kullanımları	Kullanım nedenleri
AZ91	% 9,0 Al, % 0,7 Zn, % 0,13 Mn	Genel döküm alaşımı	Dökülebilirliğinin iyi olması, $T < 150^{\circ}\text{C}$ 'de mekanik özellikler göstermektedir.
AM60	% 0,6 Al, % 0,15 Mn	Yüksek basınçlı metal kalıp alaşımı	AZ91'den daha fazla tokluk ve şekil değiştirebilme (haddeleme), bir miktar mukavemet düşürür. Sık sık otomotivlerde yapısal uygulamalar için tercih edilirler.
AZ31	% 3,0 Al, % 1,0 Zn, % 0,2 Mn	Dövme magnezyum ürünleri	İyi ekstrüzyon alaşımıdır.
ZE41	% 4,1 Zn, % 1,2 Re, % 0,7 Zr	Özel döküm alaşımı	Nadir toprak element ilavesi, yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı sağlar.
AS41	% 4,1 Al, % 1,0 Si	Genel döküm alaşımı	Yüksek sıcaklıklarda AZ91'den daha iyi sürünme direnci sergiler, fakat düşük dayanıma sahiptir.

İki dünya savaşı arasındaki dönemde, magnezyum döküm alaşımlarında sık sık zayıf mekanik özelliklerle sonuçlanan büyük ve değişken tane boyutu ve mikro gözeneklilik (mikroporozite) nedeniyle zorluklarla karşılaşmıştır [45].

5. KUVARSİT (SiO_2)

Kuvarsit, oldukça saf silisyum dioksit (SiO_2) kristallerine verilen addır. Özgül ağırlığı $2,65 \text{ g/cm}^3$, sertliği 7 olan kuvarsite doğada çok rastlanır. Trigonal trapetzoedrik sistemde kristalleşen kuvarsit, doğada kristal yada amorf (biçimsiz) halde bulunabilir. İçindeki yabancı maddelerin cins ve miktarına göre, saydam, renkli, yada yarı saydam durumdadır. Renkleri : Kuvarsit minerallerinin rengi beyaz (süt kuvars), mor (ametist), pembe kuvarsit, duman renkli (füme) ve kahverengi (opal) gibi çeşitli renklerde olabilir.



Şekil 5.1 Beyaz kuvarsit

5.1. Kullanım Alanları

Kumlarda bolca bulunan kuvarsitin saf olmayanlarının içinde demir vardır. Beyaz kum olarak bilinen oldukça saf kuvarslar camcılıkta kullanılır. Kuvarsit kristali mor-ötesi ve kızılaltı ışınımlara saydamdır; bu özellikleri P. Curie tarafından ortaya konmuştur. Bu özelliğinden dolayı kuvarsit elektronik sanayinde osilatör olarak kullanılır. Ergitilen kuvarsitten, ısınca genleşme oranı çok düşük olan bir cam elde edilir. Ani sıcaklık değişikliklerinden etkilenmesi istenmeyen malzemelerin yapımında kuvarsitten yararlanılır.

Kuvarsit kristalleri bir takım karışımlarla renklenir ve özel adlar alır. Renkli kuvars türleri; süs taşları olarak mücevher yapımı işlerinde, cam durusu kaya kristali ise bazı optik âletlerde ve elektronikte de devre elemanı olarak kullanılır. Özellikle elektronik osilatörlerde rezonans malzemesi olarak kullanılır. Çok kararlı bir osilasyon (salınım) yapar. Özellikle saatlerde, vericilerde ve hassas elektronik devrelerde çok geniş çapta kullanılır. Âdi kuvars, bileme, cilalama ile cam ve porselen yapımında kullanılır. Ergitilmiş kuvars, termik (ısı)

genleşme katsayısının küçük olması sebebiyle, ısıya dayanıklı cam olarak, kimya ve elektrikte kullanılan âletlerde; son derece ince tel hâlinde çekilen kuvars ise, aynalı galvanometre gibi hassas âletlerde kullanılır. Bunun yanında kuvarstan, zımpara taşı ve kum tozu olarak taş, ahşap ve deri işlemlerinde istifâde edilir. Toz olarak sabuna katılınca bir yıkama malzemesi olur. SiO_2 bir çok forma sahiptir ve bunlardan en yaygın olarak düşük sıcaklıkta (alfa) kuvars formunda bulunur. Her duvarında altı kenarlı bir piramit bulunan, altı kenarlı bir prizma şeklindedir. Kristalleri bir takım karışımlarla renklenir, özel adlar alır ve bunlardan kuyumculukta küpe, yüzük ve kolyeler yapılır.

- Saydam ya da renkli dağ kristali (necef taşı),
- Kahverengi dumanlı kuvarsit,
- Sarı renkli sitrin,
- Portakal renginde medeira sitrini,
- Yeşil renkli kloritli kuvarsit,
- Menekşe renkli mor necef (ametist),
- Kan renginde yemani,
- Pembe renkli hematit içerikli kuvarsit,
- İçinde mika bulunan kırmızı renkli yıldız taşı (aventurin),
- İçinde tutam halinde rutil iğneleri bulunan venüs saçı,
- İçinde amyant lifleri bulunan kedigözü [51].

5.2. Üretim Yöntemi ve Teknoloji

Kuvars genel olarak açık işletme yöntemiyle üretilir. Açık işletme tekniği uygulandığı için örtü tabakası yoktur. Üretim, delicilerle delinen delikler patlayıcı madde doldurulup patlatılarak yapılır. Daha sonra parçalanmış kuvars yabancı maddelerden elimine edebilmek için elle seçmeye tabi tutulur. Temiz ve kaliteli olanlar elle toplanarak, stoklanır. Kuvarsitin üretim girdileri fitil, kapsül, patlayıcı madde, makine yağı, işçilik ve amortismandır [52].

6. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik alaşımlamanın (MA) tarihi gelişimi gözden geçirildiğinde, ihtiyaçların karşılanmasıyla teknolojinin paralel bir gelişim gösterdiği gözlenmiştir. 1966 yılında John Benjamin ve arkadaşları tarafında geliştirilen bir yöntemdir. MA sayesinde yüksek sıcaklık dayanımlı oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş Ni bazlı süper alaşımlar üretilmiştir. Uygulama sonrasında elde edilen malzemelerle gaz türbinleri içinde arzu edilen özelliklerin sağlanması amaçlanmıştır. Aynı ekip, 1970'lerde farklı denemeler sonucunda bilyeli öğütme tekniği ile en uygun sonuçları almışlardır. Çünkü bu metot sayesinde partiküllerin yüksek deformasyonundan dolayı kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması işleminin ardışıklığı, ince partiküllerin üretilmesine imkân vermektedir. MA yönteminin gelişmesiyle birlikte kullanım alanları yaygınlaşmıştır. En başta bu gelişmenin öncü sektörleri havacılık sanayi ve otomotiv endüstrisi olmuştur [52].

Mekanik alaşımlama alışlagelmiş metotların aksine tamamen bir katı-hal işlemi olup sert refrakter oksit partiküllerinin yumuşak matris içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamakta ve Al, Ti gibi reaktif elementlerin alaşımında bulunmasına müsaade etmektedir. Alaşımlama için değirmene konan metal tozları yüksek hızda çarpışan bilyelerin arasında kalarak birbirine kaynamakta, kırılmakta ve tekrar kaynarak refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır. Bu malzemeler yüksek sıcaklık performansını artırmak için özellikle uzay sanayi ve gaz türbini uygulamaları için geliştirilmiş olmalarına rağmen oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır [53 ve 54].

Mekanik alaşımlama (MA) işlemi doğru oranda tozların karıştırılmasıyla başlar ve orta şiddetli öğütme ile değirmen içerisinde genellikle çelik bilyeler vasıtasıyla öğütülür. Bu karışım arzu edilen kararlı hale ulaşana kadar öğütülmektedir. MA işleminin önemli bileşenleri hammadde, değirmen, işlem parametreleri, öğütme kabı, öğütme hızı, öğütme süresi, öğütücü malzemelerin tipi, bilye-toz ağırlık oranı, kabın doluluk oranı, öğütme atmosferi, işlem kontrol kimyasalları ve öğütme sıcaklığıdır [55].

6.1. Hammadde

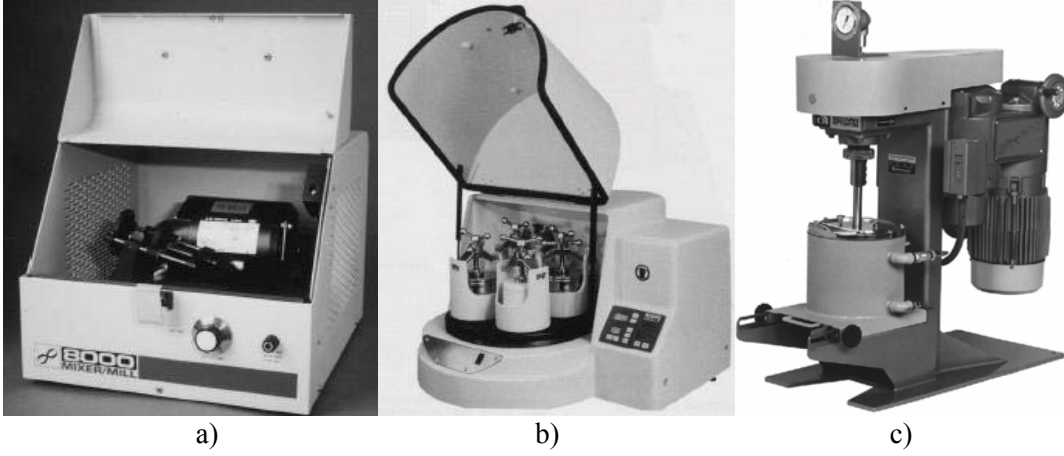
MA işlemi için ticari saflıktaki tozlar kullanılmakta ve bu ham malzemelerin parçacık boyutları 1-200 µm aralığında değişmektedir. Çok kritik olmamakla birlikte toz parçacık boyutlarının, öğütücü bilye boyutlarından daha küçük olması istenir. Bu durumda toz parçacık boyutu sadece birkaç dakikalık öğütmeden sonra artmaya başlar ve daha sonra kırılarak küçük değerlere ulaşır ve zamanla en alt noktalara kadar düşer. Ham tozlar; saf metaller, master

alaşım, ön alaşımlanmış tozlar ve refrakter parçacıklar olmak üzere geniş bir kategoride yer almaktadır. Dağılım mukavemetlendirilmiş malzemeler genellikle karbür, nitrür ve oksit ilavelidir.

Mekanik alaşımlamanın ilk dönemlerinde sünek bir sıkıştırılabilirlik için toz şarjına en az % 15 kadar deforme edilebilir metal tozu, bir bağlayıcı olarak katılmakta idi. Bununla beraber son yıllarda tamamen gevrek malzeme karışımları, alaşım halinde başarılı bir şekilde öğütülmektedir [56]. Böylece tozların öğütülmesi sırasında ihtiyaç duyulan bir sünek metal toza artık ihtiyaç duyulmamaktadır. Buna göre; sünek-sünek, sünek-gevrek ve gevrek-gevrek toz karışımları, yeni alaşımlar üretebilmek için beraber öğütülmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda, sıvı öğütmenin daha ince ürünler elde etmek için kuru öğütmeden daha kullanışlı bir metot olduğu ortaya çıkmıştır. Çünkü, çözücü moleküller daha düşük yüzey enerjisine sahiptir ve partiküllerin yeni sekilenen yüzeylerinde absorbe edilir. Islak durumda olan toz parçacıklarının daha az topaklanması faydalı bir faktördür. Amorfizasyon oranının ıslak öğütme sırasında kuru öğütmeden daha hızlı olduğu yapılan bazı çalışmalarda görülmektedir [57]

6.2. Değirmen Tipleri

Mekanik alaşımlama (MA) işleminde kullanılan değirmen tiplerini; salınımlı değirmenler, planeter değirmenler, atritör, ticari değirmenler ve yeni dizayn değirmenler olarak beş ana başlık altında toplayabiliriz. Bu değirmenlerin kapasiteleri ve öğütme etkileri farklıdır, ayrıca soğutma sistemleri gibi ilave elemanlara sahiptirler. Salınımlı değirmenler genel olarak laboratuvar araştırmaları için kullanılan 10 gr. toz öğütebilen değirmenlerdir. Diğer bir değirmen tipi olan planeter değirmenler 100-200 gr öğütme yapabilen değirmen çeşididir. Atritörler büyük miktarlarda (45 kg. civarı) toz öğütebilen değirmenlerdir. Şekil 6.1'de değirmenlerin bir örneği gösterilmiştir [52].



Şekil 6.1 Mekanik alaşımlama yönteminde kullanılan değirmenlere tipleri.

a) Salımlı, b) Planeter, c) Atritör [52].

6.3. İşlem Parametreleri

MA yoluyla üretilen malzemelerde elde edilmek istenen optimum özelliklerin sağlanması için bazı işlem parametrelerinin kontrol altında tutulması gerekir. MA işlem parametreleri birbirleri ile bağımlı olarak değerlendirilmelidir. MA işlem parametreleri;

- Öğütme Kabı,
- Öğütme Hızı,
- Öğütme Zamanı,
- Öğütücü Malzemelerin Tipi,
- Bilye-Toz Ağırlık Oranı (BTO),
- Kabın Doluluk Oranı,
- Öğütme Atmosferi,
- İşlem Kontrol Kimyasalları (İKK),
- Öğütme Sıcaklığıdır [52].

6.3.1 Öğütme kabı

Öğütme kabı için kullanılan malzeme, kabın iç duvarları üzerinde öğütücü malzemelerin çarpması sebebi ile önemlidir. Bazı malzemeler önce kabın duvarlarına yapışacak ve sonra yapıştığı yerden çıkarak toza karışacaktır. Bu durum tozun kimyasını değiştirebilir veya kirlenmesini sağlayabilir. Eğer öğütme kabının malzemesi tozdan farklı ise, toz öğütme kabı malzemesi ile kirlenmiş olur. Diğer bir ifade ile, eğer iki malzeme de aynı ise ve uygun tedbirler alınmazsa toz içindeki elementlere ilaveten kabın iç duvarlarından kopan malzemede

toza karışacak ve kirlenmeye neden olacaktır. Öğütme kabı için kullanılan malzemeler sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom-çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co ve WC kaplı çeliklerdir [58]. Özellikle kabın iç tasarımı çok önemlidir. Düz tabanlı ve yuvarlak tabanlı SPEX değirmen kapları kullanılır. Alaşımlamanın düz tabanlı kapta, yuvarlak tabanlı kaba göre önemli bir miktarda daha yüksek olduğu belirtilmektedir.



Şekil 6.2 Tungsten karbür' den yapılmış SPEX tipi (Salımlı) karıştırıcının; Öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme hücresi [52].

6.3.2. Öğütme hızı

Yüksek devirli çalışan değirmenlerde toz enerji girişi daha fazla olur. Bu yüzden değirmen dizaynında çalışabileceği maksimum devir sınırı göz önünde bulundurulur. Örneğin, geleneksel bilyeli değirmende dönme hızı artışı bilyelerin hareket hızını artırır ve belli bir hızın üzerinde, bilyeler kabın duvarına yapışarak çarpma kuvveti ile aşağı düşmeyecektir. Bu yüzden, maksimum hızda, maksimum çarpma enerjisini üretmek amacıyla bilyelerin maksimum yükseklikten aşağı düşmesi için kritik hız değerinin biraz altında olmalıdır.

Çok yüksek hızlarda kabın sıcaklığı daha yüksek bir değere ulaşabilir. Bu, tozlarda homojenizasyon ve/veya alaşımlamayı sağlamak için avantajlı olabilir. Ancak, bazı durumlarda sıcaklık artışı, dönüşüm işlemini hızlandırır ve aşırı doymuş katı çözeltileri veya öğütme sırasında oluşan diğer kararlı fazlar bozulurken ayrıca ortaya çıkan yüksek sıcaklık tozları kirletebilir [52].

6.3.3. Öğütme süresi

Toz parçacıklarının kırılma ve soğuk kaynak arasında düzenli bir durum elde etmek için gerekli en önemli işlem parametrelerinden birisi de öğütme süresidir. Öğütme süresi kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilye-toz (BTO) oranına ve öğütme sıcaklığına bağlıdır.

MA işlem parametrelerinin her bir kombinasyonlarına göre öğütme süreleri değişir. Eğer öğütme süresi gereğinden daha uzun olursa kirlenme seviyesinin artması ve istenmeyen fazların oluşması gibi beklenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu yüzden tozun gerekli süre kadar öğütülmesi gerekmektedir [52].

6.3.4. Öğütücü malzemelerin tipi

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik ve WC-Co yaygın olarak kullanılan öğütme malzemeleridir. Öğütme malzemesinin yoğunluğu, tozların üzerinde yeterli çarpma gücünü oluşturması için bilyelerde yeterince yüksek olmalıdır. Bununla beraber, öğütme kabında olduğu gibi öğütücü elemanlar içinde bazı özel malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar bakır, titanyum, niobyum, zirkonya (ZrO_2), yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) özellikle stabilize edilmiş zirkonya+itriya, safir, silikon nitrit (Si_3N_4) ve Cu-Be'dir. Öğütücü malzemelerin boyutu da öğütmeye etki eder. Genellikle büyük boyutlu öğütme malzemeleri kullanışlıdır. Çünkü ağır bilyeler toz parçacıklarına daha fazla çarpma enerjisi transfer edecektir. Tozların son durumlarının kullanılan öğütme malzemelerinin boyutlarına bağlı olduğu bazı çalışmalarda belirtilmektedir. Örneğin; 15 mm çaplı bilyeler, harmanlanmış Ti-Al toz karışımını öğütmek için kullanıldığında, titanyumdaki alüminyumun bir katı çözültüsü oluşur. Diğer bir ifade ile, 20 mm ve 25 mm çaplı bilyelerin kullanılması, uzun öğütme sırasında sadece titanyum ve alüminyum fazlarının bir karışımı sonucudur [59]. Eğer bilyeler farklı çaplarda kullanılırsa en yüksek çarpışma enerjisinin elde edileceği tahmin edilebilir [60].

6.3.5. Bilye-toz ağırlık oranı

Bilye-toz oranı (BTO), öğütme işleminde önemli bir değişkendir. BTO, farklı araştırmacılar tarafından, 1:1 gibi küçük değerden 220:1 gibi büyük değerlere kadar değişik oranlarda değiştirilmiştir. Genellikle, salınlı değirmeni gibi küçük kapasiteli değirmenlerde toz öğütülürken en yaygın kullanılan oran 10:1'dir. Fakat öğütme, atritör gibi büyük kapasiteli değirmende yapıldığında, 50:1 ve hatta 100:1'den daha yüksek BTO kullanılır

BTO, öğütülen tozda özel bir faz elde etmek için gerekli olan öğütme zamanına önemli bir etkide bulunmaktadır. Daha yüksek BTO öğütme zamanını kısaltır (Örneğin, bir SPEX değirmeninde öğütülen Ti-% 33 Al toz karışımında amorf fazın oluşumu, 10:1 BTO' de 7 saatte, 50:1 BTO' da 2 saatte elde edilirken 100:1 BTO' da 1 saatte elde edilebilmektedir). Yüksek BTO' da, bilyelerin ağırlık oranındaki artıştan dolayı, birim zamandaki yüzde çarpışma sayısı artar ve sonuçta toz parçacıklarına daha fazla enerji transfer edilir. Böylece alaşımlama daha

hızlı olur. Daha yüksek enerjiden dolayı, daha fazla ısı üretimi mümkündür ve bu da toz bileşimini değiştirebilir [52].

6.3.6. Kabın doluluk oranı

Toz parçacıkları arasındaki alaşımlanma, bu tozların üzerine etkiyen vurma kuvvetlerinden dolayı olduğu için, bilyelerin ve toz parçacıklarının öğütme haznesi içinde serbestçe hareket etmesi için yeterli miktarda yerin olması gereklidir. Bu yüzden, haznenin toz ve bilyelerle doldurulma miktarı önemlidir. Bilyelerin ve tozun miktarı çok az ise, üretim hızı çok yavaş olur. Diğer taraftan, tozun miktarı fazla ise bilyelerin etrafta dolaşması için yeterli yer yoktur ve bu yüzden vurma enerjisi azdır. Dolayısıyla, haznenin fazla doldurulmaması için önlem alınmalıdır; genelde yaklaşık haznenin % 50'si boş bırakılmalıdır [61].

6.3.7. Öğütme atmosferi

Öğütme atmosferinin esas etkisi tozun kirlenmesi ile alakalıdır. Bu yüzden, tozlar ya argon (Ar) ya da helyum (He) gibi asal gaz ile dolu kaplarda öğütülür. Yüksek saflıkta Ar tozların oksitlenmesini ve/veya kirlenmesini engellemek için en yaygın kullanılan atmosfer ortamıdır. Oksitlenmenin, azot atmosferinde genellikle engellenebileceği veya minimize edilebileceği yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Normalde, tozları kaba yüklenmesi ve kaptan boşaltılması atmosfer kontrollü glow-box'larda gerçekleştirilir. Bu glow-box'lar genellikle tekrar tekrar boşaltılır ve argon gazıyla doldurulur [52].

6.3.8 İşlem kontrol kimyasalları (İKK)

Özellikle tozlar sünekse, öğütme sırasında ağır plastik deformasyon sebebiyle toz parçacıklar birbirleriyle soğuk kaynak olur. Fakat toz parçacıklar arasındaki doğru alaşımlama sadece parçacıkların soğuk kaynağı ve kırılma arasında denge kurulduğunda olur. Bir işlem kontrol kimyasalı (İKK), toz parçacıklar arasındaki soğuk kaynağı minimize eder, toz parçacıkların yüzeyinde emilir ve bu şekilde topaklaşmayı önler. Parçacık yüzeyinde emilmiş yüzey aktif kimyasalları katı malzemenin daha düşük yüzey gerilimi ve soğuk kaynak ile toza karışır. İKK'ları katı, sıvı veya gazlar olabilir. İKK'ları geniş bir alanda pratikte toplam toz şarjının yaklaşık % 1,5 kadar bir seviyede kullanılır. İKK'larının en önemlileri; stearik asit, hekzan, metanol ve etanoldür. Öğütme sırasında toz ve parçaların birbirini etkilemesi ile ayrışan parçalar, çoğunlukla dağıtıcı ve inklüzyonların oluşumu ile birleşir.

Öğütülen tozların tipi; kullanılan İKK'nın miktarı ve yapısına, toz parçacıklarının son ebadına, şekline ve saflığına göre belirlenir. İKK'nın büyük miktarlarda kullanımı normal olarak parçacık büyüklüklerini 2-3 katı kadar düşürür. Örnek olarak İKK kullanılmadığında 1000 μm olan partikül boyutunun % 2-3 μm , İKK kullanıldığında ise 18 μm 'a düştüğü görülmektedir. Yukarıda belirtilenlere benzer sonuçlar gevrek malzemelerle öğütme yapıldığı zaman gözlemlenmeyebilir. Gerçekte İKK kullanımı gevrek malzemelerin öğütülmesinde istenmemektedir. Sıvı içinde parçacık boyutundaki homojen dağılımın İKK kullanıldığı zaman kolaylıkla elde edilebildiği Niu'nun çalışmalarında belirtilmektedir [62].

6.3.9. Öğütme sıcaklığı

Öğütme sıcaklığı, öğütülmüş tozların bileşimine karar vermekteki bir başka önemli parametredir. Çünkü difüzyon işlemleri, elde edilen son fazın bir katı çözelti, intermetalik, nanoyapı veya bir amorf faz olup olmayacağı göz önünde bulundurulmayan alaşım fazlarının oluşumunu içerir.

Öğütme sıcaklığının kasıtlı olarak değiştirilmesi sadece birkaç araştırmada yapılmıştır. Bu, ya düşük sıcaklık elde etmek için öğütme kabına sıvı azot damlatılarak ya da öğütme sıcaklığını artırmak için öğütme kabını elektrikle ısıtmak suretiyle yapılmıştır. Bu araştırmalar katı çözünebilirlikteki değişiklik üzerinde öğütme sıcaklığının etkisini çalışmak için veya farklı sıcaklıklarda bir amorf faz ya da bir nanokristal yapı oluşumunun olup olmayacağını belirlemek için yapılmıştır. Nanokristallerin oluşması sırasında malzemedeki ortalama karekökteki gerilimi daha düşüktür ve tane boyutunun yüksek sıcaklıklarda öğütülen malzemelerde daha büyük olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmektedir. Örneğin Cu-% 37 Ag toz karışımının planeter bilyeli değirmenlerde öğütülmesi sırasında amorf faz ve kristal faz karışımı, Cu-% 8 Ag katı çözeltisinin sadece 200 $^{\circ}\text{C}$ 'de toz öğütülmesiyle elde edilmesi yerine oda sıcaklığındaki öğütmede elde edildiği belirtilmektedir [63].

7. SÜRTÜNME VE AŞINMA

7.1. Sürtünme

İnsanlığın tükettiği toplam enerjinin büyük bir bölümü kayma sırasında meydana gelen sürtünme kayıplarını yenmek için harcanmaktadır. Yapılan konstrüksiyonlarda, daha uygun bağlantı malzemelerinin kullanılması veya daha iyi bir yağlama ile sürtünmenin azaltılabilmesi bugünkü teknolojinin oldukça önemli bir sorunudur. Sürtünmeyi gerektiği zaman azaltma ve gerektiği zaman yeterince yüksek seviyeye çıkarabilme, sürtünme ile ilgili en önemli iki faktördür. Sürtünme çeşitli konstrüksiyonlarda yerine göre istenilen veya hiç istenilmeyen bir faktör olarak önemini her zaman koruyan unsurdur. Sürtünme özelliklerine en büyük etki; sürtünen yüzeylerin tabaka yapılarıdır. Sürtünmeyi yüksek sürtünme ve küçük sürtünme olarak tanımlamak mümkündür. Yüksek sürtünmeden sonra yüzeyler incelendiğinde, sürtünen yüzeylerden birinden diğerine malzeme transferi ile bir yüzeydeki çıkıntıların diğer yüzey üzerinde geniş ve genellikle düzensiz izler bıraktığı görülür. Küçük sürtünme olayında, sürtünme katsayısı düşüktür. Sürtünen yüzeylerden çok ince çizgiler meydana gelir. Birbiri üzerinde kayan malzemelerden birisi sert, diğeri yumuşaksa (örneğin, kalay, kurşun) yumuşak olan malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış olur. Yani yumuşak malzeme yağlayıcı ödevi görür, sonuçta sürtünme katsayısı azalır [64].

7.2. Aşınma Mekanizmaları

Bazı mekanik etkiler sonucunda yüzeyde meydana gelen malzeme kaybına aşınma denir. Aşınma tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlanmalar neticesinde meydana gelir [65]. Aşınmaya maruz kalan makine parçalarının ömürlerinin kısa olması; üretilen malın maliyetini artırdığı gibi bundan dolayı geçen süre ve harcama maliyetlerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etkiye maruz kalan makine parçalarının aşınmaya dirençli malzemelerden, doğru tespit yapılarak seçilmesi gerekir. Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması sonucunda çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyi farklı aşınma çeşitlerinden birine maruz kalır [66]. Aşınma çeşitleri;

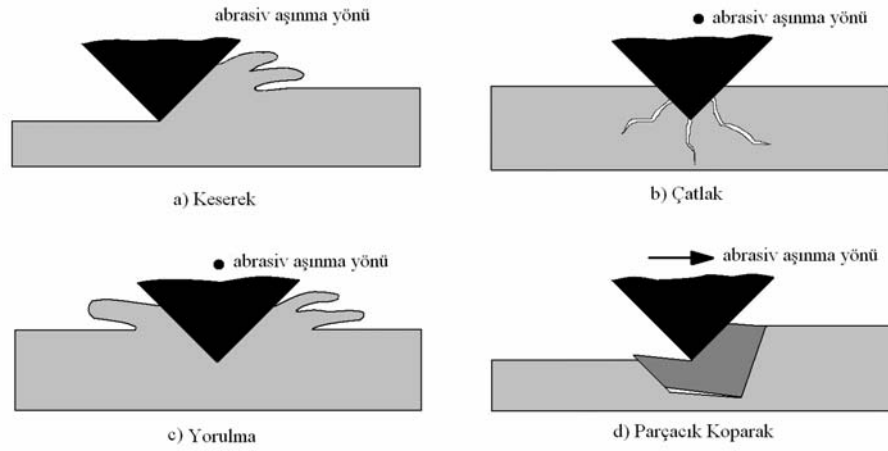
- a- Abrasiv aşınma,
- b- Adhesiv aşınma,
- c- Erozyon aşınması,
- d- Kavitasyon aşınması,
- e- Korozyon aşınması,

- f- Oksidasyon aşınması,
- g- Yorulma aşınması.

7.2.1. Abrasiv aşınması

Çok hızlı bir şekilde gelişen, etkisini anında belli eden ve çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve de sistemin hasarına sebep olacak şekilde gelişen bir aşınma türüdür. Genellikle endüstriyel aletlerde malzeme kayıplarının başlıca sebebi abrasiv aşınmadır. Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olan cismin, pürüzler veya taneler vasıtasıyla diğer cismin yüzeyini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olmak üzere iki şekilde oluşur.

Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma iki elemanlı aşınma türüdür. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip edecek sert taneciklerde bulunuyorsa veya sert malzeme yüzeyindeki pürüzler kesici kenarlar gibi çalışır ve yumuşak olan yüzeyden talaş kaldırarak birer üçüncü eleman olarak görev yaparlar. Bu aşınma çeşidine katı-katı, katı-mineral, katı-sıvı çiftlerinde rastlanmaktadır. Aşınma mekanizmaları metal-metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç cisimli abrasiv olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar veya parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üç cisimli abrasiv aşınmanın, aşınmayı hızlandırdığı belirlenmiştir. Serbest hale geçen mikro talaş partikülleri aşınmayı hızlandırmaktadır. Serbest hale geçen mikro talaş partiküllerinin, ana malzemededen daha sert olması bunun en büyük sebebi olarak gösterilebilir [67]. Bu aşınmaya genel bir örnek olarak küreğin aşınması verilebilir. Şekil 7,1’de görüldüğü gibi abrasiv aşınma mekanizmaları parçacık veya taneler mikroskobik kesme, mikroskobik kırılma, tanelerin bireysel olarak ayrılıp malzemededen taşınımı veya deformasyonun tekrarlanması ile yorulmanın ivme kazanması şeklinde olur.



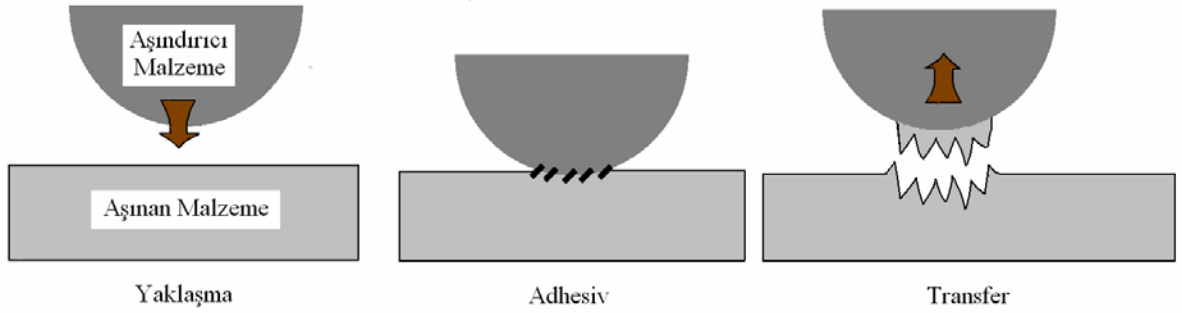
Şekil 7.1 Abrasiv aşınma mekanizmaları [68].

Şekil 7,1.a’da gösterilen ilk mekanizmada kesme; klasik metotlarla tanımlanan sert ve keskin tanelerin yumuşak bir yüzeyi kesmesi seklindedir. Burada malzeme aşınma derinliği kadar aşınır, aşındıran taneciklerin sıvanması ve deformasyonu önemlidir. Aşınan malzeme seramiklerde olduğu gibi sert ise şekil 7,1.b’de görüldüğü gibi gerçekleştirilirse aşınma yüzeyinde çatlaklar oluşur. Sünek bir malzeme, körleşmiş tanelerle aşındırıldığı zaman kesmenin aksine aşınma yüzeyi şekil 7,1.c’de olduğu gibi tekrarlanarak deformasyona uğrar. Bu durumda aşınma derinliği metal çatlamaıyla meydana gelen derinliktir. Şekil 7,1.d’de gösterilen son mekanizma tanelerin yerinden sökülmesi ya da tanelerin kopması seklindedir. Bu mekanizma temel olarak seramiklerde görülür. İşlem diğerlerine göre zayıf olan tanelerin sınırlarından kopar, bu mekanizmada aşınma derinliği kopan tanenin büyüklüğü kadardır.

7.2.2. Adhesiv aşınma

Aşınma bileşenlerinin en önemlilerinden biri olan adhezyon, sürtünme elemanlarının temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilmeler sonucu mikro kaynak bölgelerinin oluşması esasına dayanır. Yüzey pürüzlülüğü nedeni ile gerçek temas yüzeyi geometrik yüzeyin çok küçük bir parçası olması nedeni ile mikro-temas bölgelerindeki mekanik gerilmeler büyük boyutlara ulaşır. Çoğu zaman malzemenin akma sınırını aşan bu gerilmeler, plastik deformasyona ve yüzeydeki oksit tabakasının parçalanması sonucu ana eleman ile karşı eleman arasında Vander Waals kuvvetleri nedeni ile oluşan mikro soğuk kaynaklaşmalara yol açarlar. Karşılıklı köprüler şeklindeki bu kaynaklaşmalar sistem içinde var olan kayma hareketleri ile kırılır ve hızlı bir malzeme kaybına yol açar [69]. Aşırı yüklenme veya yağlama yetersizliği dolayısıyla meydana gelen “yatak sarma” adı verilen olay adhesiv aşınmaya iyi bir örnektir.

Adhesiv bağın oluşumu yüzey sertliği tarafından etkilenir. Yüzey sertliği azaldıkça yük altındaki deformasyon artacak, yüzey film tabakası daha kolay hasar görecektir. Bu sonuç ise yüzeyler arasındaki adhesiv bağın güçlenmesine yol açacaktır [70]. Aşağıdaki şekilde metal taşınımı şematik olarak gösterilmektedir.

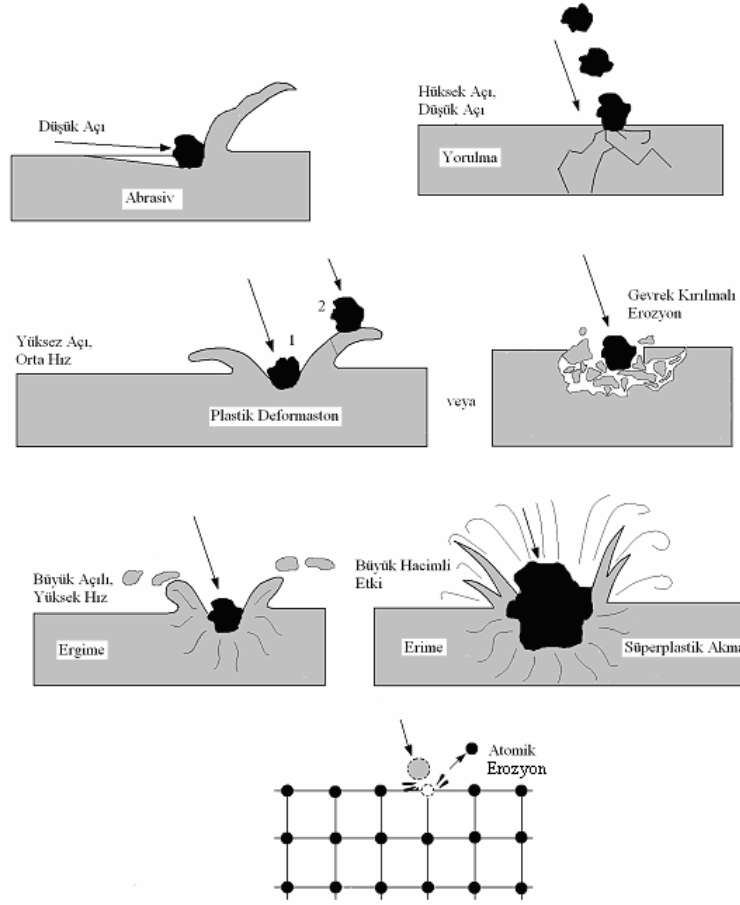


Şekil 7.2 Adhezyondan dolayı malzeme taşınımı [68].

7.2.3. Erozyon aşınması

Erozyon aşınma ise, aşındırıcı tozların askıda durduğu sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla malzeme yüzeyine çarpma etkisiyle gerçekleşmektedir. Her bir temas malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür; ancak yüksek sıcaklıklarda, malzemenin akma dayanımı düşmekte ve yüksek akış hızlarında erozyon aşınma hızı kazanmaktadır.

Erozyon aşınmada yüzeye çarpan partiküllerin çarpma açısına göre her malzeme farklı aşınma dayanıklılığı gösterir. Örneğin küçük püskürtme açısında yumuşak ve deforme olan malzemeler büyük aşınma gösterirken, sert ve gevrek malzemelerde büyük püskürtme açılarında aşırı zorlanarak maksimum aşınma gösterirler. Ayrıca aşınma miktarı püskürtülen maddenin sertliğine, püskürtme hızına ve partikül miktarına bağlı olarak değişim gösterir [67]. Erozyon aşınmasının bilinen mekanizması aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir.

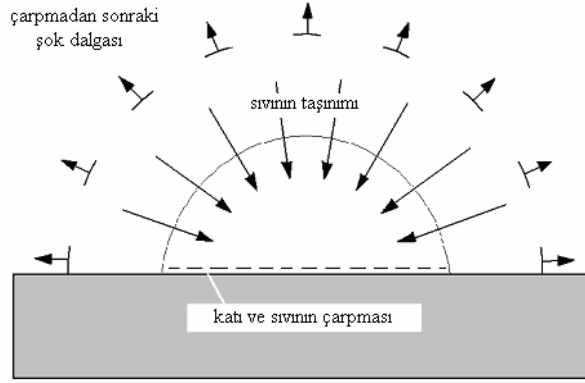


Şekil 7.3 Erozyon aşınma mekanizmaları [68].

Çarpma açısı Şekil 7,3.a'da gösterildiği gibi çarpmadan hemen öncesi yüzey ve parçacığın yörüngesi arasındaki açıdır. Düşük açılı çarpmalar abrasive benzer aşınma yöntemiyle tanımlanır. Büyük açılı bir çarpma açısı tipik bir erozyon aşınma mekanizmasına neden olur. Aşındırıcı parçacığın hızı aşınma yönteminde çok güçlü etkiye sahiptir. Şayet hız plastik deformasyon oluşturmayacak kadar çok yavaş ise, aşınma yüzeyi yorulmasıyla devam eder. Çoğu mühendislik malzemeleri için geçerli olan bir hız olan 20 m/s ve üzerindeki hızlarda, çarpan parçacıkla aşınan malzeme, tekrarlanan plastik deformasyon etkisiyle aşınmaya uğrar. Şayet aşınan parça düzleşmiş veya küreselleşmiş ise, plastik deformasyon sonucu aşınan yüzeyin formu aşınan malzemede çok ince bir tabaka şeklinde olur. Parçacık keskin ise, büyük bir ihtimalle gevrek ve kırılımdır. Diğer bir ifade ile gevrek malzeme alt tabakayı çatlatarak aşınır. Bir diğer mekanizma ise çok yüksek hızlarda parçacığın yüzeye çarparak eritmesi şeklinde gerçekleşir. Atomik erozyona örnek olarak uyduya hidrojen ve oksijen atomlarının çarpması ile erozyonun ortaya çıkması verilebilir.

7.2.4. Kavitasyon aşınması

Kavitasyon aşınması buhar ortamlarında çalışan türbin kanat ve türbin ekipmanlarının zarara uğraması olarak bilinir. Aşınma kavitasyona maruz kalan yüzeyde belli bir düzende delik ve çukurların şekillenmesiyle ilerler.

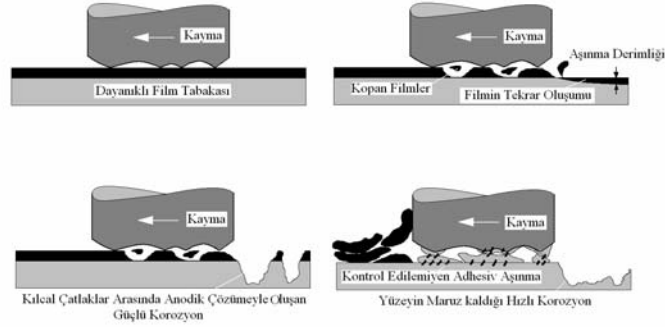


Şekil 7.4 Kavitasyon aşınma mekanizmasında kabarcık çökme mekanizması [68].

Kavitasyon aşınması, izafi hareket halinde bulunan bir sıvı ile katı bir cismin arasında meydana gelir. Sıvı içerisinde bulunan zerreciklerin basıncı, buharlaşma basıncından daha küçük bir ortamdan geçerken zerreciklerin büyümesi ve patlamasıyla oluşan basınç dalgalarının katı cismin yüzeyine çarpması sonucu kavitasyon meydana gelir. Kavitasyon aşınması genellikle, su türbinleri, su pompaları ve buhar türbinlerinde görülür [71].

7.2.5. Korozyon aşınması

Korozyon aşınması hem yağlı hem de yağsız olarak birçok durumda oluşur. Aşınmanın bu aşınma türünün temel nedeni aşınan malzeme ve korozif bir ortam arasında kimyasal bir reaksiyondur. Hızlı aşınma oranı sürtünme katsayısının düşük olmasına neden olur. Sürtünme ve aşınma arasındaki bu farklılık aşınma yöntemini belirleyen önemli bir faktördür. Adhesiv aşınmayı önlemede kullanılan yüzeydeki kimyasal reaksiyon kontrol edilemezse altlık malzemede önemli kayıplara yol açar [68]. Korozyon aşınmasının modelleri aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir;



Şekil 7.5 Korozyon oluşturmucular ve aşınan yüzey arasındaki etkileşim modelleri [68].

7.2.6. Oksidasyon aşınması

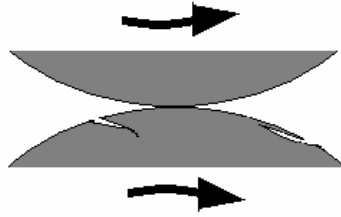
Oksidasyon aşınması hava ve oksijen bulunduran bir ortamda kuru yağsız metallerin aşınması olarak tarif edilir. Atmosferdeki oksijen kuru olarak kayan bir metalin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını değiştirir. Yöntemde birkaç farklı mekanik gereksinimler vardır. Oksitlenme aşınması farklı yükler ve aşınma oranları altında gerçekleşen çeliklerdeki kuru kaymalı aşınma, genelde aşınma derinliğindeki kimyasal bileşiği değiştirdiği zaman gerçekleşir. Burada yük ve kayma hızı, sürtünen temas noktalarındaki sıcaklığı birkaç yüz derece artırırsa gerçekleşir. Daha sonraki oluşumlar kalın film tabakaların yumuşak aşınmanın oluşturduğu yüzey aşınma şekilleridir. Kalın film tabakası yok ve malzeme kırılğan ise adhesiv aşınma formu olan aşınma oluşur. Oksit ile etkili ve yumuşak aşınmada ortalama sürtünme katsayısı 0.3-0,6 arasında bulunur. Sert aşınmada daha yüksek bir iniş çıkış gözlenir. Oksitlenme aşınmasının karakteristik özelliklerine bakıldığında, bunlarda pürüzsüz bir aşınma yüzeyi ve küçük oksitlere sahip bir aşınma izi bulunur.

Özellikle kimyasal maddelerin bulunduğu ortamlarda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek, ince fakat sert bir oksit veya benzeri tabakanın oluşmasına neden olurlar. Yağlarda bulunan bazı maddeler nedeni ile de aynı sonuç ortaya çıkmaktadır. Değişken yüke maruz yüzeylerde bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınmayı meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyonun bir sonucu olarak tekrar sert bir tabaka oluşur ve olay bu şekilde devam eder [72].

7.2.7. Yorulma aşınması

Bu aşınma tipi, esas itibari ile yüzey bölgesini tekrarlı tribolojik yüklemeye maruz kalması sonucu ortaya çıkmaktadır. Tribolojik zorlanmalar mekanik gerilmeleri de beraberinde

getirdiği için zamana veya yüzey bölgesine göre tekrarlı bir sürtünme olayı mikro çatlakların oluşmasına veya büyümesine, sonuçta aşınma parçacığı olarak da malzeme kopmasına yol açar. Bu özelliğinden dolayı yorulma aşınması, birçok aşınma sürecine katılan bir bileşendir. Uygulamada özellikle dişli çarkların çalışan evolvent yüzeyleri, bilyeli rulman yatakları veya kam mekanizması ile yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde, çok küçük çukurların (pitting) meydana gelmesi şeklinde ortaya çıkar [69].



Şekil 7.6 Yorulma aşınma mekanizmasının şematik görüntüsü [68].

7.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler, farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmiştir [65].

1- Ana malzemeye bağlı faktörler:

- a. Malzemenin kristal yapısı,
- b. Malzemenin sertliği,
- c. Elastisite (Young) modülü,
- d. Deformasyon davranışı,
- e. Yüzey pürüzlüğü,
- f. Malzemenin boyutu.

2- Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.

3- Ortamın etkisi: a. Sıcaklık, b. Nem, c. Atmosfer.

4- Servis koşulları: Basınç, Hız, Kayma yolu.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. Giriş

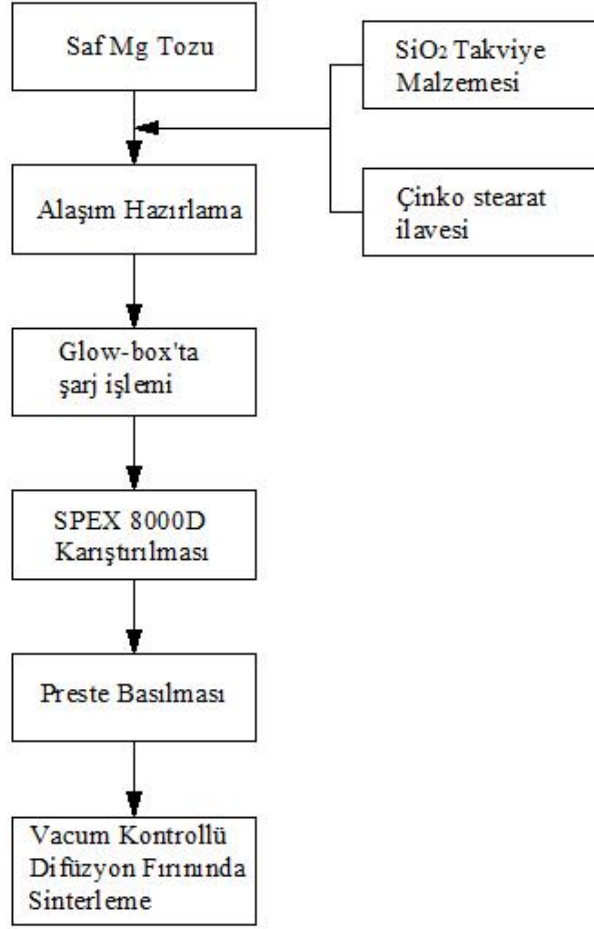
Bu çalışmada farklı toz tane boyutlarındaki SiO₂ seramik tozları saf Mg matris içerisine çeşitli oranlarda ilave edilerek, karışım tozları elde edilmiştir. Bu karışım; toz metalürjisi yöntemi kullanılarak SiO₂ takviyeli Mg esaslı kompozit malzeme üretilerek, bu malzemelerin karakterizasyonu ve aşınma davranışları araştırılmıştır.

8.2. Malzeme

Bu çalışmada matris malzemesi olarak ortalama 40 µm tane boyutuna sahip ticari olarak elde edilen saf Mg tozu kullanılmıştır. Kullanılan takviye malzemesi olarak -10 µm -125 µm - 500 µm tane boyutlarına sahip SiO₂ seramik tozları kullanılmıştır ve bu tozlar % 5-10-15 karışım oranların da karıştırılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan SiO₂ seramik tozlar, D.P.Ü Seramik Mühendisliği Bölümü'nde üretilmişlerdir.

8.3. Alaşım Hazırlama

Yapmış olduğumuz bu çalışmalarda öncelikle hazır olarak temin edilen -40 µm tane boyutuna sahip saf halde bulunan Mg tozu ve yine hazır olarak temin edilen farklı partikül boyutlarına sahip SiO₂ tozlarının ağırlıkça % 5-10-15 oranlarında saf Mg matris içerisine katılmasıyla elde edilen numunelerin yapıları incelenmiştir. Bu işlem basamakları şekil 8,1'de gösterilmektedir.



Şekil 8.1 Alaşım hazırlamada işlem basamakları.

8.4. Test Numunelerinin Hazırlanması

SPEX 8000 D karıştırma cihazında yapılan karıştırmadan sonra ve öncesinde tozlardan 0,40 gr toz karışımı alınarak karışım tozlarının dönüşüm sıcaklıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneyler Diffraction Scanning Calorimeter (DSC) cihazında yapılmıştır. Deney sonucunda karıştırmanın etkisi ve karışım tozlarının reaksiyon dönüşüm sıcaklıkları tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu deneyler Osmangazi Üniversitesi Metalürji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Alaşım hazırlama işlemi EK-1'deki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Formüllerle hazırlanan karışım içinde oluşturulmak istenen fazların oluştuğunu görebilmek için X-Ray Diffraction (XRD) analizi yapılmıştır.

Formüllerden hesaplanan miktarlarda hazırlanan karışım tozu ve 5:1 alumina bilye-toz oranıyla (BTO) glow-box içerisinde argon gazı atmosferinde tartılıp, karıştırma kabına (vial'e) konulmuştur. Şarj işleminin glow-box ortamında ve argon gazı atmosferinde yapılmasının

sebebi saf Mg tozunun oksitlenmeye karşı direncinin düşük ve doğrudan reaksiyona girmesidir. Glow-box ortamındaki şarj işlemi Osmangazi Üniversitesi, Metalürji Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Şekil 8,2'de glow-box cihazı görülmektedir.



Şekil 8.2 Argon gazı yüklü glow-box cihazının görüntüsü.

Glow-box içerisindeki tartma işlemi yapıldıktan sonra argon gazı atmosferinde karışım kabının kapağı kapatılıp glow-box'tan çıkarılır ve karıştırma işlemi için SPEX 8000D makinesine bağlanıp ve 1 saat yüksek devirde (1000 rpm) karıştırma işlemi yapılmıştır. Karıştırma işlemi Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işleminde kullanılan SPEX TURBO 8000D cihazı şekil 8,3'de gösterilmiştir. SPEX TURBO 8000D tipi karıştırıcılar mekanik alaşımlama metoduyla 10 saatte yapılan bir karıştırma işlemi, bu cihazla daha kısa sürede ve daha homojen bir karışım elde edilebilmektedir.



Şekil 8.3 Karıştırma işleminde kullanılan yüksek devirli SPEX TURBO 8000D titreşimli cihazı.

Karıştırma işleminde kullanılan karıştırma kabının (vial'in) boyutları; yüksekliği 64 mm, et kalınlığı 6.5 mm, derinliği 57.3 mm, çap 51 mm kapak ise 10.6 mm kalınlıkta, çap 51 mm ve kenardan 1 mm içeride 2 mm kalınlıkta O-halka içeriyor. Alüminyum kapak ise 17.5 mm yükseklikte, resimde görülen boşluk çapı 32 mm'dir.



Şekil 8.4 SPEX tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme hücresi.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra glow-box ortamında karışımın yapıldığı vial kabın kapağı açılıp toz ve bilyeler birbirinden ayrılır ve tartım işlemi $\pm 0,0001$ hassasiyetteki terazide yapılmıştır. Tartma işleminin ardından belirlenen kalıba konulan tozun kalıp üst zımbası da kapatılır ve glow-box'tan çıkartıldı.

Elde edilen toz karışımların preslenmesi, Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisi Laboratuvarı'nda Wolpert cihazında yapılmıştır. Kalıp içerisindeki sıkıştırma işlemi 4 mm/s ilerleme hızı ve 550 MPa basma kuvvetindeki preslerde tek yönlü olarak yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan tüm toz karışımları aynı şartlar altında preslenmiştir. Hazırlanan karışımın sinterleme sıcaklığını belirlemek için Diffraction Scanning Calorimeter (DSC) yapılmıştır. Presleme sonrası elde edilen numunelerden temel olarak gerekli mukavemet artışını sağlamak için DSC analizinden çıkan peak değerlerine göre vakum kontrollü difüzyon fırınında argon gazı atmosferinde (550 °C) 45 dakika süreyle sinterleme işlemi yapılmıştır. Fırın oda sıcaklığında iken numuneler fırın içerisine yerleştirilmiştir. Daha sonra fırın 10-20 °C/dk ısınma hızı ile sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılmış, fırın sinterleme sıcaklığına geldiğinde bu sıcaklıkta numuneler 45 dakika bekletilmiştir. Sinterleme süresi sonunda, fırın oda sıcaklığına kadar 10 °C/dk soğuma hızında kontrollü olarak soğutulmuştur. Numunelerin sinterleme anında oksitlenmesini önlemek için ortamda sürekli olarak argon gazı bulundurulmuş koruyucu ortam da sinterleme gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi Osmangazi Üniversitesi Metalürji

Mühendisliği Laboratuvarı'nda şekil 8,5'de gösterilen vakum kontrollü TR2002 02710 Y patent numarasına sahip difüzyon fırınında yapılmıştır.



Şekil 8.5 Vakum kontrollü difüzyon fırını.

8.5. Test Numunelerinin Karakterizasyonu

8.5.1. Yoğunluğunun ölçülmesi

Vakum kontrollü difüzyon fırınında argon koruyucu gazı atmosferinde sinterlenmiş numuneler sinterleme sonrası ve öncesi yoğunlukları aynı usul ile ayrı ayrı ölçülmüştür. Sinterleme öncesi toz halindeki numunenin ağırlığının preste basıldıktan sonrası hacmine oranı numunenin yoğunluk ölçümünü vermektedir. Sinterleme sonrası tartılan parçanın ağırlığının sinterleme sonrası hacmine oranı yoğunluğunu vermektedir.

8.5.2. Mikroyapılarının incelenmesi

Sinterleme işlemi sonrası elde edilen numunelerin optik görüntüsü ve sertlik değerleri için zımpara diskleri sırasıyla 600, 800 ve 1200 grit (mesh) tane boyutuna sahip dairesel zımpara ile yüzeyin parlatma işlemleri yapılmıştır. Magnezyumun yumuşak bir malzeme olmasından dolayı yüzeyi çok hassas ve daha küçük tane boyutuna sahip 0,03 μm alümina süspansiyonu dökülerek parlatma işlemi yapılmıştır. Optik mikroskop görüntülerinin yüzeyinin düzgün ve çiziksiz olması için bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan parlatılmış yüzeylerin çeşitli bölgelerinden optik mikroskop görüntüleri alınmış ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Aşınma testleri her bir test için 3'er adet numune 1200 grit tane boyutuna sahip dairesel zımpara kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi tamamlanan numunelerin mikro yapısı Osmangazi Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan nikon eclipse L150 optik mikroskopunda ve SEM (Scanning Electron Microscop) görüntüsü ise

Anadolu üniversitesi Metalurji ve Malzeme Laboratuvarında bulunan JEOL JSM 6060 mikroskobunda incelenmiş ve çeşitli büyütmelerde değişik bölgelerinden görüntüleri alınmıştır. Şekil 8.6'da optik mikroskop cihazının resmi görülmektedir.



Şekil 8.6 Optik Mikroskop cihazı.

8.5.3. Malzemelerin sertlik değerlerinin belirlenmesi

Sinterleme sonrası numunelerin yüzeyleri 1200'lük zımpara ile gerekli yüzey kalitesinde zımparalanarak, yüzeydeki özellikle sinterleme sonrası oluşabilen oksit tabakası temizlenmiştir. Numune yüzeyinin 4 farklı noktasından Vickers sertlik ölçümü (HV) yapılmıştır. Sertlik ölçümleri şekil 8,7'deki Future Tech FM-800 HV sertlik test cihazı ile yapılmıştır. Sertlik ölçümü; 136°'lik standart pramit uç kullanılarak, 50 gr yük ve 10 sn süreyle uygulanmıştır.

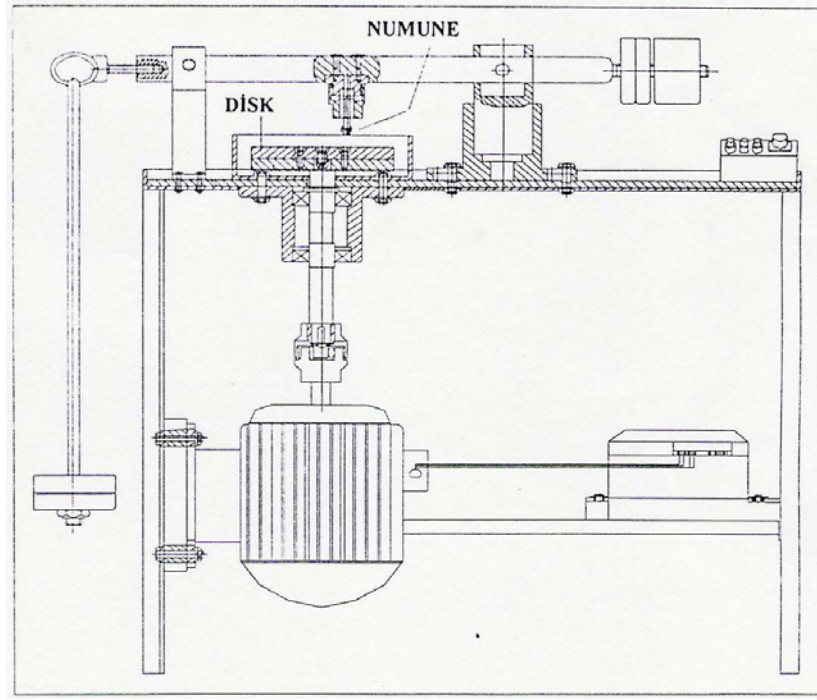


Şekil 8.7 Sertlik test cihazı.

8.6. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri, disk üzerinde pim prensibine göre çalışan cihaz ile kuru ortamda yapılmıştır. Deneyin kuru olarak yapılmasının sebebi Mg'un suyla doğrudan temasında reaksiyona girmesidir. Kompozit numuneler 10 mm çapında ve yaklaşık 4 mm uzunluğunda aşınma deneyi için hazırlanmıştır. Bu uzunluk, disk üzerinde pim aşınma cihazına bağlamak için çok küçük olduğundan numuneler, aynı çapta ve 60 mm uzunluğunda çelik çubukların uç kısmına pirinç bilezik kullanılarak epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Bu işlemi takiben numune yüzeyi 800 numara zımpara kağıdı kullanılarak düzgün seviyeye getirilmiştir. Daha sonra numune diskin yüzeyine dikey konumda aşınma cihazına monte edilmiştir. Kompozitlerin aşınma miktarları, 0.0001 g ölçme hassasiyetine sahip Precisa B-220A marka terazide numunelerin deney öncesi ölçülen ağırlıklarından deney sonrası tespit edilen ağırlıklarının çıkarılması ile bulunmuştur. Her numune 1 saat süre ile aşınma deneyine tabi tutulmuştur.

Deneylerde her bir kompozit malzeme için en az üç adet numune test edilerek, bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemek amacı ile, adhesiv aşınma deneyi yapılmıştır. Aşınma deneylerinde, yüzeyleri 0,15 μm yüzey hassasiyetinde taslanmış ısıtılmış 57 HRc sertliğe getirilmiş AISI 4140 çelik diskler kullanılmıştır. Deneyler 5, 10 ve 20 N yük altında 1000 m/h kayma mesafesinde, 0.5-1-2 m/s sabit kayma hızında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. deneyler Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu cihaza ait şematik resim şekil 8.8' da verilmiştir.



Şekil 8.8 Aşınma deneylerinde kullanılan pim disk aşınma cihazı.

8.6.1. Aşınma miktarının ölçümü

Aşınma işlemi, dönen bir disk üzerine pens vasıtasıyla taşıyıcı kola bağlanan numunenin istenilen kuvvetle bastırılması yoluyla yapılmıştır. Disk üzerinde iki iz bulunmaktadır. Dolayısıyla deneyi, disk üzerinde iki farklı noktadan temas ettirmek gerekmektedir. Deney sabit kayma hızında olduğu için her izde çap değişeceğinden çevresel hızdan dolayı kayma hızı da değişecektir. Kayma hızının sabit olabilmesi için diskin devir sayısının değişmesi gerekir. Bu nedenle, disk üzerindeki kompozit numunenin temas edeceği noktaların çapları bilindiğinden her bir iz için ayrı ayrı devir sayıları hesaplanmıştır.

Tezgah devir sayısı;

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000 \cdot 60}$$

$$N = \frac{V \cdot 1000 \cdot 60}{D \cdot \pi}$$

8.1

formülünden bulunur. Bu formülde;

V: Kayma hızını, (m/s)

D: İz çapını, (mm) göstermektedir.

Çizelge 8.1 İz çapına göre devir sayıları.

İz Numarası	İz Çapları (mm)	Devir Sayısı (dev/dak.)
1	64	240
2	86	180

Aşınma miktarının ölçümü ise, deney numunelerinin testten önceki ağırlığı ile testten sonraki ağırlığı arasındaki fark kütle kaybını (Δm , mg) göstermektedir. Kütle kaybının; yoğunluğa (ρ , g/mm³), hacim kaybına (V , mm³) ve alınan yola (t , km) bölünmesi ile hacimsel aşınma miktarı (W , mm³/km) bulunur.

Hacimsel aşınma miktarı (W);

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot V \cdot t} \quad \text{mm}^3/\text{km} \quad 8.2$$

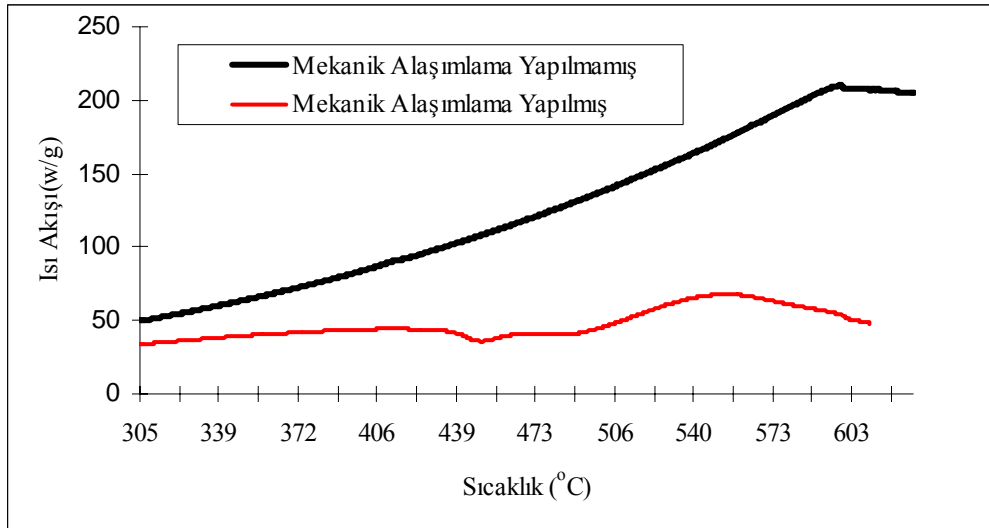
şeklinde yazılır.

Hacim kaybını hesaplarken kütle kaybının yoğunluğa oranından bulunabilmektedir. Deneylerde kullanılan metal matrisli kompozitler farklı oranlarda takviyelendirildikleri için yoğunlukları da farklı olacaktır.

9. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

9.1. Giriş

Araştırma, farklı tane boyutlarına sahip SiO_2 partikül takviyeli saf Mg matrisli malzemelerden toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen numunelerinin deneysel çalışmasıdır. Saf Mg toz boyutu yaklaşık olarak $40 \mu\text{m}$ ve içerisine takviye edilen SiO_2 tozlarının tane boyutu ise $-10 \mu\text{m}$, $-125 \mu\text{m}$, $-500 \mu\text{m}$ dir. Bu tozlar Ek-1’de hesaplanan formüller kullanılıp, istenilen miktarda karışım hazırlanmıştır. Belirlenen miktarlarda hazırlanan karışımların DSC (Diffraction Scanning Calorimeter) analizine göre sinterleme sıcaklığı belirlenmiştir. Bunun neticesinde DSC analizinde farklı sıcaklıklarda pikler verdiği gözlemlenmiştir. Bu piklerin başlangıç ve bitiş noktaları dikkate alınmıştır. Bitiş noktasının rast geldiği nokta sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Karıştırma işlemi esnasında, kabın çeperleri arasındaki çarpışma esnasında oluşan yüksek enerji sayesinde, aktive olan tozların sinterleme sıcaklığını etkilediği bilinmektedir. DSC ile bu sıcaklık belirlenmeye çalışılmıştır. Burada aktivasyonun sinterleme sıcaklığına olan etkisi belirlenmiştir. Böylece optimum sıcaklıkta sinterleme işlemi yapılmıştır. Şekil 9,1’da sinterleme öncesi ve sonrası hazırlanmış % 5 karışım oranı kompozitin DSC analizi verilmektedir.

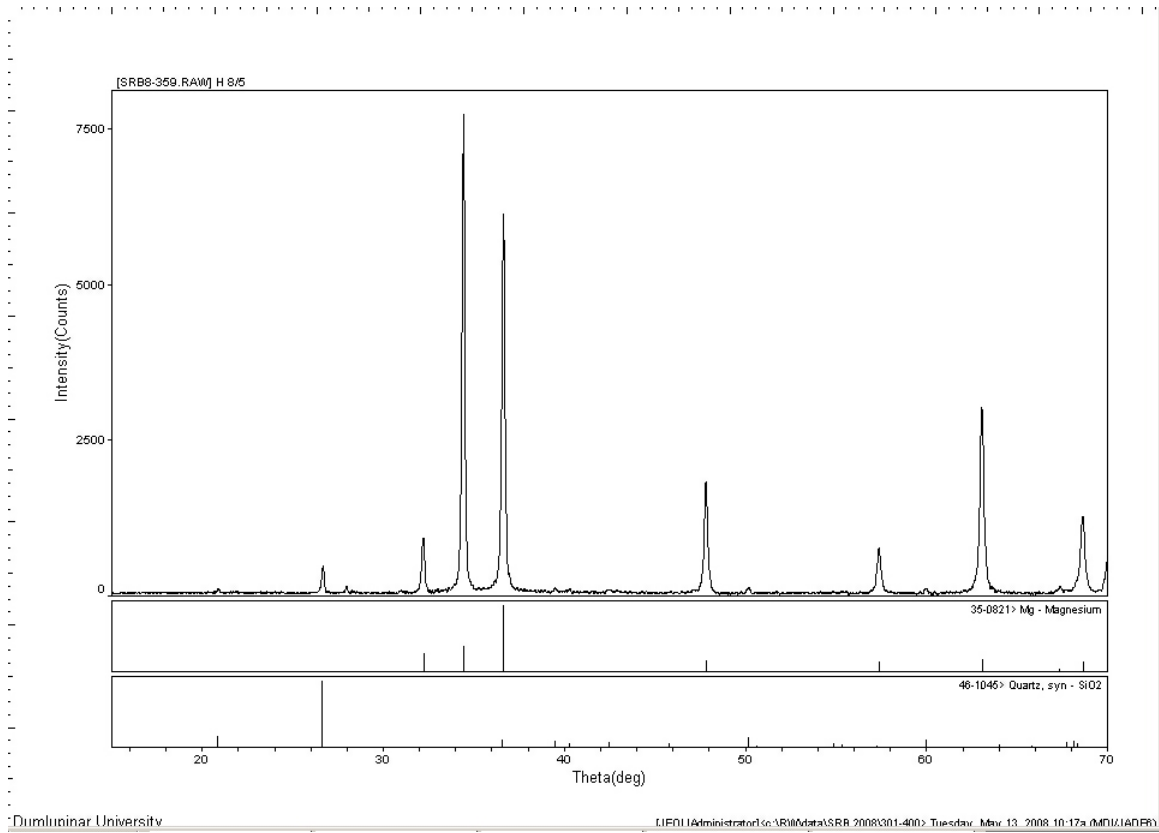


Şekil 9.1 Sinterleme öncesi ve sonrası hazırlanmış % 5 karışım oranı kompozitin DSC analizi sonuçlarını.

Bu grafikten de net bir şekilde görüldüğü gibi mekanik alaşımlama öncesi grafiğin peak vermediği düz bir çizgi oluşturduğu görülmektedir. Ancak mekanik alaşımlama işleminden sonra karışımın peak değerleri verdiği ve bu değerlerine göre sinterleme sıcaklığı tespitinin

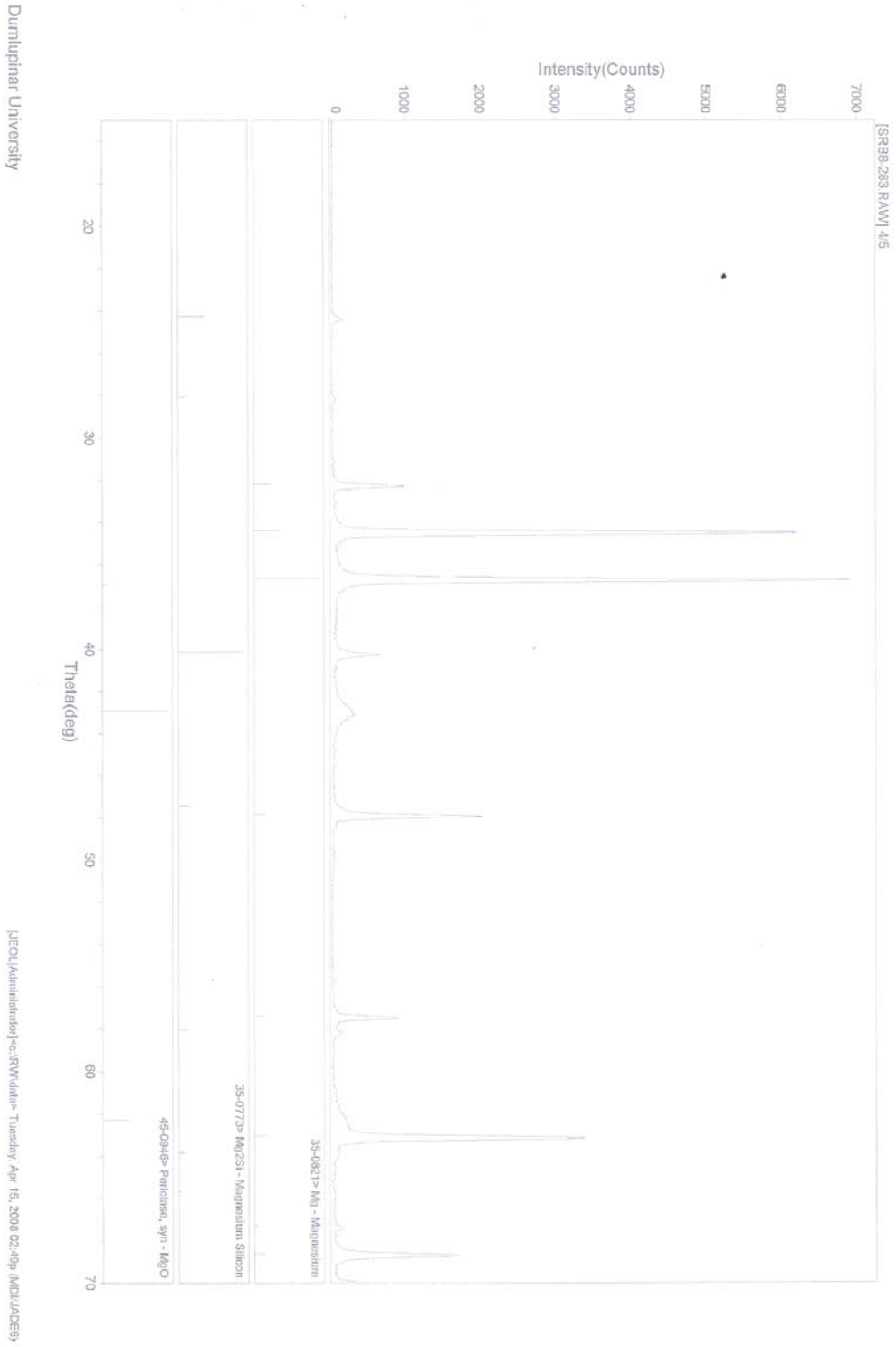
yapılabildiği görülmektedir. Bu grafiğe göre sinterleme sıcaklığı bitiş peak değerine göre 550 °C olarak belirlenmiştir.

Formüllerle hazırlanan karışım içinde oluşması beklenen fazların oluştuğu görebilmek için sinterleme öncesi ve sonrası XRD (X-Ray Diffraction) analizleri yapılmıştır. Şekil 9.2’de sinterleme öncesi XRD analizi görülmektedir. Bu analiz sonucu sinterleme öncesi sadece magnezyum ve kuvars peak değerlerini verdiği görülmektedir.



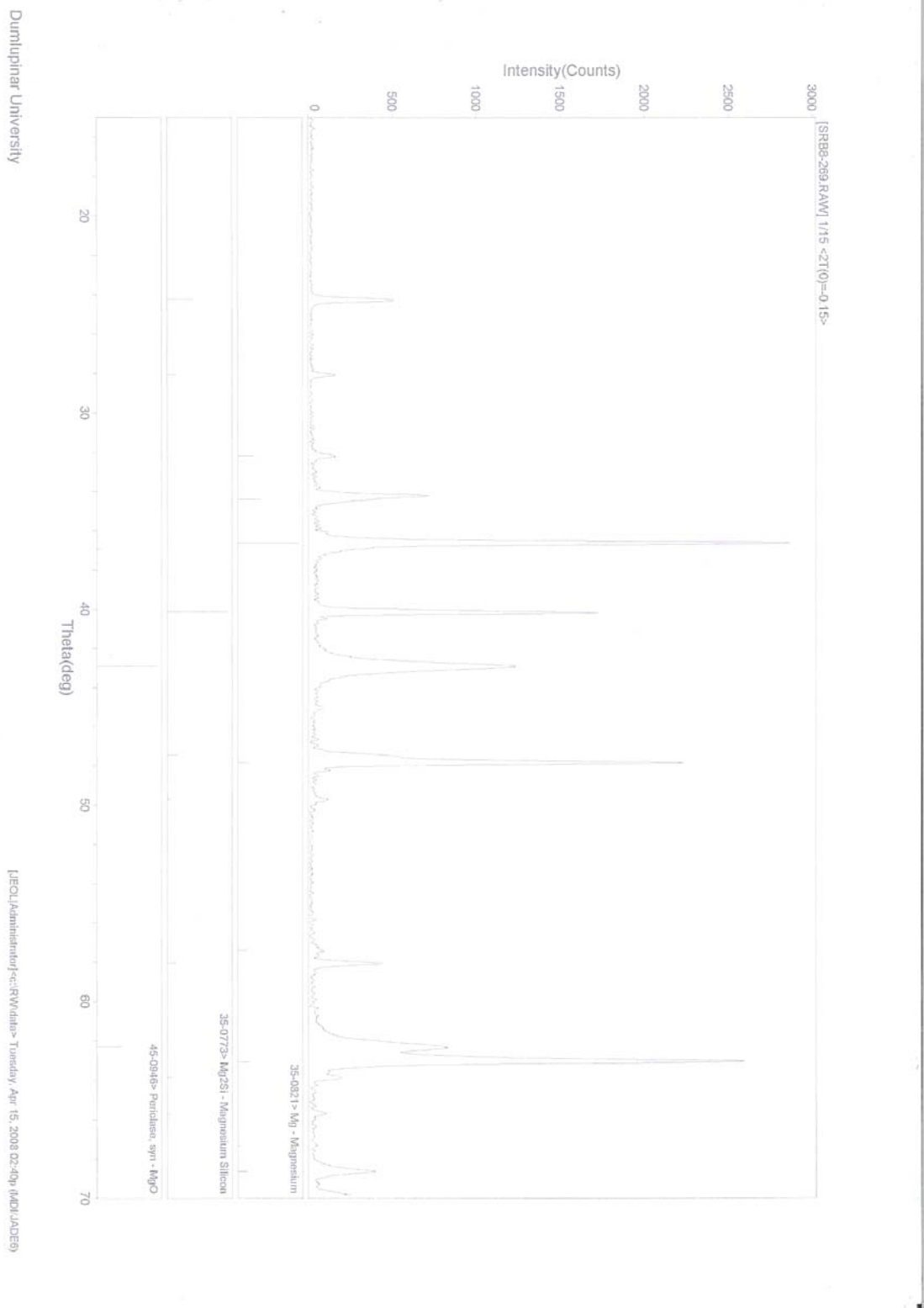
Şekil 9.2 % 95 saf Mg -% 5'si SiO₂ olan karışımının sinterleme öncesi XRD analizi.

Şekil 9.3’de ise % 95 saf Mg -% 5’si SiO₂ olan karışımının sinterleme sonrası XRD analiz sonuçları görülmektedir. Bu analiz sonucunda da görülebildiği gibi 3 farklı peak değeri verdiği görülmüştür. Bunlar magnezyum, magnezyum silisid ve magnezyum oksittir. Bu analiz sonucu elde edilmek istenen fazların oluştuğu görülmüştür.



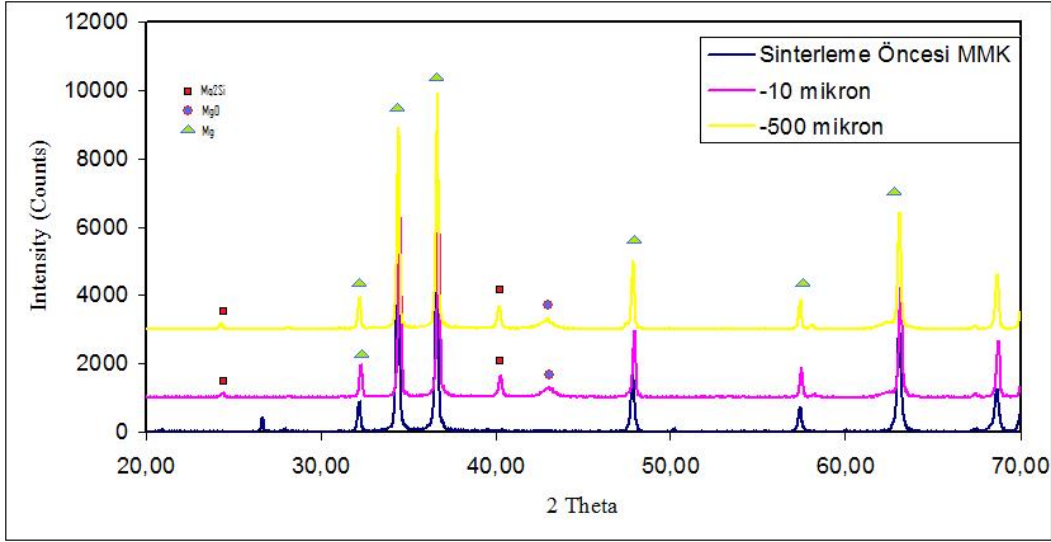
Şekil 9.3 % 95 saf Mg -% 5'si SiO₂ olan karışımın sinterleme sonrası XRD analizi sonuçları.

Şekil 9.4' de % 85 saf Mg -% 15'si SiO₂ olan karışımının sinterleme öncesi XRD analizi sonuçları görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi takviye malzemesi karışım oranı artığında oluşması beklenen fazlarında buna paralel olarak artığı görülmüştür.



Şekil 9.4 % 85 saf Mg -% 15'si SiO₂ olan karışımının sinterleme sonrası XRD analizi sonuçları.

Şekil 9.5’de sinterleme öncesi MMK, -10 µm, -500 µm tane boyutuna sahip olan SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi sinterleme sonrası farklı tane boyutuna sahip olan karışımların aynı noktalarda aynı peak değerleri ve reaksiyon çıktılarını verdiği görülebilmektedir.



Şekil 9.5 Sinterleme öncesi MMK, -10 µm, -500 µm tane boyutuna sahip olan SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin XRD analiz sonuçları.

Bu şekilde resmin daha iyi görülebilmesi için -10 µm’e bin ve -500 µm’ye de üçbin eklenmiştir. Bu değerler keyfi seçilmiştir. Bu şekilde sinterleme öncesi MMK, -10 µm ve -500 µm’ nin aynı noktalarda peak değeri verildiği görülmektedir.

Elde edilen tozlar çeşitli oranlarda karıştırılmış ve karışımlar preslenmiş ve sinterlenerek kompozit numuneler elde edilmiştir. Numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini belirlemek amacıyla bir dizi mikroyapı incelemeleri yapılmış, sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları ölçülmüş ve sinterleme sonrası deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

9.2. Presleme ve Sinterleme Sonrası Fiziksel Özellikler

Presleme sonrası ve sinterleme sonrası elde edilen numuneler için yoğunluk sonuçları Çizelge 9.1’de verilmiştir. Toz tane boyutunun küçülmesi tozların daha iyi sıkıştırılabilmesini ve dolayısıyla ham yoğunluğun artmasını sağlamıştır. Kompozit malzeme içerisindeki takviye seramik oranı arttıkça ham yoğunluğun arttığı belirlenmiştir. Presleme sonrası elde edilen numunelerden temel olarak gerekli mukavemet artışını sağlamak için numuneler 550 °C argon

vakum kontrollü difüzyon fırınında 45 dakika süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen numunelerde, gözle görülebilir herhangi bir bozulma oluşmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 9.1 Numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları.

Karışım Oranları	Takviye elemanı (SiO ₂) Toz Tane Boyutu					
	-10 µm		-125 µm		-500 µm	
	Yoğunluk Değerleri g/cm ³					
	Sint. Önce	Sint. Son.	Sint. Önce	Sint. Son.	Sint. Önce	Sint. Son.
%95 Mg + %5 SiO ₂	1,756	1,743	1,753	1,748	1,762	1,756
%90 Mg + %10 SiO ₂	1,798	1,703	1,799	1,695	1,793	1,692
%85 Mg + %15 SiO ₂	1,84	1,747	1,838	1,737	1,838	1,79

Numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları ölçüldüğünde, ham yoğunluklarına göre yoğunluklarının azaldığı görülmüştür. Presleme sonrası elde edilen numunelerde olduğu gibi, matris içerisindeki seramik oranı arttıkça kompozit yoğunluğunun artmaktadır, bunun sebebi olarak da matris içerisine katılan seramiğin yoğunluğunun matris malzemesine göre daha yüksek bir değerde olmasıdır. Fakat matris içerisindeki seramik tane boyutu büyüdükçe yoğunluğun azaldığı bunu sebebi olarak ta tane boyutu büyüdükçe taneler arası boşluğun arttığı söylenebilir. Bu sonuçlar, mikroyapı incelemeleri ile de desteklenmektedir. Hazırlanan karışımların karıştırılması için kullanılan yüksek devirli karıştırıcıya bağlı olarak takviye malzemesi olarak katılan iri tane boyutuna sahip SiO₂'nin tane boyutunda küçülmelerin olduğu Optik ve SEM görüntülerinde de görülmektedir. Bu kısmın açıklaması mikroyapı incelemeleri ile daha detaylı olarak incelenecektir. Bunun sonucu olarak yoğunluk değerleri değişmektedir.

Malzemelerin içerdikleri gözenek miktarının SiO₂ parçacık oranı ile değişimi Çizelge 9.2'de verilmiştir. Malzemelerin gözenek oranları;

$$\%porozite = \frac{P_{teorik} - P_{deneysel}}{P_{teorik}} \times 100 \quad 9.1$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 9.2 Numunelerin gözenek miktarları.

Malzeme	SiO ₂ (%) (Ağırlıkça)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	Gözenek (%)
Saf Mg	0	1,738	-	-
-10 µm	5	1,783	1,757	1,458216
	10	1,829	1,798	1,694915
	15	1,874	1,84	1,814301
-125 µm	5	1,783	1,753	1,682557
	10	1,829	1,799	1,640241
	15	1,874	1,838	1,921025
-500 µm	5	1,783	1,762	1,17779
	10	1,829	1,793	1,968289
	15	1,874	1,838	1,921025

Yukarıdaki çizelge 8,2’de SiO₂ parçacıklarının % oranının artması ve tane boyutunun büyümesiyle gözenek oranlarının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kırılma ve ufalanmayla parçacıklar arasında kalan boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

9.3. Sertlik Ölçümü

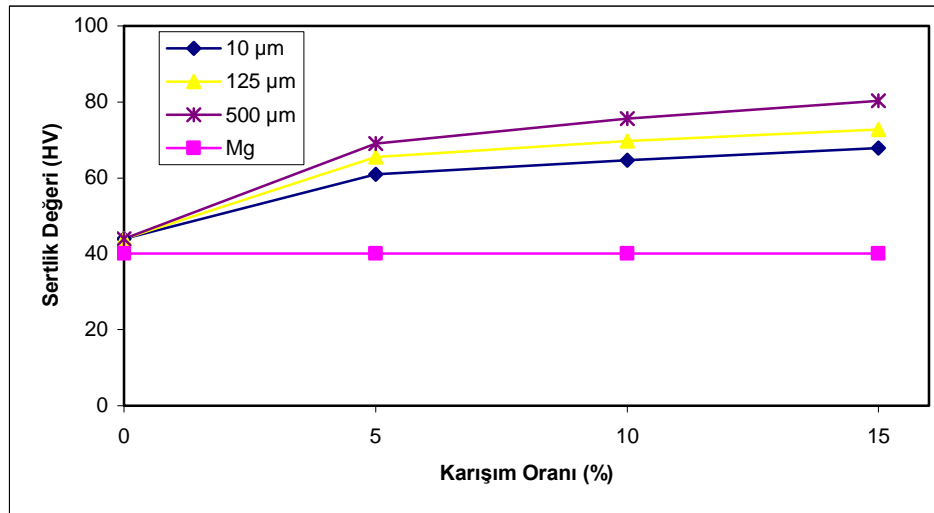
Saf Mg ve farklı boyut ve hacim oranlarında SiO₂ partikül takviyeli MMK malzemelerin, Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 4 ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması, sertlik değeri olarak alınmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Çizelge 9,3’de verilmiştir.

Çizelge 9,3’de görüldüğü gibi, partikül hacim oranının artmasıyla MMK malzemelerin sertliği artmaktadır. Aynı hacim oranlı partikül boyutu farklı kompozitlerde, partikülün tane boyutu büyüdükçe sertlik artmıştır. Sonuç olarak, partikül hacim oranının artması ve partikül boyutunun artmasıyla kompozitlerin sertlikleri artmaktadır. Matris malzemesi ile kıyaslandığında, bütün MMK malzemelerin sertliklerinin daha fazla olduğu görülmekte ve partikül ilavesinin malzemenin sertliğini artırdığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak matris içerisinde homojen olarak dağılmış SiO₂ parçacıklarının etkisi ve yine takviye malzemesi olarak kullanılan SiO₂’nin sertliğinin magnezyumun sertlik değerine göre yüksek bir değerde olmasıdır.

Çizelge 9.3 Saf Mg'a -250 µm tane boyutuna sahip SiO₂ takviyeli MMK malzemelerin Vickers sertlik değerleri.

Malzeme	SiO ₂ (%)	Sertlik Değeri (HV)
Mg	0	40,0
Mg -10 µm SiO ₂	5	60,866
Mg -10 µm SiO ₂	10	64,667
Mg -10 µm SiO ₂	15	67,777
Mg -125 µm SiO ₂	5	65,567
Mg -125 µm SiO ₂	10	69,667
Mg -125 µm SiO ₂	15	72,811
Mg -500 µm SiO ₂	5	69,033
Mg -500 µm SiO ₂	10	75,644
Mg -500 µm SiO	15	80,336

Şekil 9,7 Saf Mg ve % 5-10-15 karışım oranına farklı tane boyutlu SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin sertlik değeri – karışım oranı grafiği görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü üzere saf Mg'a takviye edilen SiO₂ saf Mg'un sertlik değerini değiştirmektedir. Buna göre karışım oranı yüzdesi arttıkça kompozitin sertlik değeri saf Mg'a göre artış göstermiştir.



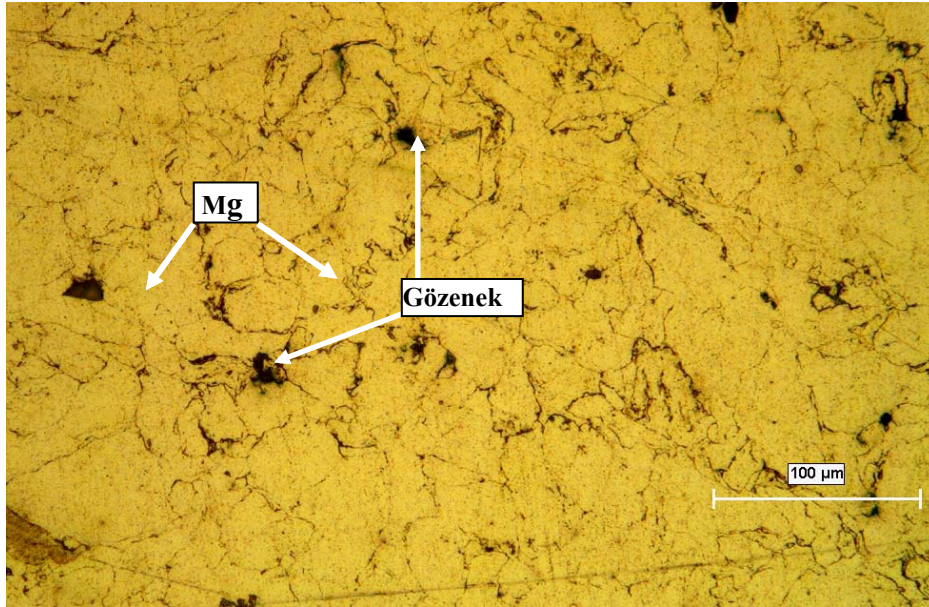
Şekil 9.7 Saf Mg ve % 5-10-15 karışım oranına farklı tane boyutlu SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin sertlik değeri – karışım oranı grafiği.

Sonuç olarak tane boyutu ve karışım oranı arttıkça MMK malzemenin sertliği de iyi bir yaklaşımla doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Özellikle daha iri tane yapısına sahip - 500 μm parçacık takviyeli kompozitin toz parçacıklarının karıştırma esnasında kırıldığı böylece yer yer yüksek sertlik değerlerinin ölçüldüğü dikkati çekmiştir. Bu nedenle uç değerler dikkate alınmamıştır

9.4. Mikroyapı İncelemesi

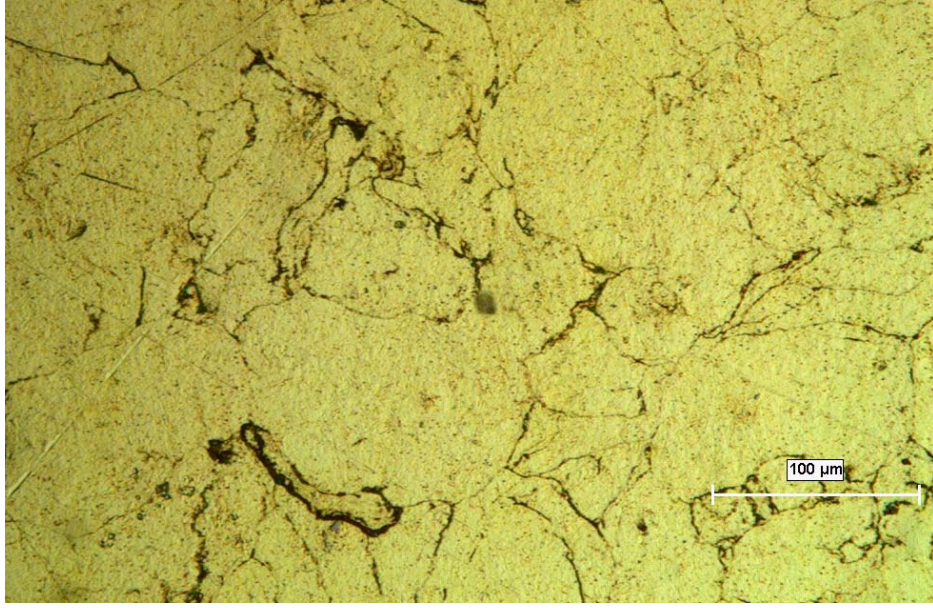
9.4.1. Deney numunelerinin optik mikroskop görüntüleri

Üretilen kompozit numunelerin parçacık dağılımlarının incelenmesi için mikroyapı fotoğrafları optik mikroskop kullanılarak çekilmiştir. Tane boyutu -40 μm olan saf Mg'un 4 mm/s sıkıştırma oranına sahip preste sıkıştırılıp 550 °C de vakum kontrollü difüzyon fırınında sinterlendikten ve soğumaya bırakıldıktan sonra elde edilen yüzeylerin optik görüntüsü Şekil 9,8'de verilmiştir. Bu resim de görüldüğü gibi saf Mg'un tane boyutları, gözenekleri ve bununla beraber tane sınırları ve numunenin tanelerinin eş eksenli olduğu gözlenmektedir.



Şekil 9.8 Saf haldeki Mg' un optik görüntüsü (X200)

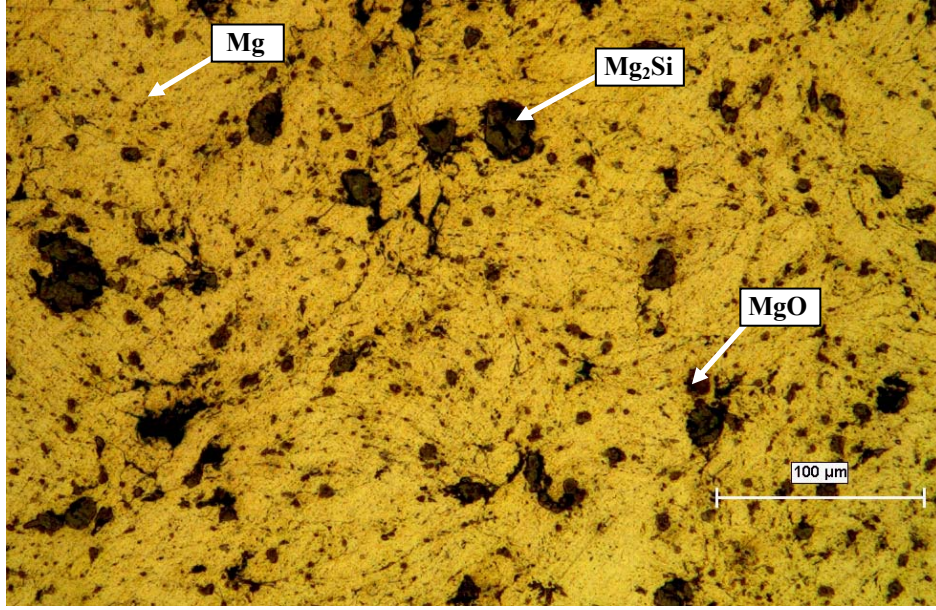
Şekil 9,9'de saf magnezyumun görüntüsü X500 olarak daha yakından belirlenmiştir. Bu resimde de X500 büyütmede daha da belirgin olarak saf Mg'nın tane boyutları, gözenekleri ve bununla beraber tane sınırları ve numunenin eşeksenli tane yapısı görülmektedir.



Şekil 9.9 Saf haldeki Mg' un optik görüntüsü (X500)

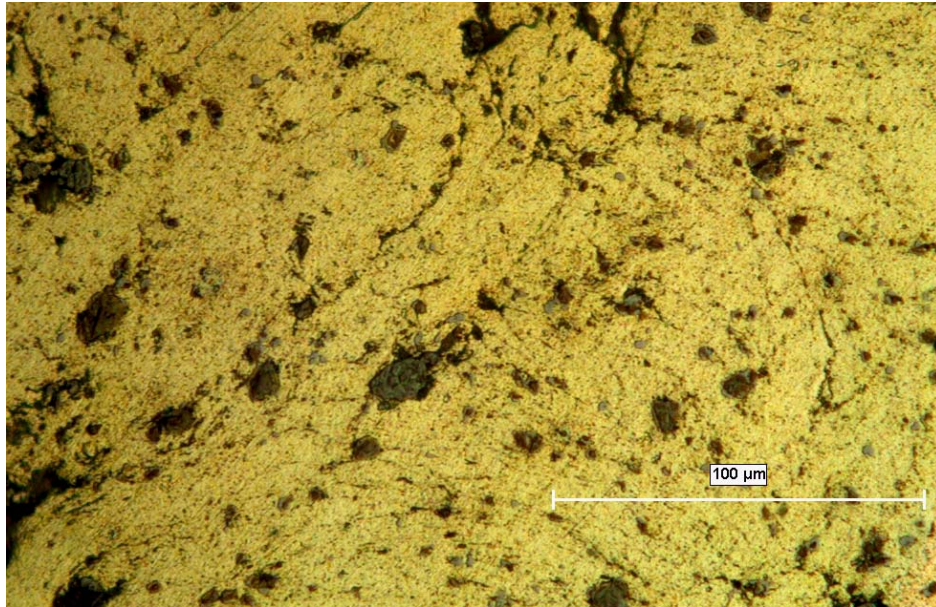
Saf Mg'a farklı partikül boyutlarında SiO_2 ilave edilerek elde edilen karışım preste sıkıştırılıp vakum kontrollü difüzyon fırınında argon koruyucu gaz ortamında $550\text{ }^\circ\text{C}$ sinterlendikten sonra serbest soğumaya bırakılmış ve numunenin yüzeyinden alınmış optik görüntüleri şekil 9,10'da verilmiştir.

Şekil 9,10'de saf Mg içerisine katılan $-125\text{ }\mu\text{m}$ tane boyutuna sahip ve % 5 takviyeli oranlı SiO_2 'in X200 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir. Bu resimde homojen bir dağılım, partikül topaklanmasının olmadığı gözeneksiz bir yapı görülmektedir. Topaklanma olmamasından dolayı aşınmada avantaj sağlayacağı tahmin edilmektedir.



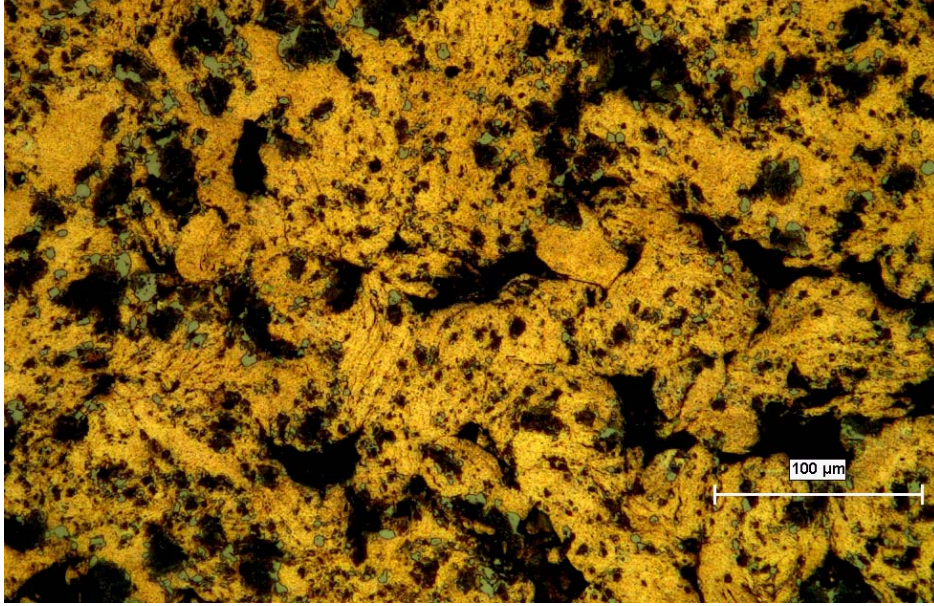
Şekil 9.10 Mg matris % 5 SiO₂ (-125 μm) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X 200)

Şekil 9,11’de Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-125 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozitin X500 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir.



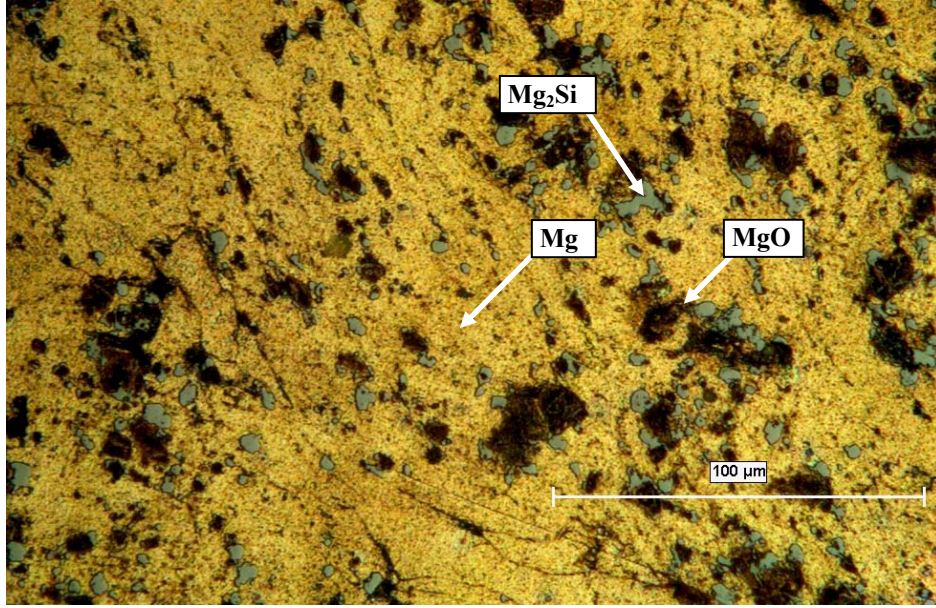
Şekil 9.11 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-125 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500)

Şekil 9,12'de saf Mg içerisine ilave edilen $-125\ \mu\text{m}$ tane boyutuna sahip ve % 10 karışım oranlı SiO_2 'in X200 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir. Bu resimde homojen bir dağılım, tane boyutuna ve karışım oranına bağlı olarak yer yer topaklanma olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak da gözenekli ve boşluklu bir yapı görülmektedir. Topaklanma oluşmasından dolayı aşınmayı olumsuz etkileyeceği tahmin edilmektedir.



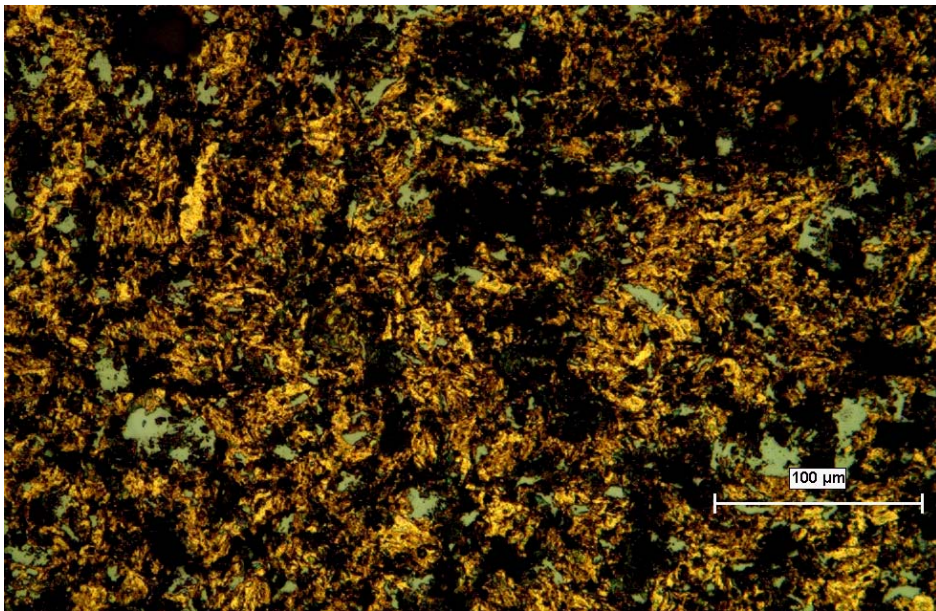
Şekil 9.12 Mg matris içerisindeki % 10 SiO_2 ($-125\ \mu\text{m}$ tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X200)

Şekil 9,13'de saf Mg içerisine katılan $-125\ \mu\text{m}$ tane boyutuna sahip ve % 10 karışım oranlı SiO_2 'in X500 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir.



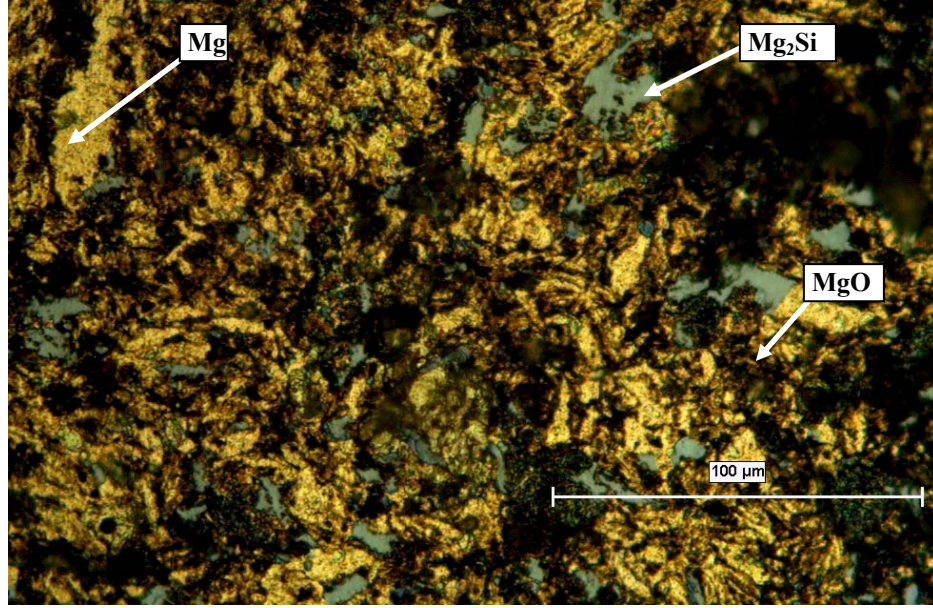
Şekil 9.13 Mg matris içerisindeki % 10 SiO₂ (-125 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500)

Şekil 9,14'de saf Mg içerisine katılan -125 μm tane boyutuna sahip ve % 15 karışım oranlı SiO₂'in X200 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir. Bu resimde tane boyutuna bağlı olarak topaklanma olduğu ve homojen bir dağılım olmadığı görülmektedir. Buna bağlı olarak ta gözenek ve boşluklu bir yapı gözlenmiştir. Topaklanma olmasından dolayı aşınmada olumsuz sonuçlar elde edileceği tahmin edilmektedir.



Şekil 9.14 Mg matris içerisindeki % 15 SiO₂ (-125 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X200)

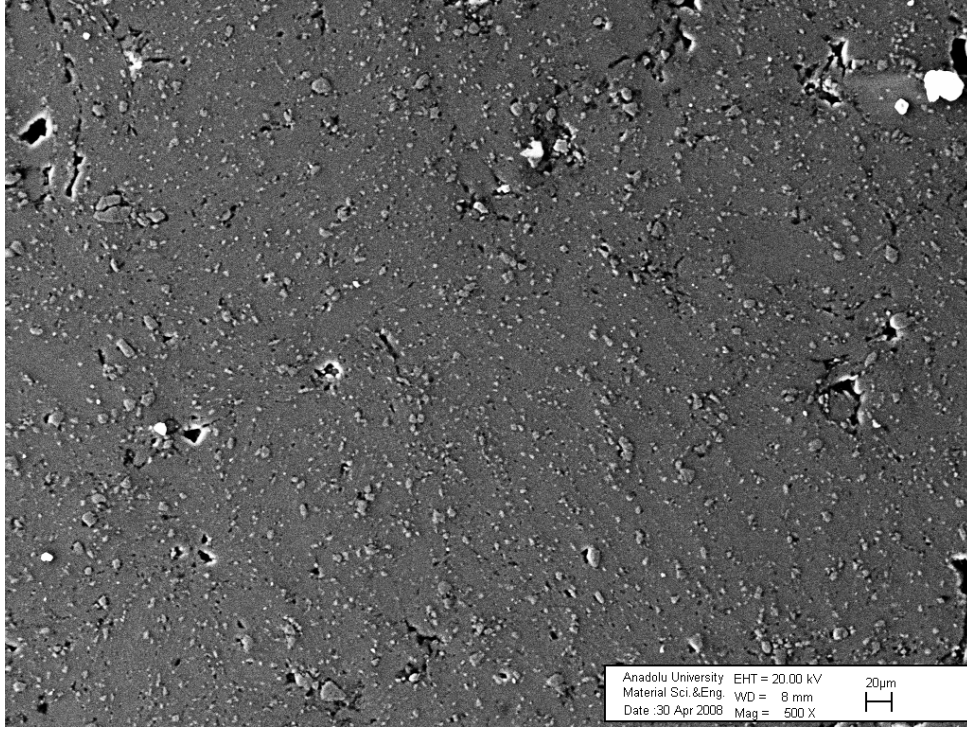
Şekil 9,15'de saf Mg içerisine katılan -125 µm tane boyutuna sahip ve % 15 karışım oranlı SiO₂'in X500 büyütmedeki optik görüntüsü verilmiştir. Yapılan XRD sonuçlarına ve optik mikroskoptan da görüldüğü gibi saf magnezyum içerisine katılan SiO₂'in miktarı arttıkça doğru orantılı şekilde magnezyum silisid (Mg₂Si) ve magnezyum oksit (MgO) oranlarının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9.15 Mg matris içerisindeki % 15 SiO₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin optik görüntüsü (X500)

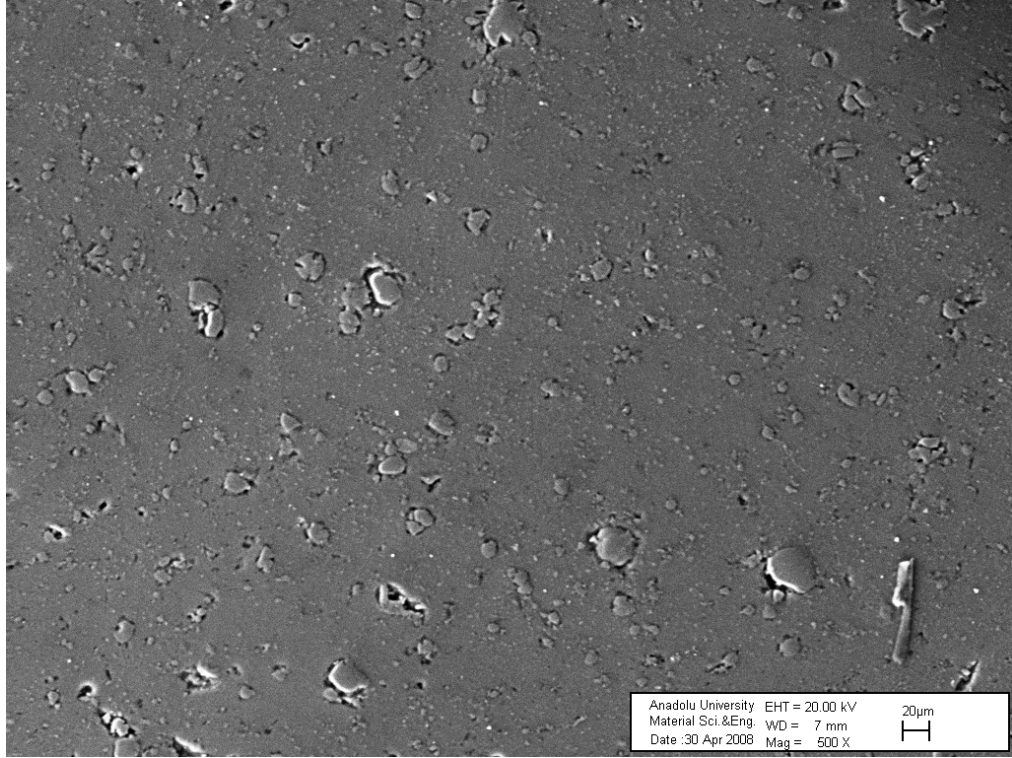
9.4.2. Deney numunelerinin SEM mikroskop görüntüleri

Saf Mg içerisine katılan farklı partikül boyutuna ve farklı karışım miktarına sahip SiO₂ karışım tozunun presleme ve vakum kontrollü difüzyon fırınında argon gazı atmosferinde 550 °C de sinterleme sonrası elde edilen MMK'ların değişik yüzeylerinden parçacık dağılımlarının incelenmesi için mikroyapı fotoğrafları SEM mikroskobu kullanılarak çekilmiştir. Aynı şekilde SEM görüntülerine göre artan kuvars (SiO₂) miktarıyla sistem içerisindeki magnezyum silisid ve magnezyum oksit miktarları artmıştır. Şekil 9,16 saf Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-10 µm tane boyutuna sahip) takviyeli malzemenin X500 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir. Bu resimde de görüldüğü gibi tane boyutuna bağlı olarak homojen bir dağılım oluşmaktadır, gözenek ve boşluk fazla görülmemiştir. -10 µm boyutunda ilave edilen SiO₂ parçacıklarının karıştırma esnasında kırılıp parçalanmadığı orijinal boyutlarını hemen hemen korudukları görülmektedir.



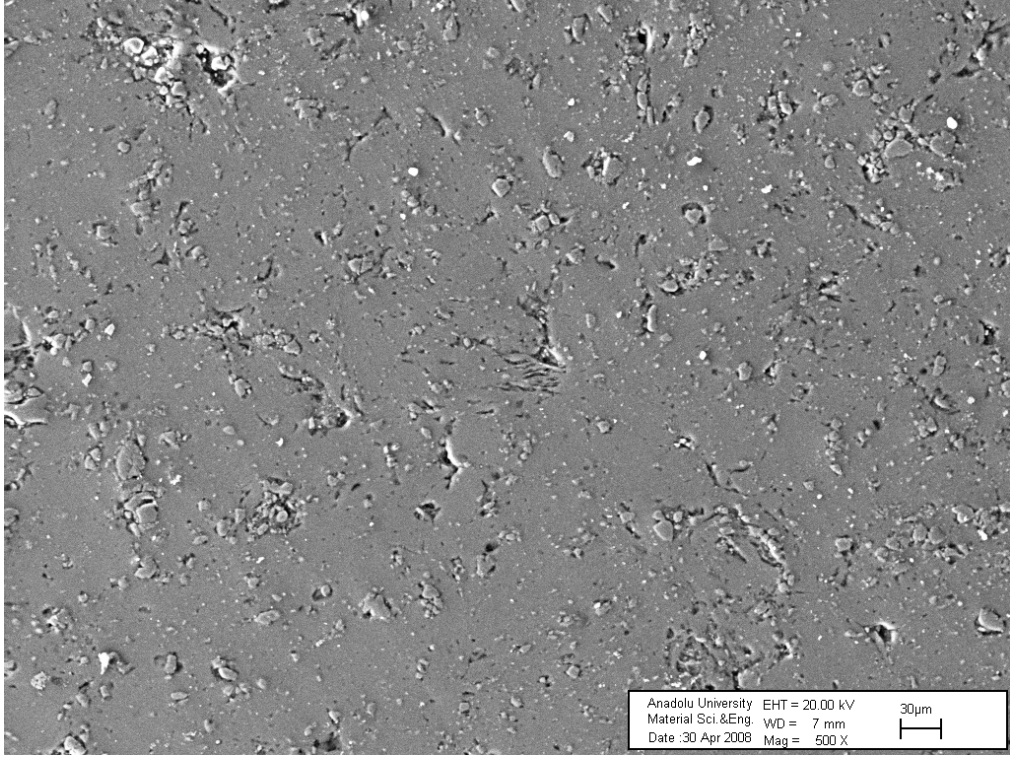
Şekil 9.16 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-10 µm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (X500)

Şekil 9,17 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-125 µm tane boyutuna sahip) kompozit malzemenin X500 büyütmedeki malzemenin SEM görüntüsü görülmektedir. Bu resimde tane boyutuna bağlı olarak yer yer topaklanma olduğu ve bazı bölgelerde kırılan parçacıkların etrafında boşlukların olduğu gözlenmiştir. Yapıda daha az boşluk ve gözeneklere rastlanmaktadır. Buda karıştırmanın iyi yapıldığını göstermektedir. Aşınma deneylerinde olumsuz sonuçlar elde edileceği tahmin edilmektedir. -125 µm tana boyutuna sahip SiO₂ parçacıkları karıştırma işlemi esnasında kırılıp parçalandığı orijinal boyutlarını koruyamadıkları SEM görüntüsündeki scale'dan görülebilmektedir.



Şekil 9.17 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-125 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (X500)

Şekil 9,18 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-500 μm tane boyutuna sahip) takviyeli X500 büyütmedeki malzemenin SEM görüntüsü görülmektedir. -500 μm tane boyutuna sahip kompozit malzemelerde topaklanma olduğu ve bazı bölgelerde kırılan parçacıkların etrafında gözenek ve boşlukların varlığı gözlenmiştir. Aşınma deneylerinde olumsuz sonuçlar elde edileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca karıştırma işleminde kullanılan yüksek enerjili karıştırıcıya bağlı olarak partikül boyutlarında küçülmeler olmuştur. Scale'dan da görüldüğü gibi -500 μm tane boyutuna sahip katkı elemanının boyutları yer yer 20 μm'nin altına kadar düştüğü görülmüştür.



Şekil 9.18 Mg matris içerisindeki % 5 SiO₂ (-500 μm tane boyutuna sahip) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüsü (500X)

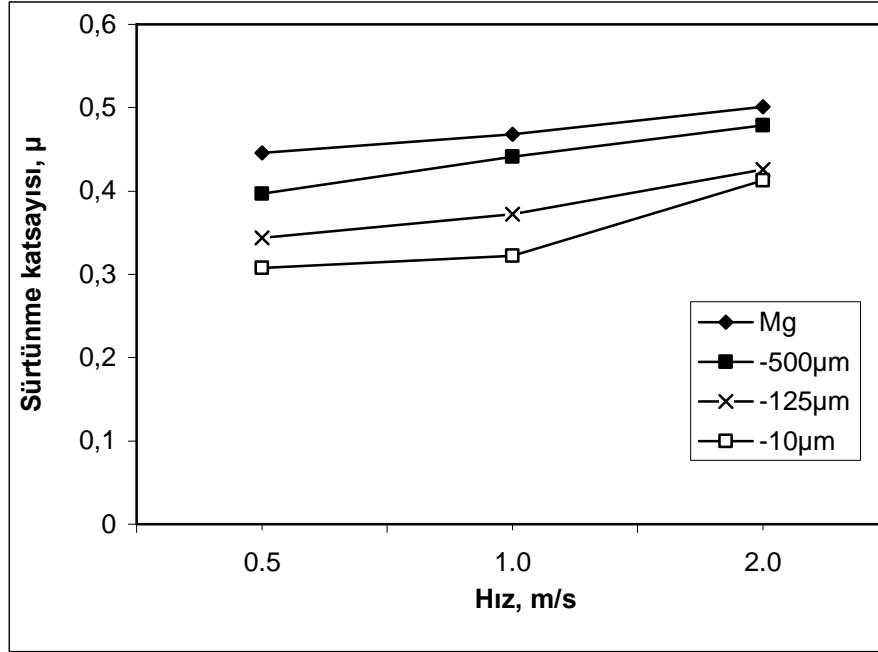
Optik ve SEM fotoğraflarından da görüldüğü üzere takviye malzemesi tane boyutu ve matris içerisindeki karışım oranı arttıkça gözenek ve topaklanma arttırmıştır.

9.5. Aşınma

Kompozitin aşınma davranışları ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 SiO₂ takviyeli kompozitin 0.5 -1 -2 m/s kayma hızı 1 km sabit kayma mesafesinde 5-10-20 N sabit yük uygulayarak test edilmiştir. SiO₂ partikülün tane boyutunun, ağırlıkça oranının ve değişen yük uygulamalarının kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma davranışlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

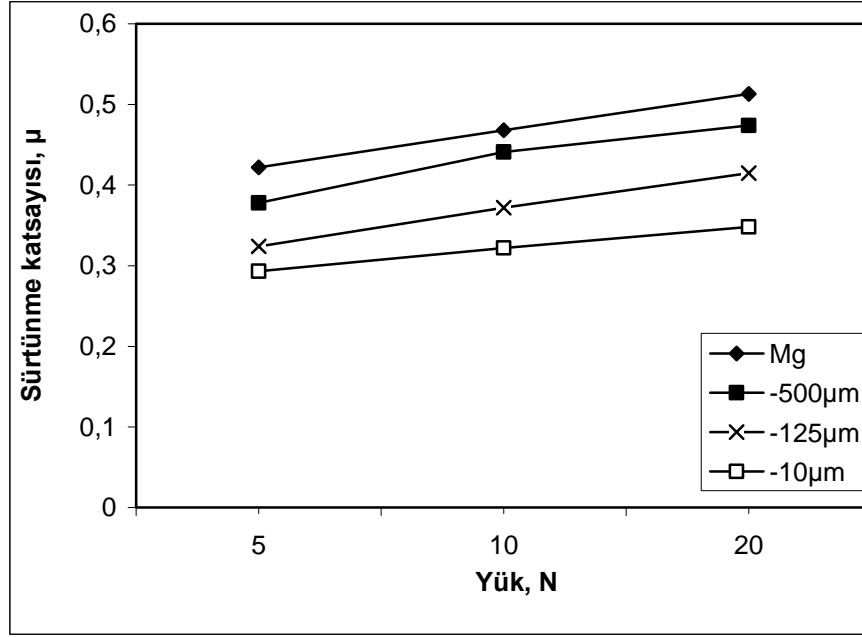
Şekil 9,19 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip SiO₂ parçacıkları % 5 ilave edilerek hazırlanan takviyeli kompozit malzemenin hız-sürtünme katsayısı grafiği görülmektedir. 40 μm tane boyutuna sahip saf Mg'a (sinterleme işleminden sonra) aşınma testi yapılmıştır. Saf Mg 0.5 m/s'deki sürtünme katsayısı 0,446, 1 m/s deki sürtünme katsayısı 0,468, 2 m/s deki sürtünme katsayısı ise 0,501'dir. Bu da gösteriyor ki, saf Mg artan hızla doğru orantılı olarak sürtünme katsayısı da artış göstermektedir. Diğer taraftan 0.5 m/s sabit bir hızda -10 μm takviyeli kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,308, -125 μm takviyeli kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,344, -500 μm takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı 0,397

olarak saptanmıştır. Buradan da anlaşıldığı üzere takviye malzemesinin tane boyutu artıkça sürtünme katsayısı doğru orantılı bir şekilde artış göstermiştir.



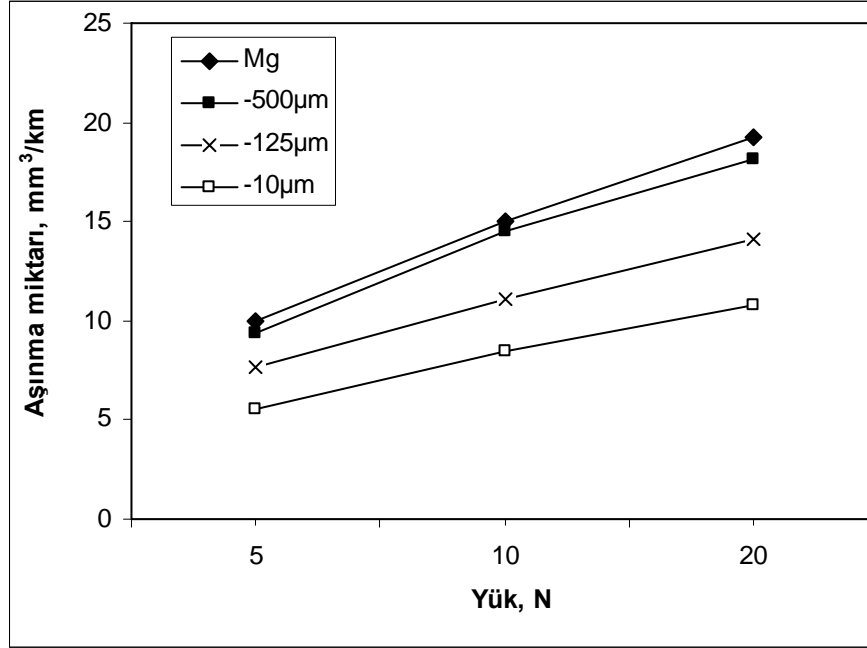
Şekil 9.19 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin hız-sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 9,20 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-sürtünme katsayısı grafiği görülmektedir. Saf Mg'a uygulanan yüke karşın sürtünme katsayısı 5 N da 0,422, 10 N yükte 0,468, 20 N yükte ise 0,513 olduğu saptanmıştır. Buradan da anlaşıldığı gibi, saf Mg'a uygulanan yük artıkça sürtünme katsayısı da ona paralel olarak artış göstermiştir. Diğer taraftan 5 N sabit bir yükte -10 μm takviyeli kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,293, -125 μm takviyeli kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,324, -500 μm takviyeli kompozit malzemenin sürtünme katsayısı 0,378 olarak saptanmıştır. Buradan takviye malzemesinin tane boyutu artıkça sürtünme katsayısı da artış gösterdiği açıkça görülebilmektedir. Bunun da Mohs sertliğine göre sertliği 7 olan SiO₂ parçacıklarının matris malzemesinin sertliğinin artışıyla etkili olduğu ve aşınma direncinin geliştirilmesine katkı sağladığı görülmektedir.



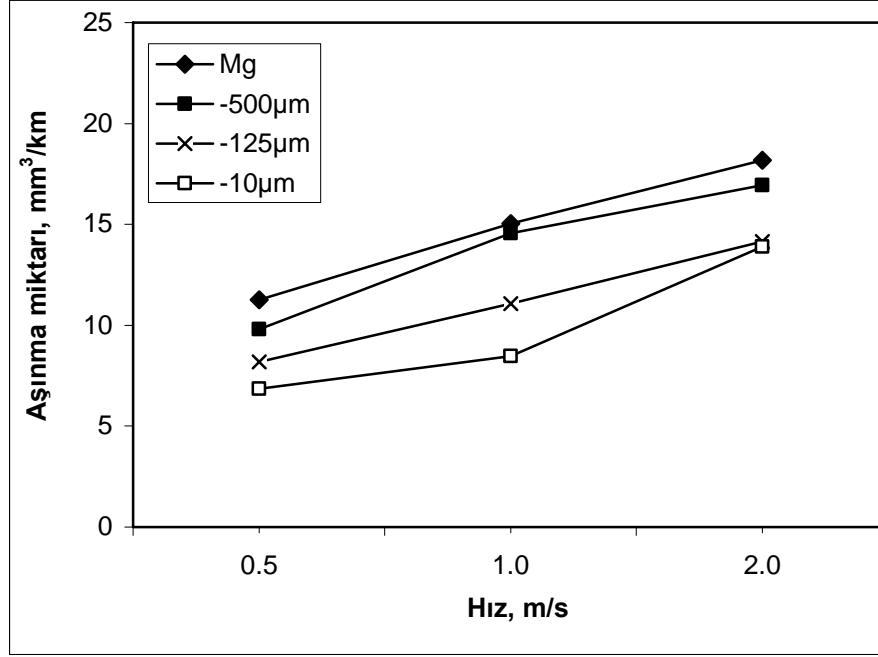
Şekil 9.20 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-sürtünme katsayısı grafiği.

Genel olarak malzemelere uygulanan yükün artmasıyla birlikte hacimsel olarak aşınma oranı da artmaktadır. Kompozit malzemeler yükün artmasıyla yükün artması ile birlikte aşınma artmakta ve takviye hacim oranının artması ile azalmaktadır. Şekil 9,21’te Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-aşınma miktarı grafiği verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi 40 µm tane boyutuna sahip saf Mg’ya uygulanan 5 N yükteki aşınma miktarı 9,953 mm³/km, 10 N yükte 15,023 mm³/km, 20 N yükte ise 19,255 mm³/km olarak saptanmıştır. Buradan da anlaşıldığı gibi saf Mg’ya uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı da ona paralel olarak artış göstermiştir. Diğer taraftan 5 N sabit bir yükte -10 µm SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 5,534, -125 µm takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 7,674, -500 µm takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 9,348 olarak saptanmıştır. Buradan da görüldüğü üzere takviye malzemesinin tane boyutu arttıkça aşınma miktarı da artış göstermiştir. Bunun sebebi olarak, optik ve SEM mikroyapıların da görüldüğü gibi, karıştırma esnasında kırılmış olan SiO₂ seramik parçacıklarının topaklanarak ara yerlerinde gözenek ve boşluklar oluşturmasıdır. Bu boşluklar matris ile kırılmış parçaların yeteri kadar sarılmamasına ve matrisle takviye parçacığın yeteri kadar bağlanmayıp, aşınma esnasında yapıdan uzaklaşarak ağırlık kaybına neden olması şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 9.21 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin yük-aşınma miktarı grafiği.

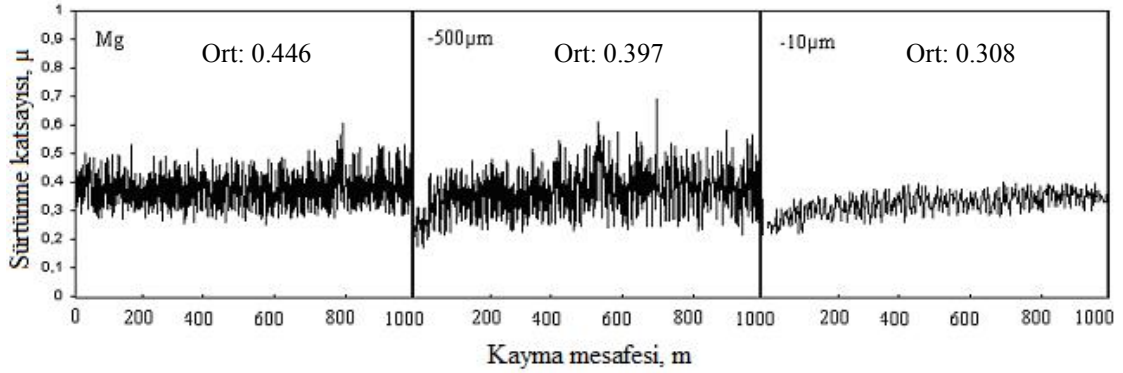
Şekil 9,22 Mg matris içerisine farklı tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin hız-aşınma miktarı grafiği görülmektedir. Bu grafikte 40 µm tane boyutuna sahip saf Mg'a uygulanan 0.5 m/s hızdaki aşınma miktarı 11,255 mm³/km, 1 m/s hızdaki aşınma miktarı 15,023 mm³/km, 2 m/s hızdaki aşınma miktarı ise 18,186 mm³/km olarak saptanmıştır. Bu değerler göz önünde tutularak, saf Mg'a uygulanan aşınma deney hızı artıkça aşınma miktarı da ona paralel olarak artış göstermiştir. Diğer taraftan 0,5 m/s sabit bir hızda -10 µm tane boyutuna sahip SiO₂ takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 6,837 mm³/km, -125 µm takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 8,186 mm³/km, -500 µm takviyeli kompozit malzemenin aşınma miktarı 9,813 mm³/km olarak saptanmıştır. Buradan da görüldüğü gibi takviye malzemesinin tane boyutu artıkça aşınma miktarı da artış göstermiştir. Tane boyutuna bağlı olarak malzeme yapısında meydana gelen topaklanmadan dolayı gözenekli bir yapı oluşmuş ve bundan dolayı yüzey pürüzlülüğünde bir artış görülmüştür.



Şekil 9.22 Mg matris içerisine değişik tane boyutuna sahip % 5 takviyeli kompozit malzemenin hız-aşınma miktarı grafiği.

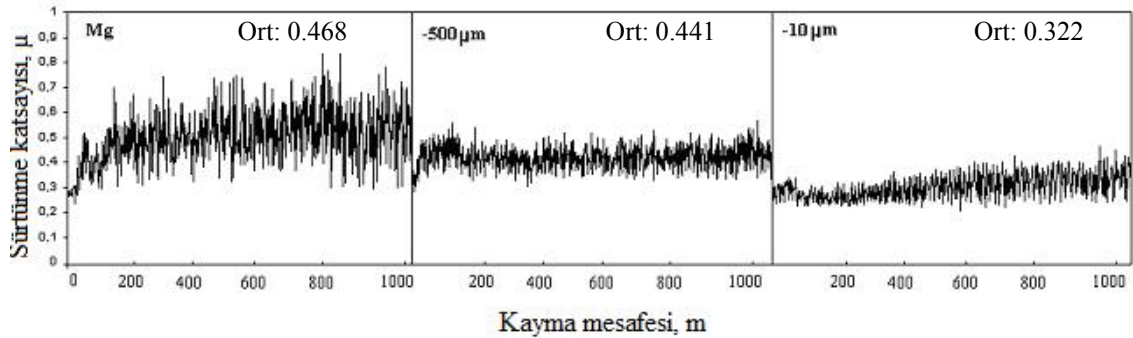
Kompozit malzemelerin aşınma miktarının, uygulanan yükün artması ile birlikte artmıştır. Bunun nedeni numune üzerine etkiyen yükün artması sonucu sürtünmenin artması ve matris-takviye elemanı arasındaki yüzey bağının zayıflamasıdır. Dolayısıyla numune yüzeyinde kopmaların meydana gelmesi ile aşınma miktarı artmıştır. Ayrıca aşınma miktarının takviye parçacıklarının hacim oranının % 5'den % 15'e artması ile düştüğü görülmüştür. Sertlik ölçümlerinden anlaşılacağı üzere kompozitlerde takviye oranı arttıkça numunenin sertlik değerlerinde artış görülmüştür (Bkz. Çizelge 9.3). Bunun doğal sonucu olarak da kompozitlerin aşınma direnci artmış ve aşınma miktarı azalmıştır.

Şekil 9,23 0.5 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği görülmektedir. Bu grafikte görüldüğü gibi saf Mg ortalama sürtünme katsayısı içerisine katılan katkı elemanına göre farklılık göstermektedir. Saf Mg'un içerisine katılan SiO₂'nin tane boyutu düştükçe sürtünme katsayısında da bir düşüş olduğu grafikten de görülmektedir. Tane boyutu arttıkça sürtünme katsayısı da artış göstermektedir.



Şekil 9.23 0.5 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği.

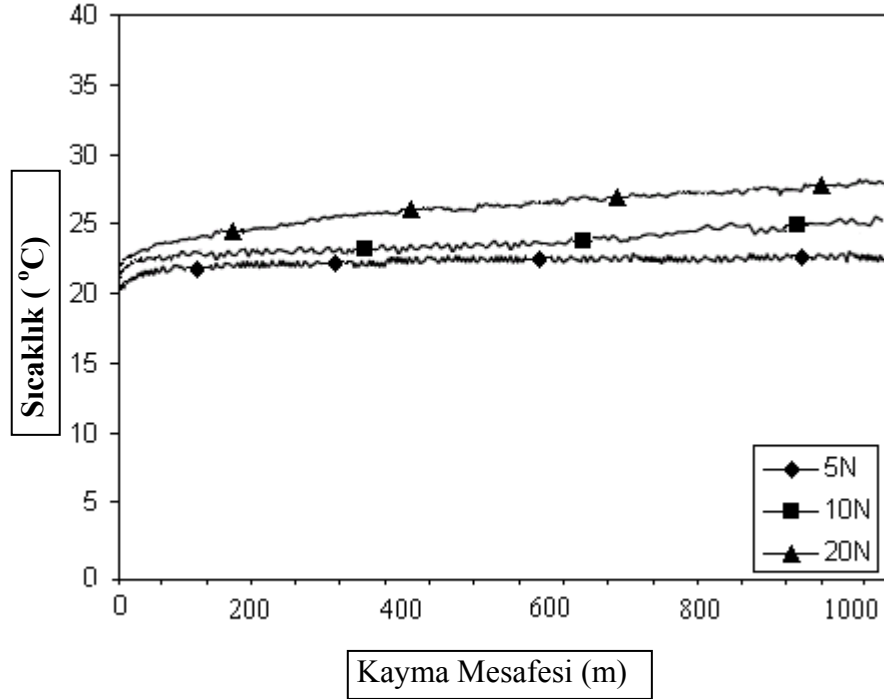
Şekil 9,24 1 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı–kayma mesafesi grafiği görülmektedir. Bu grafikte görüldüğü gibi sürtünme katsayısı saf Mg ve saf Mg içerisine katılan SiO_2 katkı elemanının tane boyutuna göre farklılık göstermektedir. Saf Mg'un içerisine katılan SiO_2 'nin tane boyutu küçük olan kompozitin sürtünme katsayısı tane boyutu iri (büyük) olan kompozit malzemeye göre daha düşük olduğu grafikten de görülmektedir. Tane boyutu artıkça sürtünme katsayısı da artış göstermektedir.



Şekil 9.24 1 m/s hızda 10 N yük altında saf Mg ve içerisine katılan katkı elemanının boyutuna göre sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği.

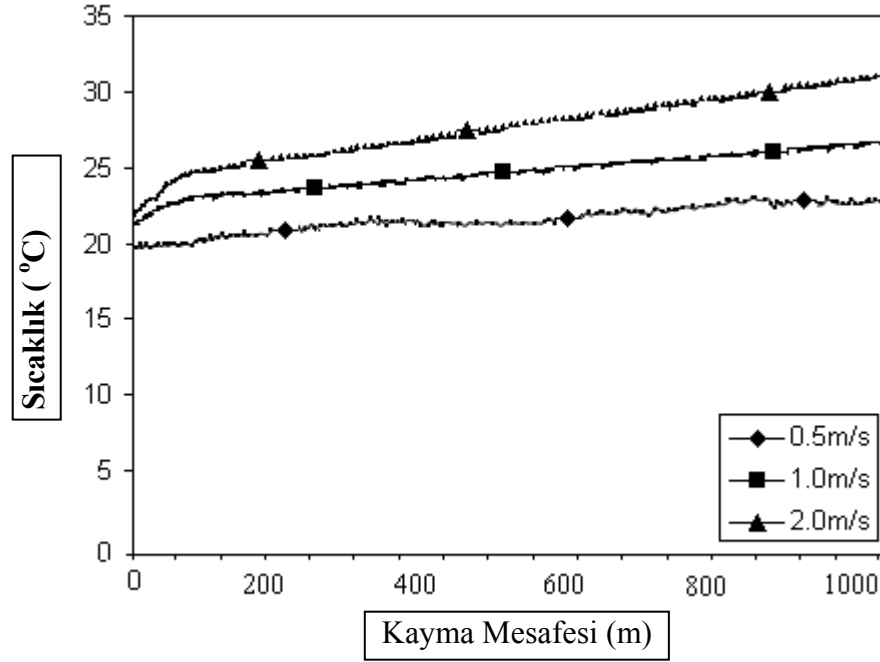
Elde edilen kompozit malzemeye 1.0 m/s hızda aşınma deneyi yapıldığı esnada yapılan ölçümlerde elde edilen kayma mesafesine bağlı sıcaklık değişimi grafiği şekil 9.25'de verilmiştir. Bu grafiğe göre saf Mg'a katılan % 5 SiO_2 'takviyeli kompozit malzemenin (-10 μm tane boyutlu) uygulanan yüke göre sürtünen yüzey sıcaklığında farklılık görülmüştür. Grafikten de görüldüğü gibi sabit bir hızda uygulanan yük değeri artıkça sıcaklık da yüke bağlı olarak artış

göstermiştir. Sabit hız ve sabit yükte kayma mesafesi artıkça sürtünen yüzeyin sıcaklığında artış görülmektedir.



Şekil 9.25 Mg matris içindeki % 5 SiO₂ (-10 µm tane boyutlu) takviyeli numune 1.0 m/sn hız uygulandığında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği.

Şekil 9,26'de saf Mg matris içindeki % 5 SiO₂ (-10 µm tane boyutlu) takviyeli numune 10 N yük uygulandığında sıcaklık-kayma mesafesi grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre saf Mg'a katılan %5 oranında SiO₂ kompozitine (-10 µm tane boyutlu) uygulanan farklı hız değerlerine göre sürtünen yüzey sıcaklığında farklılık oluşmuştur. Grafikten de görüldüğü gibi sabit bir yükte uygulanan hız değeri artıkça sıcaklık da hıza bağlı olarak bir artış göstermektedir. Sabit yük ve hız değerinde kayma mesafesi artıkça sürtünen yüzeyin sıcaklığında artış gözlemlenmiştir.



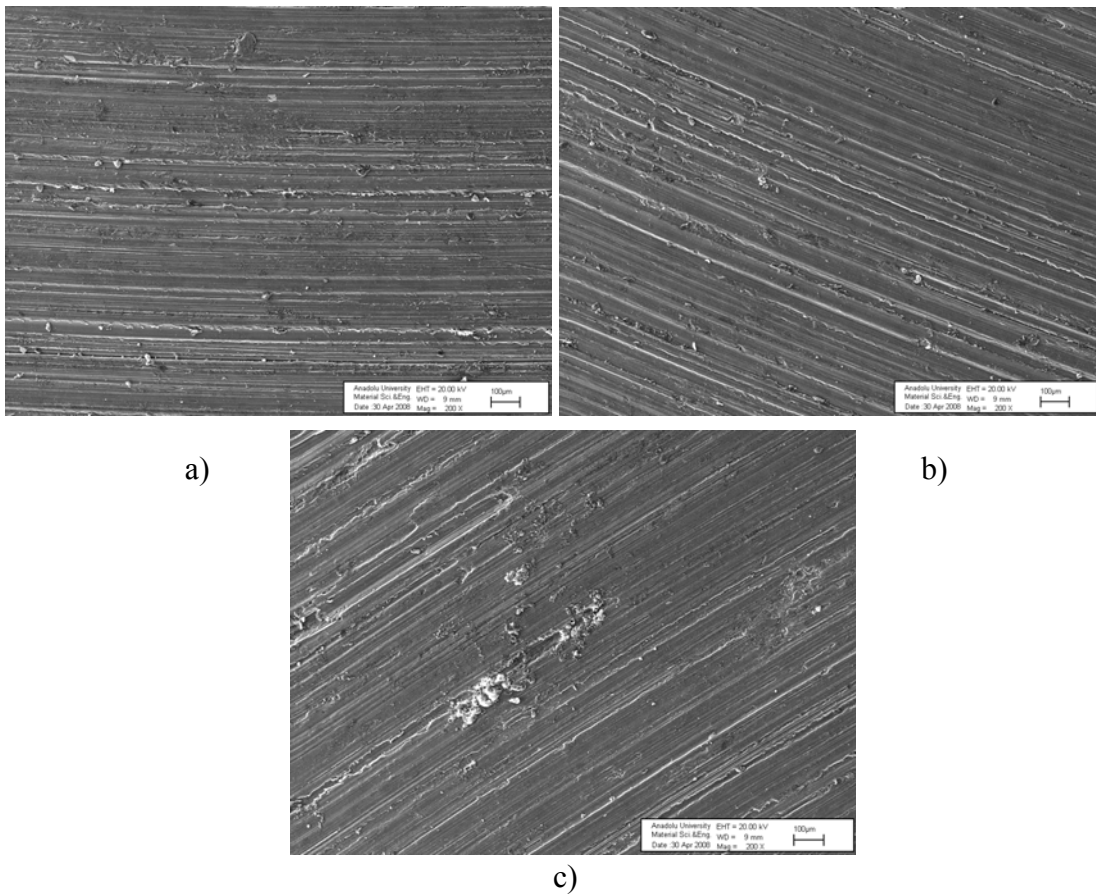
Şekil 9.26 Mg matris içindeki % 5 SiO (-10 µm tane boyutlu) takviyeli numune 10 N yük uygulandığında sıcaklık-kayma mesafesi grafiği.

9.5.1. Aşınmış yüzeylerin SEM ile incelenmesi

Farklı hacim içerikli ve farklı parçacık tane boyutlu MMK malzemeler ve matris üzerinde yapılan kuru aşınma deneyi sonrası numunelerin yüzeyleri SEM cihazında incelenmiştir. Şekil 9,27'de ortalama 40 µm boyutundaki saf Mg'un aşınma deneyi sonrası yüzeyi gösterilmektedir. Bu numune 0,5 m/s kayma hızında ve 10 N yük altında deneye tabi tutulmuştur.

Şekil 9,27 a'da saf Mg'un sinterleme ve aşınma işleminden sonra aşınmış yüzeyinden çekilen X200 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir. Bu resimde 40 µm tane boyutuna sahip saf Mg preslenip sinterlendikten sonra aşınma testine tabii tutulmuş ve aşınmış yüzeyinden belirli bir bölgesinden SEM görüntüsü alınmıştır. Bu resimde de görüldüğü gibi saf Mg'un küçük tane boyutuna sahip olmasından dolayı aşınma testinde olumlu sonuçlar verdiği grafikten de görülmektedir. Aşınan yüzeylerden kopan parçaların derin çukurlar dikkat çekmektedir. Şekil 9.27 b'de ortalama 40 µm tane boyutuna sahip saf mg içerisine katılan -10 µm tane boyutuna sahip % 5 SiO₂ katkı malzemesiyle oluşan kompozitin preslenip sinterleme sonrası aşınma testine tabi tutulmuş ve aşınma yüzeyinin belirli bölgesinden SEM görüntüsü alınmıştır. Bu resimde de görüldüğü gibi saf Mg'a katılan SiO₂ tane boyutuna bağlı olarak aşınma testinde olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Aşınan yüzeylerden kopan parçaların

tane boyutu küçük olduğu için derin çukurlar oluşturmadığı görülmektedir. Şekil 9,27 c’de 40 µm tane boyutuna sahip saf Mg içerisinde katılan -500 µm tane boyutuna sahip %5 SiO₂ katkı malzemesiyle oluşan kompozitin preslenip sinterlendikten sonra aşınma testine tabii tutuluyor ve aşınmış yüzeyinden belirli bir bölgesinden SEM görüntüsü alınıyor. Bu resimde de görüldüğü gibi saf Mg’ya katılan SiO₂ tane boyutuna bağlı olarak aşınma testinde olumsuz sonuçlar verdiği şekil 9,21’den de görülmektedir. Aşınan yüzeylerden kopan parçaların tane boyutuna bağlı olarak derin çukurlar oluşturduğu ve karışım oranına bağlı olarak da bu çukurların arttığı görülmektedir.



Şekil 9.27 Sinterleme ve aşınma işleminden sonra çekilen SEM görüntüsü (X200)

a) Saf mg, b) -10 µm tane boyutuna sahip % 5 SiO₂ takviyeli kompozit

b) c) -500 µm tane boyutuna sahip % 5 SiO₂ takviyeli kompozit.

Aşınma deneylerinde de görüldüğü gibi takviye malzemesinin tane boyutu arttıkça aşınma miktarı da buna paralel olarak artış göstermektedir. SEM görüntülerinde aşınma izlerinin derinliği ve genişliği artmıştır. Artan tane boyutuyla aşınma testinde, aşınma yüzeyinde daha iri ve derin çukurlar oluşturacak ve daha fazla tane koparacaktır. Karışım

oranının artmasıyla da bu kopmalar ve derin çukurlar daha fazla artacağından aşınma miktarında artacağı söylenebilir. Buda önceki aşınma grafikleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

10. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; saf Magnezyum matris içerisine toz tane boyutlarına göre farklı oranlarda SiO₂ seramik tanecikleri katılarak, Mg₂Si metal matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Toz metalürjisi yöntemlerinden turbo spex 8000 D mekanik titreşimli karıştırıcı tekniği ile seramik takviyeli metal matrisli kompozit deney numuneleri elde edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri yapılmış, sertlik ve yoğunluk değerleri ölçülmüştür. Ayrıca değişik yükler ve hızlar altında kuru ortamda pin-on-disk yöntemiyle aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma özelliklerinin, takviye oranı ve boyutuna bağlı değişimi farklı yük ve hızlarda incelenmiştir. Yapılan tüm deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

1) Mg ile SiO₂ malzemelerin sinterleme sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan DSC çalışmalarında 550 °C’de civarında bir reaksiyonun tamamladığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklıkta sinterleme sıcaklığı olarak belirlenmiş ve deneylerde kullanılmıştır.

2) Mg-SiO₂ tozlarının karıştırma işlemlerinde uygulanan XRD analizinde ve karıştırma sonrasında yapılan analizlerde yapıda Mg₂Si ve MgO gibi beklenen yeni fazların oluşmadığı görülmüştür.

3) DSC çalışmaları ile elde edilen ve 550 MPa yük altında preslenip, 550 °C’de sinterlemeden sonra yapılan XRD analizinde, yeni fazların oluştuğu görülmüştür. Burada Mg₂Si ve MgO fazlarının sinterlemeyle oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak karıştırmanın ise reaksiyonu hızlandırdığı açıktır.

4) Optik ve SEM mikroyapılarında görüldüğü gibi homojen karışımli bir kompozit elde edilmiştir. Ancak yönteme bağlı olarak, iri tanelerde karıştırma esnasında aşırı kırılmalar ve durum sonucu olarak da topaklanma ve boşluklara rastlanmıştır.

5) Numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları ölçüldüğünde ham yoğunluklarına göre yoğunluklarının azaldığı belirlenmiştir. Bu, toz hazırlama, presleme ve sinterleme işlemlerinin sağlıklı yapıldığının bir göstergesi kabul edilmiştir. Seramik tane boyutu büyüdükçe yoğunluğunun azaldığı, ayrıca matris içerisindeki seramik oranı arttıkça da yoğunluğun arttığı görülmüştür.

6) Partikül hacim oranının ve boyutunun artmasıyla kompozitlerin sertliklerinin arttığı, matris malzemesi ile kıyaslandığında, bütün MMK malzemelerin sertliklerinin daha fazla olduğu görülmekte ve partikül ilavesinin malzemenin sertliğini artırdığı anlaşılmaktadır.

7) Sabit kayma hızında ve değişik yükler altında yapılan deneylerde matrise göre SiO₂ ile takviyelendirilmiş kompozitin aşınma direnci artmıştır.

8) Kompozit malzeme içerisindeki seramiğin tane boyutu ve ağırlık hacim oranı küçüldükçe aşınma miktarı artmıştır. Ayrıca kompozit malzeme içerisindeki seramiğin oranı arttıkça aşınma miktarı azalmıştır.

9) Artan yüklerle aşınma miktarı hem kompozitlerde hem de ana malzemede artmıştır.

10) Farklı hacim içerikli ve parçacık boyutlu MMK malzemeler ve matris alaşımı üzerinde yapılan kuru aşınma deneyi sonrası numunelerin yüzeyleri SEM altında incelenmiştir. Aşınma yüzeyinin iki karakterden oluştuğu özellikle yüzeydeki koyu kısımlar aşınmaya maruz kalan yüzeyi gösterirken diğer kısımlar ise parlak bir şekilde görünen aşınmış katman şeklinde yüzeyden kopmaların olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ve bilgiler çerçevesinde aşağıdaki noktaların aydınlatılabileceği çalışmaların yapılması uygun olacaktır.

1) Mg-SiO₂ kompozit malzemenin, farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenerek oluşan Mg₂Si ve MgO fazlarının hacimsel değişimi geliştirilmeye çalışılmalıdır.

2) T/M metodu ile üretilen bu kompozitler sinterleme süresi uzatılarak da sertlik ve aşınma deneyleri yapılabilir.

3) Parçacık boyutu mikrondan ziyade nano ölçekli MMK malzemeler üretilmeli ve aşınma davranışları karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] MPIF, 1995, Standard test methods for metal powders and powder metallurgy products, Metal Powder Industries Federation, New Jersey/U.S.A, 3-11.
- [2] Sarıtaş, S., 1994, Toz metalurjisi, Makine Mühendisliği El Kitabı, Cilt 1-2 Baskı, Ankara,MMO, 64-82.
- [3] Lawley, A., 1992, Atomization: The production of metal powders, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA.
- [4] Kurgan, N., 2005, T/M paslanmaz çelik implantlarının üretimi ve teknolojik özellikleri üzerine bir araştırma, Celal Bayer Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Doktora Tezi , 9, 25-46.
- [5] Ünal, R., 1995, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi değişkenlerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [6] Yılmaz, B., 1999, Toz metalurjisi ile üretilen, bağlı grafitli demir parçalarda kullanılan, farklı demir tozu cinslerinin parçalardaki mekanik özelliklere etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 3-4.
- [7] Solak, A., 1995, Ferrous powder metallurgy, Cambridge International Science Publishing, London/ England, 9-10.
- [8] Meddings, B., 1998, Production of cobalt and cobalt alloy powders, ASM, Handbook, 7, 144-146.
- [9] Kurt, A.O., 2004, Toz üretim yöntemleri ve sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 15-19.
- [10] Avner, S.H., 1994, Introduction to physical metallurgy, 4.ed., Published by Ankara University, Ankara/Turkey, 605-632.
- [11] Beddow, J.K., 1978, The production of metal powders by atomization, Heiden Ltd, London.
- [12] German, R.M., 1994, Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA.
- [13] Lee, P.W., 1998, Powder Metal Technologies and Application, ASM Handbook 7, 478-481, ASM International New York/USA.
- [14] Sarıtaş, S., and Doğan, C., 1994, Metal powder production by centrifugal atomization, Int. J. Powder Metallurgy, 30, 419 – 427.
- [15] Ünver, K., 1992, Atomizasyon ve elektroliz sistemleri ile metal tozu üretimi, Makine ve Metal Teknolojisi, , Sayı: 6, İstanbul, 41-45.

- [16] Baksan, B., Gürler, R. 2003, Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- [17] Uygur, E.M., 1979, Metal tozların imalı, ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, Sayı.2, Ankara.
- [18] Yıldırım, M.M., 1974, Theoretische untersuchungen über abbaureaktionen an dichten festkörpern mit einem gemisch aus vier reagierenden gasen, Doktorarbeit, TU Clausthal, 33-38.
- [19] TS 3087, 1978, Toz metalürjisi – terimler, TSE, Ankara
- [20] Huo, H.L., 1998, Angle of repose, ASM, Handbook,7, 282-285.
- [21] Somunkıran, İ., 1999, Demir esaslı molibden, nikel, bakır katkılı toz metal alaşımının mekanik özelliklerine bakır oranının etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Yüksek Lisans Tezi, 8-10, 40-45.
- [22] Housner, H.H, and Kempton, H.R., and Johnson, F.K., 1978, Iron powder Metallurgy, 3. MPIF, Newyork.
- [23] Alpugan, Z., 1981 T/M de presleme tekniği ve nükleer yakıt üretim uygulamaları, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırmalar Enstitüsü, TÜBİTAK.
- [24] Thumler ve Thomma, 1967
- [25] Dixon, R.T.H and Clayton, A., 1997, Powder Metallurgy for Engineers, The Mechanicery Publishing Co, London.
- [26] Bututaki, T., 1997, Toz metalurjisi ile üretilen çelik malzemelerin mekanik özelliklerine etki eden faktörler, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 29 31.
- [27] Sarıtaş, S ve Çınar, H., 1988, Metal tozlarının çift hareketli zımbalarla briketlenmesi.
- [28] Herman, S., 1981, Sintering an economical process for the manufacture of metallic precision parts, Mannesmann Conference, Germany.
- [29] James, B.A., 1985, Liquid phase sintering in ferrous powder metallurgy, Powder Metallurgy, 28 (1985) 3.
- [30] Crawson, A., 1993, P/M ferrous materials, Metal Handbook, Volume 7, 623, New York/U.S.A
- [31] Akbulut, H., (1994), Alümina fiber takviyeli metal matriksli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı-özellik ilişkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).
- [32] Ögel, B. (1997), "Kompozit malzemelerde son gelişmeler ve ileriye dönük beklentiler", 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11–15. Haz. 1997, İstanbul, 639–649.

- [33] Cöcen, Ü., Önel, K. (1996), "Metal matrisli kompozitler: Özellikleri ve uygulamaları", *Metalurji*, (104):18-31.
- [34] Miracle, D.B. ve Donaldson, S.L. (2001), *ASM Handbook, Volume 21, Composites*, ASM.
- [35] Ma, Q. S., Chen, Z. H., Zheng, W., Hu, H., (2005), "Processing and characterization of particles Si-O-C composites via pyrolysis of polysiloxane SiC or/and Al fillers", *Ceramics International*, Elsevier, 31 (N) 8 : 1045-1051.
- [36] Berghezan, A., (1978), "Basic design concepts and spesific methods for the fabrication of metal matrix composites materials", *Advance In Composite Materials*, ed., G. Piatti, 5-17.
- [37] Peng, H.X., Fan, Z., Evans, J.R.G. (2000), "Novel MMC Microstructures Prepared by Melt Infiltration of Reticulated Ceramic Preforms", *Materials Science and Technology*, 16:903-907.
- [38] Froyen, L., Verlinden, B. (1994), *Aluminium matrix composites materials*, TALAT Lecture 1402, European Aluminium Association.
- [39] Contreras, A., Lopez, V. H. And Bedolla, E., (2004), "Mg/TiC composites manufactured by pressureless melt infiltration", *Scripta Materialia*, 51 : 249-253.
- [40] İnternet : Anon., Magnesium Information, <http://www.members.tripod.com/Mg-mgggen.htm>(2005).
- [41] Yan, C., Ye, L., Mai, Y., W., 'Effect of constraint on tensile behavior of an AZ91 magnesium alloy', *Materials Letters*, 58 :3219-3221 (2004).
- [42] Büyük larouse Sözlük ve Ansiklopedisi, *Milliyet Gazetesi*, 15: 7657-7658 (1986).
- [43] Singh, R., R., K., (2004), 'The role of microstructure in localized corrosion of magnesium alloys', *Metallurgical and Materials and Transactions A*, 35A: 2525.
- [44] Cahn, R., W., Haasen, P., Kramer, E., J., (1996), 'Structure and properties of nonferrous alloys', *Materials Science and Technology*, 8: Matuchan, K., H., Almanya, 117-206.
- [45] Luo, A., A., Balogh, M., P., and Powell, B., R., March, (2002), 'Creep and materials and Transactions A, 33A: 567.
- [46] Polmear, I., J., (1981), 'Light alloys- metalurgy of the light metals', *Metallurgical and Materials Science*, Prof. Hancock, P., Prof. Honeycombe, R., W., K., Monash University, London, 127-145.
- [47] İnternet: Willman Industries Inc., Properties of Magnesium, http://www.castingsource.com/AdRedir.asp?url=http://www.willmanind.com/&image=images/ads/willman_banner.gif 8-10 (2004).

- [48] Kazdal, Z., H., (1999), ‘Magnezyum alaşımları: otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği’, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli,.
- [49] Australian Greenhouse Office, (2000), ‘Synthetic use in non-montreal industries;metals processing-magnesium and alloys’, Report, ISBN 1-876536-79-9,Avustralya, 7-9.
- [50] Askeland, D., R., 1998, “ The science and engineering of materials, 1”, Çeviren Dr. M. Erdoğan, M., Nobel Yayın Dağıtım, 3.baskı, Ankara.
- [51] İnternet: <http://frm.ekshi.net/kuvars.nedir.84477.html>
- [52] Bolen, W.T., 1991, Industrial sand and gravel.
- [52] Suryanarayana, C., (2001), “Mechanichal alloying and milling”, Progress in Materials Science, 46: 1-184.
- [53] Kurt, A., (1992), “Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-35.
- [54] Arık, H., Turker, M., and Sarıtas, S., (2000), “Investigation of the mechanical properties of Al_4C_3 reinforced aluminium based composites by mechanical alloying techniques”, Proceedings of Powder Metallurgy Wold Congres, 1713.
- [55] ASM Handbook (2001), Composites, the material information society, Ohio, ASTM, Vol. 21, pp. 903-912.
- [56] Koch, C. C., (1991), “ Processing of metals and alloying”, Materials Science and Tecnology- Acomprehensive Treatment, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, ed. Cahn. R. W, Germany, 15: 193-245.
- [57] Dolgin, B. P., Vanek, M. A., McGory, T. And Ham, D.J., (1986), “Solids”, Non-cryst solids, 87: 9-281.
- [58] Kaya, H., (2003), “ Spex tipi mekanik alaslamlama cihazının tasarımı, imalatı ve alüminyum bazlı kompozit tozların üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 1-35.
- [59] Bostan, B., (2003), “Alüminyum-karbon tozlarından mekanik alaslamlama ve sonrası işlemlerle Al_4C_3 sentezlenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-10.
- [60] Chin, Z. H., Perng, T. P., (1997), “Amorphization of Ni-Si-C ternary alloy powder mechanical alloying”, Materyal Science Forum, 235-238: 6-121.
- [61] Fındık, T., (2002), “Mekanik alaslamlama değirmeninde öğütülmüş 17-4 çökelti sertleştirilmiş paslanmaz çelik tozların karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-34.

- [62] Hong, L. B., Bansal, C., Fultz, B., (1994), “Nano-mechanical properties and biotribological behaviors of nanosized HA/partially-stabilized zirconia composites”, *Nanostructured Mater*, 4: 56-949.
- [63] Özyürek, D., (2002), “Mekanik alaşımlama yöntemi ile titanyum bazlı metal matris kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6, 27-35.
- [64] Hiçyılmaz, N., (1999), “ Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin aşınma özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 60–61.
- [65] Çelik, H., 1991, Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 11-12.
- [66] Turhan, H., 1998, “Düşük katkılı kalay içerikli bronz yatakların aşınma ve yorulma davranışlarının araştırılması”, F.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- [67] E. Atik, 1987, “Poliüretan esaslı elemanların belirlenmiş şartlar için imal edilen bir düzende Aşınma Davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, U.Ü. Fen Bil. Enst..
- [68] Stachowiak, G.W. and Batchelor A.W.,2001, *Engineering tribology*, U.S.A., 433- 616. [56]
- [69] Demirci, A.H., (1982), “Ötektoidalı çeliklerin yeni imal edilen bir sürtünme-aşınma deney standında ısıl işlemlere bağlı olarak aşınma davranışlarının incelenmesi ve optimizasyonu”, Doçentlik Tezi, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, 8- 44.
- [70] Bowden, F. B. Tabor, D., (1964), “Friction and lubrication of solids”, Oxford at the Clarendon Pres, London, 544.
- [71] Aslan, A., (2002), “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 42-54.
- [72] Okay, F., (2006), “PVD yöntemi ile TiN kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 76.

EKLER

EK-1 Karışım miktarlarının formüllerle bulunması.

Her bir üretilecek parça için sıkıştırmadan önce kalıba konulacak toz miktarı (W), toz karışım yoğunluğuna ve üretilecek parçanın boyutlarına bağlıdır. Buna göre hazırlanan karışımlarda ilave edilen katkı oranına göre karışım miktarlarının bulunması aşağıdaki formülle yapılmıştır.

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (1.1)$$

formülünden;

$$W = \rho * V \quad (1.2)$$

olarak türetilen formülden toz ağırlıkları hesaplanmıştır. Burada;

ρ : yoğunluk (g/cm^3),

V : üretilecek parça hacmi (cm^3),

W : toz ağırlığı (g), şeklindedir.

Üretilecek parçanın hacmi;

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (1.3)$$

cm^3 dir.

Elde edilmek istenen numunenin hacmi;

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = 1,573 \text{ cm}^3 \text{ dir.}$$

Bilye Ağırlığı (BA) : Toplam karışım ağırlığı x 5

Karışımın yoğunluğu;

$$\rho_{\text{kar}} = [(\%W)_1 \cdot \rho_1] + [(\%W)_2 \cdot \rho_2] + \dots + [(\%W)_n \cdot \rho_n] \quad (1.4)$$

Buradan Mg-SiO₂ karışımları için sıkıştırmadan önce kalıba konacak toz miktarları (1.4) no'lu formülden karışımın yoğunluğu hesaplanmıştır;

$\rho_{\text{Mg}} = 1.738 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{SiO}_2 \text{ kuvars}} = 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 'dir.

Kütlice %95 Mg - % 5 SiO₂ karışımı hazırlamak için;

$$W_{\text{kar1}} = \rho_{\text{kar1}} * V$$

$\rho_{\text{Kar}} = [(0,05 \times 2,65) + (0,95 \times 1,738)] = 1,783 \text{ g}/\text{cm}^3$ toplam bu hacme girecek ortalama yoğunluk.

Elde edilmek istenen hacim $V = 1,573 \text{ cm}^3$ dir. Buradan,

$$W_{\text{kar1}} = \rho_{\text{kar1}} * V \text{ den} = 1,783 \times 1,573 = 2,805 \text{ gr karışımın toplam ağırlığıdır.}$$

Buradan karışımın;

%95'i Mg olduğu için: $2,805 \times 0,95 = 2,664 \text{ gr}$

%5'i SiO₂ ise : $2,805 \times 0,05 = 0,140 \text{ gr}$ 'dir.

BA : toplam karışım ağırlığı x 5 = $2,805 \times 5 = 14,025 \text{ gr}$

EK-1 (devam)

Kütlece %90 Mg - % 10 SiO₂ karışımı hazırlamak için;

$\rho_{Kar} = [(0,1 \times 2,65) + (0,90 \times 1,738)] = 1,829 \text{ g/cm}^3$ bu hacme girecek ortalama yoğunluk.

Elde edilmek istenen hacim $V = 1,573 \text{ cm}^3$ dir. Buradan,

$W_{kar1} = \rho_{kar1} \cdot V$ den = $1,829 \times 1,573 = 2,877 \text{ gr}$ karışımın toplam ağırlığıdır.

Buradan karışımın;

%90'i Mg olduğu için: $2,805 \times 0,90 = 2,589 \text{ gr}$

%10'i SiO₂ ise : $2,805 \times 0,10 = 0,2877 \text{ gr}$ 'dır.

$BA = 2,877 \times 5 = 14,385 \text{ gr}$

Kütlece %85 Mg - % 15 SiO₂ karışımı hazırlamak için;

$\rho_{Kar} = [(0,15 \times 2,65) + (0,85 \times 1,738)] = 1,874 \text{ g/cm}^3$ bu hacme girecek ortalama yoğunluk.

Elde edilmek istenen hacim $V = 1,573 \text{ cm}^3$ dir. Buradan,

$W_{kar1} = \rho_{kar1} \cdot V$ den = $1,874 \times 1,573 = 2,949 \text{ gr}$ karışımın toplam ağırlığıdır.

Buradan karışımın;

%85'i Mg olduğu için: $2,805 \times 0,85 = 2,506 \text{ gr}$

%15'i SiO₂ ise : $2,805 \times 0,15 = 0,442 \text{ gr}$ 'dır.

$BA = 2,949 \times 5 = 14,745 \text{ gr}$