

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI ORANLARDA SiC TAKVİYESİNİN SICAK PRES İLE  
ÜRETİLEN MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
SERTLİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**BEYZA BİÇER**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI ORANLARDA SiC TAKVİYESİNİN SICAK PRES İLE**  
**ÜRETİLEN MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN**  
**SERTLİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**BEYZA BİÇER**

**Prof. Dr. Muzaffer ZEREN**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Kenan YILDIZ**

**Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 30.01.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda öncelikli olarak otomotiv sektörü olmak üzere bir çok alanda sağladığı avantajlarla öne çıkan magnezyum alaşımlarının hafif olmasının yanı sıra bir de sertlik ve aşınma direncinin geliştirilmesi amacı ile bu çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada toz metalurjisi yönteminden faydalanılmıştır.

Eğitimimin ilk senesinde benim bu konuya ilgi duymamı sağlayan eski danışmanım ve üniversitemiz bünyesinden ayrılan Erdem KARAKULAK'a, ardından bana hem üniversite hem iş hayatımda yol gösteren, elimden tutan ve çalışmalarım boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muzaffer ZEREN'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarına öncülük eden, her türlü imkanlardan faydalanmamı sağlayan Doç.Dr Rıdvan YAMANOĞLU'na minnetlerimi sunuyorum. Çalışmalarımı destekleyen ve danıştığım konularda yardımcı olan, Arş. Gör. Fulya KAHRIMAN'a, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarımla hepsine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her anında bana desteklerini sunan, beni her konuda cesaretlendiren ve her zaman güç veren, en kıymetli varlığım canım aileme en derin teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Ocak – 2021

Beyza BİÇER

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ .....	1
1. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ .....	3
1.1. Matris Fazlarına Göre Kompozit Malzemeler .....	3
1.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler .....	3
1.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler .....	5
1.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler.....	6
1.2. Takviye Fazlarına Göre Kompozit Malzemeler.....	7
1.2.1. Fiber takviyeli kompozitler.....	7
1.2.2. Lamine katmanlı kompozitler .....	9
1.2.3. Partikül takviyeli kompozitler .....	10
1.2.4. Whisker takviyeli kompozitler.....	11
2. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	13
2.1. Karıştırmalı Döküm (Stir Casting).....	13
2.2. Toz Metalurjisi .....	15
2.3. Sıkıştırma Döküm (Squeeze Casting) .....	19
2.4. Sprey Çöktürme (Spray Deposition).....	21
3. MAGNEZYUMA GENEL BAKIŞ .....	23
3.1. Magnezyumun Tarihi .....	23
3.2. Magnezyumun Temel Özellikleri .....	23
3.2.1. Atomik özellikler ve kristal yapı .....	23
3.2.2. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	24
3.3. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	25
3.4. Magnezyumun Uygulama Alanları .....	26
3.4.1. Otomotiv uygulamaları .....	26
3.4.2. Havacılık uygulamaları.....	27
3.4.3. Spor uygulamaları.....	27
3.4.4. Elektronik uygulamalar.....	28
4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ.....	29
4.1. Saf Magnezyum .....	29
4.2. Silisyum Karbür Takviyeli Magnezyum Matrisli Kompozitler .....	30
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	32
5.1. Çalışmada Kullanılan Tozlar.....	32
5.2. Tozların Basınç Destekli Sıcak Presle Sinterlenmesi .....	33
5.3. Üretilen Numunelerin Metalografik İşlemleri .....	35
5.4. Yoğunluk Ölçümü .....	36
5.5. Mekanik Testler .....	37
5.5.1. Aşınma testi .....	37

5.5.2. Sertlik ölçümü.....	38
5.6. Mikroyapısal Karakterizasyon .....	38
5.6.1. SEM ve EDX incelemesi .....	38
5.6.2. Optik mikroskop incelemesi .....	39
6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	40
6.1. Yoğunluk Sonuçları .....	40
6.2. Metalografik Hazırlık.....	41
6.3. Aşınma Testi Sonuçları .....	41
6.4. Sertlik Testi Sonuçları.....	43
6.5. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) Aşınma İzlerinin İncelemesi .....	44
6.6. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) Faz İncelemesi .....	47
6.7. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDX) ve Mapping İncelemesi .....	51
6.8. Işık Mikroskobu İncelemesi .....	58
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	60
KAYNAKLAR .....	62
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Metal matrisli kompozitten üretilen gaz türbin motoru .....	5
Şekil 1.2.	Takviye fazlarının yaygın çeşitleri .....	8
Şekil 1.3.	Lamine katmanlı kompozitlerin şematik gösterimi .....	10
Şekil 1.4.	a) Silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ) b) Silisyum karbür (SiC) whiskerların SEM görüntüleri .....	12
Şekil 2.1.	Karıştırmalı döküm yöntemi .....	13
Şekil 2.2.	Toz metalurjisi üretim akım şeması .....	15
Şekil 2.3.	(a) 0, (b) 60, (c) 120 ve (d) 290 Monte Carlo simülasyonu ile üçlü bir karışımın karıştırma genlikleri .....	16
Şekil 2.4.	Bilyaların partiküller ile çarpışması esnasında oluşan yapılar .....	17
Şekil 2.5.	a) Tek yönlü presleme, b) Çift yönlü presleme .....	17
Şekil 2.6.	Sinterleme kademeleri .....	18
Şekil 2.7.	Sıkıştırma döküm prosesinin şematik diyagramı a) ön ısıtma b) eriyiğin kalıp boşluğuna aktarımı c) eriyiğin basınç altında katılaşması d) katılaştıran parçanın kalıp boşluğundan ayrılması .....	20
Şekil 2.8.	Sprey çöktürme işleminin proses şeması .....	21
Şekil 2.9.	Sprey çöktürme ile üretilen farklı şekillerin şematik gösterimi .....	21
Şekil 3.1.	Magnezyum otomotiv bileşenleri a) 0,75 kg ağırlığındaki Toyota için direksiyon göbeği b) 2,6 kg ağırlığındaki Jaguar ve Fiat için koltuk desteği c) AZ91D'den 2,7 kg ağırlığındaki aktarma elemanı ve d) AZ91 Ford motor için 0,9 kg ağırlığında kam kapak .....	26
Şekil 3.2.	Magnezyum spor malzemeleri: (A) golf klübü başı, yüksek kaliteli magnezyumdan, (B) Magnezyum şasili sıralı patenlerden, (C) Magnezyum başlıklı tenis raketi ve (D) Magnezyum çerçeveli bisiklet .....	27
Şekil 5.1.	Deneysel çalışmada kullanılan SiC partiküllerinin SEM görüntüleri .....	32
Şekil 5.2.	Deneysel çalışmada kullanılan saf magnezyum partiküllerinin SEM görüntüleri .....	33
Şekil 5.3.	Deneysel çalışmada yararlanılan sıcak pres .....	34
Şekil 5.4.	Deneysel çalışmada kullanılan grafit kalıp ve üretilen numuneler (soldan sağa sırasıyla saf Mg, %10 SiC takviyeli, %20 SiC takviyeli, %30 SiC takviyeli, %30 SiC + %5 grafit takviyeli) .....	35
Şekil 5.5.	Sinterleme işlemi için uygulanan zaman-sıcaklık grafiği .....	35
Şekil 5.6.	a) Zımparalama cihazı, b) Parlatma cihazı .....	36
Şekil 5.7.	Ultrasonik temizleme cihazı .....	36
Şekil 5.8.	Hassas terazi .....	37
Şekil 5.9.	Aşınma testi cihazı .....	37
Şekil 5.10.	Vickers sertlik ölçüm cihazı .....	38
Şekil 5.11.	Taramalı elektron mikroskobu .....	38
Şekil 5.12.	Optik mikroskop .....	39
Şekil 6.1.	Yoğunluk-takviye oranı grafiği .....	40
Şekil 6.2.	Özgül aşınma miktarı grafiği .....	42

Şekil 6.3.	Takviye oranı artışına bağlı olarak aşınma testi sonrası ağırlık kaybı değişim grafiği.....	43
Şekil 6.4.	Vickers sertlik ölçüm sonuçları.....	43
Şekil 6.5.	a) Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+ %5 grafit takviyeli kompozitin 8x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri.....	45
Şekil 6.6.	a )Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 35x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri.....	46
Şekil 6.7.	a) Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 100x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri.....	47
Şekil 6.8.	a) Saf Mg ,b)%10 SiC takviyeli, c)%20 SiC takviyeli, d)%30 SiC takviyeli, e)%30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 100x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	48
Şekil 6.9.	a)Saf Mg ,b)%10 SiC takviyeli, c)%20 SiC takviyeli, d)%30 SiC takviyeli, e)%30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 300x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	49
Şekil 6.10.	a) Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 500x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	50
Şekil 6.11.	Saf magnezyum numunesinde EDX analizi için seçilen 1 nolu bölge .....	51
Şekil 6.12.	Seçilen bölge için EDX analizi sonucu .....	51
Şekil 6.13.	Saf magnezyum numunesinde EDX analizi için seçilen üç farklı bölge .....	51
Şekil 6.14.	(a) 1 numaralı, (b) 2 numaralı, (c) 3 numaralı seçili bölgeler için EDS analizi sonucu .....	52
Şekil 6.15.	%10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozit numunenin EDS analizi için seçilen bölgeler.....	52
Şekil 6.16.	(a) 1 numaralı, (b) 2 numaralı, (c) 3 numaralı seçili bölgeler için EDX analizi sonucu .....	53
Şekil 6.17.	%10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü .....	54
Şekil 6.18.	Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi .....	54
Şekil 6.19.	%10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu .....	55
Şekil 6.20.	%20 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü ....	55
Şekil 6.21.	Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi .....	55
Şekil 6.22.	%20 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu .....	56
Şekil 6.23.	%30 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü ....	56
Şekil 6.24.	Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi .....	56
Şekil 6.25.	%30 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu .....	57

Şekil 6.26. %30 SiC+%5 grafit takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	57
Şekil 6.27. Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi .....	57
Şekil 6.28. %30 SiC+%5 grafit takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu .....	58
Şekil 6.29. 5x büyütme sahip a) saf magnezyum, b) %10 SiC, c) %20 SiC d) %30 SiC e) %30 SiC + %5 grafit takviyeli kompozit numunelerin ışık mikroskop görüntüsü .....	58
Şekil 6.30. 10x büyütme sahip a) saf magnezyum, b) %10 SiC, c) %20 SiC d) %30 SiC e) %30 SiC + %5 grafit takviyeli kompozit numunelerin ışık mikroskop görüntüsü.....	59





## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri .....	4
Tablo 1.2. Sı birim sistemine göre mekanik özellikler.....	7
Tablo 1.3. Polimer matrisli malzemelerde kullanılan fiberlerin mekanik özellikleri.....	7
Tablo 1.4. Çeşitli seramik partiküllerin mekanik ve fiziksel özellikleri .....	11
Tablo 1.5. Whisker özellikleri .....	12
Tablo 3.1. Magnezyumun atomik özellikleri ve kristal yapısı .....	24
Tablo 3.2. Magnezyumun fiziksel özellikleri.....	24
Tablo 3.3. Saf Magnezyumun mekanik özellikleri (20°C).....	24
Tablo 3.4. Magnezyumun sınıflandırılması.....	25
Tablo 4.1. SiC partikül takviyeli AZ91 alaşımının mekanik özellikleri .....	31
Tablo 6.1. Takviye oranlarına göre teorik ve Arşimet yoğunlukları .....	40
Tablo 6.2. Aşınma testi öncesi ve sonrası tartım sonuçları .....	41
Tablo 6.3. Özgül aşınma miktarı .....	42
Tablo 6.4. Sertlik testi sonuçları .....	43
Tablo 6.5. Aşınma izi genişlikleri( $\mu\text{m}$ ).....	44

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\mu\text{m}$  : Mikrometre  
r : Yarıçap

### Kısaltmalar

$\text{Al}_2\text{O}_3$  : Alüminyum Oksit  
Ar-Ge : Araştırma ve Geliştirme  
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Standart Test Metodu)  
 $\text{B}_4\text{C}$  : Bor Karbür  
CIP : Cold Isostatic Pressing (Soğuk İzostatik Presleme)  
CMC : Ceramic Matrix Composite (Seramik Matrisli Kompozit)  
EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımlı Spektroskopi)  
HB : Brinell Ölçeğinde Sertlik Değeri  
HSP : Hegzagonal Sıkı Paket  
HV : Vickers Ölçeğinde Sertlik Değeri  
MA : Mekanik Alaşımlama  
 $\text{MgCO}_3$  : Manyezit  
MgO : Magnezyum Oksit  
MMC : Metal Matrix Composite (Metal Matrisli Kompozit)  
OM : Optical Microscopy (Optik Mikroskop)  
PM : Powder Metallurgy (Toz Metalurjisi)  
PMC : Polymer Matrix Composite (Polimer Matrisli Kompozit)  
rpm : Revolution Per Minute ( Dakikadaki Devir Sayısı)  
SC : Squeeze Casting (Sıkıştırma Döküm)  
SiC : Silisyum Karbür  
 $\text{Si}_3\text{N}_4$  : Silisyum Nitrür  
 $\text{SiO}_2$  : Silisyum Dioksit  
SP : Sıcak Presleme  
TEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)  
 $\text{ThO}_2$  : Toryum Dioksit  
TiC : Titanyum Karbür  
Tm : Melting Temperature (Erime sıcaklığı)

## FARKLI ORANLARDA SiC TAKVİYESİNİN SICAK PRES İLE ÜRETİLEN MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN SERTLİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

### ÖZET

Magnezyum matrisli kompozitler özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sektörlerinde çok çeşitli uygulamaları olan yüksek potansiyelli malzemelerdir. Düşük yoğunluk, iyi mekanik ve fiziksel özellikler bu malzeme grubunun kullanımını arttırmıştır. Saf magnezyum düşük yoğunluk, düşük mukavemet, düşük sürünme ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler magnezyumun çalışma alanlarını sınırlandırmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında toz metalurjisi yönteminden faydalanılmıştır. Magnezyumun oksijene karşı yüksek reaktivitesi nedeniyle kompozit malzeme üretimlerinde vakum altında basınç destekli bir sinterleme yöntemi tercih edilmiştir. Magnezyum ve SiC partikülleri mekanik alaşımlama yapılarak 570°C'de sinterlenmiş, kompozit malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Partikül katkı oranının mikroyapı ve özelliklere etkisini incelemek için %99 saflıkta magnezyum partikülleri içerisine %10 SiC, %20 SiC, %30 SiC ve %30 SiC'e %5 grafit ilavesi yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları optik mikroskop (OM), enerji dağılımlı spektroskopi analiz ünitesi (EDS) tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda saf magnezyumun sertlik ve aşınma direnci özellikleri geliştirilerek, hafif ve yüksek dayanımlı bir kompozit malzeme eldesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma Direnci, Kompozit, Magnezyum, Silisyum Karbür, Toz Metalurjisi.

# **THE EFFECT OF DIFFERENT RATIOS OF SILICON CARBIDE REINFORCEMENT ON THE HARDNESS AND WEAR PROPERTIES OF MAGNESIUM MATRIX COMPOSITES PRODUCED BY HOT PRESS**

## **ABSTRACT**

Magnesium matrix composites are high-potential technology in a wide variety of locations in the automotive, aerospace and defense industries. Low density, good mechanical and physical properties have increased the functionality of this group of materials. Pure magnesium has properties such as low density, low strength, low creep and corrosion. These properties limited working areas of magnesium.

Powder metallurgy method was used in thesis. It was preferred due to the high reactivity of magnesium, productions were carried out under vacuum atmosphere and pressure supported sintering method was preferred. Magnesium and SiC particles were sintered at 570°C by mechanical alloying and microstructural and mechanical properties of composites were investigated. In order to examine the effect of particle volume ratio on pure magnesium particles microstructure and properties, 10% SiC, 20% SiC, %30 SiC and 5% graphite were added to %30 SiC. The microstructures of the composites were examined by optical microscopy (OM), energy dispersive spectroscopy analysis unit (EDS) scanning electron microscope (SEM).

As a result of this studies, it was aimed to obtain a light and high strength material by improving the hardness and abrasion resistance properties of pure magnesium.

**Keywords:** Wear Resistance, Composite, Magnesium, Silicon Carbide, Powder Metallurgy.

## GİRİŞ

Magnezyum ticari olarak kolayca temin edilebildiği için mükemmel bir metaldir ve tüm yapısal metaller arasında  $1.7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğuyla en hafif metal olma özelliği taşımaktadır [1]. Magnezyum esaslı malzemeler, düşük yoğunluklu ve yüksek sertlik-ağırlık oranlarına bağlı olarak otomotiv, malzeme işleme, endüstriyel ve havacılık ekipmanları uygulamaları için artan bir önem kazanmaktadır [2]. Düşük yoğunluğa sahip malzemeler yakıt tüketiminde düşüşe ve taşıma kapasitesinde artışa izin vermektedir. Örneğin otomobillerde, yaklaşık 100 kg'lık bir azalma ile 100 km'de 0,5 litrelik yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Yakıt tüketimini azaltmak için hafif fakat aynı zamanda güvenilir malzeme kullanılması zorunludur. Başka bir deyişle, yüksek dayanım ve tokluk araçlarda yeterli performansın ve güvenliğin sağlanmasında gerekli iken, korozyon direnci de tasarım ömrünün artmasına yardım etmektedir. Otomobillerde ağırlık kazancının önemi giderek artmakta ve bu doğrultuda alüminyumdan %35 daha hafif olan magnezyum büyük ilgi çekmektedir. Magnezyum alaşımları alüminyum alaşımlarına karşı ümit verici şekilde alternatif olma yolundadır. Otomotiv endüstrisindeki magnezyum kullanımındaki artış, geçen 10 yıl içerisinde her yıl %15 olarak gerçekleşmiştir [3].

Oda sıcaklığında magnezyum ve alaşımlarının altıgen paketleniş kristal yapısı nedeniyle deforme olması zordur. Bu yapı, daha düşük sıcaklıklarda daha az kayma sistemine sahip olduğundan deformasyon yeteneğini sınırlar. Magnezyum orta derecede erime sıcaklığına sahiptir. Korozyona karşı hassastır. Magnezyum ısıtıldığında kolayca tutuşur ve toz halinde çok dikkatli kullanılmalıdır [1].

Seramik takviyelerle elastik modülleri, kuvvetleri ve yüksek sıcaklık özellikleri iyileştirilebilirse magnezyum ve alaşımlarının uygulama aralıkları daha da genişletilebilir. Matris malzemesi ve partikül takviyesi arasındaki reaksiyonlar önemlidir. Magnezyum herhangi bir karbür oluşturmadığından SiC, magnezyum matrisli kompozitler için en uygun takviyelerden biridir [2].

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile %99 saflıktaki magnezyuma farklı oranlarda SiC ve grafit partikül ilavesi yapılarak aşınma ve sertlik gibi özelliklerinde iyileştirme sağlanması amaçlanmıştır.



## **1. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ**

### **1.1. Matris Fazlarına Göre Kompozit Malzemeler**

#### **1.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler**

Metal matris kompozitler (MMC'ler), adından da anlaşılacağı gibi, metalik bir matrise sahiptir. Bu tür kompozitlerde matris örnekleri arasında alüminyum, magnezyum ve titanyum bulunur. Tipik lifler arasında karbon ve silisyum karbür bulunur. Metaller, temel olarak tasarımın gereksinimlerine göre özelliklerini artırmak veya azaltmak için güçlendirilir. Örneğin, metallerin elastik sertliği ve mukavemeti artırılabilir ve silisyum karbür gibi liflerin eklenmesiyle büyük ısıl genleşme katsayıları ve metallerin ısıl ve elektrik iletkenlikleri azaltılabilir [4].

Metalik matrisler, metal-matris kompozitlerin (MMC'ler) imalatı için temel bileşenlerdir. MMC'ler üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmaları son 10 yılda, takviyeli olmayan alaşımlara kıyasla önemli ölçüde artmıştır. MMC kavramı; metalik matrislerin sünekliği ve tokluğu ile seramik karakterdeki takviyelerin mukavemetinin birlikte kullanılmasını sağlamıştır. MMC'lerin özellikleri, matris malzemesinin, ve takviye malzemesinin arayüzünün özelliklerine bağlıdır. MMC'leri yapmak için çeşitli matris malzemeleri kullanılırken, başlıca alüminyum ve titanyum alaşımları daha hafif MMC'lerin geliştirilmesinde rol oynamışlardır. Kompozit malzemeler havacılık, uzay ve otomotiv motorları için ağırlık / ağırlık oranında önemli gelişme potansiyeli sağlamaktadır [5].

Metal matris kompozitler, çelik ve alüminyum gibi metallere göre avantaj sağlamak için kullanılır. MMC'lerin polimer matris kompozitlerine göre çeşitli avantajları vardır. Bu avantajlar; daha yüksek elastik özellik; daha yüksek servis sıcaklığı; neme karşı duyarsızlık; daha yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik ve daha iyi aşınma direncidir [4]. Magnezyum alaşımları hafif yapı malzemeleri olarak günlük yaşamda, özellikle otomotiv uygulamalarında ve bilgisayar, tüketici ve iletişim elektroniğinde giderek

daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca, magnezyum gelecekteki tıbbi uygulamalar için biyouyumlu ve biyobozunur bir malzeme olarak çok umut verici bir adaydır [6].

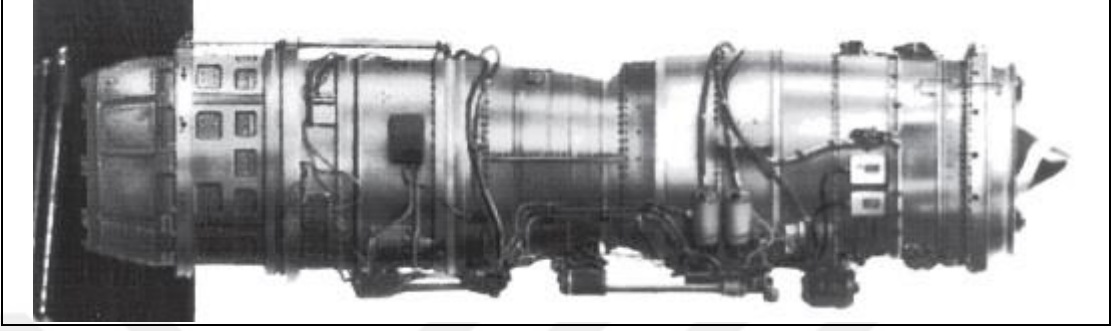
Takviye fazları, ya sürekli elyaflar, kırılmış elyaflar ve whiskerlar ya da partiküllerden oluşur. Metal matris kompozitler sürekli ve süreksiz veya her iki takviyenin karışımını da içerebilirler. Sürekli takviyeli kompozitler, takviye edilmemiş matris malzemeleri için yaygın olarak kullanılan benzer işleme teknikleri kullanılarak üretilmekte ve bu da onları düşük maliyetli hale getirmektedir. Ancak süreksiz takviyeli kompozitler düşün en/boy oranı ve rastgele yönelmelerden dolayı, sürekli güçlendirilmiş olanlara nispeten daha izotropiktir. Matris fazından ziyade matris ve süreksiz fazın uyumu çok daha önemlidir. Matris fazı yükü taşıırken süreksiz olan faz yükü aktarmaya yardımcı olmaktadır. Matris malzemesinin seçimi mukavemet, sıcaklık, yoğunluk ve maliyet gereksinimlerine bağlıdır. Örneğin, titanyum çok yüksek dayanımlı ve orta dereceli sıcaklık uygulamaları için bir iyi bir adaydır. Bununla birlikte; alüminyum mukavemet ve sıcaklık kabiliyeti açısından titanyumdan daha düşük olmasına rağmen, önemli ölçüde düşük yoğunluğundan dolayı titanyum ile rekabet edebilir. Ayrıca, titanyum ile karşılaştırıldığında düşük alüminyum maliyeti, alüminyum için ek bir avantaj sağlar. Belirli bir metal seçildikten sonra süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi diğer faktörler daha önemli hale gelir. En önemli faktörlerden biri, matris malzemesinin takviye fazı ile uyumluluğudur. Bu durumda uyumluluk, matris ve takviye arayüzünde istenmeyen kimyasal reaksiyona izin vermemektedir. Bu reaksiyon bazen arayüzeyde yükü takviyelere aktarmanın zararlı etkisine sahip olabilecek intermetalik bileşiklerin oluşumuna yol açabilir. Ayrıca, reaksiyon ürünleri, çatlak çekirdeklenmesi için bölgeler olarak işlev görebilir [5].

Tablo 1.1. Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri [4]

Özellik	Birim	SiC/Al	Grafit/Al	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2.6	2.2	7.8	2.6
Young modül	GPa	117.2	124.1	206.8	68.95
Çekme dayanımı	MPa	1206	448.2	648.1	275.8
Termal genleşme katsayısı	µm/m/°C	12.4	18	11.7	23



Metalleri liflerle takviye etmek sünekliği ve kırılma tokluğunu azaltabilir. Alüminyumun sünekliği % 48'dir ve basit silisyum karbür whisker takviyeleri ile % 10'un altına düşebilir. Alüminyum alaşımlarının kırılma tokluğu 20 ila 40 MPa√m ve silikon elyafarla takviye edildiğinde % 50 veya daha fazla azalır.



Şekil 1.1. Metal matrisli kompozitten üretilen gaz türbin motoru [4]

Yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve yüksek sıcaklıklarda performans gösterme özelliği, metal matrisin gaz türbini motor bileşenleri için tercih edilen malzemeyi birleştirmesini sağlar [4].

### 1.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli seramik matrisli kompozitler (CMC'ler) 1980'lerden bu yana yüksek sıcaklıkta yapısal malzemeler olma potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Bu yeni kompozit sınıfı, sonuçta türbin motorları için bileşen üretmeyi amaçlayan birçok araştırma programının konusu olmuştur.

Uzay uygulamaları ve çeşitli endüstriyel kullanımlar için havacılık ve enerji üretimi ve bileşenleri önemli rol oynamaktadır. Şu anda, bu malzemelerin mevcut alternatiflere göre pahalı olduğu düşünülmektedir. Tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve tam ölçekli bileşenlerin değerlendirilmesi konusunda ilerleme yavaş olmuştur. Bu, hem matrisler hem de takviyeler için çok çeşitli kimyalardan ve ayrıca imalat için kullanılan işlem yöntemlerinden kaynaklanabilir. CMC'lerin kullanımını sınırlayan diğer faktörler maliyet ve arayüzey kaplamalarının zayıf oksidasyon direncidir [5].

Son yıllarda, havacılık ve askeri alandan biyomedikal sektöre kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere yüksek performanslı malzemelere olan talep

artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sınırlı veya uzatılmış servis için malzemelere özel ilgi gösterilmiştir. Maalesef, geleneksel çöktmeyle sertleştirilmiş metal alaşımları yeterli değildir.

Düşük ve orta sıcaklıklarda yeterli süneklik bulunmaması ve bu nedenle çentik etkisine duyarlı hale gelmesi geleneksel metal alaşımlarını yetersiz kılmıştır. Yeni dispersiyon güçlendirilmiş metaller sınıfı iki malzeme grubunun özelliklerinin karışımı olduğu için daha kararlıdır. Ancak özellikle ısı çevrim koşullarında ısı bozulmaya uğraması nedeniyle, hizmet sırasında matris-takviye arayüzeyinin bozulmasına ve hatta takviyenin parçalanmasıyla da karşılaşılabilir. Buna karşılık bir çok seramik ve cam, düşük sıcaklık ve kimyasal reaktivitesi ile birlikte yüksek sıcaklıklarda nispeten yüksek mukavemet ve stabilite sergiler [7].

CMC'lerin avantajları arasında yüksek mukavemet, sertlik, seramik için yüksek servis sıcaklığı limitleri, kimyasal inertlik ve düşük yoğunluk bulunur. Bununla birlikte, seramikler kendi başlarına düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Çekme veya çarpma yükü altında başarısız olurlar. Silisyum karbür veya karbon, kırılma tokluğunu arttırmaktadır. Bir elyaf ve seramik matrisin kombinasyonu, yüksek mekanik özelliklerin ve aşırı servis sıcaklıklarının istendiği uygulamalar için CMC'leri daha çekici kılmaktadır.

Seramik matrisli kompozitler, metal ve polimer matrisli kompozitlerin kullanılmadığı yüksek sıcaklıklarda artan uygulama alanları bulmaktadır.

### **1.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler**

En yaygın gelişmiş kompozitler, ince çaplı liflerle (örneğin grafit, aramidler, bor) takviye edilmiş bir polimerden (örneğin epoksi, polyester, üretan) oluşan polimer matris kompozitlerdir (PMC'ler). Örneğin, grafit / epoksi kompozitler, ağırlık-ağırlık esasına göre çelikten yaklaşık beş kat daha güçlüdür. En yaygın kompozit olma nedenleri arasında düşük maliyetli, yüksek mukavemetli ve basit imalat ilkeleri bulunur. PMC'lerin ana dezavantajı ise düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek ısı ve nem genişleme katsayıları ve belirli yönlerde düşük elastik özellikleri içerir [4].

Tablo 1.2. SI birim sistemine göre mekanik özellikler [4]

Özellik	Birim	Grafit/epoxy	Cam/epoxy	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1.6	1.8	7.8	2.7
Young modül	GPa	181	38.6	206.8	68.95
Çekme dayanımı	MPa	150	1062	648.1	275.8
Termal genleşme katsayısı	µm/m/°C	0.02	8.6	11.7	23

Tablo 1.3. Polimer matrisli malzemelerde kullanılan fiberlerin mekanik özellikleri [4]

Özellik	Birim	Grafit	Aramid	Cam	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1.8	1.4	2.5	7.8	2.7
Young modül	GPa	230	124	85	206.8	68.95
Çekme dayanımı	MPa	2067	1379	1550	648.1	275.8
Termal genleşme katsayısı	µm/m/°C	-1.3	-5	5	11.7	23

## 1.2. Takviye Fazlarına Göre Kompozit Malzemeler

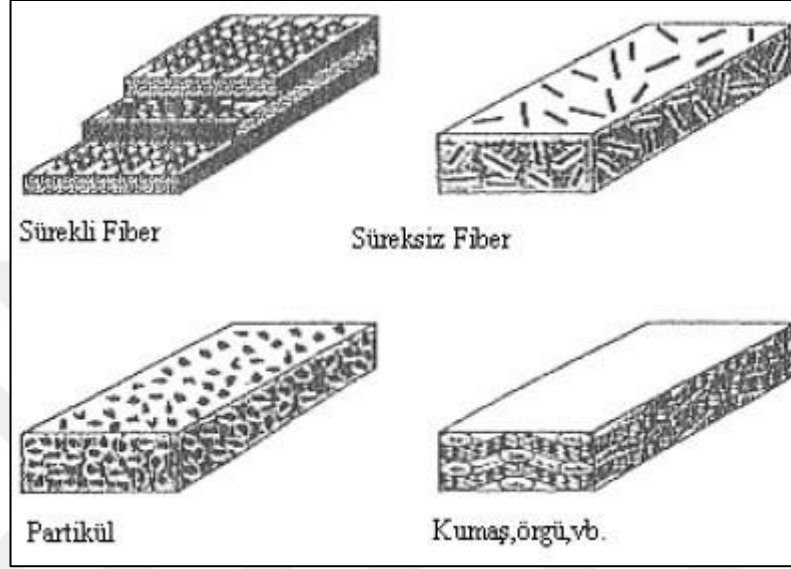
Sınıflarına göre yaygın olarak kabul gören dört kompozit malzeme türü bulunmaktadır.

- (1) Bir matristeki liflerden oluşan lifli kompozit malzemeler
- (2) Çeşitli malzemelerin katmanlarından oluşan lamine kompozit malzemeler
- (3) Bir matristeki parçacıklardan oluşan partiküllü kompozit malzemeler
- (4) İlk üç türün bir kısmının veya tamamının kombinasyonları

### 1.2.1. Fiber takviyeli kompozitler

Çeşitli formlardaki uzun lifler, doğal olarak, aynı biçimde, toplu halde aynı malzemedan daha sert ve daha güçlüdür. Örneğin, normal plaka camı inç kare başına yalnızca birkaç bin pound (lb / in veya psi) (20 MPa) baskıda kırılır. Ancak ticari olarak temin edilebilen cam elyafı daha güçlüdür (400.000 ila 700.000 psi -2800 ila 4800 MPa). Açıkçası, bir elyafın geometrisi ve fiziksel yapısı bir şekilde gücünün değerlendirilmesinde çok önemlidir ve yapısal uygulamalarda dikkate alınmalıdır.

Lifler sadece geometrik olarak yüksek uzunluk/çap oranıyla değil aynı zamanda kristal boyutuna yakın çapla karakterize edilirler. Elyaf ve yapısal metaller arasındaki doğrudan bir karşılaştırma geçerli değildir. Çünkü elyafın yapısal bir elemanda gerçekleştirmek için bir matrise sahip olması gerekirken, yapısal metaller kullanıma hazırdır [8].



Şekil 1.2. Takviye fazlarının yaygın çeşitleri [9]

Oksit bazlı elyaf uygulamalarında, oksitlenme direncinden, orta sıcaklık kabiliyetinden (1100° C'ye veya 2000° F'ye kadar), kimyasal kararlılıktan ve nispeten düşük maliyetlerden yararlanır. Pek çok oksit lifli CMC, bağlanma için arayüzey lifli kaplamalar veya kompozit kaplamalar gerektirmez. Yüzey kusurlarına ve yüzey kaplamalarına karşı daha az dayanıklılık göstermesine rağmen, atık yakma, sıcak gaz filtrasyonu, bazı ısı eşanjörü uygulamaları gibi aşındırıcı ortamlarda oksit bazlı olmayan elyaflara göre oksit bazlı elyaflar tercih edilir.

Ek olarak, oksit lifleri borular ve elektrik kabloları için manşonlar, yüksek sıcaklık koruması, kayışlar, battaniyeler ve conta contaları gibi esnek, hafif ve oksidasyona dirençli sürekli lifler gerektiren yüksek sıcaklık ısı yalıtım uygulamalarında büyük ticari kullanımlara sahiptir. Çoğu küçük çaplı oksit lifinin maliyeti (200-1000 ABD Doları/kg), cam ve karbon liflerinininkinden daha yüksektir, ancak SiC liflerinininkinden (1.000-113.000 ABD Doları / kg) düşüktür.

Oksit olmayan SiC bazlı lifler için uygulamalar tipik olarak, yüksek sıcaklıkta yapısal uygulamalar ( $> 1100^{\circ} \text{C}$  veya  $2000^{\circ} \text{F}$ ) için CMC'ye odaklanır, burada oksit liflerine kıyasla daha düşük sürünme ve tane büyüme oranları, daha iyi boyutsal stabilite ve mukavemet tutma olanağı sağlar.

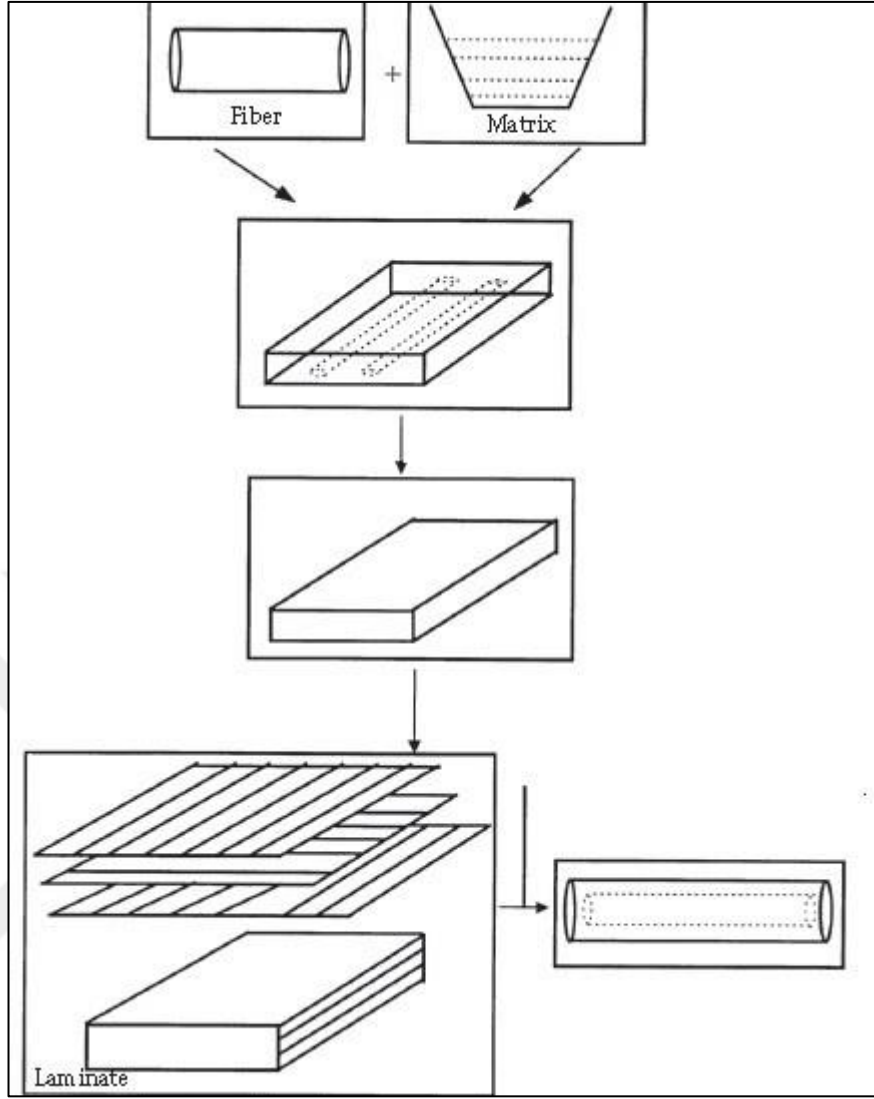
SiC lifler ayrıca daha fazla termal ve elektriksel iletkenlik, daha fazla üretilmiş güç ve daha düşük yoğunluk sağlayabilir. Bununla birlikte, oksijen içeren çevresel koşullar altında, silisyum bazlı liflerin açıkta kalan yüzeyleri silika büyümesi ve yüzey durgunluğu nedeniyle yavaşça bozunacaktır. Genel anlamda Silisyum karbürün oksidasyon direnci çok iyidir. Bu SiC bazlı lifler, uzun servis ömrü gerektiren CMC uygulamaları için genellikle tercih edilirler. Yanma gazı ortamlarında binlerce saat hizmet gerektiren sıcak bölüm bileşenleri için, örneğin gaz türbini motorlarında, CMC uygulamalarından yararlanır [5].

### **1.2.2. Lamine katmanlı kompozitler**

Bir lamina (ayrıca bir kat veya katman olarak da bilinir), bir matris halinde düzenlenmiş tek yönlü bir elyaf veya dokuma elyaf katmanıdır. Laminat, bir kompozit kat yığıdır. Her katman çeşitli yönler ve farklı malzeme sistemlerinden oluşabilir.

Hibrit kompozitler, bir laminatta birden fazla fiber veya bir matris sistemi içerir. Dört ana hibrit laminat türü bulunmaktadır.

- 1) Ara hibrit laminatlar, iki veya daha fazla farklı katman içeren bileşik sistemlerdir. Örneğin araba tamponlarında cam /epoksi tabakaları burulma rijitliğini, grafit/epoksi ise sertlik sağlamak amacıyla kullanılır.
- 2) Tamamen hibrit kompozitler, aynı katta kullanılan iki veya daha fazla farklı elyaftan oluşur. Grafit ve aramid elyaf kullanan golf aletleri örnek olarak verilebilir. Grafit lifleri burulma rijitliği, aramid lifleri çekme dayanımı ve tokluk sağlar.
- 3) Melez laminatlar, aynı kat içerisinde iki veya daha fazla farklı elyaf içeren katlardan ve birden fazla katlı kompozit sistemlerden oluşurlar.
- 4) Reçine hibrit laminatlar, iki veya daha fazla elyafı bir laminatta birleştirmek yerine iki veya daha fazla reçineyi birleştirir. Genellikle, bir reçine esnek ve diğeri ise serttir. Hibrit laminatlar kesme ve kırılma özelliklerinin gelişime katkı sağlamaktadır [4].



Şekil 1.3. Lamine katmanlı kompozitlerin şematik gösterimi [4].

Lamine katmanlı kompozitler genellikle üst üste istiflenmiş çeşitli laminarlardan oluşan bir yapıdır (Şekil 1.3) Bu laminat yapının analizi ve tasarımı ile sonuçta üstün özelliklere sahip bir yapı oluşur. Tüm laminat için sertlik, kuvvet ve ısı ve nem genleşme katsayıları bulunabilir. [4].

### 1.2.3. Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozitler, makroskobik partiküllerin veya mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri diğer kompozitlerden ayıran (örneğin; fiber) karakteristik özellikleri; partiküllerin matris içerisinde tamamen rastgele dağılması ve

bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermesidir. Partikül takviyeli kompozitler sermetler ve dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar şeklinde iki grup içinde toplanabilir. Sermetler, seramik ve metal fazlarının karışımından oluşurlar. Seramikler genel olarak yüksek sıcaklık dirençleri, yüksek ergime sıcaklıkları, ısıl kararlılıkları ve elastik davranışları ile karakterize edilirler. Dispersiyonla sertleştirme de prensip ise, sert, inert ve refrakter karakterli birkaç mikron boyutundaki partikülleri sünek bir yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıtmaktır. Disperse faz olarak genellikle yüksek ergime sıcaklıkları, ısıl kararlılıkları ve metalik sistemler de düşük çözünürlükleri nedeniyle oksitler kullanılır [9].

Tablo 1.4. Çeşitli seramik partiküllerin mekanik ve fiziksel özellikleri [5]

Seramik	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	Basma dayanımı (MPa)	Termal iletkenlik (W/mK)	Termal genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K)
SiC	3.21	430	2800	132	3.4
B <sub>4</sub> C	2.52	450	3000	29	5.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.92	350	2500	32.6	6.8
TiC	4.93	345	2500	20.5	7.4

Dispersiyonla sertleştirilmiş kompozitlerin üretiminde karşılaşılan bazı güçlükler nedeniyle endüstriyel uygulamaları sınırlıdır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersiyonu ile sertleştirilmiş alüminyum ve ThO<sub>2</sub> dispersiyonu ile sertleştirilmiş nikel alaşımı bu tür kompozitlere örnek gösterilebilir [9].

#### 1.2.4. Whisker takviyeli kompozitler

Bir whisker esasen kristal büyüklüğüyle yaklaşık aynı çaptadır. Ancak uzunluk-çap oranı yüzlerce olabilmesine rağmen, genellikle çok kısa ve kalındırlar. Bu nedenle, bir whisker, kristal-kütle-materyal-özellik-farklılık paradoksunun daha da belirgin bir örneğidir. Yani whiskerlar bir elyaftan daha mükemmeldir ve bu nedenle daha da yüksek özellikler sergiler. Whiskerlar, kristallerin neredeyse mükemmel hizalanmasıyla sonuçlanan çok küçük bir ölçekte kristalizasyon ile elde edilir. Demir gibi malzemeler, teorik olarak 2.900.000 psi (20 GPa) dayanımlı kristal yapılara sahiptir, ancak çoğunlukla demir olan ticari olarak temin edilebilir yapısal çelikler,

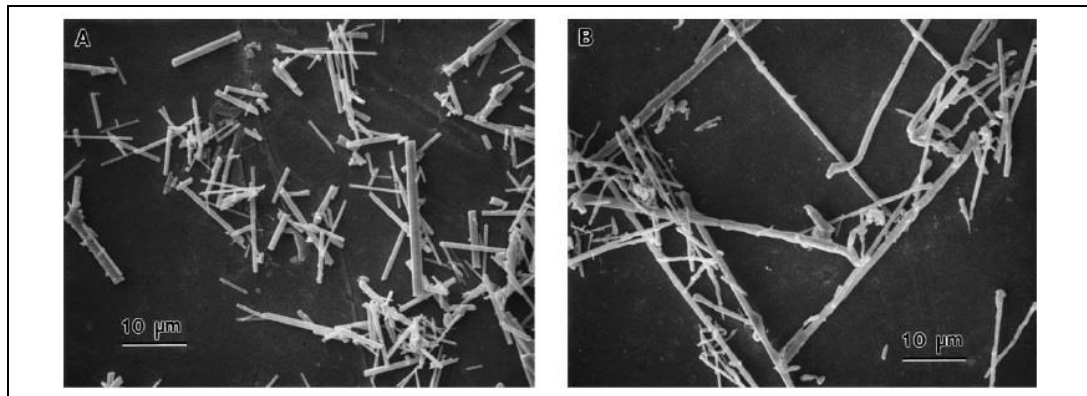
75.000 psi ila yaklaşık 100.000 psi (570 ila 690 MPa) arasında değişen dayanımlara sahiptir. Teorik ve gerçek dayanım arasındaki tutarsızlık çeliğin kristal yapısındaki kusurlardan kaynaklanır. Dislokasyon hareketleri bu ilişkiyi değiştirir.

Neredeyse mükemmel bir whisker için, az sayıda dislokasyon vardır. Bu nedenle, demir whiskerlar dökme halde çelikten önemli ölçüde daha yüksek dayanımlara sahiptir [8].

Tablo 1.5. Whisker özellikleri [8]

Whisker	Yoğunluk (kN/m <sup>3</sup> )	Teorik dayanım (GN/m <sup>2</sup> )	Deneysel dayanım (GN/m <sup>2</sup> )	Elastik modül ,E (GN/m <sup>2</sup> )	E/p 10 <sup>7</sup> in (Mm)
Bakır	87.4	12	3.0	124	1.4
Nikel	87.9	21	3.9	215	2.5
Demir	76.8	20	13	200	2.6
B <sub>4</sub> C	24.7	45	6.7	450	18
SiC	31.2	83	11	840	27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.8	41	19	410	11
C	16.3	98	21	980	60

Şekil 1.4.' de örnek olarak silisyum karbür ve silisyum nitür whiskerlerin SEM görüntüsü verilmiştir [10].



Şekil 1.4. a) Silisyum nitür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) b) Silisyum karbür (SiC) whiskerların SEM görüntüleri [10]



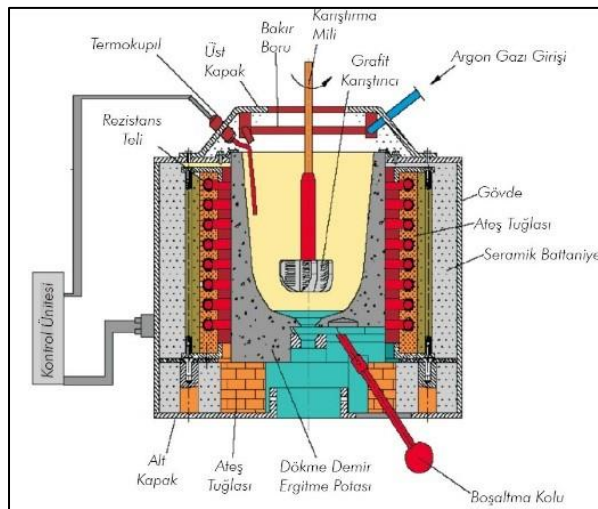
## 2. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Genel olarak, SiC ile güçlendirilmiş magnezyum ve alaşımlarına dayanan MMC'ler ağırlıklı olarak karıştırmalı döküm, toz metalurjisi, sıkıştırma döküm ve spreycöktürme yoluyla üretilmiştir [11].

### 2.1. Karıştırmalı Döküm (Stir Casting)

Sürekli metal matris kompozitler için mevcut olan çeşitli üretim prosesleri arasında, karıştırmalı döküm ticari olarak uygulanan, özellikle ümit verici bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Avantajları basitliği, esnekliği ve büyük miktarlı üretime uygulanabilirliğidir [12].

Vorteks diğer adıyla karıştırmalı döküm yönteminde, matris alaşımı sıvı-katı aralığına getirilir. Şekil 4.1 'de görüldüğü gibi bir sistemde partikül takviye elamanı bir karıştırıcı yardımı ile sıvı metal matris alaşımına karıştırılır. Bu karışım, matris ve takviye fazları homojen olana kadar devam eder ve daha sonra karışım kalıba dökülür. Döküm esnasında takviye fazının yer çekimi etkisi ile çökmesini önlemek amacı ile sıvı metal yerine daha çok yarı katı metal tercih edilmektedir. Kalıpta soğumaya bırakılan numune, soğuma işlemi tamamlandıktan sonra çıkarılır ve metal matris kompozit üretilmiş olur [13].



Şekil 2.1. Karıştırmalı döküm yöntemi [13]

Metal matris kompozitlerinin karıştırma yöntemi ile hazırlanmasında, dikkat edilmesi gereken birçok faktör vardır.

1. Takviye fazının düzgün bir şekilde dağılmasındaki zorluk
2. İki ana madde arasındaki ıslanabilirlik
3. Dökme metal matris kompozitlerinde gözeneklilik
4. Takviye fazı ve matris alaşımı arasındaki kimyasal reaksiyonlar

Üretilen kompozit malzemenin optimum özelliklerini elde etmek için, takviye malzemesinin matris alaşımındaki dağılımı eşit olmalıdır ve bu maddeler arasındaki ıslanabilirlik veya bağlanma optimize edilmelidir. Gözeneklilik seviyelerinin en aza indirgenmesi ve takviye malzemeleri ile matris alaşımı arasındaki kimyasal reaksiyonlardan kaçınılması gerekmektedir.

Bu üretim yönteminde karşılaşılan sorunlardan biri de, takviye partiküllerinin eriyik döküm sırasında çökeltilmesidir. Bu, takviye parçacıkları ve matris alaşımını eriyik arasındaki yoğunluk farklılıklarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Takviye dağılımı, (a) karıştırma sonucunda sıvıda dağıtım, (b) karıştırmadan sonra, fakat katılaşmadan önce sıvıda dağıtım ve (c) katılaşma sonucunda yeniden dağıtım dahil olmak üzere birkaç aşamada etkilenir. Karıştırma sırasında kullanılan (genellikle eriyik hazırlama veya tutma sırasında), erime sıcaklığı ve partiküllerin tipi, miktarı ve niteliği göz önünde bulundurulmalıdır. Partiküllerin bir matris içinde uygun şekilde dağılması ayrıca, dökme hızından, döküm sıcaklığından etkilenir. İçeriğindeki partikülleri eriyik metal içine sokmak ve karıştırmak için birkaç teknik vardır.

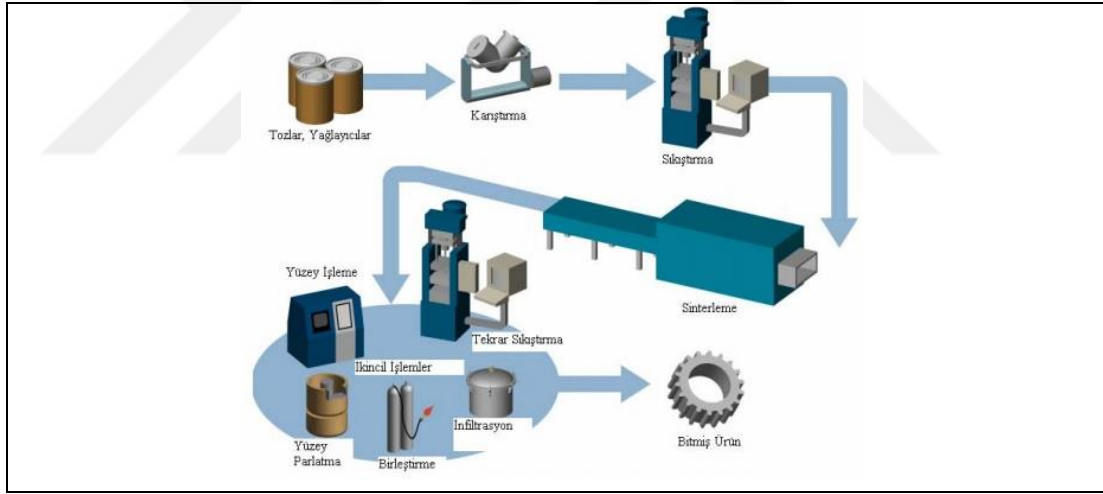
1. İnert bir taşıyıcı gaz içinde tutulan parçacıkların, bir enjeksiyon tabancası yardımıyla eriyik içine enjekte edilmesi;
2. Kalıp doldurulurken erimiş akış içine parçacıkların eklenmesi;
3. Parçacıkları ilerletme çubukları kullanarak eritmeye itme;
4. Atomize edilmiş erimiş metal damlacıklarının parçacıklarla birlikte bir altlık üzerine püskürtmeli dökümü;
5. İnce taneciklerin eriyik içinde santrifüjleme ile dağılması gibi yöntemler vardır [12].

## 2.2. Toz Metalurjisi

Metal matris olarak tungsten, molibden, niyobyum ve tantalum gibi modern ve yüksek performanslı malzemelerin geleneksel döküm yöntemleri ile imal edilmesi zordur. Bu durumlarda toz metalurjisi (PM) daha çekicidir ve en önemli imalat haline gelmiştir.

Kompozit malzemeler için PM yöntemi aynı zamanda şekillendirme ve işleme maliyetini de azaltır. Ayrıca, PM yöntemi ile üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler imal edilebilir. PM işleminin bir başka avantajı metal matris içindeki partiküllerin homojen bir şekilde dağılımının, diğer üretim tekniklerine kıyasla kolayca elde edilmesidir.

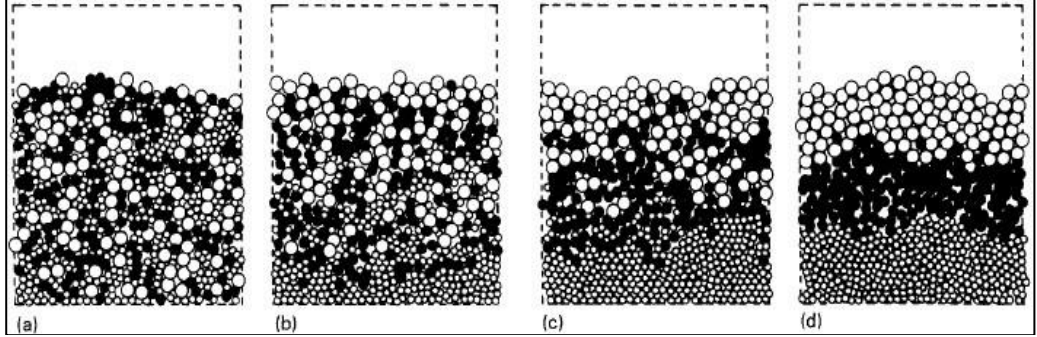
Toz metalurjisinde geleneksel üretim metodu karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerini içerir [14]. Şekil 2.2’de toz metalurjisi yöntemine ait adımlar şematik olarak verilmiştir [15].



Şekil 2.2. Toz metalurjisi üretim akım şeması [15].

Karıştırma işleminden önce uygun malzeme seçiminin yapıldığından emin olunmalıdır. Malzeme seçim sürecinde göz önünde bulundurulması gereken diğer faktörler arasında mekanik davranış, kimyasal kararlılık, termal uyum ve maliyet unsurları vardır. Bir sonraki adım karıştırma, aynı derecede önemlidir. Çünkü üretilen PM malzemelerinin mekanik özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkileyen, sıkıştırma partikülün ve porozitenin son dağılımını kontrol eder. Ayrıştırma ve kümelenme, genel problemlerdendir. Ayrışma olgusu, mekanik karışmaya maruz kalan herhangi bir gevşek toz konfigürasyonunda doğaldır. Ayrılma ve kümelenme, metal tozları ve

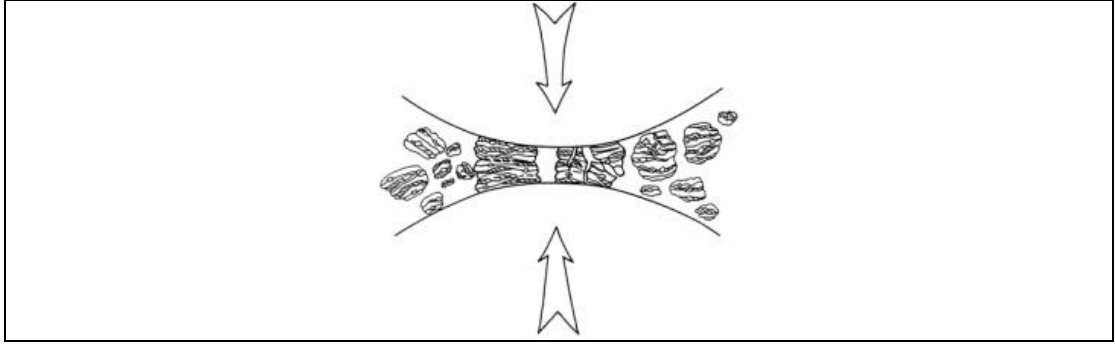
takviye partikülleri arasında farklı akış karakteristikleri ve partiküllerin aglomerasyonunun yüzey enerjisini minimize etme eğilimini içerir [14].



Şekil 2.3. (a) 0, (b) 60, (c) 120 ve (d) 290 Monte Carlo simülasyonu ile üçlü bir karışımın karıştırma genlikleri [14].

Genel bir kural olarak, daha büyük bir partikül boyutu daha iyi bir dağılım derecesine yol açacaktır. Parçacıkların şekli aynı zamanda karıştırma sonucunu da etkiler. Metal tozların küresel parçacıklarla karıştırılması, düzensiz ya da pul benzeri parçacıklardan daha kolaydır. Farklı büyüklükteki partiküllerin ayrışma davranışı, Monte Carlo simülasyonu ile Şekil 2.3’de görülebilir. Büyük partiküller, çalkalanma sonucunda üste çıkar. Çünkü daha küçük parçacıklar, daha büyük parçacıklar altında kalan boşlukları doldurduklarında daha büyük parçacıklar yukarı doğru hareket eder. En büyük ve orta büyüklükteki parçacıklar, en küçük tüm parçacıkların tabana kaydırılmasından sonra tamamen ayrılır. Yoğunluk açısından bakıldığında ise genel olarak hafif partiküller üstte kalırken, daha ağır partiküller öncelikle dibeye ayrılır.

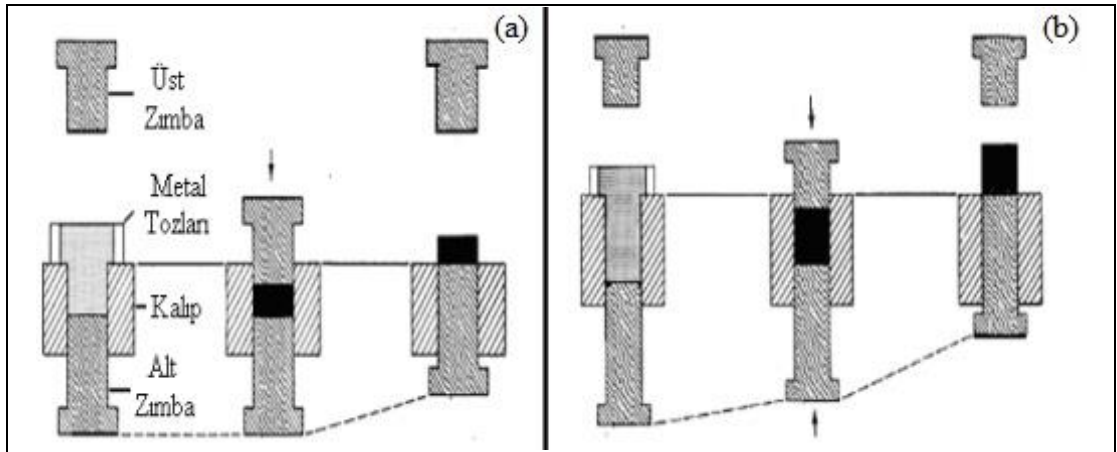
Harmanlama sırasındaki ayrışma ve kümelenme, 1960’larda mekanik alaşımlama (MA) adı verilen bir teknikle giderilebilmektedir. Mekanik alaşımlama, kontrollü mikro yapıya sahip kompozit metal tozları üretmek için kuru, yüksek enerjili bir bilyalı öğütme işlemidir. Bu işlem, yüksek enerjili sıkıştırma etkisi ile tekrar tekrar kırılma ve partiküllerin ve metal tozlarının bir karışımının yeniden karıştırılmasından oluşur [14].



Şekil 2.4. Bilyaların partiküller ile çarpışması esnasında oluşan yapılar [15].

Metalik faz bu çarpışmalar esnasında düzleşip üst üste bindikçe atomik düzeyde temiz yüzeyler birbiri ile temas eder ve birbirine soğuk şekilde kaynar. Aynı aşamada kırılgen fazlar bu kaynayan yüzeyler arasında sıkışarak kaplanır ve yapıya karışır [14]. Sıkıştırma işlemi, tatminkar bir mikro-yapıya sahip parçacıkları ve metal tozlarını homojen bir dağılım oluşturmaya zorlar. İnce tane boyutu ve metal matrisin yüksek dislokasyon yoğunluğu, MMC 'lerin güçlendirilmesine de katkıda bulunur.

Karıştırma işleminin ardından, karışım oda sıcaklığında basınç altında bir kalıpta preslenir, bu da tozların uygun bir yoğunluğa sahip kompakt oluşturmak için birbirlerine bağlanmasını sağlar. Bu sürece soğuk sıkıştırma denir. İşlemden, sıkıştırma işlemlerinin yoğunluğu, gözeneklerin iyi bir şekilde bağlanmasını sağlamak için dikkatlice kontrol edilmelidir [14].



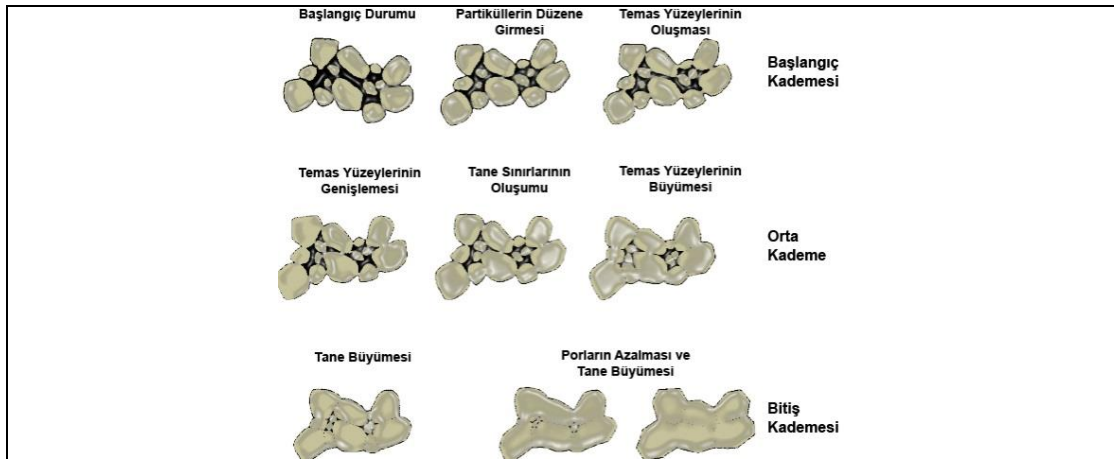
Şekil 2.5. a) Tek yönlü presleme, b) Çift yönlü presleme [16]

Geleneksel sıkıştırma yönteminde, basınç tek bir yönde uygulanır, bu da dengesiz bir dağılıma ve bazen de yetersiz yoğunluklara neden olur. Bu, sinterleme ve ikincil üretim gibi kompaktların daha sonraki işlemlerini etkiler. Sıkıştırma kalitesini daha iyi

kontrol etmek için, izostatik presleme teknikleri soğuk, ılık ve sıcak izostatik presleme gibi yöntemler geliştirilmiştir.

Soğuk izostatik presleme (CIPing) genellikle tozları yüksek basınç altında preslemek için kullanılır. CIPing'in avantajları, diğer sıkıştırma yöntemleri arasında tozların büyüklüğü ve şekli ne olursa olsun elde edilebilecek sıkıştırma yoğunluğunun düzgünlüğü; kontrol edilebilir büzülme ve tek boyutlu preslemede duvar sürtünmesinden kaynaklanan sınırlı artık gerilmelerdir. İzostatik işleme tekniklerinde umut vaat eden bir diğer gelişme, yüksek verimlilikte üretimlerdir.

Genellikle, uygun şekilde hazırlanmış kompaktlar daha sonra sinterlenir. Bu aşamadaki kontrol edilebilir parametreler sinterleme sıcaklığı ve sinterleme atmosferidir. Yaygın olarak ortaya çıkan sorunlar, oksit filmlerinin varlığı, parçacıkların kusurlu dağılımı ve sıvı faz sinterlemesi sırasında kaynaklanma ve katı faz sinterlemesinde zayıf kuvvetlerdir. Sinterleme sıcaklığında partiküller ve metaller arasında yetersiz bir bağlanma düşük bir dayanımla sonuçlanır. Parçacıklar ve matris arasındaki ıslanabilirliği arttırmak, özellikle grafit gibi yumuşak parçacıklar içeren kompozitler için, MMC'lerin imalatında en önemli hedeflerden biri haline gelmiştir. Takviye partikülleri ile metalik matris arasındaki zayıf ıslanabilirliğin ve etkileşimin üstesinden gelmek için bazı teknikler geliştirilmiştir. Örneğin, nikel kaplı grafit partiküllerinin temas açısı değiştirilerek ıslanabilirlik kontrol edilir. Kaplanmış parçacıkların bir başka avantajı, imalat işlemi sırasında bazı metallerle reaksiyondan kaçınma yetenekleridir [14]. Şekil 2.6' da sinterleme kademeleri şekilsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Sinterleme kademeleri [15].

Sinterlemenin temel amacı kompakt malzemedeki porozitelerin azaltılmasıdır. Sinterleme, genel olarak  $T > 0,5T_m$  (K) olacak sıcaklıklarda toz kompaktlara ısıl işlem uygulanmasına denir. Uygulanan sıcaklıklarda difüzyon kontrollü kütle taşınımı meydana gelmelidir. Ancak sinterleme bölgesel olarak sadece tanelerin temas eden yüzeylerinde meydana gelmektedir [15].

Sıcak presleme yöntemi ise, yüksek performanslı malzemeler ve sinterleme davranışı zayıf olan malzemelerin üretilmesi için uygun bir yöntemdir. faz yöntemi ile üretilmeyen malzemelerin üretiminde kullanılmakta olup, birçok oksit ve karbür seramiklerin ( $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$  v.b) açık atmosfer ortamında grafit kalıplarda veya yüksek sıcaklıklara dayanabilen sıcak iş takım çeliklerinden üretilen kalıplarda sıcak presleme tekniği ile üretilmektedir. Sıcak preslemenin geleneksel toz konsolidasyonuna göre birçok avantajı mevcuttur.

Bu avantajlar;

- 1) Tek bir operasyon ile tozların preslenmesi.
- 2) Presleme ve sinterlenme işleminin aynı anda gerçekleştirilmesi.
- 3) Sıcaklık ve basıncın eş zamanlı olarak uygulanması.
- 4) Kullanım alanı geniş olan sert iş malzemelerinin teorik yoğunluğuna ulaşılması.
- 5) Düzgün iç yapılı malzemelerin üretilmesi.

Sıcak pres tekniğinde basınç ve sinterleme işlemi bir arada yapıldığından ayrı bir sinterleme işlemi gerektirmemektedir. Ayrıca düzgün iç yapılı malzemeler, yüksek yoğunluk, düşük maliyet, oksitlenmeyen seramiklerin üretilmesi sıcak pres tekniğinin avantajları arasındadır. Sıcak presleme yönteminin dezavantajı ise sürecin yavaş işlemesi ve kullanılan kalıp aksamı nedeniyle sıcaklık kontrolünün zorluğudur [17].

### **2.3. Sıkıştırma Döküm (Squeeze Casting)**

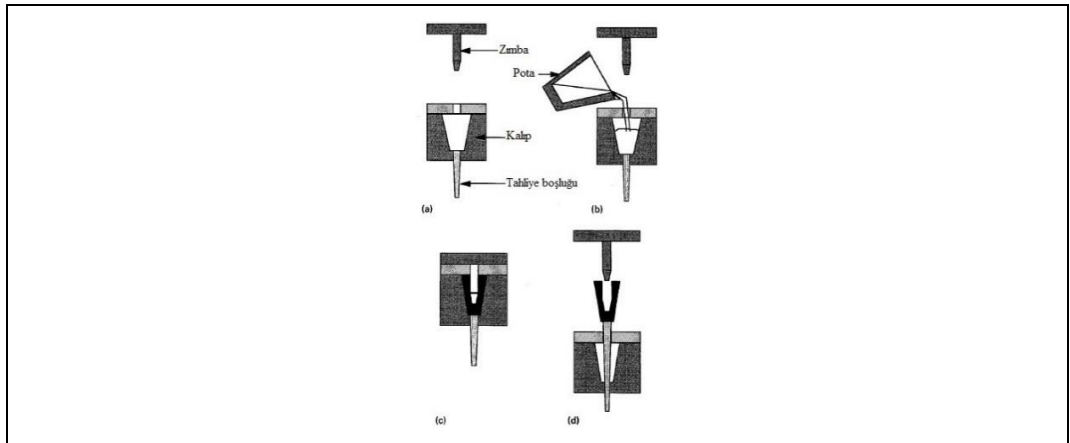
Döküm, hammaddeleri kolayca kullanılabilir bileşenlere aktarmak için en ekonomik yoldur. Bununla birlikte, geleneksel veya hatta daha gelişmiş döküm teknikleri (örneğin, yüksek basınçlı döküm) için ana dezavantaj; porozite gibi kusurların oluşumudur. Dahası segregasyon bantları vb. mikroyapısal hatalar, potansiyel çatlak başlatıcıları olabilir. Bu nedenle, bu eksiklikleri gidermek için yeni döküm teknikleri geliştirilmiştir. Kullanılabilir birçok döküm tekniğinden, sıkıştırılmalı döküm, daha az

kusurlu döküm bileşenleri yaratma konusunda daha büyük bir potansiyele sahiptir. Sıkıştırma dökümü, katılaşmanın yeniden kullanılabilir bir kalıp içinde yüksek basınç altında yapıldığı yöntemdir. Kalıcı kalıp döküm; kalıba dökümün tek bir işlemden, hidrostatik basınç altında eritilmiş metalin döküldüğü bir metal şekillendirme işlemidir.

Genel olarak, sıkıştırma döküm tarafından imal edilen parçalar, mükemmel yüzey kalitesine ve ince taneye yapısına sahip olup, neredeyse hiç porozite bulunmamaktadır [18].

Sıkıştırma döküm işlemi aşağıdakileri adımları içermektedir.

1. Önceden belirlenmiş bir miktarda ergimiş metal, bir hidrolik pres yardımıyla, önceden ısıtılmış bir kalıp boşluğuna dökülür.
2. Ergimiş sıvı metal kalıp içine doldurulur. Bu çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilir ve ergimiş metalin basınç altında katılaşması sağlanır.
3. Tamamen katılaşana kadar basınç metal üzerine uygulanır. Bu sadece ısı akış hızını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda en önemlisi makro/mikro büzülmeden kaynaklı gözenekliliği de ortadan kaldırabilir. Ek olarak, gaz porozitesinin çekirdeklenmesi, basınca bağlı olduğundan, ergimiş metalde çözünen gazlardan kaynaklı porozitenin oluşumunu sınırlar.
4. Son olarak, zımba orijinal konumuna geri çekilir ve katılaşan parça kalıp boşluğundan çıkarılır [19].

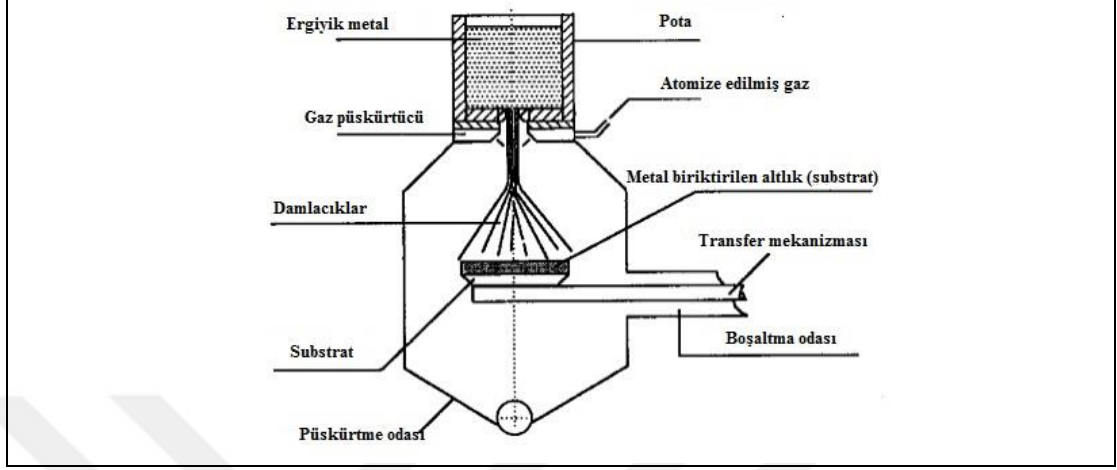


Şekil 2.7. Sıkıştırma döküm prosesinin şematik diyagramı a) ön ısıtma b) eriyiğin kalıp boşluğuna aktarımı c) eriyiğin basınç altında katılaşması d) katılaşan parçanın kalıp boşluğundan ayrılması [19]



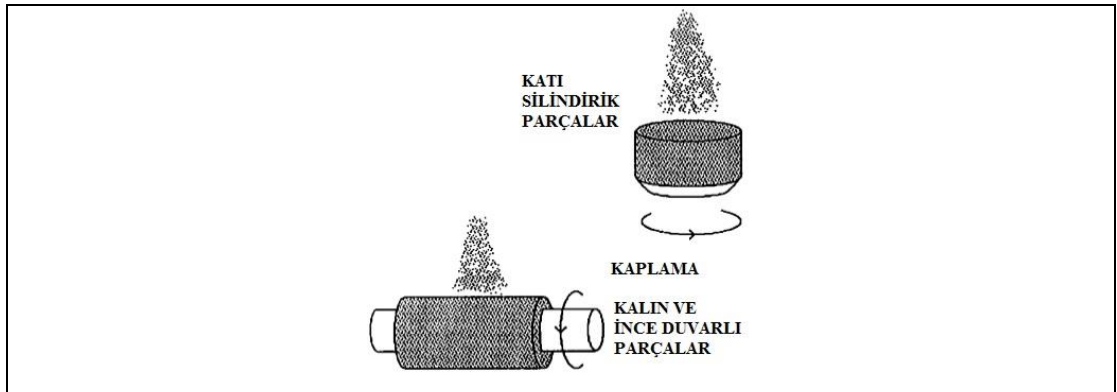
## 2.4. Sprey Çöktürme (Spray Deposition)

Sprey çöktürme işleminin şeması Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Sprey çöktürme işleminin proses şeması [20]

Ergiyik metal, püskürtme haznesinin üstünde bulunan bir potada indüklenerek ergitilir. Ergime sırasında, hazne azot gazıyla temizlenir ve ergiyik metaldeki oksidasyonu önlemek için kapalı potaya azot gazı verilir. Ergiyik metal potanın tabanında bulunan bir refrakter ağızlıktan çıkar. Potanın altındaki atomizasyon bölgesinde, erimiş metal akımı, tipik olarak 0.7-1.0 MPa aralığında bir basınçta azot gazı ile küçük metal damlacıkları çarpıştırır. Sıvı damlacıklar, atomize edici gaz tarafından soğutulur ve büyük ölçüde gözeneklilik içermeyen kalın bir ağ veya ağa yakın bir şekil birikimi oluşturmak üzere püskürdükleri ve birleştirildiği alt tabakaya hızlandırılır. Bir mikro işlemciye bağlı bir çevrimiçi sensör, spreyi ve biriktirme sırasında biriktirmeyi izler ve işleme koşullarına göre ayarlar. Metal biriktirilen altlık (substrat) malzeme, spreyin altında kalacak şekilde konumlandırılır [20].



Şekil 2.9. Sprey çöktürme ile üretilen farklı şekillerin şematik gösterimi [20]

Dönen bir disk şeklindeki altlık (substrat) üzerine püskürtülerek katı silindirik bir geometri üretilir. Dönen bir mandrel üzerine püskürtülerek, kaplamalar uygulanabilir, ince veya kalın duvarlı bir tüp imal edilebilir [20].

Partikül dağılımının eşit olmasını sağlamak için püskürtme ve partikül besleme koşullarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Bugüne kadar yapılan çalışmaların çoğu, Ar-Ge amacıyla küçük külçeler üretecek bir ünitelerde gerçekleştirilmiştir [21].

Sprey çöktürme işlemi, Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmektedir. Proses iki farklı aşamadan oluşmaktadır: biri damlacıkların uçmakta olduğu ve atomize edici gaz ile etkileşime girdiği, diğeri ise damlacıkların substrat ile etkileşime girdiği aşamadır. İlk aşamada, atomizasyon ile üretilen damlacıklar substrata doğru hızlandırılır ve atomize edici gazla soğutulur. Büyüklük ve dolayısıyla soğutma hızına bağlı olarak, damlacıklar tamamen veya kısmen sıvıdır. Substrata temas etkilediklerinde ise katılaşma tamamlanmıştır. Oluşan katının mikroyapısını optimize etmek için, damlacıkların çarpmadan önceki durumunu, ısı muhtevasını, boyut dağılımını ve sprej içindeki yoğunluğunu belirlemek gerekir. Sıvı damlacıkların uçuş sırasındaki hızını ve sıcaklık profillerini tahmin etmek için; damlacık/gaz etkileşimlerini, uçuş mesafesine bağlı olarak katılaşmasının ilerlemesini öngören matematiksel modeller formüle edilmiştir.

İşlemin ikinci aşamasında, damlacıklar, substrat üzerinde birleşir ve katılaşır [20].

### **3. MAGNEZYUMA GENEL BAKIŞ**

#### **3.1. Magnezyumun Tarihi**

Magnezyum ismi, büyük miktarda manyezit birikintisinin bulunduğu Yunanistan'ın Magnesia kentinden gelmektedir. Magnezyum ilk kez 1808'de İngiltere'de Sir Humphrey Davy tarafından bir oksit olarak keşfedilmiştir. 1828'de saf metali izole eden Fransız bilimci Antoine-Alexander Bussy'di. Magnezyumun elektrolitik üretimi çok küçük bir ölçekte ilk kez 1833 yılında Michael Faraday tarafından gerçekleştirildi. Magnezyumun ilk metalotermik üretimi, Kanadalı araştırmacı Dr. L.M. Pidgeon tarafından 1941'de gerçekleştirilmiştir [22].

#### **3.2. Magnezyumun Temel Özellikleri**

Magnezyum şu anda mühendislik için yeterince kullanılmayan, fakat gelecek için umut verici hafif bir metaldir. Magnezyum, yer kabuğundaki en bol bulunan altıncı elementtir. Yer kabuğunun %2,7'sini oluşturan magnezyum, element biçiminde bulunmasa da, magnezyum bileşikleri dünya çapında bulunabilir. En yaygın bileşikler manyezit ( $MgCO_3$ ), karnallit ( $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), dolomit ( $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ ) ve ayrıca deniz suyudur. Magnezyum, deniz suyunda en bol bulunan ve çözülmüş üçüncü mineraldir. Magnezyum tüm yapısal metallerin en hafif olanıdır.  $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'lük bir yoğunluğa sahip olup, çelik yoğunluğunun yaklaşık dörtte biri ve alüminyumun üçte ikisi kadardır. Düşük yoğunluklu ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı magnezyum esaslı malzemeler, ağırlığın kritik olduğu uygulamalar için şirketler tarafından aktif olarak takip edilmektedir [23].

##### **3.2.1. Atomik özellikler ve kristal yapı**

Periyodik tabloda toprak alkali grubuna giren magnezyumun atom numarası 12 olmakla beraber +2 değerlikli elektronlara sahiptir. Tablo 3.1' de magnezyumun atomik özellikleri ve kristal yapısına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.1. Magnezyumun atomik özellikleri ve kristal yapısı [23]

Sınıfı	Toprak alkali metal
Atom numarası	12
Atomik ağırlığı	24.3050
Atomik hacim	14.0 cm <sup>3</sup> /mol
Atomik yarıçap	0.160 nm
İyonik yarıçap	0.072 nm
Serbest elektronların orbital dizilimi	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup>
Değerliği	2+
Kafes yapısı	Hegzagonal sıkı paket (HSP)

### 3.2.2. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri

Tablo 3.2 farklı koşullar altında işlenen saf magnezyumun oda sıcaklığında mekanik özelliklerini göstermektedir [23].

Tablo 3.2. Magnezyumun fiziksel özellikleri [23]

Yoğunluk (20 °C)	1.74 g/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	650 °C
Kaynama noktası	1090 °C
Lineer genişleme katsayısı (20-100 °C)	26.1x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Termal iletkenlik (27 °C)	156 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Spesifik ısınma kapasitesi (20 °C)	1.025 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Buharlaşma latent ısısı (25 °C)	5150–5400 kJ kg <sup>-1</sup>
Süblimleşme latent ısısı (25 °C)	6113–6238 kJ kg <sup>-1</sup>
Difüzyon katsayısı (468 °C)	4.4 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Difüzyon katsayısı (551 °C)	3.6 × 10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Difüzyon katsayısı (627 °C)	2.1 × 10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>

Saf magnezyumun farklı üretim proseslerinde elde edilmiş olan mekanik özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir [23].

Tablo 3.3. Saf magnezyumun mekanik özellikleri (20°C) [23]

Saf magnezyum	Tavlanmış sac	Haddelenmiş sac	Kum kalıba döküm	Toz metalurjisi (ekstrüze edilmiş 350°C)
% 0.2 Basmada akma dayanımı (MPa)	69–89	105-115	21	92 ± 12
% 0.2 Çekmede akma dayanımı (MPa)	90–105	115-140	21	132 ± 7
Nihai çekme dayanımı (MPa)	160–195	180-220	90	193± 2
Sertlik (HB) 50 kp/10mm	40–41	45-47	30	-

### 3.3. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Magnezyum alaşımları sıklıkla döküm ve dövme alaşımları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Döküm alaşımları kullanılan yöntemine göre basınçlı, kum ve kalıcı kalıba döküm alaşımları olarak ayrılmaktadır. Dövme alaşımlarını da sac, levha, ekstrüzyon alaşımları olarak bölümlendirilmektedir. Alaşımların çeşitleri ve ısıl işlemleri gösteren standartlar ASTM tarafından 1948 yılında aşağıdaki çizelgeye uygun sırayla belirlenmiştir.

Tablo 3.4. Magnezyumun sınıflandırılması [23]

1. Kısım	2. Kısım	3. Kısım	4. Kısım
2 temel alaşım elementi belirlenir.	Alaşım elementlerinin miktarları belirlenir.	Aynı yüzde deki farklı alaşımlar ile farkları belirlenir.	Isıl işlem durumu belirlenir.
Alaşım elementleri için kodlar belirlenir ve azalan alaşım yüzdesine göre sıralanır. (yüzdeler aynı ise alfabetik sıraya göre)	Kodları verilen sıraya göre alaşım yüzdeleri yuvarlanarak yazılır.	Standartlara uygun alfabetik bir harf belirlenir.	Harften sonra gelen sayıdan oluşur.
A--alüminyum B--bizmut C--bakır D--kadmiyum E--nadir element F--demir G--magnezyum H--toryum K--zirkonyum L--lityum M--manganez N--nikel P--kurşun Q--gümüş R--krom S--silikon T--kalay W—tungsten Y--antimon Z--çinko	Bütün numaralar	I ve 0 hariç bütün harfler	F--işlenmiş O--tavlanmış H10 ve H11--düşük gerilme sertleşmesi H23, H24, ve H26--gerilme sertleşmesi ve kısmen tavlama T4—çözelti ısıl işlemi T5—yalnız yapay yaşlanma T6—çözelti ısıl işlemi ve yapay yaşlanma T8—çözelti ısıl işlemi Soğuk işlem, ve Yapay yaşlanma

Sınıflandırmaya örnek vermek gerekirse; AZ91E-T5 alaşımı incelenebilir. Sistemdeki ilk iki harf olan AZ harflerinden A harfi alaşımımızda alüminyum bulunduğunu, Z ise çinko elementi bulunduğunu belirtmektedir. Sonrasındaki iki harf olan 9 ve 1 ise %9 alüminyum ve %1 çinko bulunan bir alaşım olduğunu göstermektedir. E harfi aynı alaşım yüzdelere sahip standartlaştırılmış alaşımlar içerisinde 5. Sırada olduğunu göstermektedir. T5 kısmı ise uygulanan ısıl işlemini belirtmekte bu alaşıma sadece yapay yaşlandırma işlemi uygulandığını göstermektedir [23].

### 3.4. Magnezyumun Uygulama Alanları

#### 3.4.1. Otomotiv uygulamaları

1920'li yıllarda yarış arabalarında magnezyuma yer verilmeye başlanmıştır. Ancak 1930'lara kadar ancak Volkswagen (VW) Beetle gibi ticari araçlarda magnezyum kullanılmıştır. VW Beetle, o yıllarda, şanzıman mahfazasında ve karterinde 20 kg'dan fazla magnezyum alaşımı içeriyordu. Son on yılda, daha hafif, daha yüksek yakıt verimliliği ve daha yüksek performanslı araçlar üretmek için otomotiv endüstrisi üzerinde artan baskılar sayesinde magnezyum kullanımında artış olmuştur.

Audi, Volkswagen, Daimler, Toyota, Ford, BMW, Jaguar, Fiat, Hyundai, Kia Motors gibi önde gelen otomotiv firmaları magnezyum esaslı malzemeler kullanmaya başlamıştır. Şekil 3.1'de çeşitli otomotiv firmalarına ait magnezyum esaslı parçalar görülmektedir [24].



Şekil 3.1. Magnezyum otomotiv bileşenleri a) 0,75 kg ağırlığındaki Toyota için direksiyon göbeği b) 2,6 kg ağırlığındaki Jaguar ve Fiat için koltuk desteği c) AZ91D'den 2,7 kg ağırlığındaki aktarma elemanı ve d) AZ91 Ford motor için 0,9 kg ağırlığında kam kapak [24]

### 3.4.2. Havacılık uygulamaları

Havacılık endüstrisinde artan emisyon değerleri nedeni ile en kritik hedeflerden biri yakıt verimliliğini arttırmak olmuştur. Uçağın ağırlığındaki azalma, toplam işletme maliyetindeki tasarruf anlamına gelen yakıt tasarrufuna neden olacaktır. Yıllar boyunca alüminyum, fiber metal laminatlar ve düşük yoğunluklu plastikler gibi çeşitli ağırlık azaltma alternatifleri kullanılmıştır. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının geliştirilmesindeki sınırlamalar, daha fazla ağırlık azaltmayı zorlaştırmıştır. Diğer alternatifler arasındaki sınırlamalar magnezyumu çekici hale getirmiştir.

Magnezyum esaslı malzemeler, havacılık endüstrisinde uzun bir uygulama geçmişine sahiptir. Yıllar boyunca, hem sivil hem de askeri uçaklarda magnezyum esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Boeing için itme ters çeviricisi, Rolls-Royce için dişli kutusu, motor ve helikopter nakil kasaları, F16 ve Tornado gibi askeri uçaklarda da magnezyum alaşımlarının hafiflik özelliğinden yararlanılır.

### 3.4.3. Spor uygulamaları

Spor endüstrisinde, spor ekipmanlarının ve spor meraklılarının giderek artan beklentilerine uygun olması çok önemlidir. Magnezyum alaşımlarının ve kompozitlerinin karmaşık şekilleri oluşturmadaki mükemmel yeteneği sporla ilgili ekipmanlarda bir çok uygulamanın önünü açmıştır. Örneğin, magnezyum esaslı malzemeler, okçulukta kullanılan yayların, tenis raketlerinin ve golf aletlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Magnezyum spor malzemeleri: (a) golf klübü başı, yüksek kaliteli magnezyumdan, (b) magnezyum şasili sıralı patenlerden, (c) magnezyum başlıklı tenis raketi ve (d) magnezyum çerçeveli bisiklet [24]

#### **3.4.4. Elektronik uygulamalar**

Elektronik ekipman endüstrisindeki eğilim, ürünleri daha kişisel ve taşınabilir hale getirmektedir. Bu nedenle ekipmanı oluşturan bileşenler hafif ve dayanıklı olmalıdır. Magnezyum esaslı malzemeler, plastikler gibi hafif oldukları için gereklilikleri karşılamaktadır. Plastiklere göre güç, daha iyi ısı transferi, elektromanyetik girişimi ve radyo frekansı girişimini koruma kabiliyeti sunmaktadır. Dolayısıyla magnezyum esaslı malzemeler, cep telefonları, bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar ve taşınabilir medya oynatıcıların (Apple Ipod nano magnezyum kasası) muhafazalarında kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının karmaşık şekilli parçalarda iyi ısı transfer özelliği sağlaması ve bunu iyi bir şekilde dağıtması nedeniyle magnezyum alaşımlarının ısı alıcılarında ve sabit sürücü okuyucularında kullanılmasına neden olmaktadır. Dijital kamera yuvalarında ve görüntü projeksiyon sistemlerinde magnezyumun kullanıldığı görülmektedir [24].



#### **4. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ**

Magnezyum alaşımları üzerine yapılan çoğu araştırma, düşük üretim maliyetleri nedeniyle dökme ürünlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Ergitme ve döküm teknikleri ile elde edilen malzemelerin mikroyapısal heterojenliği ve kaba tane boyutu, düşük mukavemetli malzemelerin elde edilmesine yol açar. Döküm ürünlerine yapılacak uygun termomekanik işlemler, mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlayabilir.

Toz metalurjisi (PM) prosesleri, yüksek mukavemetli magnezyum alaşımlarının üretimi için alternatif bir yol sunar. Magnezyum alaşımlarının ticari üretimini engelleyen en büyük dezavantaj, yüksek fiyatlı oluşu ve magnezyum tozlarının oksijene karşı yüksek reaktivitesidir.

Toz metalurjisi tarafından hazırlanan magnezyum alaşımlarının avantajları; ince tane boyutu, alaşım elementlerinin katı çözünürlüğündeki artışa bağlı dayanım artışıdır. MgO partiküllerinin nanometrik dağılımı ince taneli magnezyumda bile yüksek sürünme mukavemeti ile sonuçlanır [25].

##### **4.1. Saf Magnezyum**

Titanyumun aksine magnezyum, oksijen için belirgin bir çözünürlük göstermez, ancak yüksek bir afinite gösterir. Böylece, havaya maruz kaldıktan sonra, partikül yüzeyinde sinterlemeyi kuvvetle önleyen 3-5 nm'lik ince ve stabil bir oksit tabakası oluşur. Bu nedenle, magnezyumun sinterlenmesi genellikle uygun değildir. Ancak, zamanla yapılan araştırmalar magnezyum sinterlemesinin mümkün olabileceğini göstermiştir. En büyük gereksinim, ısı işlem sırasında tüm parçaları oksijenden korumaktır. Bu, yüksek saflıktaki inert gaz atmosferinde sinterleme işlemi ile sağlanabilir. Sinterleme, termal olarak aktif bir işlem olduğundan, görünür sonuçlar elde etmek için sinterleme sıcaklıkları mümkün olduğu kadar yüksek olarak seçilmelidir [6].

## 4.2. Silisyum Karbür Takviyeli Magnezyum Matrisli Kompozitler

Silisyum karbür takviyeli magnezyum matrisli kompozitler ile ilgili geçmişte sınırlı çalışmalar yapılmıştır. Ancak yapısal uygulamalarda düşük yoğunluklu magnezyum matrisli kompozitlere duyulan ihtiyaç son zamanlarda bu araştırmaları hızlandırmıştır. SiC takviyeli magnezyum esaslı kompozitlerde takviye; fiber, whisker ve parçacık şeklinde kullanılmaktadır. Bu kompozitler sıvı emdirme, sıkıştırılmalı döküm, toz metalurjisi ve karıştırılmalı döküm yöntemleri ile üretilmektedir. Ancak maliyet nedeniyle son zamanlarda çalışmalar, SiC parçacık ile karıştırılmalı döküm yöntemine odaklanmıştır.

Magnezyum ana malzemeye SiC takviye ilavesi ile malzemenin özellikle elastik modülünde ve çekme dayanımında artış elde edilmektedir.

SiC whisker takviyeli magnezyum kompozit malzemenin dayanım değerleri, SiC parçacık takviyeli magnezyumdan daha yüksektir. Ancak whiskerlerin ana malzemede homojen dağılımı zordur. SiC whisker'den hazırlanan ön şekilde (preform) sıvı metal emdirme yönteminin kullanılması, whiskerlerin belirli bölgelere yığılması (kümeleşme) probleminin neden olmuştur. Toz metalurjisi yönteminde ise uygulanan ekstrüzyon sırasında SiC fiberlerin kırıldığı görülmüştür. Bu etkilerin her ikisi de mekanik özelliklerin düşmesine neden olmuştur.

SiC partikülleri ve magnezyum ana malzeme arayüzeyinde oluşan reaksiyon ürünlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Magnezyumun yüksek kimyasal ilgisi nedeniyle SiC partikülleri, üretim şartlarına bağlı olarak arayüzey filmi MgO parçacıklarıyla (10-70 nm çapında) ana malzemedan ayrılmaktadır. Bu filmler 500 nm üzerinde kalınlığa ulaşır ve arayüzeyde çatlama ihtimalini artırır. MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in oksit indirgemesinden oluşabildiği gibi üretim işlemi sırasında sıcaklığın bir sonucu olarak SiC yüzeyinde oksit oluşumundan ortaya çıkabilmektedir. Oksit filmine ek olarak kompozitte ikincil faz Mg<sub>2</sub>Si ve Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazı gözlemlenebilir. İnce parçacıklar şeklindeki Mg<sub>2</sub>Si, magnezyum matrisi ve SiC yüzeyindeki SiO<sub>2</sub> arasında meydana gelen reaksiyondan kaynaklandığı tespit edilmiştir.

SiC partikül takviyeli magnezyum kompozitlerde bileşenler arasındaki bağlanmanın adhesif karaktere sahip olduğu saptanmıştır. Bu tür arayüzey bağlanma tipi, sıvı magnezyum tarafından SiC'in yüksek ıslatalabilirliği ve sıvı magnezyumda SiC'in yüksek kararlılığı ile ilgilidir. Ancak alaşım elementlerinin hazırlanmasında ve üretim sırasında işlem parametrelerinin yanlış seçilmesi magnezyum ve SiC parçacıkları arasında bağ oluşumunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir [26].

Tablo 4.1. SiC partikül takviyeli AZ91 alaşımının mekanik özellikleri [26]

SiC boyutu ( $\mu\text{m}$ )	%0.2 Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül(GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama
AZ91	150	42	190	1.15
15	120	44.5	135	0.47
20	117	45.1	120	0.24
25	117.5	42.15	127.5	0.33
38	110	42	120	0.45
50	105	49.8	110	0.23

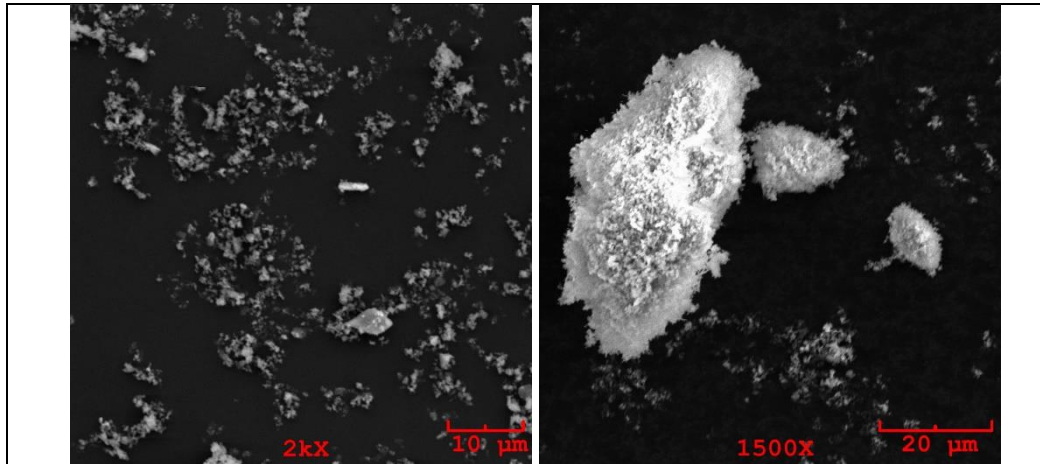
## 5. MALZEME VE YÖNTEM

### 5.1. Çalışmada Kullanılan Tozlar

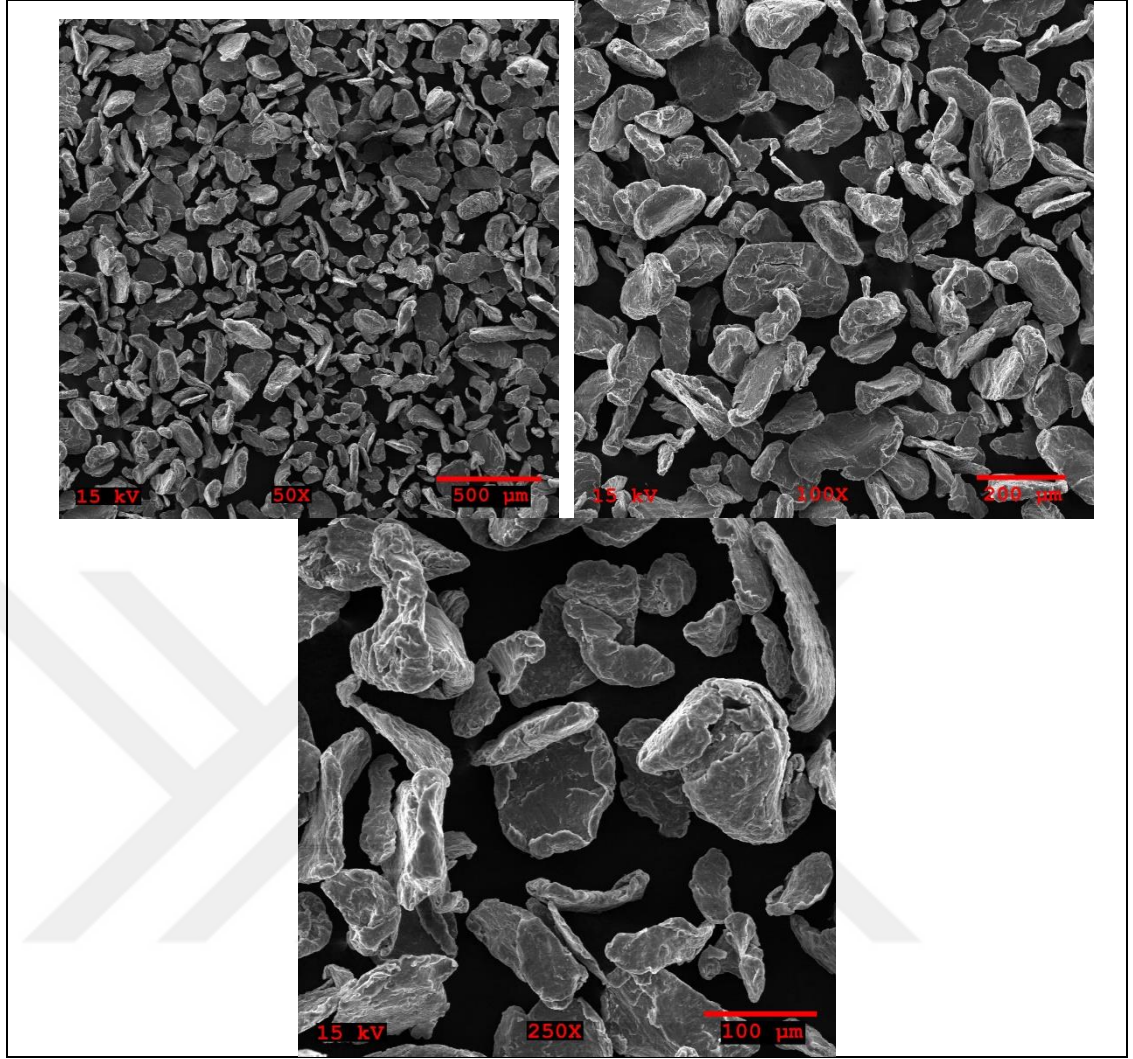
Bu çalışmada amaçlanan silisyum karbür takviyeli magnezyum esaslı kompozitler, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Mevcut çalışmada matris malzemesi olarak saf magnezyum tozu ve farklı oranlarda silisyum karbür ve yarıca grafit takviyesi yapılmıştır. Saf magnezyum, MME Magnezyum ve Metal Tozları Endüstri ve Ticaret A.Ş' den ticari olarak temin edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda; ortalama tane boyutu 70 µm olan magnezyum metal tozları, ortalama boyutu 2,5µm SiC takviye parçacıkları ve ortalama boyutu 15 µm olan grafit kullanılmıştır. Çalışmanın gerçekleştirilmesi için 5 farklı numune basınç destekli sinterleme yöntemi ile üretilmiştir.

Magnezyum tozlarının yuvarlak (ve kısmen köşeli) geometriye sahip olduğu, buna karşılık SiC takviye partiküllerinin ise topaklanmış durumda olduğu Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' deki SEM resimlerinden görülmektedir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan SiC partiküllerinin SEM görüntüleri



Şekil 5.2. Deneysel çalışmada kullanılan saf magnezyum partiküllerinin SEM görüntüleri

## 5.2. Tozların Basınç Destekli Sıcak Presle Sinterlenmesi

Farklı takviye oranlarına sahip magnezyum esaslı numunelerin üretimi Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan DIEX marka sıcak pres cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Magnezyumun oksijene olan yüksek afinitesi dikkate alınarak sinterleme işlemi vakum ( $10^{-4}$  mbar) altında yapılmıştır. Saf magnezyum tozlarıyla birlikte silisyum karbür takviyeleri, grafit kalıp içerisine yerleştirilip preslenerek sinterlenmiştir. Sıcak presleme işlemi;  $570^{\circ}\text{C}$ 'de 45 MPa basınç altında

5 dakika ısıtma ve soğutma, 30 dakika sinterleme olmak üzere; toplam 40 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir.

Sinterleme işlemi sonrası nihai ürünün şekli; kalıp formundan dolayı silindirik şekilde olmuştur. Grafit kalıbın kullanılmasının nedeni; sahip olduğu yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik özelliğidir. Bunun yanı sıra, grafitin yağlayıcılık özelliği olduğundan basınç destekli sinterleme yöntemlerinde genel olarak tercih edilen bir kalıp malzemesidir. Ayrıca kalıp ile toz partikülleri arasındaki reaksiyonu önleyip aynı zamanda zımba ile kalıp arasında ve alt üst zımba yüzeylerinde yağlayıcılık özelliği olan grafit kağıtlardan da yararlanılmıştır.

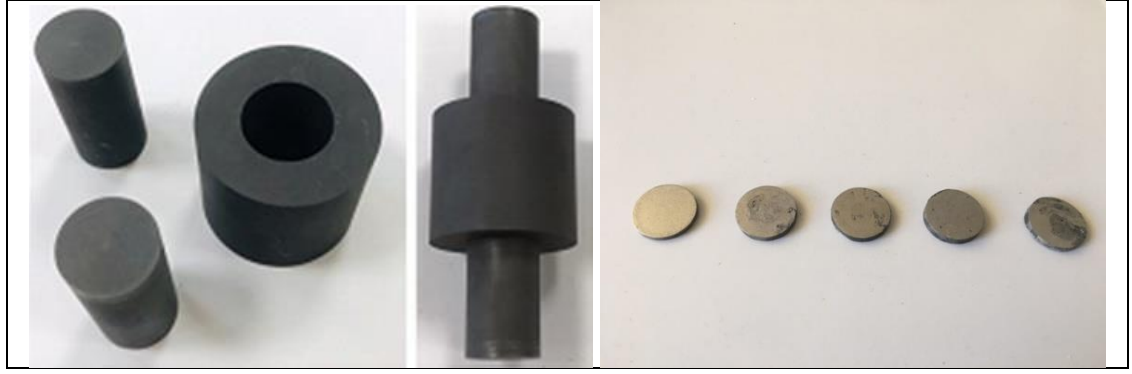
Bu çalışmada kullanılan grafit kalıp ve üretilen numuneler Şekil 5.4’de verilmiştir. Kullanılan grafit kalıbın çapı 20 mm olması nedeniyle, elde edilen numunenin çapı 20 mm, yüksekliği ise uygulanan basıncın ve sıcaklığın etkisiyle etkisiyle 4mm’dir.

Sinterleme işlemi sırasında uygulanan zaman-sıcaklık grafiği Şekil 5.5’de verilmiştir.

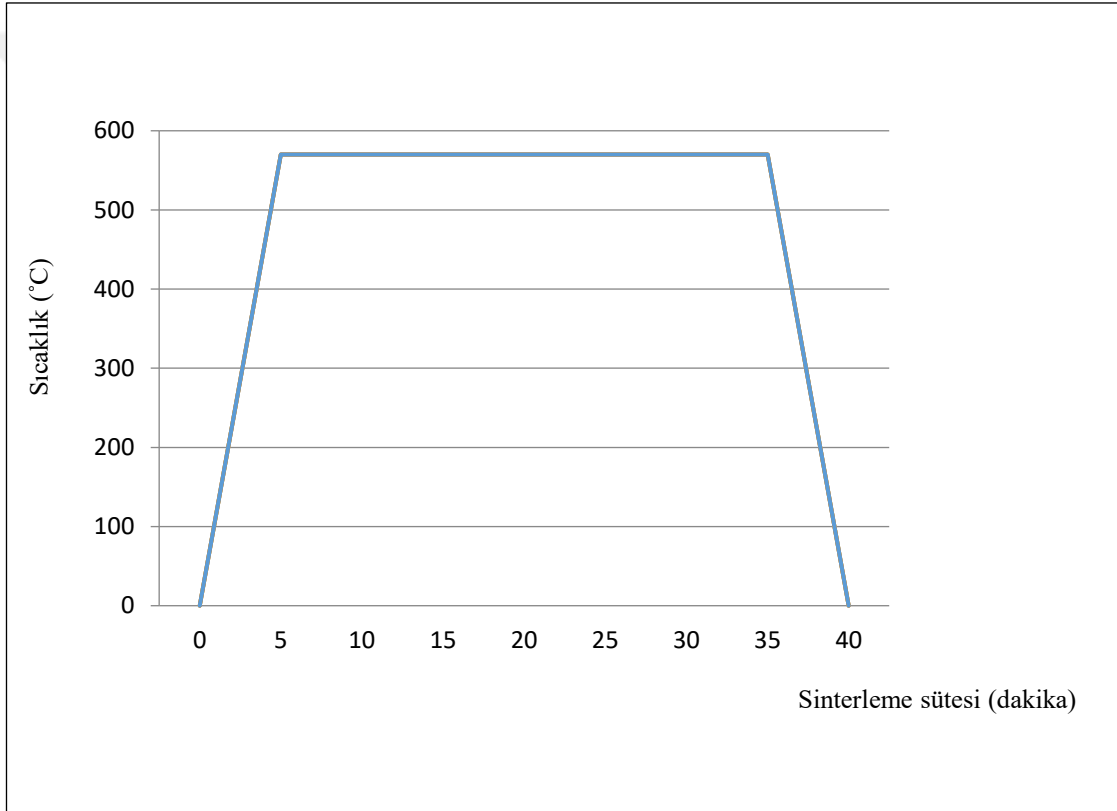


Şekil 5.3. Deneysel çalışmada kullanılan sıcak pres

Sinterleme işlemi sonrası elde edilen numunelerin makro görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.4. Deneysel çalışmada kullanılan grafit kalıp ve üretilen numuneler (soldan sağa sırasıyla saf Mg, %10 SiC takviyeli, %20 SiC takviyeli, %30 SiC takviyeli, %30 SiC + %5 grafit takviyeli)

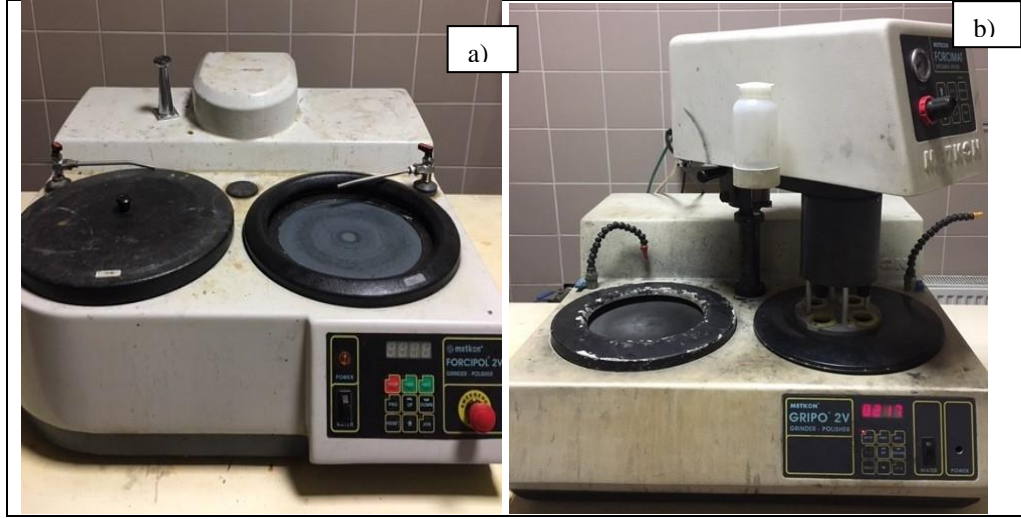


Şekil 5.5. Sinterleme işlemi için uygulanan zaman-sıcaklık grafiği

### 5.3. Üretilen Numunelerin Metalografik İşlemleri

Sıcak pres yöntemi ile üretilen numuneler öncelikle aşınma ve sertlik testleri için zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Zımparalama için 320, 600, 1000 ve 2500 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Ardından 9,6,3,1  $\mu\text{m}$ 'luk elmas pasta ve parlatma sıvısı ile parlatılmıştır. Yüzeyde oluşabilecek kirlilikleri ve oksitlenmeleri gidermek için 20 dakika süreyle ultrasonik temizleme işlemi uygulanmıştır.





Şekil 5.6. a) Zımparalama cihazı, b) Parlatma cihazı



Şekil 5.7. Ultrasonik temizleme cihazı

#### 5.4. Yoğunluk Ölçümü

Kompozit numunelerin yoğunluğu, (5.1) eşitliğinde sunulan Arşimet prensibinden yararlanılarak AND Marka GR-200 model hassas terazi cihazında ölçülmüştür. Yapılan çalışmada magnezyumun korozyon özelliğinden dolayı sıvı olarak etil alkolden yararlanılmıştır. Etil alkolün yoğunluğu  $0,789 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.

$$\text{Arşimed prensibi} = \frac{\text{cismin havadaki ağırlığı} \times \text{sıvının yoğunluğu}}{\text{cismin havadaki ağırlığı} - \text{cismin sıvıdaki ağırlığı}} \quad (5.1)$$





Şekil 5.8. Hassas terazi

## 5.5. Mekanik Testler

### 5.5.1. Aşınma testi

Hazırlanan numuneler metalografik (zımparalama, parlatma) işlemlerinden sonrası numuneler, her 0,1 metrede bir (yaklaşık her saniyede bir) veri toplayabilen NANOVEA marka ball on disk tipi aşınma cihazı kullanılarak 20 N yük altında, 150 rpm dönme hızı ve 200 m olacak şekilde numuneler aşındırılmıştır. Aşınma yüzeyleri daha sonra SEM’de incelenmiştir.



Şekil 5.9. Aşınma testi cihazı

### 5.5.2. Sertlik ölçümü

Numunelerin sertlik deneyleri Future Tech marka Vickers cihazında, 5 kgf yük altında 10 sn süre ile uygulanmıştır. Numune kesitinden 6 farklı bölgede yapılan ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmıştır ve diyagramlar standart sapma hesaplanarak oluşturulmuştur.



Şekil 5.10. Vickers sertlik ölçüm cihazı

### 5.6. Mikroyapısal Karakterizasyon

#### 5.6.1. SEM ve EDX incelemesi

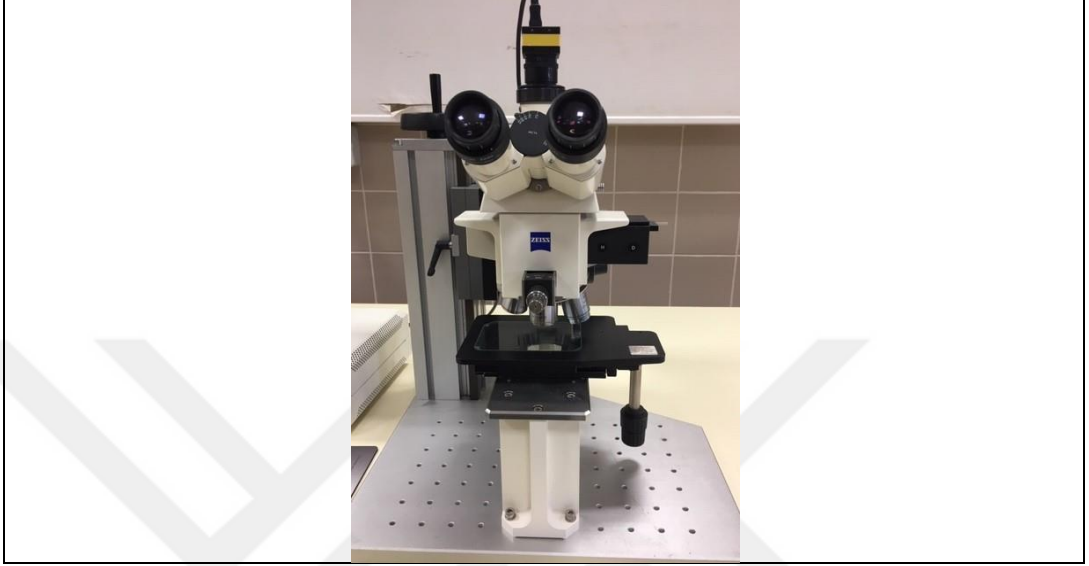
Numunelerin SEM görüntülerinin alınması ve EDX analizi JEOL JSM-6060 marka taramaları elektron mikroskobunda yapılmıştır.



Şekil 5.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### 5.6.2. Optik mikroskop incelemesi

Deneyisel çalışmada mikroyapı incelemelerinde Zeiss marka optik mikroskoptan yararlanılmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Optik mikroskop

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

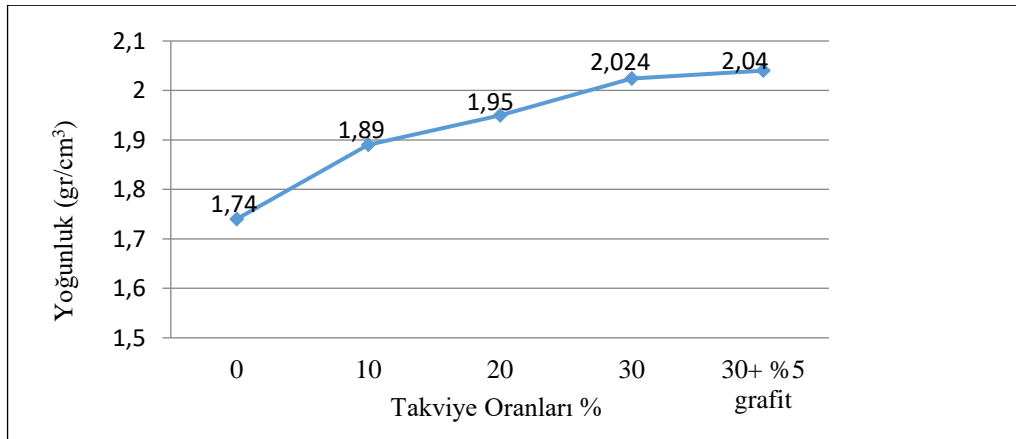
### 6.1. Yoğunluk Sonuçları

Arşimet prensibi yardımı ile yapılan deneyde magnezyumun korozyon özellikleri dikkate alınarak etil alkolden yararlanılmıştır. Toz metalurjik yöntemle üretilen 5 adet numune ağırlıkları sırasıyla havada ve sıvı içerisinde tartılmış ve Arşimet prensibine göre yoğunlukları hesaplanmıştır.

SiC takviye oranlarına bağlı olarak kompozit malzemelerin sahip olduğu teorik yoğunluk ve Arşimet prensibi yardımıyla hesaplanan yoğunluklar Tablo 6.1'de verilmiştir. SiC takviye oranı arttıkça yoğunluğun arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni silisyum karbürün magnezyumdan daha yoğun olmasıdır. Teorik yoğunluğa ulaşamamasının nedeni ise proses sırasında giderilemeyen poroziteden kaynaklıdır.

Tablo 6.1. Takviye oranlarına göre teorik ve Arşimet yoğunlukları

	Saf Magnezyum	Mg-% 10 SiC	Mg-% 20 SiC	Mg-% 30 SiC	Mg-% 30 SiC+% 5 Grafit
Teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,74	1,89	2,034	2,181	2,194
Arşimet yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	1,74	1,89	1,95	2,024	2,040



Şekil 6.1. Yoğunluk-takviye oranı grafiği

Şekil 6.1'den de görülebileceği üzere; SiC takviye oranının artması ile beraber başlangıçta hızlı bir şekilde yoğunluk artışı olmakta, sonrasında ise daha yavaş bir şekilde artış devam etmektedir.

## 6.2. Metalografik Hazırlık

Magnezyum matrisli ve çeşitli oranlarda silisyum karbür takviyesi yapılan kompozit malzemenin, basınç destekli sıcak presleme ile sinterlenme işlemi sonrası numunelerin mekanik testlere ve mikroskopik incelemelere hazır hale gelebilmesi için metalografik olarak hazırlanmıştır. Sinterleme işlemi sonrası 320 meshlik zımpara ile ilk yüzey düzleme işlemi yapılmıştır. Sonrasında sırasıyla 600, 1000, 2500 meshlik zımparalar kullanılmıştır. Her zımpara değişiminde numune 90° döndürülüp ve alkolle yıkanarak temizlenmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında çuha kumaş üzerine elmas pasta ve parlatma sıvısı tatbik edilerek parlatma işlemi tamamlanmıştır.

## 6.3. Aşınma Testi Sonuçları

Metalografik işlemler sonrasında numuneler bilya yarıçapı 5 mm olan pin on disk tipi bir cihazda aşınma testleri yapılmıştır. Numuneler döner tabla üzerine sabitlenerek 20 N yük altında 150 rpm dönüş hızıyla 200 m mesafede aşınma testine tabi tutulmuştur.

Numuneler, aşınma testi öncesinde hassas terazide tartılmıştır. Tablo 6.2'de farklı takviye oranlarına bağlı olarak, ilk ve son ölçümler arasındaki ağırlık kaybı verilmiştir.

Tablo 6.2. Aşınma testi öncesi ve sonrası tartım sonuçları

	Saf Mg	Mg- %10 SiC	Mg-% 20 SiC	Mg-% 30 SiC	Mg-% 30 SiC -%5 Grafit
İlk ağırlık(g)	1.8131	2.0226	1.9735	2.4566	2.2712
Son ağırlık (g)	1.7768	2.0104	1.9621	2.4492	2.2707
Ağırlık kaybı (g)	0.0363	0.0122	0.0114	0.0074	0.0005

Özgül aşınma miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla da hesaplanmıştır.

$$W_s = \Delta m / d F_n S = \Delta v / F_n S \quad (6.1)$$

Ws: Özgül aşınma miktarı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )

$\Delta m$ : Ağırlık kaybı (mg)

d: yoğunluk ( $\text{mgr}/\text{mm}^3$ )

$F_n$ : Uygulanan normal kuvvet (N)

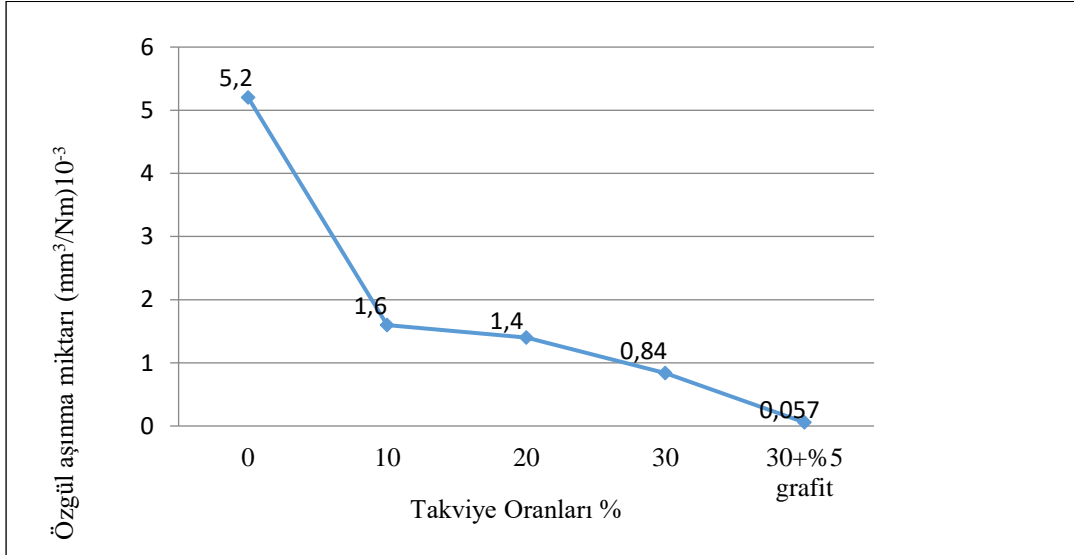
S: Aşınma mesafesi (m)'ni ifade etmektedir.

Tüm numuneler aşınma testinden sonra aşınma oranı hesaplamasına tabi tutulmuştur. Tablo 6.3'de ise farklı takviye oranları için ortaya çıkan aşınma oranı değerleri verilmiştir.

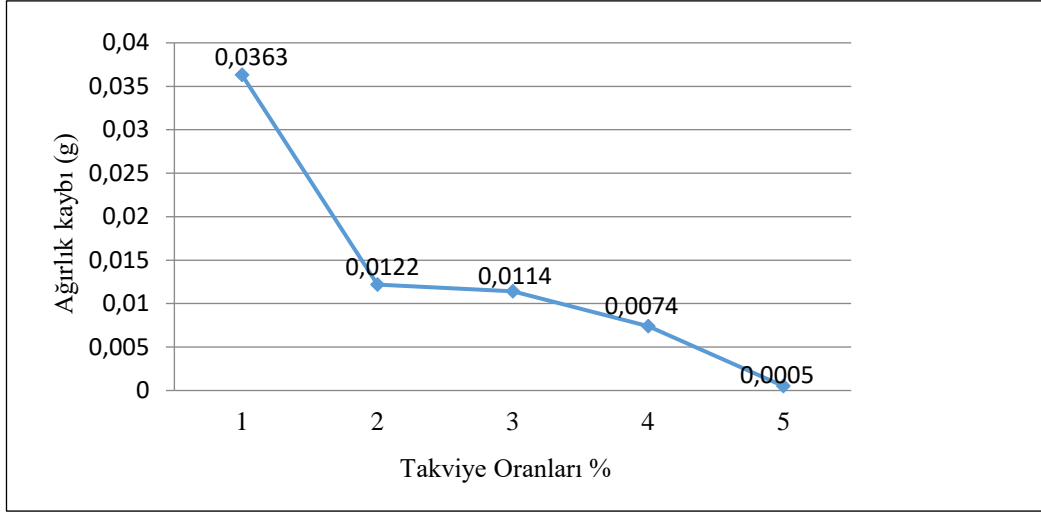
Tablo 6.3. Özgül aşınma miktarı

	Saf Mg	Mg- % 10 SiC	Mg-% 20 SiC	Mg-% 30 SiC	Mg-% 30 SiC -%5 Grafit
Özgül aşınma miktarı $\text{mm}^3/\text{Nm}$	$5,2 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$0,84 \times 10^{-3}$	$0,057 \times 10^{-3}$

Şekil 6.2'de görüldüğü üzere SiC takviye oranlarının artması ile birlikte kompozit malzemenin aşınma miktarı azalmaktadır.



Şekil 6.2. Özgül aşınma miktarı grafiği



Şekil 6.3. Takviye oranı artışına bağlı olarak aşınma testi sonrası ağırlık kaybı değişim grafiği

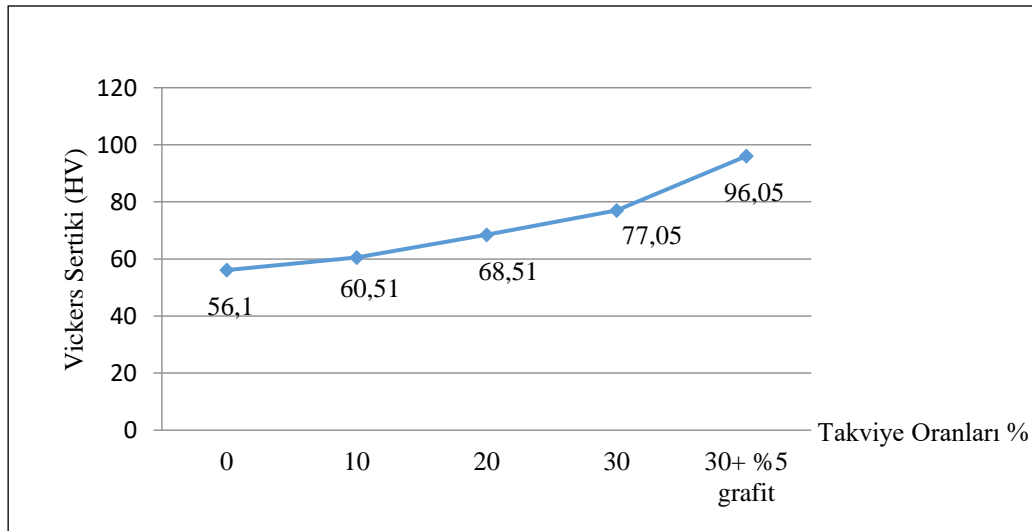
#### 6.4. Sertlik Testi Sonuçları

Numunelere ait sertlik test sonuçları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Sertlik testi sonuçları

Saf Mg	Mg-% 10SiC	Mg-% 20SiC	Mg-% 30SiC	Mg-% 30SiC- %5 Grafit
56.1 HV	60.51 HV	68.51 HV	77.05 HV	96.05 HV

Tablo 6.4'ten ve Şekil 6.4'ten de görülebileceği gibi, SiC partikül oranı arttıkça kompozitin sertliği belirgin bir şekilde artmaktadır.



Şekil 6.4. Vickers sertlik ölçüm sonuçları

## 6.5. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) Aşınma İzlerinin İncelemesi

Farklı SiC takviye oranlarına sahip numunelere uygulanan aşınma testi sonrası aşınma yüzeyleri, JEOL JSM 6060 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Bu çalışmada ikincil (sekonder) elektronlar ile topografik kontrastta görüntüleme yapılmıştır.

Saf magnezyum görüntüleri incelendiğinde ağırlıklı olarak abrazif aşınma gözlenmiştir. SiC takviyesiyle birlikte iz genişliğinin azalmaya başladığı, abrazif aşınmanın daha yüzeysel kaldığı gözlemlenmiştir.

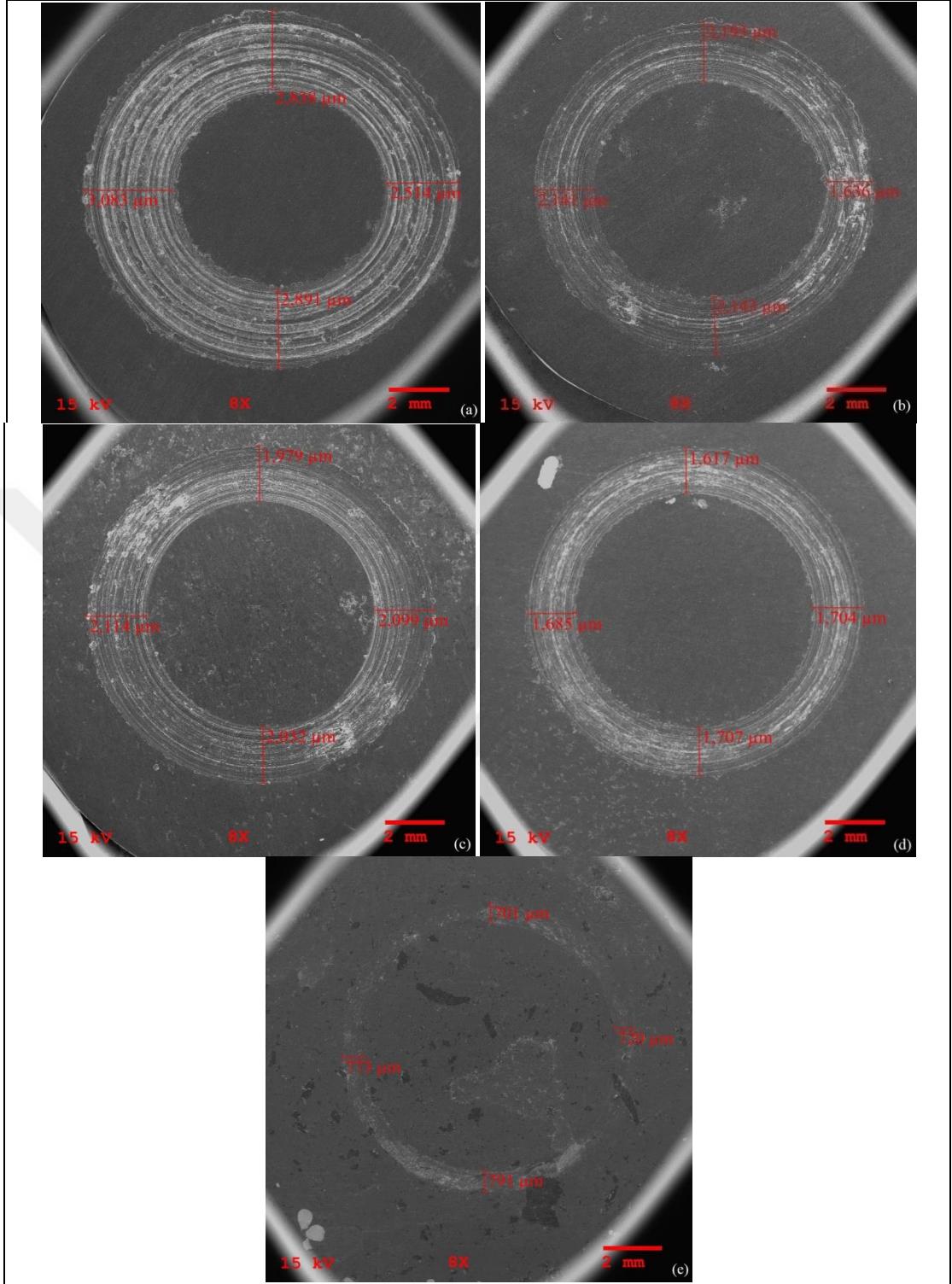
%20 SiC takviyeli malzemelerde adhezif aşınmanın olduğu görülmektedir. (Şekil 6.5). %30 SiC takviyeli numunede adhezif karakterde aşınma olduğu, %30 SiC+%5 grafit ilaveli numunede ise adhezif aşınmanın baskın olduğu, abrazif aşınma neredeyse olmadığı anlaşılmıştır. %30 SiC+%5 grafit ilaveli numunede uygulanan yüke bağlı olarak tabakalar arası çatlamlar gözlemlenmiştir (Şekil 6.6).

Tablo 6.5. Aşınma izi genişlikleri ( $\mu\text{m}$ )

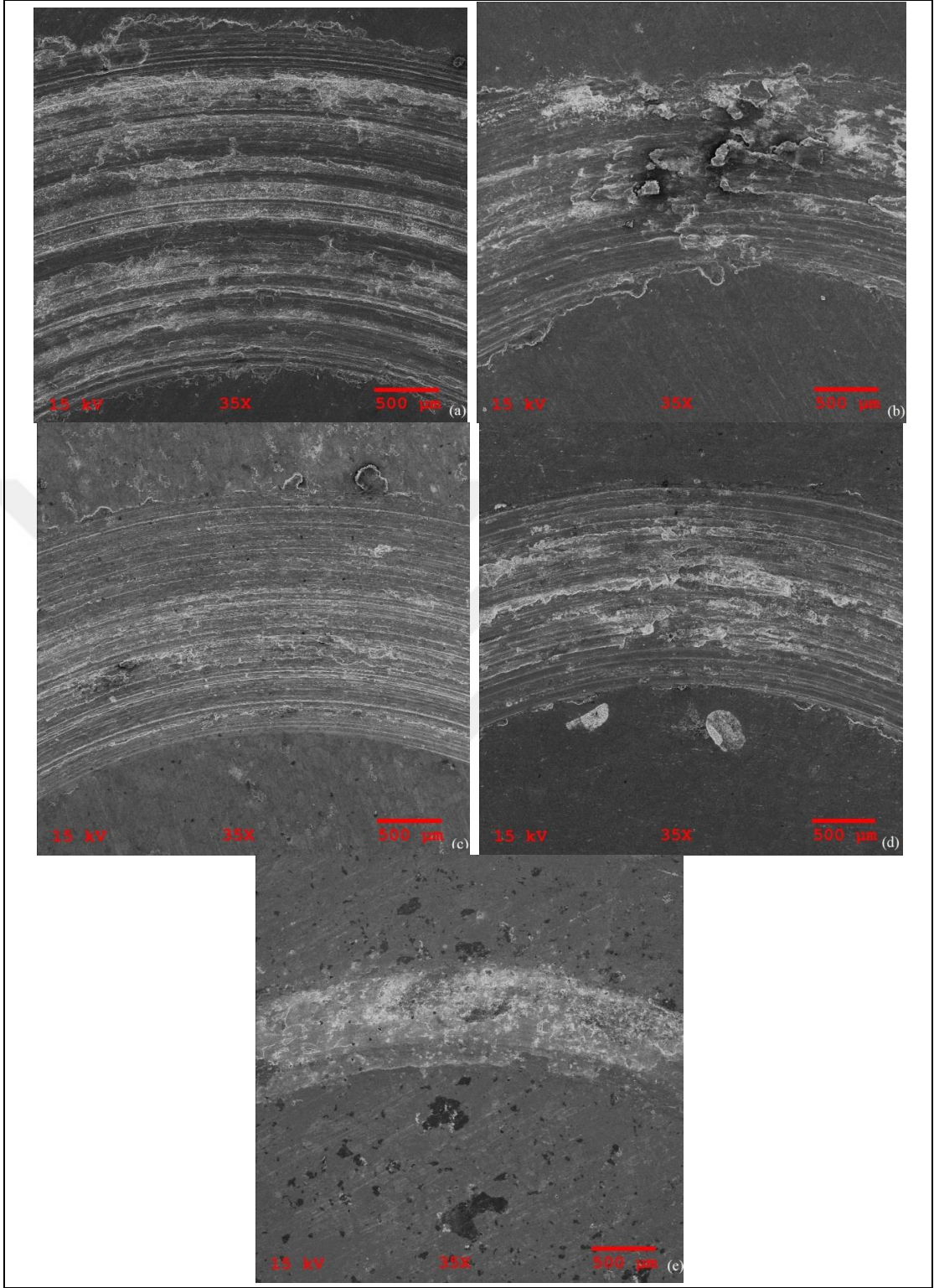
	Saf Mg	Mg /%10 SiC	Mg /%20 SiC	Mg /%30 SiC	Mg/%30 SiC+%5 Grafit
Ortalama $\pm$ standart Sapma	2,8315 $\pm$ 0,2 363	2,0282 $\pm$ 0,2 626	2,056 $\pm$ 0,05 412	1,6782 $\pm$ 0,0 419	746,25 $\pm$ 42, 64

Genel olarak mikroyapılara bakıldığında SiC takviye oranının artması ile birlikte aşınma izi genişlikleri azalmakta ve kompozit malzemenin aşınma direnci artmaktadır.



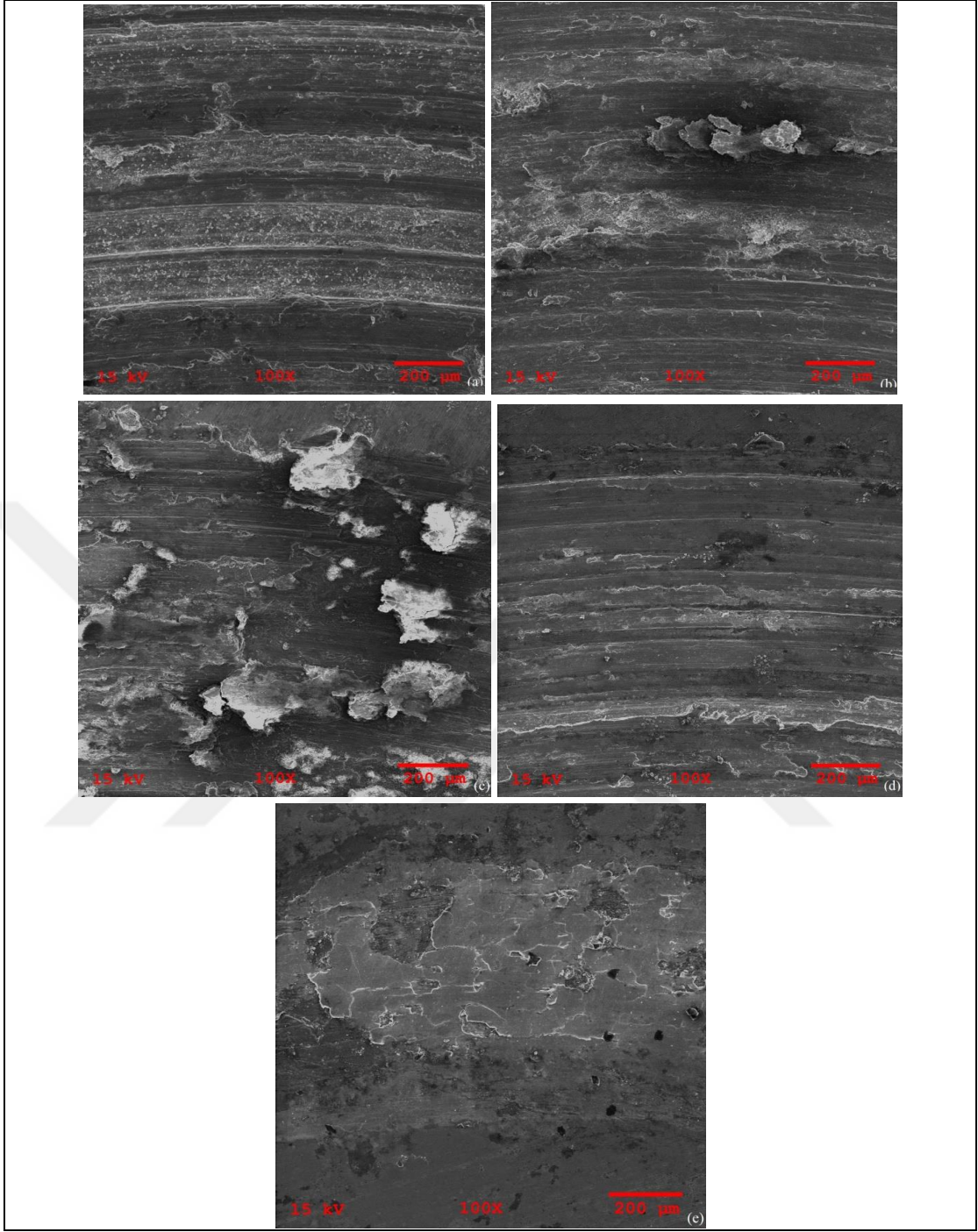


Şekil 6.5. a) Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+ %5 grafit takviyeli kompozitin 8x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri



Şekil 6.6. a) Saf Mg, b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 35x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri

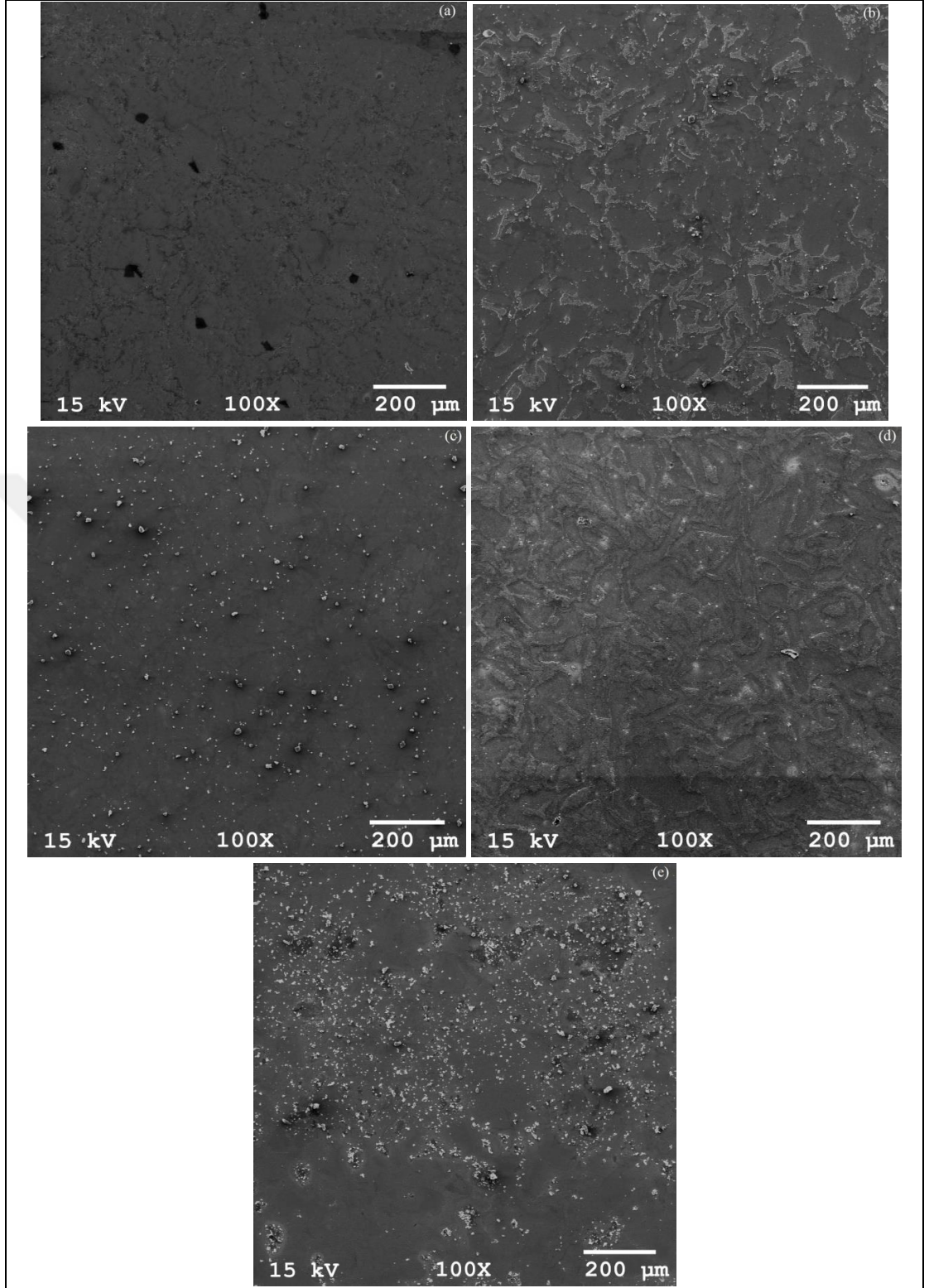




Şekil 6.7. a) Saf Mg ,b) % 10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 100x büyütmedeki aşınma SEM görüntüleri

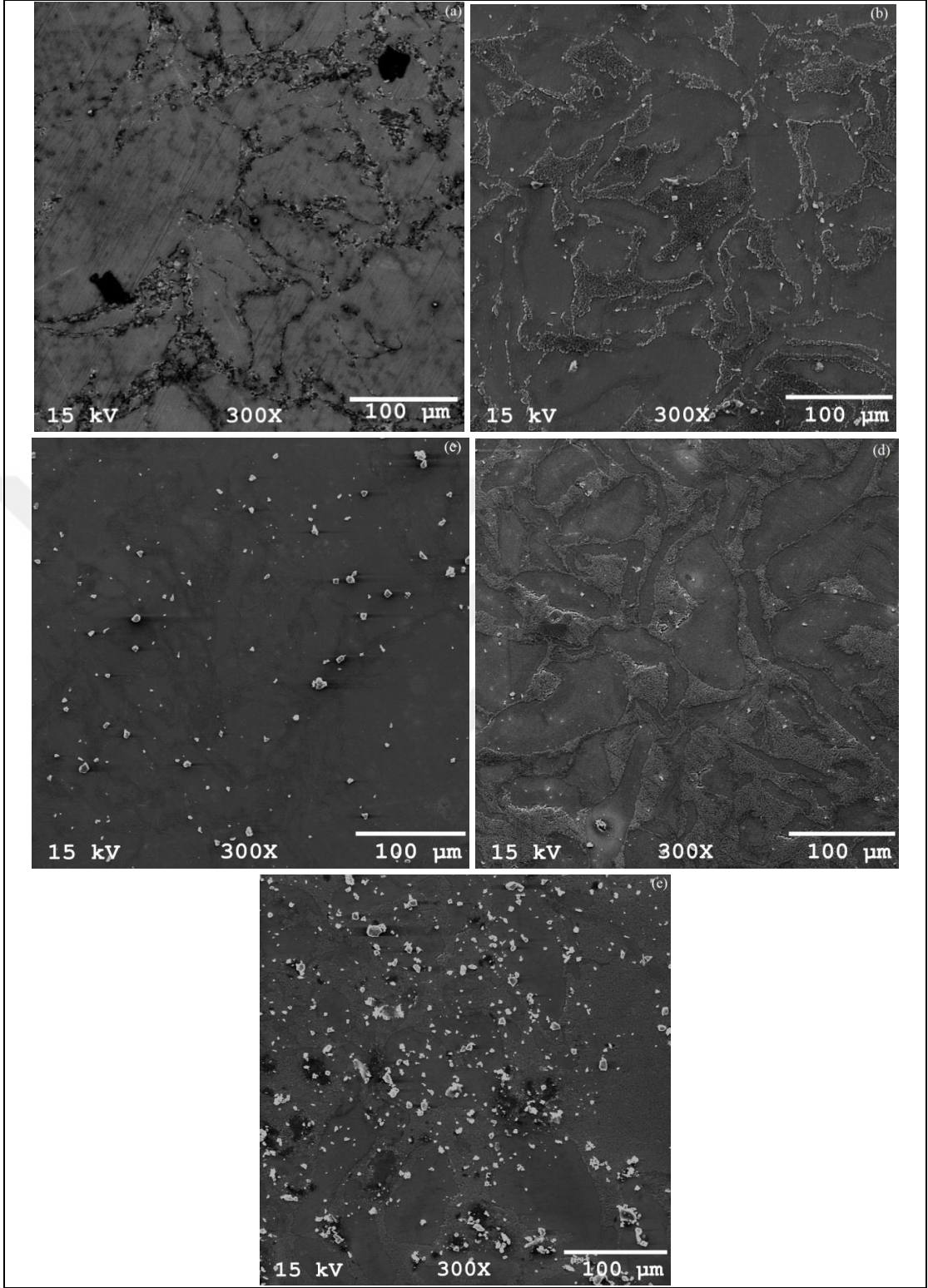
## 6.6. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) Faz İncelemesi

Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da saf magnezyum ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntüsü yer almaktadır. Mikroyapılar incelendiğinde SiC takviyesinin homojen bir şekilde matriste dağıldığını söylemek mümkündür.

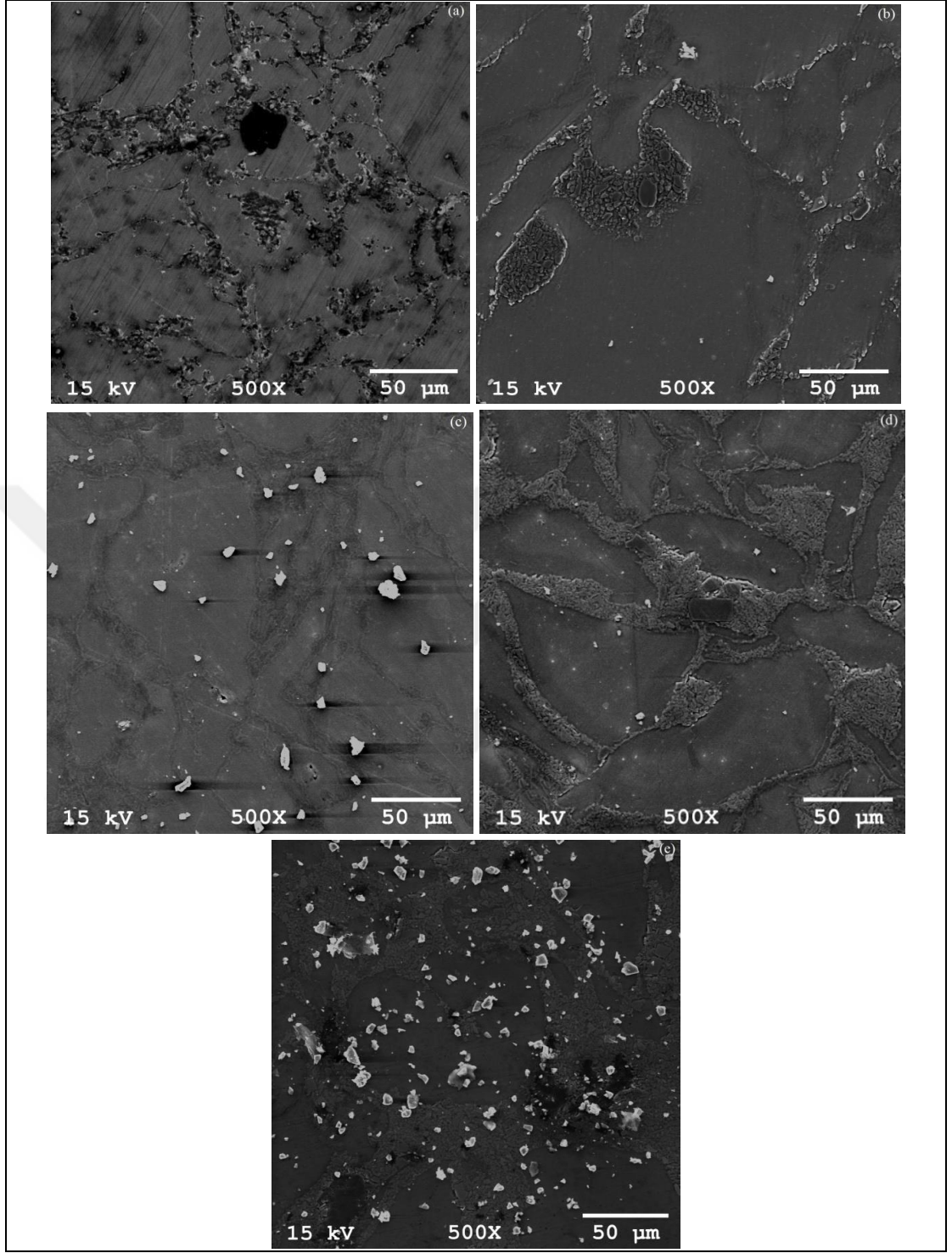


Şekil 6.8. a) Saf Mg ,b)%10 SiC takviyeli, c)%20 SiC takviyeli, d)%30 SiC takviyeli, e)%30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 100x büyütmedeki SEM görüntüleri





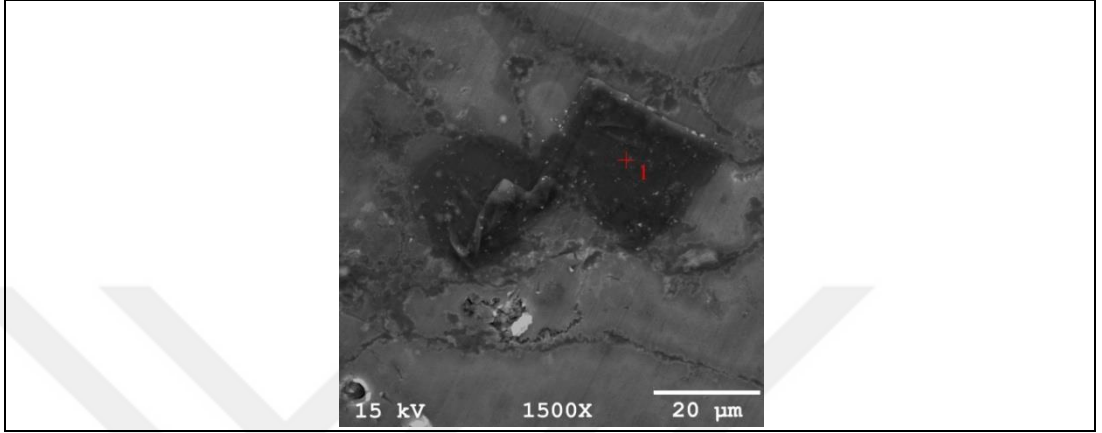
Şekil 6.9. a)Saf Mg ,b)%10 SiC takviyeli, c)%20 SiC takviyeli, d)%30 SiC takviyeli, e)%30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 300x büyütmedeki SEM görüntüleri



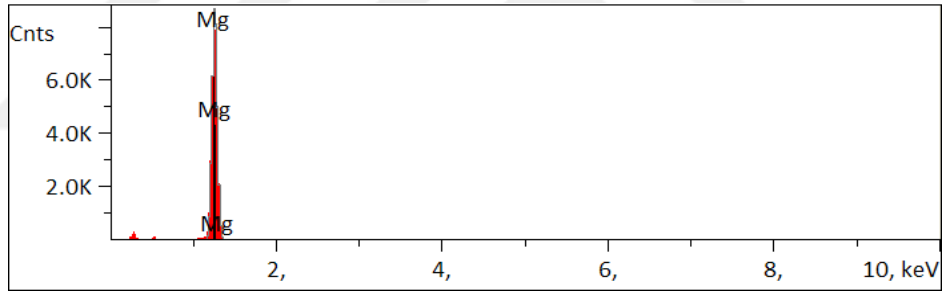
Şekil 6.10. a) Saf Mg ,b) %10 SiC takviyeli, c) %20 SiC takviyeli, d) %30 SiC takviyeli, e) %30 SiC+%5 grafit takviyeli kompozitin 500x büyütmedeki SEM görüntüleri

## 6.7. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDX) ve Mapping İncelemesi

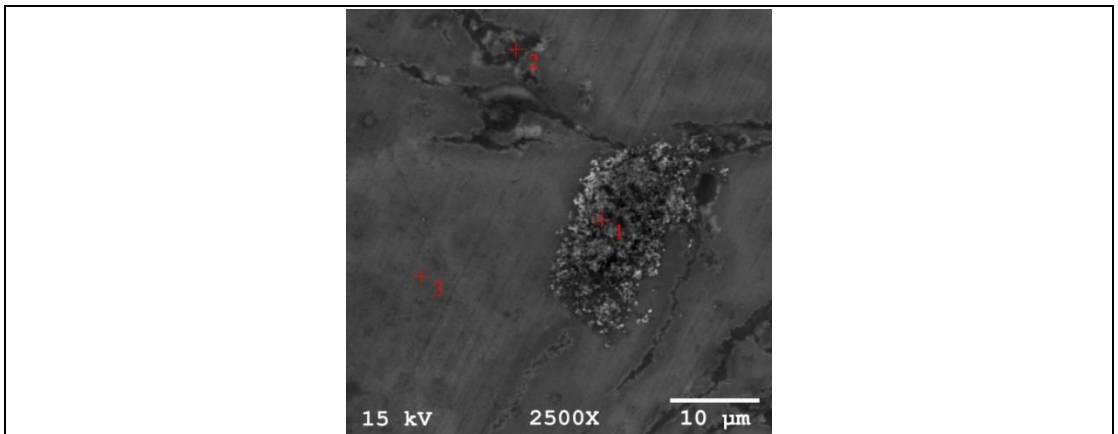
Şekil 6.11’de 1500x büyütmeye sahip saf magnezyum numunesi için seçilen bölgede EDX analizi yapıldığında Şekil 6.12’de verilen analiz sonucu koyu kontrastlı alanın magnezyumca zengin olduğu görülmüştür.



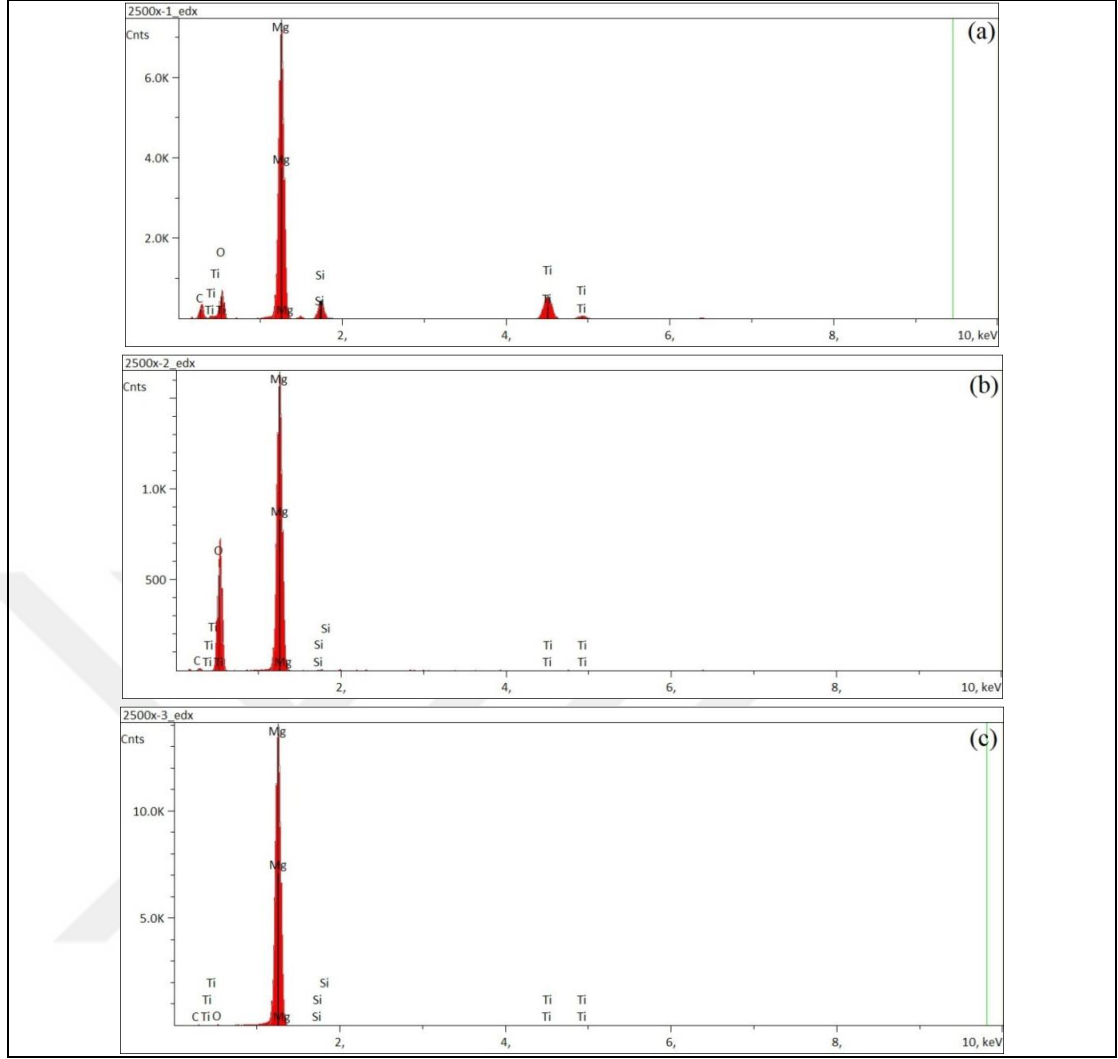
Şekil 6.11. Saf magnezyum numunesinde EDX analizi için seçilen 1 nolu bölge



Şekil 6.12. Seçilen bölge için EDX analizi sonucu

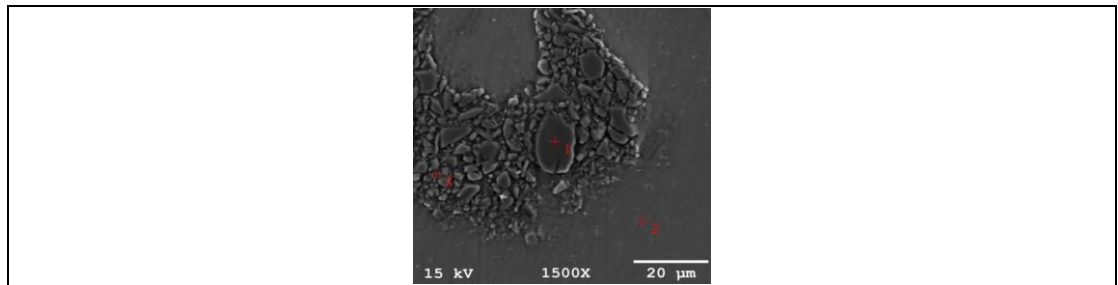


Şekil 6.13. Saf magnezyum numunesinde EDX analizi için seçilen üç farklı bölge



Şekil 6.14. (a) 1 numaralı, (b) 2 numaralı, (c) 3 numaralı seçili bölgeler için EDS analizi sonucu

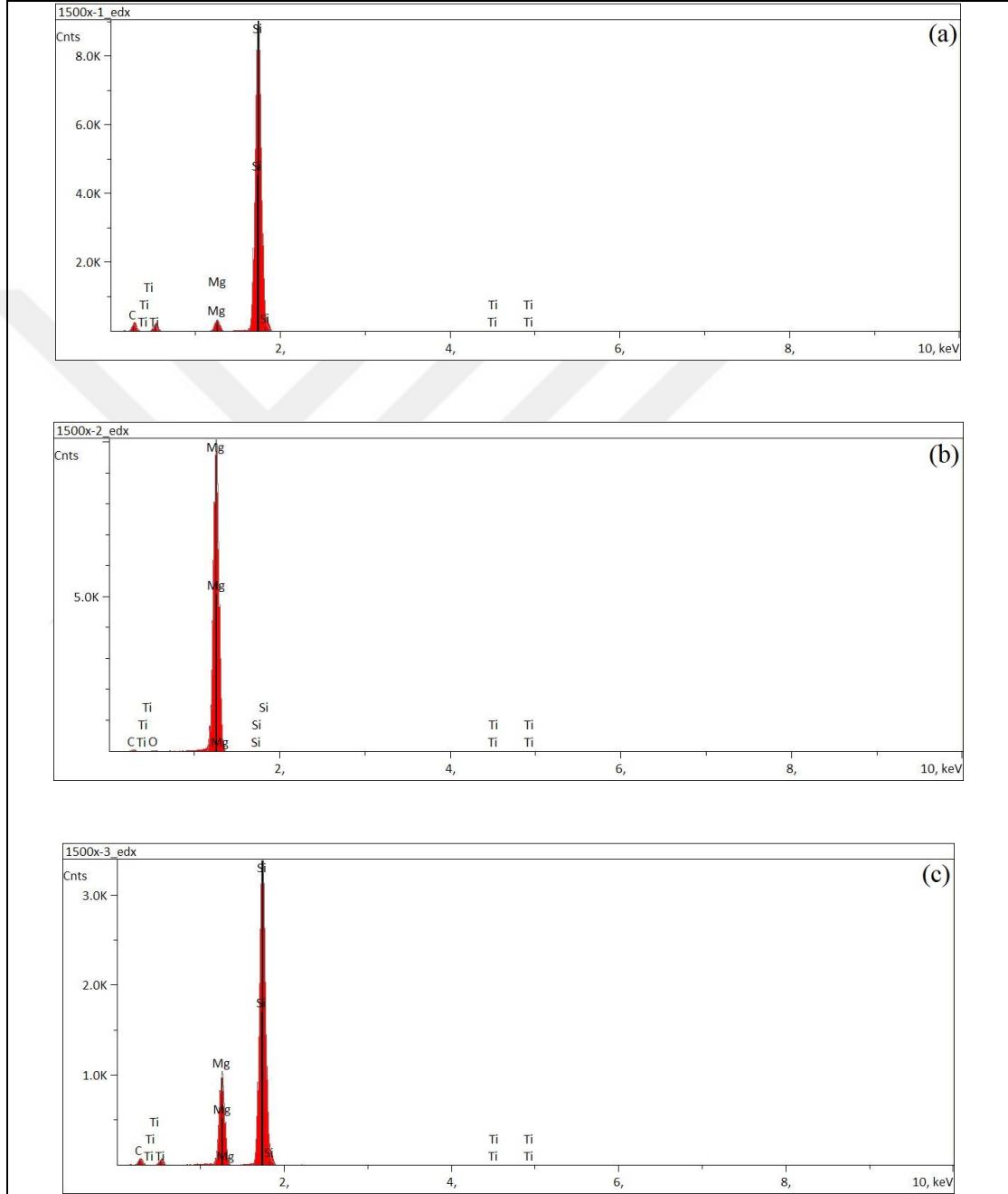
Şekil 6.13' de 2500x büyütmeye sahip saf magnezyum numunesinde seçilen bölgelerde yapılan EDX analizinde Şekil 6.14'de görüldüğü gibi 1,2 ve 3 numaralı bölgelerde ağırlıklı olarak magnezyum görülmüştür. Titanyumun, kullanılan kalıptan veya ortamdaki kirlilik olarak geldiği düşünülmektedir.



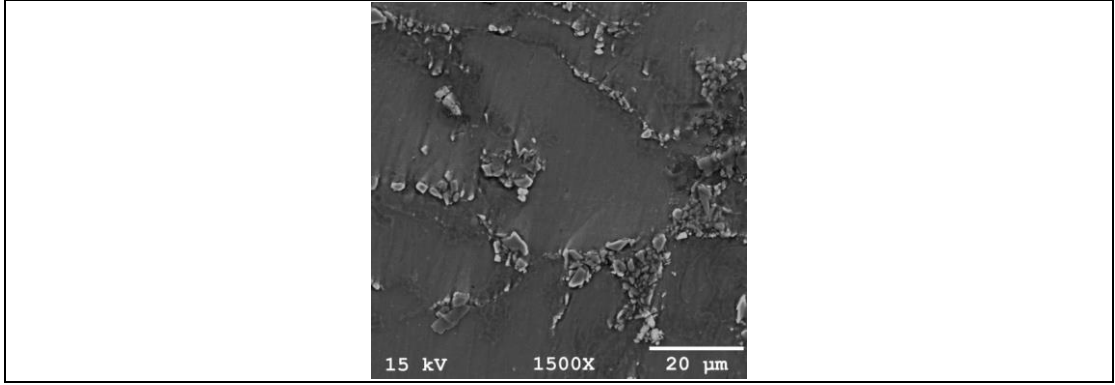
Şekil 6.15. %10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozit numunenin EDS analizi için seçilen bölgeler



Şekil 6.15'te 1500x büyötmeye sahip %10 silisyum karbür takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemeye EDS analizi yapıldığında, Şekil 6.16'da göröldüğü üzere 1 nolu bölgede ağırlıklı silisyum (SiC), 2 nolu alanda saf magnezyum son olarak 3 nolu seçili alanda ise magnezyum ve silisyum (SiC) beraber bulunmaktadır.

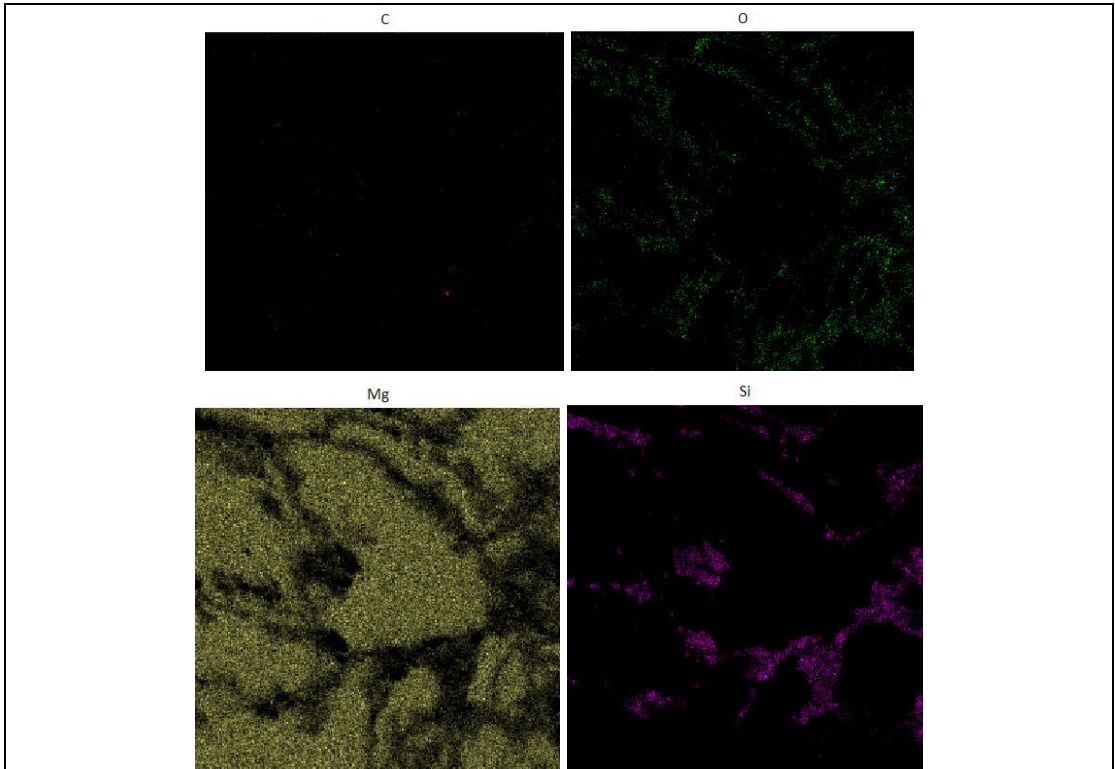


Şekil 6.16. (a) 1 numaralı, (b) 2 numaralı, (c) 3 numaralı seçili bölgeler için EDX analizi sonucu

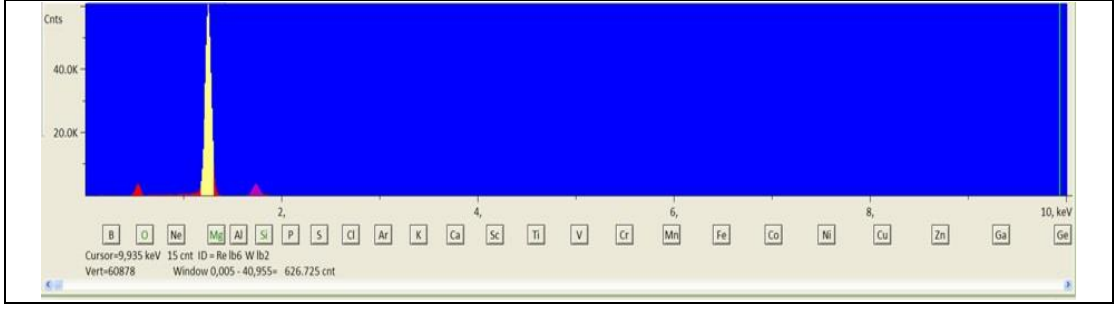


Şekil 6.17. %10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü

Şekil 6.17’de verilen 1500x büyütmedeki %10 silisyum karbür takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzeme için mapping (haritalama) analizi yapılmıştır. Şekil 6.18’de görüldüğü üzere C, O, Mg ve Si için ayrı ayrı EDX-Mapping sonucu bulunmaktadır. Kırmızı renk dağılımı karbonu, yeşil renk oksijenin bulunduğu bölgeleri, sarı alan magnezyumun bulunduğu bölgeleri ve mor ise silisyumun (SiC) bulunduğu bölgeleri temsil etmektedir. Oksijenin yapıda siliyum oksit ve magnezyum oksit şeklinde bulunduğu düşünülmektedir. Şekil 6.19’da EDX analiz sonucu verilmektedir.

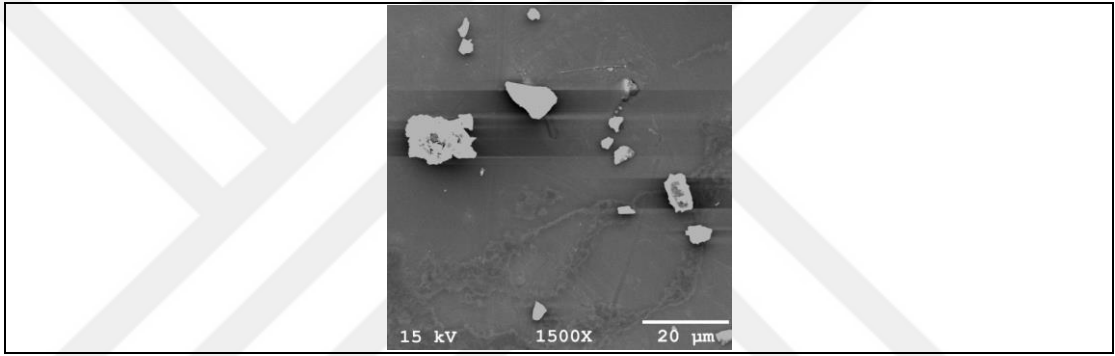


Şekil 6.18. Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi

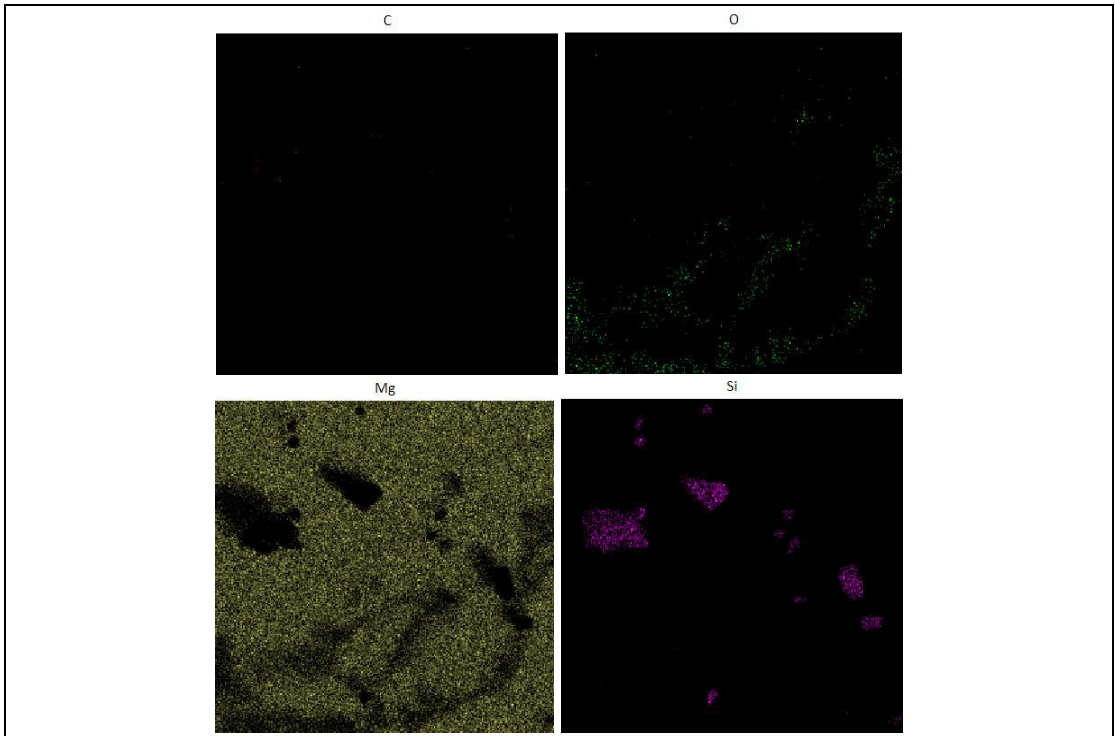


Şekil 6.19. %10 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu

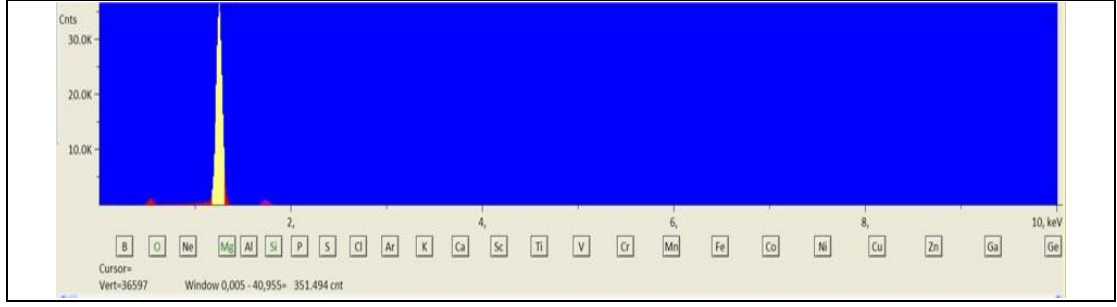
Şekil 6.18’de görüldüğü üzere yapıda sarı renkli görünen alan magnezyum esaslı alanı oluşturmaktadır.



Şekil 6.20. %20 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü

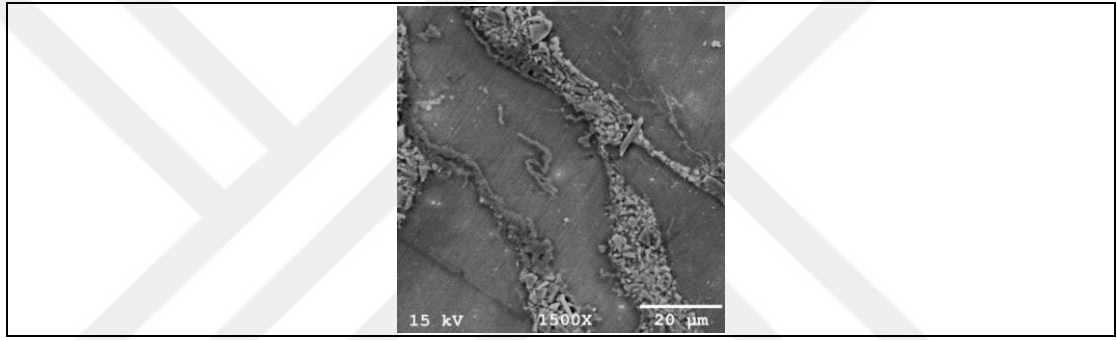


Şekil 6.21. Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi



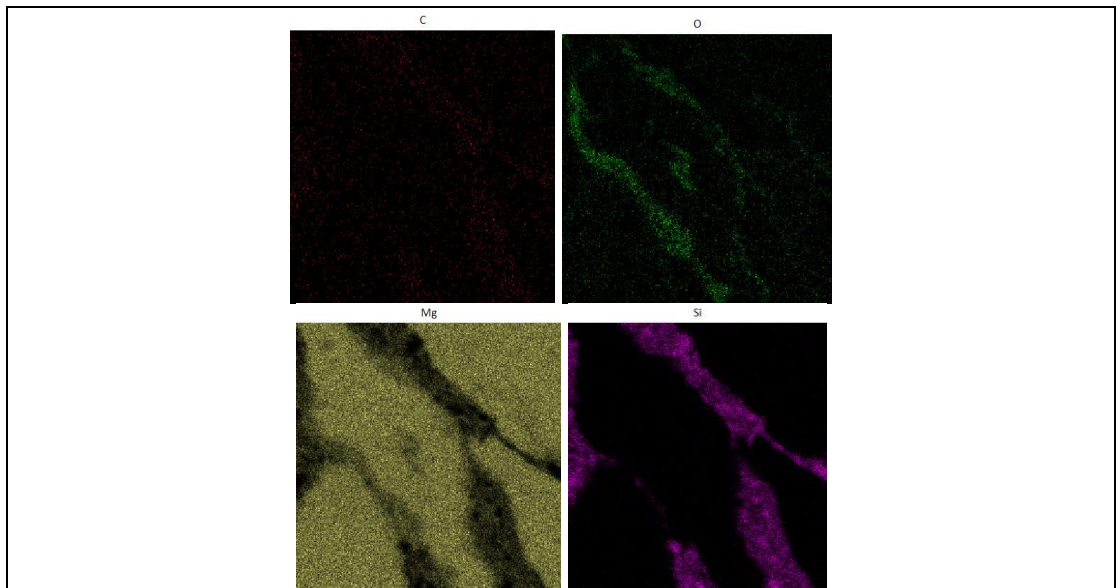
Şekil 6.22. %20 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu

Şekil 6.20’de verilen SEM görüntüsü incelendiğinde gri kontrastlı alan magnezyumu, beyaz kontrastlı alan ise silisyumu (SiC) temsil etmektedir.



Şekil 6.23. %30 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü.

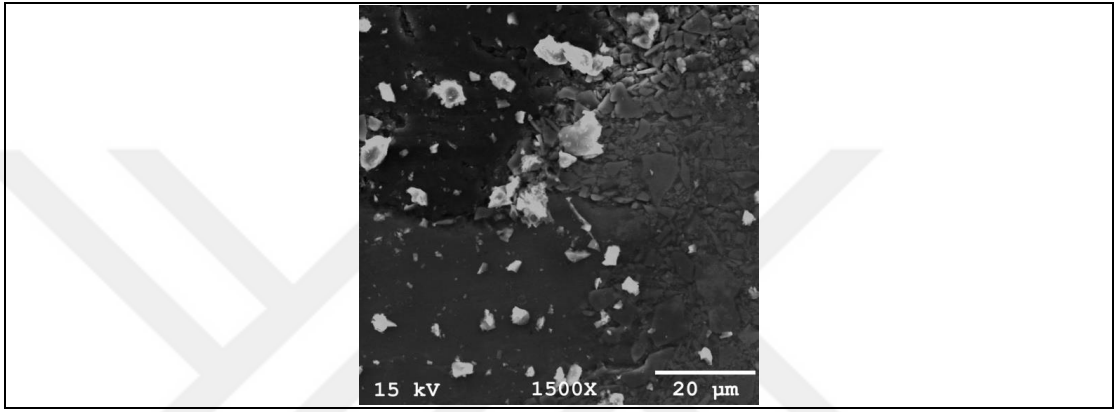
Şekil 6.23’e ait SEM görüntüsüne mapping uygulanmış olup, elde edilen elementel dağılım Şekil 6.24’de verilmiştir.



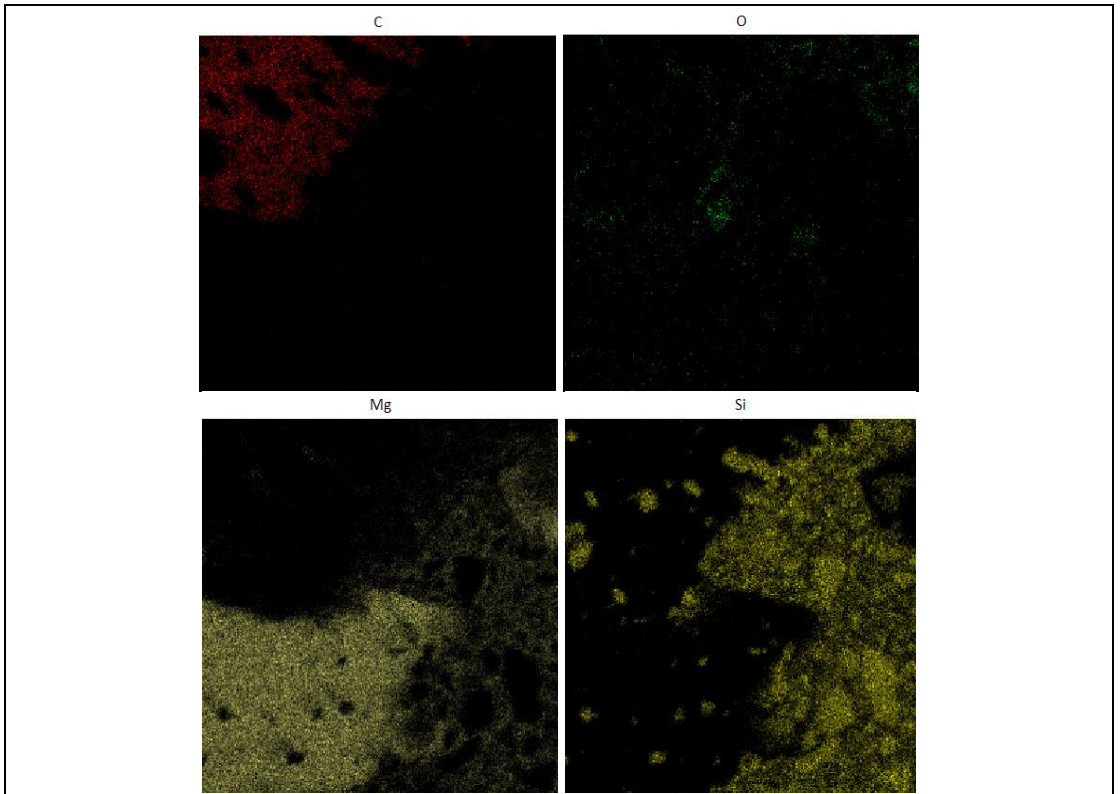
Şekil 6.24. Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi



Şekil 6.25. %30 SiC takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu



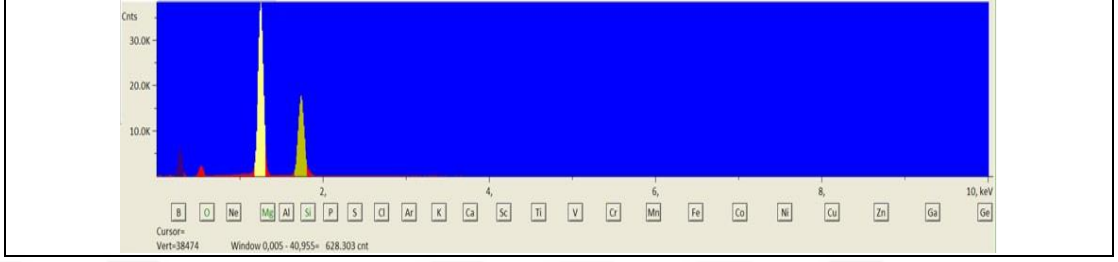
Şekil 6.26. %30 SiC+%5 grafit takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü



Şekil 6.27. Seçilen 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü için EDX-mapping analizi



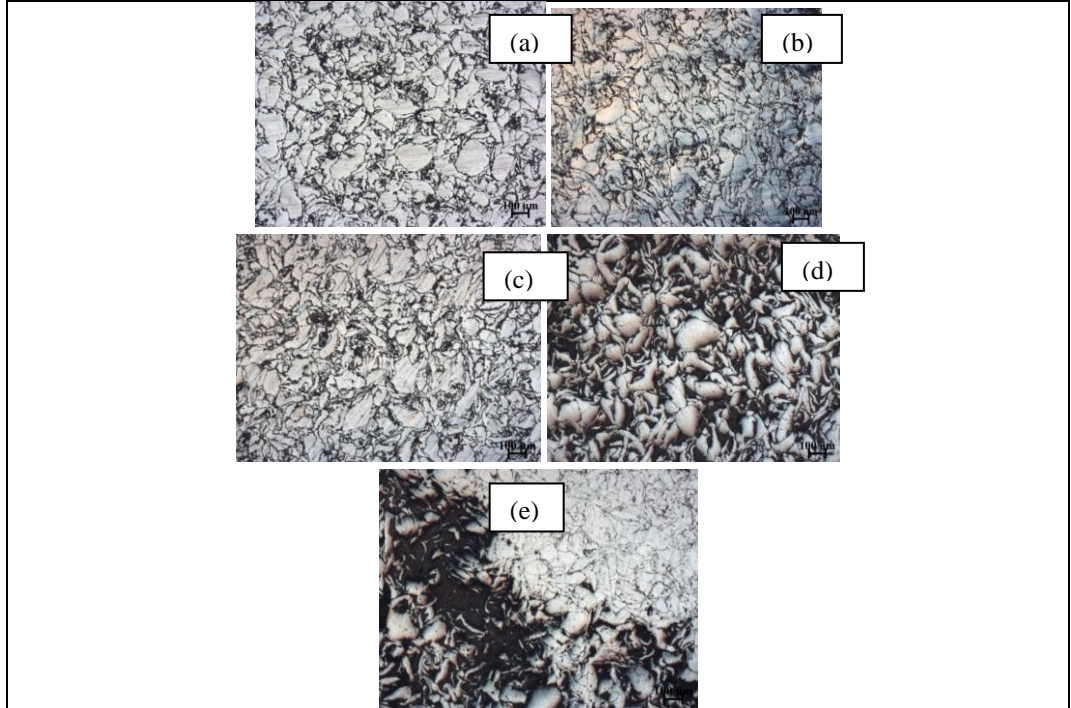
%30 SiC+%5 grafit takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM görüntüsü Şekil 6.26'da aynı numuneye ait SEM-EDX görüntüleri ise Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'de verilmiştir. Şekil 6.27 SEM-EDX görüntüleri incelendiğinde; grafitin yapıda homojen bir şekilde dağılmadığı, belirli bir bölgede kümelenmiş (agrege olmuş) halde bulunduğu anlaşılmaktadır.



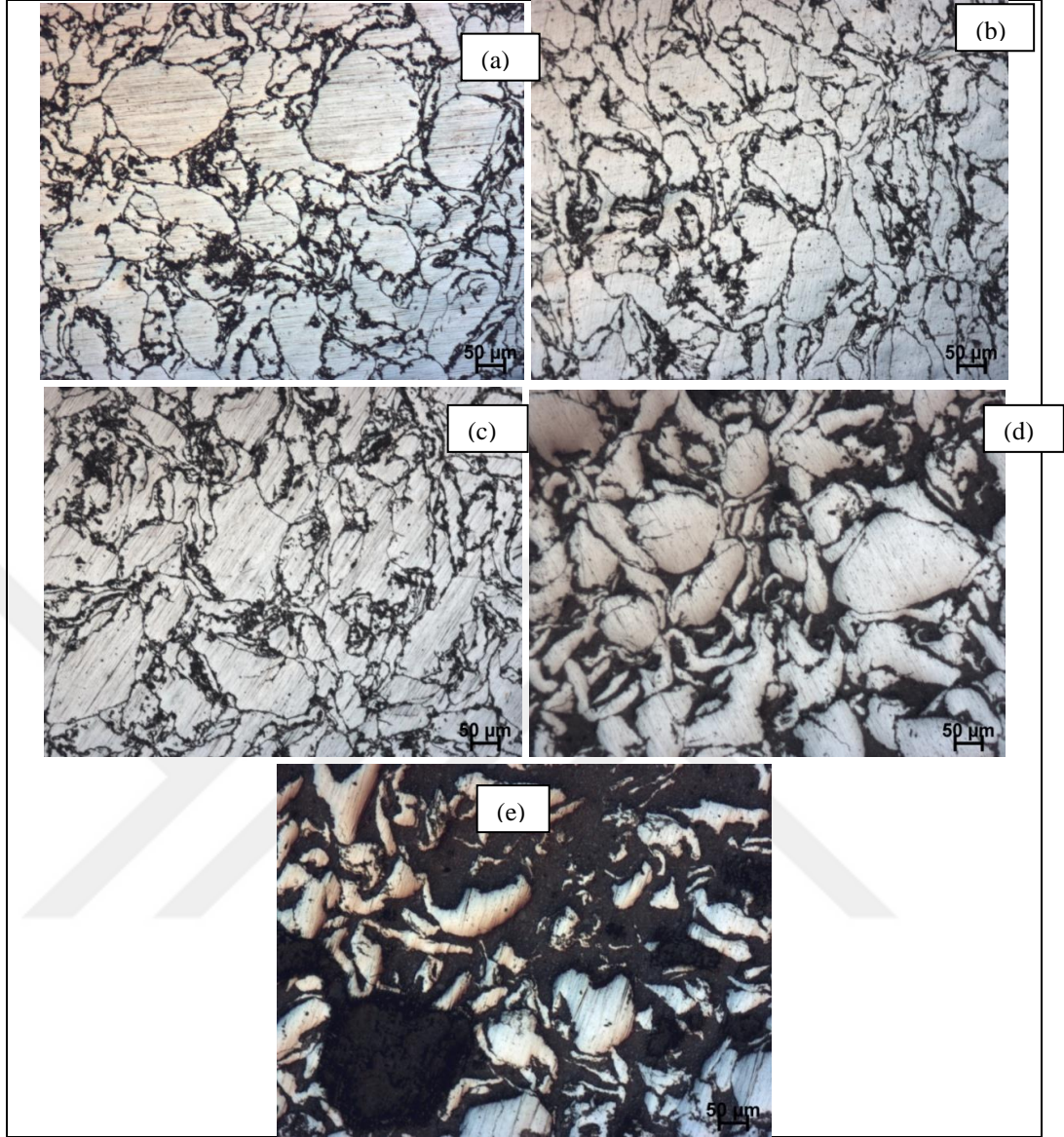
Şekil 6.28. %30 SiC+%5 grafit takviyeli magnezyum matrisli kompozitin 1500x büyütmedeki SEM-EDX analiz sonucu

## 6.8. Işık Mikroskobu İncelemesi

Şekil 6.29 ve 6.30'da farklı büyütmeleme sahip ışık mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde aydınlık olan kontrast magnezyumu, karanlık kontrast ise silyum karbür, oksitler ve grafiti temsil etmektedir.



Şekil 6.29. 5x büyütmeleme sahip a) saf magnezyum, b) %10 SiC, c) %20 SiC d) %30 SiC e) %30 SiC + %5 grafit takviyeli kompozit numunelerin ışık mikroskop görüntüsü



Şekil 6.30. 10x büyötmeye sahip a) saf magnezyum, b) %10 SiC, c) %20 SiC d) %30 SiC e) %30 SiC + %5 grafit takviyeli kompozit numunelerin ışık mikroskop görüntüsü

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Toz metalurjisi yöntemi yüksek dayanımlı, hafif, aşınmaya dayanıklı metal matrisli kompozitleri üretmek için fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışmada, toz metalurjisi yönteminin SiC katkılı magnezyum esaslı kompozitler üzerindeki mikroyapı, sertlik ve aşınma etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada saf magnezyuma takviye bileşeni olarak %10, %20, %30 SiC ve %30 SiC + %5 grafit kullanılmıştır. Bu numuneler vakum altında basınç destekli sinterleme cihazı yardımı ile toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

Magnezyum esaslı numunelere metalografik işlemler uygulandığında ve görüntülemeler yapıp incelendiğinde, kolay oksitlenebilen bir yapısının olduğu ve bu yüzden numunelerin atmosfere daha duyarlı olduğu görülmüştür. Kullanılan tozların üretim koşullarına, tozların saklanma koşullarına bağlı olarak, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin yer yer oksitli olduğu SEM-EDX incelemelerinde gözlemlenmiştir.

Magnezyumun en önemli özelliği alüminyumdan bile daha hafif olmasıdır. SiC takviyesi, düşük yoğunluğa sahip ancak dayanımı yüksek kompozit malzemelerin üretimine olanak sağlamaktadır.

Üretilen numunelerin içerisindeki porozitelerden dolayı teorik yoğunluk elde edilememiştir. Ancak numuneye takviye edilen SiC miktarı ile beraber, Arşimet yöntemi ile elde edilen, yoğunluğun arttığı görülmüştür.

Sertlik test sonuçları incelendiğinde takviye edilen SiC oranının artması ile beraber sertlik artışının da olduğu görülmüştür.

Aşınma test sonuçlarından, takviye edilen SiC miktarının artmasıyla birlikte kompozit malzemedeki aşınma miktarının azaldığı görülmüştür. SEM görüntülerinden ve mekanik testlerden magnezyum tozları ile SiC partikülleri arayüzeyinde, uygulanan sinterleme sıcaklığı, basıncın ve sürenin etkisiyle, yeterince



kuvvetli bağların oluştuğu söylenebilir. Ancak dikkat edilmesine karşın; tozların saklanma koşullarına ve sinterleme sırasında ilave koruyucu gaz kullanılmamanın bir sonucu olduğu düşünülen, saf magnezyumdan üretilen numunelerde yer yer oksitli bölgelerin de kaldığı tespit edilmiştir. Teori ile deneysel çalışmalar arasındaki paralel veri eldesinin; numunelerin sinterleme işleminin vakum atmosferi altında koşullarında direkt sıcak presleme ile sinterlemesi yapılarak üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İleriye yönelik çalışmalarda, ıslatılabilirliğinin iyileştirilmesi amacıyla SiC seramik fazın katı yüzey enerjisini artırılması için, partiküllerinin vakum tertibatlı bir ısıtım işlem fırınında bekletilmesi, sinterleme işlemlerinin koruyucu gaz ortamında yapılması faydalı olabileceği kanaatine varılmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] Fleming S., An Overview of Magnesium based Alloys for Aerospace and Automotive Applications, An Engineering Project Submitted to the Graduate, Polytechnic Institute, Faculty of Rensselaer, 2012.
- [2] Krishnadev M.R., Angers R, Krishnadas Nair C.C., Huard C., The Structure and Properties of Magnesium-Matrix Composites, *Research Summary*, 1993, **45**, 52-54.
- [3] Ararat Ö., Sıcak Pres Yöntemiyle Magnezyumun Alüminyum ve Ni-Cr-Si-Fe-B-C Nikel Alaşımı İle Çift Tabakalı Kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2016, 436183.
- [4] Kaw A.K., Mechanics of Composite Materials, *CRC Press*, 2005, **2**, 16-46.
- [5] Miracle D.B., Donaldson S.L., ASM International Handbook: Composite, *ASM Handbook*, 2001, **21**, 131-406.
- [6] Wolff M., Ebel T., Dahms M., Sintering of Magnesium, *Advance Engineering Materials*, 2010, **12**(9), DOI:10.1002/adem.201000038
- [7] Donald I.W., McMillan P.W., Ceramic Matrix Composites, *Journal of Materials Science*, 1976, **11**, 949-972.
- [8] Jones R.M., Mechanics of Composite Materials, *CRC Press*, 1999, **2**, 2-15.
- [9] Dincel E., Nanopartikül Takviyeli Magnezyum Esaslı Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2014, 375977.
- [10] Xu H.H.K, Quinn J.B., Smith D.T., Giusepetti A.A., Eichmiller F.C., Effects of Different Whiskers on The Reinforcement of Dental Resin Composites, *Dental Materials*, 2003, **19**, 359–367.
- [11] Saravanan R.A., Surappa M.K., Fabrication and Characterisation of Pure Magnesium-30 vol.% SiC<sub>P</sub> Particle Composite, *Materials Science and Engineering A276*, 2000, 108–116.
- [12] Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J., Metal Matrix Composites: Production by The Stir Casting Method, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **92-93**, 1-7.

- [13] Uğur S., Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri, *Metal Dünyası Dergisi*, <https://metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2011/11/metal-matris-kompozitlerin-uretim-yontemleri.html> (Ziyaret Tarihi: 12.08.2019).
- [14] Liu Y.B., Lim S.C., Lu L., Lai M.O., Recent Development in The Fabrication of Metal Matrix-Particulate Composites Using Powder Metallurgy Techniques, *Journal of Materials Science*, 1994, **29**, 1999-2007.
- [15] Söyler A.U., Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 223111.
- [16] Avşar E., Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Sinterleme ile Birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 244736.
- [17] Nas E., Gökkaya H., Sur G., Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2013, **3**(2), 56-65.
- [18] Ghomashchi M.R., Vikhrov A., Squeeze Casting:an Oveview, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **101**(1-3), 1-9.
- [19] Hu H., Squeeze Casting of Magnesium Alloys and Their Composites, *Journal of Materials Science*, 1998, **33**, 1579-1589.
- [20] Mathur P., Apelian D., Lawley A., Analysis of the Spray Deposition, *Aria Meraf*. 1989, **31**(2), 429-443.
- [21] White J., Willis T.C., The Production of Metal Matrix Composites by Spray Deposition, *Materials & Design*, 1989, **10**(3), 121-127.
- [22] Burke P., Investigation of The Sintering Fundamentals of Magnesium Powders, Submitted to The Degree of Doctor of Philosophy, Dalhousie University, Department of Process Engineering and Applied Science, Nova Scotia, 2011.
- [23] Muhaffel M.R., Mikro Ark Oksidasyon İşlemi Uygulanmış Silisyum Karbür Takviyeli AZ91D Magnezyum Alaşımının Korozyon ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 323698.
- [24] Gupta M., Sharon N. M. L., Magnesium, Magnesium Alloys and Magnesium Composites, *John Wiley & Sons, Inc*, New Jersey, 2011, **1**, DOI:10.1002/9780470905098
- [25] Perez P., Garces G., Adeva P., Influence of Texture on The Mechanical Properties of Commercially Pure Magnesium Prepared by Powder Metallurgy, *Journal of Materials Science*, 2007, **42**, 3969–3976 DOI 10.1007/s10853-006-1301-3.

- [26] Çavuşoğlu Ü., Magnezyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 329692.



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Biçer B.**, Zeren M., Farklı Oranlarda SIC Takviyesinin Sıcak Pres ile Üretilen Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Sertlik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, *Metal Dünyası Dergisi*, 2020, **322**, 52-56.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta, lise öğrenimini Eskişehir’de tamamladı. 2013 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliğine başladı. 2014 yılında yatay geçiş yaparak Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne başladı. 2017 yılı Eylül ayında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında Tezli Yüksek Lisansa başladı. 2019 yılı Mayıs ayında Ferrodöküm firmasında üretim mühendisi pozisyonunda kariyerine başlangıç yaptı.

