



**DÜŞÜK MALİYETLİ MAGNEZYUM MATRİSLİ  
KATI ATIK TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN  
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Süleyman DEMİRDAL**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Fatih AYDIN**

**DÜŞÜK MALİYETLİ MAGNEZYUM MATRİSLİ KATI ATIK TAKVİYELİ  
KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Süleyman DEMİRDAL**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Fatih AYDIN**

**KARABÜK  
Aralık 2021**

Süleyman DEMİRDAL tarafından hazırlanan “DÜŞÜK MALİYETLİ MAGNEZYUM MATRİSLİ KATI ATIK TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Fatih AYDIN .....

Tez Danışmanı, Metallurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/12/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Serkan ISLAK (KÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Fatih AYDIN (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ) .....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Süleyman DEMİRDAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DÜŞÜK MALİYETLİ MAGNEZYUM MATRİSLİ KATI ATIK TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Süleyman DEMİRDAL**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Fatih AYDIN**

**Aralık 2021, 71 sayfa**

Son yıllarda sera gazı emisyonlarının azaltılması ve taşıma sektöründe kullanılan araçların yakıt maliyetlerinin düşürülmesi tüm dünyada en önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Araştırmacılar bu sorunu çözmek için çevre dostu düşük yoğunluklu malzemelerin havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanımına odaklanmıştır. Bu malzemelerin en önemlilerinden birisi olan Magnezyum (Mg) ve alaşımları, yüksek mukavemet/yoğunluk oranıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fakat Mg alaşımlarının oda ve yüksek sıcaklıklarda düşük mekanik özelliklere ve düşük aşınma dayanımına sahip olması Mg alaşımlarının yaygın olarak kullanımını etkileyen en önemli dezavantajları arasındadır.

Bu sorunun çözülmesi için farklı partikül takviyeleri kullanılarak Mg matrisli kompozitler üretilmiştir. Kullanılan partiküllerin pahalı olması üretilen Mg matrisli kompozitlerin maliyetini arttırdığı için son yıllarda araştırmacılar katı atık takviyeli

Mg matrisli kompozitlerin üretimiyle ilgili çalışmalar yapmaya başlamıştır. Bu bağlamda Mg matrisli kompozitler yumurta kabuğu ve cam takviyesi kullanılarak, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapı karakterizasyonları taramalı elektron mikroskobu, X-ışınları diffraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin, mekanik ve aşınma özellikleri, sertlik ölçümleri ve ileri geri aşınma testleriyle gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri, elektrokimyasal (potansiyodinamik) test ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan aşınma ve korozyon testleri sonrasında yüzeyler SEM ile incelenip, aşınma ve korozyon mekanizmaları açıklanmıştır. Bu çalışmada katı atık takviyelerin Mg matrisli kompozitlerin üretimindeki kullanım potansiyeli incelenmiştir. Ayrıca en iyi aşınma ve korozyon özelliklerini veren optimum takviye oranı belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Mg matrisli kompozitler, toz metalürjisi, katı atık takviyesi, aşınma, korozyon

**Bilim Kodu** : 91512

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF LOW-COST Mg MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH SOLID WASTE**

**Süleyman DEMİRDAL**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Fatih AYDIN**

**December 2021, 71 pages**

In recent years, reducing greenhouse gas emissions and reducing the fuel costs of vehicles used in the transport sector have become one of the most important issues around the world. To solve this problem, researchers focused on the use of environmentally friendly low-density materials in the aerospace and automotive industries. Magnesium (Mg) and its alloys one of the most important of these materials, have become widely used with a high strength/density ratio. However, the low mechanical properties and low wear resistance of Mg alloys at room and elevated temperatures are among the most important disadvantages affecting the widespread use of Mg alloys.

To solve this problem Mg matrix composites were produced using different particle reinforcements. In recent years, researchers have started to work on the production of

solid waste reinforced Mg matrix composites as the expensive particles used increase the cost of Mg matrix composites produced.

In this context, Mg matrix composites were produced by powder metallurgy method using eggshell and glass reinforcement. Microstructure characterization of the produced composites was carried out by scanning electron microscopy, X-ray diffractometer. Mechanical and wear properties of the samples were carried out by hardness measurements and reciprocating wear tests. Corrosion experiments were carried out by electrochemical (potentiodynamic) test. After the wear and corrosion tests, the surfaces were examined with SEM and the wear and corrosion mechanisms were explained. At the end of this project, the potential for use of solid waste reinforcements in the production of Mg matrix composites was examined. In addition, the optimal reinforcement content was determined, giving the best wear and corrosion properties.

**Key Word** : Mg matrix composites, powder metallurgy, solid waste reinforcement, wear, corrosion

**Science Code** : 91512



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Fatih AYDIN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu alıőma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2020-2275 proje numarası ile desteklendiği için KBÜ-BAP birimine teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XV
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
MAGNEZYUM VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	4
2.1.1. Otomotiv Endüstrisi.....	5
2.1.2. Havacılık Endüstrisi .....	7
2.1.3. Elektronik Endüstrisi .....	8
BÖLÜM 3 .....	9
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	9
3.1. MAGNEZYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM	
YÖNTEMLERİ.....	10
3.1.1. Sıvı Hal Prosesleri .....	10
3.1.1.1. Sıkıştırma Döküm .....	10
3.1.1.2. Karıştırma Döküm .....	11
3.1.1.3. İnfiltrasyon.....	12

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1.1.3. Spray Biriktirme.....	12
3.1.2. Katı Hal Prosesleri.....	13
3.1.2.1. Toz Metalurjisi.....	13
3.1.2.2. Karıştırma İşlemi.....	14
3.1.2.3. Sıkıştırma İşlemi.....	14
3.1.2.4. Sinterleme.....	15
3.1.3. In Situ Prosesi.....	16
BÖLÜM 4.....	17
Mg MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	17
BÖLÜM 5.....	20
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	20
5.1. TAKVİYE TOZLARININ KARAKTERİZASYONU.....	20
5.2. NUMUNELERİN ÜRETİMİ.....	20
5.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ.....	22
5.4. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	23
5.5. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU ÇALIŞMALARI.....	24
5.6. AŞINMA TESTLERİ.....	25
5.7. KOROZYON TESTLERİ.....	26
BÖLÜM 6.....	27
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	27
6.1. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARI.....	27
6.2. MİKROYAPI KARATERİZASYONU.....	29
6.3. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI.....	41
6.4. AŞINMA SONRASI YÜZEY İNCELEMELERİ.....	44
6.5. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI.....	50
6.6. KOROZYON TESTİ SONRASI YÜZEY İNCELEMELERİ.....	54
BÖLÜM 7.....	63
SONUÇLAR.....	63

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	71

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Mg'dan imal edilmiş şanzıman muhafazaları .....	6
Şekil 2.2. Mg alaşımdan imal edilmiş uçak iskeleti sacı.....	7
Şekil 2.3. Mg alaşımdan imal edilmiş Airbus A380 tipi uçağın servis kapısı .....	8
Şekil 2.4. Mg alaşımdan imal edilmiş uçak kapı kilidi .....	8
Şekil 3.1. Sıkıştırma döküm yönteminin şematik görünümü.....	11
Şekil 3.2. Karıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.3. İnfiltrasyon yönteminin şematik görünümü .....	12
Şekil 3.4. Sprey biriktirme yönteminin şematik görünümü .....	13
Şekil 3.5. Karıştırma işlem süresinin homojen dağılıma olan etkisi.....	14
Şekil 3.6. Toz sıkıştırma aşamaları .....	15
Şekil 3.7. Sinterleme aşamaları .....	16
Şekil 5.1. a) C serisi takviye partiküllerinin SEM görüntüsü, b) Y serisi takviye partiküllerinin SEM görüntüsü.....	20
Şekil 5.2. Retsch RS200 öğütücü cihazı. ....	21
Şekil 5.3. Fritsch Pulverisette 7 mekanik alaşımlama cihazı. ....	21
Şekil 5.4. a) Sıcak presleme cihazı ve b) grafit kalıp.....	22
Şekil 5.5. Yoğunluk ölçüm düzeneği. ....	23
Şekil 5.6. Sertlik ölçüm cihazı. ....	23
Şekil 5.7. a) Hassas kesme ve b) zımparalama-parlatma cihazları. ....	24
Şekil 5.8. SEM cihazı.....	24
Şekil 5.9. XRD cihazı.....	25
Şekil 5.10. Aşınma test cihazı. ....	25
Şekil 5.11. Profilometre cihazı.....	26
Şekil 5.12. Korozyon test düzeneği.....	26
Şekil 6.1. Mg-C serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Mg/5C, (c) Mg/10C, (d) Mg/15C. ....	30
Şekil 6.2. Mg/15C takviyeli kompozitin EDX görüntüsü.....	31
Şekil 6.3. Mg-C serisi kompozitlerin XRD analizleri. a) Saf Mg, b) Mg/5C, c) Mg/10C, d) Mg/15C.....	32

Şekil 6.4. Mg-Y serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Mg/2,5Y, (c) Mg/5Y, (d) Mg/10Y. ....	33
Şekil 6.5. Mg / 10Y kompozitinin EDX analizi görüntüsü.....	34
Şekil 6.6. Mg-Y serisi kompozitlerin XRD analizleri. a) Saf Mg, b) Mg/2.5Y, c) Mg/5Y, d) Mg/10Y. ....	35
Şekil 6.7. AZ91-C serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) AZ91, (b) AZ91/5C, (c)AZ91/10C, (d)AZ91/15C. ....	36
Şekil 6.8. AZ91/15C takviyeli kompozitin EDX analiz görüntüsü. ....	37
Şekil 6.9. AZ91-C serisi kompozitlerin XRD analizleri. a) AZ91, b) AZ91/5C, c) AZ91/10C, d) AZ91/15C. ....	38
Şekil 6.10. AZ91-Y serisi kompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a) AZ91, (b) AZ91/2,5Y, (c) AZ91/5Y, (d) AZ91/10Y.....	39
Şekil 6. 11. AZ91/10Y kompozitinin EDX görüntüsü.....	40
Şekil 6.12. AZ91-Y serisi kompozitlerin XRD analizleri a) Saf AZ91, b) AZ91/2.5Y, c) AZ91/5Y, d) AZ91/10Y. ....	41
Şekil 6.13. Saf Mg ve Mg-Y kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.....	42
Şekil 6.14. Saf Mg ve Mg-C kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.....	42
Şekil 6.15. AZ91 alaşımı ve AZ91-Y kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.....	43
Şekil 6.16. AZ91 alaşımı ve AZ91-C kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.....	43
Şekil 6.17. Mg-C serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri. ....	51
Şekil 6.18. Mg-Y serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri. ....	51
Şekil 6.19. AZ91-C serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri. ....	52
Şekil 6.20. AZ91-Y serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri. ....	52
Şekil 6.21. Saf Mg, Mg/2,5Y, Mg/10Y kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.....	55
Şekil 6.22. Mg/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi. ....	56
Şekil 6.23. Saf Mg ve Mg/5C, Mg/15C kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.....	57
Şekil 6.24. Mg/5C kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi. ....	58
Şekil 6.25. AZ91 alaşımı ve AZ91/2,5Y, AZ91/10Y kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.....	59
Şekil 6.26. AZ91/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.....	60
Şekil 6.27. AZ91 alaşımı ve AZ91/5C, AZ91/15C kompozitinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri. ....	61
Şekil 6.28. AZ91/15C kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.....	62

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Mg'un fiziksel özellikleri.....	3
Çizelge 2.2. Bazı alaşım elementlerinin Mg'daki etkisi .....	5
Çizelge 2.3. Otomobil parçalarının Mg alaşımı ve diğer malzemelerle ağırlıklarının karşılaştırılması .....	6
Çizelge 6.1. Numunelerin yoğunluk değerleri.....	28
Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri. ....	29
Çizelge 6.3. Mg/15C takviyeli kompozitin EDX analizi. ....	31
Çizelge 6.4. Mg/10Y takviyeli kompozitin EDX analizi. ....	34
Çizelge 6.5. AZ91/15C takviyeli kompozitin EDX analizi. ....	37
Çizelge 6.6. AZ91/10Y takviyeli kompozitin EDX analizi. ....	40
Çizelge 6.7. Mg ve Mg-C serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması. ....	46
Çizelge 6.8. Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması. ....	47
Çizelge 6.9. AZ91 ve AZ91-C serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması. ....	48
Çizelge 6.10. AZ91 ve AZ91-Y serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması. ....	49
Çizelge 6.11. Kompozitlerin korozyon hızı ve korozyon akımı. ....	54
Çizelge 6.12. Mg/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.....	56
Çizelge 6.13. Mg/5C kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.....	58
Çizelge 6.14. AZ91/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.....	60
Çizelge 6.15. AZ91/15C kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri. ....	62

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Zn	: çinko
Mg <sub>2</sub> Si	: magnezyum silisid
MgO	: magnezyum oksit
Ca	: kalsiyum
CaCO <sub>3</sub>	: kalsiyum karbonat
SiC	: silisyum karbür
TiC	: titanyum karbür
B <sub>4</sub> C	: bor karbür
CNT	: karbon nanotüp
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: alüminyum oksit
N	: newton
NaCl	: sodyum klorür



## **KISALTMALAR**

MMK : Metal Matrisli Kompozit

XRD : X-ray Diffractometer (X Işını Difraktometresi)

SEM : Scanning Electrone Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)

T/M : Toz Metalurjisi

$\mu\text{m}$  : Mikrometre

mV : Milivolt

kg : Kilogram

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Son yıllarda sera gazı emisyonlarını azaltmak için küresel çapta sıkı çevre protokollerinin uygulanması nedeniyle, üstün performansa sahip hafif, düşük maliyetli malzemelere olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bu nedenle, hafif metal topluluğunda, minimum işleme ve taşıma maliyetleri ile mevcut malzemelerin kullanımına olan ilgi araştırılmıştır. Magnezyum (Mg), yeryüzünde en çok bulunan elementlerden birisi olup, düşük yoğunluğu, yüksek özgül mukavemeti, iyi işlenebilirliği ve yüksek sönümlenme kapasitesi sayesinde uzay, havacılık, otomotiv ve elektronik sanayilerinde kullanılmaktadır. Ancak, Mg'un düşük mekanik özellikleri ve düşük aşınma direnci sayesinde kullanım alanları önemli oranda kısıtlanmaktadır. Mg'un bu dezavantajlarının ortadan kaldırılması Mg'a takviye elemanı ilave edilip kompozit malzeme haline getirilmesi ile mümkündür. Bu malzemeler Mg metal matrisli kompoziter (Mg-MMK) olarak adlandırılır. Mg-MMK'lerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları SiC, TiC, B<sub>4</sub>C, CNT ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' dır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise hem katı atıkların çevreye olan olumsuz etkisini azaltmak hem de düşük maliyetli üretimlerle sanayiye katkıda bulunmak amacıyla literatürde, Mg-MMK'lerde takviye elemanı olarak yumurta kabuğu, pirinç çeltiği kabuğu, buğday kabuğu gibi katı atıklar kullanılmıştır. MMK'lerin üretiminde, en yaygın kullanılan üretim yöntemleri sıvı faz üretimlerinde karıştırma, infiltrasyon ve sıkıştırma dökümdür, katı faz üretimlerde ise toz metalürjisi yöntemidir. Toz metalürjisi üretim yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre takviye elemanının homojen dağılımı, daha yüksek oranda takviye kullanımı ve daha düşük sıcaklıklarda üretimin gerçekleşmesi sebebiyle sıvı faz üretim yöntemlerinden daha avantajlıdır.

Bu çalışmanın amacı, katı atıkların geri dönüştürülmesiyle çevre kirliliğine olumlu etki sağlamakla birlikte metal matrisli kompozitlerin üretim maliyetlerini düşürerek ekonomik, çevreci ve yenilikçi malzemeleri sanayiye kazandırmaktır. Bu çalışmada katı atık olarak nitelendirilen cam ve yumurta kabukları toz haline getirilip AZ91 alaşımı ve Mg'un matris malzeme olarak kullanıldığı MMK'ler üretilmiştir. Takviye malzemesi olan cam ve yumurta kabuğu tozları farklı oranlarda AZ91 ve Mg tozlarıyla mekanik alaşımlama cihazında homojen olarak karıştırılmıştır. Üretimler sıcak presleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntülemeleri SEM ve EDX cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin sertlik, korozyon, mikroyapı, aşınma ve yoğunluk özellikleri incelenmiştir. Aşınma testleri 5, 10 ve 20 N yük altında ileri geri aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testi (potansiyodinamik polarizasyon) %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kompozit malzemelerde takviye elemanlarının artmasıyla aşınma dayanımında artış gözlenmekle birlikte korozyon dayanımlarında düşüş gözlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### MAGNEZYUM VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Mg'un en öne çıkan özelliği olan düşük yoğunluğu nedeniyle otomotiv, uzay, havacılık, elektronik sektörlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Mg'un yoğunluğu Al, Zn ve çeliğe göre oldukça düşüktür ve bu sebeple geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla yüksek spesifik mukavemet sunar [1]. Ayrıca Mg yüksek ısı iletkenlik, boyutsal kararlılık, sönümlenme, iyi elektromanyetik koruma, işlenebilirlik ve kolay geri dönüşüm özelliklerine de sahiptir [1]. Bunlarla birlikte Mg'un kullanım alanını kısıtlayan bazı dezavantajları da vardır. Bunlar düşük korozyon direnci, düşük aşınma dayanımı ve yüksek kimyasal aktivitesidir [2]. Mg'un fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [3-4].

Çizelge 2.1. Mg'un fiziksel özellikleri [3].

Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Erime Noktası	Kaynama noktası	Erime Gizli Isısı
	°C	°C	kJ/kg
1,74	650	1110	369
Isıl Genleşme Katsayısı x10 <sup>-6</sup>	Akma Gerilmesi	Uzama	Sertlik
	N/mm <sup>2</sup>	%	HB
25,5	98	5	30

Mg ve Mg alaşımlarının üstünlükleri [4];

- Yapısal metalik malzemelerin tümünden daha düşük yoğunluktadır,
- Yüksek özgül dayanımına sahiptir,
- Dökülebilirliği iyidir ve yüksek basınçlı döküm için uygundur,
- Talaşlı imalatta işlenebilirliği iyidir,
- İneratmosferde kaynak edilebilirliği iyidir,
- Geri dönüşürebilir.

Mg ve Mg alaşımlarının zayıflıkları [4];

- Elastite modülü dūřüktür,
- Katılaşma esnasında yüksek oranda çekme meydana gelir,
- Tokluk ve sođuk řekillendirilme kabiliyeti dūřüktür,
- Sürünme direnci zayıftır,
- Korozyon direnci dūřüktür,
- Kimyasal aktivitesi yüksektir,
- Ařınma dayanımı dūřüktür.

## **2.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI**

Mg alaşımlarının gelişimi 1945 yılında başlamıştır. I. Dünya Savaşı'nda ve II. Dünya Savaşı'nda yaygın olarak nükleer endüstride ve askeri uçaklarda kullanılmıştır. En önemli uygulama, VW beetle'da kullanılmasıdır. 1998 yılında, yeni bir ilgi ile, kg başına 3,6\$ 'lık bir fiyatla yılda 360000 ton Mg tüketilmiştir. Önümüzdeki 10 yıldaki büyüme oranının yılda %7 olacağı tahmin edilmektedir [5]. Alaşımların farklı kombinasyonları ile çeşitli ürünlerin üretimi ve bir elementin diğerine uygunluğu ve ilişkisi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Mg, plastik deformasyona direnen altıgen bir kafes yapısı içerir bu nedenle Mg alaşımlarının çoğu iyi dökülebilme özelliğine sahiptir [6]. Mg için uygun miktarda alaşım elementi ilavesi, bu alaşımların mukavemetini, dökülebilirliğini, işlenebilirliğini, korozyon direncini ve kaynaklanabilirliğini geliştirir [7]. Alaşım elementlerinin Mg'a etkisi çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı alaşım elementlerinin Mg'daki etkisi [7].

Alaşım Elementi	Özellikler	Etkisi
Al	Sertlik	Artış
	Mukavemet	
	Süneklik	Azalma
Be	Oksidasyon	Azalma
Ca	Oksidasyon	Azalma
Ce	Korozyon Direnci	Artış
	Akma Dayanımı	Azalma
Cu	Mukavemet	Artış
	Süneklik	Azalma
Ni	Kopma Mukavemeti	Artış
	Süneklik ve korozyon Direnci	Azalma
Nadir Toprak Elementleri	Yüksek Sıcaklıkta Sürünme	Artış
	Korozyon Direnci	
	Mukavemet	
Si	Korozyon Direnci	Artış
Zn	Korozyon Direnci	Artış

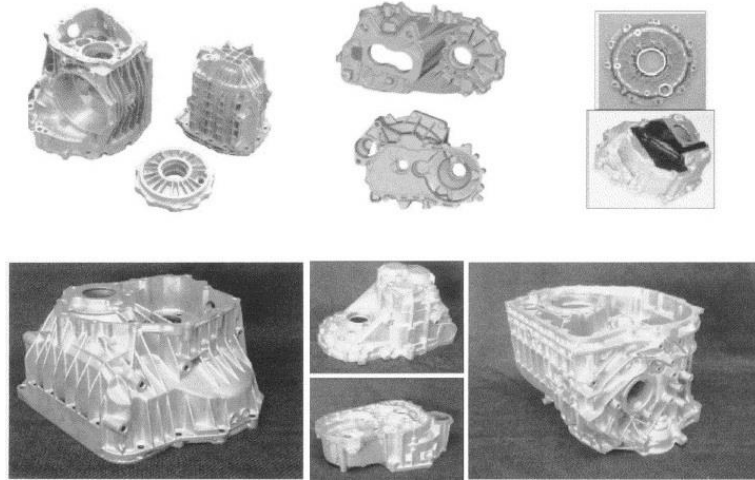
### 2.1.1. Otomotiv Endüstrisi

Araç üretiminde konfor, donanım ve güvenlik taleplerinin karşılanması gerekmektedir, bu taleplerin karşılanması araçlarda fazladan ağırlığın ortaya çıkmasına neden olur. Araçlardaki ağırlığın azaltılmasındaki çözüm ise aynı performansı gösterecek daha hafif bir malzemedir [8]. Aracın hafiflemesiyle tükettiği yakıt miktarında düşüş ve buna bağlı olarak emisyonunda da azalma olacağından hem ekonomik hem çevre dostu araçların hayatımızda yer alması geleceğimiz için de büyük önem arz etmektedir. Otomobil parçalarında kullanılan Mg alaşımlarının kullanılan diğer malzemelerin ağırlıklarıyla karşılaştırmıştır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Otomobil parçalarının Mg alaşımı ve diğer malzemelerle ağırlıklarının karşılaştırılması [4].

	Motor Bloğu		Dişli Kutusu ve Debriyaj	Karter	Dört Teker Jant		Motor Kızağı	
	Dökme Demir	Al Alaşımı			Çelik	Al Alaşımı	Çelik	Al Alaşımı
Geleneksel çözüm (kg)	32	23.5	21.5 +	3	36	2	25	17.5
Mg alaşımı (kg)	19	19	15	2	18	18	15	15
Azalan ağırlık (kg)	13	4.5	6.5	1	18	5	10	2.5
Azalma (%)	40	19	30	33	50	22.5	40	30

Bazı motor parçalarında çelik ve Al alaşımlarının yerine Mg alaşımlarının kullanılmasıyla çeliğe göre 48.5 kg ve Al'a göre 19.5 kg ağırlık azalmıştır Mg'dan imal edilmiş parçalar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Böylece, her 100 km'de çeliğe göre 0.25 litre Al'a göre 0.1 litre yakıt tasarrufu elde edilecektir [4]. 1996 yılında VW/Audi tarafından tanıtılan AZ91'den imal edilmiş b80 şanzıman muhafazası, Mg'un bu tür uygulamalarda kullanılması için bir başlangıç olmuştur [9].



Şekil 2.1. Mg'dan imal edilmiş şanzıman muhafazaları [9].

### 2.1.2. Havacılık Endüstrisi

Mg alaşımları, geniş bir uygulama yelpazesine sahip hafif metal alaşımlarıdır. Uçak endüstrisi, kanatlardan, gövde kaplamasından, kapılardan, şasiden gösterge panellerine ve koltuk bileşenlerine kadar çok çeşitli Mg alaşımlı parçalar kullanmaktadır [10]. Bir örnek vermek gerekirse, Boeing 727 uçağında yaklaşık 1200 adet Mg parça kullanılmıştır. Mg alaşımından imal edilen parçalar sırasıyla Şekil 2.2–2.4’ de gösterilmiştir. Mg ve alaşımlarının kullanılması taşıma araçlarının ağırlığının önemli ölçüde azaltılması ve dolayısıyla yakıt tüketiminin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlar. Son yıllarda Mg alaşımlarında daha yüksek mekanik ve fonksiyonel özellikler sağladığından, döküm parçalarını Mg alaşımlı dövme ile değiştirme eğilimi artış göstermiştir [11]. Ayrıca Mg alaşımlarının küresel pazarda uygulanması her yıl %15-20 oranında artmaktadır [12].

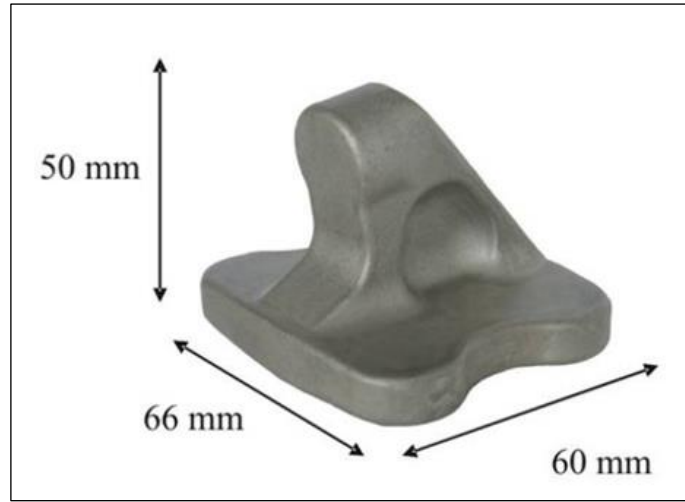


Şekil 2.2. Mg alaşımdan imal edilmiş uçak iskeleti sacı [12].





Şekil 2.3. Mg alaşımdan imal edilmiş Airbus A380 tipi uçağın servis kapısı [12].



Şekil 2.4. Mg alaşımdan imal edilmiş uçak kapı kilidi [12].

### 2.1.3. Elektronik Endüstrisi

Elektronik endüstrisinde kullanılması için tasarlanan malzemelerde dikkat edilen parametrelerin başında hafiflik, dayanıklılık, ısıl iletkenlik ve elektrik iletkenliği yer alır. Mg hafiflik, ısıl ve elektriksel iletkenliği ve dayanımıyla elektronik alanında rakibi olan polimerlerden öne çıkmaktadır. Günümüzde Mg, cep telefonları, fotoğraf makinesi, dizüstü bilgisayarlar ve bilgisayar donanımlarında kullanılmaktadır [1].

## BÖLÜM 3

### METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler matrisi (ana yapıyı) metallerin ve alaşımlarının, takviye elamanını ise seramiklerin oluşturduğu gelişmiş malzemelerdir [13]. Mukavemet, çekme dayanımı, sertlik, akma dayanımı vb. mekanik özelliklerin iyileşmesinden dolayı MMK malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu mekanik özelliklerin iyileşmesi matris malzemeye ilave edilen takviye partiküllerine bağlıdır [14]. Matris ve takviyenin en iyi özelliklerinin birleştiği bu malzemelerde monolitik alaşımlardan daha üstün mekanik özellikler elde edilebilir [13]. MMK malzemelerde çoğunlukla Al, Mg, Ti gibi hafif metaller ve alaşımları matris olarak kullanılır.

MMK'lerin metallere göre avantajları ;

- Yüksek mukavemet
- Yüksek elastiklik modülü
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı
- Yüksek sertlik
- Yüksek termal şok direnci
- Yüksek aşınma direnci
- Yüksek rijitlik / yoğunluk oranı [15].

MMK'lerin sınırlayıcı özellikleri ;

- Düşük süneklik
- Yüksek maliyet
- Karmaşık üretim süreci [16].

## **3.1. MAGNEZYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

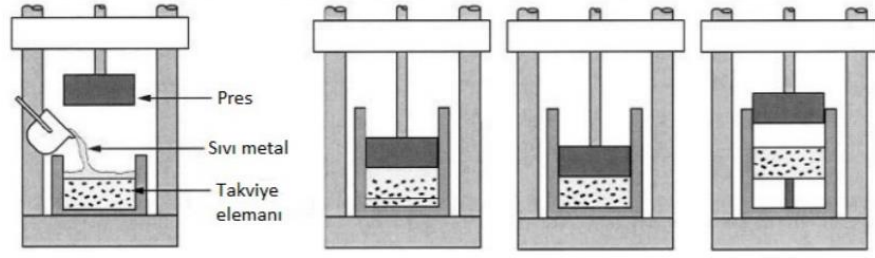
MMK'ler üretim yöntemleri bakımından üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar ;

- Sıvı hal prosesi
- Katı hal prosesi
- İn-Situ prosesi'dir [17].

### **3.1.1. Sıvı Hal Prosesleri**

#### **3.1.1.1. Sıkıştırma Döküm**

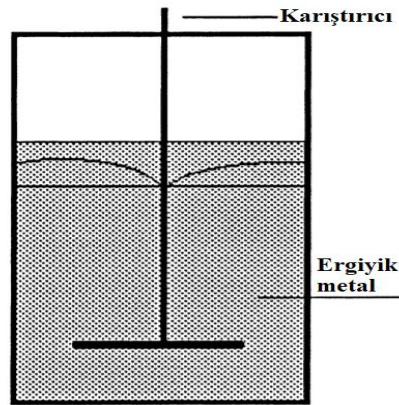
Ön şekil verilmiş preforma sıvı metalin emdirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Preforma sıvı metalin infiltrasyonu sırasında sıvı metalin katılaşmasını önlemek için preform ön ısıtmaya tabi tutulur. Sıvı metal preform üzerinde infiltre hale geldiğinde yüksek basınç uygulanır bu basınçla birlikte sıvı metal ve preformun sertleşmesi amaçlanır [18]. Yüksek basıncın etkisiyle porozitesiz bir yapı sağlanır ve yüksek oranda takviye ilavesiyle üretime olanak tanır [3]. Uygulanan basınç sonucu sıvı metal preform gözeneklerine sıkışarak yüksek oranda ıslatma sağlanır. Aynı zamanda uygulanan basınç sıvı metalin dökülebilirlik özelliğini arttırmaktadır. Sıkıştırma döküm yöntemiye üretilen parçalar nihai ürün boyutlarına oldukça yakın olmaları sebebiyle ikincil işleme az ihtiyaç duyulur veya ikincil işlem gerektirmez. Yüksek sıcaklık ve düşük işlem süresiyle sıkıştırma döküm yöntemi sıvı metal ve takviye arasındaki reaksiyonları en aza indirmektedir [19]. Sıkıştırma döküm yönteminin şematik görünümü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sıkıştırma döküm yönteminin şematik görünümü [19].

### 3.1.1.2. Karıştırma Döküm

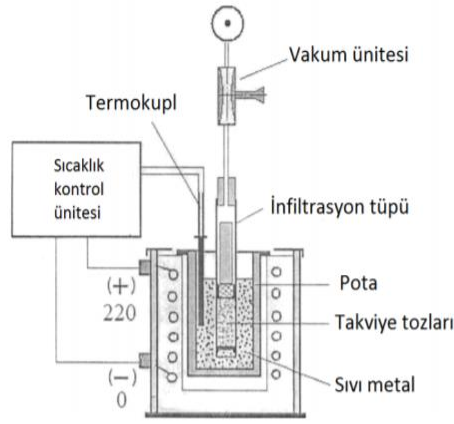
Karıştırma döküm tekniği, MMK üretimi için mevcut tüm üretim yöntemlerinin en ekonomik olanıdır ve büyük boyutlu ürünlerin üretilmesi için uygundur. Karıştırma döküm yöntemi ticari olarak uygulanmaktadır. Prosesin kolaylığı, esnek parametreleri ve büyük boyutlu üretilere uygunluğu açısından oldukça avantajlı bir yöntemdir [20]. Karıştırma döküm yönteminde üretim ergiyik haldeki matris metaline takviye malzemesinin veya malzemelerinin ilave edilerek belirlenen koşullar altında takviyenin matris içindeki dağılımının karıştırma yoluyla sağlanmasının ardından karışımın dökülerek katılaşmasının beklenmesini içerir karıştırma döküm yönteminin şematik görünümü Şekil 3.2’de gösterilmiştir [21]. Üretim süreçlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar; takviye malzemesinin matris içindeki homojen dağılımı, matris ve takviye arasındaki ıslanabilirlik, MMK’in gözenekliliği, matris ve takviye arasındaki reaksiyonlar olarak sıralanabilir [19].



Şekil 3.2. Karıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi [19].

### 3.1.1.3. İnfiltrasyon

Basit ve ekonomik bir üretim prosesi olan intilfrasyonda sıvı matris basınç etkisiyle gözenekli takviye malzemesine infiltre olmaktadır [22]. İnfiltrasyon yöntemi basınçlı ve basınçsız olmak üzere ikiye ayrılır, basınçlı infiltrasyon esnasında basınç inert gaz ve mekanik cihaz yardımıyla sağlandığından dolayı preform deforme olabilir ve heterojen mikroyapı oluşabilir bu durumu önlemek için sisteme ultrasonik titreşim uygulanabilir intilfrasyon yönteminin şematik görünümü şekil 3.3'de gösterilmiştir [23]. Basınçsız infiltrasyon da ise ergiyik metalin takviye içerisine basınç yardımı olmadan infiltre edilmesinden kaynaklı basınçlı infiltrasyona göre daha yüksek poroziteli yapı oluşur [24].

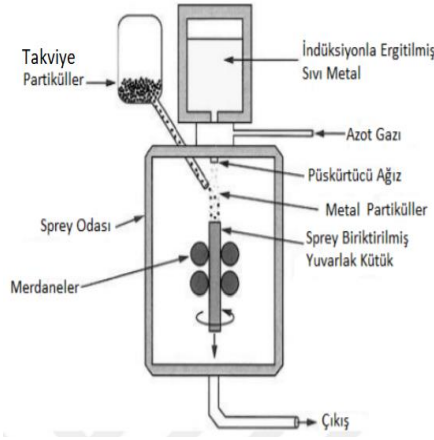


Şekil 3.3. İnfiltrasyon yönteminin şematik görünümü [19].

### 3.1.1.3. Sprey Biriktirme

Sprey biriktirme yöntemi, ergiyik haldeki metalin püskürtülerek altlık malzemenin yüzeyine yüksek bir hızla çarpması sonucu burada birikerek kompozit malzemenin oluşturulmasıdır sprej biriktirme yönteminin şematik görünümü Şekil 3.4'de gösterilmiştir [25]. Biriktirme hızı dakikada 6 ile 10 kg arasındadır. Sprey biriktirme yönteminde ayrıca ergiyik metalle birlikte takviye malzemesi de püskürtülebilir [26]. Böylece; ergiyik metal matris ile takviye malzemesi püskürtme anından itibaren karışmış bir şekilde yüksek enerjiyle altlık malzemeye yapışarak burada biriktirilerek kompozit malzeme oluşturulur. Bu yöntemde matris malzemesi olan ergiyik metal

katılaşma sıcaklığına hızlı bir şekilde ulaşır fakat katılaştıktan sonra oda sıcaklığına yavaş bir şekilde düşer bu sebeple matris ve takviye malzemesi arasındaki oluşabilecek reaksiyonlar azalır ve oluşan kompozit malzemenin ince taneli ve çökelti yapısında olması sağlanmış olur. Sprey biriktirme yöntemiyle üretilen kompozitler heterojen ve gözenekli olabilirler bu sebepten nihai ürüne ikincil işlem uygulamak gerekebilir. En çok bilinen ikincil işlem 1980 yıllarında geliştirilen “Ospey” yöntemidir [15].



Şekil 3.4. Sprey biriktirme yönteminin şematik görünümü [27].

### 3.1.2. Katı Hal Prosesleri

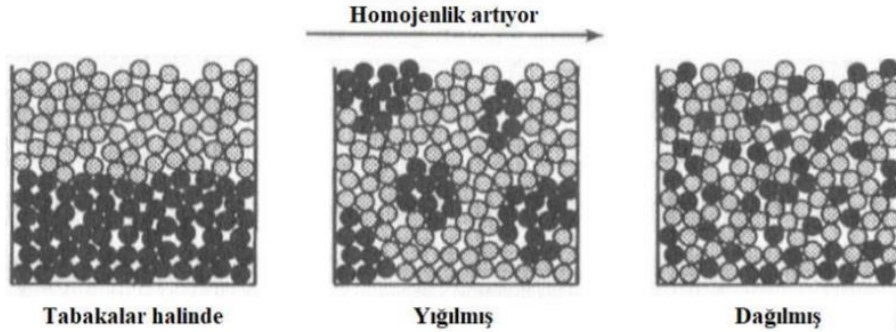
#### 3.1.2.1. Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi (T/M) yöntemi toz halindeki matris metali ve takviye elemanın farklı yöntemlerle karıştırılması ve belirli bir basınç altında ön şekil verildikten sonra inert atmosfer altında sinterlenmesi işlemidir [28]. 1960'lı yıllardan bu yana kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin avantajları; T/M ile üretilen nihai ürün neredeyse atıksız bir şekilde üretilir, çok hassas kompozisyonlar belirlenebilir [29], yüksek oranda takviye kullanmak mümkündür, matris ve takviye arasında arayüzey reaksiyonları gerçekleşmez, sıvı faz üretim yöntemleriyle homojen karıştırılmayan bileşimler toz halde karıştırılabilir [30], kullanılan tozların boyutuyla mikroyapıdaki segregasyonların boyutu doğru orantılı olduğundan segregasyonları sınırlandırmak mümkündür, intermetalik çökeltilerin küçük boyutlarda olması sebebiyle

homojenizasyon ısıl işlemi gerekmez, hammadeler daha verimli kullanılır [28]. Dezavantajları ise; üretimde kullanılan tozların pahalı olması, yoğun bileşimler üretmek için izostatik presleme gibi pahalı tekniklere ihtiyaç duyulması, ürün boyutunun pres kapasitesiyle sınırlı olması, döküm yöntemleriyle üretilen muadil ürünlere göre gözenekliliğin daha fazla olması ve bu sebeple reaksiyon için mevcut alanın artmasıyla düşük korozyon direnci oluşması şeklinde sıralanabilir [29].

### 3.1.2.2. Karıştırma İşlemi

T/M'de üretimin ilk aşaması olan matris ve takviye tozlarının karıştırılması işlemi ürünün özelliklerinin belirlenmesi bakımından oldukça önemli bir aşamadır. Karıştırma süresi ve yöntemi karışımın homojenliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Karıştırma esnasında işlemin kısa tutulması karışımın homojenliğini olumsuz etkilerken, uzun karıştırma süresi ise karıştırma potasının etrafında kalıntı kalmasına sebep olmaktadır [28]. Karıştırma süresinin homojen dağılıma olan etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

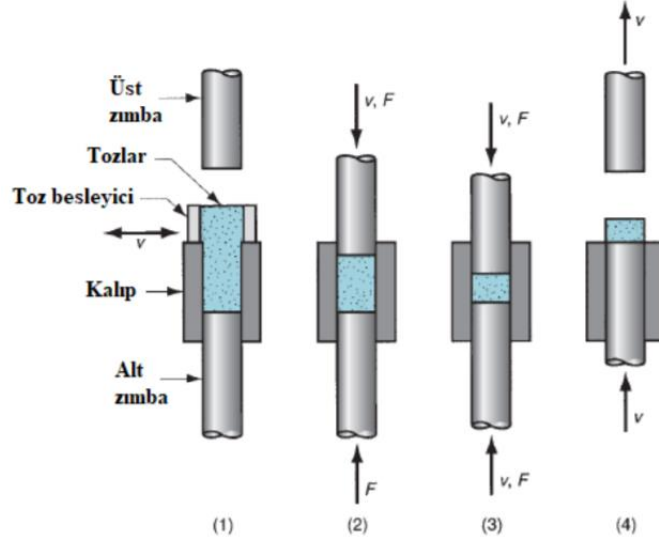


Şekil 3.5. Karıştırma işlem süresinin homojen dağılıma olan etkisi [28].

### 3.1.2.3. Sıkıştırma İşlemi

Dağınık haldeki toz karışımının istenilen şeklin verilmesi için kalıp içerisinde yük uygulanarak yoğunluk kazandırma ve katı bir parça haline getirme işlemidir [31]. Sıkıştırma işlemi genellikle 300 MPa ile 800 MPa basınç aralığında gerçekleşir. Bu işlemlerden sonra toz elle tutulabilir hale getirilir fakat istenilen mukavemet sinterleme işleminden sonra gerçekleşir. Toz metalürjisi yönteminde uygulanan sıkıştırma işlemi aşamaları Şekil 3.6'da gösterilmiştir ((1) tozların kalıp boşluğuna

doldurulması, (2) tozların preslenmesi, (3) alt ve üst pres zimbalarının son konumları, (4) parçanın çıkarılması [15].

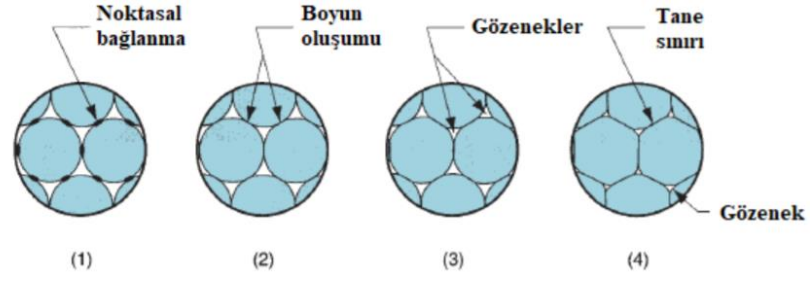


Şekil 3.6. Toz sıkıştırma aşamaları [15].

#### 3.1.2.4. Sinterleme

Sinterleme, ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda gerçekleşen partiküllerin birbirine bağlanmasını sağlayarak mukavemet artışına ve mekanik özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıl işlemdir [32]. Sinterleme, atomların yayınımları ile gerçekleşir ve birbirine temas eden parçacıkların bağlanmasını sağlar. Mikroyapısal açıdan, temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile bağlanma gerçekleşmektedir [33]. Boyunlaşma ile mukavemetin artması sağlamaktadır [15]. Sinterleme aşamaları Şekil 3.7’de gösterilmiştir ((1) partiküllerin temas noktalarından bağlanmaya başlaması, (2) temas noktalarının dönüşümü, (3) bağlanma artışıyla parçacıklar arası boşluğun azalması, (4) boyun oluşumunun başladığı bölgelerin tane sınırına dönüşmesi).





Şekil 3.7. Sinterleme aşamaları [15].

Sinterleme işlemi ile malzemede meydana gelen değişiklikler;

- Mukavemet ve elastiklik modülü
- Sertlik ve kırılma tokluğu
- Elektriksel ve ısı iletkenlik
- Sıvı ve gaz geçirgenliği
- Ortalama tane sayısı, boyutları ve şekli
- Tane boyutları ve şeklinin dağılımı
- Ortalama gözenek boyutları ve şekli
- Gözenek boyutları ve şeklinin dağılımı
- Kimyasal bileşim ve kristal yapı [15].

### 3.1.3. In Situ Prosesi

Takviye elemanlarının katı veya sıvı matris içerisinde kimyasal yollarla elde edilmesi 'in situ' yöntem olarak adlandırılır. Bu yöntemle üretilen kompozit malzemelerin temiz matris-takviye arayüzeyi, termodinamik kararlılığa sahip takviye elemanları, düşük üretim maliyeti gibi birtakım avantajları bulunmaktadır [34]. Takviyelerin özellikle sıvı matrise dışarıdan katılması ile üretilen kompozit yapılarında ise genellikle homojen olmayan bir mikroyapı, topaklanma, sert seramik partiküllerin kırılması gibi problemler olabilmektedir [35].

## BÖLÜM 4

### Mg MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Aşağıda son yıllarda Mg-MMK ile ilgili yapılan literatür çalışmalarının sonuçları kısaca özetlenmiştir.

PR. Rajkumar ve C. Kailasanathan (2020) yaptıkları çalışmada B<sub>4</sub>C takviyeli Mg matrisli kompozitlerde partikül boyutunun şekillendirilebilirlik ve gerinim sertleşmesi üzerine etkisi incelenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri ve işlenebilirliklerinde olumlu artışlar raporlanmıştır [36].

Güneş vd. (2021) yaptıkları çalışmada GNP ve B<sub>4</sub>C nano takviyeli Mg matrisli kompozitlerin termal, mekanik ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda aşınma direnci ve mekanik özelliklerde artış rapor edilmiştir [37].

Fahad vd. (2021) yaptıkları çalışmada AZ91D matrisli WC ve SiO<sub>2</sub> takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda sertlik değerlerinde ve aşınma direncinde artış raporlanmıştır [38].

Aydın vd. (2019) yaptıkları çalışmada sıcak presleme yöntemiyle ürettikleri AZ91 matrisli ZrO<sub>2</sub> takviyeli kompozit malzemenin sertlikte ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sertlikte artış rapor edilmiştir [39].

Aydın vd. (2019) yaptıkları çalışmada Mg ve Mg matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Kompozitlerin sertlik, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerin aşınma dayanımlarının arttığı rapor edilmiştir [40].

Pimenov vd. (2021) yaptıkları çalışmada sıcak presleme yöntemiyle Mg matrisli  $Al_2O_3$  takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Kompozitlerin mekanik ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir [41].

Aydın vd. (2020) yaptıkları çalışmada Mg matrisli BN takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Numunelerin yüksek sıcaklıkta kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Üretilen numunelerin aşınma dayanımlarının arttığı raporlanmıştır [42].

Ponhan vd. (2020) yaptıkları çalışmada Mg matrisli nano SiC takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerin sertlik ve bağıl yoğunluklarında artış olduğu raporlanmıştır [43].

Sadooghi vd. (2021) yaptıkları çalışmada karıştırma döküm yöntemiyle ürettikleri Mg matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda kompozitlerin sertlik değerleri ve aşınma direncinde artış olduğu raporlanmıştır [44].

Aydın vd. (2018) yaptıkları çalışmada AZ91 matrisli  $TiB_2$  partikül takviyeli üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı, yoğunluk, sertlik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Artan takviye içeriğiyle birlikte sertlik ve aşınma dayanımının önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir [45].

Son yıllarda, Mg matrisli kompozit üretiminde çevre dostu ve düşük maliyetli çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Katı atık olarak sınıflandırılan ürünlerin Mg matrisli kompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılması dikkat çekmiştir.

Yapılan yenilikçi çalışmalar ve elde edilen sonuçları şöyledir;

Parande vd. (2018) yapılan çalışmada Mg-Zn matrisli yumurta kabuğu partikülü takviyeli kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. İncelenen sonuçlarda

teorik yoğunluk ve gözeneklilik takviye oranına doğru orantılı şekilde artış göstermiştir. Sertlik değerlerinde artış olduğu rapor edilmiştir [46].

Dinaharana vd. (2019) yaptıkları çalışmada AZ91 matrisli uçucu kül (kömür ve katı yakıtlardan elde edilen kül) takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir, uygulanan testler sonucunda sertlik ve aşınma direncinde olumlu sonuçlar rapor edilmiştir [47].

Rajamani vd. (2016) yaptıkları çalışmada AZ91 matrisli kırmızı çamur takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde mikro sertlik ve mekanik özelliklerde iyileşmeler kaydedilmiştir yoğunluk artışı gözlemlenmiştir [48].

Parande (2020) yaptıkları çalışmada Mg-Zn matrisli yumurta kabuğu takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir korozyon direnci ve mekanik özelliklerinde artışlar raporlanmıştır ayrıca raporlamada kompozitin düşük maliyetle üretilmesine değinilmiştir [49].

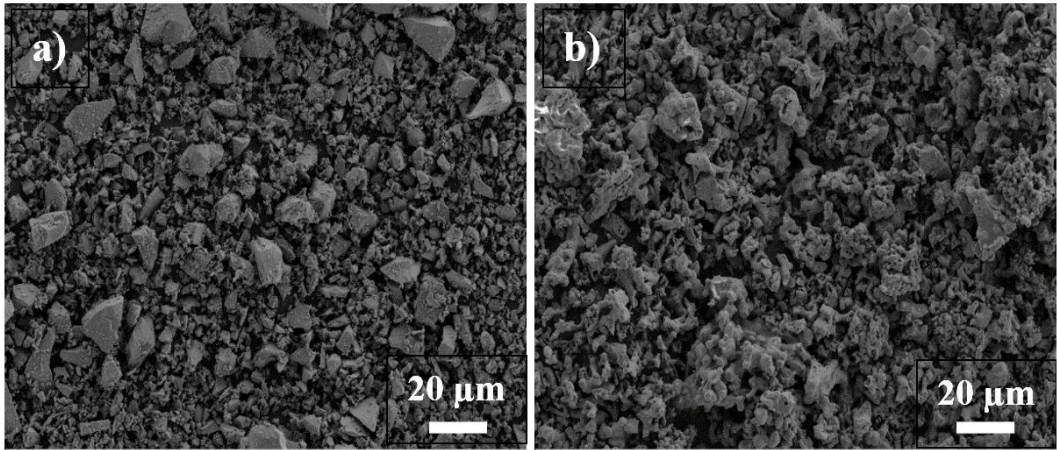
Literatürdeki çalışmalardan da görüldüğü gibi Mg ve AZ91 matrisi için katı atık takviyeli kompozitler alanında yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır, bu alanda yapılacak yeni çalışmalara ışık tutmak ve daha önce yapılmış çalışmaların ışığında bilime katkıda bulunmak amacıyla çalışmamızda kolaylıkla elde edilebilen katı atıkların aynı zamanda küresel çevre politikalarına ve üretim maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayacağı düşünülerek yumurta kabuğu ve cam takviyesi tercih edilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1. TAKVİYE TOZLARININ KARAKTERİZASYONU

Yumurta kabuğu (Y serisi) ve cam (C serisi) tozlarının SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.1' de gösterilmiştir. Görüntülerde C ve Y serisi takviye tozlarının boyutlarının çoğunlukla 20  $\mu\text{m}$ ' dan daha düşük boyutlarda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. a) C serisi takviye partiküllerinin SEM görüntüsü, b) Y serisi takviye partiküllerinin SEM görüntüsü.

#### 5.2. NUMUNELERİN ÜRETİMİ

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Mg ve AZ91 tozları, takviye elemanı olarak da yumurta kabuğu tozu ve cam tozu kullanılmıştır. Yumurta kabuğu (Y) ve atık cam (C) önce küçük parçalara ayrılmış ardından da Retsch RS200 halkalı öğütücü (Şekil 5.2) ile toz haline getirilmiştir. Matris malzemeleri olan Mg ve AZ91 tozlarına,

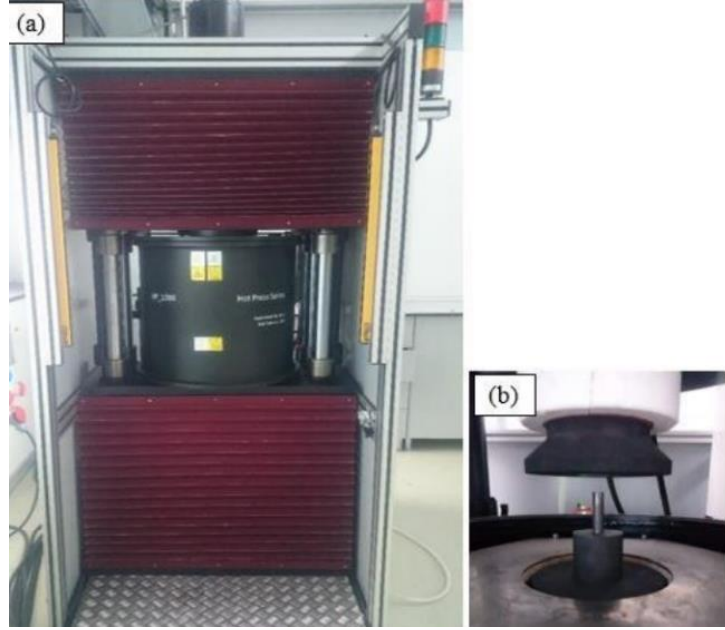
yumurta kabuğu partikülleri için; %2,5 - %5 - %10 oranlarında, cam partikülleri için; %5 - %10 - %15 oranlarında Fritsch Pulverisette 7 mekanik alaşımlama cihazında alaşımlandırılmıştır (Şekil 5.3). Elde edilen tozlar karışımın homojenleştirilmesi için mekanik alaşımlama cihazında 250 rpm'de 7 dakika süreyle karıştırılmıştır. Mg matrisli Y ve C takviyeli kompozitler sıcak presleme cihazında (Şekil 5.4) 60 dk süreyle 600 °C sıcaklığa kadar ısıtılıp 45 MPa basınç altında 600 °C sıcaklıkta 60 dk süreyle bekletilmiştir. Ardından AZ91 matrisli Y ve C takviyeli kompozitler 525 °C sıcaklıkta 45MPa basınç altında 60 dk süreyle bekletilmiştir. Belirlenen parametrelerde üretimler argon atmosferi altında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.2. Retsch RS200 öğütücü cihazı.



Şekil 5.3. Fritsch Pulverisette 7 mekanik alaşımlama cihazı.



Şekil 5.4. a) Sıcak presleme cihazı ve b) grafit kalıp.

### 5.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Üretilen numunelerin gerçek yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Bu yöntemle göre numunenin havada ve saf suda tartımları, yoğunluk ölçüm düzeneğinde (Şekil 5.5) gerçekleştirilmiştir. Tartım sonuçlarının belirlenmesiyle aşağıdaki formül kullanılarak gerçek yoğunluk hesaplanmıştır;

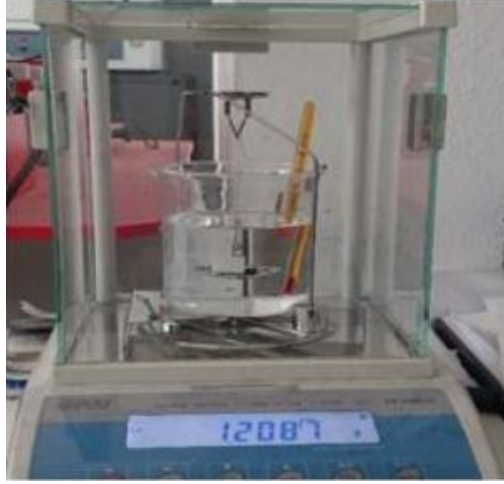
$d_{gerçek}$  : numunelerin gerçek yoğunluğunu,

$m_{hava}$  : numunelerin havadaki ağırlığını,

$m_{su}$  : numunelerin sudaki ağırlığını ve

$d_{su}$  : saf suyun yoğunluğunu ifade etmektedir [50].

$$d_{gerçek} = m_{hava} / (m_{hava} - m_{su}) \times d_{su} \quad (5.1)$$



Şekil 5.5. Yoğunluk ölçüm düzeneği.

#### 5.4. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin sertlik ölçümleri Qness Q10+ cihazında (Şekil 5.6) Vickers yöntemiyle 1 kg yük altında 15 sn süresince gerçekleştirilmiştir. Sertlik sonuçları en az 5 farklı noktadan alınan ölçümlerin aritmetik ortalamasıyla belirlenmiştir.

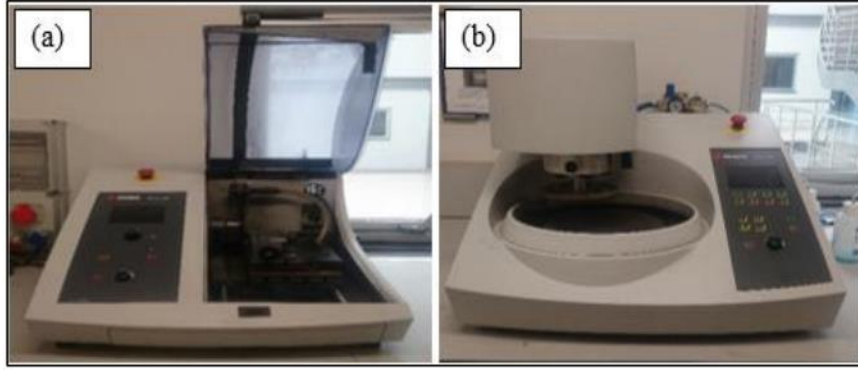


Şekil 5.6. Sertlik ölçüm cihazı.



## 5.5. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU ÇALIŞMALARI

Mikroyapı karakterizasyonu öncesinde numuneler uygun boyutta hassas kesme cihazıyla kesilmiştir. Yüzey hazırlama işlemleri sırasıyla 240-2000 arasında SiC zımpara ile zımparalanmış, yüzey parlatma işlemi için sırasıyla 6-3 mikronluk elmas solüsyon kullanılmış son olarak dağlama işlemi nital çözeltisiyle gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntüleme ve ön hazırlık aşamalarında kullanılan cihazlar Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Numunelerin mikroyapı karakterizasyonu Şekil 5.8’de gösterilen SEM cihazıyla ve faz analizleri Şekil 5.9’da gösterilen XRD cihazıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. a) Hassas kesme ve b) zımparalama-parlatma cihazları.



Şekil 5.8. SEM cihazı.



Şekil 5.9. XRD cihazı.

## 5.6. AŞINMA TESTLERİ

Aşınma testleri UTS 10/20 cihazı (Şekil 5.10) kullanılarak 5N, 10N, 20N yükler altında ve 200 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin hacim kaybı Mitutoyo SJ410 Profilometre (Şekil 5.11) ile ölçülmüştür. Hacim kaybının kayma mesafesine bölünmesiyle aşınma hızı ( $\text{mm}^3/\text{m}$ ) bulunmuştur. Aşınma tesleri sonrası aşınmış yüzeyler SEM ile incelenmiştir.



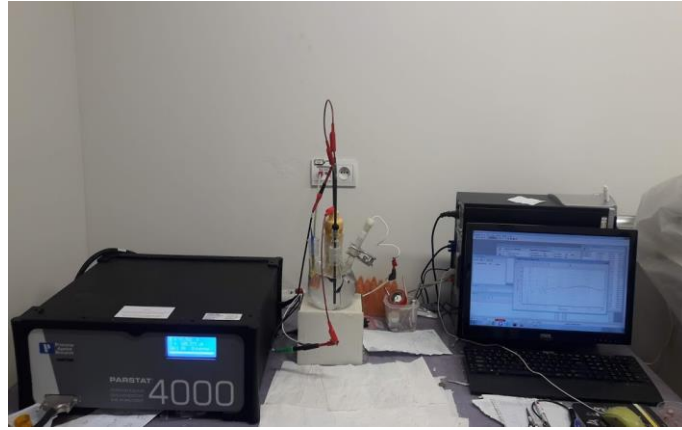
Şekil 5.10. Aşınma test cihazı.



Şekil 5.11. Profilometre cihazı.

## 5.7. KOROZYON TESTLERİ

Numunelerin elektrokimyasal korozyon testi potansiyodinamik polarizasyon ile galvanostat (Partstat 4000) cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.12). Korozyon ortamı, % 3,5 NaCl çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. Referans ve karşı elektrotlar sırasıyla Ag / AgCl ve grafit olarak kullanılmıştır. Tarama aralığı +0.5 ve -0.5 V ve tarama hızı 1.5 mV / s olarak seçilmiştir. Korozyon testi sonrası numunelerin yüzeyleri SEM ile incelenmiştir.



Şekil 5.12. Korozyon test düzeneği.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARI

Çizelge 6.1’de üretilen numunelerin gerçek, teorik ve relatif yoğunlukları verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında en yüksek relatif yoğunluklar değerleri saf Mg ve AZ91 numunelerinde elde edilmiştir. Kompozit malzemelerin relatif yoğunluk değerleri takviye oranının artmasıyla düşüş göstermektedir. Literatürde, takviye elemanın artmasıyla relatif yoğunluktaki düşüşün sebebi olarak, takviye elemanlarının sıkıştırılabilirliği negatif etkilemesi ve sinterleme sırasındaki yoğunlaşmayı azaltması olarak rapor edilmiştir [51,52]. Bu çalışmanın yoğunluk sonuçlarının literatürdeki var olan Mg matrisli kompozitlerle ilgili çalışmaların sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür [48,51]. Bu çalışmanın yoğunluk sonuçları incelendiğinde, tüm numuneler için relatif yoğunluk değerleri %90 üzeri olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak toz metalurjisi ile sıcak presleme yöntemiyle Mg matrisli yumurta kabuğu ve katı atık cam takviyeli kompozitlerin üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirileceği söylenilebilir.

Çizelge 6.1. Numunelerin yoğunluk değerleri.

Malzeme	Gerçek Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Teorik Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Relatif Yoğunluk (%)
Mg	1,733	1,738	99,7
Mg+5C	1,711	1,739	98,3
Mg+10C	1,771	1,826	96,9
Mg+15C	1,769	1,871	94,5
Mg+2,5Y	1,736	1,762	98,5
Mg+5Y	1,726	1,786	96,6
Mg+10Y	1,741	1,835	94,8
AZ91	1,829	1,864	98,1
AZ91+5C	1,851	1,902	97,3
AZ91+10C	1,832	1,940	94,4
AZ91+15C	1,850	1,978	93,5
AZ91+2,5Y	1,811	1,885	96,0
AZ91+5Y	1,801	1,906	94,4
AZ91+%10Y	1,805	1,948	92,6

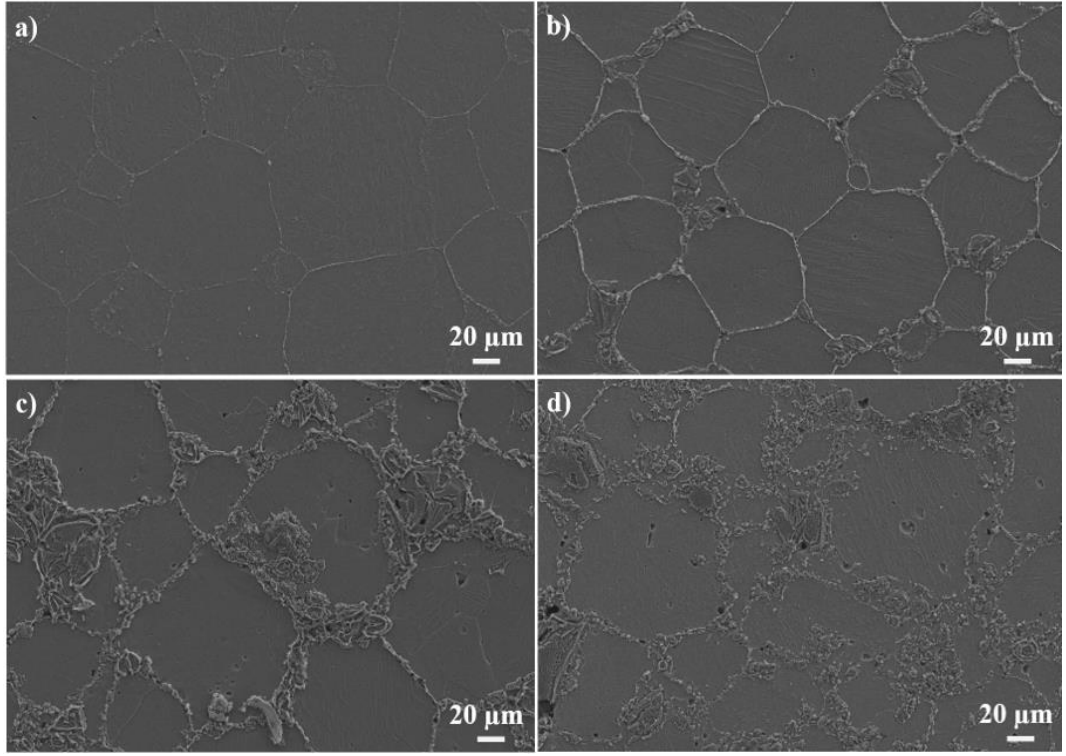
Çizelge 6.2’de Mg ve AZ91 matrisli kompozitlerin sertlik değerleri ve sertlik artışları gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde, saf Mg ve AZ91 ile kıyaslandığında kompozitlerde takviye elemanlarının ilavesiyle sertlik değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. En yüksek sertlik değeri 112,1 ile AZ91 / 15C kompozitinde elde edilmiştir. Ayrıca, en yüksek sertlik artışı da %65.5 ile Mg / 15 C kompozitinde elde edilmiştir. İki farklı takviye incelendiği zaman atık cam takviyesinin yumurta kabuğu takviyesine göre daha yüksek sertlik artışı sağladığı görülmektedir. Kompozit malzemelerde sertlik artışının temel sebebi matris içinde sert takviye fazının bulunması ve takviye fazının tane sınırı hareketlerini ve dislokasyon hareketlerini kısıtlamasına dayandırılmaktadır [53,54]. Ayrıca, yapıda bulunan bu sert pariküllerin yük altında plastik deformasyon ve penetrasyona karşı direnç göstermesi de sertlik artış nedenleri arasındadır [46,55].

Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri.

Malzeme	Numune Sertliği (HV <sub>1kg</sub> )	Sertlik Artışı (%)
Mg	38,3±0,8	-
Mg+5C	43,7±2,9	14,0
Mg+10C	58,5±1,4	52,7
Mg+15C	63,4±2,8	65,5
Mg+2.5Y	42,9±2,3	12,0
Mg+5Y	44,6±2,4	16,4
Mg+10Y	49,1±2,8	28,1
AZ91	73,8±2,1	-
AZ91+5C	84,5±3,3	14,4
AZ91+10C	99,9±2,1	35,3
AZ91+15C	112,1±5,7	51,8
AZ91+2,5Y	83,4±3,6	13,0
AZ91+5Y	89,2±4,9	20,8
AZ91+10Y	101,1±2,6	27,0

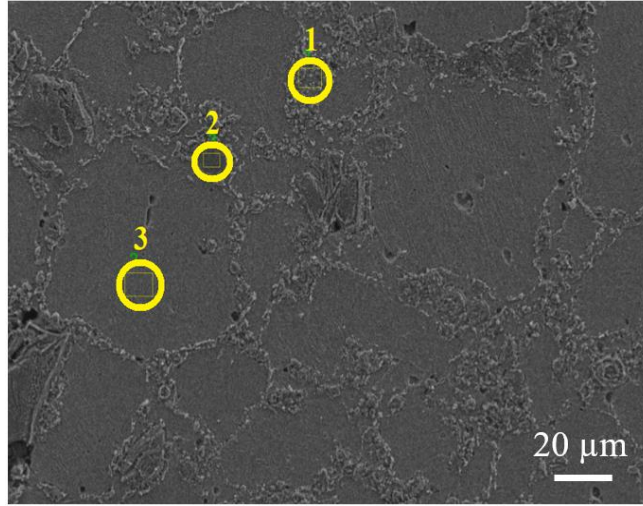
## 6.2. MİKROYAPI KARATERİZASYONU

Şekil 6.1'de Mg-C serisi kompozitlerin SEM resimleri görülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarında yüzey hataları ve poroziteler gözlenmemektedir. Takviye fazlarının dağılımının genel olarak homojen olduğu fakat takviye oranının artmasıyla özellikle %10 ve %15 takviye için topaklanmalar gözlenmektedir. Ayrıca, takviye partikülleri genellikle tane sınırlarında kendine yer bulmuştur. Literatürde Mg matrisli kompozitlerle ilgili yapılan bir çalışmada takviye partiküllerinin tane sınırlarında yoğunlaştığı rapor edilmiştir [46]. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde partikül takviyeli kompozitlerin saf Mg'a göre tane boyutunun daha düşük olduğu da gözlenmektedir. Bu durum, tane sınırlarını sabitleyen partiküllerin yapı içerisinde yer almasıyla ilişkilendirilmektedir [46].



Şekil 6.1. Mg-C serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Mg/5C, (c) Mg/10C, (d) Mg/15C.

Şekil 6.2 Mg / 15C kompozitinin EDX ölçümü gerçekleştirilen bölgelerini göstermektedir. Bir numaralı bölgeden alınan EDX analizine göre yapıda yüksek oranda Si (%44.1) ve O (%33.3) tespit edilmiştir. Bu sonuca göre 1 numaralı bölgede SiO<sub>2</sub> fazının var olduğu söylenebilir. 2 numaralı bölgenin analiz sonucuna göre yapıda yüksek oranda Na ve O tespit edilmiştir. Bu durum cam tozunda yüksek oranda yer alan Na<sub>2</sub>O bileşenin varlığıyla ilişkilendirilebilir. 3 numaralı matris bölgesinden alınan analize göre yapıda çok yüksek oranda Mg (%94.8) ve çok düşük oranda O (%3.9) tespit edilmiştir. Yapıdaki düşük oranda O'nin varlığı üretimlerin koruyucu argon atmosferinde gerçekleştirilmesine bağlanmıştır. Çizelge 6.3'te alınan EDX analizinin sonuçları verilmiştir.



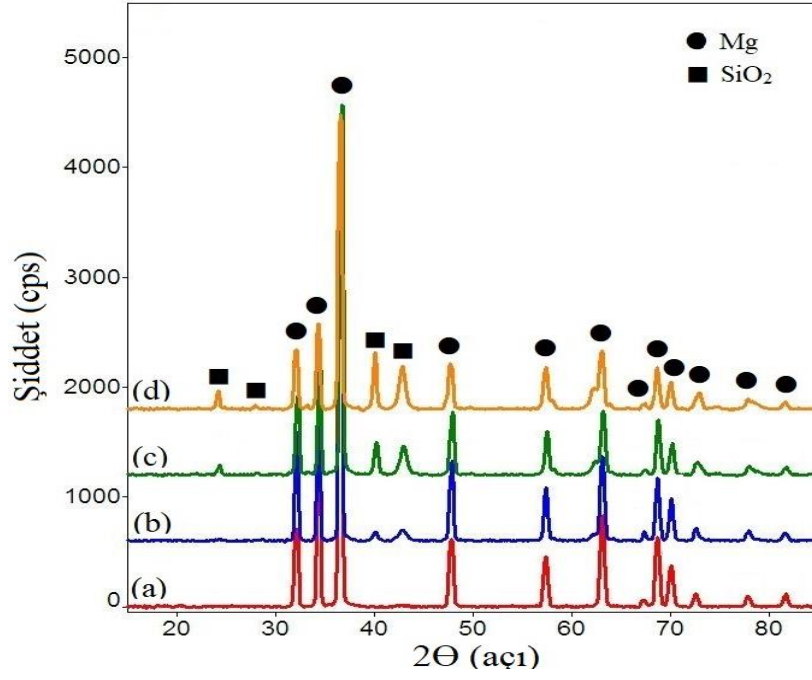
Şekil 6.2. Mg/15C takviyeli kompozitin EDX görüntüsü.

Çizelge 6.3. Mg/15C takviyeli kompozitin EDX analizi.

Ölçüm (%)	O	Na	Mg	Si
1	33.3	1.3	21.3	44.1
2	52.3	47.6	-	-
3	3.9	1.3	94.8	-

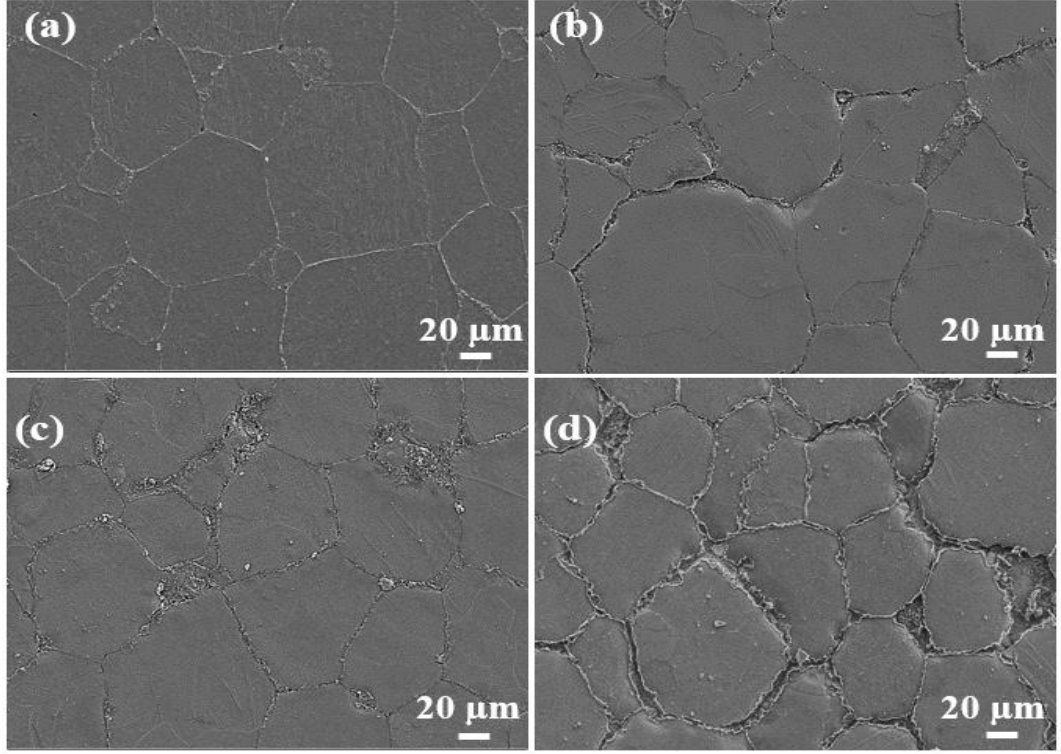
Şekil 6.3' te Mg ve Mg-C serisi kompozitlerin XRD analizi gösterilmektedir. Saf Mg numunesinde Mg fazına ait pikler net olarak görülmektedir. Kompozit malzemelerin analizlerine bakıldığı zaman yapıda Mg'a ait pikler ve SiO<sub>2</sub> fazına ait pikler görülmektedir. Ayrıca, takviye oranının artmasıyla birlikte SiO<sub>2</sub> fazının pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Yapıda herhangi bir farklı oksit veya ikinci faz oluşumu gözlenmemiştir.





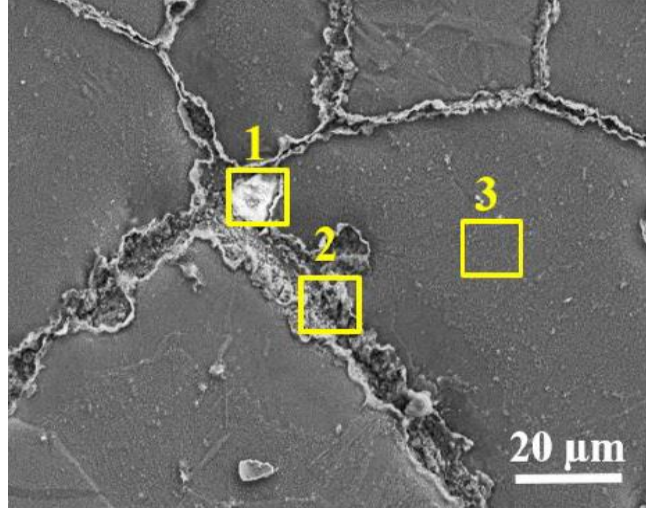
Şekil 6.3. Mg-C serisi kompozitlerin XRD analizleri. a) Saf Mg, b) Mg/5C, c) Mg/10C, d) Mg/15C.

Şekil 6.4'de saf Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Üretilen numunelerin makroskobik yüzey hatalarının olmadığı ve üretimlerin başarılı olduğu görülmektedir. Takviye partiküllerinin genelde homojen ve tane sınırlarında yer aldığı görülmektedir. Takviye oranı arttıkça, partiküllerin aglomerasyona uğradığı görülmektedir. Ayrıca, yüksek takviye oranlarındaki (%5 ve %10) numunelerde saf Mg ile karşılaştırıldığında tane boyutunun daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.4. Mg-Y serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Mg/2,5Y, (c) Mg/5Y, (d) Mg/10Y.

Şekil 6.5'te Mg / 10Y kompozitinin EDX analizi görüntüsü verilmiştir. Çizelge 6.4'te EDX analizine ait ölçümlerin sonucu verilmiştir. 1 ve 2 numaralı bölgelerden alınan analize göre yüksek oranda Ca, O ve C elementleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlar tane sınırlarındaki bu partiküllerin Y kabuğu takviyesi olduğunu kanıtlamaktadır. Y kabuğu takviyesi çok yüksek oranda  $\text{CaCO}_3$  içermektedir. 3 numaralı matris bölgesinden alınan analize göre yapıda çok yüksek oranda Mg (%93.8) ve düşük oranda O (%4.1) tespit edilmiştir. Düşük oksitlenme üretimlerde koruyucu atmosfer kullanılmasına bağlanmıştır.

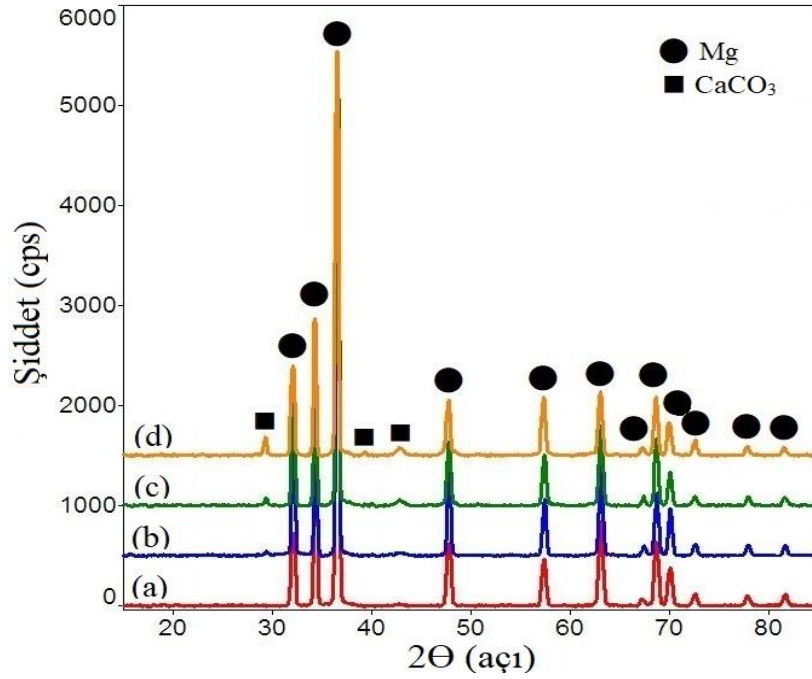


Şekil 6.5. Mg / 10Y kompozitinin EDX analizi görüntüsü.

Çizelge 6.4. Mg%10Y takviyeli kompozitin EDX analizi.

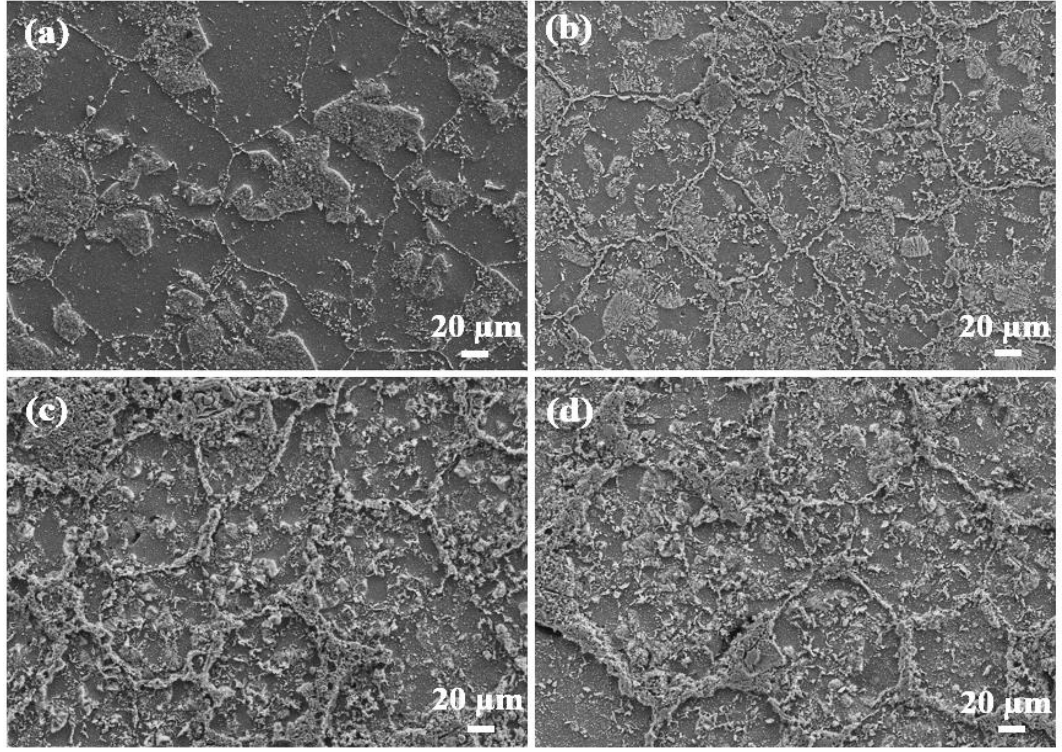
Ölçüm (%)	C	O	Mg	Ca
1	13.1	54.7	1.2	30.8
2	11.8	54.8	16.9	16.4
3	2.1	4.1	93.8	-

Şekil 6.6’da saf Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerin XRD analizleri verilmiştir. Saf Mg numunesinde sadece Mg’a ait piklerin varlığı görülmektedir. Kompozit malzemelerde, saf Mg fazına ait piklerle beraber  $\text{CaCO}_3$  fazına ait pikler algılanmıştır. Takviye oranının artmasıyla beraber  $\text{CaCO}_3$  fazına ait piklerin şiddetinde artış gözlenmiştir. XRD ve EDS analizlerinin sonuçları değerlendirildiğinde yapıda Y takviyesinin bileşeni olan  $\text{CaCO}_3$  yapısının varlığı kanıtlanmıştır.



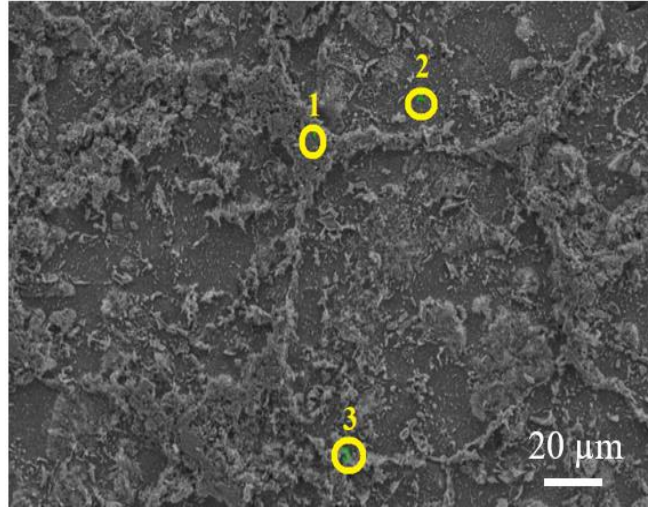
Şekil 6.6. Mg-Y serisi kompozitlerin XRD analizleri. a) Saf Mg, b) Mg/2.5Y, c) Mg/5Y, d) Mg/10Y.

Şekil 6.7’de AZ91 / C serisi kompozitlere ait SEM resimleri verilmiştir. AZ91 numunesinin görüntüsünde genellikle tane içinde oluşan bir fazın varlığı dikkat çekmektedir. Bu faz literatürde, AZ91 alaşımının yapısında görülen Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik bileşiği olarak tanımlanmaktadır [56]. Genel olarak numunelerin mikroyapısı incelendiğinde hatasız ve porozitesiz bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Takviye partiküllerinin kompozit malzemelerin yapısında genelde tane sınırlarında yer aldığı görülmektedir. Takviye oranının artmasıyla beraber kısmi topaklanmalar gözlenmiştir.



Şekil 6.7. AZ91-C serisi kompozitlerin SEM görüntüleri (a) AZ91, (b) AZ91/5C, (c)AZ91/10C, (d)AZ91/15C.

AZ91/ 15C kompozit numunesi üzerinde 3 farklı bölgede EDX analizi yapılmıştır, analiz yapılan bölgeler Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Çizelge 6.5’te alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. 1 numaralı bölgenin analiz sonucunda yapıda yüksek oranda Na ve O tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yapıda camın bileşiminde olan  $\text{Na}_2\text{O}$  fazının olduğunu göstermektedir. 2 numaralı matris bölgesinden alınan analize göre yapıda yüksek oranda Mg ve düşük oranlarda Al ve Zn tespit edilmiştir. Bu sonuçların AZ91 alaşımının bileşimiyle tutarlı olduğu görülmektedir. 3 numaralı bölgeden alınan analize göre, yapıda yüksek oranda Si ve O elementleri tespit edilmiştir. Bu sonuç yapıda  $\text{SiO}_2$  bileşiğinin varlığını doğrulamaktadır.

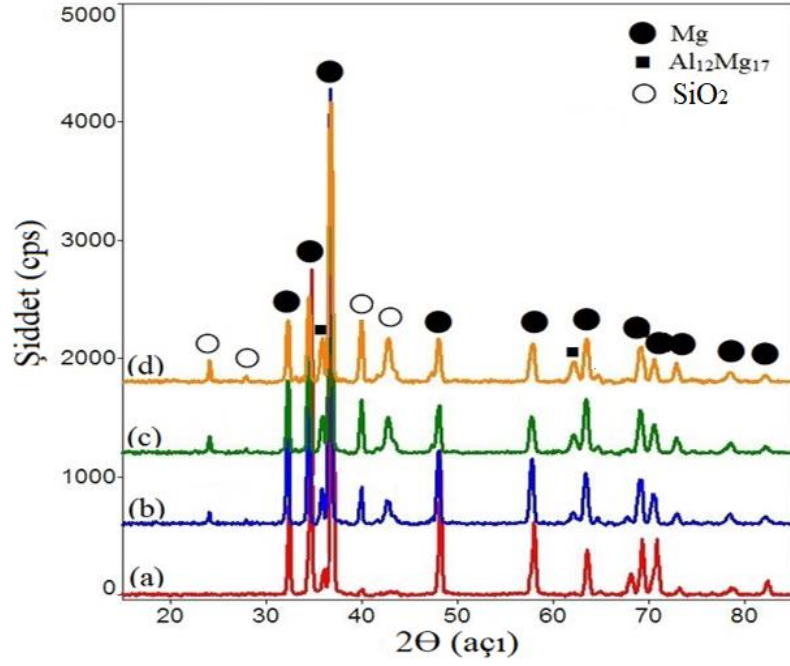


Şekil 6.8. AZ91/%15C takviyeli kompozitin EDX analiz görüntüsü.

Çizelge 6.5. AZ91/15C takviyeli kompozitin EDX analizi.

Ölçüm (%)	O	Na	Mg	Al	Si	Zn
1	39.5	36.9	12.1	2.7	7.6	1.2
2	4.3	-	85.0	7.3	0.5	2.9
3	37.8	0.8	15.8	1.2	43.1	1.3

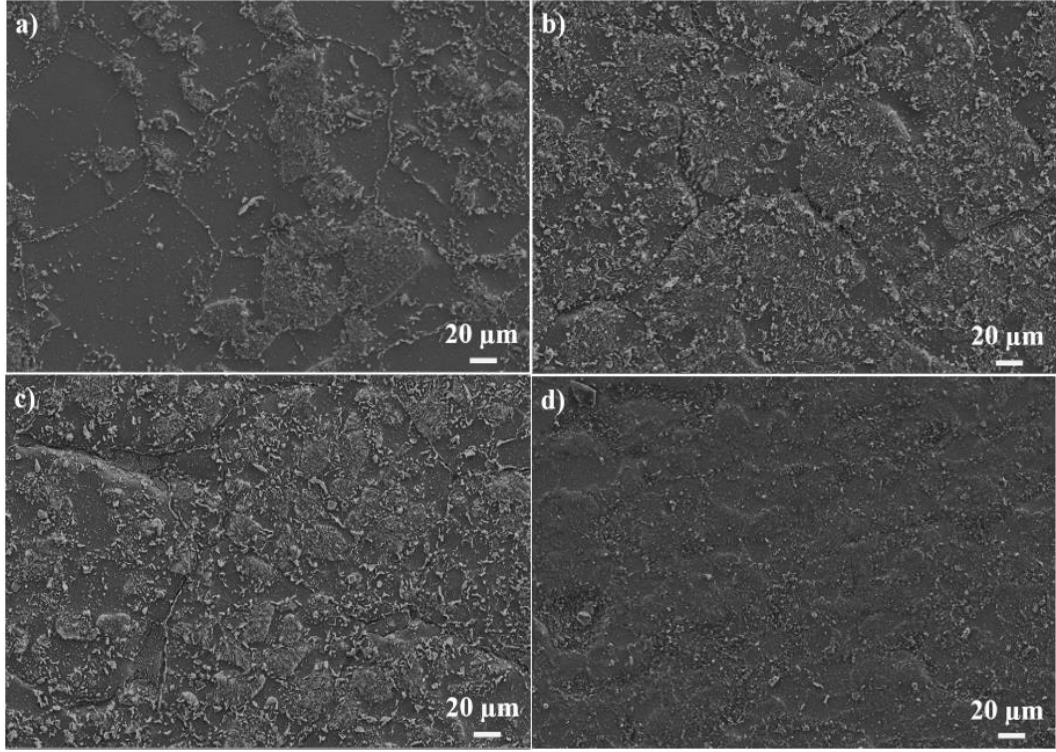
Şekil 6.9’da AZ91-C serisi kompozitlerin XRD analizleri verilmiştir. Yapılan analizde AZ91 alaşımında bulunan  $Al_{12}Mg_{17}$  fazı ve Mg elementine ait pikler tespit edilmiştir. Ayrıca C serisi kompozitlerde  $SiO_2$  fazının varlığı görülmektedir. Bu piklerin şiddeti takviye oranının artmasıyla birlikte artmıştır. XRD analizinde başka herhangi faz veya intermetalik bileşik tespit edilmemiştir.



Şekil 6.9. AZ91-C serisi kompozlerin XRD analizleri. a) AZ91, b) AZ91/5C, c) AZ91/10C, d) AZ91/15C.

Şekil 6.10'da AZ91-Y serisine ait kompozitlerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. AZ91 numunesinde tane sınırları ve tane içlerinde  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik bileşiğinin varlığı gözükmemektedir. Takviye elemanlarının kompozit malzemelerin yapısında dağılımı net olarak ayırt edilememekle birlikte genel olarak tane sınırlarında yerleştiği söylenebilir. Takviye elemanlarının varlığını kanıtlamak için bazı bölgelere EDX analizi uygulanmıştır.

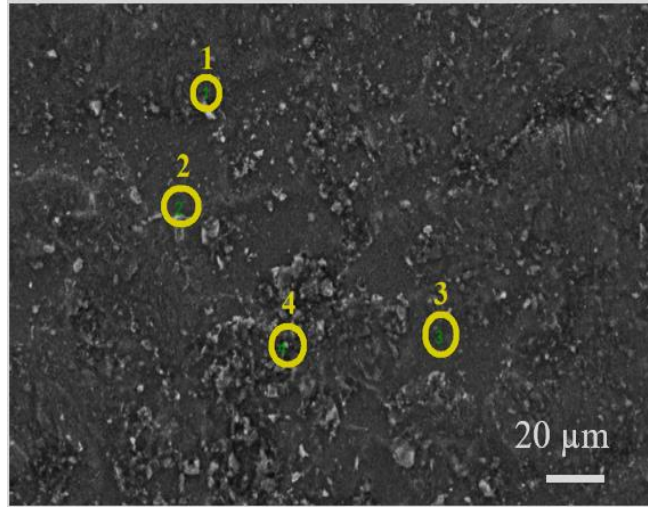




Şekil 6.10. AZ91-Y serisi kompozitlerin mikroyapı görüntüleri (a) AZ91, (b) AZ91/2,5Y, (c) AZ91/5Y, (d) AZ91/10Y.

Şekil 6.11’de gösterilen bölgelerden AZ91/10 Y numunesi için EDX analizi yapılmıştır. Çizelge 6.6’da EDX analizlerinin sonuçları verilmiştir. 1 numaralı bölgeden alınan EDS sonuçlarına göre yapıda yüksek oranda Mg ve Al algılanmıştır. Bu sonuç yapıda Mg-Al intermetalığının bulunduğunu göstermektedir. 2 ve numaralı bölgelerin analizine göre yapıda önemli oranda Ca, C ve O algılanmıştır. Bu sonuç yapıda yumurta kabuğu partiküllerinin bulunduğunu göstermektedir. 3 numaralı matris bölgesinin analiz sonucunda çok yüksek oranda Mg tespit edilmiştir.



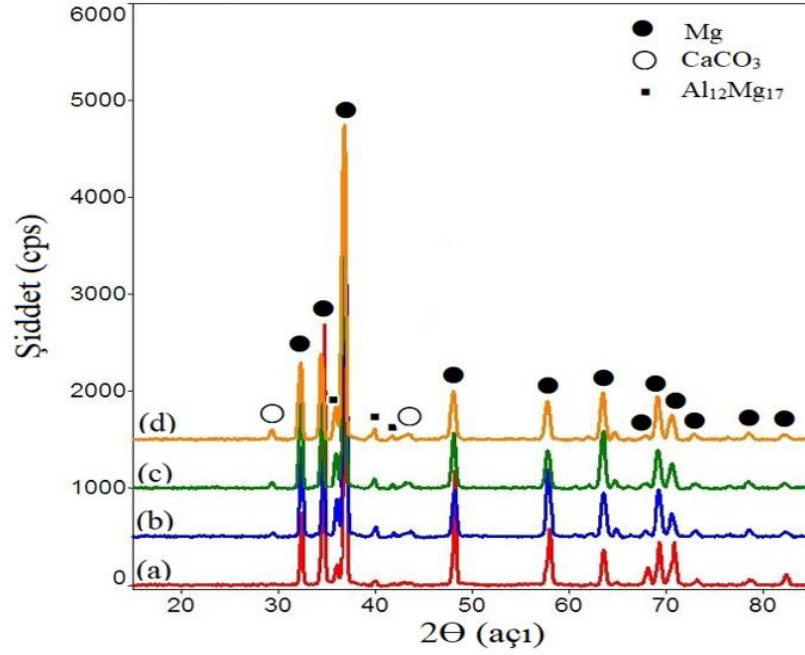


Şekil 6.11. AZ91/10Y kompozitinin EDX görüntüsü.

Çizelge 6.6. AZ91/10Y takviyeli kompozitin EDX analizi.

Ölçüm (%)	C	O	Mg	Al	Ca	Zn
1	9.8	7.9	45.1	33.6	0.1	3.5
2	25.8	22.6	12.1	8.5	30.0	1.0
3	3.7	4.6	81.5	7.8	0.1	2.3
4	16.9	43.1	14.3	1.0	23.1	1.6

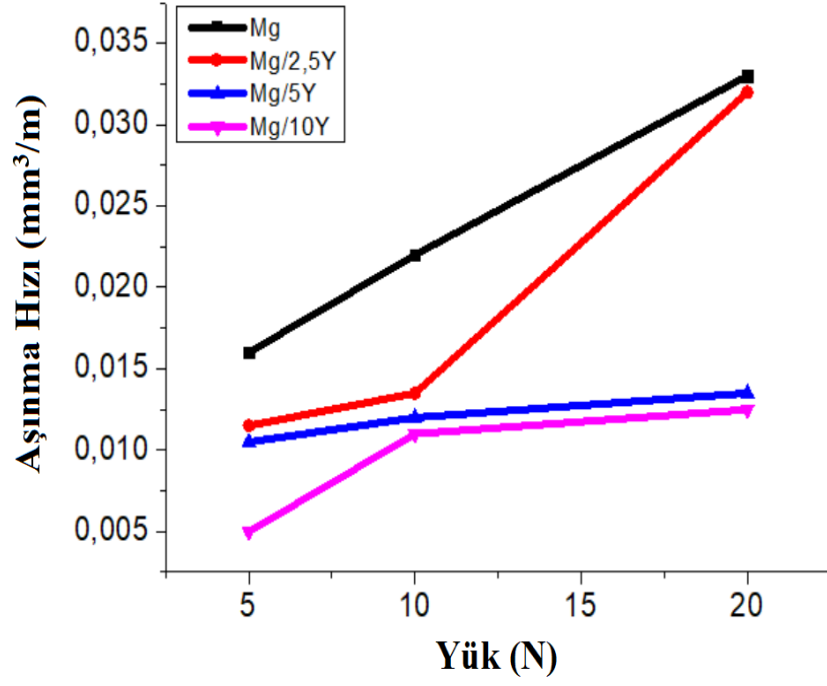
Şekil 6.12’de AZ91-Y serisi kompozitlerin XRD analizleri verilmiştir. XRD sonuçları incelendiğinde AZ91 numunesinde Mg ve  $Al_{12}Mg_{17}$  fazlarına ait pikler görülmektedir. Kompozit malzemelerin analizi incelendiğinde  $CaCO_3$  bileşiğine ait pikler tespit edilmiştir ve takviye oranının artmasıyla piklerin şiddetleri artmıştır.



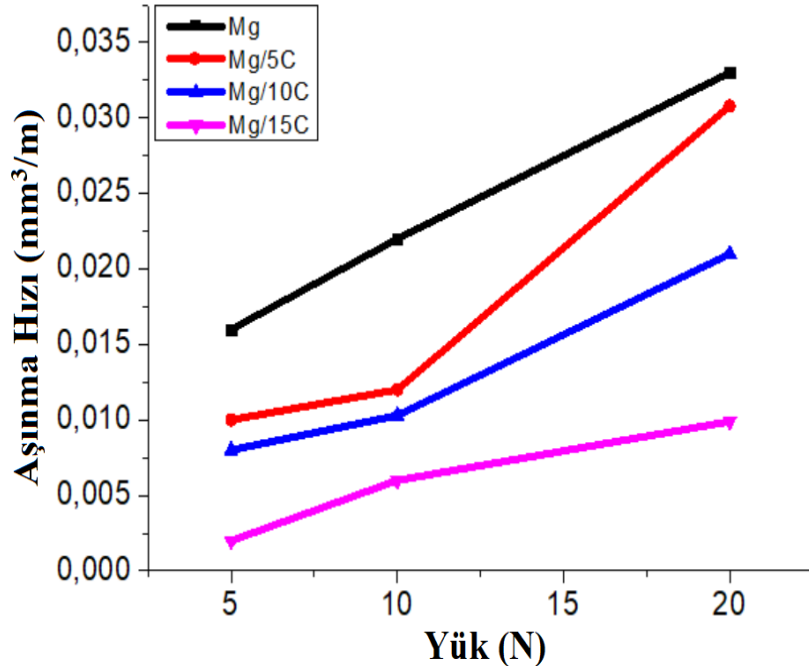
Şekil 6.12. AZ91-Y serisi kompozlerin XRD analizleri a) Saf AZ91, b) AZ91/2.5Y, c) AZ91/5Y, d) AZ91/10Y.

### 6.3. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

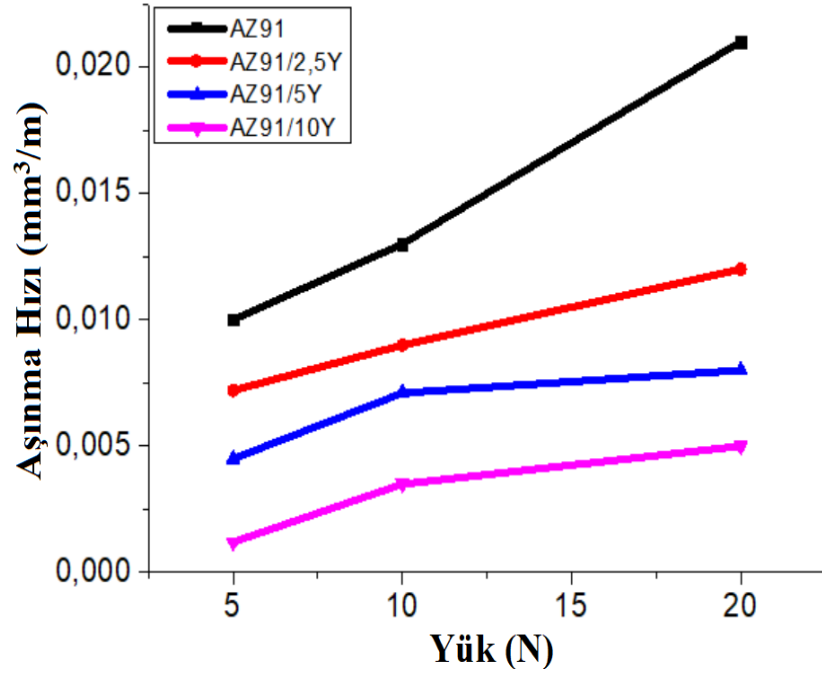
Şekil 6.13-6.16 sırasıyla Mg-Y, Mg-C, AZ91-Y, AZ91-C serisi kompozitlerinin farklı yüklere bağlı olarak aşınma grafikleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm kompozit serilerinin, takviye oranının artmasıyla aşınma hızlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumdan çıkarılan sonuç kompozit malzemelerin aşınma direncinin artmasıdır. Aşınma hızının azalması bir başka deyişle aşınma dayanımının artması, takviye ilavesiyle kompozit malzeme de oluşan sertlik artışı ve matris ile karşıt malzemenin arasındaki temas alanının azalmasına dayandırılabilir [57]. Ayrıca, yapıda bulunan takviye elemanları yük taşıyıcı özellik göstermekte ve plastik deformasyona olan direnci arttırmaktadır [43]. Aşınma grafikleri incelendiğinde yükün artmasıyla tüm numunelerin aşınma hızlarının arttığı görülmektedir. Bu durum, yükün artışı ile beraber karşıt malzeme ve numune arasındaki temas basıncının artması ve aşınma yüzeyinde daha yüksek deformasyonun oluşmasıyla ilişkilendirilebilmektedir [58].



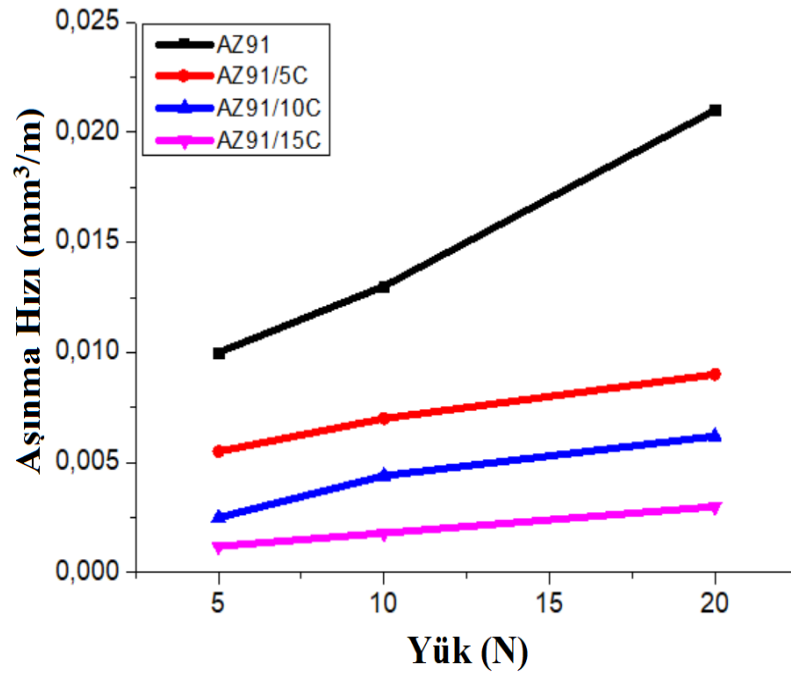
Şekil 6.13. Saf Mg ve Mg-Y kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.



Şekil 6.14. Saf Mg ve Mg-C kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.



Şekil 6.15. AZ91 alaşımı ve AZ91-Y kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.



Şekil 6.16. AZ91 alaşımı ve AZ91-C kompozitlerinin aşınma hızı grafiği.

#### 6.4. AŞINMA SONRASI YÜZEY İNCELEMELERİ

Çizelge 6.7’de saf Mg ve Mg-C serisi kompozitlerinin aşınma sonrası SEM resimleri gösterilmiştir. Saf Mg’un aşınma görüntüleri incelendiğinde 5N yük altında, aşınma yönüne paralel olarak derin yivlerin (grooves) varlığı görülmektedir. Aşınma yönüne paralel bu yivlerin varlığı abrasif aşınmanın varlığının göstergesidir [39, 59]. Saf Mg için 20 N yük altında aşınma resmi incelendiğinde, yapıda delaminasyona uğramış bölgenin olduğu görülmektedir. Aşınma yükünün artması aşırı plastik deformasyona neden olmakta ve delaminasyon aşınma mekanizmasının aktif olmasını sağlamaktadır [60]. Mg / C serisi kompozitlerin aşınmış yüzeyleri, saf Mg numunesiyle karşılaştırıldığında, daha az aşınmış ve hasara uğramış olduğu görülmektedir. Kompozit malzemelerdeki aşınma yivlerinin daha az derin olduğu görülmektedir. Ayrıca, takviye elemanının artmasıyla beraber yüzey hasarının daha az olduğu görülmektedir. Bu yüzey görüntülerinin aşınma hızı grafiklerinin sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmektedir.

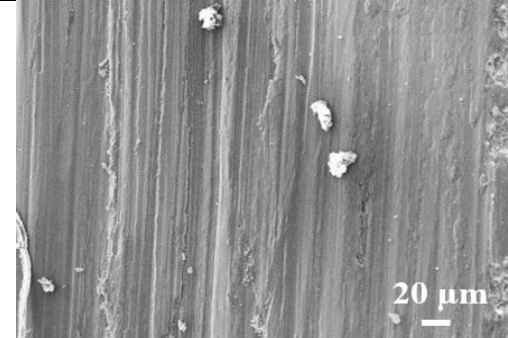
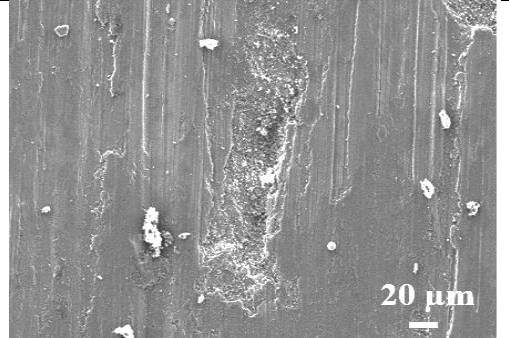
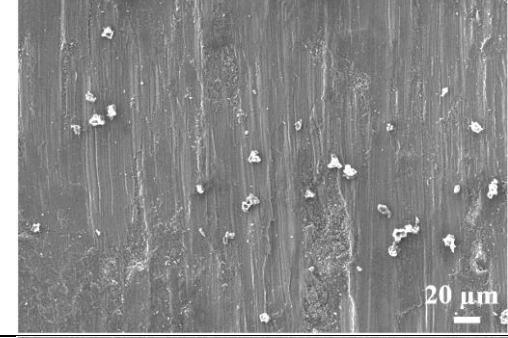
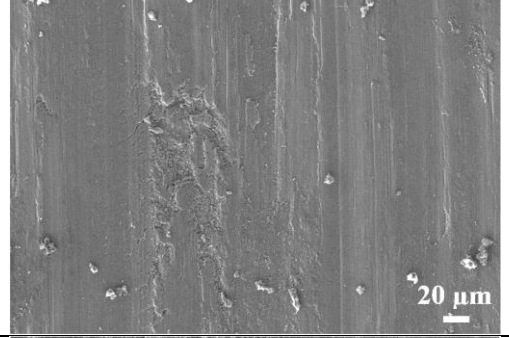
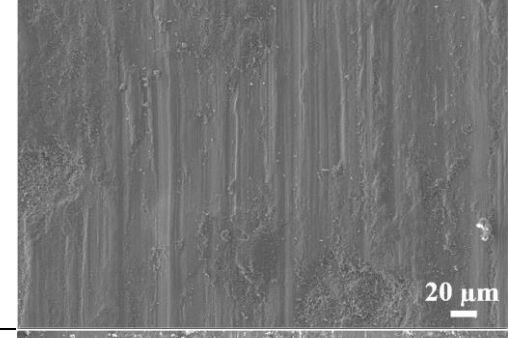
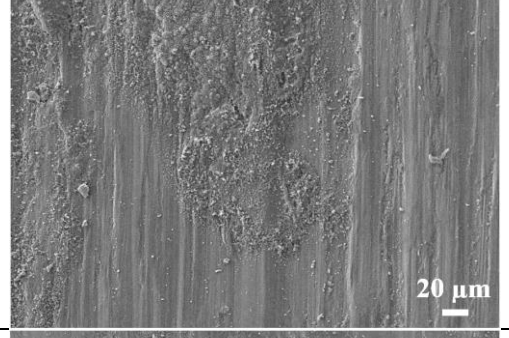
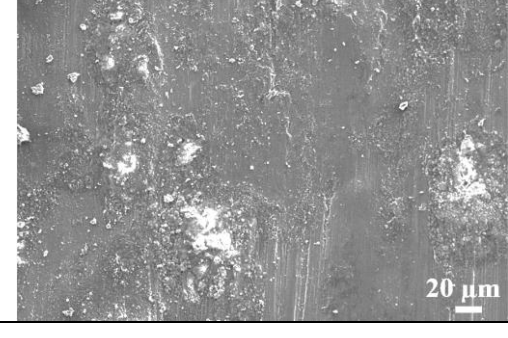
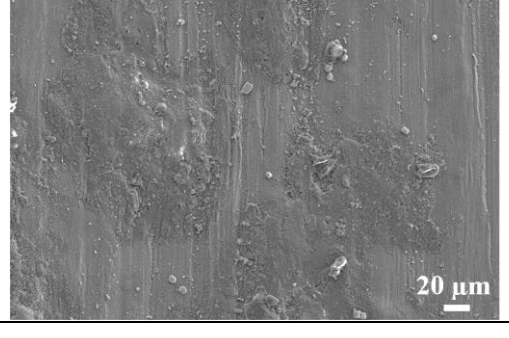
Çizelge 6.8’deki saf Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerin aşınma görüntüleri verilmiştir. Saf Mg’un 5N altında abrasif, 20 N altında delaminasyon aşınma mekanizmalarının aktif olduğu görülmektedir. Mg/2.5 Y kompozitinin 5N altında aşınma yüzeyinin az hasara uğramış olduğu görülmektedir. Aynı numune için 20 N yük altında yapıda küçük çukurun oluştuğu görülmektedir. Bu durum delaminasyon aşınmasıyla açıklanabilir [52]. Diğer numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde, Mg / 10 Y numunesinin en az aşınan ve en az hasara uğrayan numune olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.9’da AZ91 ve AZ91/ C serisi kompozitlerin aşınma görüntüleri verilmiştir. AZ91 numunesinin aşınmış yüzeyleri incelendiğinde yapıda 5N için sığ yivlerin, 20 N için derin yivlerin varlığı görülmektedir. Literatürde bu yivlerin varlığı abrasif aşınmayla ilişkilendirilmekte ve yükün artmasıyla derinlikleri artmaktadır [61]. Takviye oranının artmasıyla kompozit malzemelerin yüzeylerinin daha az aşındığı ve daha az hasara uğradığı görülmektedir.

Çizelge 6.10’da AZ91 ve AZ91/ Y serisi kompozitlerin aşınma görüntüleri verilmiştir. Numunelerin aşınma görüntüleri incelendiğinde, genel olarak abrasif

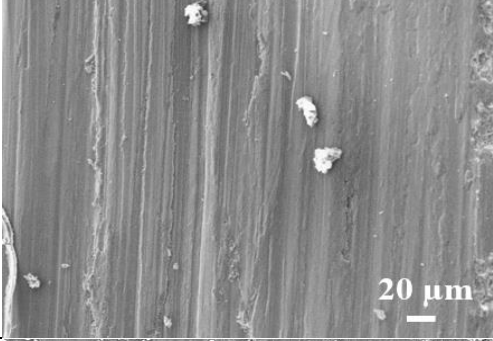
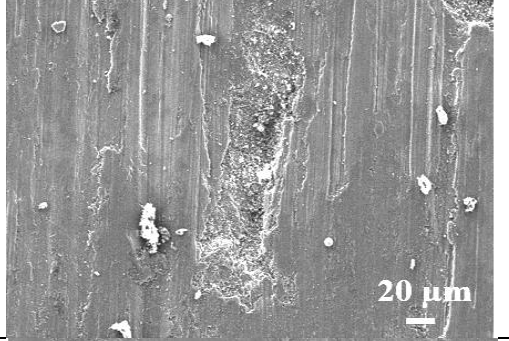
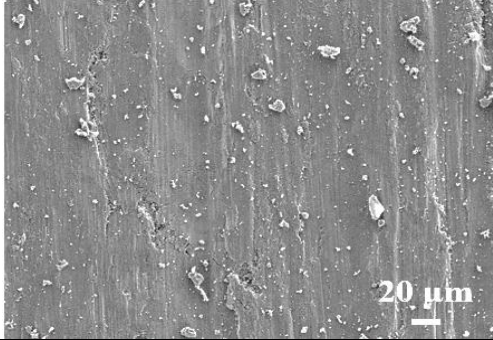
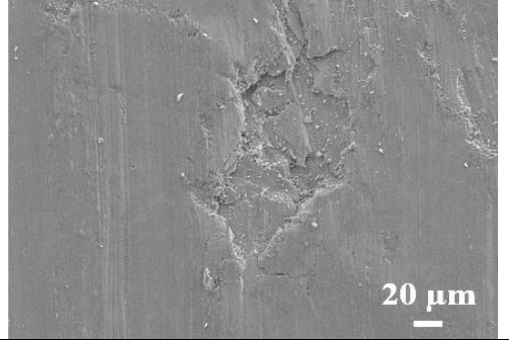
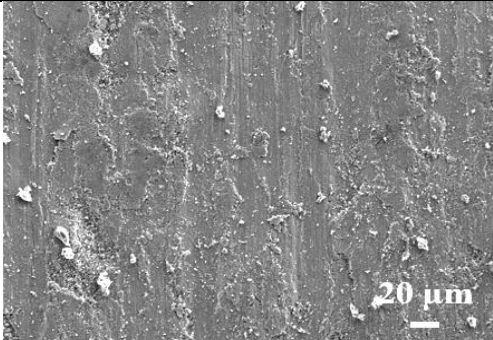
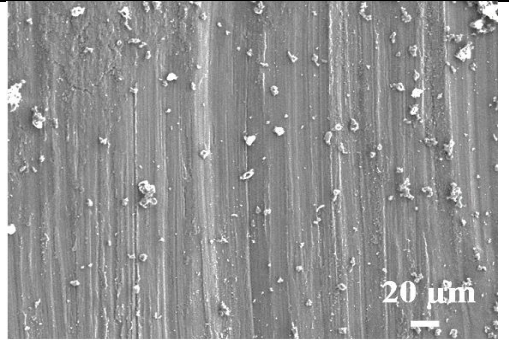
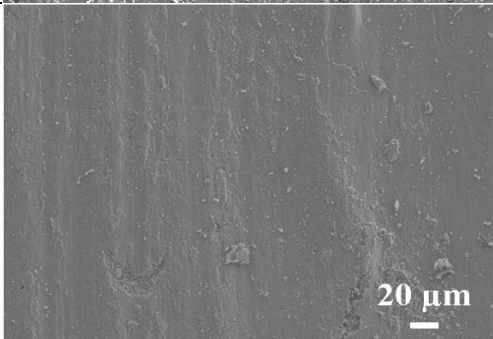
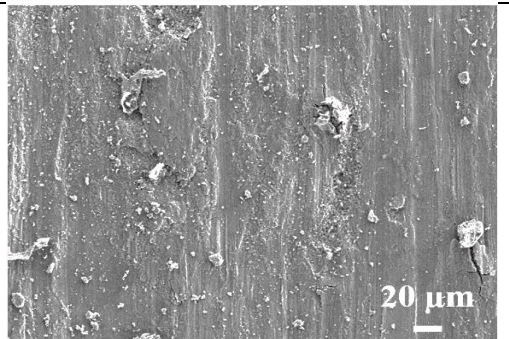
aşınma mekanizmasının hakim olduğu görülmektedir. Takviye oranı arttıkça aşınma hasarı azalmakta ve özellikle 10 Y takviyeli numunede her iki yük için de çok daha az aşınmış yüzeylerin varlığı görülmektedir.

Çizelge 6.7. Mg ve Mg-C serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması.

	5N	20N
Mg		
Mg/5C		
Mg/10C		
Mg/15C		

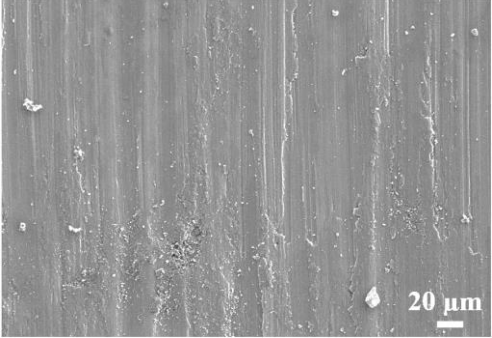
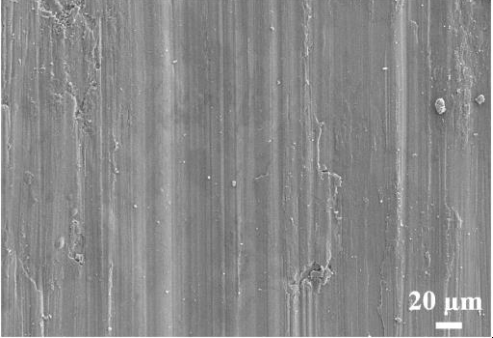
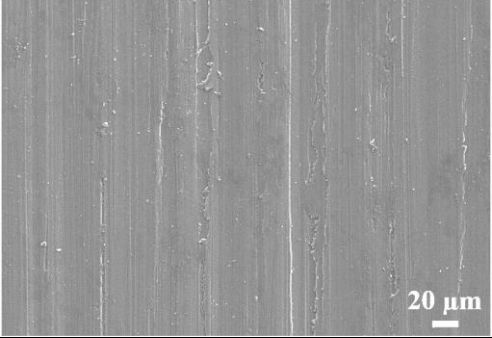
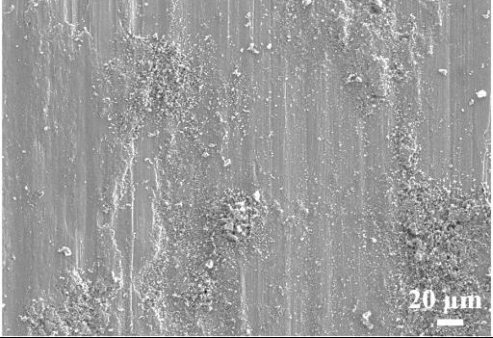
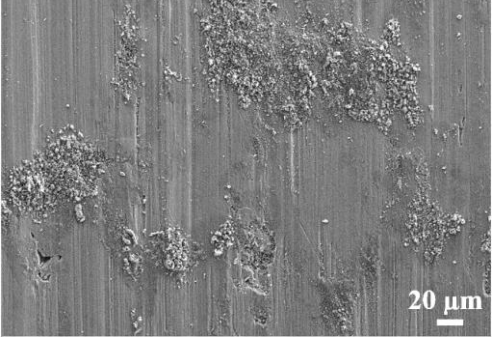
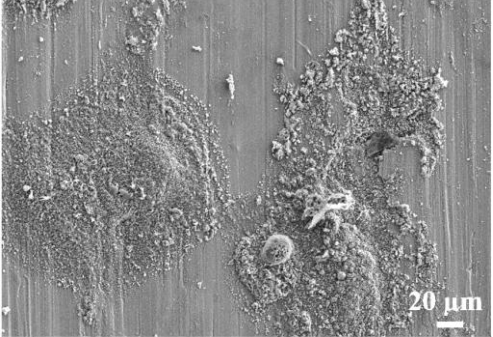
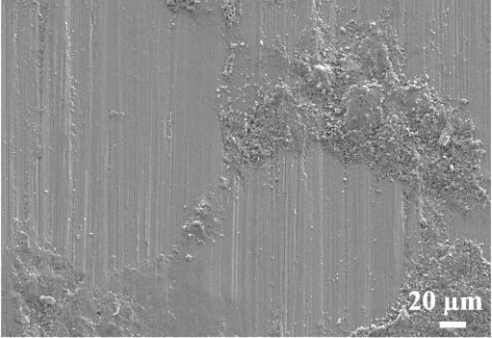
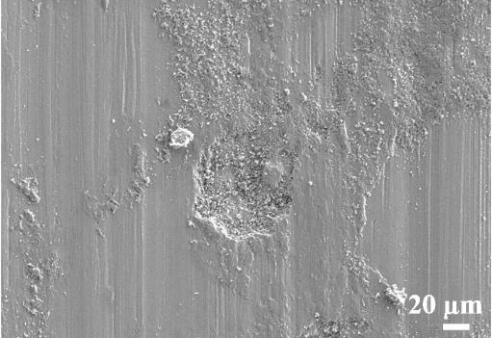


Çizelge 6.8. Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması.

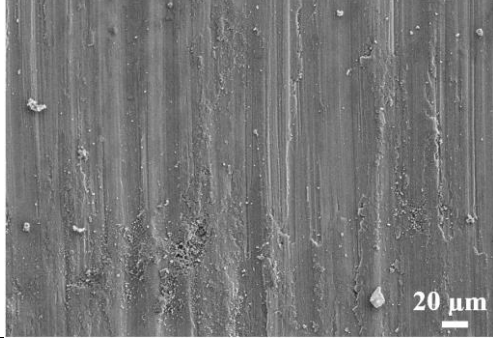
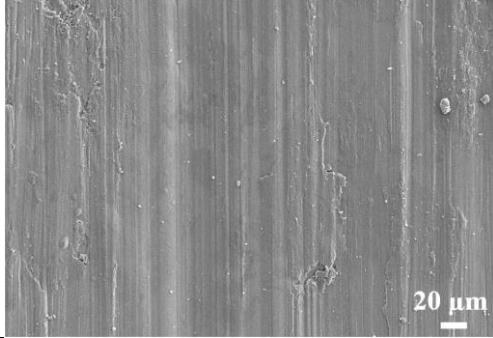
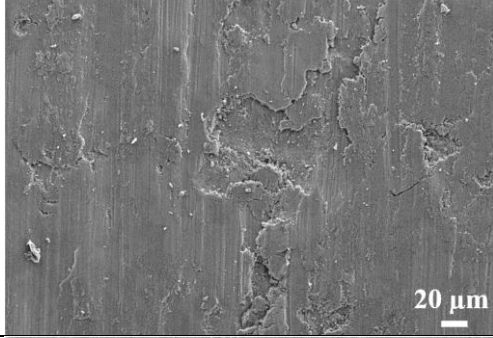
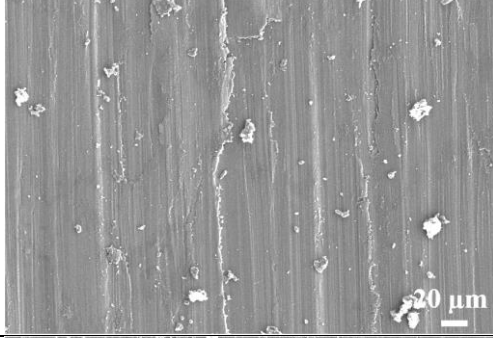
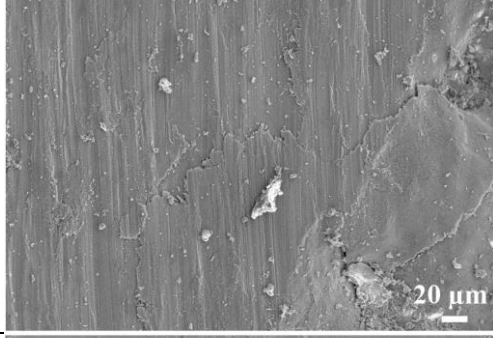
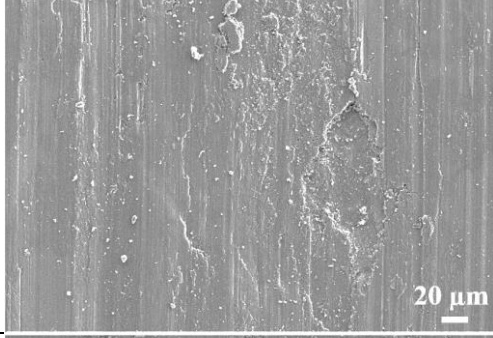
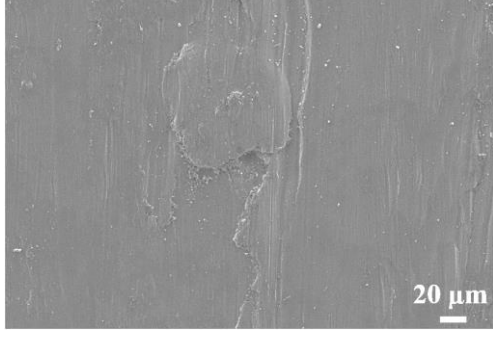
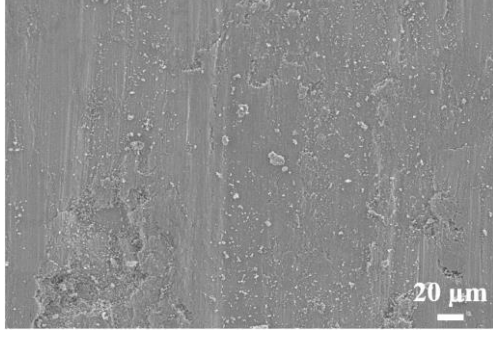
	5N	20N
Mg		
Mg/2,5Y		
Mg/5Y		
Mg/10Y		



Çizelge 6.9. AZ91 ve AZ91-C serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması.

	5N	20N
AZ91		
AZ91/5C		
AZ91/10C		
AZ91/15C		

Çizelge 6.10. AZ91 ve AZ91-Y serisi kompozitlerinin aşınma SEM görüntülerinin karşılaştırılması.

	5N	20N
AZ91		
AZ91/2,5Y		
AZ91/5Y		
AZ91/10Y		

## 6.5. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

Üretilen numunelerin korozyon performanslarının belirlenmesi amacıyla potansiyodinamik polarizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.17- 6.20’de numunelerin polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerden, korozyon potansiyeli, korozyon akımı gibi değerler elde edilmiştir. Polarizasyon eğrilerinde ifade edilen korozyon akımı değerlerine göre aşağıdaki formül kullanılarak numunelerin korozyon hızları hesaplanmıştır [62].

$$\text{Korozyon hızı} \left( \frac{\text{mm}}{\text{yıl}} \right) = \frac{k_1 \times i_{\text{cor}} \times EW}{d \times SA} \quad (6.1)$$

Bu formülde,

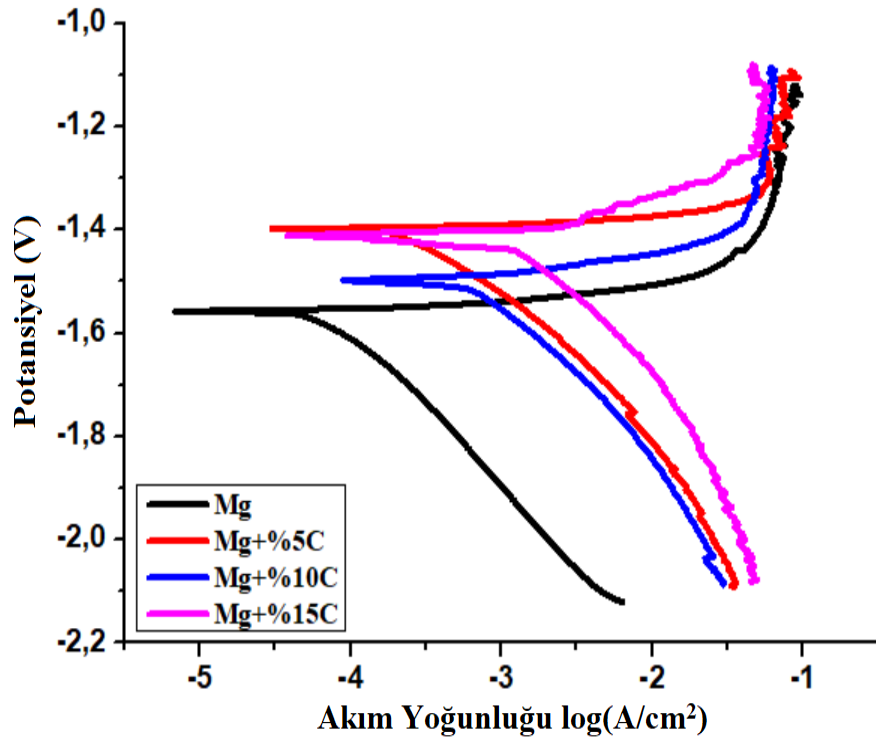
$k_1$  :  $3.27 \times 10^{-3}$ ,

$i_{\text{cor}}$  : korozyon akımı

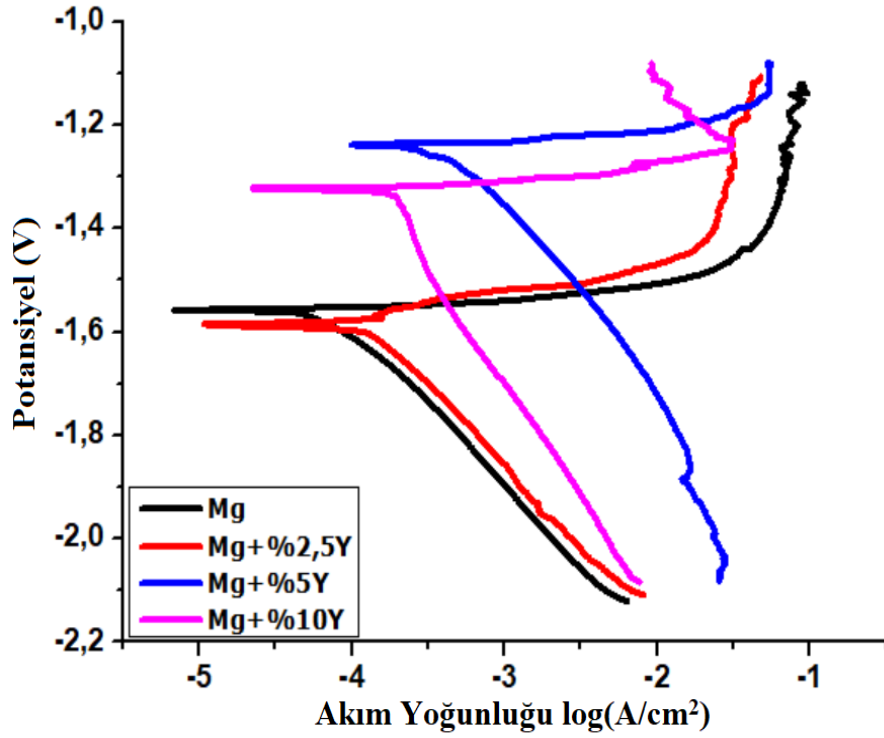
EW : ekivalent ağırlık,

d : yoğunluk,

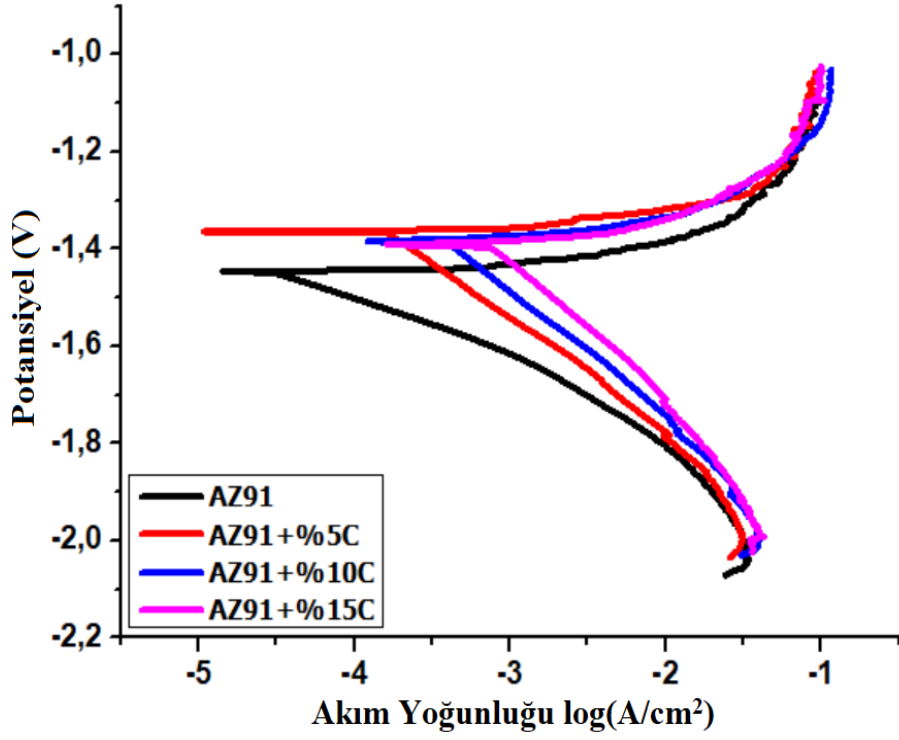
SA : numune yüzey alanını ifade etmektedir.



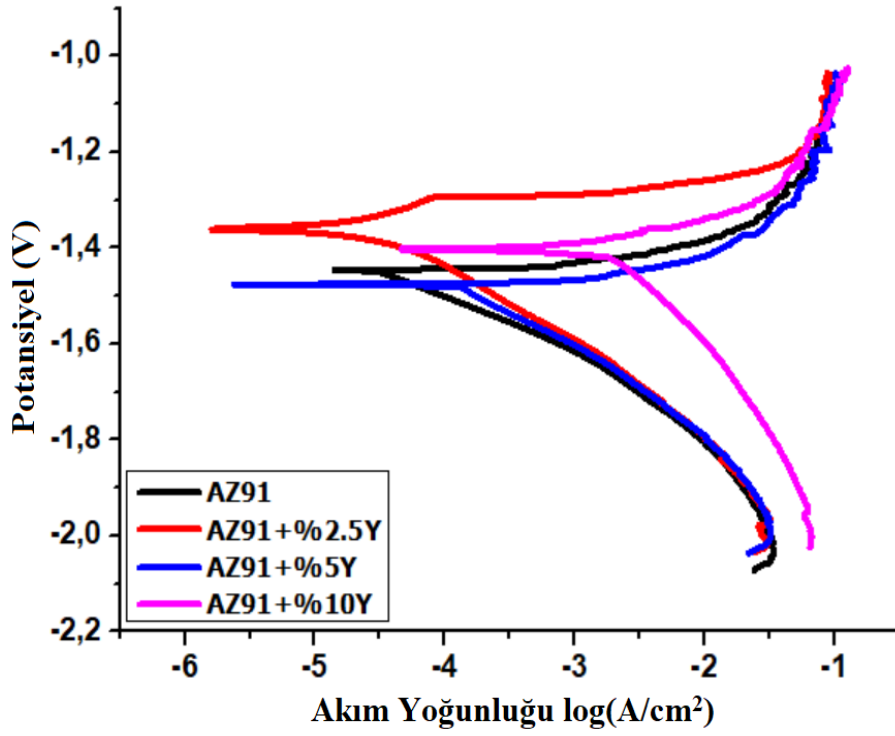
Şekil 6.17. Mg-C serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri.



Şekil 6.18. Mg-Y serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri.



Şekil 6.19. AZ91-C serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri.



Şekil 6.20. AZ91-Y serisi kompozitlerin polarizasyon eğrileri.

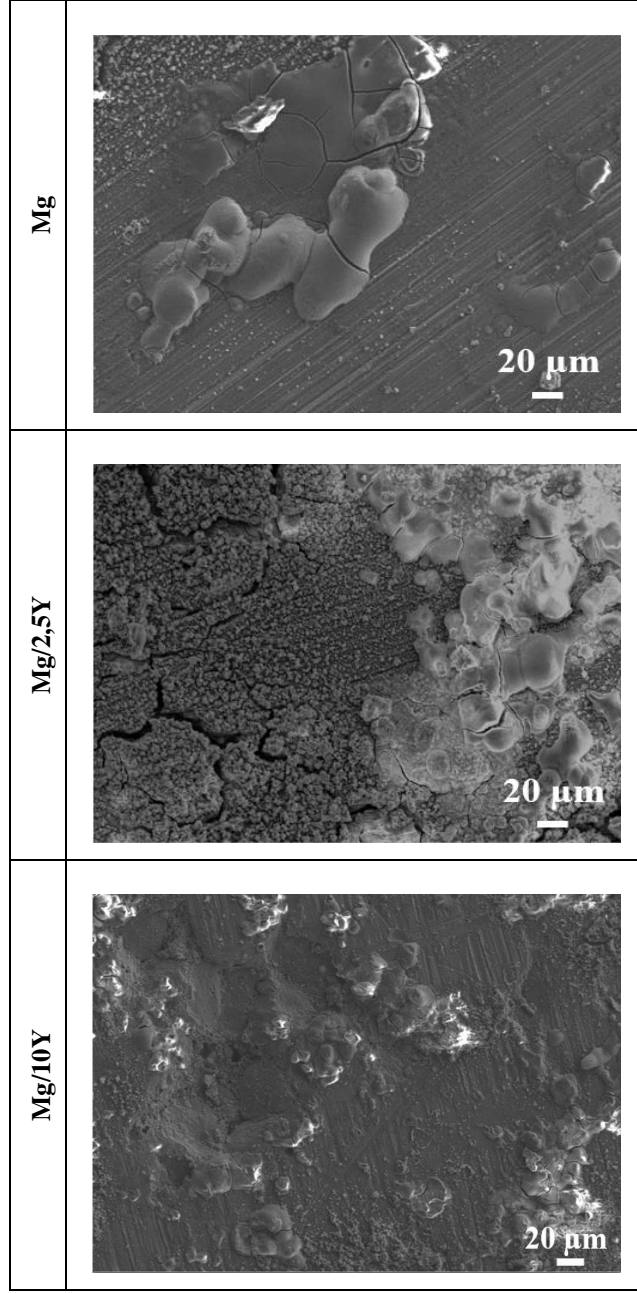
Çizelge 6.11’de numunelerin korozyon akımı, korozyon potansiyeli ve korozyon hızı değerleri verilmiştir. Çizelge genel olarak incelendiğinde, en düşük korozyon hızları takviye ilavesi saf Mg ve AZ91 numunelerinde elde edilmiştir. Bu numunelerin korozyon hızları sırasıyla 2 ve 1.4 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kompozit malzemelerin korozyon hızlarının takviye edilmemiş Mg ve AZ91 numunelerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca artan takviye oranıyla genel olarak korozyon hızının da önemli oranda arttığı görülmektedir. Korozyon hızının artması, korozyona olan direncin azalması anlamına gelmektedir [63-65]. Takviye elemanının ilavesiyle korozyon hızının artması literatürde farklı şekillerde açıklanmıştır. Takviye elemanlarının varlığıyla matris takviye arayüzelerindeki hatalar, matrisin sürekliliğini bozmaktadır. Sonuç olarak, korozyon atağını arttıran seçimli korozyon bölgeleri oluşmakta ve korozyon hızı artmaktadır [66]. Literatürde, korozyon hızının intermetalik veya takviye elemanları gibi katodik empüritelerin varlığıyla arttığı rapor edilmiştir [67, 37]. Farklı elektrokimyasal potansiyele sahip oldukları için, takviye elemanları katot olarak davranmakta ve Mg matris anot olarak davranmaktadır. Bu elektrokimyasal farklılık mikrogalvanik hücrelerin oluşmasına neden olmakta ve matris ve takviye arasında galvanik reaksiyon olmaktadır [68]. Literatürde, takviye elemanı oranının artmasıyla korozyon hızının arttığı çalışmalar yer almaktadır [69, 70]. Yukarıda bahsedilen durumlara istisna olarak çizelgede Mg/Y serisinde farklı bir olay gözlenmiştir. Takviye elemanının %5 oranına kadar artmasıyla korozyon hızı artmış fakat, %10 takviye oranında korozyon hızı azalmıştır. Literatürde bu durum aynı takviyenin kullanıldığı bir çalışmada şöyle açıklanmıştır. Artan takviye oranıyla beraber takviye partiküllerinin tane sınırlarında yerleştiği ve elektron transferine bariyer olarak davrandığı rapor edilmiştir. Bu durum da korozyon reaksiyonlarının yavaşlamasına ve korozyon hızının azalmasına neden olmaktadır [49].

Çizelge 6.11. Kompozitlerin korozyon hızı ve korozyon akımı.

Numune	Korozyon potansiyeli (V)	Korozyon hızı (mm/yıl)	Korozyon akımı ( $\mu$ A)
Mg	-1.550	2,0	15,1
Mg/5C	-1.401	9,6	73,2
Mg/10C	-1.508	15,1	114,5
Mg/15C	-1.408	24,9	182,5
Mg/2,5Y	-1.587	3,5	26,7
Mg/5Y	-1.238	7,7	57,1
Mg/10Y	-1.325	2,7	20,6
AZ91	-1.445	1,4	11,6
AZ91/5C	-1.375	2,6	21,5
AZ91/10C	-1.408	7,2	58,2
AZ91/15C	-1.387	15,1	119,7
AZ91/2,5Y	-1.334	1,1	9,3
AZ91/5Y	-1.501	4,3	33,7
AZ91/10Y	-1.405	26,4	206,2

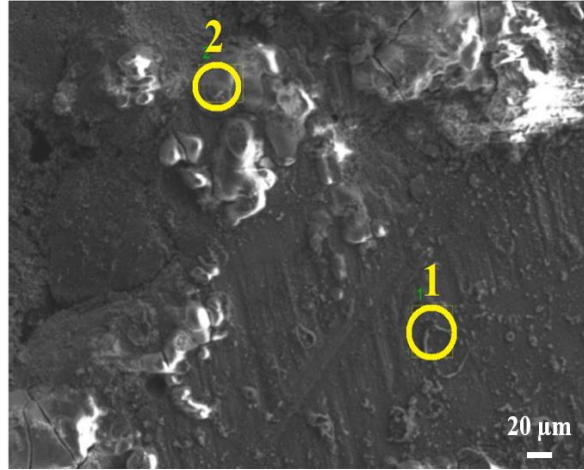
## 6.6. KOROZYON TESTİ SONRASI YÜZEY İNCELEMELERİ

Korozyon testi sonrasında kompozitlerin yüzeyleri SEM cihazı ile görüntülenmiştir. Şekil 6.21’de saf Mg ve Mg-Y serisi kompozitlerine ait görüntüler verilmiştir. Korozyon resimlerinde yerel korozyon atakları görülmektedir. Ayrıca, numune yüzeylerinde korozyon sonrası çatlaklar görülmektedir. Bu çatlakların oluşumu yüzeydeki suyun tükenmesiyle ilişkilendirilmektedir. Hidroksit tabakasının büzülmesiyle yüzeyde korozyon ürünleri oluşmaktadır [49]. Görüntüler incelendiğinde, 2.5Y takviyesine ait numunenin saf Mg’a göre daha fazla korozyona uğradığı, 10 Y takviyede yüzeyde oluşan korozyonda azalma görülmektedir. Ayrıca, takviye ilavesiyle korozif ürün ve çatlakların boyutlarında artış yaşanmıştır. Mg/10Y kompoziti için şekil 6.22’de gösterilen alanlardan EDX ölçümü yapılmıştır, ölçüm sonuçları çizelge 6.12’de gösterilmiştir. EDX sonuçları incelendiğinde yüksek miktarda Mg ve O ‘nin varlığı tespit edilmiştir. Bu sonuç yüzeyde MgO oluşumunu göstermektedir. Ayrıca 1 numunesinden alınan sonuçlara göre, Mg, O ve Cl’un varlığı görülmektedir. Bu sonuç yüzeyde, Mg klorür ve Mg oksiklorür oluşumunu desteklemektedir [70].



Şekil 6.21. Saf Mg, Mg/2,5Y, Mg/10Y kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.



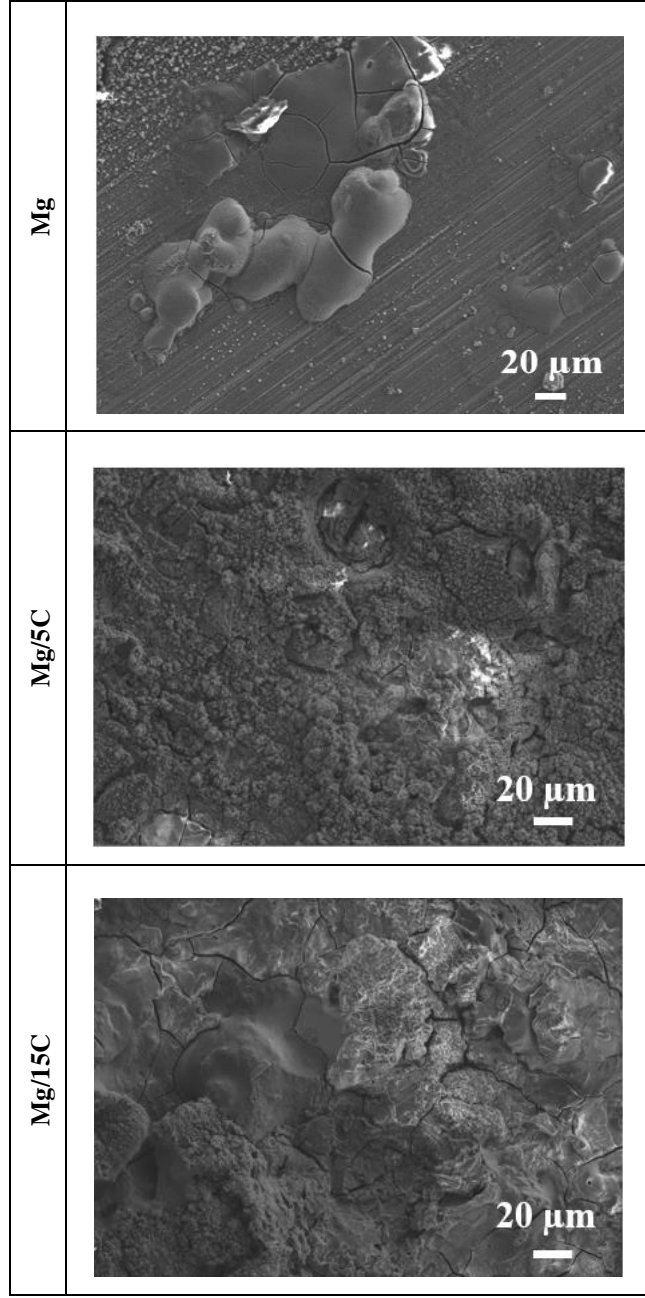


Şekil 6.22. Mg/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.

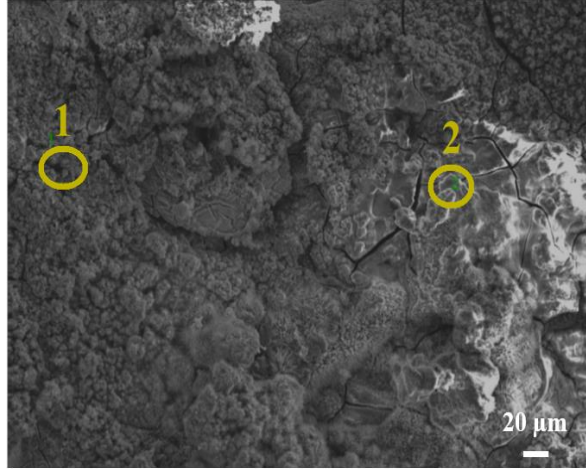
Çizelge 6.12. Mg/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.

Ölçüm (%)	C	O	Mg	Cl	Ca
1	5,9	59,3	28,9	5,1	0,1
2	4,7	53,4	40,9	-	0,8

Şekil 6.23’de saf Mg ve Mg-C serisine ait kompozitlerin korozyon sonrası yüzey incelemeleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde takviye ilavesiyle korozif ürünün ve yüzey çatlaklarının arttığı görülmektedir. Mg/5C kompozitinden şekil 6.23’de gösterilen bölgelerden alınan EDX ölçümleri Çizelge 6.13’de verilmiştir. EDX sonuçları incelendiğinde yapıda yüksek oranda Mg ve O, düşük oranda Cl varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.23. Saf Mg ve Mg/5C, Mg/15C kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.

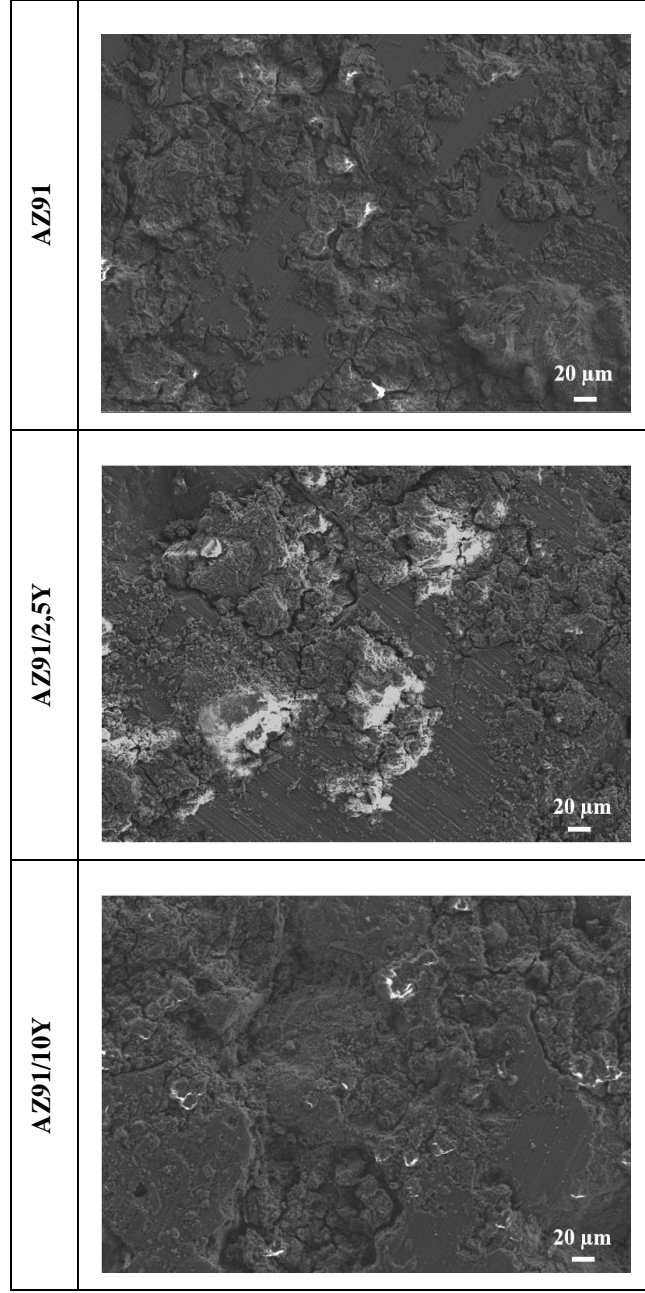


Şekil 6.24. Mg/15C kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.

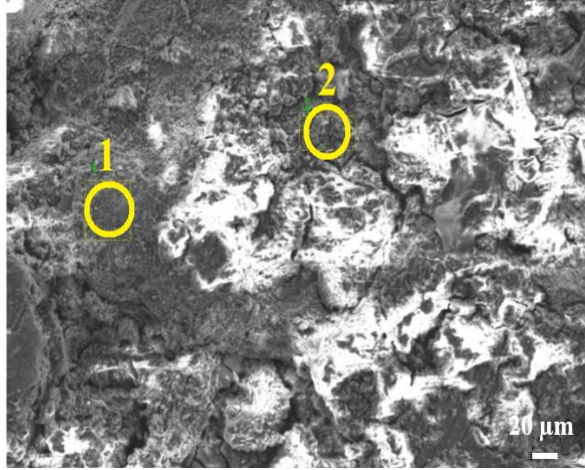
Çizelge 6.13. Mg/5C kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.

Ölçüm (%)	O	Mg	Si	Cl
1	60,43	33,88	0,06	5,63
2	64,38	32,76	0,04	2,82

Şekil 6.25'teki AZ91 alaşımını ve AZ91/Y serisine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde korozif ürün ve derinleşmiş çatlakların takviye oranıyla orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Görüntülere bakılarak Y takviye elemanının AZ91 alaşımının korozyon direncini olumsuz etkilediği söylenebilir. Şekil 6.26'da gösterilen bölgelerden alınan EDX ölçümleri alınmış ve çizelge 6.14'te ölçüm sonuçları verilmiştir. Çatlak ve korozif ürün bulunan bölgelerde Y takviyesi içeriğindeki Ca, C ve O elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca, her iki analizde de yüksek Mg ve O içeriği tespit edilmiştir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde, potansiyodinamik ölçümünün sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.25. AZ91 alaşımı ve AZ91/2,5Y, AZ91/10Y kompozitlerinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.

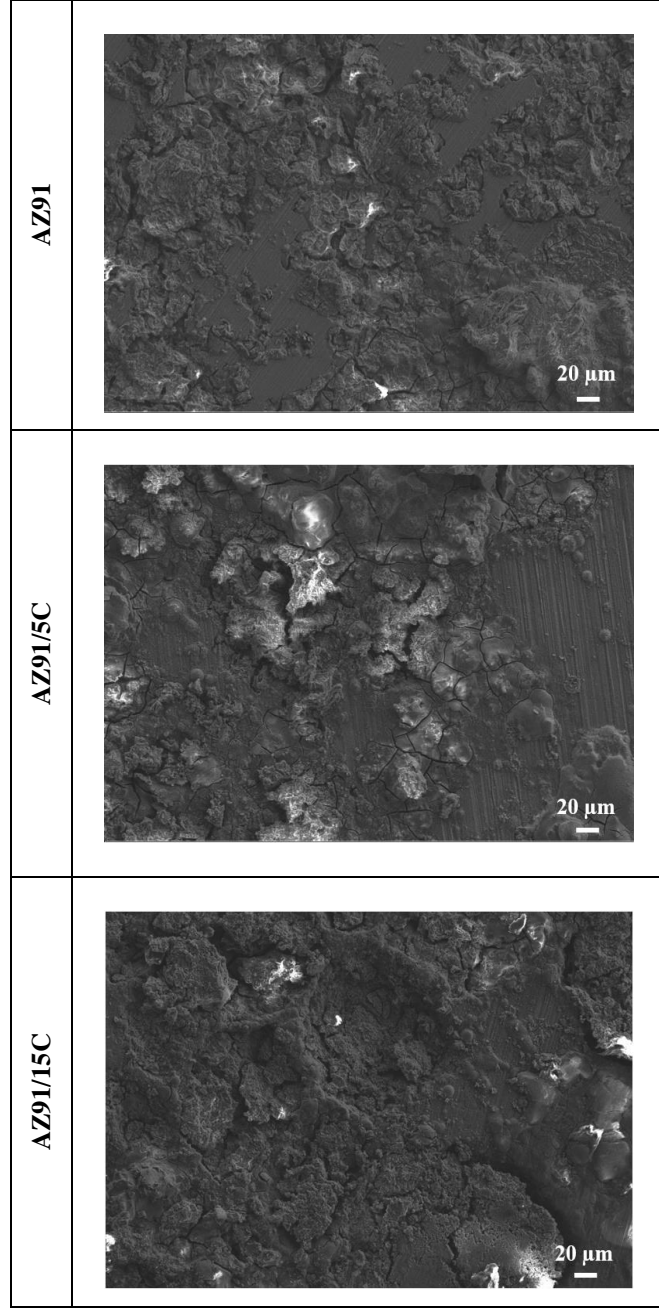


Şekil 6.26. AZ91/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.

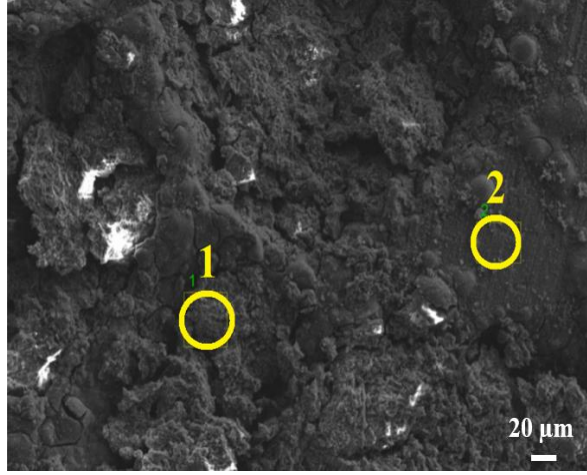
Çizelge 6.14. AZ91/10Y kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.

Ölçüm	C	O	Mg	Al	Cl	Ca	Zn
1	10,94	44,29	29,18	1,29	1,1	11,66	0,92
2	4,99	60,56	23,81	6,49	0,25	1,57	2,34

Şekil 6.27’de gösterilen AZ91 alaşımı ve AZ91/C serisi kompozitlerine ait görüntülerde de diğer kompozit serilerinde olduğu gibi takviye oranının artmasıyla çatlak ve korozif ürün oluşumu artmıştır. Şekil 6.28’de AZ91/15C kompoziti üzerinde EDX ölçümü yapılan bölgeler gösterilmiştir. EDX ölçüm sonuçları çizelge 6.15’te verilmiştir. Her iki bölgenin analiz sonucuna göre yapıda yüksek oranda Mg ve O tespit edilmiştir.



Şekil 6.27. AZ91 alaşımı ve AZ91/5C, AZ91/15C kompozitinin korozyon testi sonrası SEM görüntüleri.



Şekil 6.28. AZ91/15C kompozitinin korozyon sonrası EDX analizi.

Çizelge 6.15. AZ91/15C kompozitinin korozyon sonrası EDX ölçümleri.

Ölçüm	O	Mg	Al	Si	Cl	Zn
1	57,24	27,35	9,13	0	3,3	2,68
2	47,86	27,11	1,83	11,1	0,46	11,64

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada Mg ve AZ91 matrisli, yumurta kabuğu ve cam tozu takviyeli kompozitler sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Yumurta kabuğu takviyeli kompozitler için takviye oranları %2.5, %5, %10 ve cam tozu takviyeli kompozitler için %5, %10, %15 oranları kullanılmıştır. Üretilen tüm numuneler mikroyapı karakterizasyonu, sertlik ölçümü, yoğunluk testi, potansiyodinamik korozyon testi, aşınma testi ve SEM incelemesine tabi tutulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda;

1. Takviye elemanının artmasıyla beraber numunelerin sertlikleri önemli oranda artmıştır. Yoğunluk incelemelerinde takviye oranının artmasıyla relatif yoğunluğun azaldığı hesaplanmıştır.
2. Mikroyapı incelemelerinde, genel olarak takviye partiküllerinin homojen dağılımı gözlenmekte fakat takviye oranının artmasıyla beraber kısmi aglomerasyonlar görülmektedir.
3. Üretilen numunelerin aşınma hızları takviye oranının artmasıyla azalmıştır. Aşınmış yüzey incelemeleri sonrasında genel mekanizmaların, abrasif ve delaminasyon olduğu görülmüştür. Kompozit malzemelerdeki aşınmış yüzeylerin daha az hasara uğradığı da gözlenmiştir.
4. Korozyon direnci genel olarak kompozit malzemelerde, takviye oranının artmasıyla mikro galvanik etki nedeniyle düşüş göstermiştir. Korozyon yüzey incelemeleri sonrasında takviye oranının artmasıyla yüzeyde oluşan çatlakların ve korozyon ürünlerinin arttığı görülmüştür.



5. Bu çalışma sonunda, sıcak presleme yöntemiyle düşük maliyetli Mg matrisli kompozit malzemelerin üretilebileceği anlaşılmıştır. Üretilen bu kompozitlerin aşınma uygulamalarında kullanılması önerilmektedir. Bununla beraber, numunelerin korozif ortamlarda kullanılması önerilmemektedir.

## KAYNAKLAR

1. Öztürk, F., Kaçar, İ. "Magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi", *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12-20 (2016).
2. Handbook, "ASM Speciality. "Magnesium and magnesium alloys." *ASM international*, 6-8 (1999).
3. Kainer K. U., GL Darmstadt , "Magnesium-alloys and technologies", *Wiley-Vch*, , 2-12 (2003).
4. Gupta M. and Sharon N. M. L, "Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites", *John Wiley & Sons Inc.*, 4-11, 13-36, (2011).
5. B. L. Mordike and T. Ebert, "Magnesium properties - applications – potential", *Materials Science and Engineering A*, 37-45 (2001).
6. I. J. Polmear, "Magnesium alloys and applications", *Materials Science and Technology*, 10,1-16 (1994).
7. D. S. Kumar, C. T. Sasanka, K. Ravindra and K. Suman, "Magnesium and Its alloys in automotive applications", *American Journal of Materials Science and Technology*, 15-25 (2015).
8. G.S.Cole and A.M.Sherman, "Light weight materials for automotive applications", *Materials Characterization*,34 (1), 3-9 (1995).
9. H. Friedrich and S. Schumann, "Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry", *Research for a "New age of magnesium" in the automotive industry*, 276-281 (2001).
10. G. Arruebarrena, I. Hurtado, J. Väinölä, C. Cingi, S. Dévényi, J. Townsend, S. Mahmood, A. Wendt, K. Weiss ve A. Ben-Dov, "Development of investment-casting process of Mg-alloys for aerospace applications", *Advanced Engineering Materials*, 9 (9), 751-756 (2007).
11. B. Landkof, "Magnesium applications in aerospace and electronic industries", *Magnesium Alloys and their Applications*, 11, 50-62 (2000).
12. E. Hombergsmeier ve A. Fein, "Development of New Magnesium Forming", *Sixth European Aeronautics Days*, Madrid (2011).

13. M. Yıldırım, “Mekanik alaşımlama yöntemi ile AA7075-karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 15-32 (2016).
14. A. Mortensen ve J. Llorca, “Metal Matrix Composites”, *Annual Review of Materials Research*, 40 (1), 243-270 (2010).
15. P. Şanlı, “Farklı oranlardaki takviye elemanlarıyla katkılanmış metal matrisli kompozit malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 32-50 (2019).
16. G. Sezen, “Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesinin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 6-14 (2018).
17. S. Suresh, A. Montensen and A. Needleman, “Fundamentals of metal-matrix composites”, Montvale, *Butterworth-Heinemann*, 3-22 (1993).
18. T. Yue ve M. Chadwick, “Squeeze casting of light alloys and their composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 302-307 (1996).
19. O. Okur, “Patrikül takviyeli AA2014 metal matrisli kompozit malzemenin infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 6-22 (2016).
20. J. Hashim, L. Looney and M. Hashmi, “Particle distribution in cast metal matrix composites Part I,”, *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (2), 251-257 (2002).
21. M. D, S. Leucadia, D. Schuster and L. Jolla, "Skibo et al. 54", *United States of America Patent: 5,167,920*, (1992).
22. R., Pradeep. "Cast aluminum-matrix composites for automotive applications." *Journal of Materials*, 43.4, 10-15 (1991).
23. E. Klier, A. Mortensen and J. Cornie, “Fabrication of cast particle-reinforced metals via pressure infiltration”, *Journal of Materials Science*, 26 (9), 2519-2526 (1991).
24. A. Cook ve P. Werner, “Pressure infiltration casting of metal matrix composites,”, *Materials Science and Engineering A*, 44 (1-2), 189-206 (1991).
25. J. E. Flinn, J. V. Burch and J. W. Sears, “Spray casting of metallic preforms” *A.B.D. Patent: US6135194A*, (1996).

26. S. Annavarapu, D. Apelian and A. Lawley, "Spray casting of steel strip: process analysis", *Metallurgical transactions. A, Physical metallurgy and materials science*, 21 (12), 3237-3256 (1990).
27. Chawla, Krishan K. "Composite materials: science and engineering." *Springer Science & Business Media*, (2012).
28. A. Erçetin, "Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen magnezyum kompozitlerin karakterizasyonu ve mikro işlenebilirliği", Doktora tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 6-36 (2019).
29. Dewidar, M. Marasy, Ho-Chel Yoon, and J. K. Lim, "Mechanical properties of metals for biomedical applications using powder metallurgy process: a review." *Metals and Materials International*, 12(3) , 193-206 (2006).
30. F. Aydın, Y. Sun and M. E. Turan, "The effect of TiB<sub>2</sub> content on wear and mechanical behavior of AZ91 magnesium matrix composites produced by powder metallurgy", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57, 564-572 (2019).
31. H. Al-Qureshi, A. Galiotto and A. Klein, "On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy", *Journal of Materials Processing Technology*, 166 (1), 135-143 (2005).
32. M. A. Mark, L. Allen<sup>1</sup>, A. A. T. Mattila, K. Ojanperä, M. Suhonen ve H. Seppä, "Electrical sintering of nanoparticle structures", *Institute of Physics Science*, 9 (17), 175-201 (2008).
33. R. M. German., "Sintering theory and practice", *Wiley-VCH*, 482 (1996).
34. R. M., Aikin "The mechanical properties of in-situ composites." *Journal of Materials*, 49.8, 35-39 (1997).
35. H. Z. Ye and X. Y. Liu, "Review of recent studies in magnesium matrix composites", *Journal of Materials Science*, 39 (20), 6153-6171 (2004).
36. P. R. Rajkumar, C. Kailasanathan, A. Senthilkumar, N. Selvakumar, A. J. Rajan " Study on formability and strain hardening index: influence of particle size of boron carbide (B<sub>4</sub>C) in magnesium matrix composites fabricated by powder metallurgy technique." *Materials Research Express*, 7(1), 1-15 (2020).
37. Y. Güneş, E. Çevik, Y. Türen, "GNP'lerin ve B<sub>4</sub>C takviyelerinin toz metalürjisi ile üretilen magnezyum matrisli kompozitin mekanik, termal ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi.", *Kompozit Malzemeler Dergisi*, 114-200 (2021).
38. F. Mohammed, and B. Bavanish, "Tribological behavior of AZ91D magnesium alloy composite: effect of hybrid WC-SiO<sub>2</sub> nanoparticles.", *Industrial Lubrication and Tribology*, 789-793 (2021).

39. F. Aydın and Y. Sun., "Microstructure and wear of a sintered composite with a magnesium alloy AZ91 matrix reinforced with ZrO<sub>2</sub> particles." *Metal Science and Heat Treatment*, 61(5), 325-329 (2019).
40. Aydın, F., Sun, Y., Ahlatçı, H., and Türen, Y., "Investigation of microstructure, mechanical and wear behaviour of B 4 C particulate reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(4), 873-882 (2018).
41. A. Erçetin and D. Y. Pimenov. "Microstructure, Mechanical, and Corrosion Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Mg<sub>2</sub>Zn Matrix Magnesium Composites." *Materials*, 14(17), 4819 (2021).
42. Aydın, Fatih, and M. Emre Turan., "The effect of Boron Nitride on tribological behavior of Mg matrix composite at room and elevated temperatures", *Journal of Tribology*, 142(1) (2020).
43. Ponhan, K., Tassenberg, K., Weston, D., Nicholls, K. G., and Thornton, R. "Effect of SiC nanoparticle content and milling time on the microstructural characteristics and properties of Mg-SiC nanocomposites synthesized with powder metallurgy incorporating high-energy ball milling." *Ceramics International*, 46(7), 26956-26959 (2020).
44. Sadooghi, A., and K. Rahmani. "Experimental study on mechanical and tribology behaviors of Mg-SiC nano/micro composite produced by friction stir process." *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(3), 1121-1127 (2021).
45. Aydın, F., and Sun, Y. (2018). "Investigation of wear behaviour and microstructure of hot-pressed TiB<sub>2</sub> particulate-reinforced magnesium matrix composites.", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(4), 455-469 (2018).
46. G. Parande, V. Manakari, S. S. Koppa and M. Gupta, "Utilizing low-cost eggshell particles to enhance the mechanical response of Mg–2.5Zn magnesium alloy matrix", *Advanced Engineering Materials*, 20 (5), 1-9 (2018).
47. I. Dinaharan, S. Vettivel, M. Balakrishnan and E. T. Akinlabi, "Influence of processing route on microstructure and wear resistance of fly ash reinforced AZ31 magnesium matrix composites", *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(1), 155-165 (2019).
48. D. Rajamani, A. Tamilarasan, B. Esakki and K. Ananthakumar, "Synthesis and characterization of sintered AZ91D magnesium matrix composites reinforced with red mud particles", *Material Science Research India*, 95-100, (2016).
49. G. Parande, V. Manakari, S. S. Koppa and M. Gupta, "A study on the effect of low-cost eggshell reinforcement on the immersion, damping and mechanical properties of magnesium–zinc alloy", *Composites Part B: Engineering*, 118-119, (2020).

50. Wang H.Y., Jiang Q.C., Wang Y., Ma B.X., Zhao F. "Fabrication of TiB<sub>2</sub> particulate reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy" *Materials Letters*, 58: 3509–3513 (2004)
51. M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani, "The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite", *Materials & Design.*, 32(2), 1031-1038 (2011).
52. F. Aydin, "The investigation of the effect of particle size on wear performance of AA7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites using statistical analysis and different machine learning methods." *Advanced Powder Technology.*, 32 (2), 445-463 (2021).
53. Wong, W.L.E. Karthik, S. Gupta, M. "Development of high performance Mg–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in submicron length scale using microwave assisted rapid sintering" *Materials Science and Technology* 21(9), 1063-1070 (2005).
54. J.M. Mistrya, P.P. Gohil, "Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>p reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process", *Composites B Engineering.* 161, 190-204 (2019).
55. Aydin, F. "Investigation of Elevated Temperature Wear Behavior of Al 2024-BN Composites using Statistical Techniques." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 8560-8578, (2021).
56. Aydin, F., Sun, Y., and Turan, M. E. "Investigation of microstructure, mechanical and wear behaviour of B<sub>4</sub>C particulate reinforced AZ91 matrix composites by powder metallurgy." *Indian Journal of Chemical technology*, 26, 351-354, (2019).
57. Labib, F., H. M. Ghasemi, and R. Mahmudi. "Dry tribological behavior of Mg/SiCp composites at room and elevated temperatures." *Wear*, 348, 69-79 (2016).
58. Turan, M. E., Aydin, F., Sun, Y., Zengin, H., and Akinay, Y., "Wear resistance and tribological properties of GNPs and MWCNT reinforced AlSi18CuNiMg alloys produced by stir casting." *Tribology International*, 164, (2021).
59. Yang H, Liu Y, Zhang T, "Dry sliding tribological properties of a dendrite-reinforced Zr-based bulk metallic glass matrix composite." *Journal of Materials Science and Technology*, 30(6), 576-583 (2014).
60. F. Toptan, I. Kerti, L.A. Rocha, "Reciprocal dry sliding wear behaviour of B<sub>4</sub>Cp reinforced aluminium alloy matrix composites", *Wear*, 290-291 (2012).

61. Sun, Y., Cevik, E., Turen, Y., Ahlatci, H., Turan, M. E., Aydin, F., and Zengin, H., "Influence of GNPs and B4C reinforcements on mechanical, thermal and wear properties of magnesium matrix composite produced by powder metallurgy", *Journal of Composite Materials*, 55(26), 3881-3891 (2021).
62. A. Standard, "Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements", *Annu. Book ASTM Stand. ASTM Int. West Conshohocken PA*, 3 (2006).
63. Aydin, F., Erden, M. A. "The Investigation of Electrochemical Corrosion Behaviour of Fe Matrix Composites at Room and Elevated Temperatures." *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 418-427 (2021).
64. Erdil, M., & Aydin, F. Influence of graphene particles on the wear and corrosion performance of MAO produced AZ31 alloy. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 29(12), 998-1008 (2021).
65. Aydin, F., Ayday, A., Turan, M. E., & Zengin, H. (2020). Role of graphene additive on wear and electrochemical corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on Mg–MWCNT nanocomposite. *Surface Engineering*, 36(8), 791-799.
66. Pardo A, Merino S, Merino MC., "Corrosion behaviour of silicon–carbide-particle reinforced AZ92 magnesium alloy", *Corros Science*, 51(4), 841-849 (2009).
67. Esmaily M, Mortazavi N, Svensson JE., "On the microstructure and corrosion behavior of AZ91/SiC composites produced by rheocasting." *Materials Chemistry and Physics*, 180, 29-37 (2016).
68. Falcon LA, Bedolla E, Lemus J., "Corrosion behavior of Mg-Al/TiC composites in NaCl solution." *International Journal of Corrosion*, 2011, 1-7 (2011).
69. Aydin, F., Sun, Y., and Emre Turan, M., "Influence of TiC content on mechanical, wear and corrosion properties of hot-pressed AZ91/TiC composites.", *Journal of Composite Materials*, 54(2), 141-152 (2020).
70. Tiwari, S., Balasubramaniam, R., and Gupta, M. "Corrosion behavior of SiC reinforced magnesium composites." *Corrosion science*, 49(2), 711-725 (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

Süleyman DEMİRDAL, ilk ve orta öğrenimini Turgutlu'da tamamladı. 2012 yılında Turgutlu Anadolu Teknik Lisesi Bilişim Teknolojileri Bölümünde mezun oldu. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Lisans programına başladı, 2014 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesine yatay geçiş yaparak 2018 yılında mezun olmuştur. Lisans sürecinde BMC Savunma, Sarten Ambalaj, Özkan Demir Çelik A.Ş. ve Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Araştırma Merkezinde stajlarını tamamlamıştır. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına kayıt olmuştur halen öğrenimine devam etmektedir.