

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ÜNİVERSİTESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Toz Metalurjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve
Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Yusuf KARAMAN

TEMMUZ 2011

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yusuf KARAMAN tarafından hazırlanan TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE MgO TAKVİYELİ Al ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Recep ÇALIN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Doç. Dr. Halil ARIK	_____
Üye(Danışman)	: Doç. Dr. Recep ÇALIN	_____
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Ali Osman ER	_____

06 / 07 / 2011

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE MgO TAKVİYELİ Al ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

KARAMAN, Yusuf

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep ÇALIN

Temmuz 2011, 84 sayfa

Bu çalışmada, Toz Metalurjisi (T/M) yöntemiyle ağırlıkça %5, %10 ve %15 magnezya (MgO) takviyeli alüminyum (Al) esaslı metal matrisli kompozitler (MMK) üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak %99,7 saflıkta, ortalama 76,39 µm boyutunda Al tozları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ortalama toz boyutu 29,53 µm olan saf MgO tozları kullanılmıştır. Hazırlanan toz karışımları 60 dk süreyle Turbula cihazında karıştırıldıktan sonra 500 MPa basınç altında tek yönden etkili preste sıkıştırılarak 6,35mmX12,7mmX31,75mm boyutlarında test numuneleri üretilmiştir. Ağırlıkça %5 takviyeli kompozitler 570°C, 600°C ve 630°C sıcaklıkta 1-2-4 saat süreyle sinterlenmişlerdir. Yapılan yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti (ÇKM) testleri sonucunda en iyi değerler 630°C'de 4 saat sinterleme sonrasında elde edildiği tespit edilmiştir. Sinterleme sıcaklık ve süresinin artmasıyla gözenekliliğin azaldığı ve bu sonuçtan mekanik özelliklerin pozitif yönde etkilendiği görülmüştür. MgO takviye oranının mekanik özelliklere etkisini incelemek için ağırlıkça %5, %10 ve %15 MgO takviyeli kompozitler 630°C'de 4 saat süreyle sinterlenmişlerdir. MgO takviyesi oranının artmasıyla gözeneklilik ve sertlik artarken, artan mikro çatlak etkisi sonucu çapraz kırılma mukavemetleri (ÇKM) düşmüştür.

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan mikroyapı incelemelerinde kompozitler içerisinde MgO'in homojen dağılıma sahip olduğu görülmüştür. SEM ile yapılan kırık yüzey incelemelerinde kırılmanın zayıf ıslatmadan dolayı Al-MgO arayüzeylerinden gerçekleştiği görülmüştür. SEM ile yapılan yüzey incelemelerinde gözeneklerin çoğunlukla MgO parçacıkları etrafında toplandığı ve kırık yüzeyler incelendiğinde gözeneklerin yüzey enerjisini düşürme eğilimi ile küresel hale gelip tane sınırlarında toplandıkları tespit edilmiştir. Artan gözenekliliğin mikro çatlak etkisini artırdığı için kompozitlerin ÇKM değerlerini düşürdüğü değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Toz Metalurjisi, Kompozit Malzeme, Mekanik Özellikler, Al, MgO.

ABSTRACT

PRODUCTION OF MgO REINFORCEMENT Al MATRIX COMPOSITE BY POWDER METALLURGY METHOD AND INVESTIGATION OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

KARAMAN, Yusuf

Kırıkkale University

Institute of Science and Technology

Department of Mechanical Engineering, Master Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep ÇALIN

July 2011, 84 Pages

In this study, weight percent of 5%, 10% and 15% MgO reinforcement aluminum (Al) matrix composites were produced by powder metallurgy (P/M) method. Al powders used to produce composite specimens has over 99,7% percent of purity and 76,39 μm of average particle size. Pure MgO powders with 29,53 μm of average particle size were used as reinforcement material. Prepared powder mixes had been mixed for 60 minutes by Turbula. Powders were compacted to 6,35mmX12,7mmX31,75mm size at 500MPa pressure by single action press. Weight percent of 5% MgO reinforced composite specimens had been sintered at 570°C, 600°C and 630°C for 1-2-4 hours. After having the results of density, hardness and transverse rupture strength (TRS) tests, the best results were obtained on sintering process at 630°C for 4 hours. Increasing in the sintering temperature and time made the porosity decrease and improve the mechanical properties. After these results, weight percent of 5%, 10% and 15% MgO reinforced (Al) matrix composites had been sintered at 630°C for 4 hours to investigate the effects of MgO ratio in composite. Increasing in MgO reinforcement ratio increased the porosity and hardness and decreased TRS because of higher micro crack effect. Surface

inspections of specimens were applied by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). There was no segregation of MgO observed on the surface. Examination of surface fracture by SEM showed that fracture occurred between Al-MgO interfaces because of low wettability and porosities turned into spherical shape on the grain boundaries by the effect of reducing surface energy tendency. Surface examination made by SEM showed that the porosity mostly took place around the MgO particles. The more porosity increases, the more micro crack effect increases. Consequently, TRS values of composites decreased.

Key Words : Powder Metallurgy, Composite Material, Mechanical Properties, Al, MgO.

TEŞEKKÜR

Araştırmalarım ve deneysel çalışmalarım esnasında engin bilgi birikiminden faydalandığım ve her aşamasında yardımlarını esirgemeyen tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. Recep ÇALIN'a ve değerli hocam Sayın Öđ. Gör. Hanifi ÇİNİCİ'ye saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarımın yapılması esnasında katkılarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e, Sayın Prof. Dr. Adem KURT'a, Sayın Prof. Dr. Ramazan ÇITAK'a, Sayın Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL'a, Sayın Dr. Volkan KILIÇLI'ya, Sayın Arş. Gör. Sinan AKSÖZ'e ve yüksek lisans öğrencileri değerli arkadaşlarım Halil KARAKOÇ ve Ahmet AYATA'ya teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan dolayı sevgili eşim Sibel KARAMAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması.....	2
1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri.....	3
1.3. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. TOZ METALURJİSİ	14
3.1. T/M'de Temel Basamaklar	16
3.2. T/M Avantajları.....	17
3.3. T/M Dezavantajları.....	17
3.4. Metal Tozları Üretimi.....	18
3.4.1. Mekanik Yöntemler	18
3.4.1.1. Talaş Kaldırma.....	18
3.4.1.2. Öğütme	18
3.4.2. Elektroliz	19
3.4.3. Kimyasal Yöntemler	20
3.4.3.1. Doğrudan İndirgenme	20
3.4.3.2. Karbonil Yöntemi	21
3.4.3.3. Çökeltme Yöntemi	21
3.4.4. Atomizasyon Yöntemi	21
3.4.4.1. Gaz Atomizasyonu.....	21
3.4.4.2. Su Atomizasyonu.....	22
3.5. Toz Karakterizasyonu	23

3.5.1. Numune Alma	23
3.5.2. Toz Boyut Ölçümü	23
3.5.2.1. Mikroskopta Boyut Ölçümü	25
3.5.2.2. Eleme Yöntemi	25
3.5.2.3. Sedimentasyon Yöntemi	26
3.5.2.4. Işığın Kırınımı Yöntemi	26
3.5.3. Toz Şekli	27
3.5.4. Yüzey Alanı	27
3.5.5. Toz Akış Hızı ve Yoğunluk	28
3.5.6. Sıkıştırılabilirlik	29
3.5.7. Ham Mukavemet	30
3.6. Toz Sıkıştırma (Yoğunlaştırma) Yöntemleri	30
3.6.1. Yağlayıcılar ve Bağlayıcılar	30
3.6.2. Karıştırma ve Harmanlama	31
3.6.3. Sıkıştırmada Parçacık Deformasyonu	32
3.6.4. Kalıpta Sıkıştırma Teknolojisi	33
3.6.5. Sıkıştırma Teknikleri	36
3.6.5.1. Presleme	36
3.6.5.2. İzostatik Presleme (HIP, CIP)	36
3.6.5.3. Haddeme	37
3.6.5.4. Ekstrüzyon	38
3.6.5.5. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK)	38
3.7. Sinterleme	39
3.7.1. Sinterleme Çeşitleri	40
3.7.1.1. Katı Hal Sinterleme	40
3.7.1.2. Sıvı Faz Sinterleme	42
3.7.1.3. Aktivasyonlu Sinterleme	42
3.7.1.4. Reaksiyonlu Sinterleme	43
3.7.2. Sinterlemede Islatma Teorisi	43
3.7.3. Sinterlemenin Etkileri	44
4. MATERYAL VE YÖNTEM	45
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	45
4.1.1. Alüminyum ve Alaşımları	45

4.1.2. MgO ve Özellikleri	46
4.2. Test Numunelerinin Üretilmesi.....	47
4.2.1. Toz Karışımlarının Hazırlanması.....	47
4.2.2. Toz Karışımlarının Preslenmesi	50
4.2.3. Toz Karışımlarının Sinterlenmesi	50
4.3. Mekanik Testlerin Yapılması.....	51
4.3.1. Yoğunluk Ölçümleri.....	51
4.3.2. Çapraz Kırılma Mukavemeti (ÇKM) Ölçümleri	52
4.3.3. Sertlik Ölçümleri.....	53
4.4. Mikroyapı İncelemesi İçin Numunelerin Hazırlanması	54
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	55
5.1. Yoğunluk Sonuçlarının İncelenmesi.....	55
5.2. Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi.....	64
5.2. Çapraz Kırılma Mukavemeti (ÇKM) Sonuçlarının İncelenmesi	68
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
EKLER.....	83
EK-1 Al toz boyut analiz raporu.	83
EK-2 MgO toz boyut analiz raporu.....	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Standart Elek Boyutları	25
4.1. Matris malzemesi Al'un özellikleri.	45
4.2. Takviye malzemesi MgO'in özellikleri.	47
4.3. Toz karışımlarının ağırlık oranları.	49
4.4. Numune gruplarının sinterleme koşulları	51
5.1. %5 MgO takviye oranlı numunelerin yoğunluk sonuçları	55
5.2. 630°C'de 4 saat sinterlemede yoğunluk sonuçları	58
5.3. 1,2,3'üncü grup numunelerin sertlik sonuçları.....	65
5.4. İkinci aşama deneylerin sertlik sonuçları.....	67
5.5. 1,2,3'üncü grup numunelerin ÇKM sonuçları	68
5.6. İkinci aşama deneylerin ÇKM sonuçları	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	3
1.2. Partikül takviyeli (a), kısa fiber (b) ve sürekli fiber (c) takviyeli MMK'lerin SEM görüntüleri	4
1.3. Al matrisli kompozitten üretilmiş bazı otomobil parçaları.....	4
3.1. T/M parça üretimi akış şeması	16
3.2. Öğütücü değirmen çeşitleri	19
3.3. Demir ve bakır için örnek tepkimeler ve elektroliz hücresi	19
3.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	22
3.5. Su atomizasyonu	23
3.6. Yuvarlak fakat düzensiz parçacığın izdüşüm görüntüsü	24
3.7. Işığın kırınımı yöntemi.....	26
3.8. Muhtemel toz şekilleri	27
3.9. Hall, Carney ve Scott hunileri.....	28
3.10. Çift boru tip karıştırıcı (a), çift koni tip karıştırıcı (b)	32
3.11. Toz sıkıştırma kademeleri (a) ve küresel parçacıkların sıkıştırma sonrası SEM fotoğrafı (b).....	32
3.12. Kalıpta sıkıştırma çevrimi.....	33
3.13. Kalıpta sıkıştırmada kuvvetler dengesi	34
3.14. Soğuk İzostatik Sıkıştırma	37
3.15. TEK işlem basamakları	39
3.16. Sinterleme esnasındaki gözenek gelişimi	40
3.17. Parçacıklar arası sinterleme bağı gösterimi	41
3.18. Küresel tozda boyun geometrisi.....	41
3.19. Sıvı damlasının katı bir yüzeye teması	44
4.1. Al tozları boyut dağılım grafiği.....	46
4.2. MgO tozları boyut dağılım grafiği	46
4.3. Turbula karıştırma cihazı	49
4.4. Sıkıştırmada kullanılan pres (a) ve kullanılan kalıp (b)	50
4.5. Çapraz kırılma deney aparatı şematik gösterilişi	53

5.1.	%5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre yoğunluk değişimi	56
5.2.	%5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre yoğunluk değişimi	57
5.3.	Takviye oranına göre yoğunluk değişimi.....	58
5.4.	630°C'de 4 saat sinterlenmiş %5 (a), %10 (b) ve %15 (c) MgO takviyeli kompozit yüzeylerinin OM görüntüleri.	59
5.5.	630°C'de 4 saat sinterlenmiş %5MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.	60
5.6.	630°C'de 4 saat sinterlenmiş %10 MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.....	61
5.7.	630°C'de 4 saat sinterlenmiş %15 MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.....	62
5.8.	%15 MgO takviyeli kompozitin yüzeyinde yapılan EDS analizi	63
5.9.	%5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre sertlik değişimleri	65
5.10.	%5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre sertlik değişimleri	66
5.11.	630°C'de 4 saat sinterlemede MgO takviye ağırlık oranına göre sertlik değişimi	67
5.12.	%5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre ÇKM değişimleri.....	69
5.13.	%5 MgO takviye ağırlık oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre ÇKM değişimleri.....	70
5.14.	630°C'de 4 saat sinterlemede MgO takviye ağırlık oranına göre ÇKM değişimi.....	71
5.15.	%5 MgO takviyeli 630°C'de 2 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzeyi ve yapılan EDS analizi.....	72
5.16.	%5 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü	73
5.17.	%10 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü	73

5.18. %15 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü	74
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

Al	: Alüminyum elementi
MgO	: Magnezyum oksit, magnezya
D	: Parçacık çapı
D_V	: Hacim difüzyonu katsayısı
D_0	: Malzeme sabiti
Q	: Aktivasyon enerjisi
R	: Gaz sabiti
W_A	: Sıvıdan katıya geçişte yapılan iş
X	: Parçacıklar arası boyun genişliği
σ	: Boyun bölgesindeki gerilme
γ	: Yüzey enerjisi

KISALTMALAR DİZİNİ

ÇKM	: Çapraz Kırılma Mukavemeti
EDS	: Elektron Dispersiyon Spektrometresi
HM	: Ham Mukavemet
MA	: Mekanik Alaşımlama
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
OM	: Optik Mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Geçirmeli Elektron Mikroskobu
T/M	: Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile beraber makineleşme çağının başlaması ve bunun sonucunda insan gücü ile yapılan birçok işin makineler yardımıyla yapılması insanoğlunu yeni araştırma alanlarına yöneltmiştir [1]. Farklı özellikteki malzemelere olan ihtiyaç yeni malzemelerin ve üretim tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır [2]. Teknolojideki hızlı gelişmeler sonucunda araştırmalar sonuçlarını vermeye başlamış ve geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretilmiştir. Yeni geliştirilen bu malzemelerden birisi de kompozit malzemelerdir [1]. Kompozit malzeme, iki veya daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılır [3]. Geçtiğimiz yüzyılda kompozit malzemelerde önemli gelişmeler kaydedilmiş olup kullanım oranları da artarak devam etmektedir [2]. Kompozit malzemeler üretimlerinde kullanılan ana malzemelere göre; Metal Matrisli Kompozit (MMK), Seramik Matrisli Kompozit (SMK), Polimer Matrisli Kompozit (PMK) malzemeler olarak genel bir sınıflandırma yapılmaktadır. [1] MMK'ler döküm, Toz Metalurjisi (T/M), in-situ ve infiltrasyon gibi yöntemlerle üretilebilir [2]. MMK üretiminde kullanılan anayapı alaşımları çok çeşitli olabilmektedir. Fakat alüminyum (Al) ve alaşımları bu konuda ilk sırayı almaktadır. Bu alaşımların tercih edilmelerinin nedeni düşük yoğunluk ve düşük ergime sıcaklığına sahip olmaları ve birçok seramik takviye malzemesini kolay ıslatabilmelerinden dolayıdır [4]. MMK'lerde en çok kullanılan takviye elemanları; silisyum karbür (SiC), bor karbür (B₄C), titanyum karbür (TiC), tungsten karbür (WC), alümina (Al₂O₃), zirkonya (ZrC), magnezya (MgO), silisyum oksit, bor oksit, silisyum nitrür, alüminyum nitrür, bor nitrür, bor (B), karbon (C) ve karbon fiberlerdir. MMK üretiminde kullanılacak takviye malzemesinin seçilmesinde, takviye elemanının elde edilebilirliği, matris malzemesi ile uyumluluğu ve kazandıracığı özellikler dikkate alınmalıdır [5].

Bu çalışmada; Toz Metalurjisi (T/M) yöntemiyle MMK üretilmiş olup, alüminyum (Al) matris malzemesi olarak seçilmiş ve %5, %10 ve %15 ağırlık

oranlarında MgO takviye malzemesi olarak belirlenmiştir. Hazırlanan toz karışımları 500 MPa basınç altında tek yönlü presleme işlemine tabi tutulduktan sonra 570-600-630 °C sıcaklıklarda argon (Ar) gazı atmosferinde 1, 2 ve 4 saat süreyle sinterlenerek deney numuneleri elde edilmiştir. Numunelerin yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma mukavemetleri (ÇKM) ölçülerek MgO takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin etkileri araştırılmıştır. Gerekli yüzey işlemleri uygulandıktan sonra yüzeylerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınıp parametrelerin mikroyapıya etkileri incelenmiştir.

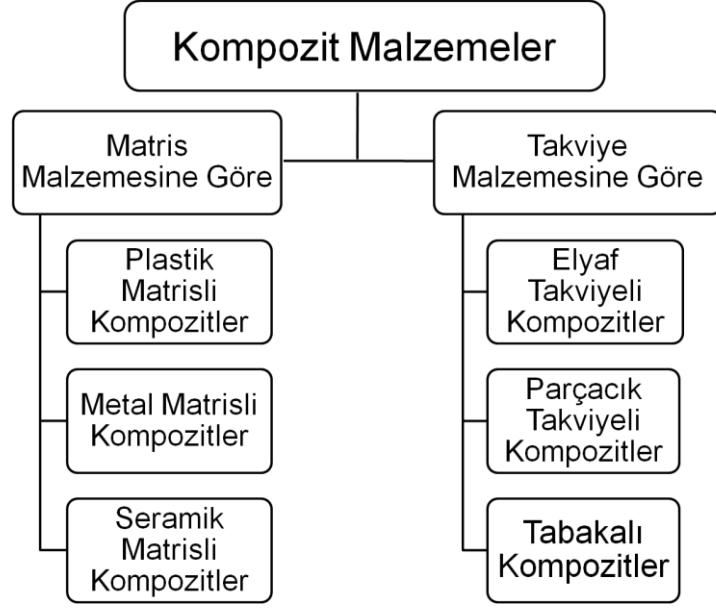
1.1. Kompozit Malzemeler ve Sınıflandırılması

Yeni ve daha üstün özelliklerdeki malzemelere olan ihtiyaç kompozit malzemelerin gelişimini sağlamıştır [6,7]. Kompozit malzemeler genellikle kendi başlarına elde edilemeyen, bileşenlerinin en üstün özelliklerinin bir malzemedeki toplanması sayesinde önemli bir avantaj sağlarlar. Kompozit malzemelerin avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenliği,
- Düşük ağırlık,
- Çekicilik ve estetik görünüm.

Bu avantajların sağlanabilmesi için matris ve takviye elemanının birbirine olan uyumu önemlidir. Aksi takdirde kuvvetli arayüzey bağı elde edilemez ve bunun sonucunda yüksek mekanik özellikler elde edilemez [3].

Kompozit malzemeleri Şekil 1.1'de gösterildiği gibi matris malzemesine göre ve takviye malzemesine göre olmak üzere iki grup halinde sınıflandırabiliriz.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

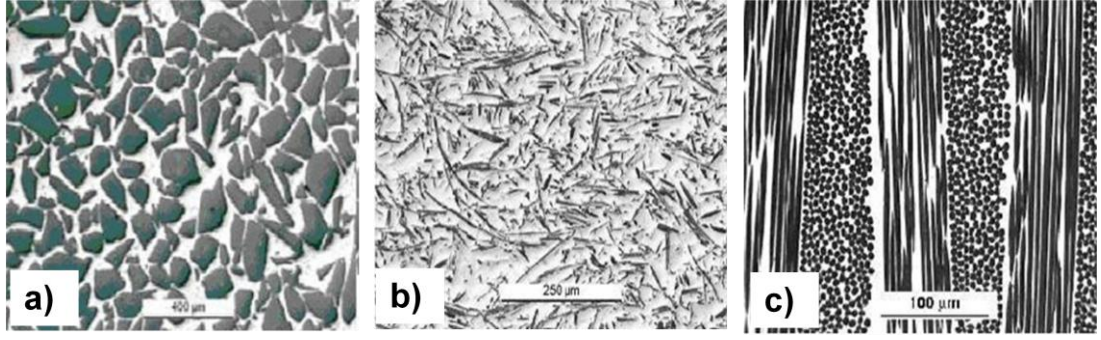
1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), kompozit malzemelerin bir grubunu temsil eder. Metal matrisli kompozitler tüm kompozitler gibi kimyasal ve fiziksel olarak farklı olan en az iki faz içerirler. Genellikle takviye fazları metalik matris içerisine dağıtılarak MMK elde edilir. MMK'ler yüksek elastik modül ve yüksek mukavemet gibi ideal mekanik özelliklere sahip olmaları ve farklı ortamlarda kullanılabilme özelliklerinden dolayı özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında, havacılık ve otomotiv sektöründe tercih edilmektedir [5]. Metal matrisli kompozitleri takviye elemanına göre üç gruba ayırabiliriz;

- Partikül takviyeli,
- Kısa fiber takviyeli,
- Sürekli fiber takviyeli.

Şekil 1.2'de takviye malzemesine göre sınıflandırılmış metal matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir [8].

Metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiB_2 , TiC, WC, W, C ve MgO'dir. Matris malzemesi olarak Al kullanımı yaygındır. MMK'ler döküm, T/M, infiltrasyon ve in-situ gibi yöntemlerle üretilebilmektedir.



Şekil 1.2. Partikül takviyeli (a), kısa fiber (b) ve sürekli fiber (c) takviyeli MMK'lerin SEM görüntüleri [8].

1.3. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler

Değişken özelliklerine bakılmaksızın Al matrisli kompozit malzemelerin düşük maliyet konusunda diğer metal matrisli kompozitlere göre önemli bir avantajı vardır. Al matrisli kompozitlerin yaygın kullanılma sebebi;

- Dayanım/özlük ağırlık oranının yüksek olması,
- Elektrik iletkenliği/ özlük ağırlık oranının yüksek olması,
- Atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahip bulunmasından kaynaklanmaktadır.

Al matrisli kompozitler endüstrinin pek çok kolunda binlerce farklı ürün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Uzay ve havacılık sanayi için vazgeçilmez olup otomotiv sanayisindeki kullanım oranı da giderek artmaktadır. Elektronik/haberleşme alanı ve spor malzemeleri üretiminde de yaygın kullanıma sahiptir.



Şekil 1.3. Al matrisli kompozitten üretilmiş bazı otomobil parçaları [5].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hiçyılmaz vd. (1999) yapmış oldukları çalışmalarında gaz atomize alüminyum (Al) tozlarına ağırlıkça %1, %5 ve %10 oranlarında SiC ve Al₂O₃ tozları katmışlardır. Daha sonra bu karışımlardan 600 MPa basınçta presleme ve azot (N₂) gazı atmosferinde 600 °C sıcaklıkta sinterleme işlemleri sonucunda numuneler üretmişlerdir. Elde edilen numunelerin mikroyapı incelemelerinde sert fazların homojen olarak dağılımlarının sağlandığını görmüşlerdir. Numunelere mekanik deneyler olarak çekme, darbe, sertlik ve aşınma deneylerini yapmışlardır. İncelenen her mekanik özelliğin matrisi oluşturan alüminyum tozlarının boyutu küçüldükçe iyileştiğini görmüşlerdir. Sert fazların ilavesi darbe enerjisini, çekme mukavemetini ve sünekliği azaltırken aşınma direncini artırdığını tespit etmişlerdir [4].

Çalın ve Çıtak (2007) yapmış oldukları çalışmalarında vakum infiltrasyon yöntemi ile MgO takviyeli Al matrisli kompozit üretiminde toz boyutunun infiltrasyon yüksekliğine etkisini araştırmışlardır. Farklı boyutlarda MgO tozlarını tüpler içerisine doldurmuşlar ve sıvı metali vakum infiltrasyon yöntemi ile blok parçalara infiltre etmişlerdir. Sıvı metal sıcaklığının infiltrasyonu kolaylaştırdığı, kırılma mukavemeti ve infiltrasyon yüksekliğinin takviye elemanının parçacık boyutu arttıkça yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır. Aynı zamanda takviye elemanı parçacık boyutunun artması ile gözeneklilik oranının düştüğünü tespit etmişlerdir [2].

Günay (2009) çalışmasında T/M yöntemi ile Alumix 231 (Al-Si alaşımı) tozu ile ağırlıkça %5, %10, %15 SiC takviyeli kompozit numuneler üretmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı ve bazı mekanik özelliklerini (sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma) incelemiştir. Mikroyapı incelemelerinde parçacık dağılımının homojen olduğu ancak kompozit numunelerde gözenekliliğin oluştuğunu ve takviye fazının artmasıyla gözenekliliğin arttığını tespit etmiştir. Bu sonuca paralel olarak en düşük yoğunluğun %15 SiC takviyeli numunede olduğunu tespit etmiştir. En yüksek sertlik değerini %15 SiC takviyeli numunede elde etmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımını matris

alaşımından üretilen numunede ölçerken, en düşük çapraz kırılma dayanımını %15 takviye hacim oranındaki numunede ölçmüştür [1].

Çalın (2010) çalışmasında vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al esaslı SiO₂ takviyeli kompozitte takviye hacim oranının (%30,%40,%50) termal iletkenliğe etkisini araştırmıştır. Termal iletkenliğin takviye hacim oranının düşmesi ile yükseldiği sonuna varmıştır. Yüksek takviye hacim oranlarında ısı direnci çok yüksek olan seramik parçacıklarından dolayı kompozitin ısı iletkenliğinin düşük olduğunu değerlendirmiştir [6].

Çalın ve Çıtak (2007) yapmış oldukları çalışmalarında vakum infiltrasyon yöntemi ile Al/MgO kompozit üretiminde matris içerisindeki Mg varlığının infiltrasyon yüksekliğine etkisini araştırmışlardır. Al matris içerisine Mg ilavesi sonucunda yüzey gerilmesinin düştüğü ve ıslatabilirlik özelliğinin arttığı bilinmektedir. Bu nedenle artan Mg oranı sonucunda infiltrasyon yüksekliğinin de arttığını gözlemlemişlerdir. İnfiltrasyonun kolay gerçekleşmesi sonucunda gözeneklilik oranının da düştüğünü tespit etmişlerdir. Yapılan XRD analizinde matris ile takviye elemanı ara yüzeyinde üçüncü bir faz (MgAl₂O₄) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Oluşan MgAl₂O₄ fazının infiltrasyonu kolaylaştırdığını değerlendirmişlerdir. Artan Mg ilavesi ile kompozitin kırılma mukavemetinin düştüğünü tespit etmişlerdir [7].

Pul (2010) çalışmasında matris malzemesi olarak ortalama 295µm boyutlarında %99,7 saflıkta Al tozu ve takviye elemanı olarak ortalama 149µm boyutlarında %5, %10, %15 takviye hacim oranında MgO tozu kullanarak MMK üretmiştir. Kompozit numunelere yaptığı çapraz kırılma deneyleri sonucunda takviye hacim oranı artmasıyla çapraz kırılma mukavemetinin düştüğünü tespit etmiştir. Bu durumun artan takviye hacim oranında MgO parçacıklar etrafında yoğunlaşan gözenek artışından kaynaklanabileceğini düşünmüştür. Numunelere yapılan sertlik deneylerinde takviye hacim oranının artmasıyla sertlik değerinin azaldığını tespit etmiştir. Bu durumun artan takviye hacim oranlarında gözenek miktarının da

artmasıyla gözenekli bölgelerdeki boşluklu yapının sertlik değerinin düşmesine sebep olduğu sonucuna varmıştır [8].

Kumdalı (2008) çalışmasında T/M yöntemi ile Al matrisli B₄C takviyeli kompozit malzeme üretmiştir. 800Mpa presleme basıncını ve atmosferik ortamda 590°C'de sinterleme sıcaklığını optimum üretim parametreleri olarak belirlemiştir. Presleme basıncının artmasıyla numunelerin sertlik ve yoğunluklarında artış olduğunu tespit etmiştir. Artan takviye oranıyla numunelerin sertlikleri de artmış fakat %25 takviye oranındaki sertlik değeri %20 oranındaki sertlik değerine göre düşük çıktığını tespit etmiştir. Bu sonuca sebep olarak da artan seramik faz içeriğinin bağlanma ve reaksiyon kabiliyetinin zayıflamasına sebep olduğu değerlendirmesini yapmıştır [9].

Aydın (1997) çalışmasında T/M yöntemi ile Al esaslı seramik (SiO₂, SiC, Al₂O₃) parçacık takviyeli kompozit malzemeler üretmiş ve mekanik özelliklerini incelenmiştir. Yaptığı izod darbe deneylerinde farklı toz tane boyutuna sahip Al tozlarından üretilen aynı tür sert faz içeren kompozit malzemelere bakıldığında matris malzemesinin toz tane boyutu küçüldükçe numunelerin darbe mukavemeti yükseldiğini tespit etmiştir. Seramik takviyeli numuneler içerisinde SiC tanecik destekli numunelerin darbe enerjisinin en yüksek olduğunu, daha sonra sırasıyla Al₂O₃ ve SiO₂ takviyeli numuneler olduğunu gözlemlemiştir. Yaptığı çekme mukavemeti deneylerinde kompozit malzemenin matris malzemesi olan alüminyumun toz tane boyutu küçüldükçe numunelerin çekme mukavemeti ve kopma uzamasının yükseldiğini, seramik takviye oranının artmasıyla bu değerlerin düştüğünü tespit etmiştir. Seramik takviyeli kompozit malzemeler içerisinde ise çekme mukavemeti en yüksek olan malzemeler sırasıyla SiC, Al₂O₃ ve SiO₂ tanecikli kompozitler olduğunu gözlemlemiştir. Yaptığı sertlik deneylerinde Al toz tane boyutu küçüldükçe ve seramik destekleyici oranı yükseldikçe kompozit numunelerin sertliğinin yükseldiğini tespit etmiştir. Seramik destekleyicili kompozit numuneler içerisinde sertliği en yüksek olan malzemeler sırasıyla SiC, Al₂O₃ ve SiO₂ parçacıklı kompozitler olduğunu gözlemlemiştir [10].

Özkan (2007) çalışmasında Al ve SiC tozları karışımlarını 450 dev/dak hızda bilyeli dikey değirmende 1,5-3,5 saat karıştırdıktan sonra 650MPa'da peresleyip 600°C'de 2 saat Ar atmosferinde sinterleyerek MMK üretmiştir. Sinterleme sonrasında yapılan yoğunluk ölçümünde deneysel yoğunluklarda doğrusal bir artış görmüş, takviye boyutu ve % ağırlık oranının artmasıyla yoğunlukların arttığını saptamıştır. SiC parçacıklarının % ağırlık oranının artması ve tane boyutunun küçülmesi sonucu sıkıştırılabilirliğin tam anlamı ile sağlanamamasından dolayı porozite oranlarının arttığını ve bu sonucun düşük presleme basıncından kaynaklandığını değerlendirmiştir. Takviye elemanı oranı ile parçacık boyutlarının büyümesi ve mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla sertlik değerlerinin arttığını tespit etmiştir [11].

Çalın ve Çıtak (2006) çalışmalarında titreşimli toz presleme aparatı dizayn etmişler ve bu aparat ile MgO tozlarının sıkıştırılabilirliğini araştırmışlardır. MgO tozlarının parçacık boyutlarına göre farklı oranlarda sıkıştırılabildiğini, optimum sıkıştırma süresinin 3 dakika olduğunu ve küçük boyutlu parçacıklarda daha yüksek sıkıştırma oranları elde edilebildiği sonuçlarına ulaşmışlardır [12].

Çalın ve Çıtak (2007) çalışmalarında vakum infiltrasyon yöntemi ile Al-MgO kompozitler üretmişler ve vakum değerinin infiltrasyon yüksekliğine etkisini araştırmışlardır. MgO tozunu takviye elemanı olarak Al-Mg alaşımını da matris elemanı olarak kullanmışlardır. Al ve MgO tozlarını bir saat süre ile karıştırıcıda karıştırmışlar ve tüplerin içerisine doldurmuşlardır. Sonrasında sıvı matris alaşımını farklı vakum ve sıcaklık değerlerinde tüplerin içerisine infiltrate etmişlerdir. İnfiltrasyon yüksekliğinin artan vakum değeri ile arttığını ve sıvı metal alaşımının artan sıcaklığının infiltrasyonu kolaylaştırdığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında gözeneklilik ve kırılma mukavemetini de incelemişler ve vakum değerinin artması ile gözenekliliğin düştüğünü, artan metal sıcaklığı ve vakum değeri ile kırılma mukavemetinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Gözenek miktarının yüksek olduğu durumlarda gözeneklerin çatlak etkisi yaptığını ve bunun sonucu olarak da numunelerin kırılma mukavemetlerinin düştüğünü değerlendirmişlerdir. Al-MgO sistemlerinde

ıslatabilirlik zayıf olduğu için kırılmanın genellikle matris ve takviye elemanı arayüzeyinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir [13].

Aydın (2005) çalışmasında Etial 171 alaşımını matris malzemesi olarak seçmiş ve hacimce %55 MgO takviye malzemesi kullanarak vakum infiltrasyon yöntemi ile kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada 250µm,180 µm, 125 µm MgO parçacıklar kullanmış ve parçacık boyutunun küçülmesi ile gözenek oranının arttığını tespit etmiştir. Bunun sebebinin küçülen parçacık boyutu ile artan arayüzey ve zorlaşan ıslatabilirlik kabiliyeti olduğunu değerlendirmiştir. Yaptığı sertlik deneylerinde MgO parçacık boyutlarının küçülmesi ile sertlik değerinin arttığını gözlemlemiştir. Mikroyapı incelemelerinde takviye elemanının bulunmadığı bölge olmadığını ve MgO parçacıklarının kompozit içerisinde homojen dağılımda olduğunu gözlemlemiştir [14].

Kılıç (2007) çalışmasında ağırlıkça %5, %10 ve %15 takviye oranlarında SiC parçacık takviyeli Al alaşımlı MMK'leri T/M yöntemi ile üretmiştir. Hazırladığı toz karışımlarını 800 MPa basınç altında tek yönlü bir kalıpta preslemiş ve 2 saat süreyle 650°C tüp fırında Ar gazı ortamında sinterleyerek kompozit numuneler elde etmiştir. Sinterleme sonrası yapılan yoğunluk ölçümlerinde seramik tane boyutu büyüdükçe yoğunluğun azaldığı ve seramik takviye oranı yükseldikçe de yoğunluğun arttığını tespit etmiştir. Yaptığı sertlik ölçümlerinde takviye oranlarının ve partikül boyutunun artmasıyla sertlik değerlerinin arttığını tespit etmiştir. Yaptığı aşınma deneylerinde kompozit malzeme içerisindeki seramiğin tane boyutu ve ağırlık oranı küçüldükçe aşınma miktarının arttığını ve kompozit oranı arttıkça aşınma miktarının azaldığını tespit etmiştir [15].

Yanıkçı (2006) çalışmasında 100 µm boyutlarında Al matris malzemesine %4 oranında 44 µm-100 µm boyut aralığında Cu tozu ilave etmiş ve takviye elemanı olarak 125 µm boyutlarında SiC tozunu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karışıma ilave etmiştir. Toz karışımlarını 23000 kg yük altında presledikten sonra 585°C sıcaklıkta Ar gazı ortamında sinterleyerek

12x12x52mm boyutlarında numuneler elde etmiştir. Numunelerin gerçek yoğunluklarını ölçmüş ve takviye oranının yükselmesi ile yoğunluğun arttığını gözlemlemiştir. Eğme testi sonuçlarında takviye oranının yükselmesi ile eğme dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. Yaptığı mikroyapı incelemelerinde %5 takviye oranında SiC parçacıklarının oldukça homojen dağıldığını ve küreselliklerini koruduklarını gözlemlemiştir. %20 takviye oranında SiC parçacıklarının küreselliklerini kaybettiklerini ve homojen dağılmadıklarını gözlemlemiş ve bu sonucunda mekanik özellikleri negatif yönde etkileyeceğini değerlendirmiştir [16].

Rahimian vd. (2009) çalışmalarında matris malzemesi olarak ortalama toz boyutları 30 µm olan %99,97 saflıkta Al ve takviye elmanı olarak toz boyutları 3, 12, 48 µm olan Al₂O₃ seçmişlerdir. Hazırladıkları ağırlıkça %10 Al₂O₃ içeren toz karışımları tek yönlü preste sıkıştırdıktan sonra 500, 550, 600°C sıcaklıklarda Ar atmosferinde 30-90 dakika arasında sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Sinterleme sonrası yaptıkları yoğunluk ölçümlerinde 600°C'de ve 12 µm takviye eleman boyutunda en yüksek yoğunluk değerine ulaşmışlardır. Alümina toz boyutunun 48 µm'a çıktığında 30 µm boyutlarındaki alüminyum ile daha az temas noktasına sahip olması sonucunda sinterlemenin zorlaştığını, porozitenin arttığını ve sonuç olarak yoğunluğun düştüğünü, alümina toz boyutunun 3 µm olduğunda yoğunluğun yine düşmesinin de büyük boyutlu tozların sıkıştırılabilirliğinin daha iyi olmasından kaynaklandığını değerlendirmişlerdir. Yaptıkları sertlik ve mukavemet ölçümlerinde Al₂O₃ toz boyutunun artmasıyla sertlik, akma mukavemeti ve basma mukavemeti değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Küçük parçacıklarda takviye elemanı ve matris arasında daha fazla arayüzeyin olmasının sertliği artırdığı ve büyük parçacıklarda daha yüksek porozite görüldüğünden sertliğin düştüğünü değerlendirmişlerdir. Artan sinterleme sıcaklığı ve süresi ile sertlik ve yoğunluğun arttığını tespit etmişlerdir. En yüksek basma mukavemeti ve uzama oranlarının (ε) 600°C'de 3 µm Al₂O₃ toz boyutunda elde etmişlerdir [17].

Rahimian vd. (2010) bir başka çalışmalarında matris malzemesi olarak ortalama toz boyutları 30 μm olan %99,97 saflıkta Al ve takviye elemanı olarak toz boyutları 3, 12, 48 μm olan Al_2O_3 seçmişlerdir. Hazırladıkları ağırlıkça %5, %10 ve %15 Al_2O_3 içeren toz karışımları tek yönlü preste sıkıştırdıktan sonra 550°C sıcaklıklarda Ar atmosferinde 45 dakika sinterleme işlemine tabi tutarak takviye elemanı parçacık boyutu ve miktarının mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Sert bir yapısı olan alüminanın sıkıştırılabilirliği düşük olduğu için kompozit içerisindeki alümina miktarı artmasıyla yoğunluğun düştüğünü değerlendirmişlerdir. Bu düşüğe bir diğer etkininde alümina parçacıklarının sinterleme mekanizmasını önleyici etkisinin olduğunu ve ergime derecesi 2054°C olan Al_2O_3 'ün saf Al ile bağ yapma eğiliminin düşük olması yani ıslatabilirliğin düşük olmasının neden olduğunu yorumlamışlardır. Artan takviye elemanı oranı ile sert parçacıklar arası mesafe düşmüş, dislokasyon hareketleri engellenmiş ve bunun sonucu olarak mukavemetin ve sertliğin arttığını tespit etmişlerdir. 30 μm boyutundaki Al parçacıkları arasına 3 ve 12 μm boyutlarındaki Al_2O_3 rahatça girip boşlukları doldurabildiğini, fakat 48 μm boyutundaki Al_2O_3 parçacıklar arasındaki boşluklara tam olarak yerleşip dolduramadığını ve sonuç olarak düşük % yoğunluk ve sertlik değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir [18].

Arık (2008) çalışmasında Al tozlarına %5, %10 ve %15 ağırlık oranlarında α - Si_3N_4 tozlarını karıştırmış ve ilk grup karışımları bilyeli değirmende karıştırmış ikinci grup tozları da atritörlü değirmende 5 saat süre ile mekanik alaşımla (MA) işlemine tabi tutmuştur. Elde ettiği karışımları 1000 MPa basınçta tek yönlü preste sıkıştırmış ve 620°C, 640°C, 660°C, 680°C sıcaklıklarda 2 saat süre ile sinterleyerek çapraz kırılma numuneleri elde etmiştir. Elde ettiği sonuçlarını incelediğinde MA işlemi uygulanmış numunelerde daha yüksek % yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti değerlerine ulaşıldığını tespit etmiştir. %10 takviye oranlı MA numunelerinde homojen dağılım sebebiyle en yüksek değerler elde edildiğini belirtmiştir. Artan sinterleme sıcaklığının % yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma değerlerini artırdığını gözlemlemiştir. Artan takviye oranı ile kompozitlerin yoğunluk ve çapraz kırılma mukavemetinin düştüğünü, sertliğin ise yükseldiğini saptamıştır [19].

Xu vd. (2002) çalışmalarında katı hal sinterlemede yoğunluk ve mukavemet değişimini incelemişlerdir. Sinterleme süresi ve sıcaklığının yükselmesi ile parçacıklar arası boyunlaşma eğiliminin artması ile parçacıklar arasında oluşan boyun genişliğinin (X) eşdeğer parçacık çapına (D) oranının da yükseldiğini belirtmişlerdir. Artan sıcaklıklarda sinterlenen deney numunelerinin çekme, eğme ve çapraz kırılma mukavemeti değerlerinin arttığını saptamışlardır. $(X/D)^2$ artması ile çapraz kırılma mukavemetinin arttığını belirtmişlerdir. Parçacıklar arası boyun gelişimi ve yoğunlaşmanın sinterlenmiş parçaların mukavemetleri belirleyen en etkili faktörler olduğunu belirtmişlerdir [20].

Simchi (2003) çalışmasında toz metal parçalarda yağlayıcı kullanmanın yoğunlaşma, sinterleme ve mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yaptığı deneylerde sıkıştırma basıncının artması ile parçacıklar arası plastik deformasyonun artmasına bağlı olarak yoğunluk artışının gerçekleştiğini saptamıştır. Toz karışımına yağlayıcı ilavesinin sıkıştırmanın ilk basamaklarında parçacıklar arası sürtünmeyi azaltarak yoğunluk artışı sağlarken artan basınç ile yağlayıcının gözenekleri doldurması ile yoğunluğun yağlanmamış toz karışımına göre daha düşük olduğunu belirtmiştir. Toz karışımında yağlayıcı kullanmanın parçacık kilitlemesini ve soğuk kaynak kabiliyetini düşürdüğünü belirtmiştir. Karışım içerisindeki yağlayıcının metal-metal temasını azaltarak sinterlemede negatif etki yapmakta ve bunun sonucu olarak çapraz kırılma mukavemetini düşürdüğünü saptamışlardır. Kalıp duvarı yağlanarak üretilen numunelerde parçacıklar arasında daha fazla soğuk kaynak oluşmuş ve sıkıştırma süresince oluşan metalik köprüler sinterleme esnasında daha kuvvetli hale gelerek daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmayı mümkün kıldığı yorumunu yapmıştır [21].

Topçu vd. (2009) çalışmalarında matris malzemesi olarak Al, takviye elemanı olarak %5-%20 ağırlık oranlarında B_4C seçmişlerdir. Toz karışımlarını atritörde alaşımladıktan sonra 250 MPa basınç altında soğuk izostatik presleme işlemine tabi tuttukten sonra 600°C, 625°C ve 650°C'de

sinterlemişlerdir. 400-450°C'ta sürünme dirençleri araştırılan numunelerin sinterleme sıcaklığının yoğunluk ve sertliğe olan etkisini de araştırmışlardır. Düşük takviye oranlarında teorik yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde etmişler sinterleme sıcaklığı yükseldikçe teorik yoğunluğa daha yakın yoğunluk değerleri elde etmişlerdir. B₄C parçacıkları kompozit içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını ve porozitenin B₄C parçacıklarının uçlarında yer aldığını saptamışlardır. Artan takviye oranı ve sinterleme sıcaklığının sertliğe pozitif etki yaptığını belirtmişler. Fakat 625°C'ta %15 B₄C'den sonra dispersiyon sertleşmesinden dolayı sertliğin daha fazla arttığını yorumlamışlardır [22].

3. TOZ METALURJİSİ

Boyutu 1 mm'den daha küçük olan parçacıklara toz denir [5,30]. Toz Metalurjisi (T/M) metal veya alaşım tozlarını üretmek ve bu tozlara metal olmayan toz ilave ederek veya etmeyerek yarı mamül veya mamül olarak iş parçası üretme işlemine denir [23]. Diğer bir deyişle de metal tozlarından metalin ergime sıcaklığını geçmeden iş parçası üretmeye denir [24]. T/M yöntemi ile toz halindeki metal ve seramik malzemeler birleştirilebilir [3]. Seramik parçacıklarının sıvı metal tarafından ıslatılmasındaki güçlük nedeniyle T/M ile kompozit üretimi ilk geliştirilen tekniklerden biridir. Bu teknikte genel olarak parçacık veya kısa fiber şeklindeki takviye elemanları ile metal tozları kullanılarak metal matrisli kompozit malzeme üretilir [25].

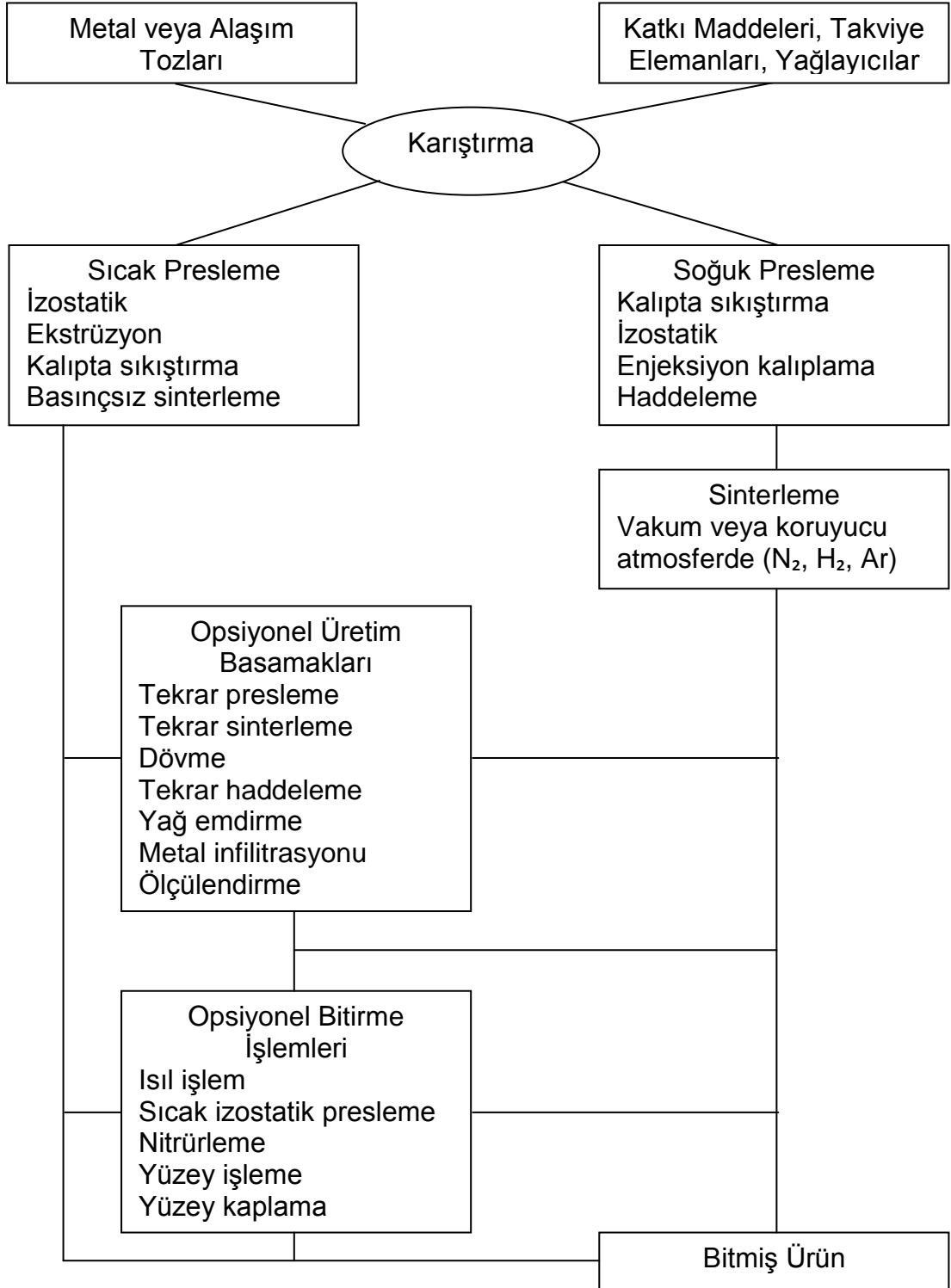
T/M bilinen en eski metal şekillendirme yöntemi olup ilk insanlar doğada saf halde buldukları metalleri ergitemediğinden çekiçlerle döverek birleştirmeyi gerçekleştirmişlerdir. En eski T/M örnekleri Mısır'da M.Ö.3000 yıllarında sünger demirden çeşitli el aletleri üretilmesi ve Hindistan'da M.S. 300 yıllarında sünger demirden şekillendirilen 6,5 ton ağırlığındaki Yeni Delhi Kolonudur. Platin gibi refrakter metaller sadece T/M yöntemi ile üretilebilirler [26]. Güney Amerika'da İnka'ların M.S.1200 yıllarında platini işledikleri bilinmektedir. 1829 yılında İngiltere'de Wollaston platini endüstriyel olarak üretmeyi başarmıştır [23]. Bir diğer önemli gelişme 1925 yılında bir Alman firması olan F Krupp tungsten karbür parçacıklarını metalik kobalt kullanarak bitleştirmeyi başarmış ve patentini almıştır. Bu sayede kesici takımlarda büyük bir gelişme kaydedilmiştir [24]. İkinci dünya savaşından sonra mekanik alaşımlama ve nikel/demir esaslı oksit dağılımlı süper alaşımlarda (ODS) gelişmeler sağlanmıştır. 1970'li yıllarda sıcak izostatik presleme ve T/M takım çeliklerinde, 1980'li yıllarda hızlı katılma ve toz enjeksiyon kalıplamada, 1990'lı yıllardan sonra sıcak presleme, metal matrisli kompozitlerde ve nano boyutlu tozlarda gelişmeler sağlanmıştır. Günlük hayatımızdaki otomobillerde, ev aletlerinde (televizyon, çamaşır makinesi vb.), klimalarda, ofis araçlarında ve hava/uzay araçlarında T/M parçaların sayısı arttıkça T/M'nin önemi artmakta ve gelişmeye devam etmektedir [23].

Sanayileşmiş birçok ülkede T/M parçaların %70-85'ini otomotiv endüstrisi alır. P/M parçalarının global ticaret hacmi 2005 yılında 20 milyar dolar, 2006 yılında 21 milyar dolar olarak gerçekleşmiş olup yıllık ortalama %4-5 artış ile 2011 yılında 26 milyar dolar, 2012 yılında 30 milyar dolar olması beklenmektedir [27]. Dünya çapında metal tozu üretiminin bir milyon tonu aştığı günümüzde sadece Avrupa'nın ticaret hacmi 6 milyar avroyu geçmiş bulunmaktadır [28].

T/M yöntemi ile dişliler, yakıt pompa elemanları, kamlar, amortisör pistonları, kilit mekanizmaları, elektrik kontakları, takım çelikleri, sert metaller, sermetler, kendinden yağlamalı yataklar, metal filtreler, balatalar, flamanlar, süper iletkenler [26,30] ve jet motorlarının vazgeçilmez parçası olan süper alaşımlar gibi birçok endüstri ürünü üretilmektedir [31].

3.1. T/M'de Temel Basamaklar

Şekil 3.1'de T/M parça üretim aşamalarında yapılan işlemler gösterilmektedir.



Şekil 3.1. T/M parça üretimi akış şeması [29,32].

3.2. T/M Avantajları

T/M yönteminin avantajları aşağıdaki gibidir [23,25,28,29,30,32].

- Ergitme sıcaklığı çok yüksek olan tungsten ve molibden gibi refrakter metallerin diğer yöntemlerle endüstriyel olarak üretilmemesi.
- Kendinden yağlamalı yataklar, sert metal kesici uçlar, metalik filtreler vb. parçaların diğer yöntemlerle üretilmemesi.
- Klasik yöntemlerle birbirine karıştırılamayan malzemelerden kompozit malzeme üretilir.
- %97'nin üzerinde hammadde kullanımı.
- Karmaşık şekilli parçalar daha pratik şekilde üretilir.
- Parçaların gözeneklilik oranı kontrol edilebilir.
- Kompozit malzemelerde takviye elemanının matris içinde homojen olarak dağılımı sağlanabilir.
- Yüzey kalitesi yüksek parçalar elde edilebilir.
- Süper alaşımlar ve yüksek hız çelikleri T/M ile homojen mikroyapıda ve geliştirilmiş özelliklerde üretilir.
- Çevreci bir yöntem olup yüksek miktarlarda üretimlerde ekonomiktir.
- Parça üretim hızı 200-300 parça/saat'ten 2000-3000 parça/saat'e çıkartılabilir.

3.3. T/M Dezavantajları

T/M yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibidir [23,30].

- İlk yatırım maliyeti (Pres, kalıp, sinterleme fırınları vb.) yüksektir.
- Büyük boyutlu parçalar, girintili köşeli parçalar veya dikey preslemede radyal delikli parçalar üretilemez.
- Metal tozları pahalıdır ve tozlar safsızlıklarından arındırılmalıdır.
- 10.000 parçanın altındaki üretimlerde diğer yöntemlerle rekabet edemez, optimum üretim miktarı 100.000 parça olmalıdır.
- Talaşlı imalata göre toleranslar kabadır ($\pm 0,025$ mm).
- Sadece 20-100g arası küçük parçalar için ekonomiktir.

3.4. Metal Tozları Üretimi

Metal tozu üretim tekniklerini mekanik yöntemler, elektroliz yöntemi, kimyasal yöntemler ve atomizasyon yöntemleri olmak üzere dört ana başlık altında toplayabiliriz.

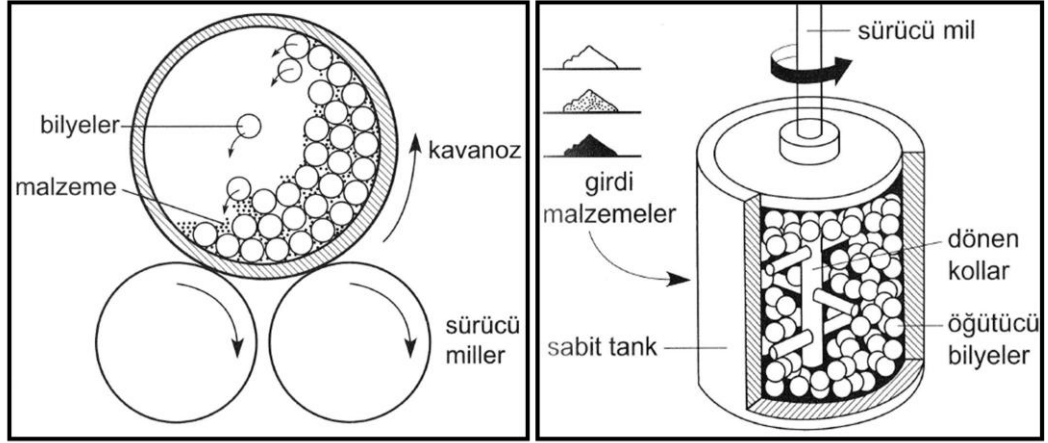
3.4.1. Mekanik Yöntemler

3.4.1.1. Talaş Kaldırma

Talaşlı imalat sonucu ortaya çıkan çok miktarda talaş hurdası metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu talaşlar temizlenerek boyut küçültmek için öğütülürler, ancak yöntem verimsizdir [33]. Genellikle bir toz üretim tekniği olarak kullanılmaz [30].

3.4.1.2. Öğütme

Öğütme hem toz üretim yöntemi olarak hem de diğer yöntemlerle üretilmiş tozlardaki topraklanmayı dağıtmak için kullanılabilir. Şekil 4.1.a'da basit bir silindirik değirmen görülmektedir. Silindirik kap döndükçe içerisindeki bilyeler toz malzemeye çarpar ve gevrek tozlar daha küçük parçalara ayrılır [33]. Yapılan araştırmalar en ideal silindirik kavanoz çapının 250 mm olduğunu göstermiştir. Bu çaptan daha büyük ve daha küçük çaplarda öğütme oranı düşer. Öğütme süresinin artması toz kalitesini artırır [23]. Çok yavaş dönme hızlarında bilyeler kavanozun çeperinden geri yuvarlanır, yüksek dönme hızlarında ise bilyeler kavanoz duvarında kavanozla birlikte dönerler. En uygun dönme hızı 60 d/dak olarak hesaplanmıştır. Silindirik değirmende bilye çapı toz çapının yaklaşık 30 katı olmalıdır, bilyeler değirmen hacminin yaklaşık yarısını doldurmalıdır ve öğütülecek toz değirmen hacminin yaklaşık %25'i kadar olmalıdır [33]. Şekil 3.2.b'de düşey silindirik değirmenin içindeki düşey mil ve üzerindeki kollardan oluşan atritör görülmektedir. Diğer yöntemlere göre daha verimli olan bu yöntemde kirlilik daha azdır ve bilye çapının küçülmesi öğütme zamanını azaltır [23].



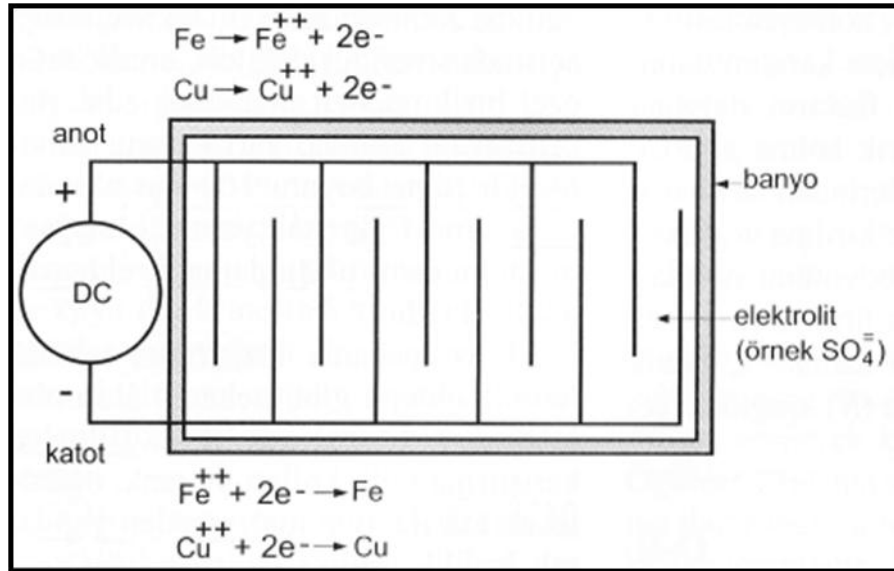
a) Silindirik değirmen

b) Atritör

Şekil 3.2. Öğütücü değirmen çeşitleri [33].

3.4.2. Elektroliz

Elektroliz yöntemi daha çok yüksek saflıkta demir ve bakır tozu üretimi için kullanılmasına rağmen çinko, nikel, gümüş vb. metallerin üretiminde de kullanılabilir. Demir ve bakır tozları üretiminde genellikle sülfat çözeltileri kullanılır [23]. Yöntem Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 3.3. Demir ve bakır için örnek tepkimeler ve elektroliz hücresi [33]

Çözelti içerisinde uygulanan gerilimin etkisi ile anottan kopan metal parçaları iyon haline geçerek zıt yüklü katotta birikmesi esasına dayanır [30].

Elektrolitik tozlar dentritik yapıda, düşük görünür yoğunluğa ve akış hızına sahiptir [23]. Yüksek elektrik maliyeti, tozların yıkanmasında kullanılan yüksek miktardaki su ve yüksek kurutma maliyetleri yöntemin maliyetini arttırmaktadır [24]. Bu yöntemde sadece metal tozları üretilebilir, alaşım tozları üretilemez [30,33].

3.4.3. Kimyasal Yöntemler

3.4.3.1. Doğrudan İndirgenme

Metal oksitlerin indirgeyicilerle indirgenmesi sonucunda metal tozları üretilmekte olup en eski metal tozu üretim yöntemidir [23]. Uzun yıllar boyunca demir tozu üretiminde kullanılan en yaygın yöntem olmuştur [24]. Demirin yanında bakır, nikel, kobalt, molibden, tantalyum, toryum ve titanyum tozlarının üretiminde de kullanılır [23]. Bu yöntemde tabiatta bulunan metal oksitler kırılarak veya öğütülerek küçük boyutlara getirildikten sonra refrakter malzemeden yapılmış tüpler içinde indirgeyici gaz ortamında belli bir sıcaklıkta fırından geçirilerek sünger metal tozları elde edilir [24].

Sünger demir tozlarının katı hal indirgenmesi metodu ile üretiminde Hoeganaes ve Pyron olmak üzere iki yöntem kullanılır. İsveç'te geliştirilen Hoeganaes yönteminde öğütülen saf magnetit (Fe_3O_4) tozları kok ve kireçtaşı ile karıştırılarak silisyum karbür (SiC) tüpler içerisinde $1200^{\circ}C$ 'de 24-40 saat ısıtılarak indirgenir. Sünger demir tozları manyatik ayrıştırma işleminden sonra $700-870^{\circ}C$ 'de bantlı fırında N_2+H_2 ortamında tekrar indirgenerek saflıkları artırılmış sünger demir tozları elde edilir. Pyron yönteminde magnetitler $980^{\circ}C$ 'de H_2 ortamında önce hematite (Fe_2O_3) dönüştürülürler [23]. İki yöntem arasındaki diğer önemli bir fark da Hoeganaes'de CO gazı ile indirgenme yapılması, Pyron'da H_2 gazı ile yapılmasıdır [30].

3.4.3.2. Karbonil Yöntemi

Metallerin yüksek sıcaklık ve basınçta CO ile tepkimeye sokularak metal karbonillerinin oluşturulması ve sonrasında metal karbonillerin yoğunlaştırılması sonucunda yüksek saflıkta (%99,5) metal tozlarının üretilmesi işlemdir [23]. Toz şekli küreseldir ve 0,2-20µm aralığındadır [33]. Toz enjeksiyon kalıplamada çok tercih edilir [24,30].

3.4.3.3. Çökeltme Yöntemi

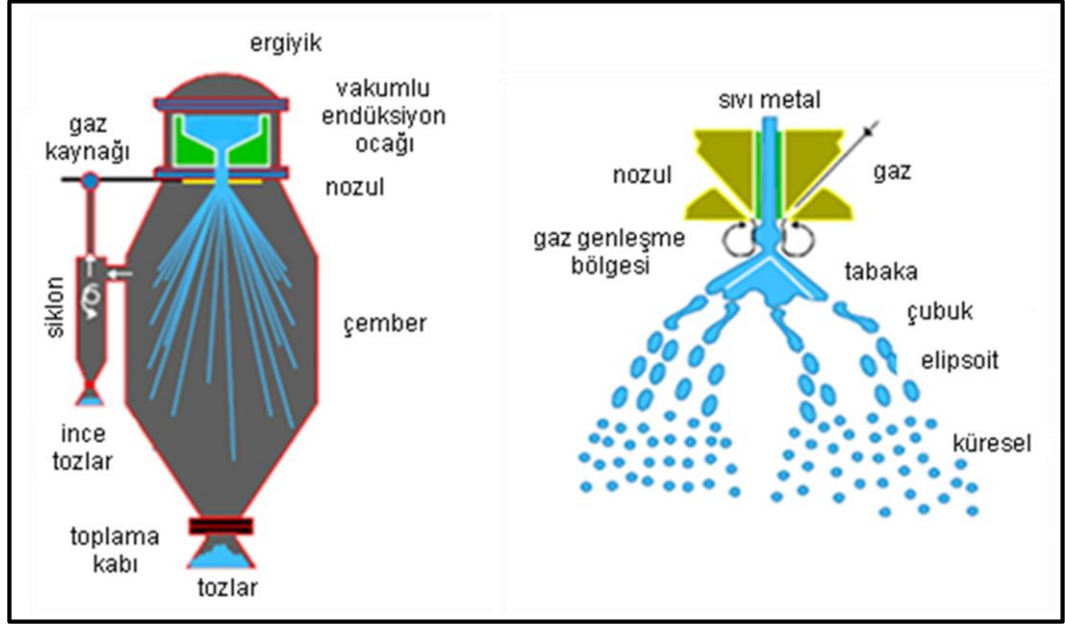
Nitrat, klorür veya sülfat gibi çözünmüş bileşikler kimyasal işleme tabi tutularak %99,8 saflıkta bakır, nikel, kobalt tozları üretilebilir. Örneğin; $CuSO_4$ 130°C sıcaklık ve 3MPa basınç altında H_2 ile tepkimeye sokulursa H_2SO_4 ve 10 nm-20 µm aralığında bakır tozları üretilebilir [33]. Toz şekli süngerimsidir [30].

3.4.4. Atomizasyon Yöntemi

Metal ve alaşım tozu üretiminde en geniş uygulama alanına sahip yöntem atomizasyondur. T/M'de kullanılan tozların çok büyük bir kısmı bu yöntemle üretilir [23]. Endüstride atomizasyon ile 400 kg/dak üretim hızlarına çıkılabilir. Gaz ve su atomizasyonu başta olmak üzere yağ atomizasyonu, santrüfuj atomizasyonu gibi pek çok çeşidi vardır [24].

3.4.4.1. Gaz Atomizasyonu

Hava, azot, argon ve helyumun sıvı demetini parçalayan gaz olarak kullanılmasına gaz atomizasyonu denir [33]. Şekil 3.4'de gaz atomizasyonu şematik olarak gösterilmiştir.

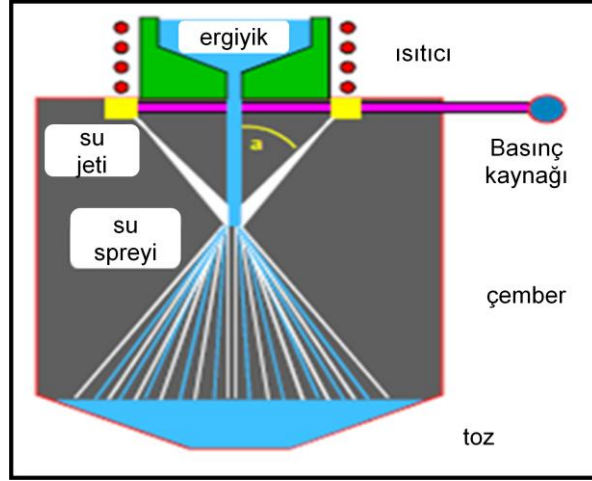


Şekil 3.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [34].

Nozullardan çıkarak hızlı bir şekilde genişleyen gaz dökülen sıvı metali parçalar ve önce ince bir tabakaya, sonra sırasıyla çubuksu, elipsoit ve küresel hale getirir. Şekil 3.4’de sıvı metalin küresel toza dönüşümü şematik olarak gösterilmektedir. Toz aşağıda toplanır ve gaz siklon üzerinden çıkarken küçük tozları siklona bırakır [34]. Gaz atomizasyonu yönteminde çok sayıda değişken vardır. Bunlar; alaşım kompozisyonu, sıvı metal akış debisi, sıvı metal sıcaklığı, sıvı metal viskozitesi, gaz basıncı, gaz sıcaklığı, gaz debisi, gaz hızı ve nozul geometrisidir. Bu yöntemin en önemli avantajları ürün homojenliği, kirliliğin olmayışı ve küresel şekilli toz üretilmesidir [33,34]. 5-18 MPa arası gaz basıncı ve 100kg/dakikaya kadar üretim hızına ulaşılabilir [33]. Atomizasyon kulelerinin genişlikleri 1-5 m, yükseklikleri 2-10 m arındadır [30].

3.4.4.2. Su Atomizasyonu

Su atomizasyon yöntemi prensip olarak gaz atomizasyonu gibidir. Şekil 3.5’de su jetlerinden çıkan basınçlı suyun sıvı metali parçalaması şematik olarak görülmektedir. Soğuma hızı gaz atomizasyonundan daha hızlıdır. Üretilen tozun şekli düzensiz, pürüzlü ve yüzeyinde oksidasyon mevcuttur [34].



Şekil 3.5. Su atomizasyonu [34].

Su atomizasyonunda ana değişken basınç olmakla beraber daha yüksek basınç ve su hızında daha küçük parçacık elde edilir. 150 MPa'a kadar olan basınçlar kullanılabilir ve 400 kg/dakikaya kadar üretim hızlarına çıkılabilir [33].

3.5. Toz Karakterizasyonu

3.5.1. Numune Alma

Numune alma metal tozu karakterizasyonunda yapılan ilk işlemdir. Analiz için alınan numune temsil edici olmalıdır. Birçok kimyasal analiz için az miktarlarda toz numunesi yeterli olurken elek analizi gibi yöntemlerde daha fazla numuneye ihtiyaç vardır [23]. Numune alma işlemi çoğu kez baston tip numune alıcılarla yapılmakta olup numune bölme işlemi ise döner bölücülerle yapılır [30]. Yapılan araştırmalar sonucunda en düşük numune alma hatalarının veya en yüksek temsil ediciliğin döner bölücülerle sağlandığı saptanmıştır [33].

3.5.2. Toz Boyut Ölçümü

Parçacık şekli küresel olarak varsayıldığında; yüzey alanı, izdüşüm alanı ve hacme göre eşdeğer küresel çaplar hesaplanabilir. Şekil 3.6'da yuvarlak

fakat düzensiz şekilli parçacığın izdüşüm görüntüsü, parçacık boyutunun olası ölçüsüyle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Yuvarlak fakat düzensiz parçacığın izdüşüm görüntüsü [33].

Bir parçacığın izdüşüm alanından (A) eşdeğer küresel izdüşüm alanı çapı (D_A) Eşitlik 3.2'den hesaplanabilir.

$$A = \frac{\pi D_A^2}{4} \quad (3.1)$$

$$D_A = \left(\frac{4A}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3.2)$$

Eğer parçacığın hacmi (V) ölçülürse buradan eşdeğer küresel hacim çapı (D_V) Eşitlik 3.3'den hesaplanabilir.

$$D_V = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \quad (3.3)$$

Eğer parçacığın dış yüzey alanı (S) ölçülürse eşdeğer küresel yüzey çapı (D_S) Eşitlik 3.4'den hesaplanabilir [33].

$$D_S = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3.4)$$

3.5.2.1. Mikroskopta Boyut Ölçümü

Parçacık boyutunu ölçmenin en genel yolu sayısallaştırılabilecek veya dijital ortama aktarılabilecek bir görüntü elde etmektir. Bu işlem de parçacık görüntülerinin üzerini çeşitli boyutlarda dairelerle örterek, her bir boyuttaki parçacık adedini saymakla yapılır. Günümüzde bu işlem otomatik görüntü analizi ile bir mikroskopta yapılabilir [33]. Optik mikroskop (OM) 100 nm - 100 µm aralığındaki parçacıklar için, taramalı elektron mikroskobu (SEM) 10 nm - 10 µm aralığındaki parçacıklar için, geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) 0,1nm -10 µm aralığındaki parçacıklar için kullanılır [23].

3.5.2.2. Eleme Yöntemi

Elek analizi olarak da bilinen eleme yöntemi boyut dağılımını belirlemede kullanılan en eski bir yöntemdir. Eşit aralıklı tellerden oluşan kare ızgara bir elek meydana getirir [33]. Elek boyutu bir inç (25,4mm) uzunlukta bulunan delik sayısı (mesh no) ile sınıflandırılır. Mesh no büyüdükçe teller arasındaki açıklık azalacağı için toz boyutu küçülür. 325 mesh altındaki tozlar (<45µm) elek altı tozlar olarak adlandırılır [30]. Çok ince tozların bu yöntemle sınıflandırılması olanaksızdır [24]. Çizelge 3.1'de elek serisinin açıklık boyutları görülmektedir.

Çizelge 3.1. Standart Elek Boyutları [33]

elek boyutu	100	120	140	170	200	230	270	325	400
açıklık (µm)	150	125	106	90	75	63	53	45	38

Bir elekten geçen toz (-) işareti ile, eleğin üzerinde kalan toz (+) işareti ile gösterilir. Örnek olarak -100/+200 eleklik toz gösteriminde tozlar 100 mesh nolu elekten geçmiş ancak 200 mesh nolu elekten geçmemiştir. Bu nedenle parçacıklar 150-75 µm boyut aralığındadır [33].

3.5.2.3. Sedimentasyon Yöntemi

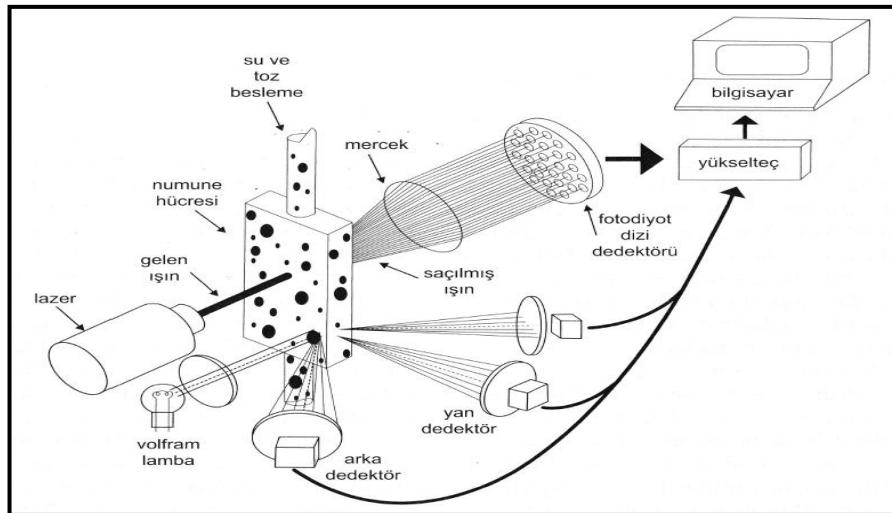
Sedimentasyon yöntemi ile küçük boyutlu parçacıklara (0,02-100 µm) boyut analizi uygulanabilir [33]. Bu yöntem ile küresel şekilli kabul edilen metal tozlarının sıvı içerisinde batma hızına göre tozlar sınıflandırılabilir. Parçacık çapının hesaplanmasında Stoke denkleminden faydalanılır. Parçacığın düşme hızı “V”, sıvının yoğunluğu “ρ_s”, parçacık yoğunluğu “ρ_p”, sıvının viskozitesi “η”, yer çekim ivmesi “g” ve parçacık çapı “D” alındığında Stoke denklemi Eşitlik 3.5’deki gibi yazılır. Stoke denkleminden parçacık çapı (D) Eşitlik 3.6’daki gibi çekilir [23].

$$V = \frac{(\rho_p - \rho_s)}{18\eta} D^2 g \quad (3.5)$$

$$D = \left[\frac{18\eta V}{(\rho_p - \rho_s)g} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

3.5.2.4. Işığın Kırınımı Yöntemi

Parçacık boyutu ve boyut dağılımını belirlemek için kullanılan hızlı ve kullanışlı bir yöntemdir. Işığın kırınımı yöntemi Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir.

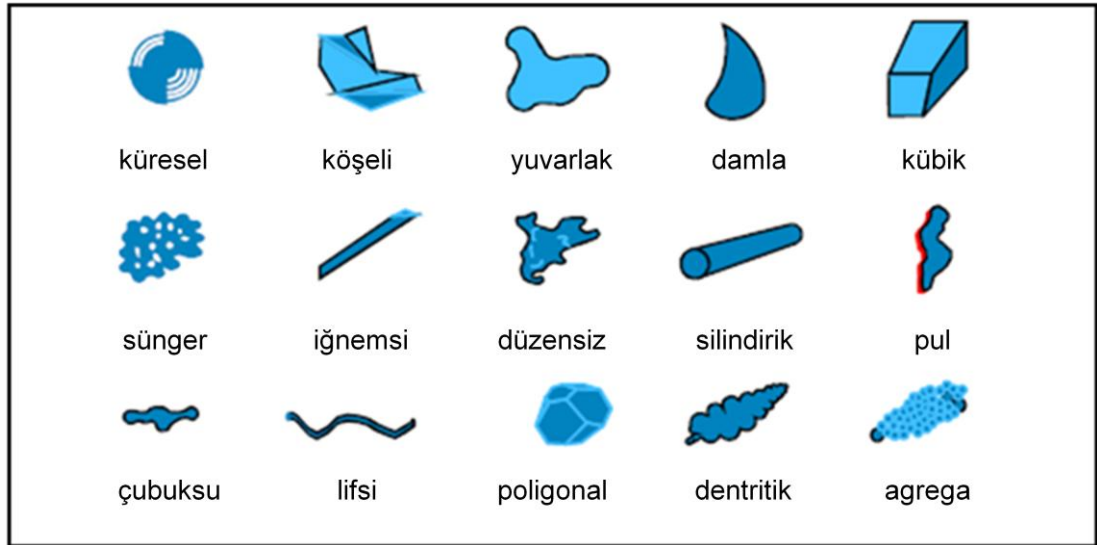


Şekil 3.7. Işığın kırınımı yöntemi [33].

Süspansiyon halindeki karışım bir pompa yardımı ile lazer yoluna yerleştirilmiş ölçüm hücresinden geçirilir. Lazer ışığının kırılma açısı parçacık çapının karesi ile ters orantılı olarak değişir. Tozlara çarparak kırılan ışığın şiddet ve açısı dedektör ile ölçülerek bilgisayar ortamında gerekli hesaplamalar otomatik olarak yapıldıktan sonra toz boyutu ve dağılımı elde edilir [30]. Bu yöntemle 0,05-5000 µm boyut aralığındaki parçacıklar ölçülebilir [31]. En uygun şartlar altında yapılan ölçümlerdeki hata payı %1-3 arasındadır. [23]

3.5.3. Toz Şekli

Toz şekli paketlenmeyi, akış hızını ve sıkıştırılabilirliği etkilediği [33] için önceliklere göre seçilmelidir. Şekil 3.8'de toz üretim işlemleri sonunda karşılaşılabilecek muhtemel toz şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Muhtemel toz şekilleri [34].

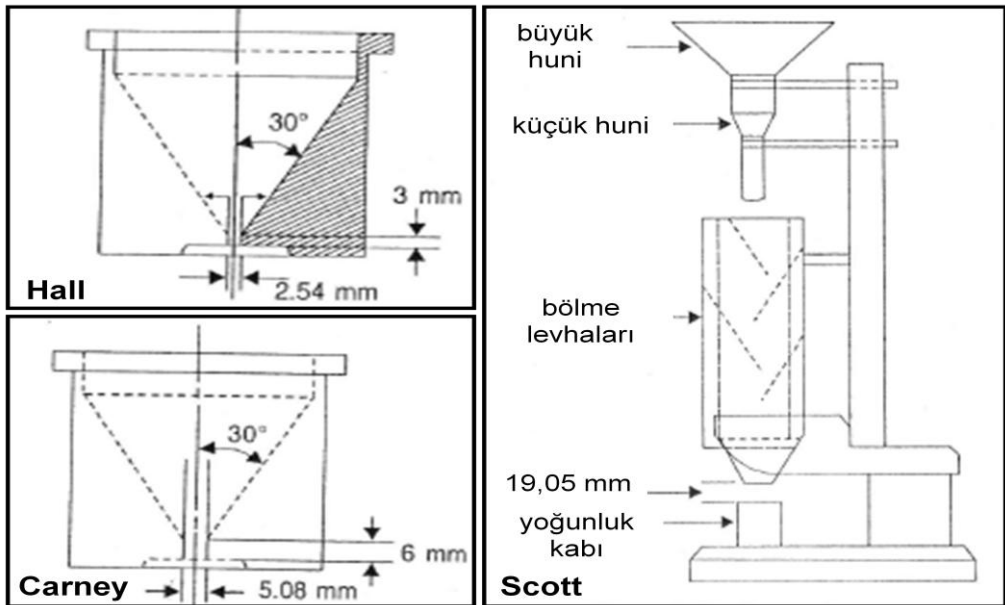
3.5.4. Yüzey Alanı

T/M parçaların üretiminde metal tozlarının davranışının belirlenmesinde ve üretilen parçanın mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde metal tozlarının özgül yüzey alanı, yoğunluk ve gözeneklilik özelliklerinden faydalanılır. Özgül yüzey alanı veya yüzey alanı birim ağırlıktaki tozların toplam yüzey alanı

olarak tanımlanır ve birim olarak m^2/kg veya cm^2/g kullanılır. Özgül yüzey alanı parçacıkların boyutu, şekli, yoğunluğu ve yüzey şekillerine göre değişir [23]. Parçacık boyutu büyüdükçe özgül yüzey alanı düşer. Küresel tozlar en küçük pul tozlar en büyük yüzey alanına sahiptir [30]. Örnek olarak bir gram atomize demir tozu $525 cm^2$ yüzeye sahipken bir gram indirgenmiş sünger demir tozu $5160 cm^2$ yüzeye sahip olabilir. Yüksek yüzey alanı sinterleme hızını artırır. Yüzey alanı BET (Brunauer Emmett ve Teller) metodu ile ölçülür [31].

3.5.5. Toz Akış Hızı ve Yoğunluk

Akış hızı, 50 g ağırlığındaki tozun Hall akış ölçerden aktığı zamandır. Birimi s/50g olarak alınır. Akış süresi kısa ise tozlar serbest akıyor, akış süresi uzun ise tozlar arasında akışı engelleyen yüksek sürtünme var demektir. Bu sürtünme yüksek yüzey alanı ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanır [33]. Hall akış ölçeri 2,5 mm çaplı deliği olan 60° açılı bir huni olup hem akış hızı hem de görünür yoğunluk hakkında bilgi verdiği için daha büyük tozlar için kullanılır. Akmayan küçük tozlarda ise Scott düzeneği kullanılır. Daha yavaş akan tozlar için 5 mm deliği olan Carney hunisi kullanılır. Şekil 3.9'da Hall ve Scott hunileri görülmektedir.



Şekil 3.9. Hall, Carney ve Scott hunileri [23].

Görünür yoğunluk, bir toz kütlesinin sıkıştırılmamış ve sarsılmamış halde bir hacim içerisindeki kütlesi olarak tanımlanır. Serbest halde akan tozlar ile Hall hunisi altındaki 25cm³'lük kap doldurulur ve kap içerisindeki tozların kütlesinin 25cm³'e bölünmesiyle g/cm³ biriminde görünür yoğunluk ölçülmüş olur. Toz boyutu küçüldükçe, daha az küresel ve daha düzensiz yapıdaki tozlarda görünür yoğunluk düşer [23,30]. Herhangi bir basınç uygulanmadan tozun titreştirilerek ulaşılan en yüksek yoğunluğu vurgu yoğunluğudur. İçyapıda hiç gözenegin olmadığı el kitaplarındaki yoğunluğa da teorik yoğunluk denir [33]. Sıkıştırma işleminden sonra yani sinterlemeden önceki ham parçanın yoğunluğuna ham yoğunluk denir.

3.5.6. Sıkıştırılabilirlik

Sıkıştırma, tozların bir kalıp içerisinde belirli bir basınç altında şekillendirilmek suretiyle yoğunlaştırılmasına denir. Sıkıştırma oranı, tozların ham yoğunluğunun görünür yoğunluğuna oranına denir. Görünür yoğunluğu yüksek olan tozlarda daha kısa mesafede daha yüksek basınçlara sıkıştırma yapılabilir. Sıkıştırılabilirliği etkileyen faktörler;

- Metal tozlarının sertliğinin artması sıkıştırma esnasında parçacık deformasyonunu azaltacağından sıkıştırılabilirliği negatif etkiler.
- Toz şeklinin düzensiz olması sıkıştırılabilirliği düşürür.
- İç gözeneklilik sıkıştırma esnasında parçacık içerisinde havanın hapsolmesine neden olur. Gözeneksiz tozların sıkıştırılabilirliği daha yüksektir.
- Geniş toz boyut dağılımı sıkıştırılabilirliği pozitif yönde etkiler.
- İndirgenmemiş oksitler gibi metalik olmayan takviye elemanları ilavesi yüksek sertlik ve düşük özgül ağırlıklarından dolayı sıkıştırılabilirliği düşürür.
- Katı yağlayıcı ilavesi sıkıştırılabilirliği artırır.
- Grafit ve sülfür gibi elementlerin ilavesi genellikle sıkıştırılabilirliği negatif yönde etkiler.

Sıkıştırılabilirliği yüksek olan tozlardan üretilen parçaların ham yoğunlukları da yüksektir [23].

3.5.7. Ham Mukavemet

Ham mukavemet, sıkıştırma sonrası sinterlenmemiş T/M parçaların sahip oldukları mukavemet değeridir. Ham T/M parçanın mukavemeti temel olarak toz yüzeylerindeki düzensizliklerin mekanik olarak kilitlemesi sonucu ortaya çıkar. Mukavemetin %90'ı mekanik kilitlemeden, %10'u da sıkıştırma esnasında oluşan plastik deformasyon sonucunda parçacıklar arasında meydana gelen soğuk kaynaktan oluşur [30]. Ham parçanın kalıptan çıkarılması esnasında çatlamasını, parçanın ham mukavemeti önler. Kalıp duvarında oluşan sürtünme ham mukavemetten fazla olursa parça yüzeyinde gözle görülür çatlaklar oluşur. Bu sürtünme kuvvetlerinin azaltılması için yağlayıcı kullanılmalıdır [33]. Yüksek sıkıştırma oranları ham mukavemeti artırırken, yüzey oksit filmleri ve yağlayıcılar ham mukavemeti düşürür . Artan özgül yüzey alanı ham mukavemeti yükseltirken, artan görünür yoğunluk ham mukavemeti düşürür [23,24,31].

3.6. Toz Sıkıştırma (Yoğunlaştırma) Yöntemleri

3.6.1. Yağlayıcılar ve Bağlayıcılar

Yağlama, yağlayıcının kalıp ve zimba yüzeyine sürülmesi veya doğrudan preslenecek toz karışımına ilave edilmesi şeklinde yapılır. Toz karışımı içerisine ağırlık olarak genelde %0,4-1,5 oranlarında katılmakta olup en yaygın olarak metalik stearat tozları kullanılır [33].

Sıkıştırma esnasında küresel olarak varsayılan tozların sıvılar gibi basıncı kalıbın her noktasına eşit iletmesi istenir ancak bu mümkün olmaz. Yağlayıcılar sayesinde basınç iletimi kolaylaşır, daha homojen yoğunluk dağılımı olur ancak yine de zimbadan uzaklaştıkça basınçta düşme olur buna paralel olarak yoğunlukta da düşme olur. Yağlayıcı ilavesi parçacıkların birbiri üzerinde kaymasını sağlarken, metal-metal temasına engel olmaktadır. Artan basınç daha fazla plastik deformasyon, daha fazla temas noktası demektir. Buda daha geniş bir alanda metalurjik bağ oluşmasını sağlar.

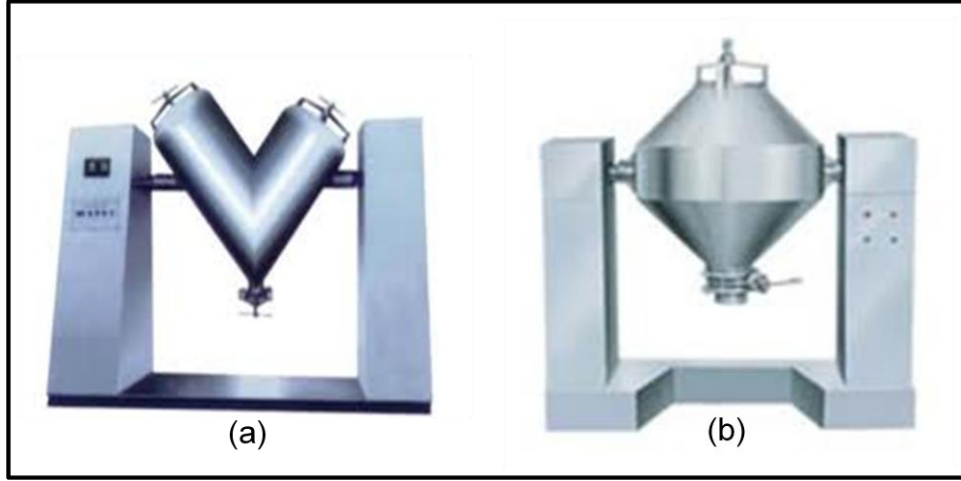
Yağlayıcının bir diğer faydası da kalıp ömrünü uzatmasıdır (Çelik kalıplar 200.000 adet çevrime kadar çalışabilirler) [24]. Ancak zimbalar yüzlerinde ve köşelerinde oluşan aşınmaların giderilmesi için belirli aralıklarla keskinleştirilmelidir [31].

Bağlayıcılar, etkili yapıştırıcılar olup ham parçanın dayanımını artırır ve sinterleme işlemine kadar parçanın dağılmasını veya zarar görmesini engeller. Ucuz olmaları ve ısı ergime ile kolayca uzaklaştırılabilmeleri nedeniyle genellikle basit mum benzeri polimerler kullanılır. Soğuk izostatik presleme, kalıpta sıkıştırma, enjeksiyon kalıplama, şerit döküm ve slip döküm gibi işlemlerde kullanılır [33].

3.6.2. Karıştırma ve Harmanlama

Karıştırma ve harmanlama işlemleri özel toz boyut dağılımının hazırlanması, sinterleme esnasında yeni alaşımların oluşturulması amacıyla tozların birleştirilmesi, sıkıştırma için yağlayıcıların eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı karışımının hazırlanması için gereklidir. Harmanlamanın ana amacı tozların taşınması esnasında oluşan titreşimlerden kaynaklı toz karışımında topaklanmanın engellenmesidir [33]. Karıştırma hem kuru hem ıslak durumda yapılabilir. Islak karıştırma alkol, aseton, benzen veya saf su ortamında daha homojen karışımlar için uygulanır. Çok çeşitli karıştırıcı tipleri kullanılmaktadır. Ancak genellikle Şekil 3.10'da gösterilen "V" şeklindeki çift boru tip karıştırıcı veya çift koni tip karıştırıcılar daha yaygındır.

Karıştırmayı etkileyen faktörler; karıştırıcının tipi, hacmi, yapıldığı malzeme, yüzey pürüzlülüğü, doluluk oranı, toz karışım oranları, karıştırma süresi, sıcaklığı, karıştırma tipidir. (ıslak-kuru) Toz karakterizasyonu karıştırma işlemini önemli ölçüde etkiler. Bunlar; tozların özgül ağırlığı, boyutu, şekli, yapısı ve yüzey şeklidir. Toz karışımının görünür yoğunluğu ve akış hızı karıştırma süresini ve derecesini etkiler. Optimum süre istenen karıştırma derecesine göre deneysel olarak belirlenebilir [23].

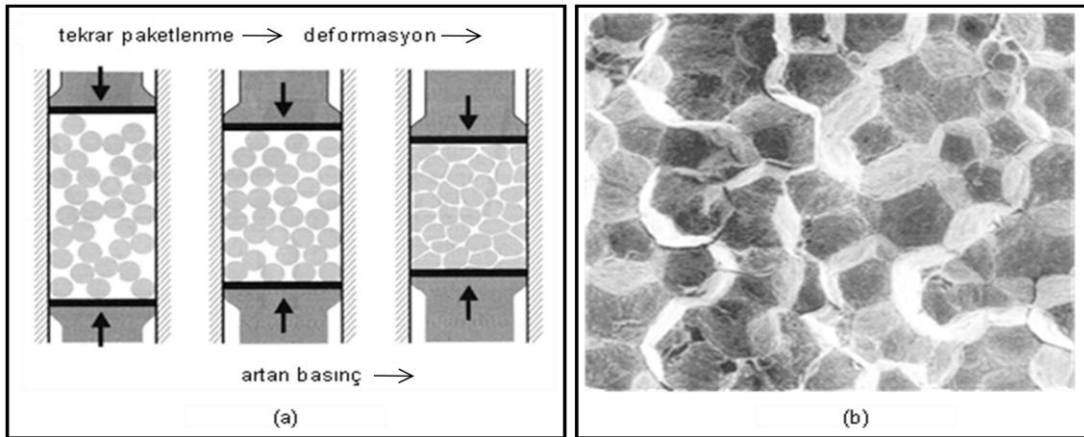


Şekil 3.10. Çift boru tip karıştırıcı (a), çift koni tip karıştırıcı (b) [35].

Karıştırma işlemi sonunda homojen bir toz karışımı istenir. Karışım elemanlarının belirli noktalarda toplanması veya tozların belirli bölgelerde tabakalaşması istenmez. Bu homojenlik belirli noktalardan alınan yoğunluk, viskozite, ısı kapasitesi elektrik iletkenliği ve renk testleri ile belirlenir [33].

3.6.3. Sıkıştırmada Parçacık Deformasyonu

Toz karışımlarına basınç uygulandığında önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak ve daha sonra artan basınçla parçacıklar şekil değiştirerek yoğunlaşırlar. Şekil 3.11'de toz sıkıştırma kademeleri ve küresel tozların sıkıştırma sonrası düzleşmiş şekilleri gösterilmektedir.



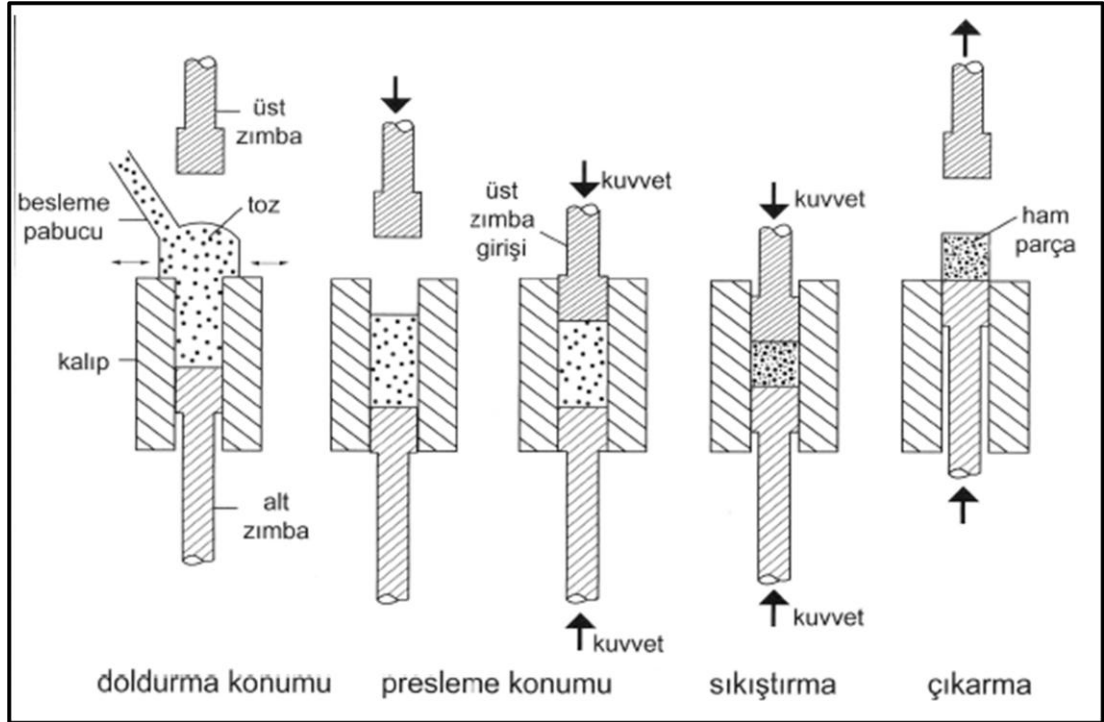
Şekil 3.11. Toz sıkıştırma kademeleri (a) ve küresel parçacıkların sıkıştırma sonrası SEM fotoğrafı (b) [33].

Yoğunlaşma işleminin ilk aşaması düşük basınçlarda tozlar yeniden dizilirler ve bu sayede görünür yoğunlukları %5-10 arasında artışa uğrar. İkinci aşamada tozlarda elastik ve plastik deformasyon meydana gelir. Artan plastik deformasyon ile gözeneklilik % 10'un çoğu kez altına düşer ve tozlar arasında parçanın ham mukavemetine katkı sağlayan soğuk kaynak meydana gelir. Son aşamada gevrek tozlarda kırılma olur, sünek tozlarda deformasyon sertleşmesi sonucunda gevrekleştikleri için kırılarak daha küçük parçacık haline gelirler [30].

Tozların sertliği sıkıştırma için önemli bir parametredir. Çok sert ve çok yumuşak tozlar daha düşük basınçlarda sıkıştırılır. Sert karbür, oksit, borür ve nitrür tozlar sıkıştırma esnasında şekil değiştirmedikleri için ham mukavemet polimer bağlayıcılarla sağlanır.

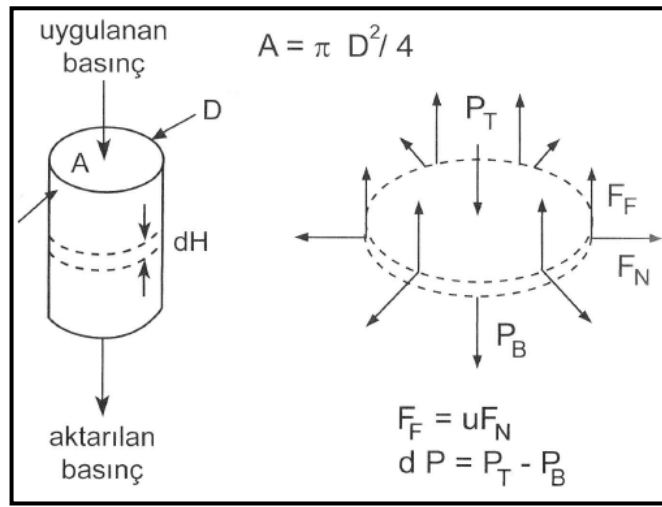
3.6.4. Kalıpta Sıkıştırma Teknolojisi

Toz parçacıklarının ısıtılmadan yoğunlaştırılması sıkıştırma olarak tanımlanır. Şekil 3.12'de kalıpta sıkıştırma çevrimi görülmektedir.



Şekil 3.12. Kalıpta sıkıştırma çevrimi [33].

Sıkıştırmanın ana amacı toz metal parçaları yoğunlaştırıp istenilen şekli vermenin yanı sıra kalıptan çıkabilecek ve sinterleme esnasına kadar kırılmasını veya hasar görmesini engelleyebilecek ham mukavemete sahip olmalarını sağlamaktır [23]. Besleme pabucu vasıtasıyla kalıp boşluğuna doldurulan toz veya toz karışımı üst zımbanın da kalıba girmesi ve alt ve üst zımbanın merkeze doğru ilerlemesi ile sıkıştırılır. Sonrasında üst zımbanın geri çekilmesi ve alt zımbanın parçayı çıkartması ile çevrim tamamlanır [33]. Şekil 3.13'de D çapında H yüksekliğinde silindirik bir parçanın kalıpta sıkıştırılması esnasındaki kuvvetler dengesi gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Kalıpta sıkırtmada kuvvetler dengesi [33].

Uygulanan basınç P_T ise kesitin altındaki basınç da sürtünme kayıplarından dolayı biraz daha düşük bir değer olan P_B halini alır. Burada F_N normal kuvveti, F_F kalıp duvarı sürtünme kuvvetini, u toz karışımı ile kalıp duvarı arasındaki sürtünme katsayısını, z orantı faktörünü A ise kesit alanını ifade etmektedir.

$$F_N = \pi z P_T D dH \quad (3.7)$$

Sitemdeki kuvvetler eşitlenip sıkıştırılan kütlenin boyuna göre integralinin alınmasıyla zımbanın ucundan herhangi bir x mesafesindeki basıncı ($P_{(x)}$) veren Eşitlik 3.8 çıkartılır. Burada P zımbaya uygulanan basınçtır [30,33,36].

$$P_{(x)} = P e^{-\left(\frac{4uzx}{D}\right)} \quad (3.8)$$

Oda sıcaklığında yapılan sıkıştırma işlemleri çoğunlukla 100-700 MPa basınçlarda yapılır. Örnek olarak alüminyum tozlar 70-275 MPa, demir tozları ise 350-800 MPa basınçlar arasında sıkıştırılır. Elde edilen ham yoğunluk ise genellikle toz karışımının teorik yoğunluğunun %60-90'ı arasındadır. Ham yoğunluk değerine görünür yoğunluk, sıkıştırma basıncı, parçacık şekli, boyutu gibi parametreler etki eder. Düzensiz şekilli parçacıklar daha iyi mekanik kilitleme gerçekleştirdiklerinden yüksek ham mukavemete sahiptirler [23].

T/M parçalar dizayn edilirken oluşabilecek üretim hatalarını önceden engellemek için bazı noktalara dikkat edilmelidir. Parça üzerindeki kanallar ve delikler presleme yönüne paralel olmalıdır. Çok ince bölümler muhtemel hata kaynağıdır. Çok ince duvar kalınlıklarından kaçınılmalıdır. 0,075 mm'den daha ince kalınlıklar tavsiye edilmez. Ani kesit değişiklikleri ve keskin köşelerden kaçınılmalıdır. Bu bölgeler yuvarlatılmalıdır. Devam eden üretim esnasında kirlenerek bozulan kalıp yüzeyleri çıkan parçalarında yüzeyinin bozuk olmasına sebep olur. [23,24]

T/M parçalar kalıptan çıkartılırken oluşan çıkartma gerilmesi parçanın ham mukavemetini geçtiği zaman parça ile kalıp duvarı arasındaki sürtünmeden dolayı parçada çatlaklar oluşur. Çatlamanın diğer bir sebebi de parçanın kalıptan çıktıktan sonra genişlemesi yani geri yaylanmadır. Zorlanmış alt kısım ile rahatlamış üst kısım arasında oluşan gerilme farklılıkları çatlama sebebi olur. Bu tür bir çatlak parçanın diğer yüzeyine çıkarma işlemi için uygulanan kuvvetten daha küçük bir kuvvet uygulayarak önleyebiliriz. Yeterli homojen yoğunluk sağlanamaz ise parçada yine çatlaklar oluşur [31,33]. Sıkıştırma işlemi hızlı yapıldığı takdirde kalıptan dışarı çıkamayıp hapsolan hava sıkıştırma yönüne dik çatlaklar oluşmasına sebebiyet verebilir ve aynı zamanda toz parçacıkları arasındaki mekanik kilitlemeyi engellediği için ham mukavemeti de düşürür [23].

3.6.5. Sıkıştırma Teknikleri

3.6.5.1. Presleme

T/M parçaların %80'den fazlası presleme yöntemiyle üretilir [30]. Genel olarak aşağıda sıralanan üç tipi mevcuttur;

- Sadece üst zımbanın hareketli olduğu tek hareketli presleme,
- Alt ve üst zımbanın her ikisinin de hareketli olduğu çift hareketli presleme,
- Hareketli üst zımbanın yanı sıra yaylar üzerine oturtulmuş kalıbında kısmen hareket ettiği yüzer kalıp tipi preslemedir [23,24,33].

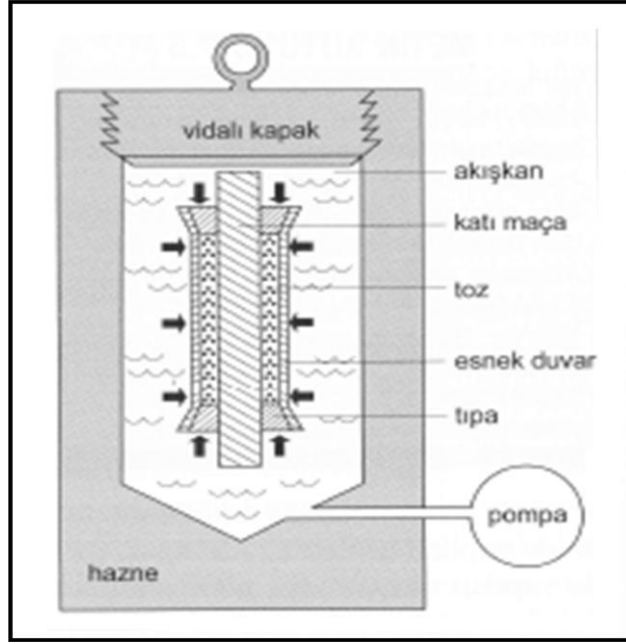
Preslemede zimba yüzeyinden uzaklaştıkça aktarılan basınç azalır buna paralel olarak yoğunluk da zimba yüzeyinden uzak noktalarda yakın noktalara oranla kısmen düşüktür [24,30,33]. parça yüksekliğinin (H) parça çapına (D) oranının yani narinlik oranının 0,5'den küçük ($H/D < 0,5$) olduğu durumlarda çift hareketli zimba kullanılmalıdır, aksi takdirde ideal bir sonuç alınamaz [30].

Metal tozları basınç altında köşelerde veya kademelerde iyi bir akış göstermez ve sonuç olarak da hedeflenen homojen yoğunluk dağılımı elde edilemez. Bu sorunun üstesinden gelmek için karmaşık geometriye veya kademeli parçalarda alt zımbanın parçalı yapılması önerilir [31].

3.6.5.2. İzostatik Presleme (HIP, CIP)

İzostatik preslemenin iki çeşidi vardır. Bunlar Soğuk İzostatik Presleme (CIP) ve Sıcak İzostatik Preslemedir (HIP). CIP yönteminde tozlar elastik bir kapsül içerisine konur ve kapsülün ağzı kapatılır. Daha sonra kapsül içerisinde sıvı olan bir basınç hücreğine konulur. Sıvıya basınç uygulanmasıyla suretiyle tozlar sıkıştırılmış olur. 800 MPa basınca çıkılabilmemesine rağmen genellikle 100-400 MPa arası basınçlar kullanılır. Bu yöntemde kalıp duvarı sürtünmesi yoktur, yağlayıcı gerektirmez ve teorik yoğunluğa çok yakın yoğunluklar elde

edilebilir. CIP ile karmaşık şekilli ve diğer yöntemler ile üretilmeyen büyük boyutlu parçalar üretilebilir. Şekil 3.14'de CIP işlemi şematik olarak gösterilmektedir. Sinterleme işleminden sonra %95-97 yoğunluk değerlerine ulaşılabilir. Yüksek ham mukavemet sağlaması da avantajları arasındadır [23,24,29].



Şekil 3.14. Soğuk İzostatik Sıkıştırma [33].

HIP yönteminde CIP yönteminden farkı yoğunlaşma ile sinterlemenin birlikte gerçekleşmesi ve ısı transferi ile basınç için inert gaz (genellikle argon) kullanılmasıdır [24,30]. Bu yöntemde 40-300 MPa arası basınç altında 500-2200°C sıcaklık değerine kadar çıkılabilmesine rağmen 1000-1500°C arası sıcaklıkların kullanımı daha yaygındır [23]. %90'ın üzerinde yoğunluk değerlerine ulaşılabilir. T/M parçaların dışında döküm yöntemi ile üretilmiş parçalara da tam yoğunluğa ulaşmak için uygulanır ve bu sayede döküm parçalarda daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiş olur [24].

3.6.5.3. Haddeleme

Toz veya toz karışımının silindirler arasına gönderilerek yoğunlaşması sonucu kırılğan yapıda bir şerit üretilmesi işlemidir. Ham mukavemeti

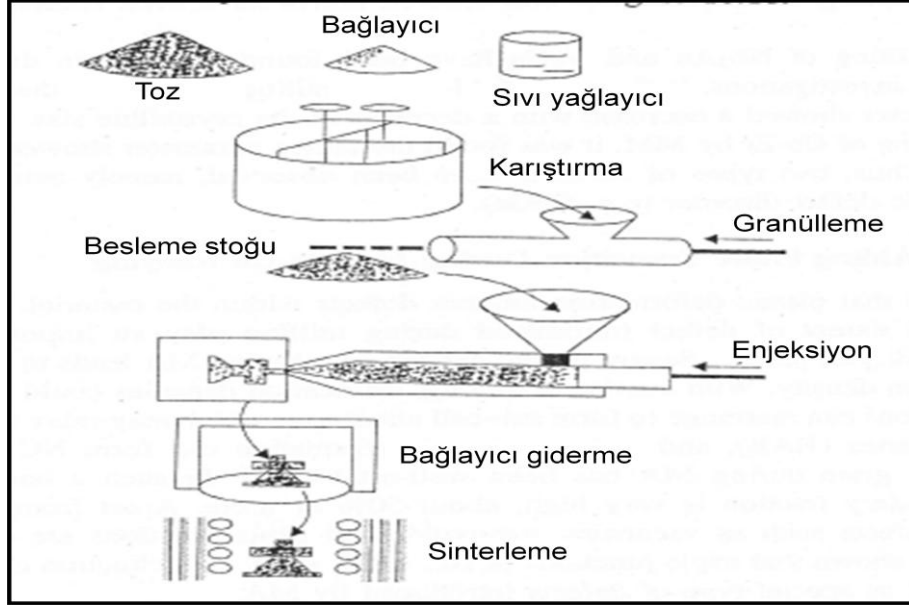
artırmak için bağlayıcı kullanılır. Silindir kenarlarında meydana gelen toz kaçağı en büyük problemidir [23]. Sandviç (katmanlı) T/M şerit üretimi dışında pek yaygın olmayan bir yöntemdir [30].

3.6.5.4. Ekstrüzyon

Bu yöntem çubuklar, tüpler, bal petekleri ve matkap uçları gibi uzun, ince şekilli malzemelerin üretiminde kullanılır. Toz-bağlayıcı karışımının bulunduğu hazne bir piston vasıtasıyla sıkıştırılır. Şekil verme kalıbı bu haznenin çıkışıdadır. Ürünün şekli bu kalıba bağlıdır. Basit durumlarda dairesel bir deliktir, ancak birçok durumda üretilecek parçada merkezi delikler, kayar kama yerleri veya diğer istenen geometrilerin bulunması gerekir. Bal petekleri gibi şekillerin elde edilmesinde kalıp merkezinde maça oluşturmak için ızgaralar kullanılır. Bu yöntem ile kapasitörler, mikro-elektronik altlıklar, gözenekli tüpler, kaynak çubukları ve otomobil eksoz katalitik dönüştürücüleri gibi parçalar üretilir [33].

3.6.5.5. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK)

Toz ve bağlayıcı besleme stoğunu oluşturmak için karıştırılır ve bir kalıp içerisinde basınç altında şekillendirilir. Sonrasında genellikle 150-200°C sıcaklıkta ham parça içerisindeki bağlayıcının giderilmesi için ön sinterleme yapılır. Son olarak iş parçasının sinterlenmesi ile yüksek yoğunlukta ürün elde edilir. Teorik yoğunluğun %95'inin üzerine bile çıkılabilir. Ham parça ile sinterlenmiş parça arasında boyutsal olarak %20-25'e varan çekme oluşabilir. Bu çekme payı kalıp tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. TEK yönteminde kullanılan tozların küresel veya küresele yakın ve toz boyutunun 20 µm'den küçük olması istenir. Ancak uygulamada 10 µm'den küçük toz boyutu kullanılır. Bu yöntem özellikle küçük boyutlu ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılır. TEK ürünü parçalar çoğunlukla 100 g ağırlığını geçmez ve ekonomik olması için 100.000 adet civarı üretim yapılmalıdır [23,24,29,30,33]. Şekil 3.15'de TEK işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.15. TEK işlem basamakları [23].

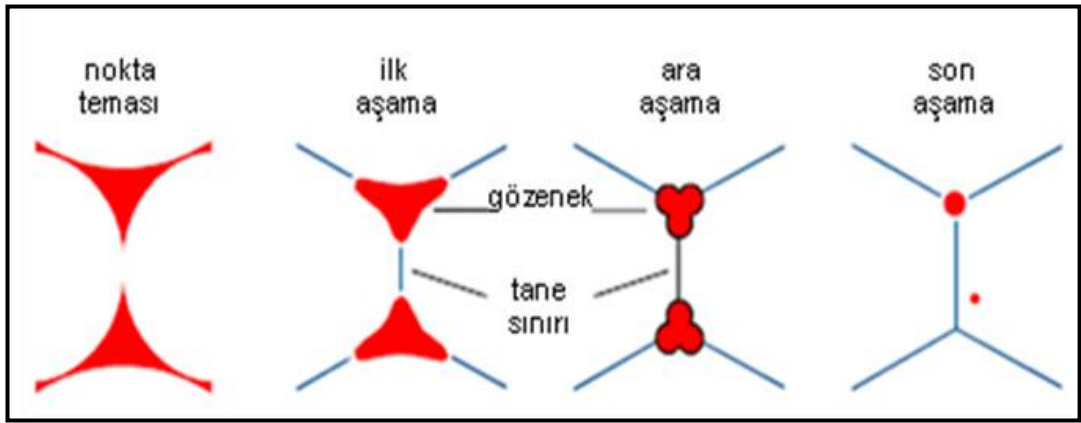
3.7. Sinterleme

Sıkıştırılmış bir toz karışımının veya sadece bir tozun ana elementinin ergime sıcaklığının altında ısı işleme tabi tutularak parçacıklar arasında kaynaklaşma olmak suretiyle mukavemetinin artırılması için yapılan işleme sinterleme adı verilir. Sinterleme işlemi metal veya alaşımların ergime derecelerinin genellikle 0,6-0,9 katı aralığında [29] ve argon veya hidrojen gibi koruyucu atmosfer ortamında yapılır. Sinterleme esnasında farklı parçacıklar arasında metalurjik bağ oluşur, mikroyapı gelişir, gözeneklerin azalması sonucunda yoğunluk yükselir [23], ancak bazı durumlarda parça boyutlarındaki genişlemeden dolayı yoğunluk düşebilir [23,24,29,31]. Sinterleme esnasında yüzeyler arasında oluşan metalurjik bağ atomik difüzyon sayesinde oluşur. Teorinin açıklanabilmesi için parçacıklar küresel şekilli varsayılır. Başlangıçta noktasal temas halinde olan parçacıklar arasında yükselen ısının etkisi ile boyun oluşmaya başlar ve bu boyunlaşma artan ısıyla birlikte gelişerek devam eder. Sonuç olarak parçacıklar arasındaki keskin köşeler yuvarlak hale gelmiş ve aradaki boşluklar küresel hal almıştır. Bu reaksiyonda amaç yüzey alanının indirgenmesidir [24]. Sinterlemede itici güç parçacıkların yüzey alanlarını ve yüzey gerilmelerini düşürme isteğidir. İşlem sonunda metal atomları daha düşük enerji durumuna geçmiş olurlar [23,31,33].

3.7.1. Sinterleme Çeşitleri

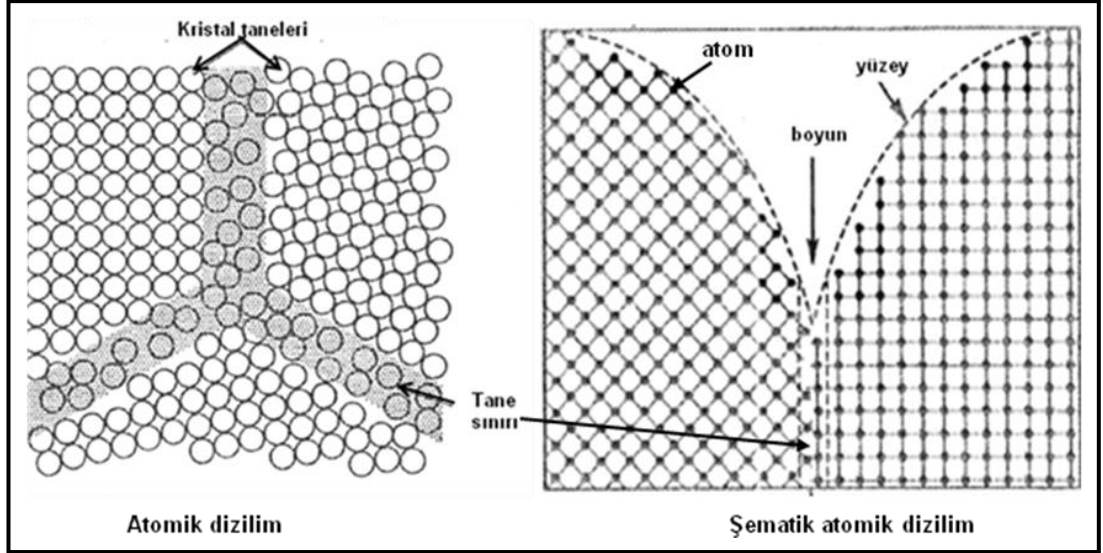
3.7.1.1. Katı Hal Sinterleme

Metal veya alaşım tozlarının yoğunlaşmasında genellikle gerçekleşen işlemdir. Yoğunlaşma katı halde gerçekleşen atomik difüzyon sayesinde gerçekleşir [23]. Sinterlemenin itici güç yüzey enerjisinin azaltılması isteğidir. Rasgele atom hareketleri esnasında atomlar mikroyapıdaki boşlukları doldurur [33]. Şekil 3.16'da görüldüğü üzere katı hal sinterlemesini ilk aşama, ileri aşama ve son aşama olarak üç adımda izah edilebilir.



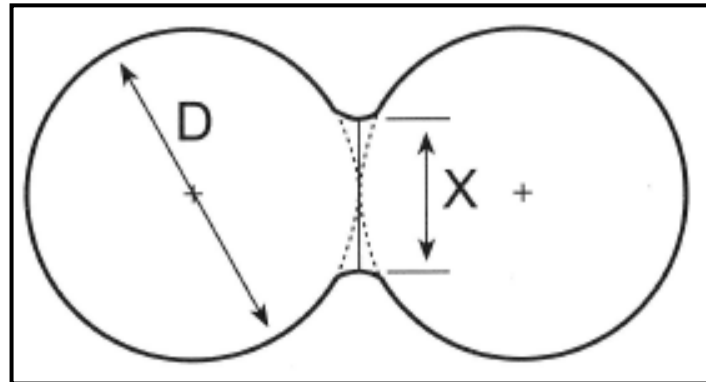
Şekil 3.16. Sinterleme esnasındaki gözenek gelişimi [34].

İlk aşamada parçacıklar arasındaki noktasal temaslardan başlayan bir boyun oluşumu söz konusudur. Bu boyunlaşma sıcaklık arttıkça hızlı bir şekilde gelişmeye devam eder. Gözenek yapısı düzensiz haldedir. İkinci aşama olan ileri aşamada boyun gelişimi için yeterli sürenin geçmesiyle birlikte gözenekler küresel hale gelir. Son aşamada ise halen var olan gözenekler hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde olabilir [23]. Şekil 3.17'de parçacıklar arasında sinterleme esnasında oluşan bağ atomik düzeyde gösterilmektedir. Atomlar kristal kafeslerindeki yerlerindedir, ancak bağlanma bölgelerindeki kafes uyumsuzlukları tane sınırlarını oluşturur [33].



Şekil 3.17. Parçacıklar arası sinterleme bağı gösterimi [31].

Fırın sıcaklığı arttıkça atomlar tane sınırları içerisinde bir sınırdan diğerine boşluklar vasıtasıyla hareket ederler. Tane sınırlarının bazıları küçülür bazıları büyür ama toplam alan küçülür. Sinterleme süresi yeterince uzun tutulursa tek bir tane sınırı ve kristal yapısı oluşur [31]. Atomların yüksek kimyasal potansiyelden düşük kimyasal potansiyele geçerek yaptıkları harekete difüzyon denir. Hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu ve yüzey difüzyonu yoğunlaşma sırasında gerçekleşen difüzyon çeşitleridir. Sinterlemede yoğunlaşma esnasında dislokasyonlar tane sınırlarına doğru plastik akış yaparak ilerlerler [23].



Şekil 3.18. Küresel tozda boyun geometrisi [33].

Şekil 3.18'de küresel tozun boyun geometrisi görülmektedir. D parçacık çapı, X boyun uzunluğu, γ yüzey enerjisi olmak üzere boyun bölgesindeki gerilme σ Eşitlik 3.9'daki gibi hesaplanır [33,36].

$$\sigma = \gamma \left(\frac{2}{X} - \frac{4D}{X^2} \right) \quad (3.9)$$

Bu gerilme sinterleme gerilmesi olarak adlandırılır. Küçük parçacıklarda boyun bölgesinin doldurulması için daha az sayıda atom gerekir. Atomların hareket mesafesi daha kısadır ve gerilme daha büyüktür. Bunun doğal sonucu olarak küçük boyutlu parçacıklar daha hızlı sinterlenir [33].

3.7.1.2. Sıvı Faz Sinterleme

Ham T/M parçaların hızlı bir şekilde yoğunlaşmasını sağlamak için kullanılan yaygın bir sinterleme yöntemidir. Bu yöntemde yoğunlaşma malzeme içerisinde oluşturulan %1-10 arasında sıvı faz sayesinde gerçekleşir. Sıvı faz ile katı faz yapı içerisinde katı toz parçacıklarının çözebileceği oranda bulunur. Yapı içerisinde yeterli miktarda sıvı faz olmalıdır. Soğuma esnasında sıvı faz tane sınırlarında katılaşıp tanelerin birleşmesini sağlar [23]. Bu yöntemde sinterleme solüdisi eğrisinin biraz üzerinde yapıldığı için çok dikkatli olunmalıdır. Ancak bu çabaya değer çünkü son şekle çok yakın ürün elde edilebilir ve parçayı son şekle getirmek için gerekli işlemleri en aza indirger [24].

3.7.1.3. Aktivasyonlu Sinterleme

Toz karışımına veya nadiren sinterleme atmosferine, sinterleme hızını artırmak için veya sinterleme sıcaklığını düşürmek için doping [23] etkisi yapacak element ilave ederek yapılan sinterlemeye aktivasyonlu sinterleme adı verilir. Aktive edici elementin görevi toz parçacıklarını yüzey oksitlerinden temizlemek metal atomlarının difüzyonunu hızlandırmak olabilir [24].

3.7.1.4. Reaksiyonlu Sinterleme

Yüksek sıcaklıkta eriyen ve en az iki bileşenden oluşan malzemeleri hızlı sinterlemenin özel bir tekniğidir. Bileşenler arasında kimyasal bağ meydana gelir ve bu bağ sayesinde çok iyi kaynaklaşma meydana gelir [23].

3.7.2. Sinterlemede Islatma Teorisi

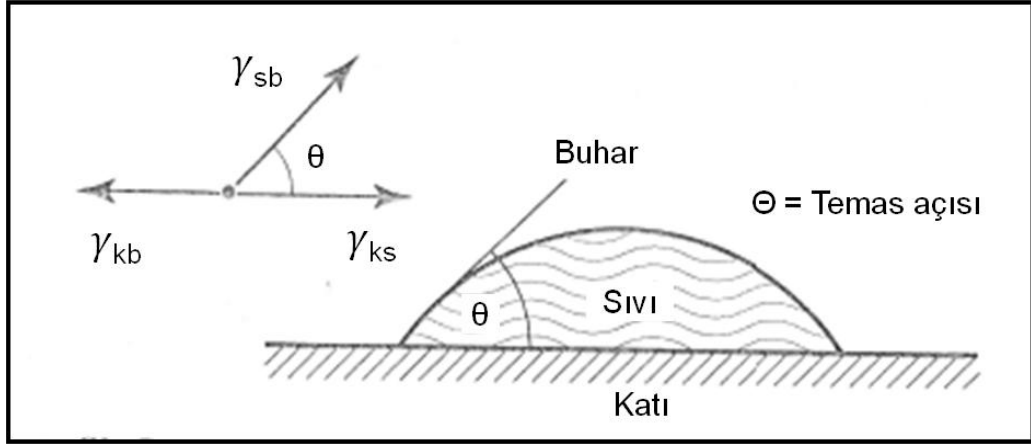
Islatma özelliği, matris malzemesi ve takviye elamanının oluşturduğu serbest enerji değişimine bağlıdır. İki elektriksel yüzey birbirlerine yeteri kadar yaklaştığı zaman fiziksel çekim kuvveti mevcut olur ki bu, katı bir yüzeyin sıvıyla ıslatılması halinde daha iyi anlaşılır. İki yüzey fiziksel temas halinde olduğu zaman gerçek molekülse temas toplam yüzeyin sadece küçük bir kısmında meydana gelir. Katı yüzeyindeki kirlilik oksit veya diğer atık maddeler ıslatma kabiliyetini düşürerek zayıf bir yapışmaya neden olur. Etkili ıslatma için sıvı, katının her noktasına temas etmelidir. Bir sıvının katı hale geçişi esnasında yapılan iş (W_A), Püpre denklemi ile Eşitlik 3.10'daki gibi hesaplanır [3].

$$W_A = \gamma_{sb} + \gamma_{kb} - \gamma_{ks} \quad (3.10)$$

Burada; γ_{sb} sıvı-buhar arayüzeyi serbest enerjisini, γ_{kb} katı-buhar arayüzeyi serbest enerjisini ve γ_{ks} katı-sıvı arayüzeyi serbest enerjisini ifade etmektedir. Bileşenler arasında maksimum bağ arayüzey serbest enerjisinin en aza indirildiği durumda ortaya çıkar. Şekil 3.19'da bir sıvı damlasının katı bir yüzey üzerine düşmesi sonucu oluşan yüzey gerilimleri şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.19'da görülen sıvı damlasının fiziksel durumu Eşitlik 3.11'deki Young denklemi ile ifade edilir [3].

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{sb} \cos \theta \quad (3.11)$$



Şekil 3.19. Sıvı damlasının katı bir yüzeye teması [36].

Temas açısı θ küçük olması durumunda iyi ıslanabilirlik, büyük olması durumunda kötü ıslanabilirlik meydana gelir. Örneğin $\theta = 0^\circ$ ise tam ıslatma olur, $\theta = 180^\circ$ ise ıslatma gerçekleşmez. $\gamma_{kb} < \gamma_{ks}$ olur ise θ , 90° den büyük olacağı için ıslatma olmaz. $\theta < 90^\circ$ ise genellikle iyi ıslanabilirliğin olduğu söylenebilir [3].

3.7.3. Sinterlemenin Etkileri

T/P parçaların sinterlenmesinde esas amaç mukavemetin yükseltilmesidir. Bu sırada gözeneklerin giderilmesi sebebiyle genellikle parçada çekme olur ve yoğunluk da artar. Ancak bazı durumlarda parçada şişme olup yoğunluğun düştüğü de görülebilir [23,24]. Bu durumun sebepleri arasında ham parça içerisinde gaz hapsolmesi, yüksek sıkıştırma basınçları, yüksek ham yoğunluk değerleri, hızlı ısıtma, yağlayıcılardan kalan atıklar ve toz karışımı içerisindeki ikinci elementler sayılabilir [29].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. DeneYlerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.1.1. Alüminyum ve Alaşımaları

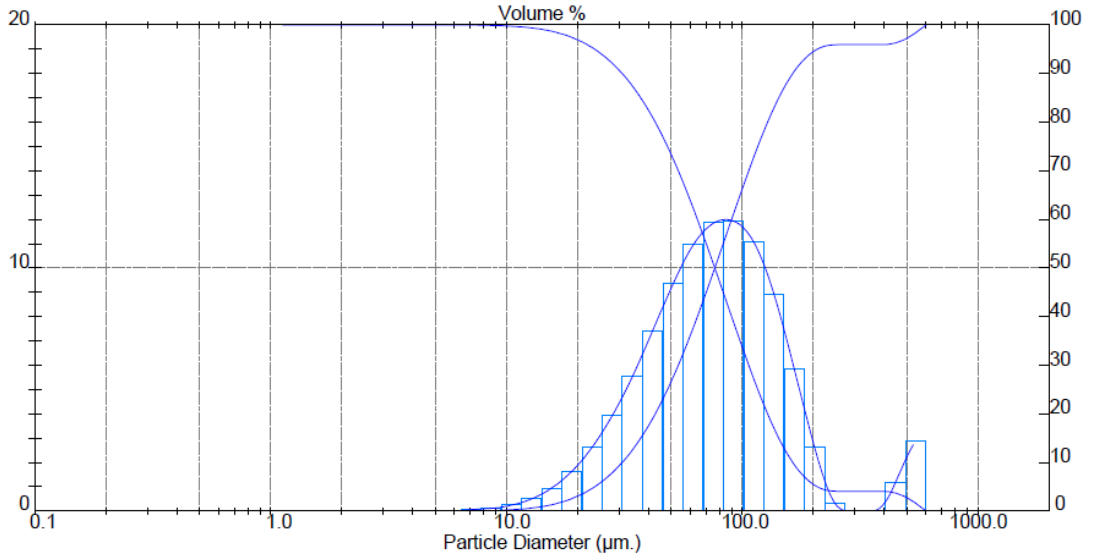
Metal matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak genellikle alüminyum (Al) ve alaşımaları kullanılmaktadır. Diğer metaller daha nadir kullanılmaktadır [5]. Alüminyum yer kabuğunda en çok bulunan metaldir ve daima demir, oksijen ve silisyum gibi diğer metallerle bileşik halde bulunur. Ana malzemesi alüminyum oksit olan boksit alüminyum üretiminde en çok kullanılan cevherdir [37]. Alüminyum diğer metaller ile bileşik halde yer kabuğunun %8'ini oluşturmaktadır. Endüstriyel tüketiminde lineer bir artış olsa dahi alüminyumun üretilmesinde kullanılan boksit rezervlerinin önümüzdeki 2000 yıla yetecek miktarda olduğu tahmin edilmektedir [5].

Alüminyum matrisli kompozitler otomotiv endüstrisinde (motor parçaları, jantlar vb.) havacılık/uzay endüstrisinde (motorlar, uçak gövdesi vb.), elektronik ve haberleşme alanında ve spor malzemeleri (golf sopaları, tenis raketleri vb.) üretiminde geniş yer almaktadır [38]. Yüksek korozyon direnci, manyetik olmamaları, demir-bakır bazlı malzemelere göre üç kat daha hafif olmaları öne çıkan özelliklerindedir [24].

Çizelge 4.1. Matris malzemesi Al'un özellikleri.

Yoğunluk (g/ cm ³)	2,70
Ergime sıcaklığı (°C)	2800
Isıl iletkenlik [W/(m.K)]	235

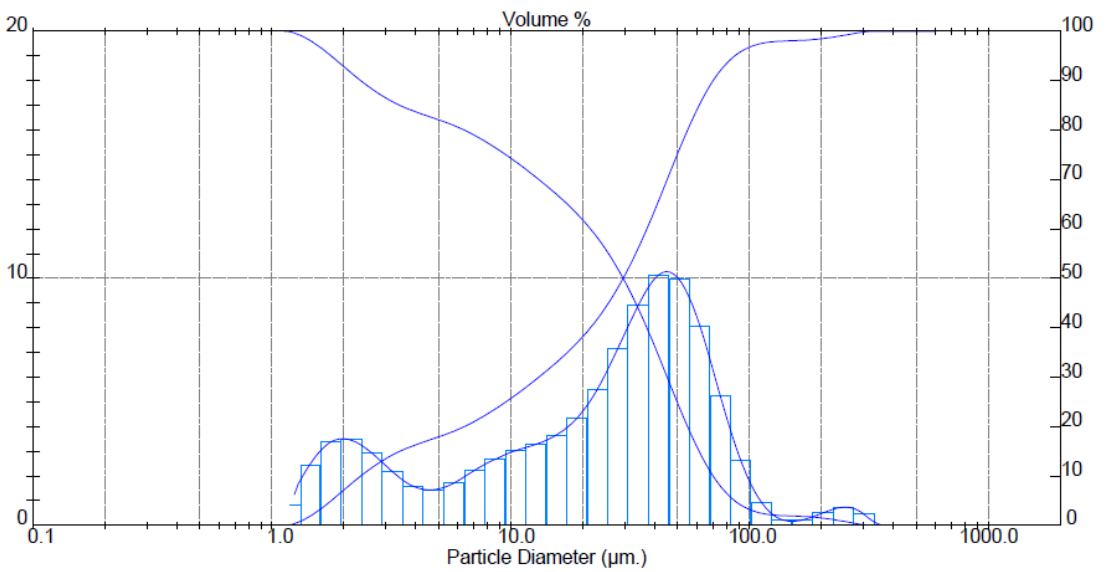
DeneYlerde matris malzemesi olarak ECKA Granules firmasından temin edilen ortalama toz tane boyutu 76,39 µm olan, %99,7 saflıkta gaz atomize Al tozlar kullanılmış olup Şekil 4.1'de toz boyutu dağılım grafiği verilmiştir. Ayrıntılı Al toz boyut analiz raporu EK-1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Al tozları boyut dağılım grafiği.

4.1.2. MgO ve Özellikleri

Bu çalışmada üretimi yapılan Al matrisli kompozit malzemede takviye elemanı olarak ortalama 29,53 µm toz tane boyutuna sahip saf MgO kullanılmıştır. Takviye malzemesi MgO'in toz boyut dağılım grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir. Ayrıntılı MgO toz boyut analiz raporu EK-2'de sunulmuştur. Çizelge 4.2'de bu MgO parçacıklarının bazı özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.2. MgO tozları boyut dağılım grafiği

Çizelge 4.2. Takviye malzemesi MgO'in özellikleri.

Yoğunluk (g/ cm ³)	3,51
Ergime sıcaklığı (°C)	2800
Isıl iletkenlik [W/(m.K)]	32-60

4.2. Test Numunelerinin Üretilmesi

4.2.1. Toz Karışımlarının Hazırlanması

Yapılan deneylerde ASTM B-328 standartlarında verilen ölçülerde (6,35mm X 12,7mm X 31,75mm) numune elde etmek için gerekli olan toz karışımlarının ağırlık hesapları yapılmıştır. Toz karışımlarının teorik yoğunluklarının hesaplanması için Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2'deki denklemler Eşitlik 4.3'deki karışımlar kuralı denkleminde yerine yazılmış ve Eşitlik 4.4'deki denklem elde edilmiştir.

$$V = \frac{W}{\rho} \quad (4.1)$$

$$v_{MgO} = \frac{V_{MgO}}{V_{MgO} + V_{Al}} \quad (4.2)$$

$$\rho_{teorik} = \rho_{MgO} v_{MgO} + \rho_{Al} v_{Al} \quad (4.3)$$

$$\rho_{teorik} = \rho_{MgO} \frac{V_{MgO}}{V_{MgO} + V_{Al}} + \rho_{Al} \frac{V_{Al}}{V_{MgO} + V_{Al}}$$

$$\rho_{teorik} = \rho_{MgO} \frac{\frac{W_{MgO}}{\rho_{MgO}}}{\frac{W_{MgO}}{\rho_{MgO}} + \frac{W_{Al}}{\rho_{Al}}} + \rho_{Al} \frac{\frac{W_{Al}}{\rho_{Al}}}{\frac{W_{MgO}}{\rho_{MgO}} + \frac{W_{Al}}{\rho_{Al}}} = \frac{W_{MgO} + W_{Al}}{\frac{W_{MgO}}{\rho_{MgO}} + \frac{W_{Al}}{\rho_{Al}}}$$

$$\rho_{teorik} = \frac{W_{kompozit} (\rho_{MgO} \rho_{Al})}{W_{Al} \rho_{MgO} + W_{MgO} \rho_{Al}}$$

$$\rho_{teorik} = \frac{W_{kompozit} (\rho_{MgO} \rho_{Al})}{(W_{kompozit} - W_{MgO}) \rho_{MgO} + W_{MgO} \rho_{Al}}$$

$$\rho_{teorik} = \frac{W_{kompozit}(\rho_{MgO} \rho_{Al})}{W_{kompozit} \rho_{MgO} - W_{MgO} \rho_{MgO} + W_{MgO} \rho_{Al}}$$

$$\rho_{teorik} = \frac{W_{kompozit}(\rho_{MgO} \rho_{Al})}{W_{kompozit} \left(\rho_{MgO} - \frac{W_{MgO}}{W_{kompozit}} \rho_{MgO} + \frac{W_{MgO}}{W_{kompozit}} \rho_{Al} \right)}$$

Burada $\frac{W_{MgO}}{W_{kompozit}} = \varphi$ yazılıp ortak paranteze alınırsa Eşitlik 4.4 elde edilir.

$$\rho_{teorik} = \frac{\rho_{MgO} \rho_{Al}}{\rho_{MgO} + \varphi(\rho_{Al} - \rho_{MgO})} \quad (4.4)$$

Burada ;

V : Hacim (g/cm³)

W : Ağırlık (g)

ρ : Yoğunluk (g/cm³)

v_{MgO} : MgO takviye hacim oranı

v_{Al} : Al takviye hacim oranı

V_{MgO} : Kompozit içindeki MgO hacmi (cm³)

V_{Al} : Kompozit içindeki Al hacmi (cm³)

ρ_{teorik} : Kompozitin teorik yoğunluğu (g/cm³)

ρ_{Al} : Al yoğunluğu (g/cm³)

ρ_{MgO} : MgO yoğunluğu (g/cm³)

W_{Al} : Kompozit içindeki Al ağırlığı (g)

W_{MgO} : Kompozit içindeki MgO ağırlığı (g)

$W_{kompozit}$: Kompozitin toplam ağırlığı (g)

φ : $W_{MgO}/W_{kompozit}$ oranı (%)

Eşitlik 4.4'den elde edilen teorik yoğunluk değerlerine göre Çizelge 4.3'de yer alan her kompozit numunenin toplam ağırlığı hesaplanmıştır. Bu ağırlık değerine göre matris malzemesi olarak seçilen Al tozlarının ağırlığı ve takviye

elemanı olan MgO (ağırlıkça %5, %10, %15) tozlarının ağırlığı hesaplanarak Çizelge 4.3'de 4 grup toz karışımı elde edilmiştir. Sinterlemede yapacağı negatif etkiden dolayı toz karışımına yağlayıcı ilavesi yapılmamıştır.

Çizelge 4.3. Toz karışımlarının ağırlık oranları.

Grup No	Sıra No	%MgO	W_{MgO} (g)	W_{Al} (g)	$W_{kompozit}$ (g)	ρ_{teorik} (g/cm ³)
1	1-2-3					
2	4-5-6	5	0,3490	6,6326	6,9817	2,7315
3	7-8-9					
4	10	5	0,3490	6,6326	6,9817	2,7315
	11	10	0,7064	6,3578	7,0642	2,7637
	12	15	1,0723	6,0763	7,1486	2,7968

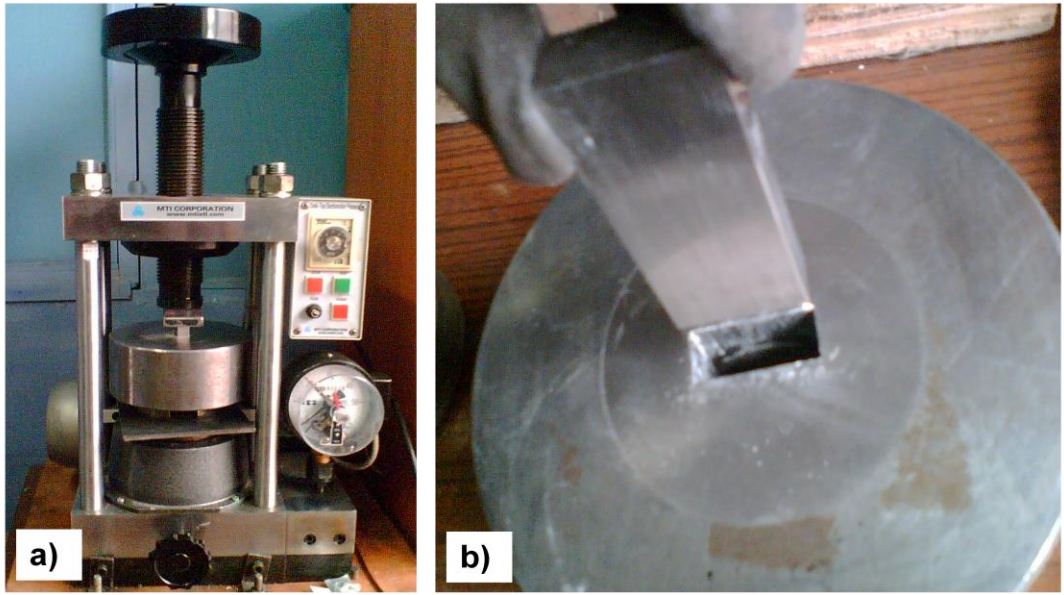
Toz karışımları Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü T/M laboratuvarındaki Presica marka 0,0001g hassasiyetli elektronik terazide tartılmıştır. Yine aynı laboratuvardaki Şekil 4.3'deki üç boyutlu karıştırma yapabilen Turbula cihazında toz karışımları 60 dakika süreyle karıştırılmıştır.



Şekil 4.3. Turbula karıştırma cihazı

4.2.2. Toz Karışımlarının Preslenmesi

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda toz karışımlarının 500 MPa basınç altında sıkıştırılmasına karar verilmiştir. Sıkıştırma Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümündeki MTI marka FYD-40 model Şekil 4.4.a'da gösterilen tek yönlü pres kullanılmıştır. Sıkıştırma kalıp duvarları ve zımba yüzeyleri çinko stearat ile yağlanmıştır. Şekil 4.4.b'de yüzeyleri beyaz renkli çinko stearat ile yağlanmış kalıba zımbanın yerleştirilmesi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Sıkıştırma kullanılan pres (a) ve kullanılan kalıp (b)

4.2.3. Toz Karışımlarının Sinterlenmesi

Sinterleme işlemlerinde Çizelge 4.4'de gösterilen 1, 2 ve 3'üncü grup %5 MgO takviye oranlı numuneler 570°C, 600°C ve 630 °C sıcaklıklarda sırasıyla 1, 2, 4 saat süreyle sinterlenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarda 630 °C'de 4 saat süre ile sinterlemede en ideal sonuçlar elde edildiği tespit edildikten sonra 4'üncü grup %5, %10 ve %15 MgO takviye ağırlık oranlı numuneler bu sıcaklık ve sürede sinterlenip takviye oranının etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak her bir grup için 3 adet numune sinterlenip

takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin Al-MgO kompozitinin özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 4.4. Numune gruplarının sinterleme koşulları

Grup No	Sıra No	% MgO	Sinterleme Atmosferi	Sinterleme Süresi (saat)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
1	1	5	Ar	1	570°C
	2	5	Ar	2	570°C
	3	5	Ar	4	570°C
2	4	5	Ar	1	600°C
	5	5	Ar	2	600°C
	6	5	Ar	4	600°C
3	7	5	Ar	1	630°C
	8	5	Ar	2	630°C
	9	5	Ar	4	630°C
4	10	5	Ar	4	630°C
	11	10	Ar	4	630°C
	12	15	Ar	4	630°C

Tozların sinterlenmesi için G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü T/M laboratuvarındaki sıcaklığı elektronik göstergeli yatay tüp fırında yapılmıştır. Sinterlenme esnasında oksitlenmeyi önlemek için işlemler süresince argon gazı kullanılmıştır.

4.3. Mekanik Testlerin Yapılması

4.3.1. Yoğunluk Ölçümleri

Sinterleme işlemi sonrasında kompozit numunelerin yoğunluk ölçümleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü T/M laboratuvarında bulunan 0,0001g hassasiyetli dijital Sartorius marka terazide Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Oda sıcaklığında havada ve suda tartılan numunelerin deneysel yoğunlukları Eşitlik 4.5 ile hesaplanmıştır. Kompozitlerin teorik yoğunlukları

ve sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları kullanılarak Eşitlik 4.6'ya göre % gözeneklilik oranları ve Eşitlik 4.7'ye göre yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho_{deneyysel} = \frac{W_{hava}}{W_{hava} - W_{su}} \rho_{su} \quad (4.5)$$

$$\% \text{ gözenek} = \frac{\rho_{teorik} - \rho_{deneyysel}}{\rho_{teorik}} \times 100 \quad (4.6)$$

$$\% \rho = \frac{\rho_{deneyysel}}{\rho_{teorik}} \times 100 \quad (4.7)$$

Burada;

$\rho_{deneyysel}$: Kompozitin deneysel yoğunluğu (g/cm³)

ρ_{su} : Suyun yoğunluğu (g/cm³)

W_{hava} : Kompozitin havadaki ağırlığı (g)

W_{su} : Kompozitin sudaki ağırlığı (g)

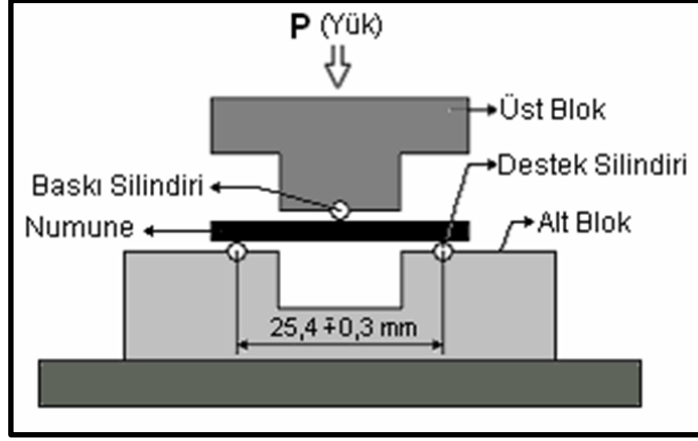
ρ_{teorik} : Kompozitin teorik yoğunluğu (g/cm³)

$\% \text{ gözenek}$: Kompozitin gözeneklilik oranı (%)

$\% \rho$: Kompozitin % yoğunluğu şeklindedir.

4.3.2. Çapraz Kırılma Mukavemeti (ÇKM) Ölçümleri

Çapraz kırılma deneyleri için 6,35mm X 12,7mm X 31,75mm boyutlarındaki numuneler yüzeyleri üzerlerinde çentik etkisi yapacak herhangi bir çizik, kusur vb. kalmayacak şekilde zımparalanıp parlatılmıştır. Hazırlanan numunelerin kırılma yükleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinde bulunan AG-I SHIMADZU marka 5kN kapasiteli bilgisayar kontrollü cihazda yapılmıştır. Şekil 4.5'de çapraz kırılma deneylerinin yapıldığı aparat şematik gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Çapraz kırılma deney aparatı şematik gösterilişi

ASTM B 528-05 ve ASTM B 312 standartlarına uygun olarak 0,5mm/dakika ilerleme hızında numunelerin kırılma yükleri belirlenmiştir. Elde edilen kırılma yüklerine (P) göre her bir numunenin çapraz kırılma mukavemetleri (ÇKM) Eşitlik 4.8'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\text{ÇKM}} = \frac{3 P L}{2 t^2 w} \quad (4.8)$$

Burada;

$\sigma_{\text{ÇKM}}$: Çapraz kırılma mukavemeti (MPa)

P : Numunenin kırılma yükü (N)

L : Taban destekleri arasındaki mesafe (mm)

w : Numunenin genişliği (mm)

t : Numunenin kalınlığı (mm)

4.3.3. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalındaki Instron Wolpert marka sertlik ölçme cihazında 5 kg yük uygulanarak Vickers cinsinden yapılmıştır. Tek yönlü preslemede alt ve üst yüzeylerinde basınç iletiminden kaynaklı farklı sertlik değerleri olabileceğinden hataları minimize edip optimum sonuçlar için her iki

yüzeiden de eşit sayıda olmak üzere toplamda en az 8 farklı noktadan sertlik ölçümü yapılarak bunların aritmetik ortalaması alınmıştır.

4.4. Mikroyapı İncelemesi İçin Numunelerin Hazırlanması

Sinterleme sonrasında numunelerin yüzeyleri 600#, 800#, 1000# 1200#, 1500# numaralı SiC zımparalar ile zımparalanıp pürüzsüz hale getirilmiştir. Sonrasında parlatma keçesinde 3µm elmas pasta süspansiyonu dökülerek yüzeyler parlatılıp temizlenmiş ve keller sıvısı (2,5ml HNO₃ + 1,5ml HCl + 1ml HF + 95ml H₂O) ile dağlama işleminden sonra tekrar alkol ile temizlenerek numuneler mikroyapı incelemesine hazır hale getirilmiştir. SEM incelemeleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalında JOEL JSM-5600 model cihaz ile yapılmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Yoğunluk Sonuçlarının İncelenmesi

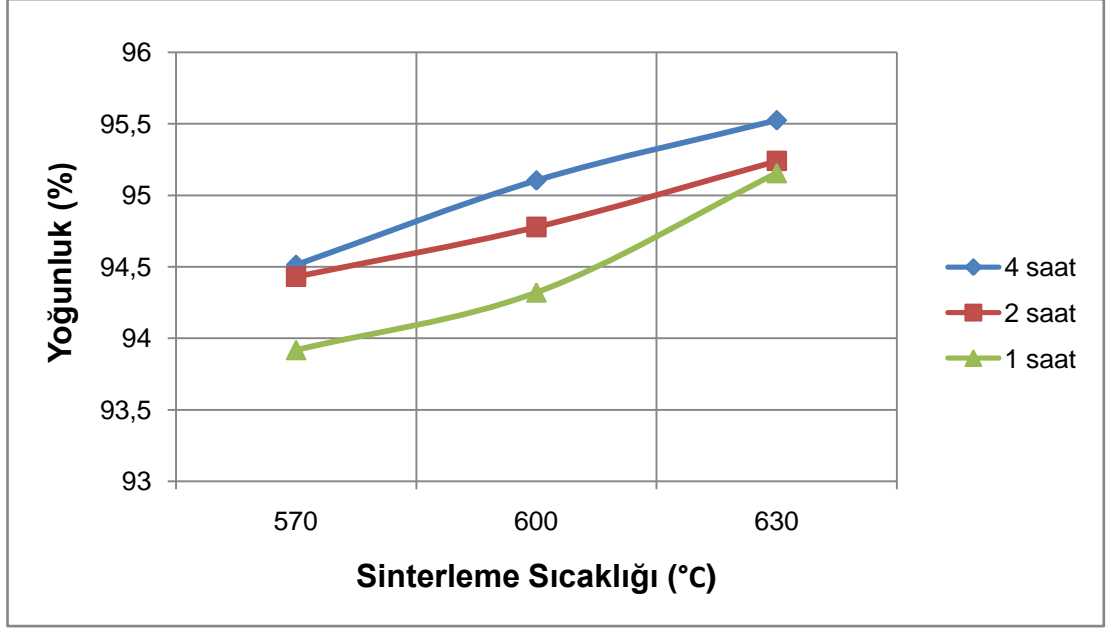
Sinterleme işlemi sonrasında elde edilen ilk aşama yoğunluk sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir. %5 MgO takviye oranlı 1'inci grup kompozitler 570°C'de sinterlenmiş olup 1, 2 ve 4 saat sinterleme sonunda sırasıyla %93,9191 - %94,4316 - %94,5152 yoğunlukları elde edilmiştir. 2'nci grup kompozitlerde 600°C'de 1, 2 ve 4 saat sinterleme sonunda sırasıyla %94,3218 - %94,7794 - %95,1052 yoğunlukları elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. %5 MgO takviye oranlı numunelerin yoğunluk sonuçları

Grup No	Sıra No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (%)
1	1	570°C	1	2,7315	2,5654	93,9191
	2	570°C	2	2,7315	2,5794	94,4316
	3	570°C	4	2,7315	2,5816	94,5152
2	4	600°C	1	2,7315	2,5763	94,3218
	5	600°C	2	2,7315	2,5888	94,7794
	6	600°C	4	2,7315	2,5978	95,1052
3	7	630°C	1	2,7315	2,5991	95,1565
	8	630°C	2	2,7315	2,6015	95,2407
	9	630°C	4	2,7315	2,6093	95,5262

3'üncü grup kompozitlerde 630°C sinterleme sıcaklığında 1, 2 ve 4 saat sinterleme süreleri sonunda sırasıyla %95,1565 - %95,2407 - %95,5262 yoğunlukları elde edilmiştir.

Şekil 5.1'de %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen yoğunluk değerleri verilmiştir.



Şekil 5.1. %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre yoğunluk değişimi.

Şekil 5.1’de yer alan grafik incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artması ile yoğunluk değerlerinde artış olduğunu göstermektedir. Bu artış Eşitlik 5.1’de yer alan Arrhenius denklemi [17,33,36] ile açıklanabilir.

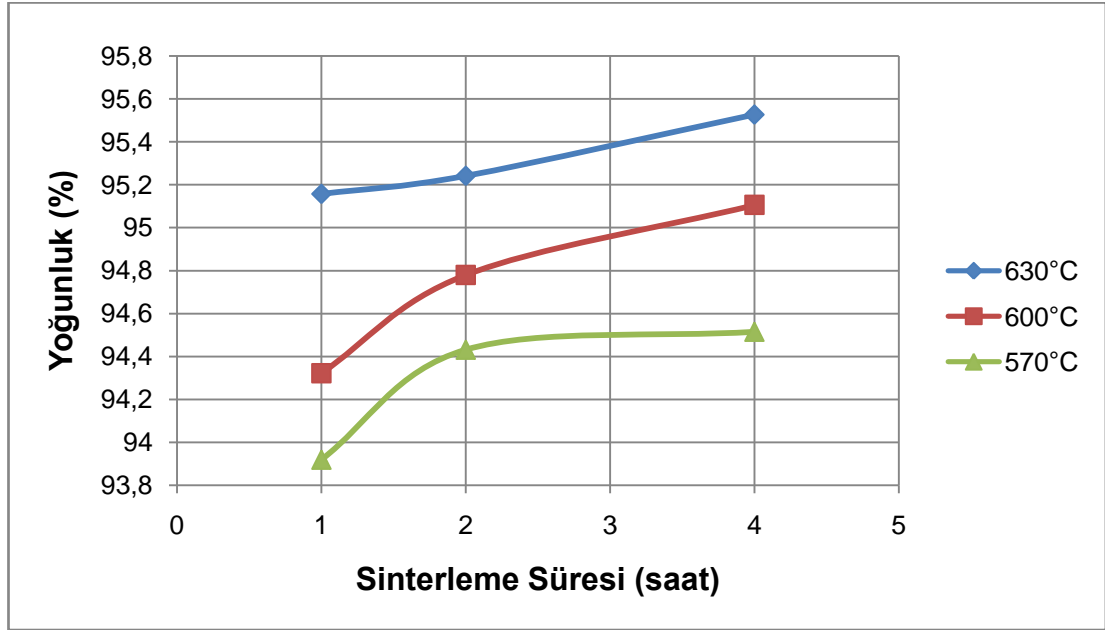
$$D_V = D_0 e^{(-Q/RT)} \quad (5.1)$$

Burada D_V hacim difüzyonu katsayısı, D_0 malzeme sabiti, Q aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Denklemin sağ tarafındaki T değerinin artmasıyla D_V değerinin de artacağı açık bir şekilde görülmektedir.

Ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda daha fazla atom komşuları ile bağlarını kopartıp yeni yerlere gitmek için daha yüksek enerjiye sahiptir [33]. Artan sıcaklık ile Al parçacıkları arasında daha fazla difüzyon gerçekleştiği ve gözeneklerin birleşerek daha düşük enerji konumuna geçtiği değerlendirilmiştir. Sonuç olarak sıcaklığın artması ile sinterlenebilirlik artmış ve sinterlenebilirliğin artması yoğunluk değerlerini arttırarak teorik yoğunluğa yakın değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar Xu vd., (2002); Topçu vd., (2003);

Min vd., (2005); Kim, (2008) ve Rahimian vd., (2009) tarafından da benzer şekilde elde edildiği belirtilmiştir [17, 20, 22, 39, 40].

Şekil 5.2'de %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre yoğunluk değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 5.2. %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre yoğunluk değişimi.

Şekil 5.2'de yer alan grafik incelendiğinde yine sinterleme süresinin artmasıyla bütün sıcaklık değerlerinde teorik yoğunluğa daha yakın yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Sinterleme süresinin artmasıyla parçacıklar arasındaki boyunlaşmanın geliştiği, gözeneklerin azaldığı [20, 33], artan süre ile parçacıklar arası difüzyonunda artması sonucu teorik yoğunluğa daha yakın yoğunluklar elde edildiği değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Xu vd., (2002) ve Kim, (2008) tarafından da benzer şekilde elde edilmiştir [20, 40].

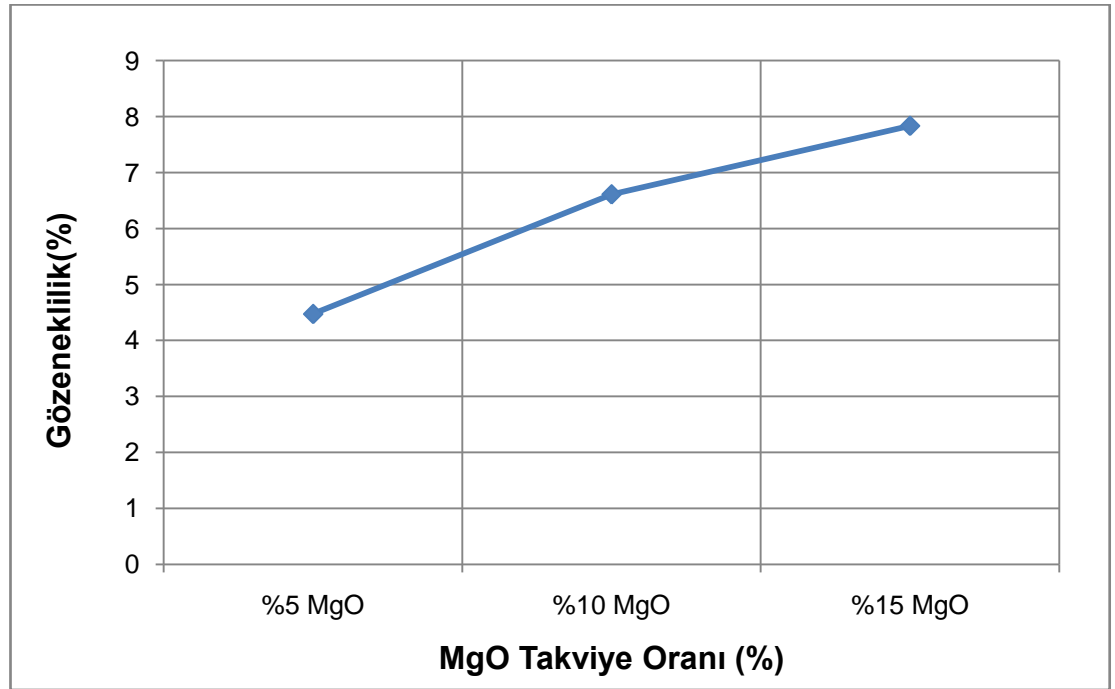
1, 2 ve 3'üncü grup %5 MgO takviyeli kompozitlerle yapılan ilk aşama deney sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek yoğunluk değerinin 630°C'de 4 saat sinterleme sonucunda elde edildiği görülmüştür. Farklı takviye oranlarındaki 4'üncü grup numunelerin 630°C'de 4 saat sinterleme sonucunda elde edilen

yoğunluk ve gözeneklilik sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Burada %5, %10 ve %15 MgO takviyeli kompozitlerin deneysel yoğunlukları sırasıyla %95,5262 - %93,3892 -%92,166 şeklinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. 630°C’de 4 saat sinterlemede yoğunluk sonuçları

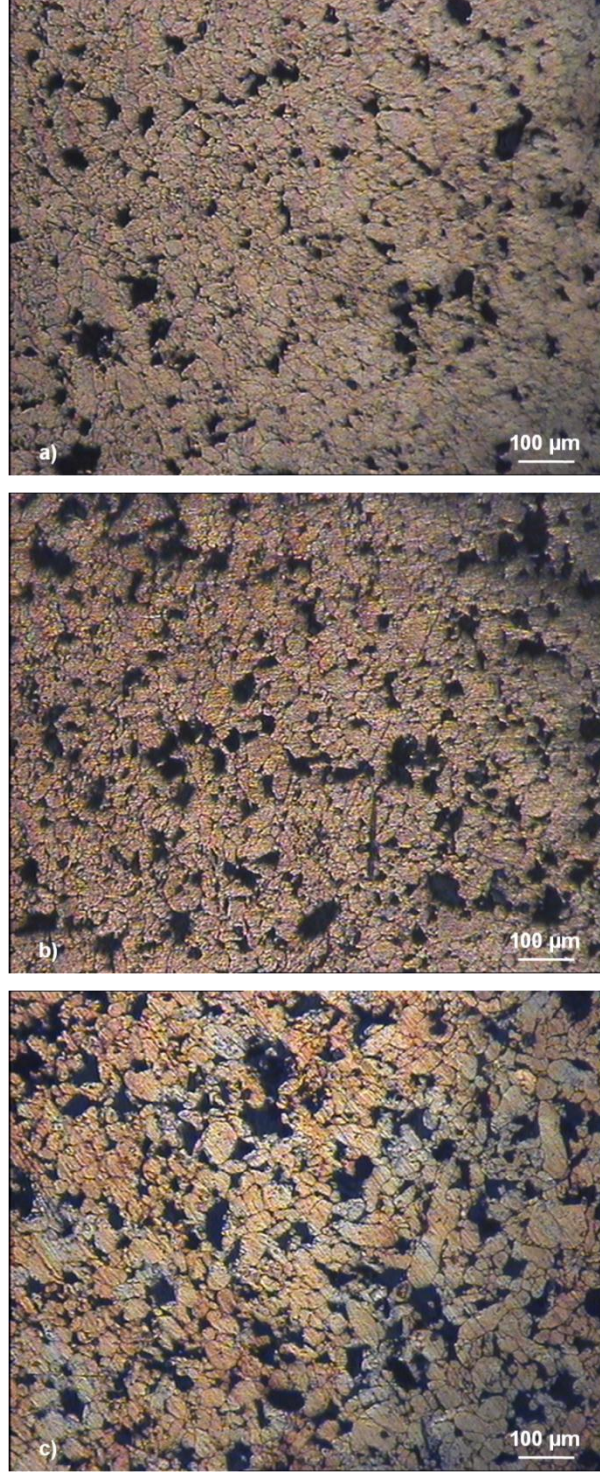
Grup No	Sıra No	MgO Takviye Oranı(%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (%)
4	10	5	2,7315	2,6093	95,5262	4,4738
	11	10	2,7637	2,5809	93,3892	6,6108
	12	15	2,7968	2,5777	92,1660	7,834

Şekil 5.3’de 630°C’de 4 saat süre ile yapılan sinterleme sonucunda ağırlıkça % MgO takviye oranının % gözenekliliğe etkisi gösterilmiştir. Artan MgO takviye oranı ile gözenekliliğin arttığı diğer bir deyişle yoğunluğun düştüğü görülmektedir.



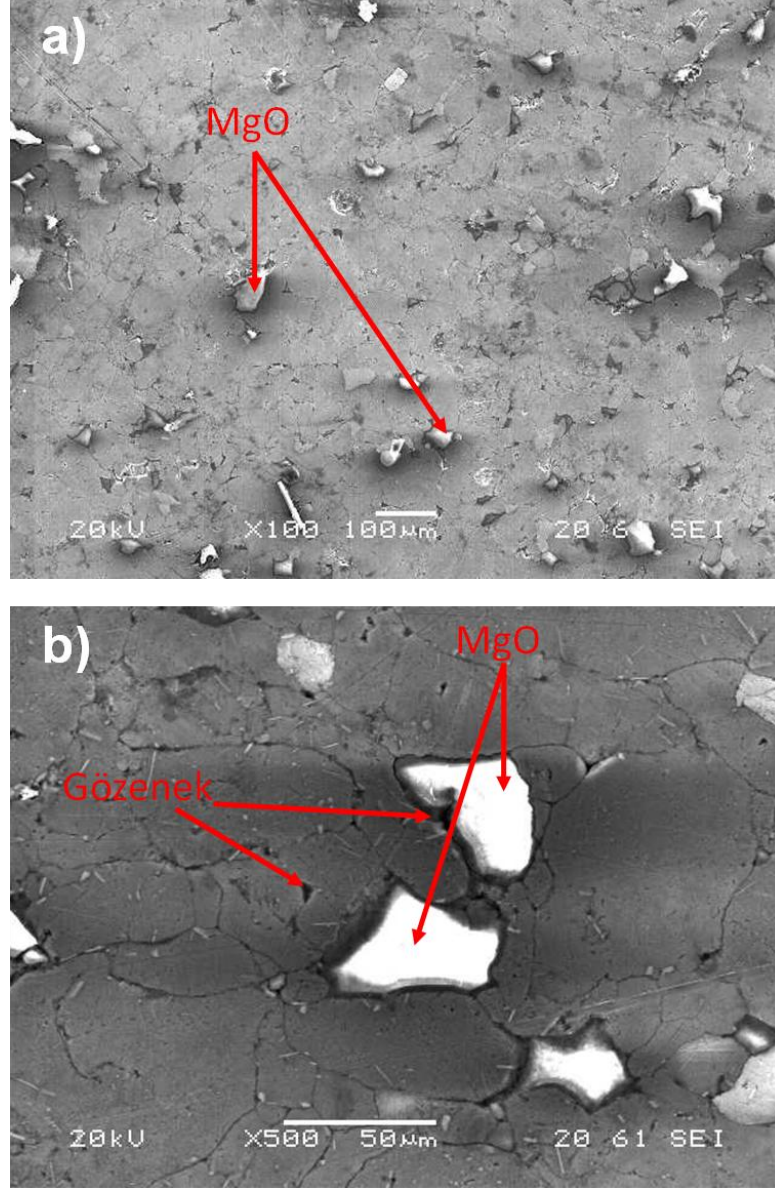
Şekil 5.3. Takviye oranına göre yoğunluk değişimi.

Şekil 5.4'de kompozitlerin mikroyapılarını incelemek için OM görüntüleri yer almaktadır. Siyah noktaların homojen bir dağılım içerisinde oldukları görülmekte olup, gözenek ve MgO parçacıklarının ayrımı yapılamamaktadır.



Şekil 5.4. 630°C'de 4 saat sinterlenmiş %5 (a), %10 (b) ve %15 (c) MgO takviyeli kompozit yüzeylerinin OM görüntüleri.

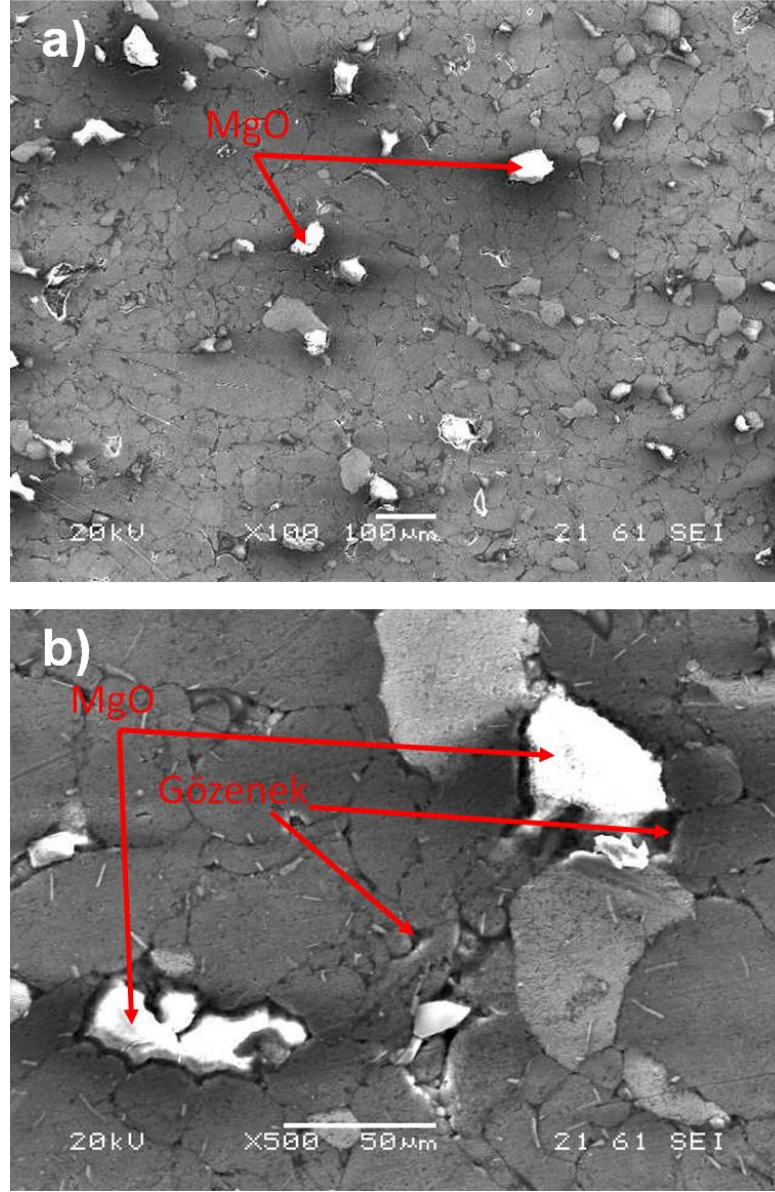
Şekil 5.5'de %5 MgO takviyeli, 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin takviye dağılımının incelenmesi amacıyla X100 ve X500 SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.5. 630°C'de 4 saat sinterlenmiş %5MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.

Şekil 5.5 incelendiğinde parlak beyaz parçacıklar MgO'yi temsil etmekte olup kompozit içerisindeki takviye elemanı MgO'nin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Gözeneklerin Al tane sınırlarında ve Al-MgO arayüzeylerinde olduğu görülmektedir.

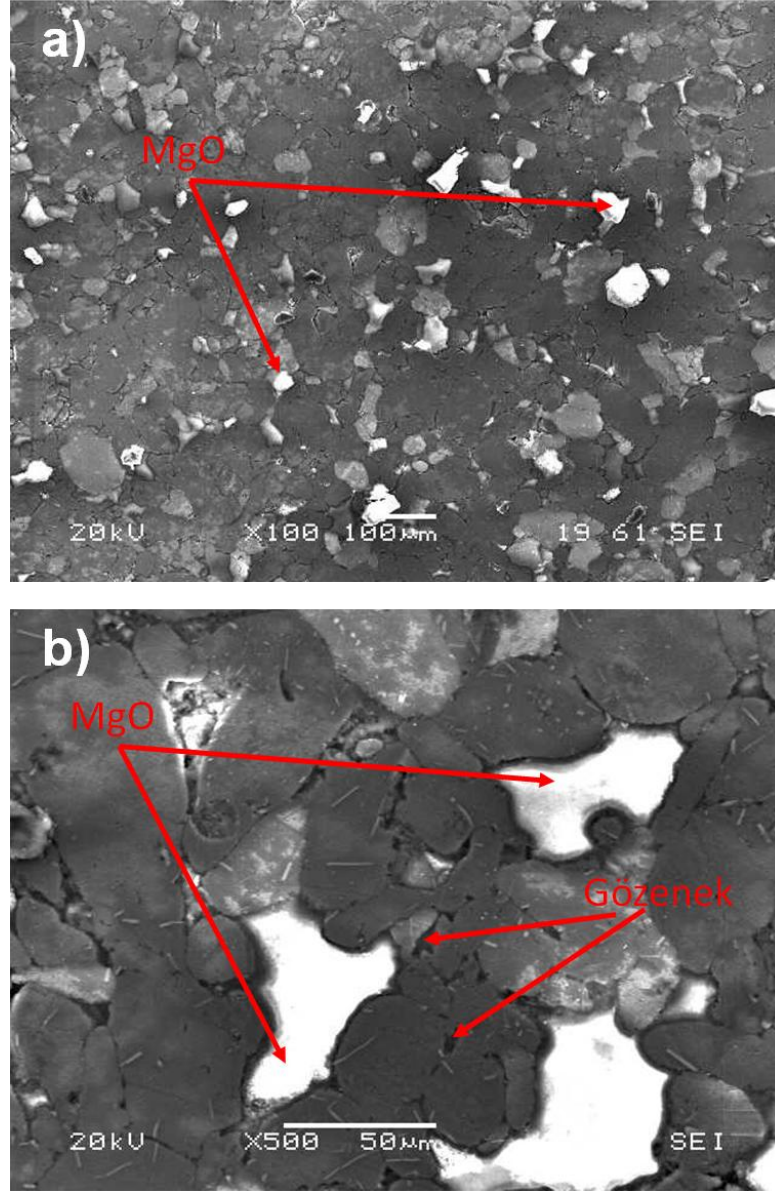
630°C'de 4 saat sinterlenmiş %10 MgO takviyeli kompozitin takviye dağılımının incelenmesi amacıyla Şekil 5.6'da X100 ve X500 SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.6. 630°C'de 4 saat sinterlenmiş %10 MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.

Şekil 5.6 incelendiğinde %10 MgO takviyeli kompozitlerde MgO dağılımında homojenlik olduğu görülmektedir. Gözenekler tane sınırlarında yer almakta ve %5 MgO takviyeli kompozitlere oranla gözeneklilikte artış olduğu gözlenmektedir.

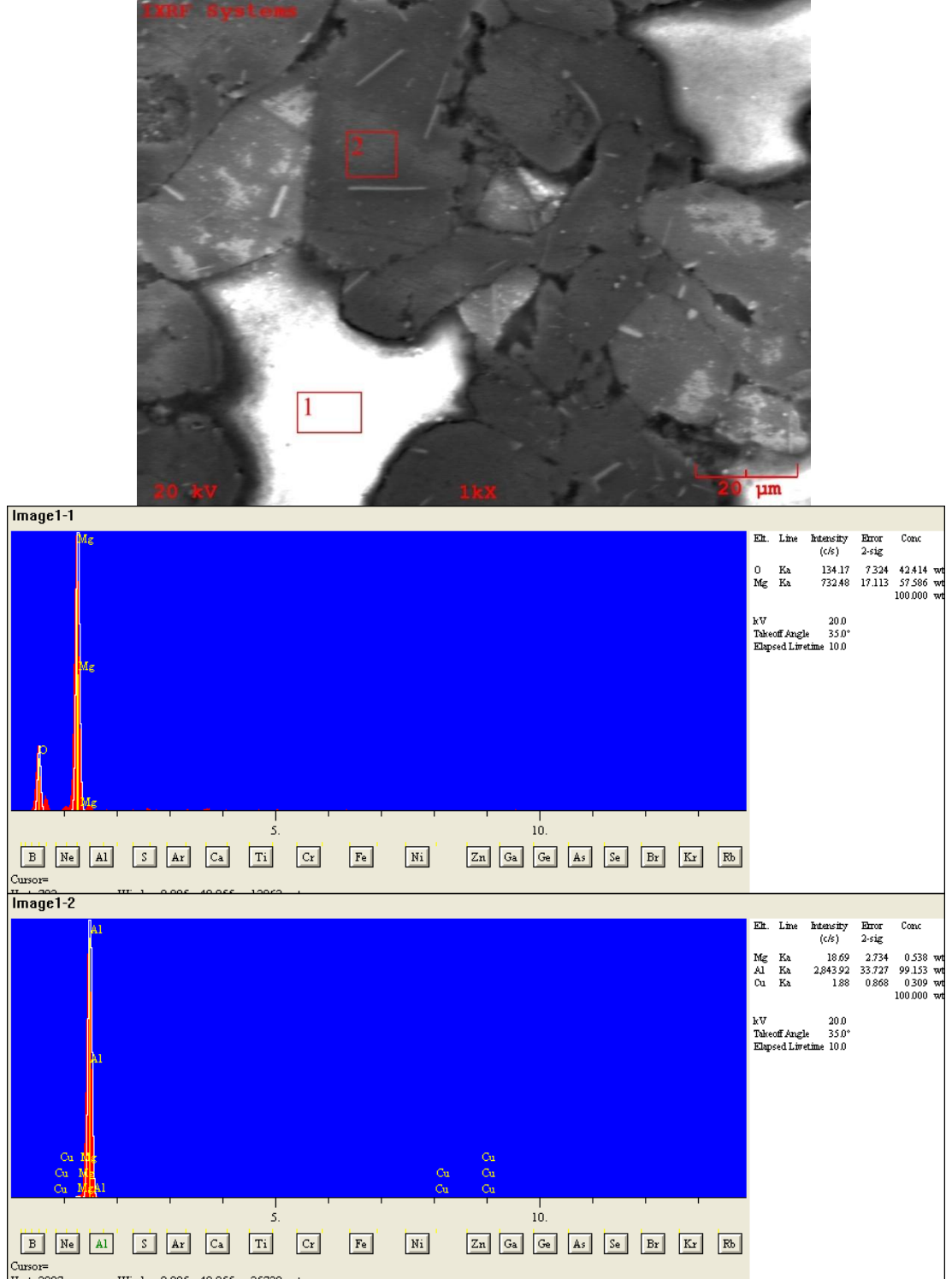
630°C'de 4 saat sinterlenmiş %15 MgO takviyeli kompozitin takviye dağılımının incelenmesi amacıyla Şekil 5.7'de X100 ve X500 SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.7. 630°C'de 4 saat sinterlenmiş %15 MgO takviyeli kompozitin X100 (a) ve X500 (b) SEM görüntüleri.

Şekil 5.7 incelendiğinde kompozit içerisinde MgO'in homojen bir şekilde dağıldığı ve %5 ile %10 MgO takviyeli kompozitlere oranla daha fazla MgO içerdiği açıkça görülmektedir. Yüksek MgO oranı sonucunda en yüksek gözeneklilik değeri %15 MgO takviyeli kompozitlerde ölçülmüştür.

Şekil 5.8'de %15 MgO takviyeli kompozit numunenin yüzeyindeki farklı bölgelerden yapılan EDS analizleri ile Matris malzemesi Al ve takviye malzemesi MgO incelenmiştir.



Şekil 5.8. %15 MgO takviyeli kompozitin yüzeyinde yapılan EDS analizi.

Şekil 5.8'de 1 noktasında yapılan EDS analiz sonuçlarına göre takviye malzemesi MgO'in saf olduğu doğrulanmıştır. 2 noktasında yapılan EDS analizinde matris malzemesi Al'un %99,15'in üzerinde saflık değerine sahip olduğu görülmüştür.

Gözenek artışının bir nedeni toz karışımı içerisindeki sıkıştırılabilirliği düşük olan sert faz oranının artması ile karışımında sıkıştırılabilirliğinin düşmesi [18] sonucunda ham parçanın gözenekliliğinin yüksek olması olarak değerlendirilmiştir. Diğer bir neden olarak da termal iletkenliği düşük olan seramik fazların kompozitin de termal iletkenliğini düşürmesi [6,41] ve sinterleme mekanizmasını önleyici etki yapması [18] sonucu artan MgO oranı ile teorik yoğunluktan uzaklaşıldığı değerlendirilmiştir. Elde edilen gözeneklilik sonuçları Bhattacharyya vd., (2008); Rahimian vd., (2010) ve Liu vd., (2010)' de benzer şekilde elde etmişlerdir [18,42,43].

5.2. Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi

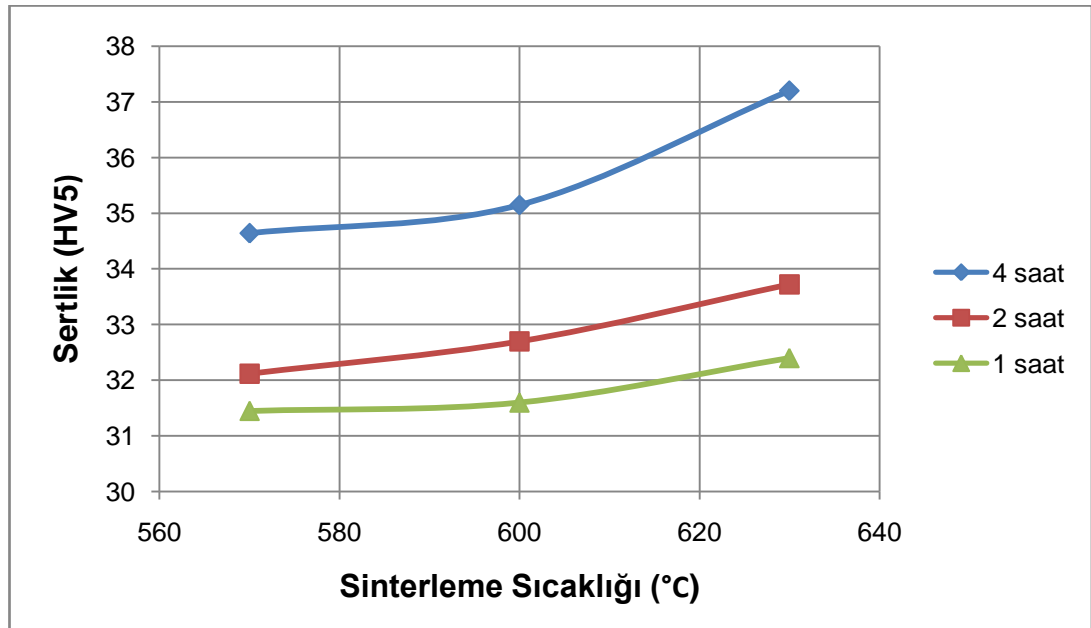
1, 2, 3'üncü grup numunelerle yapılan deneylerde 570°C-600°C-630°C sıcaklıklarda ve üç farklı sürede (1-2-4 saat) sinterleme işlemleri sonucunda elde edilen sertlik sonuçları Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

570°C'de sinterlenen 1'inci grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki sertlik değerleri sırasıyla 31,4HV5 – 32,1HV5 – 34,64HV5 şeklinde olmuştur. 600°C'de sinterlenen 2'nci grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki sertlik değerleri sırasıyla 31,6HV5 – 32,7HV5 – 35,15HV5 şeklinde olmuştur. 630°C'de sinterlenen 3'üncü grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki sertlik değerleri ise sırasıyla 32,4HV5 – 33,72HV5 – 37,2HV5 şeklinde olmuştur.

Çizelge 5.3. 1,2,3'üncü grup numunelerin sertlik sonuçları.

Grup No	Sıra No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	MgO Takviye Oranı(%)	Sertlik (HV5)
1	1	570°C	1	5	31,4
	2	570°C	2	5	32,1
	3	570°C	4	5	34,64
2	4	600°C	1	5	31,6
	5	600°C	2	5	32,7
	6	600°C	4	5	35,15
3	7	630°C	1	5	32,4
	8	630°C	2	5	33,72
	9	630°C	4	5	37,2

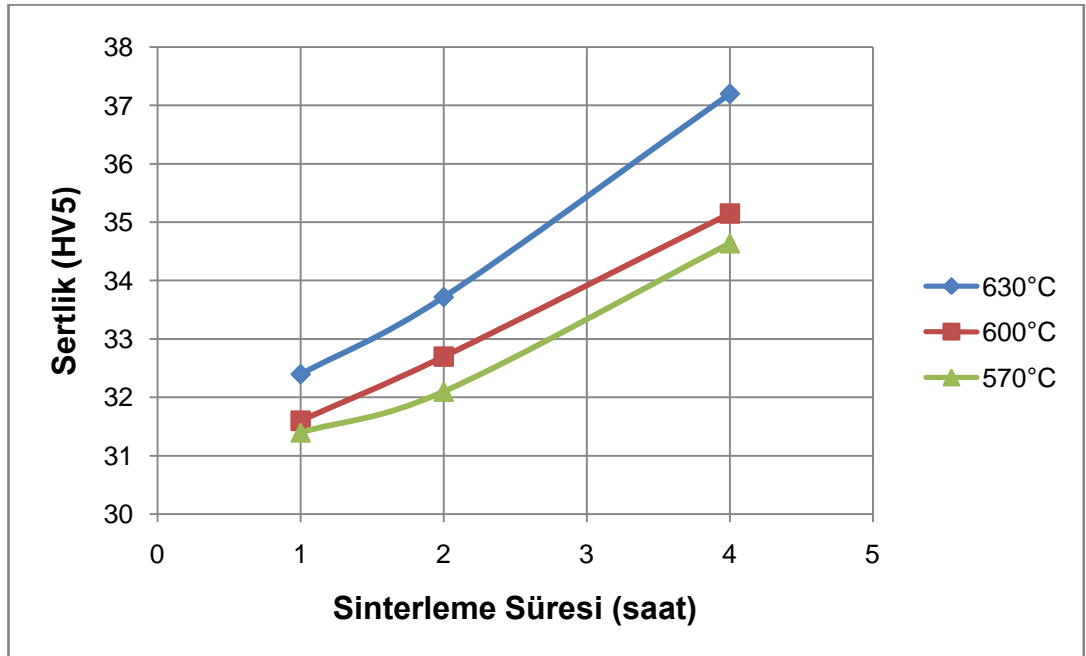
Şekil 5.9'da %5 MgO takviyeli Al matrisli kompozitlerin farklı sinterleme sıcaklıklarında ölçülen Vickers sertlik değerleri grafik şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 5.9. %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre sertlik değişimleri.

Şekil 5.9'daki grafik incelendiğinde artan sinterleme sıcaklığı ile numunelerin sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Buradaki sertlik artışının artan sinterleme sıcaklığı ile teorik yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde edilmesinden veya diğer bir deyişle gözenekliliğin düşmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Kumdalı, (2008); Rahimian vd., (2009) ve Topçu vd., (2009) tarafından da benzer şekilde elde edildiği literatürde belirtilmiştir [9, 17, 22].

Şekil 5.10'da kompozit numunelerin sertlik değerlerinin sinterleme süresine göre değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 5.10. %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre sertlik değişimleri.

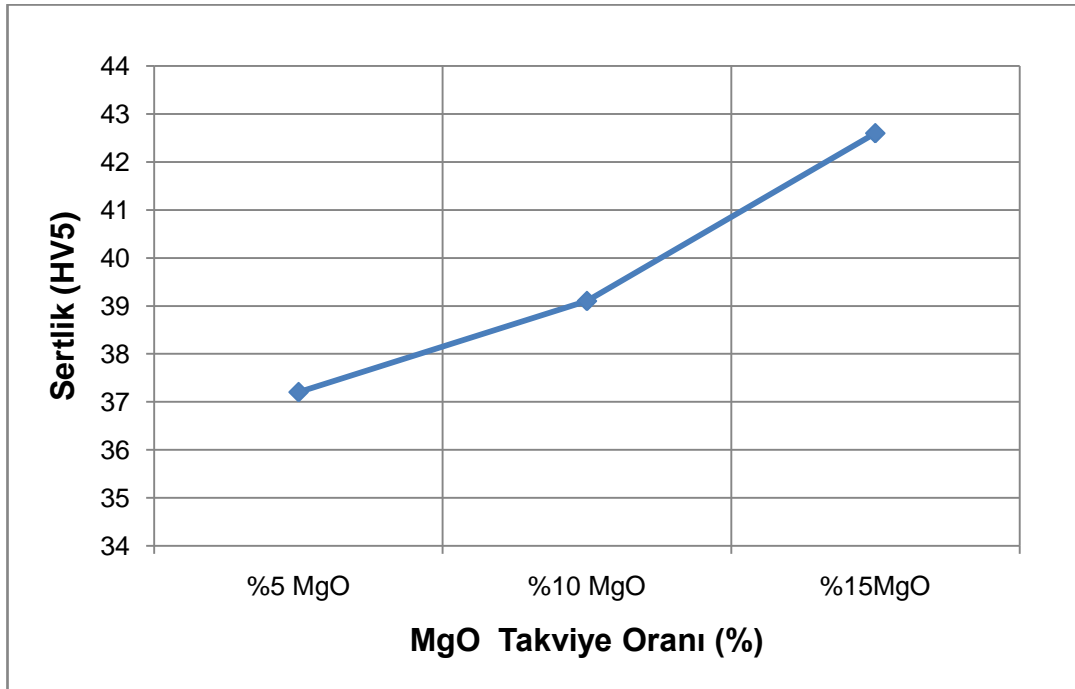
Şekil 5.10 incelendiğinde tüm sıcaklıklarda artan sinterleme süresi ile sertlik değerlerinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artışın artan sinterleme süresi ile teorik yoğunluğa daha yakın sonuç elde edilmesinden veya diğer bir deyişle daha az gözenekli yapı elde edilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Gözeneklilik oranı düşük yapılarda sertlik ölçme cihazının baticı ucunun gözenek üzerine gelme olasılığı da düşüktür.

Kompozit numuneler içerisindeki MgO takviye oranının sertliğe olan etkisi 4'üncü grup numunelerin sertlik ölçümleri sonucunda ortaya konulmuştur ve Çizelge 5.4'de elde edilen sonuçlar verilmiştir. 630°C'de 4 saat sinterlenen 4'üncü grup %5, %10 ve %15 MgO takviyeli numunelerin sertlik sonuçları sırasıyla 37,2HV5– 39,1HV5 – 42,6HV5 şeklinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. İkinci aşama deneylerin sertlik sonuçları.

Grup No	Sıra No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	MgO Takviye Oranı(%)	Sertlik (HV5)
4	10	630°C	4	5	37,2
	11	630°C	4	10	39,1
	12	630°C	4	15	42,6

Şekil 5.11'de 630°C'de 4 saat süre ile yapılan sinterleme sonucunda kompozit numune içerisindeki ağırlıkça %MgO takviye oranının sertliğe etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.11. 630°C'de 4 saat sinterlemede MgO takviye ağırlık oranına göre sertlik değişimi.

Şekil 5.11 incelendiğinde artan %MgO takviye ağırlık oranı ile sertlik değerinin arttığı görülmektedir. MgO takviye oranının artması ile gözeneklilik artış göstermekteydi ve gözenekliliğin artması sonucunda sertlik düşmekteydi, ancak sert faz olan MgO oranının artması gözeneklilikten daha fazla oranda etki ederek kompozitin sertliğini arttırdığı değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar Arık, (2008); Topçu vd., (2009) ve Rahimian vd., (2010) tarafından da benzer şekilde elde edildiği literatürde belirtilmiştir [18,19,22].

5.2. Çapraz Kırılma Mukavemeti (ÇKM) Sonuçlarının İncelenmesi

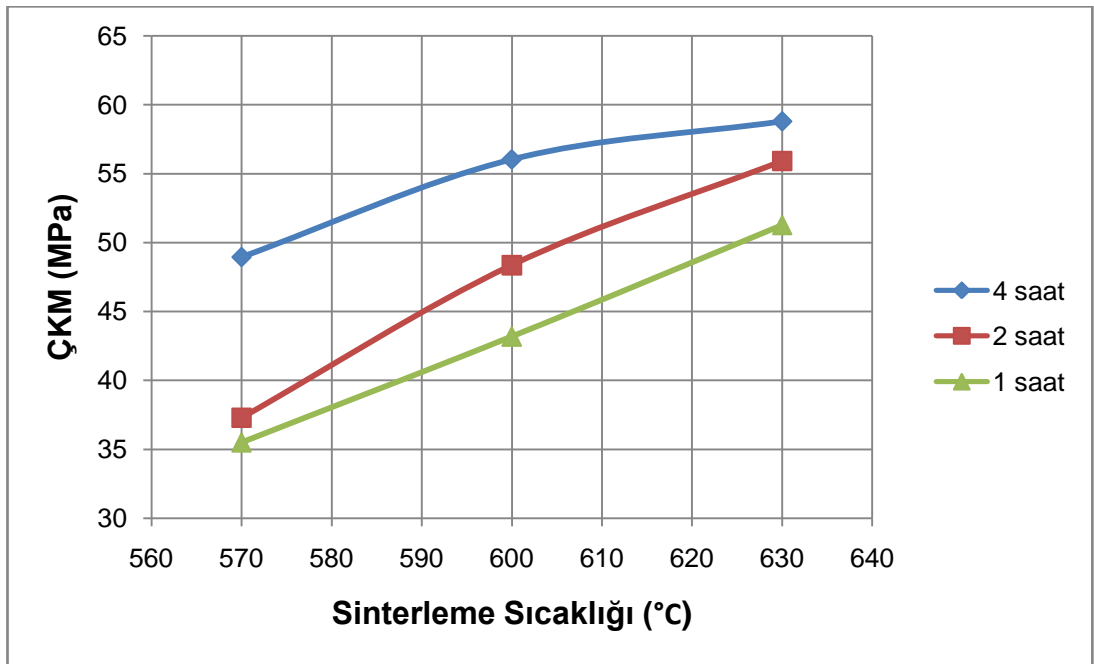
Çizelge 5.5’de 570°C, 600°C ve 630°C sinterleme sıcaklıklarında 1-2-4 saat sürelerde sinterlenen %5 MgO takviye ağırlık oranlı numunelerin çapraz kırılma mukavemetleri verilmektedir. 570°C’de sinterlenen 1’inci grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki ÇKM değerleri ise sırasıyla 35,5MPa – 37,3MPa – 48,95MPa şeklinde gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.5. 1,2,3’üncü grup numunelerin ÇKM sonuçları

Grup No	Sıra No	MgO Takviye Oranı(%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Çapraz Kırılma Mukavemeti (MPa)
1	1	5	570°C	1	35,5
	2	5	570°C	2	37,3
	3	5	570°C	4	48,95
2	4	5	600°C	1	43,18
	5	5	600°C	2	48,36
	6	5	600°C	4	56,04
3	7	5	630°C	1	51,28
	8	5	630°C	2	55,92
	9	5	630°C	4	58,79

600°C'de sinterlenen 2'nci grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki ÇKM değerleri sırasıyla 43,18MPa – 48,36MPa – 56,04MPa şeklinde hesaplanmıştır. 630°C'de sinterlenen 3'üncü grup numunelerin 1-2-4 saatlik sinterleme süresi sonundaki ÇKM değerleri sırasıyla 51,28MPa – 55,92MPa – 58,79MPa şeklinde hesaplanmıştır.

Şekil 5.12'de %5 MgO takviye ağırlık oranlı Al matrisli kompozitlerin farklı sinterleme sıcaklıklarındaki çapraz kırılma mukavemetleri (ÇKM) grafik olarak verilmiştir.

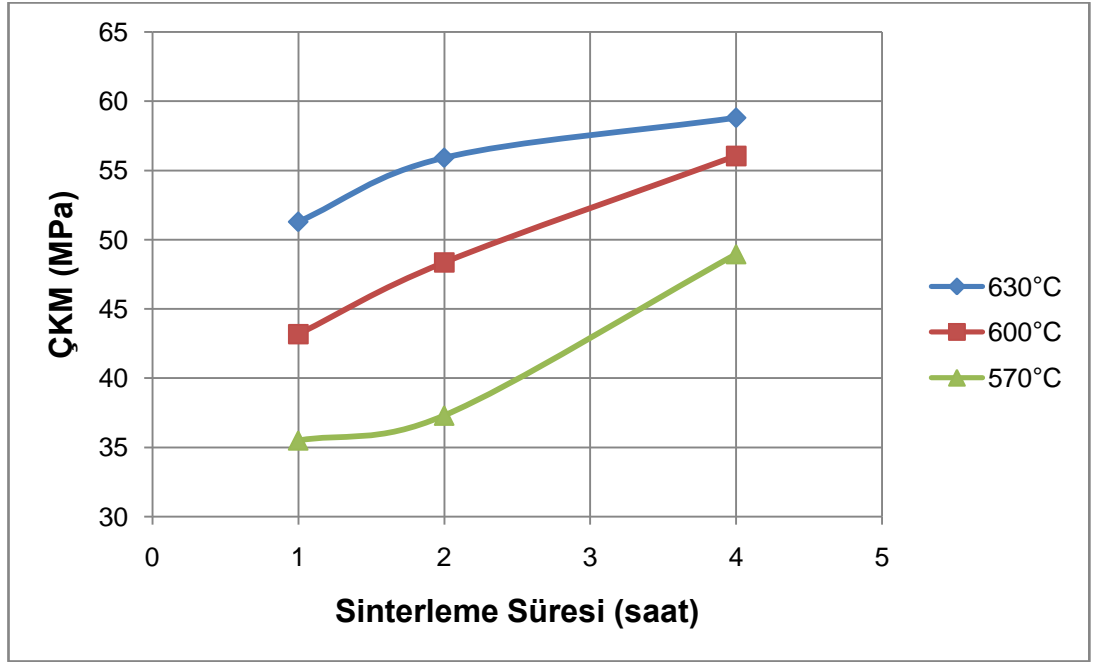


Şekil 5.12. %5 MgO takviye oranlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığına göre ÇKM değişimleri.

Şekil 5.12 incelendiğinde artan sinterleme sıcaklığı ile ÇKM değerlerinin arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda alüminyumun yüzey gerilmesi düşer, ıslatma kabiliyeti artar ve daha kuvvetli arayüzey bağları oluşur [44]. Buradan yola çıkarak ÇKM artışının sebebi; artan sinterleme sıcaklığı ve süresiyle parçacıklar arasında oluşan boyun çapının (X) toz çapına (D) olan oranı (X/D) artmasıyla [20] oluşmuş olan kuvvetli bağ sayesinde parçacıklar arasındaki yük transferinin daha kolay gerçekleşmesi olarak

değerlendirilmiştir. Literatürde Xu vd., (2002) ve Arık (2008)'da bu sonuçlara benzer şekilde ulaştıklarını belirtmişlerdir [19, 20].

Şekil 5.13'de kompozit numunelerin ÇKM değerlerinin sinterleme süresine göre değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 5.13. %5 MgO takviye ağırlık oranlı kompozitlerin sinterleme süresine göre ÇKM değişimleri.

Şekil 5.13 incelendiğinde artan sinterleme süresiyle de ÇKM değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebinin daha uzun sinterleme sürelerinde parçacıklar arasında daha fazla difüzyon gerçekleşmesi sonucunda daha kuvvetli bağ oluşması olduğu değerlendirilmiştir.

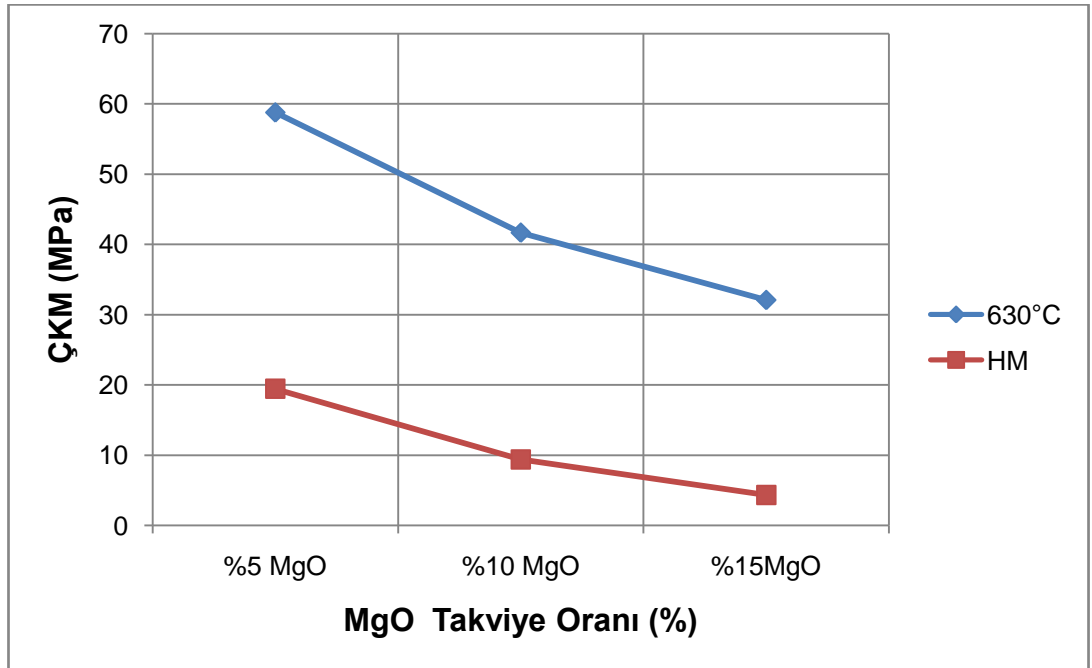
Çizelge 5.6'da yapılan ikinci aşama deneyler sonucunda elde edilen farklı takviye oranındaki deney numunelerin hesaplanan çapraz kırılma mukavemetleri verilmiştir.

630°C'de 4 saat sinterlenen 4'üncü grup %5, %10 ve %15 MgO takviyeli numunelerin ÇKM sonuçları sırasıyla 58,79MPa– 41,66MPa –32,06MPa şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6. İkinci aşama deneylerin ÇKM sonuçları.

Grup No	Sıra No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	MgO Takviye Oranı(%)	Ham Mukavemet (MPa)	Çapraz Kırılma Mukavemeti (MPa)
4	10	630°C	4	5	19,425	58,79
	11	630°C	4	10	9,375	41,66
	12	630°C	4	15	4,325	32,06

Şekil 5.14'de 630°C'de 4 saat süre ile yapılan sinterleme sonucunda ağırlıkça MgO takviye oranının çapraz kırılma mukavemeti (ÇKM) değerine ve ham mukavemet (HM) değerine etkisi grafik olarak gösterilmiştir.

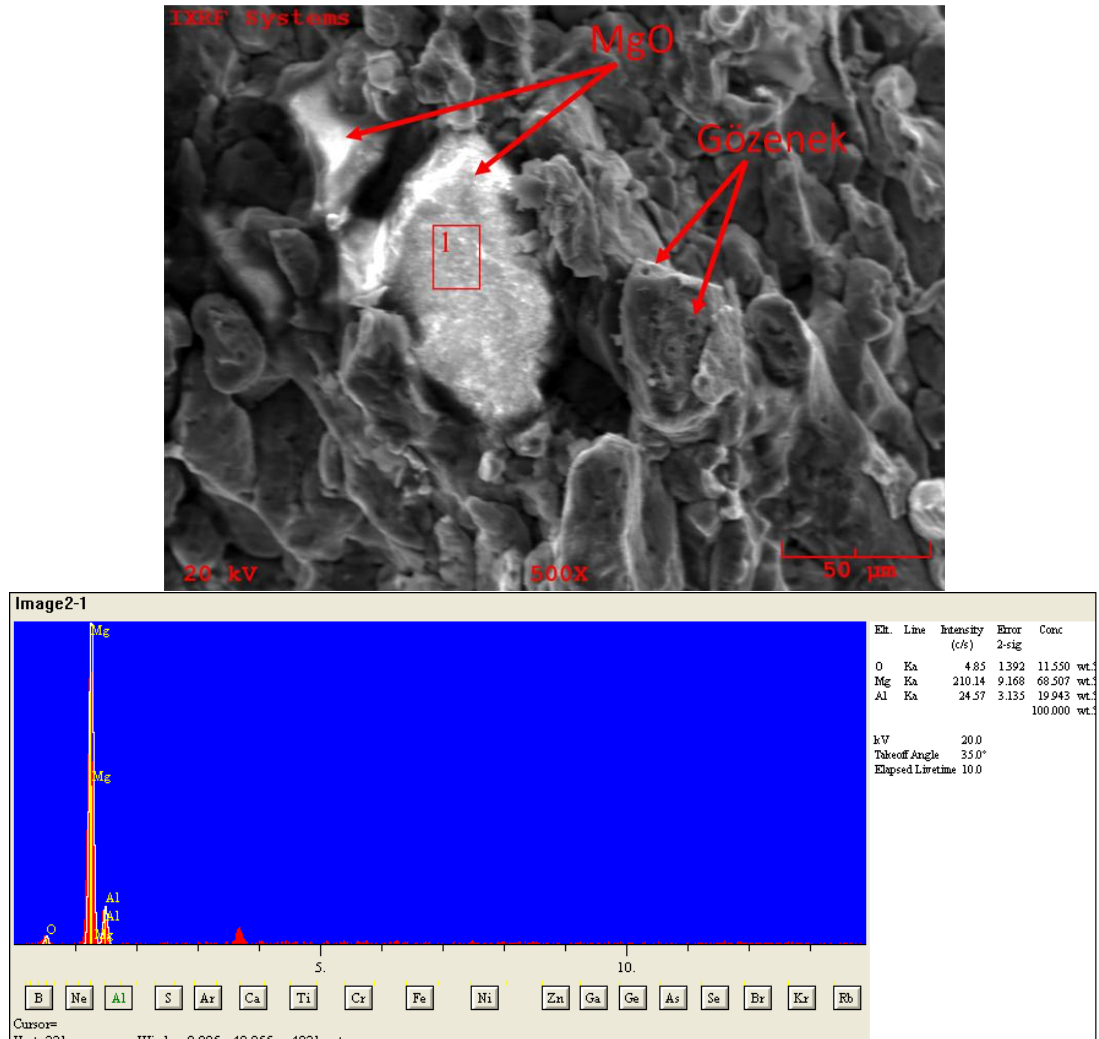


Şekil 5.14. 630°C'de 4 saat sinterlemede MgO takviye ağırlık oranına göre ÇKM değişimi.

Şekil 5.14 incelendiğinde kompozit içerisindeki MgO takviye oranının artması ile ÇKM değerleri düşmektedir. Artan MgO oranı ile gözeneklilik de artmaktadır. Gözenekler kompozit içerisinde mikro çatlaklar gibi davranırlar [42] ve bu oranın artması sonucu yük transferi iyi yapılamadığı ve bu

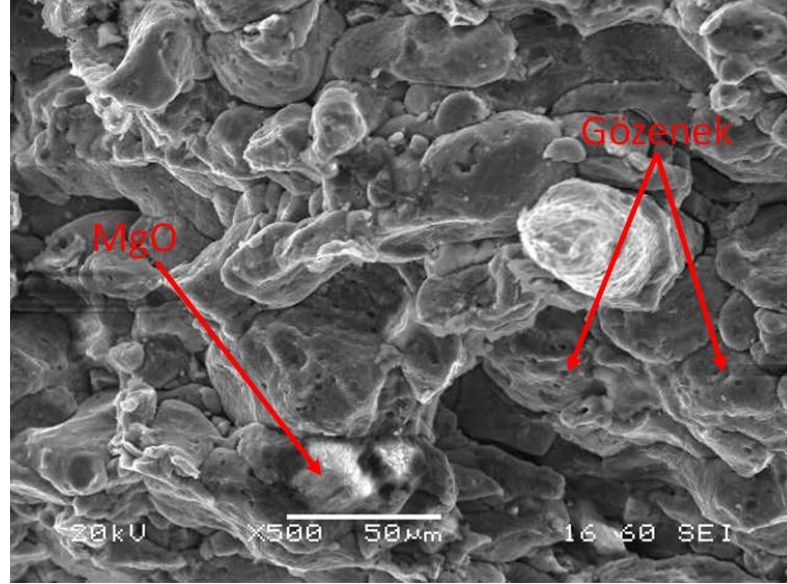
sebepten daha düşük yüklerde kırılmanın gerçekleştiği değerlendirilmiştir. MgO-Al arayüzeyinde ıslatma kabiliyetinin iyi olmayışı da [13] sebepler arasında sayılabilir. Bu sonuçlar Dariavah vd.,2000 ve Arık (2008)'in yaptıkları çalışmalarında da benzer şekilde elde edilmiştir [19,45].

Şekil 5.15'de %5MgO takviyeli 630°C'de 2 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü ve Al ile MgO ayrımının yapılabilmesi için yapılan EDS analizi yer almaktadır.

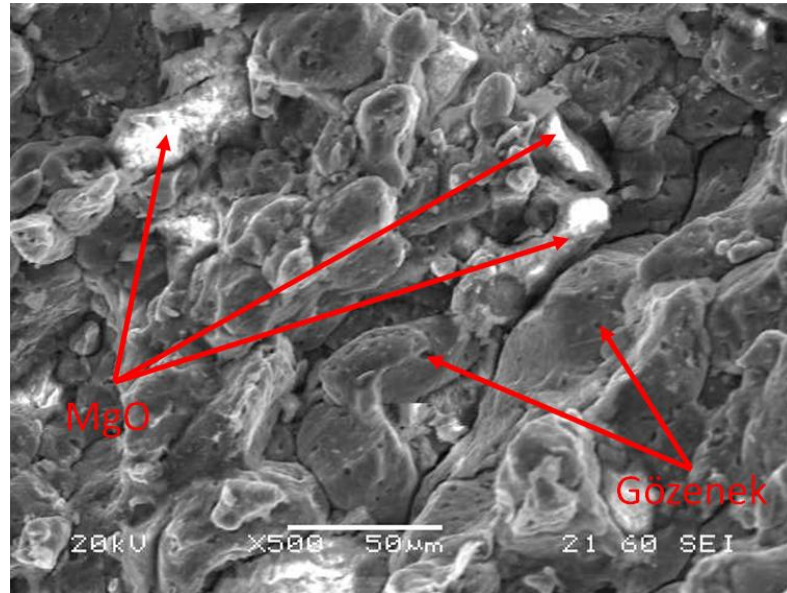


Şekil 5.15. %5 MgO takviyeli 630°C'de 2 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzeyi ve yapılan EDS analizi.

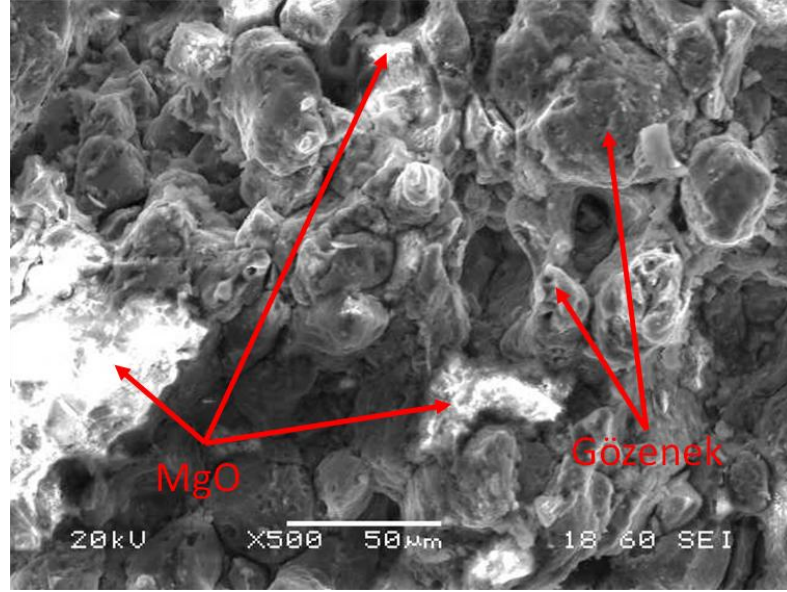
Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de 630°C'de 4 saat süreyle sinterlenmiş sırasıyla %5-%10-%15MgO takviyeli kompozitlerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.16. %5 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü.



Şekil 5.17. %10 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü.



Şekil 5.18. %15 MgO takviyeli 630°C'de 4 saat sinterlenmiş kompozitin kırık yüzey görüntüsü.

Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 incelendiğinde kırılmaların Al-MgO arayüzeyinden ve tane sınırlarından gerçekleştiği görülmektedir. Tane sınırlarında yer alan küresel gözeneklerin çentik etkisi yaparak kırılmayı kolaylaştırdığı değerlendirilmiş ve ÇKM değerlerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada %5, %10, %15 ağırlık oranlarında MgO takviyeli Al matrisli kompozitler T/M yöntemiyle üretilmiştir. %5 MgO takviyeli Al matrisli kompozitler 570°C, 600°C ve 630°C sıcaklıklarda sırasıyla 1-2-4 saat sürelerde sinterlenmişlerdir. Üretilen Al-MgO kompozitlerde sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve takviye oranının yoğunluk, sertlik ve ÇKM gibi mekanik özelliklerine etkileri araştırılarak OM ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Sinterleme süresindeki artış ile beraber Al-MgO kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve ÇKM değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Sinterleme sıcaklığının artması ile düşen gözeneklilik sayesinde yoğunluk ve sertlik değerlerinde yükselme gözlenmiştir. Artan sıcaklık ile gerçekleşen kuvvetli arayüzey bağları sayesinde daha yüksek ÇKM değerleri elde edilmiştir.
- %MgO takviye oranının artmasıyla kompozitlerdeki gözeneklilik oranlarının yükseldiği tespit edilmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde artan takviye oranının sertliği artırdığı görülmüştür. Artan gözeneklilik ise mikro çatlak etkisini artırdığı için kompozitlerin ÇKM değerlerini düşürmüştür.
- Kırık yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde kırılmanın arayüzeylerde ve matris tane sınırlarında gerçekleştiği görülmüştür.
- Gözeneklerin takviye elemanı etrafında ve tane sınırlarında yer aldığı SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir.
- Kompozit yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde oksitlenmeden dolayı Al-Al arayüzeylerinde sinterleşmenin kötü olduğu ve Al-MgO arayüzeylerinde ıslatmanın zayıf olduğu görülmüştür.
- En düşük gözeneklilik oranı %4,4738 ile 630°C'de 4 saat süreyle sinterlenen %5 MgO takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. En yüksek gözeneklilik oranı ise %7,834 ile 630°C'de 4 saat süreyle sinterlenen

%15 MgO takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. Artan gözeneklilik oranları OM ve SEM görüntüleri ile desteklenmiştir.

Bu konuyla ilgili bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki konular araştırılabilir;

- 500 MPa basıncın altında ve üzerindeki değerlerde yapılacak sıkıştırma işlemleri sonucunda sıkıştırma basıncının mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.
- T/M yöntemi ile üretilmiş Al-MgO kompozitlerin aşınma davranışlarının sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı, takviye oranı ve sıkıştırma basıncına göre değişimleri araştırılabilir.
- Bu çalışmada kullanılan 76,39 μm Al ve 29,53 μm MgO ortalama toz boyutlarından daha küçük tozlar ile üretilen kompozitlerin sinterlenebilirlikleri ve mekanik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Günay, M., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-SiC Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2009.
- [2] Çalın R., Çıtak R., Effect of Powder Size on Infiltration Height in Producing MgO Reinforced Al Matrix Composite By Vacuum Infiltration Method. Materials Science Forum Vols., 534-536, s.797-800, 2007.
- [3] Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [4] Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş., Sarıtaş, S., Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Tanecikli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. Uluslararası Katılımlı 2.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Eylül 1999, ODTÜ., Ankara, s.621-629, 1999.
- [5] Soy, U., Metal Matriks Kompozit Malzemeler, Sakarya Üniversitesi. <http://www.ugursoy.sakarya.edu.tr> (Erişim tarihi: 08.12.2010)
- [6] Çalın, R., Effect of Reinforcement Volume Ratio on Thermal Conductivity of SiO₂ Reinforced Al Matrix Composite Produced by Vacuum Infiltration Method. Asian Journal of Chemistry, Vol.22, No 1, s.808-814, 2010.
- [7] Çalın R., Çıtak R., Effect of Mg Content of Matrix on Infiltration Height in Producing MgO Reinforced Al Matrix Composite By Vacuum Infiltration Method. Material Science Forum Vols.546-549, s.611-614, 2007.
- [8] Pul, M., Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.

- [9] Kumdalı, F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [10] Aydın, Ş., Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1997.
- [11] Özkan, S., Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [12] Çalın R., Çıtak R., Designing of a Powder Compressing Device With Vibration and Investigation of Compressibility of MgO Powders With This Device. Materials and Design Vol, 28 N 10, s.2654-2657, 2007.
- [13] Çalın R., Çıtak R., Effect of Vacuum on Infiltration Height in Producing MgO Reinforced Al Matrix Composite By Vacuum Infiltration Method. ICIT-MPT International Conference on Industrial Tools and Materials, Bled, Slovenya, 11-14 Eylül 2007.
- [14] Aydın, H., MgO Parçacık Takviyeli Alüminyum Matris Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [15] Kılıç, E.F., Alüminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.

- [16] Yanıkçı, G., SiC Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin T/M ve Döküm Yöntemi ile Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [17] Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., Baharvandi, H.Z., The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy. Journal of Materials Processing Technology, Vol 209, s.5387-5393, 2009.
- [18] Rahimian, M., Parvin, N., Ehsani, N., Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. Material Science and Engineering, Vol 527, s.1031-1038, 2010.
- [19] Arık, H., Effect of mechanical alloying process on mechanical properties of α -Si₃N₄ reinforced aluminum based composite materials. Materials and Design, Vol 29, s.1856-1861, 2008.
- [20] Xu, X., Lu, P., German, R.M., Densification and strength evolution in solid-state sintering. Journal of Materials Science, Vol 37, s.117-126, 7 2002.
- [21] Simchi, A., Effects of lubrication procedure on the consolidation, sintering and microstructural features of powder compacts. Materials and Design, Vol 24, s.585-594, 2003.
- [22] Topçu, İ., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N., Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites. Journal of Alloys and Compounds, Vol 482, s.516-521, 2009.
- [23] Angelo, P.C., Subramanian, R., Powder Metallurgy Science, Technology and Applications. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 2008.

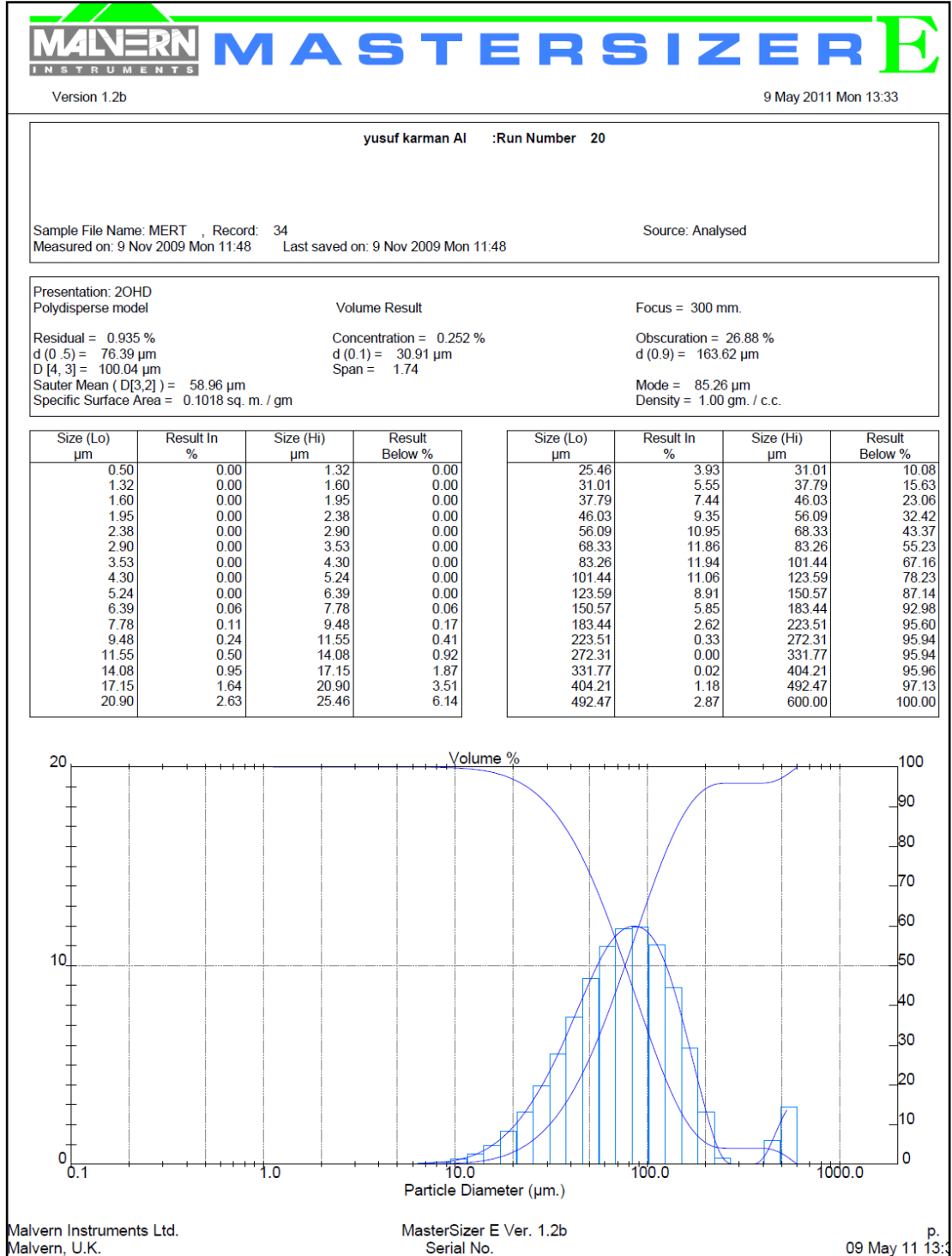
- [24] Dowson, G., Powder Metallurgy The Process and its Products. Adam Hilger, Bristol and New York, 1990.
- [25] Akdoğan Eker, A., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi.
http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son.pdf
(Erişim tarihi: 08.12.2010)
- [26] Sarıtaş, S., Mühendislik Gereçleri, Makina Mühendisliği El Kitabı Cilt 1. TMMOB Yayın no:169, Ankara, 1994.
- [27] Sheppard, L., The Powder Metallurgy Industry Worldwide 2007-2012.
<http://www.mat-tech.co.uk/> (Erişim tarihi:06.03.2011)
- [28] Anonim, European Powder Metallurgy Association,
<http://www.epma.com> (Erişim tarihi:06.03.2011)
- [29] Whittaker, D., Introduction to Powder Metallurgy The Process and Its Products.
http://www.epma.com/New_non_members/pdf/Intro_to_PM_final.pdf (Erişim tarihi:06.03.2011)
- [30] Uslan, İ., Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri Ders Notları, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [31] Peace, L.F., West, W.G., Fundamentals of Powder Metallurgy. Metal Powder Industries Federation, Princeton, N.J., 2002.
- [32] Anonim, Metal Powder Industries Federation,
<http://www.mpif.org/IntroPM/intropm.asp?linkid=1>
(Erişim tarihi:11.03.2011)
- [33] German, R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.

- [34] Verlinden, B., Froyen, L., Aluminium Powder Metallurgy, University of Leuven. <http://www.eaa.net/aaa/education/talat/lectures/1401.pdf> (Erişim tarihi: 08.12.2010)
- [35] Anonim, [http://www.google.com.tr/search?q=powder+mixer & hl = tr&sa = N&prmd = ivns&tbm = isch&tbo = u&source = univ&ei = dzygTcj-IZHtsqb7p9HQCg & ved = 0CFgQsAQ&biw = 1003 & bih = 596 |blending](http://www.google.com.tr/search?q=powder+mixer&hl=tr&sa=N&prmd=ivns&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ei=dzygTcj-IZHtsqb7p9HQCg&ved=0CFgQsAQ&biw=1003&bih=596|blending) (Erişim tarihi: 08.04.2011)
- [36] German, R.M., Park, S.J., Mathematical Relations in Particulate Material Processing. John Wiley & Sons Inc. Publication, USA, 2008.
- [37] Smith, W.F., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayınları, İstanbul, 2005.
- [38] Verlinden, B., Froyen, L., Aluminium Matrix Composite Materials, University of Leuven. <http://www.core.materials.ac.uk/repository/aaa/talat/1402.pdf> (Erişim tarihi: 08.12.2010)
- [39] Min, K.H., Kang, S.P., Kim, D.G., Kim, Y.D., Sintering Characteristic of AlO-reinforced 2xxx Series Al Composite Powders. Journal of Alloys and Compounds, Vol 400, s.150-153, 2005.
- [40] Kim, T.W., Determination of Densification Behavior of Al-SiC Metal Matrix Composite During Consolidation Processes. Materials Science and Engineering A 483-484, s.648-651, 2008.
- [41] Tatar, C., Özdemir, N., Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α -Al₂O₃ particulate reinforced Al composites (Al/Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method. Physica B 405, s.896-899, 2010.

- [42] Liu, Z.Y., Wang, Q.Z., Xiao, B.L., Ma, Z.Y., Liu, L., Experimental and modeling investigation on SiC_p distribution in powder metallurgy processed SiC_p/2024 Al composites. *Materials Science and Engineering A* 527, s.5582-5591, 2010.
- [43] Bhattacharyya, M., Kumar, A.N., Kapuria, S., Synthesis and characterization of Al/SiC and Ni/ Al₂O₃ functionally graded materials. *Materials Science and Engineering A* 487, s.524-535, 2008.
- [44] Wang, H., Zhang, R., Hu, X., Wang, C.A., Huang, Y., Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu-Al composite. *Journal of Material Processing Technology* 197, s.43-48, 2008.
- [45] Dariavach, N.G., Rice, J.A., Electromigration and the electroplastic effect in aluminum SiC MMCs. *Journal of the Minerals, Materials and Material Society*, Vol 52, s.40-42, 2000.

EKLER

EK-1 Al toz boyut analiz raporu.



EK-2 MgO toz boyut analiz raporu.

