

**Mg<sub>2</sub>Si PARTİKÜL TAKVİYELİ Mg ALAŞIMLARININ  
AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Bünyamin ÇİÇEK**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği  
Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2011**

Bünyamin ÇİÇEK tarafından hazırlanan “ Mg<sub>2</sub>Si PARTİKÜL TAKVİYELİ Mg ALAŞIMLARININ AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN .....

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24 / 06 / 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ) .....

...../...../2011

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN .....

Fen Bilimleri 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.”*

Bünyamin ÇİÇEK

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## Mg<sub>2</sub>Si PARTİKÜL TAKVİYELİ Mg ALAŞIMLARININ AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bünyamin ÇİÇEK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN

Haziran 2011, 90 sayfa

Yapılan tez çalışmasında, Mg matrisine % 10 oranında (daha önce hazırlanmış) Al<sub>12</sub>Si ingot alaşımı ilave edilerek yerinde döküm yöntemiyle standart dışı bir Mg kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde Mg ve Si elementleri bileşik oluşturarak Mg<sub>2</sub>Si partiküllerini meydana getirmiştir. Meydana gelen Mg<sub>2</sub>Si partikül takviyeli kompozit malzemeler tekrar döküm işlemine hazırlanarak döküme farklı oranlarda Pb ilavesi yapılmıştır. Kompozit malzemelerde yapılan mikroyapı incelemeleri Pb ilavesi sonucu Mg<sub>2</sub>Si partiküllerinin yapısındaki ve oranındaki değişim gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerde oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik fazında da artan Pb oranıyla hacim değişiklikleri mevcuttur. Kompozit malzemelerden alınan sertlik değerlerinde (HV) ise Pb ilavesiz malzemelerde sertlik seviyesi diğer Mg alaşımlarına nazaran daha yüksek seviyelerdedir. Ancak Pb elementinin Mg matris içerisinde iyi derecede çözünmesiyle sertlik değeri artan Pb ilavesiyle bir miktar düşüş göstermiştir. Pb ilavesiz ve üç farklı oranda (% 0.2, % 0.5 ve % 1) Pb ilavesiyle oluşturulan kompozit malzemeler korozyon ve aşınma

deneylerine tabi tutulmuştur. Korozyon deneylerinde artan Pb ilavesiyle korozyon direnci de artmıştır. Malzemelerin Pb ilavesiyle korozif ortamlarda daha uzun sürelerle kullanılabilceği tespit edilmiştir. Ancak artan Pb ilavesi sonucunda aşınma direncinde ise kabul edilir bir artış meydana gelmemiştir. Aşınma deneyi sonuçları; yapıda bulunan partikül hacim oranının azalmasıyla kompozitlerin aşınma direncinin de azaldığını göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler :** Mg<sub>2</sub>Si, kompozit malzeme, aşınma, korozyon.

**Bilim Kodu :** 915.1.193

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Mg<sub>2</sub>Si PARTICLE REINFORCED Mg ALLOYS INVESTIGATION OF WEAR AND CORROSION PROPERTIES**

**Bünyamin ÇİÇEK**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department Of Metallurgy And Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Yavuz SUN**

**June 2011, 90 pages**

In this study non-standard Mg alloy was produced by in-stu casting method with the addition of weighty %10 Al<sub>12</sub>Si (prepared previously) ingot alloys to Mg matrix. Mg and Si elements generated Mg<sub>2</sub>Si particles in the produced material. Generated Mg<sub>2</sub>Si particle reinforced composite materials prepared for re-casting and Pb added at variety proportions. Particular structural changes and ratios of Mg<sub>2</sub>Si related to Pb addition observed by the micro structural analyses. In addition volumetric changes occur at Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetallic phase with the rising Pb ratios. Related to the hardness value (HV) of composite materials hardness of materials without Pb addition higher than the other mg alloys. However hardness value slightly decreased with the increase of Pb addition due to good level of Pb elements dissolution in the Mg matrix. Produced composite materials without a Pb addition and with the Pb addition at three different values (%0.2, %0.5, %1) subjected to corrosion and wear tests. Corrosion resistant increased with the increased Pb addition related to corrosion tests. There is detected that materials can be use for a longer time period at

the corrosive media with the Pb addition. However, there is not acceptable increasement occur at wear resistant values with the increased Pb addition. Results of wear tests showed that, with the decreased particle volume ratio in the structure wear resistant of composites decreased.

**Key Word** : Mg<sub>2</sub>Si, composite material, wear, corrosion.

**Science Code** : 915.1.193

## TEŞEKKÜR

Yapılan tez çalışmasının hazırlanması sırasında ve yüksek lisans eğitimim boyunca tarafıma daimi olarak katkı sağlayan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN' a; yaptığım bütün deney ve çalışmalarda engin bilgilerinden yararlandığım Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın hocam Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI' ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmalarımında maddi ve manevi olarak bana destek veren Arş. Gör. Engin ÇEVİK 'e ve Arş. Gör. Ali PALTA 'ya teşekkür eder; Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü tüm akademik personeline saygılar sunarım.

Ayrıca lisans eğitimi tez danışmanım Sürekli Eğitim Merkezi Müdürü Sayın Doç. Dr. Mustafa BOZ hocama da yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemediği için teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda Metal Eğitimi Bölümündeki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca minnet borçlu olduğum ve beni yetiştirmek için çaba gösteren, hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan saygıdeğer aileme şükranlarımla.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
Mg ve Mg ALAŞIMLARI .....	3
2.1. Mg METALİNİN KİMYASAL ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ .....	3
2.2. Mg ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI .....	5
2.3. Mg ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI .....	7
2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN Mg ALAŞIMLARINA ETKİSİ .....	10
2.4.1. Alüminyum.....	11
2.4.2. Kurşun.....	12
2.4.3. Çinko .....	13
2.4.4. Mangan.....	14
2.4.5. Kalay .....	14
2.4.6. Silisyum.....	13
2.4.7. Titanyum .....	14
2.4.8. Zirkonyum .....	14
2.4.9. Kalsiyum .....	15

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.4.10. Demir.....	15
2.4.11. Bakır.....	15
2.4.12. Yitriyum.....	15
2.4.13. Gümüş.....	15
2.4.14. Stronsiyum.....	16
2.4.15. Toryum.....	16
2.4.16. Toprak alkali elementleri.....	16
2.5. Mg-Al İKİLİ SİSTEMİ.....	16
2.5.1. Mg-Al-Si Alaşımları.....	17
2.5.2. Mg-Al-RE Alaşımları.....	18
BÖLÜM 3.....	19
AŞINMA.....	19
3.1. AŞINMA NEDİR?.....	19
3.1.1. Aşınmanın Temel Unsurları.....	20
3.1.2. Aşınma Mekanizmaları.....	21
3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	27
3.2.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	29
3.2.2. Kalınlık Farkı Metodu.....	30
3.2.3. İz Değişimi Metodu.....	30
3.2.4. Radyoizotop Metodu.....	30
BÖLÜM 4.....	31
KOROZYON.....	31
4.1. KOROZYON ÇEŞİTLERİ.....	34
4.1.1. Çukur Korozyonu.....	34
4.1.2. Galvanik Korozyon.....	35
4.1.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu.....	36
4.1.4. Kabuk Altı Korozyonu.....	36
4.1.5. Fili Form Korozyonu.....	37
4.1.6. Seçimli Korozyon.....	37

	<u>Sayfa</u>
4.1.7. Taneler Arası Korozyon .....	38
4.1.8. Gerilmeli Korozyon .....	38
4.1.9. Yorulmalı Korozyon .....	39
4.1.10. Erozyonlu Korozyon .....	39
4.2. KOROZYON HIZININ ÖLÇÜMÜ .....	40
4.2.1. Kütle Azalması Yöntemi .....	40
4.2.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi .....	41
4.2.3. Alternatif Akım Empedans Ölçme Yöntemi .....	42
4.2.4. Tafel Elektro-Polarizasyon Yöntemi .....	42
BÖLÜM 5 .....	46
LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	46
5.1. Mg ALAŞIMLARININ MİKROYAPI KARAKTERİSTİĞİ ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....	46
5.2. Mg ALAŞIMLARININ KOROZYON ÖZELLİKLERİ .....	49
5.3. Mg ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ .....	50
BÖLÜM 6 .....	52
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	52
6.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ .....	52
6.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI İNCELEMESİ .....	53
6.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN XRD İNCELEMESİ .....	54
6.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN SERTLİKLERİNİN İNCELENMESİ .....	55
6.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON DENEYLERİ .....	55
6.5.1. Ağırlık Kaybı Metodu ile Yapılan Deneyler .....	56
6.5.2. Potansiyodinamik Polarizasyon ile Yapılan Deneyler .....	57
6.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DENEYLERİ .....	60
BÖLÜM 7 .....	62
DENEYSEL SONUÇLAR .....	62
7.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN KİMYASAL ANALİZLERİ .....	62
7.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU .....	62

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLEŞENLERİNİN YAPI ANALİZ SONUÇLARI.....	64
7.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN GÖRÜNTÜ ANALİZ SONUÇLARI.....	66
7.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI.....	68
7.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI ....	69
7.6.1. Daldırma Yöntemiyle Yapılan Korozyon Deney Sonuçları.....	70
7.6.2. Tafel-Polarizasyon ile Yapılan Korozyon Deney Sonuçları .....	72
7.7. KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DENEY SONUÇLARI.....	74
BÖLÜM 8 .....	77
DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI .....	77
8.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	77
8.1.1. Kurşun Elementinin Mikro Yapıya Etkisi.....	78
8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	78
8.2.1. Kurşun Elementinin Korozyona Etkisi .....	79
8.3. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ .....	79
BÖLÜM 9 .....	81
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	90

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Mg metalinin 2009 yılındaki yıllık üretimi .....	4
Şekil 2.2. Otomobil üretiminde Mg alaşımlarından üretilebilecek alaşımlar ve kazanç değerleri .....	7
Şekil 2.3. AZ serisi alaşımlardan üretilmiş bazı döküm parçalar .....	8
Şekil 2.4. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler .....	9
Şekil 2.5. AE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu .....	9
Şekil 2.6. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları .....	10
Şekil 2.7. Mg-Al denge diyagramı .....	12
Şekil 2.8. Mg-Pb denge diyagramı .....	12
Şekil 2.9. Mg-Si denge diyagramı .....	13
Şekil 2.10. Si ilaveli Mg alaşımlarının genel mikro yapısı .....	17
Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi .....	20
Şekil 3.2. Adhesiv aşınma .....	22
Şekil 3.3. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri.....	23
Şekil 3.4. Abrasiv Aşınma.....	25
Şekil 3.5. Tribo oksidasyon aşınması .....	26
Şekil 3.6. Yorulma aşınması.....	27
Şekil 3.7. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi .....	28
Şekil 4.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar .....	33
Şekil 4.2. Çukur korozyon işleyiş şeması. ....	35
Şekil 4.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi .....	35
Şekil 4.4. Aralık korozyonunun şematik gösterimi .....	36
Şekil 4.5. Fili form korozyonun şematik gösterimi .....	37
Şekil 4.6. Seçimli korozyonun şematik gösterimi .....	37
Şekil 4.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge .....	38
Şekil 4.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi .....	38
Şekil 4.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi .....	39

Şekil 4.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi .....	40
Şekil 4.11. Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması .....	41
Şekil 5.1. Mg-5Si alaşımlarına farklı oranlarda Bi ilave ederek elde edilen optik mikroskop görüntüleri (a) % 0.2 Bi, (b) % 0.5 Bi, (c) % 0.8 Bi ve (d) 1% Bi .....	47
Şekil 5.2. a) AZ91 Alaşımı Korozyon Deneyi Öncesi Durumu, b) Alaşımın korozyon Deneyi Sonrası AZ91, c) AZ91+0,2 Ti, d) AZ91+0,3 Ti, e) AZ91+0,4 Ti ve f) AZ91+0,5 Ti .....	49
Şekil 5.3. Alaşımların aşındırıldığı deney düzenekleri .....	51
Şekil 6.1. Döküm Fırını Kesit ve Genel Görünümü .....	53
Şekil 6.2. Dökümün Yapıldığı Metalik Kalıbın Şematik Görünümü .....	53
Şekil 6.3. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik ışık mikroskobu. ....	54
Şekil 6.4. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrosertlik test cihazı. ....	55
Şekil 6.5. Numune temizleme işlemlerinde kullanılan BEB marka ultrasonik temizleme cihazı. ....	56
Şekil 6.6. Ağırlık kayıplarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka XS 220A model hassas terazi. ....	57
Şekil 6.7. Tafel-polarizasyon sistem düzeneği. ....	57
Şekil 6.8. Potansiyostat deneylerinde kullanılan numune örneği. ....	58
Şekil 6.9. Potansiyodinamik korozyon deney hücresi. ....	59
Şekil 6.10. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu. ....	60
Şekil 6.11. Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma cihazı. ....	61
Şekil 7.1. Üretilen alaşımların optik mikroskop görüntüleri; a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0,2Pb, c) MgAlSi-0,5Pb ve d) MgAlSi-1Pb .....	63
Şekil 7.2. Üretilen alaşımların SEM görüntüleri a)MgAlSi-0Pb ve b)MgAlSi-1Pb.....	64
Şekil 7.3. Üretilen kompozit malzemelerin XRD paternleri. ....	65
Şekil 7.4. İncelenen MgAlSi alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları. ....	66
Şekil 7.5. Mg <sub>2</sub> Si Hacim Oranı .....	67
Şekil 7.6. İntermetalik Hacim Oranı .....	67
Şekil 7.7. Sertlik Analizi Sonuçları .....	68
Şekil 7.8. Farklı partiküllerden (5 adet) alınan sertlik değerleri. ....	69
Şekil 7.9. Sertlik ölçümü sonucu oluşan batma ucu izi. ....	69

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 7.10. MgAlSi-XPb alaşımlarının zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi.....	70
Şekil 7.11. İncelenen alaşımların daldırma korozyon sonrası makro görüntüleri; a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0,2Pb, c) MgAlSi-0,5Pb ve d) MgAlSi-1Pb .....	71
Şekil 7.12. İncelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzey kesitlerinin SEM görüntüleri. ....	72
Şekil 7.13. İncelenen alaşımların polarizasyon eğrileri a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0.2Pb, c) MgAlSi-0.5Pb ve d) MgAlSi-1Pb.....	73
Şekil 7.14. MgAlSi-XPb alaşımlarının farklı yükler altındaki ağırlık kayıpları; a) 5 N, b) 10 N, c) 20 N ve d) 40 N. ....	74
Şekil 7.15. Toplam 10000 m kayma mesafesi sonucundaki ağırlık kaybı grafiği .....	75
Şekil 7.16. İncelenen alaşımların aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri .....	76

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Mg metalinin genel özellikleri .....	4
Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları .....	5
Çizelge 2.3. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94).....	6
Çizelge 2.4. İkili Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar .....	11
Çizelge 3.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler .....	23
Çizelge 4.1. Korozyon türleri . .....	34
Çizelge 7.1. Üretilen kompozitlerin kimyasal analizleri.....	62
Çizelge 7.2. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri. ....	73



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- s : Saniye  
d : Dakika  
°C : Santigrat derece  
 $E_{\text{corr}}$  : Korozyon potansiyeli  
 $I_{\text{corr}}$  : Korozyon akımı  
 $\mu\text{m}$  : Mikrometre  
F : Faraday sabiti  
mV : Milivolt  
mA : Miliamper  
N : Newton

### KISALTMALAR

- MMK : Metal matrisli (ana bileşen) kompozit  
MMMK : Mg esaslı metal matrisli kompozit  
XRD : X- ışını difraksiyonu (X-Ray Diffraction)  
SCE : Doymuş kalomel elektrot (Saturated Calomel Electrode)  
SEM : Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)  
EDS : Elektron difraksiyon taraması (Electron Diffraction Scanning)  
ASTM : Amerikan malzeme ve test standartları kurumu  
ASLE : American society of lubrication engineers

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyadaki araştırma geliştirme çalışmalarına paralel olarak gelişen teknolojinin üretim yöntemlerine uygulanması ile birlikte dünya pazarına sunulan yeni ürünler, dünya pazarından pay almak isteyen ülkeler için ekonomilerini geliştirme aracı olarak değerlendirilmektedir. Küreselleşmenin getirdiği rekabet ortamında piyasaya katma değeri yüksek yeni ürünler arz eden ve bu ürünlerle rekabet yarışını sürdüren ülkeler bu alanda alt yapısı eksik diğer ülkelere ürün ve teknolojilerini ihraç ederek büyümektedir [1].

Teknik ve teknolojik ürünlerin günlük yaşamda ağırlığının artması ve toplumun bu tür ürünlere olan talebinin yoğunluğu, son on yıldır ülkemizin dış ticaret dengesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkemizde bir taraftan ürün yelpazesini ve ürün birim maliyetini düşürürken diğer taraftan ürün kalitesinin ve teknolojik içeriğinin arttırılması gereği ortaya çıkmaktadır. Türkiye’de teknolojik katma değeri olan ürün tüketiminin payı gittikçe büyümektedir [1].

Geleceği şekillendiren ileri teknoloji destekli katma değeri yüksek ürünlerin oluşturduğu pazara ülkemizin de girebilmesi ve söz konusu ürünlerin ticaretinde pay sahibi olabilmesi için gerekli stratejiler üzerinde yoğun olarak çalışması zorunludur. Bu çerçevede yeni malzemeler konusunda bilinçlenmeli ve gerekli çalışmalar yapılmalıdır. Son yılların en çok kullanılan malzemeleri içerisinde bulunan kompozit malzemelerde bu payın en büyük parçalarından birine sahiptir [1-3].

Kompozit malzeme, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemeleri belirtmek için kullanılmaktadır. Kompozitlerin sahip

olduğu yüksek özellikler kompozit malzemelerin birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmesini sağlamaktadır [1].

Metal bazlı kompozitlerde ise matris yapısı olarak alüminyum, bakır, Mg, titanyum gibi hafif metaller ve alaşımları kullanırken; takviye malzemesi olarak karbon, bor ve diğer metallerin elyaf, parçacık, plakacık, kıl kristal gibi parçacıkları kullanılmaktadır. Bahsi geçen metal matris ve takviye malzemesinin bir araya getirilmesi ile elde edilen yeni malzemenin mukavemeti, aşınma dayanımı, korozyon ve sertlik özelliklerinin geleneksel malzemelere göre çok daha iyi olması nedeniyle bu tip malzemeler otomotiv sanayisinde, gaz türbinlerinde, havacılık sanayisinde ve nükleer güç ekipmanlarında verimli bir şekilde kullanılabilir [1,2].

Bu tez çalışmasında,  $Mg_2Si$  partikül takviyeli Mg-Al-Si alaşımlarına Pb ilavesinin alaşımın korozyon ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Mg-%10  $Al_{12}Si$  alaşımına %0.2, %0.5 ve %1 oranlarında Pb ilave edilerek alaşımlar üretilmiştir. Korozyon deneyleri % 3.5 NaCl çözeltisinde daldırma ve potansiyodinamik polarizasyon yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri ise disk üzeri pim (pin on disk) aşınma test cihazında kayma mesafesi ve uygulanan yük değiştirilerek yapılmıştır. Pb ilavesi incelenen alaşımın korozyon direncini geliştirirken aşınma direncini azalttığı belirlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### Mg ve Mg ALAŞIMLARI

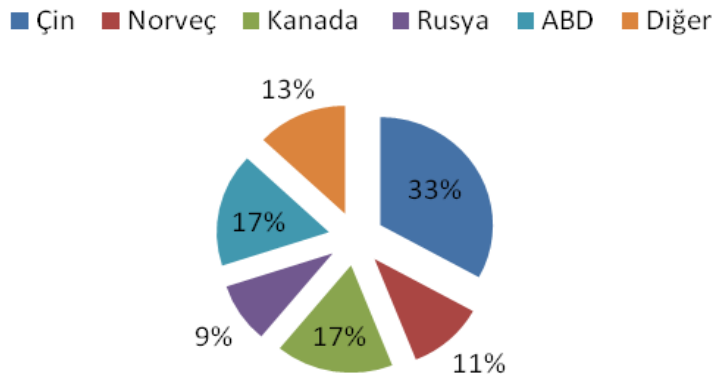
#### 2.1. Mg METALİNİN KİMYASAL ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Mg, yapısal uygulamalarda kullanılabilir ve gün geçtikçe kullanımı da artan en hafif metaldir. 1695'te İngiliz botanikçisi Nehemiah Grew, İngiltere' nin Epsom bölgesindeki maden sularının tıbbî özellikleriyle ilgilenmeye başlamıştı. Araştırması sonunda yeni bir tuz bulan Grew, maden sularına “şifalı olma” özelliği kazandıran bu tuza “Epsom tuzu” adını verdi. Daha sonraları, Epsom tuzunun, bilinmeyen bir metal olan Mg' un sülfatı olduğu anlaşıldı. Mg 1755 yılında İngiltere'de Joseph Black tarafından metal olarak adlandırılarak ilgi odağı haline geldi. 1808 yılında Humphrey Davey tarafından saf olarak, magnezya ve civa-II-oksit (HgIIO) karışımından izole edilmiştir. Bilinen yerkürenin % 2.7'sinde ve okyanus sularının % 0,13' ünde bulunması sebebiyle Mg periyodik cetvelde 2A grubunda Mg simgesiyle yer alan toprak alkali bir elementtir. Doğada saf olarak bulunamayan bu metal genelde oksit halde ve diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Sanayide artan kullanımı nedeniyle Mg sanayi metalleri arasında bulunmaktadır. Saf Mg metalinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir [2-4].

Çizelge 2.1. Mg metalinin genel özellikleri [4].

Simgesi	Mg
Atom numarası	12
Atom ağırlığı (g/mol)	24.312
Kaynama noktası (°C)	1090
Ergime noktası (°C)	650
Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	1.74
Elektron düzeni	3 s <sup>2</sup>
Kristal yapısı	Hegzagonal (HSP)
Çekme Dayanımı (MPa)	80-180
Young Modülü (GPa)	45
Çekme (katı-sıvı)	% 4.2
Atom hacmi ( mA / d )	14.0
Özgül ısısı (cal/g °C)	0.25

Mg üretimi ilk olarak 1. Dünya savaşı döneminde önem kazanmıştır. Savaş öncesi dönemlerde fişek yapımında kullanılan Mg, 1. Dünya Savaşı zamanında birçok ülke tarafından üretilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar sanayinin birçok dalında kullanılan Mg günden güne artan rağbet sebebiyle dünya ülkeleri tarafından üretilmektedir [5].



Şekil 2.1. Mg metalinin 2009 yılındaki yıllık üretimi [5].

Mg metali magnezit ( $MgCO_3$ ), karnolit ( $K_2MgCl_4 \cdot 6H_2O$ ) veya dolomit  $MgCa(CO_3)_2$  cevherlerinden, tuz depozitlerinden, doğal yeraltı ve yapay tuzlu sulardan ya da deniz suyundan üretilir. Mg üretimi iki şekilde yapılır. Birincisi ergimiş Mg klorürün ( $MgCl_2$ ) indirgenme prensibine göre; ikincisi ise elektroliz yöntemi olup, dolomitten kimyasal yollarla çökeltme ve arıtma işlemiyle yapılır. İkincisi doğrudan tuzlu sulardan elde edilen Mg oksit ( $MgO$ ) termal redüksiyonu ile üretimidir. Mg; alaşımlarındaki tane inceltici etkisi ve hafifliğe karşı iyi olması ile ilgili 1938 yılındaki önemli buluşlarla beraber yapısal uygulamalarda kullanılması kabul görmüştür [7].

II. Dünya Savaşı sırasında Mg metaline olan talep yükselmiştir. Yalnızca A.B.D.'de üretim 1943 yılında, 1938 yılındaki üretim rakamının 8 katından biraz yüksek olan 184.000 tona ulaşmıştır. Yapısal uygulamalar ve savaş esnasında askeri amaçlı kullanımlarla Mg hava taşıtları öncelikli olmak üzere motor parçaları, uçak iskeletleri ve iniş takımlarında da hızla kullanılmaya başlanmıştır [8].

## 2.2. Mg ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI

Mg alaşımları standartları ASTM tarafından belirlenmiştir. Yöntem iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. Standart da bulunan ilk iki harf en yüksek oranda ilave edilmiş iki alaşım elementini sonrasındaki rakamlar ise bu alaşımların en yakın tam sayıya yuvarlanmış yüzdelik oranlarıdır. Çizelge 2.2' de yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir [4,7,9].

Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları [7,9].

Harf	A	B	C	D	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Bi	Cu	Cd	RE	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

Örnek olarak AS41 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir [7,9].

A→ Al'yi yani Mg'den sonra alaşımdaki en fazla bulunan elementi ifade eder.

S→ Si'yi yani 2. olarak en fazla bulunan elementi ifade eder.

4→ Alaşımdaki Al oranının yaklaşık 3,7 – 4,8 arasında olacağını ifade eder.

1→ Alaşımdaki Si oranının yaklaşık 0,6 – 1,4 arasında olacağını ifade eder.

Mg alaşımlarının bileşim değerlerini belirten ASTM B93/B93M ve ASTM B94 standartları Çizelge 2.3'de gösterilmiştir [5,10-12].

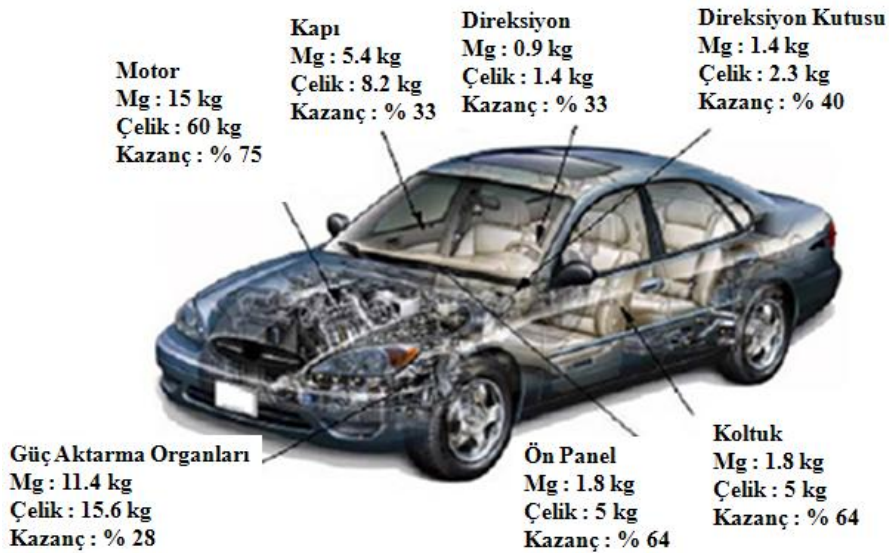
Çizelge 2.3. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) [10-12].

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4.5-5.3	5.6-6.4	1.9-2.5	3.7-4.8	2.5-3.5	7.8-9.2	8.5-9.5	0.05 max.	0.05 max.
Zn	0.20 max..	0.20 max..	0.15-0.25	0.10 max..	0.7-1.3	0.2-0.8	0.45-0.90	1.0-1.5	4.8-6.2
Mn	0.28-0.50	0.26-0.50	0.20 min.	0.35-0.60	0.20 min.	0.15-0.5	0.17-0.40	0.1 max..	0.1 max..
Si	0.05 max.	0.05 max.	0.70-1.2	0.60-1.4	0.05 max.	0.10 max.	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.
Fe	0.004 max.	0.004 max.	0.004 max.	0.035 max.	0.005 max.	0.05 max.	0.004 max.	0.03 max.	0.03 max.
Cu	0.008 max.	0.008 max.	0.008 max.	0.015 max.	0.05 max.	0.05 max.	0.025 max.	0.025 max.	0.05 max.
Ni	0.001 max.	0.001 max.	0.001 max.	0.001 max.	0.005 max.	0.005 max.	0.001 max.	0.005 max.	0.005 max.
Be	-	-	-	-	-	0.002	-	0.002	0.002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0.12-0.25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3-0,9
Diğer	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

### 2.3. Mg ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Günümüzde enerji kaynaklarının ve çevre dengesinin korunması otomotiv sektörünü yakıt tüketiminde zorunlu kısıtlamalara götürmektedir. Bu amaçla araç lastiklerinde sürtünmenin azaltılması, ağırlıkta azalma, motor ve transmisyon verimliliğinin artırılması, araç ön alanının küçültülmesi ve aerodinamik tasarım gibi yaklaşımlar üzerine çalışılmaktadır [13]. Örneğin araç ağırlığında yaklaşık 100 kg. bir azalma ile 100 km'de 0,5 litre bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Ağırlıktaki bu azalma atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunda da azalma meydana getirmektedir [14]. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin mutlaka hafif, aynı zamanda da güvenilir malzeme kullanması zorunlu hale gelmiştir. Bu kapsamda özellikle otomobil üretiminde ağırlığın azalımı üretici firmaların en önemli hedefi haline gelmiştir [15]. Otomotiv endüstrisinde Mg kullanımındaki artış geçen 10 yıl içerisinde her yıl % 15 olarak gerçekleşmiştir. Bu artışın önümüzdeki 10 yıl içerisinde % 12'lik oranla artmaya devam edeceği beklenmektedir [9,16].

Şekil 2.2' de otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere Mg alaşımları otomobillerin hemen her kısmında kullanılmaktadır [17].



Şekil 2.2. Otomobil üretiminde Mg alaşımlarından üretilebilecek alaşımlar ve kazanç değerleri [17].



Mg döküm alaşımlarının gelecekte daha geniş kapsamlı kullanılabilmesine dair en iyi örneklerden birini de BMW firmasının yeni ürettiği Mg-Al kompozit motor bloğudur. Bu, Mg alaşımlarının yüksek sıcaklık motor uygulamasında ilk uygulamadır [18].

Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar (AM50 - AM60) iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Toprak elementleri içeren AS41, AS21 (Mg-Al-Si-Mn) ve AE42 (Mg-Al-Re) alaşımları artan sıklıkla, Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarından daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçaları imalı için kullanılır [5,19].

AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar, kamera ve mobil telefonlarda kullanılır. Şekil 2.3 'de AZ serisi alaşımlarından üretilmiş döküm parçalar görülmektedir [14].



Şekil 2.3. AZ serisi alaşımlardan üretilmiş bazı döküm parçalar [14].

Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorpsiyon özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapımında kullanılır. Şekil 2.4'de AM alaşımından dökülmüş parçalar görülmektedir [20-22].



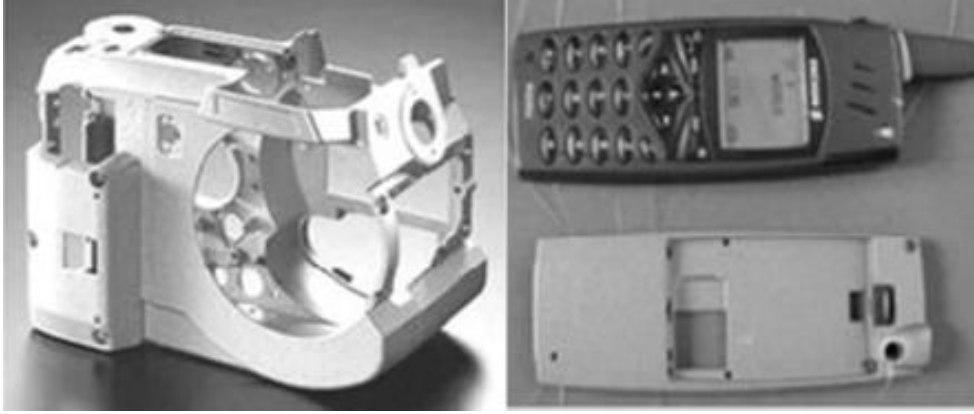
Şekil 2.4. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler [14].

AE43 alaşımları 200 °C' nin üzerindeki servis koşullarında, transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılır [5]. Şekil 2.5'de AE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu görülmektedir [8,23].



Şekil 2.5. AE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu [8,23].

Süper hafif Li katkılı Mg esaslı alaşımlar bilgisayar elemanı olarak plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir [14]. Şekil 2.6'da Li katkılı Mg alaşımından dökülmüş kamera ve cep telefon kutusu görülmektedir.



Şekil 2.6. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları [14].

#### 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN Mg ALAŞIMLARINA ETKİSİ

Mg metali genelde saf halde kullanılmaz. Malzemenin dayanım özelliklerinde belirli gelişmeler sağlamak için Mg 'a alaşım elementleri katılarak döküm veya dövme ürünler elde edilmektedir. Mg hegzagonal yapıya sahiptir ve sahip olduğu tane çapı da çok fazla sayıda elementle katı çözünebilirliğe müsaade eder. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, Be, Ca, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Ag, Sn, Zn ve Zr gibi ana elementler ile Na, K, Li alkali ve Ce, Ln, Y, Nd gibi toprak elementleri (RE) katılarak alaşımlandırılır. Bu elementlerin biri veya birkaçı ile alaşımlandırıldığı zaman alaşımlar yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur [5,9].

Mg alaşımları için katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi iki önemli sertleştirme mekanizmalarıdır. Hume-Ruthery kuralına göre; eğer çözünen ve çözen atomların atomik çapları arasındaki fark % 14–15'i aşarsa, katı çözelti oluşmayabilir. Ayrıca, katı çözelti oluşturabilmek için iki elementinde aynı kristal yapıya sahip olması gerekir [4,5]. Çizelge 2.4' de ikili Mg alaşımlarında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik verileri verilmiştir [4,8].

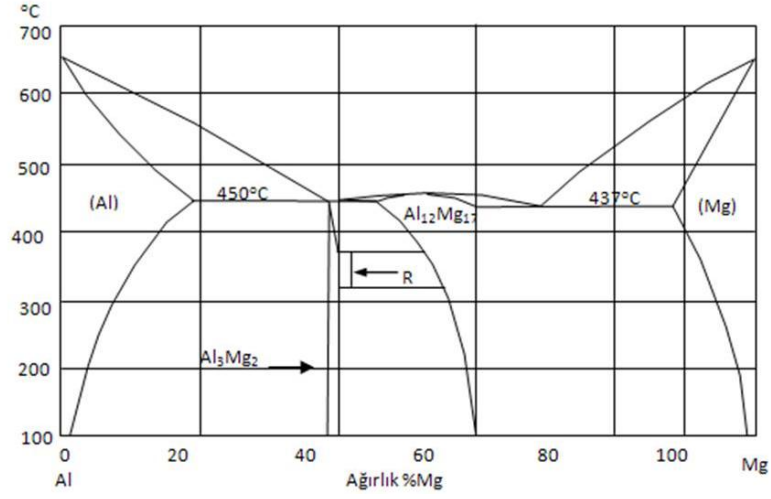
Çizelge 2.4. İkili Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar [4,8].

İkili Sistem	Max.. Çöz.		Oluşan Faz	Ergime noktası °C	İkili Sistem	Max.. Çöz.		Oluşan Faz	Ergime noktası °C
	% ağı.	% at.				% ağı.	% at.		
Mg-Al	12.7	11.6	Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub>	402	Mg-Sm	5.8	0.99	Mg <sub>62</sub> Sm	-
Mg-Ca	0.95	0.58	Mg <sub>2</sub> Ca	714	Mg-Nd	3.6	0.63	Mg <sub>41</sub> Nd <sub>5</sub>	560
Mg-Sc	25.9	15.9	MgSc	800	Mg-Th	5.0	0.49	Mg <sub>23</sub> Th <sub>6</sub>	772
Mg-Mn	2.2	1.0	Mg <sub>2</sub> Mn	1245	Mg-Dy	25.8	4.83	Mg <sub>24</sub> Dy <sub>5</sub>	610
Mg-Zn	8.4	3.3	MgZn	347	Mg-Ho	28.0	5.44	Mg <sub>24</sub> Ho <sub>5</sub>	610
Mg-Y	12.0	3.6	Mg <sub>24</sub> Y <sub>5</sub>	620	Mg-Tm	31.8	6.26	Mg <sub>24</sub> Tm <sub>5</sub>	645
Mg-Zr	3.6	0.99	MgZr	1855	Mg-Yb	3.3	0.48	Mg <sub>2</sub> Yb	718
Mg-Ag	15.5	4.0	Mg <sub>3</sub> Ag	492	Mg-Lu	41.0	8.80	Mg <sub>24</sub> Lu <sub>5</sub>	-
Mg-Sn	14.85	3.45	Mg <sub>2</sub> Sn	770	Mg-Tl	60.5	15.4	Mg <sub>5</sub> Tl <sub>2</sub>	413
Mg-Ce	0.74	0.13	Mg <sub>12</sub> Ce	611	Mg-Pb	41.7	7.75	Mg <sub>2</sub> Pb	538
Mg-Pr	1.7	0.31	Mg <sub>12</sub> Pr	585	Mg-Bi	8.85	1.12	Mg <sub>3</sub> Bi <sub>2</sub>	821

Ticari Mg alaşımlarında kullanılan farklı alaşım elementlerinin etkisi kısaca aşağıda belirtilmiştir.

### 2.4.1. Alüminyum

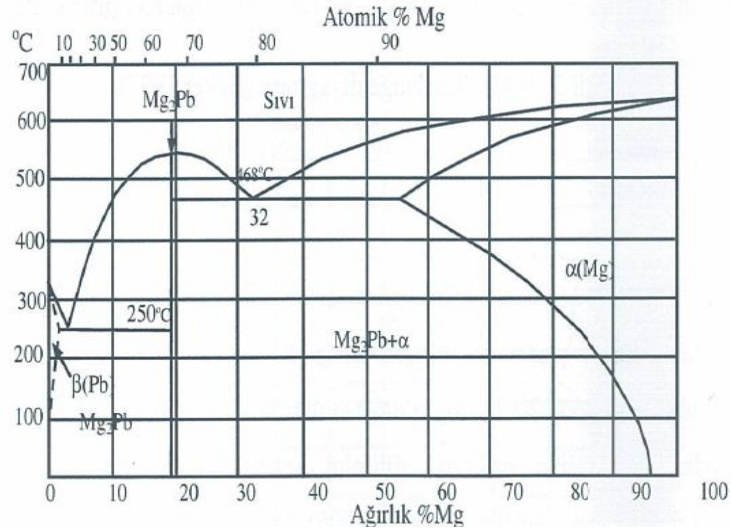
Mg esaslı alaşımlarda Al, en fazla kullanılan alaşım elementidir. Al katkısı alaşımın çekme dayanımını, sertliğini ve katılma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini ve darbe dayanımını azaltmaktadır. Ergiğin dökülebilirliğini geliştirmesinin yanı sıra Mg'un katı çökelti dayanımını ve döküm alaşımlarının mikro gözeneklerini azaltır. Alaşıma eklenen Al miktarı % 6'yı aştığında, alaşımın ısıl işlem kabiliyeti artar. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalikliği düşük sıcaklıklarda ( $\leq 120$  °C) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir. Şekil 2.7'de Mg-Al ikili faz denge diyagramı görülmektedir [9,24].



Şekil 2.7. Mg-Al denge diyagramı [25].

#### 2.4.2. Kurşun

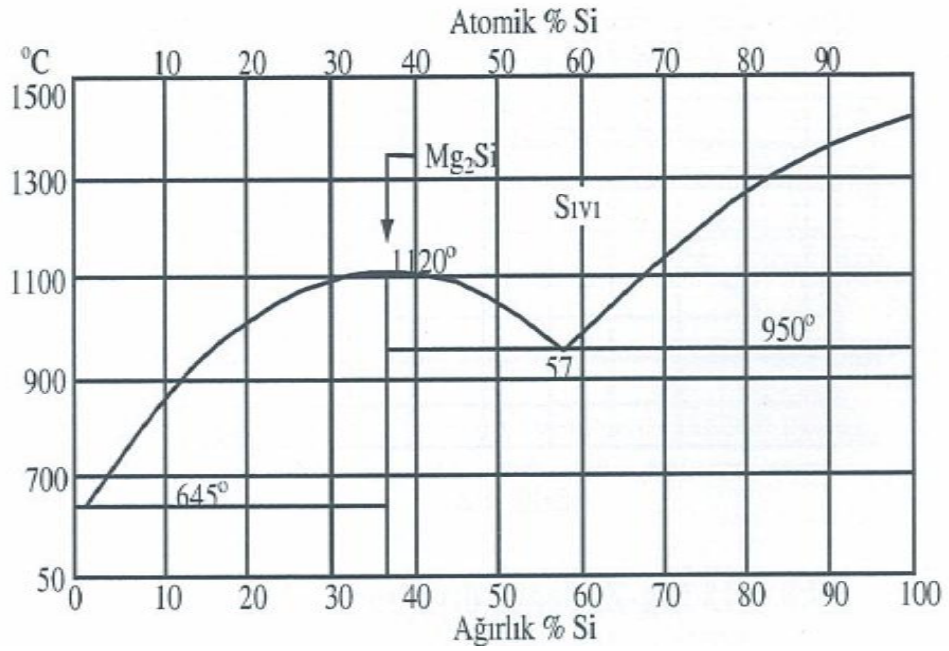
Alaşıma ilave edilen Pb iyi bir çözünürlüğe sahip olduğundan, yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 460 °C) % 45'e kadar Kurşun (Pb) çözünmekte ve ayrı faz olarak ortaya çıkmamasının yanı sıra Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik fazını da inceltmektedir. Şekil 2.8'de verilen Mg-Pb denge diyagramı incelendiğinde alaşımın sıcaklığı azaldıkça α+Mg<sub>2</sub>Pb fazının oluştuğu gözlenmektedir [29-31].



Şekil 2.8. Mg-Pb denge diyagramı [25].

### 2.4.3. Silisyum

Mg alaşımlarına eklenen Silisyum (Si), alaşımın yüksek sıcaklıklarda dayanımını arttırmaktır. Eğer alaşımda Fe de varsa Si, Mg alaşımlarının korozyona karşı direncini azaltır. Si atomları Mg matrisi içerisinde, oda sıcaklığında katı halde  $Mg_2Si$  intermetalik fazını oluşturur. Kuma dökümlerde oluşan  $Mg_2Si$  fazı basınçlı dökümlerde oluşumuna göre yavaş soğumadan dolayı kabadır ve bu da alaşımı kırılgan yapmaktadır. Şekil 2.9'da Mg-Si denge diyagramı verilmiştir [5,19,26,33].



Şekil 2.9. Mg-Si denge diyagramı [25].

### 2.4.4. Çinko

Zn, tane sınırlardaki ötektik miktarını artırarak, alaşımın katılaşıma sıcaklığını düşürmektedir. Korozyon özelliklerinde Bakır' ın (Cu) kötü etkisini yok etmek için Zn ilave edilmektedir [9,17,24]. Zn, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında sertliği, dayanımı ve aynı zamanda eriyiğin akıcılığını artırmakla birlikte, tane sınırlarına çökmesi ile sıcak yırtılma oluşturduğu için % 2 ile sınırlıdır. Ayrıca Zn alaşımın çekme mukavemetini artırır [5,9].

#### **2.4.5. Mangan**

Alaşıma ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini artırmak için % 0.1 – 0.5 arasında kullanılır. Mn' ın Mg alaşımlarında, korozyon direncine etkisi fazladır. Fe-Mn çöktelilerinde, Fe' in kontrolü için Mn kullanılır. Mn, Mg alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ve Fe' in etkisini azalttığı için, korozyonu engeller. Fakat Mg alaşımlarının dayanımında Mn' ın etkisi azdır [24].

#### **2.4.6. Kalay**

Kalay (Sn), Mg 'dan daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve Mg' dan daha az akıcılığı olan bir elementtir. Mg'a ilave edilen Sn, alaşımların sünekliğini artırır, sıcak işlem sırasında da alaşımların çatlama eğilimini azalttığı için aynı zamanda alaşımların işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Sn içeren alaşımlarda  $Mg_2Sn$  intermetalik faz oluşumu soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızlarında çubuk tipi  $Mg_2Sn$  partiküllerin gözlenmesi Mg matrisi ile birlikte olur [26-28].

#### **2.4.7. Titanyum**

Alaşıma ilave edilen Titanyum (Ti), az da olsa tane inceltici görevi yapar ve Mg içinde çok az çözünürlüğe sahiptir. Hızlı katılaşma ile Mg alaşımları Ti'un çözünürlük miktarı artırılabilir [34].

#### **2.4.8. Zirkonyum**

Alaşıma ilave edilen Zirkonyum (Zr), Mg alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılır. Zr, oda sıcaklığında mekanik özellikleri geliştirir. Zn, RE ve Th içeren Mg alaşımlarında Zr tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Zr, toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında dökülebilirliği geliştirir [5,9,35].

#### **2.4.9. Kalsiyum**

Kalsiyum' un (Ca) Mg içerisinde maksimum çözünebilirliği 565 °C' de % 1.34, 200 °C' de ise yaklaşık olarak % 0'dır. İntermetalik bileşim olan Mg<sub>2</sub>Ca' un ergime noktası 715 °C' ye ulaşır (Şekil 2.15). Mg' da Ca sınırlı çözünebilirliği ile katı eriyik sertleşmesine etkisi sınırlıdır. Mg alaşımlarına % 1 oranında katılan Ca alaşımın sürünme direncini geliştirmesinin yanı sıra sıcak yırtılmalara karşı olan eğilimi artırır. Ayrıca az da olsa eriyik metalin oksidasyonunu azaltmaktadır [5,19,24].

#### **2.4.10. Demir**

Mg'un çelik kalıplarla kuvvetli reaksiyona girmesini artırır. Korozyon özelliklerini büyük oranda azaltır. Mg alaşımlarında Fe içeriği % 0.01–0.03 aralığını geçmemelidir [36].

#### **2.4.11. Bakır**

Cu, dökülebilirliği iyileştirir. Mg alaşımlarında Cu miktarı % 0.05' i aştığında korozyon özelliklerine zararlı olmaktadır. Bununla birlikte Cu alaşımın yüksek sıcaklıklara dayanımını artırır [37].

#### **2.4.12. İtriyum**

İtriyum (Y), Mg alaşımlarının dayanımını artırır. Diğer toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında 300 °C sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir. Ayrıca Y, Mg'da yüksek çözünürlüğe sahiptir (% 12.5) ve azalan sıcaklıkla birlikte çözünürlük de azalmakta ve çökelti sertleşmesi oluşmasına sebep olmaktadır [5,38].

#### **2.4.13. Gümüş**

Gümüş (Ag) elementi katkısı Mg alaşımlarının sertliği geliştirir, ancak Ag' nin pahalı oluşundan dolayı kullanımı sınırlıdır [9].



#### **2.4.14. Stronsiyum**

Stronsiyum (Sr) mikro gözeneklerin dağılmasında etkisi vardır ve Mg alaşımlarının porozite eğilimini azaltır. Mg alaşımına % 2 Sr ilavesi ile alaşımın mekanik özellikleri ve korozyona direnci artmaktadır [39,40].

#### **2.4.15. Toryum**

Alaşıma ilave edilen Toryum (Th), Y'de olduğu gibi, 300 °C sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir. Dökülebilirliği iyileştirir, mikro porozite eğilimini azaltır ve Zn ile birlikte kullanıldığında kaynak edilebilme kabiliyetini geliştirir [5,41].

#### **2.4.16. Toprak alkali elementleri**

RE elementleri yüksek ısı dayanımını ve sürünme direncinin artırdığını ve döküm porozitesini azalttığı araştırmalar sonucunda bilinmektedir. RE elementleri dökülebilirliği iyileştirir ve Mg alaşımlarında mikro boşlukları azaltır. Oda sıcaklıklarında ve yüksek sıcaklıklarda alaşımda katı eriyik ve çökeltme sertleşmesi yaparlar. Bu elementler, dayanım özelliklerini iyileştirir ve yükselen sıcaklıklarda alaşımların iyi sürünme dirençleri sayesinde kararlı çökeltileri matriste ve tane sınırlarında dağılır [5, 9,41,42].

### **2.5. Mg-Al İKİLİ SİSTEMİ**

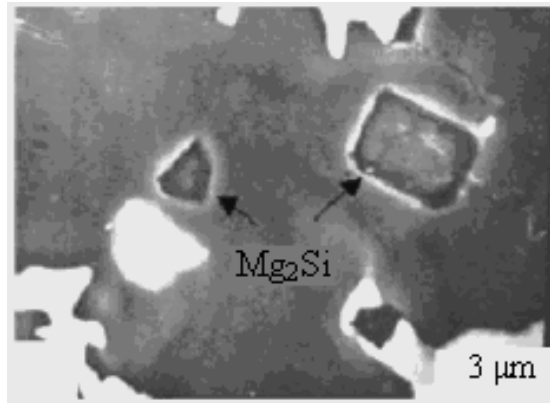
Mg-Al ikili sistemi en eski ve en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. AZ91, AM50 ve AM60 gibi alaşımlar tüm Mg alaşım dökümünün büyük bir bölümünü kapsamaktadır. Şekil 2.7' de verilen ikili Mg-Al diyagramı incelendiğinde ötektik reaksiyon, bir başka deyişle  $Sıvı \rightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha (Mg)$  dönüşümü, 437 °C gibi düşük bir sıcaklıkta olduğu gözlenmektedir. Bu sıcaklıkta Al 'un maksimum çözünebilirliği % 12.7 dir. Alaşım % 2' den az Al içerdiğinde dökülebilirlik zorlaşır, % 2' den fazla Al içerdiğinde ise mikro yapıda  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik bileşiği

oluşumundan dolayı kırılabilirlik artar. Alaşımdaki Al içeriği % 8' in üzerinde olursa  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşiği tane sınırları boyunca yayılır ve bu yüzden şekillenebilirlik de hızla azalır [5,9,19,43].

Mg-Al ikili alaşımları oldukça iyi döküm özelliklerine ve mekanik özelliklere sahiptir. Mg-Al alaşımları Mn, Zn, RE ve Si gibi ilave elementlerle üçlü ve dördü alaşımlar oluştururlar. En fazla kullanılan alaşım elementleri Al, Zn, Mn ve Zr dir. RE, Y ve Ca genellikle yüksek sıcaklıklar için kullanılır [5,9,22,43,44].

### 2.5.1. Mg-Al-Si Alaşımları

Mg alaşımlarında 150 °C' ye kadar sürünme direncini geliştirmek için AS41 (% 4.2 Al, % 1 Si, % 0.35 Mn) ve AS21 (% 2.2 Al, %1 Si, % 0.3 Mn) basınçlı döküm alaşımları geliştirilmiştir. Bu alaşımın dayanımı, hızlı katılaşma sonucu ince taneli yapıya sahip olan  $Mg_2Si$  fazından kaynaklanmaktadır. Alaşım kuma döküm uygulamalarında yavaş soğumadan dolayı  $Mg_2Si$  fazının kaba taneli olmasına sebebiyet verdiği için kullanılamamıştır. Şekil 2.22'de Si 'lu Mg alaşımının genel mikro yapısı görülmektedir [5,45].



Şekil 2.10. Si İlaveli Mg alaşımlarının genel mikro yapısı [45].

### 2.5.2. Mg-Al-RE Alaşımları

RE' nin % 1'den fazla eklenmesiyle, Mg- Al esaslı alařımların sűrűnme dirençlerinde iyileřme olduđu gűrűlműřtűr. Belli bařlı toprak alkali elementler RE, kararlı  $Mg_{12}RE$  intermetalik bileřiđi oluřturduđundan; hem oda sıcaklıđında hem de yűksek sıcaklıklarda kararlıdırlar ve dűzenli bir matris yapısına sahiptirler. Artan Al içeriđi ile birlikte dűkűlebilirliđin yűkselmesine rađmen, RE' nin sűrűnme dirençlerindeki etkisi, bir dereceye kadar Al ilavesini sınırlı kılar. RE miktarı arttıka sıcak yırtılma eđilimi azalmaktadır [5,33,46].

## BÖLÜM 3

### AŞINMA

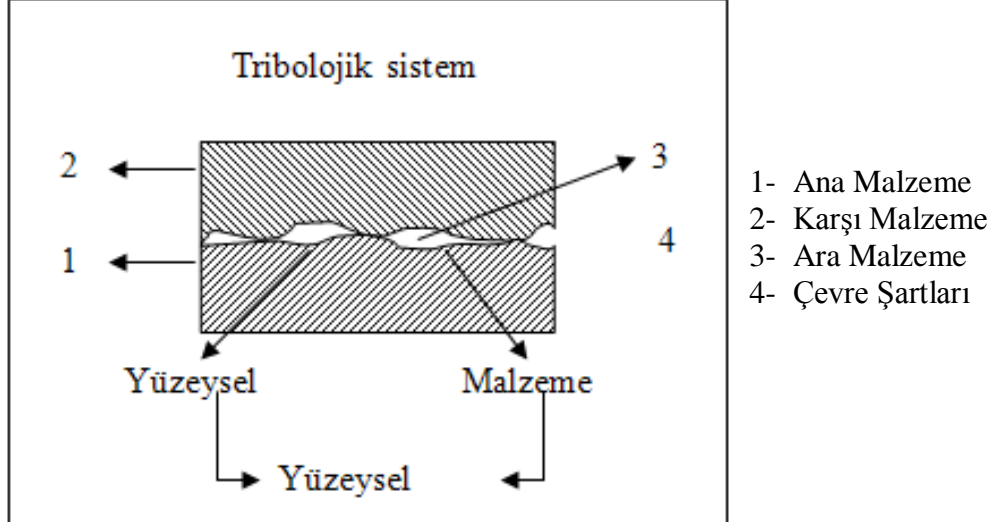
#### 3.1. AŞINMA NEDİR?

Birbirine göre bağıl hareket yapan ve aynı zamanda temasta olan iki yüzeyden küçük parçacıklar kalkar. Kalkan bu parçacıkların gitmesi ile aşınma meydana gelir. Mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının ömürlerine bu aşınmanın büyük etkisi vardır. DIN 50320'de aşınma; "cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir" şeklinde tarif edilir [47].

Aşınma mekanik, kimyasal veya elektro-kimyasal etkenlerin tribo-sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınma iş sertleşmesi, oksitlenme, metal transferi, faz değişikliği, yağ ve kir filmleri gibi çok sayıda olaya bağlıdır. Pek çok malzeme çiftinin sürtünme katsayısı 0.1 ile 1 ( $\mu$ ) arasında değiştiği halde aşınma hızları çok farklı değerlerde olmaktadır. Mühendislik malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için; a) Mekanik bir etkinin olması, b) Sürtünmenin olması, c) Yavaş fakat devamlı olması, d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi, e) İsteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir. Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma aşınma değildir [48].

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısı şartları ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistem, Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi;

- 1) Ana malzeme (aşınan)
- 2) Karşı malzeme (aşındıran)
- 3) Ara malzeme
- 4) Çevre ortamı (Yük, hareket) elemanlarından meydana gelir [49–51].



Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi [49,52].

Aşınmanın incelendiği eleman esas sürtünme elemanıdır. Karşı eleman katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Eğer ortam vakumlu ise iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir. Bu haldeki sürtünmeye teknik kuru sürtünme denir. Vakumsuz ortamda ise çevre devreye girer ve sistem elemanları sayısı üç tanedir. Eğer yağlama da var ise eleman sayısı dördür [53].

### 3.1.1. Aşınmanın Temel Unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekir. Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Bu alanın aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanından çok küçüktür. Çok hassas işlenen yüzeylerde dahi yüzeylerde pürüzler bulunur. Yüzeylerin etkileşimi bu pürüzlerde olur. Pürüzler arası girintilerde ise etkileşim yoktur ve temas alanı dışında kalır. Yüklemenin şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki önemli faktördür. Yükün değeri arttıkça gerçek temas alanı artar. İki cisim birbirine

göre kayma, yuvarlanma ve kaymalı-yuvarlanma hareketi veya çarpma hareketi yapabilir. Hareketin yönü ve hareketin miktarı aşınma miktarına ve aşınma cinsine tesir eder. Ayrıca sıcaklığın da aşınma üzerinde büyük etkisi vardır [54].

### **3.1.2. Aşınma Mekanizmaları**

Bir tribolojik sistemin elemanları arasındaki karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri ve bundan dolayı da farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir [49,51]. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir [52].

Genelde üç tür aşınma vardır. Bunlar; adhesiv, abrasiv ve tribo oksidasyon aşınma olarak bilinen eroziv aşınma türleridir [55]. Bunlardan başka fretaj aşınması ve yorulma aşınması da aşınma türü olarak söylenebilir [53].

Evensel bir aşınma türü olmadığı için, aşınmayı test edecek makine ve metot yoktur. Laboratuvar testleri, aşınma türünün servis şartlarını taklit etmeyi amaçlar [56].

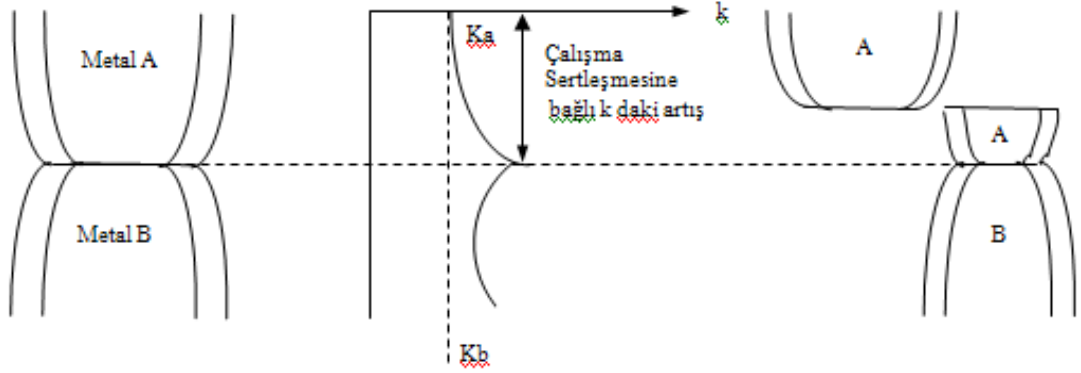
#### **3.1.2.1. Yapışma Aşınması (Adhesiv Aşınma)**

Yapışma aşınması olarak da bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının hazırlayıcısı olarak bulunmaz [52].

Bu aşınma çok düşük hızlarda da meydana gelmekte olup, uygulamada daha çok yüksek hız ve yüklerde görülen bir aşınma tipidir. Temasta olan yüzeyler birbirlerini pürüzlü noktalarda etkilerler. Gerçek temas alanı çok küçük olduğundan yüzeylere uygulanan yükün etkisi ile temas eden yüzeylerde temas etme alanı artar. Temastaki pürüzler basıncı taşıyamayacak duruma geldiğinde akma sınırı aşılır ve plastik deformasyon meydana gelir [57]. Eğer malzemenin sünekliği yüksek ise mikro adhezyon alanları hızlı bir şekilde temas yüzeyine tamamen yayılır. Malzeme

molekülleri birbiri ile temasa geçerek temas noktalarında kaynak bağları meydana gelir. Yatay bir kuvvet ile yüzeyler birbirine göre hareket ettirilmek istenirse kaynak olan noktalar kesilebilir. Eğer kesilme tam ara yüzeyde gerçekleşir ise aşınma meydana gelmez. Eğer kopma yüzeylerden birinde gerçekleşir ise diğer yüzeye malzeme transferi olur. Sürtünmenin devam etmesi halinde transfer olan malzeme kopmak sureti ile aşınma ürününü meydana getirir [53, 58].

Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi A ve B atomları arasındaki yapışma yeteri kadar iyi ise, yumuşak olan A metalinden kopan parçacıklar taşınacaktır. Eğer, A ve B malzemeleri aynı ise, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelecektir. Çizelge 3.1'de metallerin yapışmasını (adhezyonu) etkileyen faktörler gösterilmektedir [59].

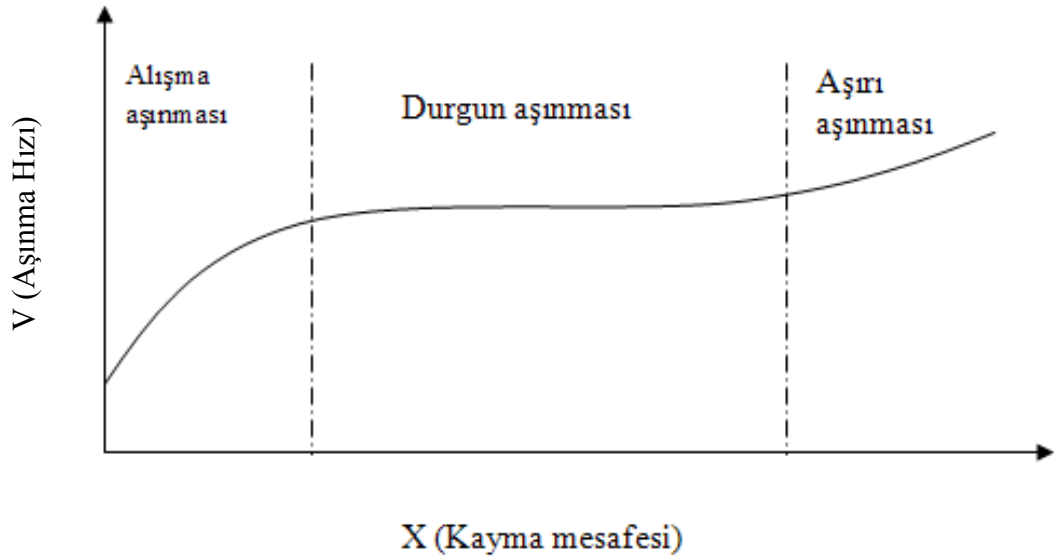


Şekil 3.2. Adhesiv aşınma [59].

Çizelge 3.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler [52].

Özellik	Tür veya Büyüklük	Adhezyon Katsayısı
1. Yüzeğe yardımcı bir madde sürme	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik	Yüksek
	Hegzagonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Saflık	Yüksek	$a^1$
5. Sertlik	Yüksek	Düşük
6. Elastik modülü	Yüksek	Düşük
7. Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8. Yeniden kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9. Atomik yarıçapı	Düşük	Düşük
10. Yüzey enerjisi	Yüksek	$b^2$

- <sup>1</sup> a) Literatürde hegzagonal sıkı paket yapıda olan Zn metali üzerinde çalışılmıştır. Büyük oranlarda bir değişimin olmadığı görülmüştür. Aksine yüzey merkezli yapıda olan Cu üzerindeki çalışmalar büyük ölçüde etkinin var olduğunu göstermiştir [52].
- <sup>2</sup> b) Literatürde fiziko-kimyasal olarak yapılan araştırmalara bağlı olarak yüksek yüzey enerjisinin yüksek adhezyona sebep olacağı söylenmektedir. Mekanik açıdan yüksek yüzey enerjili malzemeler oldukça serttir ve düşük adhezyon katsayısına sahip malzemelerdir [52].



Şekil 3.3. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri [53].

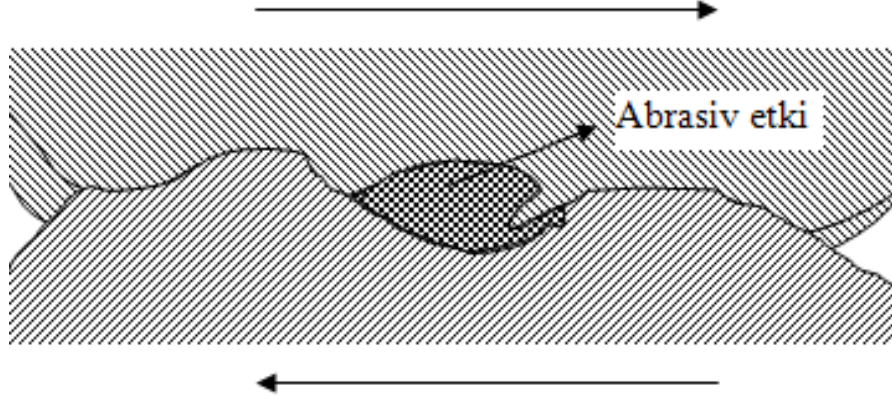
Adhesiv aşınma; Şekil 3.3' de görüldüğü gibi üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir [53]. Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeliklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri



noktaların düzleşmesi ile ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır. Aşınmanın başlangıcına “alışma aşınması” (rodaj) denir. Bu aşınma halinde yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamalı sistemlerde rodaj uygun şartlarda gerçekleşir ise faydalıdır. Alışma aşınması ile malzemenin yüzeyi düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgah ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir [60].

### **3.1.2.2. Kazıma Aşınması (Abrasiv Aşınma)**

Sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sert bir maddenin yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert maddeler, yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi bir malzemeden parça kopartılması olayı ile benzer işlem gösterirler [59]. Yüzeylere baskı kuvveti uygulandığı zaman sert yüzey üzerindeki asperitiler (aşındırıcı yüzeyindeki nano tepelikler) yumuşak yüzeye gömülür. Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman asperitiler yumuşak yüzeyi kazırlar. Aşınma; yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Şekil 3.4'de tipik bir abrasiv aşınma görülmektedir. Üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur. Metalin (aşınan malzeme) sertliği ( $H_m$ ) ve aşındırıcının sertliği ( $H_a$ ) olmak üzere  $H_m/H_a$  bir kriter olarak kullanılır.  $H_m/H_a < 0.8$  ise metalde çok aşırı kazıma aşınması meydana gelir. Talaşlı imalatta da istenen durum budur.  $H_m/H_a > 0.8$  ise kazıma aşınması düşüktür.  $H_m/H_a \geq 1$  ise metalde kazıma aşınması meydana gelmediği kabul edilir [61].

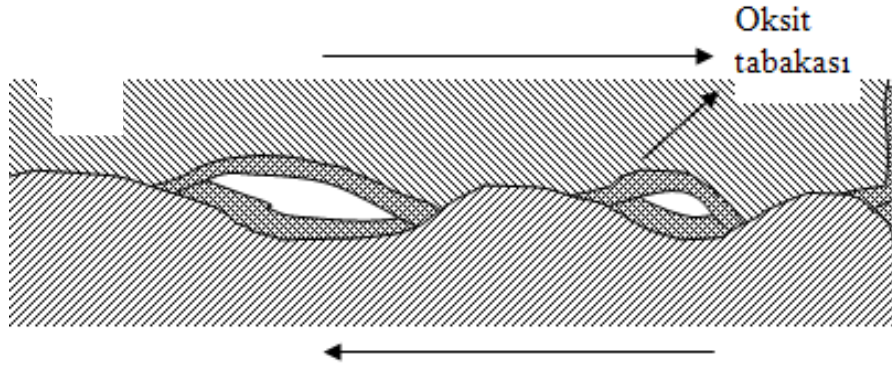


Şekil 3.4. Abrasiv Aşınma [49].

Kayma ve abrasiv aşınma arasındaki fark çok belirgin değildir. Her ikisi de temiz yüzeylerde partikül (talaş) oluşmadan önce, meydana gelen deformasyona bağlı olarak bir aşınma alanı halkasının parçalarıdır [62]. Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrasiv duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin, kaymanın ilk aşamalarında oluşan partiküller her iki kayma bileşenini de aşındırabilir [63]. Sert partiküllerin boyutunun kritik bir değer altına düşmesine göre abrasiv aşınmadan kayma aşınmasına bir geçiş olduğu belirtilmiştir [64].

### 3.1.2.3. Erozyon Aşınma (Erozif) veya Tribo Oksidasyon

Temas yüzeylerinden en az birinin çalışma ortamında korozyona uğraması ve izafi hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakasının silinerek alınması ve bunun devamlı olarak tekrarı ile meydana gelen aşınmadır. Sert olan ve koparak sürtünme yüzeyleri arasına giren parçacıklar abrasiv bir tesir yaparak aşınmayı artırıcı rol oynarlar [58]. Şekil 3.5.'de tribo oksidasyon aşınma görülmektedir.

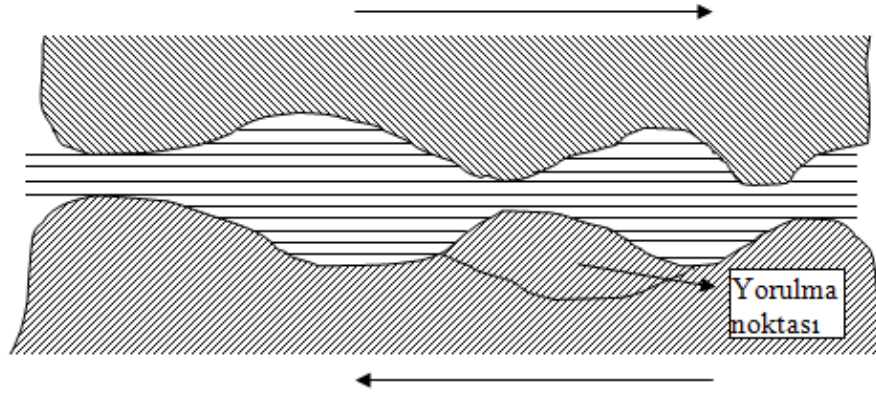


Şekil 3.5. Tribo oksidasyon aşınması [49].

Katı tanecik erozyonunda; katı bir cisim bir yüzeye dik olarak çarparsa ikinci yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma meydana gelir. Çarpılan yüzey sünek ve çarpan cisim çok sert ise yüzeyde çukur oluşur. Malzeme kaybı meydana gelmeyebilir. Darbeler devam ettiği sürece yorulmadan dolayı malzeme kaybı başlar. Erozyon aşınması tanecik darbe hızı arttıkça aşınmada lineer bir değişim gösterir. Sıvı tanecik erozyonunda ise; basınçlı sıvı jetleri katı cisim gibi davranır. Sıvı jetleri yüzeye çarptığı zaman ses dalgaları oluşur ve bunlar çekme-basma şeklinde yüzeyde yayılır. Sonuçta yüzeylerde plastik deformasyon ve pürüzler oluşur [65].

#### 3.1.2.4. Yorulma Aşınması

Temas yüzeylerinde oluşan küçük çukurcuklar halinde kendini gösterir. Genellikle dişli çarklar, kamlar ve rulmanlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde oluşur ve zamanla yorulma sonucu zararlı hale gelirler [66]. Bu elastik ve plastik olayların devam etmesi sonucu mikro çatlaklar oluşur, çatlak büyümesi olur ve aşınma parçacıkları kopar. Burada harcanan enerji, malzemede belirli ölçüde tahribat yapar [67]. Şekil 3.6'da yorulma aşınması görülmektedir.



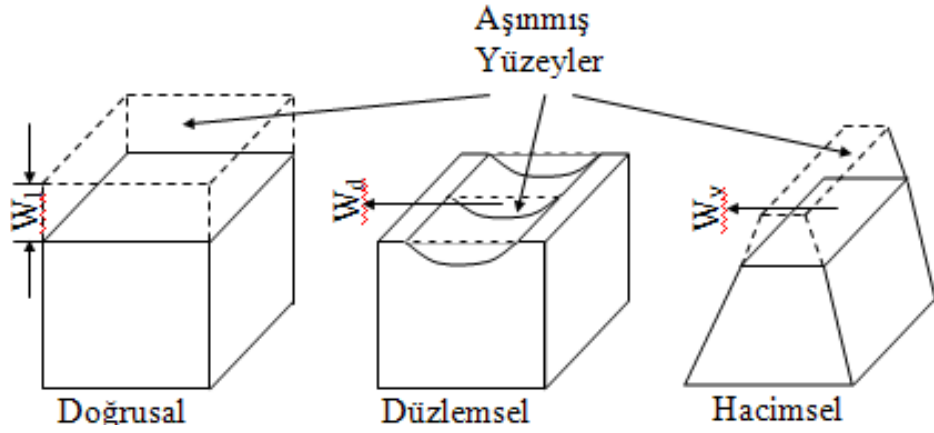
Şekil 3.6. Yorulma aşınması [49].

### 3.1.2.5. Fretaj Aşınması

Düşük enerjili izafi hareket yapan iki yüzey arasında meydana gelen aşınmadır. İzafi hareket gel-git şeklinde olup genliği 20–400  $\mu\text{m}$  olmalıdır. Fretaj aşınma kaybı çok azdır. Fakat yorulma çatlaklarının başlangıç yerlerini oluşturur. Hareket etmeyen makinelerde (kamyon ile taşınan otomobil), bilyeli yataklarda titreşim var ise fretaj meydana gelir. Titreşim çok sert kuvvetler oluşturursa yüzeylerden birinde izler meydana gelir [48].

## 3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı esas alınarak yapılır. Aşınma doğrudan veya dolaylı ölçümlerle verilebilir. Aşınmanın oluşabileceği durumlara bağlı olarak Şekil 3.7' de doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma gösterilmiştir [49].



Şekil 3.7. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi [49].

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan özelliklerden biri de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti artırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir [52]. Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

- 1) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınmanın değerlerinin ölçüldüğü deneylerdir.
- 2) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma deneylerinin ölçüldüğü deneylerdir.

ASLE tarafından yüz kadar ölçüm deney sistemi belirtilmiştir. Önemli olduğu düşünülen ve yaygın olarak kullanılan ölçüm yöntemlerinden; ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim metodu ve radyo izotop metodu aşağıda sırayla açıklanmıştır.

### 3.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi içinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi  $10^{-3}$  veya  $10^{-4}$  gr hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, gr/km veya mg/m olarak ifade edilir. Eğer bir birim alan için hesap edilecekse, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek birim alan bulunabilir. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntı şudur [52];

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S} \text{ (mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{ m}^{-1}\text{)} \quad \text{Burada;} \quad (3.3)$$

$W_a$  = aşınma oranı ( $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ),

$\Delta G$  = ağırlık kaybı (mg),

$S$  = kayma mesafesi (m),

$M$  = yükleme ağırlığı (N),

$d$  = aşınan malzemenin yoğunluğu ( $\text{gr} / \text{cm}^3$ ),

olarak verilmiştir. Aşınma oranının ( $W_a$ ) ters değeri de aşınma direnci ( $W_r$ ) olarak gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \text{ (N.m/mm}^{-3}\text{)} \quad (3.4)$$

### **3.2.2. Kalınlık Farkı Metodu**

Aşınma esnasında oluşacak boyut değışikliğinin ölçülmesi ve bu ölçümün başlangıç değeri ile karşılaştırması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerdan gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile  $\mu\text{m}$  duyarlılığında ölçülmelidir [52].

### **3.2.3. İz Değişimi Metodu**

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (örneğin çapının) değışimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucu izidir. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutundaki değışme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [52].

### **3.2.4. Radyoizotop Metodu**

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya  $\alpha$ -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değıştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarda kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir [52].

## **BÖLÜM 4**

### **KOROZYON**

#### **4.1. KOROZYON NEDİR?**

Korozyon, metal ve metalik alaşımların kimyasal ya da elektrokimyasal olarak termodinamik bakımdan doğada kararlı olduğu bileşiklerine dönüşme isteğidir. Metal ve alaşımların çevre ortamıyla etkileşerek fazla enerjisini dışarı vermesi, entropisini azaltması ve doğadaki kararlı bileşiğine dönüşmesi şeklinde gerçekleşen bir olaylar zinciridir [68]. Korozyon olayı kendi içerisinde 2 sınıfta incelenebilir. Bunlar;

##### **4.1.1. Kimyasal Korozyon**

Malzemelerin çevreyle etkileşime girerek doğrudan reaksiyon oluşturmasıdır. En önemli örneği metalin oksitlenmesi (paslanması) olayıdır. Oksitlenme özellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve malzemeyi hasara uğrattığı için genelde istenmeyen bir durumdur [68].

##### **4.1.2. Elektrokimyasal Korozyon**

Metal ve alaşımlarının sıvı ortamlar içindeki korozyonudur. Elektrokimyasal korozyonun meydana gelebilmesi için elektrik akımının iletilebileceği bir elektrolit ortamının bulunması gerekir. Ortamdaki çevre asit, baz ve tuzların sudaki çözeltileridir. Örneğin, bir metal elektrot kendi tuzunun sulu çözeltisine daldırıldığında atomların son yörüngesindeki elektronlar serbest hale geçer, bunun sonucunda;



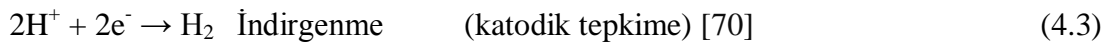
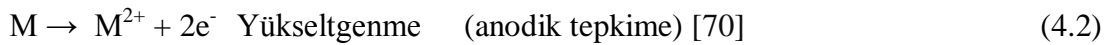


yüklü metal iyonu meydana gelir [69].

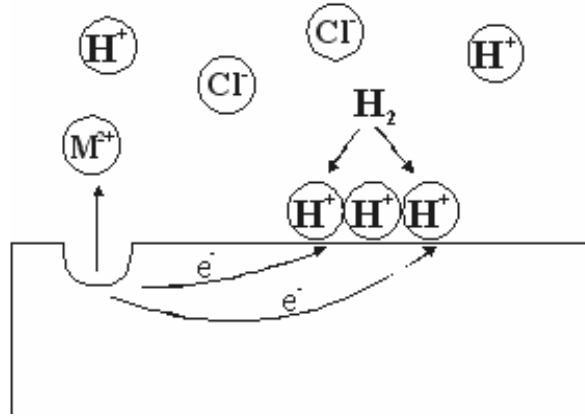
Korozyon tepkimeleri, çoğu metallerin termodinamik kararsızlığı sonucu (Au, Pt, Ir ve Pd gibi soy metaller dışında) veya dış akımların etkisiyle yürür. Metal korozyonu ister anodik ister katodik tepkime ile denetlensin, çoğu hallerde korozyon hızı, yük aktarım basamağı ile sınırlanır. Metal iyonları oluştuğu zaman elektrik devresi tamamlanarak sürekli bir akım yolu sağlanmış olur [69].

Sıvı ortamda elektron alışverişi ile gerçekleşen oksidasyon (elektron verme) ve redüksiyon (elektron alma) reaksiyonlarına elektrokimyasal reaksiyonlar denir. Atmosferde, su içinde, toprak altında oluşan korozyon reaksiyonları bu tip reaksiyonlara örnek teşkil eder. Atmosferde ve toprak altındaki metallerin yüzeyinde de değişik kalınlıkta su filmi vardır. Su içinde hava ve onun bileşeni olan O<sub>2</sub> gazı belli oranda çözüldüğünden O<sub>2</sub> gazı metal yüzeyinde redüklenerek yani elektron alarak iyonik hale dönüşür. Metal de elektronlarını Oksijen'e vererek oksitlenirse katı halden sulu iyon hale dönüşerek kimyasal olarak değişikliğe uğrar. Sulu ortam-metal ara yüzeyinde metalin kimyasal şeklini değiştirmesine korozyon denir [70].

Sulu çözelti kimyasında korozyon elektrokimyasal tepkimelerle gerçekleşir. Bu tepkimelerde anotta metal yükseltgenir, katot da ise çözeltideki reaktif indirgenir [70].

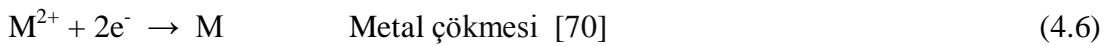
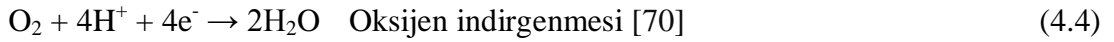


Bu tepkimeler metal yüzeyinde aynı anda ve aynı hızda gerçekleşirler. Yani korozyon sırasında anottaki yükseltgenme hızı katottaki indirgenme hızına eşittir. Şekil 4.1'de HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olayların şematik gösterimi görülmektedir [70].



Şekil 4.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar [70].

Metal yüzeyinden ayrılan metal atomu iyonuna dönüşürken iki elektronunu bırakır. Bu elektronlar hidrojen iyonlarının indirgenme sırasında kullanılırlar. Metal atomunun elektron vererek metal iyonuna dönüşmesi anodik tepkime olarak adlandırılır. Katodik tepkime ise hidrojen oluşumu reaksiyonudur [70]. Katodik tepkimelere başka örneklerde verilebilir;



Asidik ortamlarda en genel tepkime hidrojen çıkışıdır. Diğer katodik tepkimeler ise çok seyrek gerçekleşebilir. Bir alaşım korozyona uğradığında içerisindeki her metal kendi iyonlarına dönüşerek çözeltiliye geçeceğinden birden fazla yükseltgenme tepkimesi gerçekleşir. Aynı şekilde eğer HCl çözeltisi içerisinde çözülmüş  $\text{O}_2$  bulunuyorsa hem hidrojen çıkışı hem de  $\text{O}_2$  indirgenmesi gerçekleşir. Korozyon sırasında yükseltgenme hızı indirgenme hızına eşit olacağından bu tepkimelerden birinin artışı diğerinin de artmasına neden olacaktır. Yani oksijen içeren HCl çözeltisi içermeyenden daha çok korozif olacaktır [70].

## 4.2. KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Mühendislik açısından daha önemli olan bölgesel korozyon 2 ana başlık altında incelenebilir (Şekil 4.1). Bunlar;

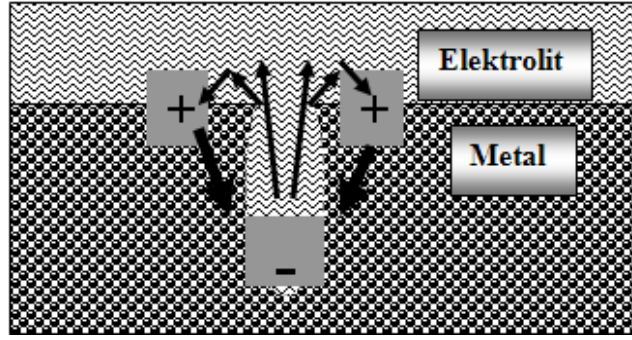
- Makro Korozyon
- Mikro Korozyon

Çizelge 4.1. Korozyon türleri [71].

Makro korozyon	Mikro korozyon
a) Çukur Korozyon	a) Taneler arası korozyon
b) Galvanik Korozyon	b) Gerilmeli korozyon
c) Aralık Korozyon	c) Yorulmalı Korozyon
d) Seçimli Korozyon	
e) Kabuk altı korozyonu	
f) Fili-form korozyonu	

### 4.2.1. Çukur Korozyonu

Metal yüzeyinin bazı noktalarında çukur oluşturarak meydana gelen korozyon türüdür. Bu tip korozyon olayında anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot, yüzeyin herhangi bir noktasında açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki çok geniş bir alandır. Korozyon sonucunda çukur gittikçe büyüyerek metalin o noktasından kısa sürede delinmesine neden olur. Bu nedenle çukur tipi korozyon çok tehlikeli bir korozyon türü olarak kabul edilir [72].

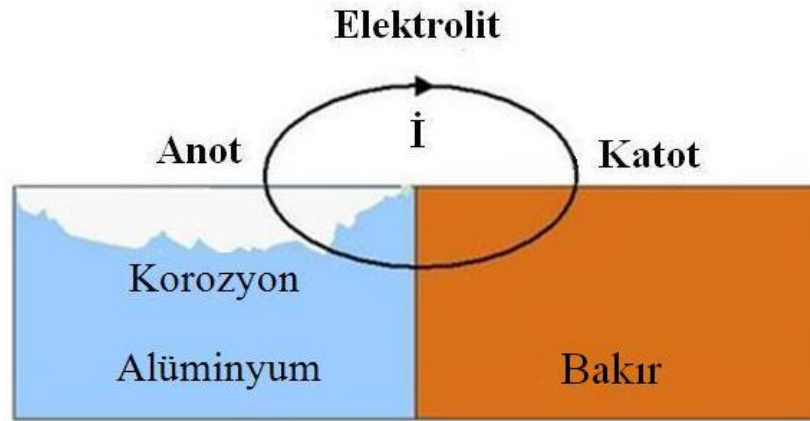


Şekil 4.2. Çukur korozyon işleyiş şeması [71].

Çukurun dibi anot görevi görürken, çukur ağzındaki yüzeyler katot görevi görmektedirler. İyonik akım elektrolitten geçerken, elektronik akım metalden geçer (Şekil 4.2) [71].

#### 4.2.2. Galvanik Korozyon

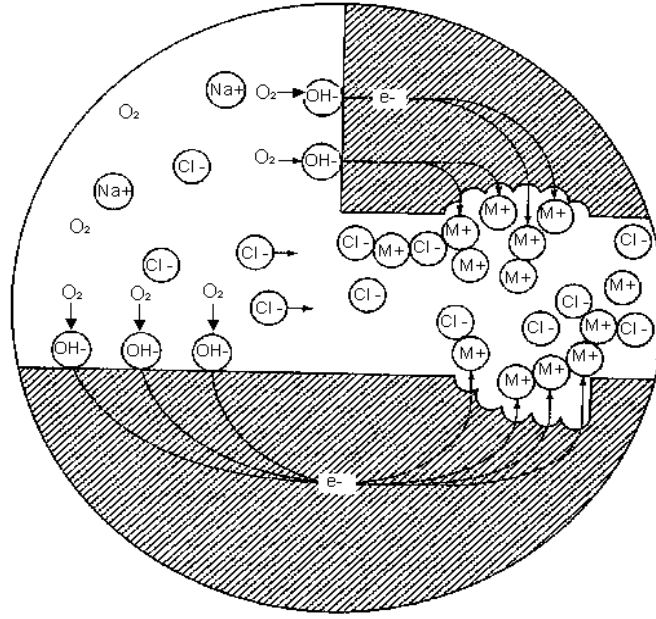
İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Metallerden daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur (Şekil 4.3). Böylece bir korozyon hücresi meydana gelir. Bu hücrede yalnız anot olan metal korozyona uğrar [72].



Şekil 4.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi [72].

### 4.2.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan çatlak, aralık veya cep gibi çözeltinin durgun halde kaldığı bölgelere oksijen transferi gerçekleşir. Bunun sonucu olarak bu bölgeler anot, çatlağın çevresindeki metal yüzeyleri katot olur. Çatlak korozyonu yalnız metal yüzeylerinde bulunan bir çatlakta değil, metal olmayan bir malzeme ile metal yüzeyi arasında da meydana gelebilir (Şekil 4.4) [72].



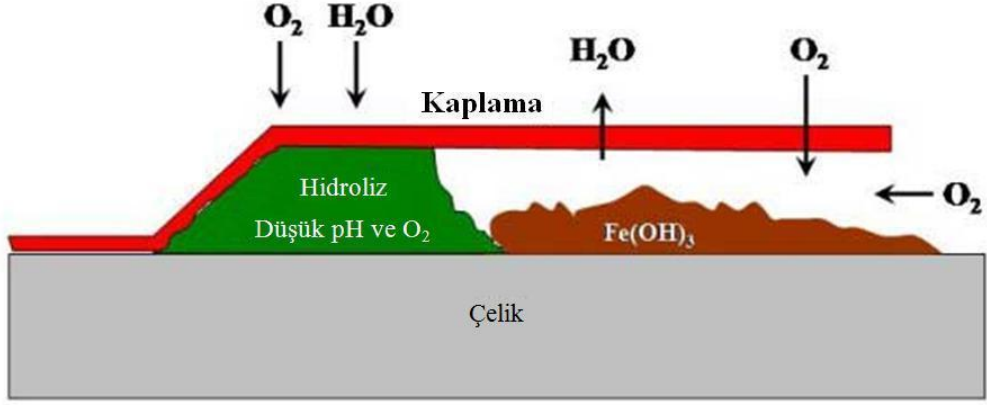
Şekil 4.4. Aralık korozyonunun şematik gösterimi [71].

### 4.2.4. Kabuk Altı Korozyonu

Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk (birikinti) altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Bu korozyon kabuk altının rutubetli olmasından ve yeteri kadar oksijen alamamasından kaynaklanır. Çünkü kabuk altında sıvı hareketi yoktur. Bu durum çatlak korozyonuna benzer bir ortam oluşturur. Kabuğun altı anot, kabuk çevresi ise katot olur [72].

#### 4.2.5. Fili Form Korozyonu

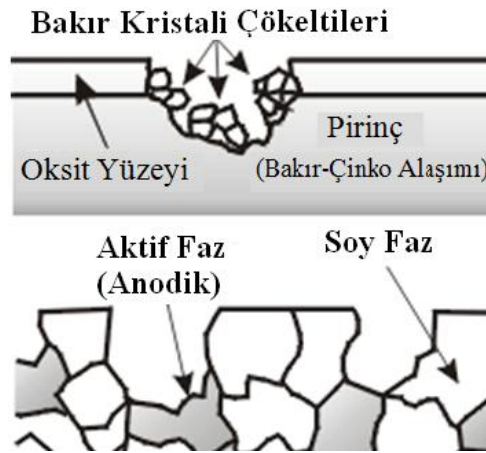
Metallerin yüzeyinde bulunan boya v.b. kaplamaların altında kaplama kalınlığının incelmesi bölgeden başlayarak kaplama altında devam eden bir korozyon türüdür (Şekil 4.5) [72].



Şekil 4.5. Fili form korozyonunun şematik gösterimi [72].

#### 4.2.6. Seçimli Korozyon

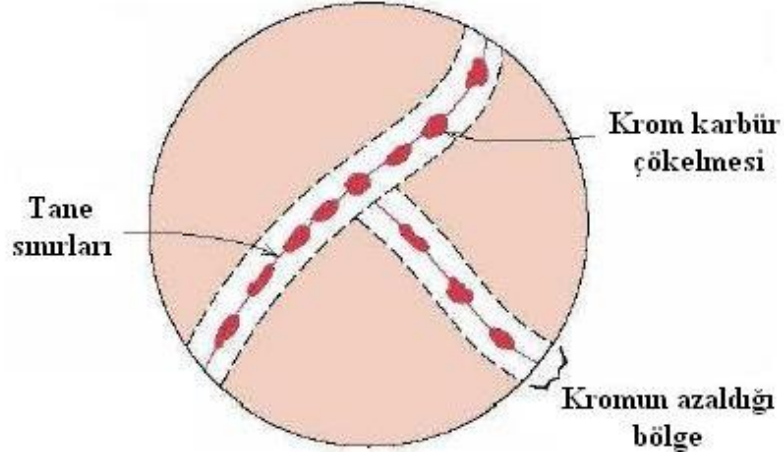
Bir alaşım içerisinde alaşıma katılmayıp serbest kalan elementlerin bir tanesinin korozyona uğrayıp diğer elementin korozyona uğramaması durumudur. Pirinç malzemeler bu korozyon türüne en iyi örnektir (Şekil 4.6) [72].



Şekil 4.6. Seçimli korozyonun şematik gösterimi [72].

#### 4.2.7. Taneler Arası Korozyon

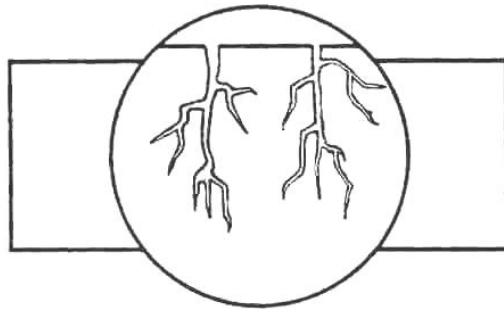
Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür (Şekil 4.7) [72].



Şekil 4.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge [73].

#### 4.2.8. Gerilmeli Korozyon

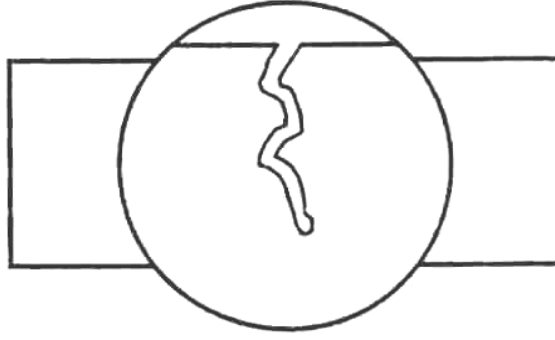
Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise, metalin çatlayarak kırılması, korozyonun başlaması için uygun bir ortam oluşur. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur (Şekil 4.8) [72].



Şekil 4.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi [72].

#### 4.2.9. Yorulmalı Korozyon

Periyodik olarak yükleme-boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş halde bulunan metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisiyle çatlayabilir. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede çatlamasına neden olur (Şekil 4.9) [72].

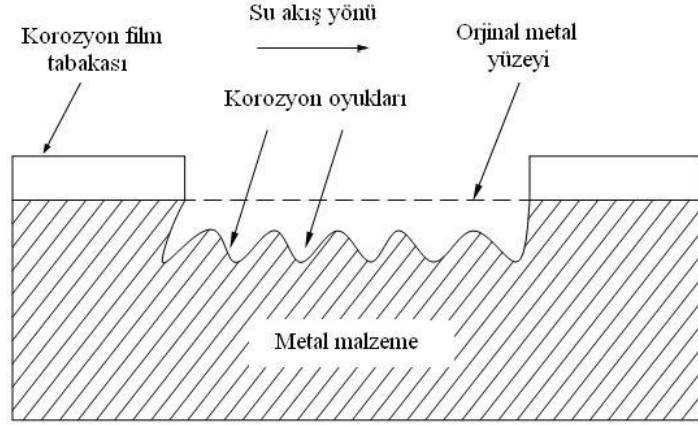


Şekil 4.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi [72].

#### 4.2.10. Erozyonlu Korozyon

Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni, oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Erozyonlu korozyon olayı daha çok hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda, (borular, dirsekler, valfler vb. ) söz konusu olabilir (Şekil 4.10) [72].





Şekil 4.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi [72].

### 4.3. KOROZYON HIZININ ÖLÇÜMÜ

Kimyasal olaylarda korozyon hızı kütle kaybı yöntemiyle, elektrokimyasal olaylarda ise tafel polarizasyon yöntemi, lineer polarizasyon yöntemi, alternatif akım empedans ölçme yöntemi ile ölçülür [69].

#### 4.3.1. Kütle Azalması Yöntemi

Kütle kaybindan korozyon hızı belirlenirken çözünmenin homojen olması ve korozyon ürünlerinin ya tamamen çözünür veya uygun bir çözeltilde çözünerek metal yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir [69].

$$\text{Korozyon hızı} = \frac{\text{kütle azalması}}{\text{metal yüzey alanı} \times \text{zaman}} \quad (4.7)$$

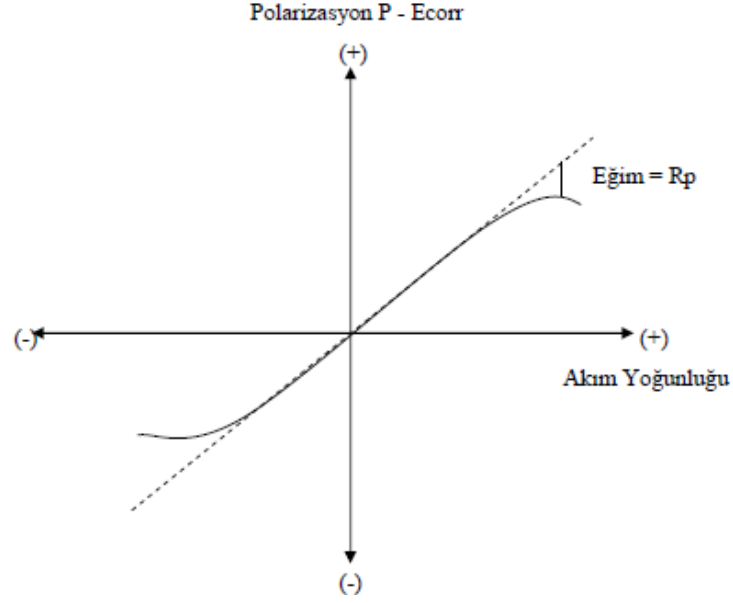
Bu yöntemde korozyon akımı Faraday yasası ile şöyle bulunabilir:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\Delta m \cdot F \cdot n}{\Delta t \cdot M} \quad (4.8)$$

Burada  $\Delta m$  kütle kaybını,  $M$  metalin molar kütleini,  $F$  Faraday sabitini,  $n$  söz konusu metalin çözünmeye geçme değerini ve  $\Delta t$  ise zaman aralığını göstermektedir [69].

### 4.3.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi

Akım potansiyel eğrisinin korozyon potansiyeli dolayındaki doğrusal kısmının eğiminden polarizasyon direnci bulunup, aşağıda ifade edilmiş Stern- Geary eşitliği kullanılarak korozyon hızı bulunur (Şekil 4.11) [69].



Şekil 4.11. Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması [70].

Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi  $I_{corr}$  ile ağırlık azalması arası ilişki aşağıdaki denklemlerle verilir;

$$I_{corr} = \Delta m.F.n / \Delta t.Mk \quad (4.9)$$

Burada;  $\Delta m$  ağırlık azalması, F Faraday sabiti; n alınan verilen elektron sayısı, Mk metalin atom gramının kütlesi,  $\Delta t$  zaman aralığıdır [70].

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad (4.10)$$

$I_{corr}$  korozyon akımını,  $\beta_a$  ve  $\beta_c$  sırasıyla anodik ve katodik tafel sabitlerini,  $R_p$  polarizasyon direncini gösterir [70].

### 4.3.3. Alternatif Akım Empedans Ölçme Yöntemi

Yöntemin esası, metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan çift tabakanın uygulanan alternatif akım ile empedansının ölçülmesine dayanmaktadır. Yöntemin uygulanmasında, çift tabaka kapasitesi ve metal yüzeyi ile çözeltinin iç kısmı arasındaki dirençlerden oluşan bir “elektronik eşdeğer devre” tasarlanarak polarizasyon direnci belirlenmeye çalışılmıştır. Bulunan polarizasyon direnci ( $R_p$ ) değeri Stern-Geary eşitliğinde yerine konularak, korozyon hızı hesaplanır [69].

### 4.3.4. Tafel Elektro-Polarizasyon Yöntemi

Çözelti ortamında malzeme belirli bir potansiyele sahiptir. Akım çekmezken oluşan bu potansiyel değeri açık devre potansiyeli olarak adlandırılır. Açık devre potansiyeli daha negatif veya daha pozitif yapılan taramalar bu bölgede yüzeyde meydana gelen reaksiyonlar hakkında bilgi verir. Bu davranışlar incelenerek deneye tabii tutulan malzemenin elektrokimyasal özellikleri ile ilgili sonuca varırız. Elde edilen bu katodik ve anodik eğriler vasıtasıyla  $\beta$ -Anodik ve  $\beta$ -Katodik eğriler ile  $E_{corr}$  potansiyel korozyon ve  $I_{corr}$  akım korozyon değerleri tespit edilir. Tespit edilen bu veriler vasıtasıyla malzemenin belirlenen ortamda belirlenen koşullarda elektrokimyasal özellikleri ve korozyon hakkında yorum yapılır [68].

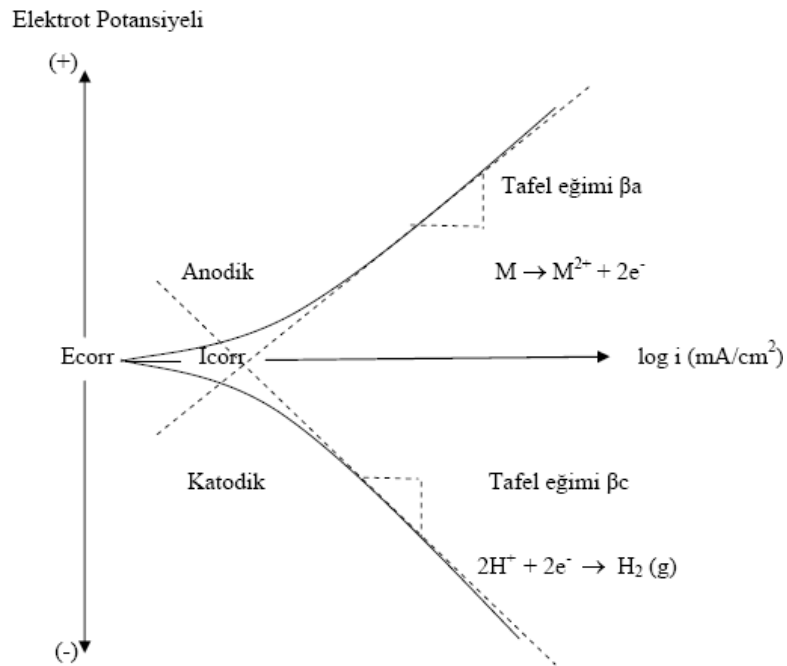
Korozyon metali ve çözelti arasında anodik ve katodik reaksiyonların oluşup dengeye gelmesiyle oluşur. Anodik reaksiyonda açığa çıkan elektron katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Bu yolla korozyon hızının belirlenmesi, korozyona uğrayan metalin anot ve katot yüzeyleri arasındaki akımı ölçülerek yapılır. Bu yöntemle korozyon olaylarında anot ve katot yüzeyleri birbirinden ayrılmadığından, iki kutup arasındaki akım dolaylı olarak ölçülür. Bu ölçüm korozyon hızı olarak kabul edilir [68].

Bu yöntemde de akım-potansiyel ölçümü vardır. Akım ya da potansiyelden biri denetimli olarak uygulanır ve diğerinin değişimi kayıt edilir. Sabit potansiyelde akım

değerlerinin ölçülmesi potansiyostatik yöntem, değiştirilen potansiyellere karşılık gelen akım şiddetlerinin ölçülmesi ise potansiyodinamik yöntemdir [68].

Korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik tafel eğrileri deneysel olarak belirlenir. Bu eğrileri çizebilmek için, çalışılacak potansiyel aralığı korozyon hızının belirleneceği yönteme göre seçilir. Şekil 4.12’de görülen E - log i polarizasyon eğrisi elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi uygulanan dış akım belli bir değere ulaştıktan sonra polarizasyon eğrisinde lineer bölge oluşuyor. Uygulanan dış akımın lineer olarak değiştirdiği bu bölgelere “Tafel Bölgesi” denir. Korozyon potansiyelinden başlayarak katodik ya da anodik yönde çizilen yarı-logaritmik akım-potansiyel eğrileri tafel eğimleri olarak bilinir (Şekil 4.12). Bu eğrilerin ekstra polarizasyonu alındığında kesişen noktadaki korozyon potansiyeli, buna karşılık gelen akım ise korozyon akımıdır. Korozyon akımı korozyon hızı hakkında bilgi verir [68].

Tafel doğrusunun eğimi deneysel olarak elde edilip korozyon hızı bulunur. Yani tafel ekstra polarizasyonu yönteminde anodik ve katodik tafel eğrilerinin çizgisel olan kısımları azaltılıp kesim noktalarından korozyon hızı ve korozyon potansiyeli bulunur [68].



Şekil 4.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri [68].

Anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda gerçekleştiğinden elektrot potansiyeli karma bir potansiyel değere yani  $E_{\text{corr}}$ 'a ulaşır. Buna karşılık gelen akımda  $I_{\text{corr}}$  korozyon akımı olur [68].

Korozyon hızının elektrokimyasal olarak ölçülmesi sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, korozyon potansiyelindeki akımın ölçülmesidir, çünkü bu potansiyelde dışarıdan bir ölçüm cihazı tarafından kaydedilebilecek herhangi bir akım olmaz. Sonuç olarak, korozyon akımını ( $I_{\text{corr}}$ ) ölçmek için yapılan herhangi bir elektrokimyasal yöntem, korozyon potansiyeli dışındaki potansiyellerdeki akımları ölçerek gerçekleştirilir. Böylece, korozyon potansiyelindeki akım yaklaşık olarak tahmin edilir, daha doğrusu yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için çeşitli formüller geliştirilmiştir [69].

Metal çözünmesi akım yoğunluğunu veren eşitlik:

$$I_{\text{anot}} = i_0 \exp(\beta\eta nF/RT) \quad (4.11)$$

Bu eşitlik tekrar düzenlendiğinde:

$$\eta_{\text{anot}} = b_{\text{anot}} \log(i_{\text{anot}} / i_0) \quad \text{eşitliği ortaya çıkar [69].} \quad (4.12)$$

Burada  $b_{\text{anot}}$  tafel katsayısıdır:

$$b_{\text{anot}} = 2,303 RT / \beta nF \quad (\text{Anot için}) \quad (4.13)$$

Katot söz konusu olduğunda:

$$b_{\text{anot}} \rightarrow b_{\text{katot}} \quad ; \quad i_{\text{anot}} \rightarrow i_{\text{katot}} \quad \text{olacaktır [69].} \quad (4.14)$$

Katodik ve anodik reaksiyonlar bir korozyon işlemi olarak birleştirildiğinde, metal çözülümünden kaynaklı anodik akım, redüksiyon nedeniyle oluşan eşit katodik akım ile dengelenmelidir [69].

Bu durumda  $I_{\text{corr}}$  korozyon akımıdır ve sadece tek bir potansiyelde gerçekleşebilir, o da  $E_{\text{corr}}$ , yani korozyon potansiyelidir.  $E_{\text{corr}}$ 'un değeri temel bir termodinamik anlama sahip değildir [69].

Korozyon potansiyeli genellikle anodik ve katodik reaksiyonların tafel analizine uygun şartlarda devam ettiği tafel bölgesindedir. Dolayısıyla, hem katodik, hem de anodik reaksiyonların polarizasyon eğrileri korozyon potansiyelinden uzakta potansiyellerde belirlenir. Dış devrede ölçülen akım her zaman  $i_{\text{anot}} + i_{\text{katot}}$  toplamıdır ve korozyon potansiyelinde ( $E_{\text{corr}}$ ) sifıra denk gelir. Bu fikirden yola çıkarak, korozyon potansiyeli ölçümü ile korozyon akımı aşağı yukarı belirlenebilir. Bunun için  $i_0$  değişim akım yoğunluğu (exchange current), tafel katsayıları ( $b_{\text{anot}}$ ,  $b_{\text{katot}}$ ), denge potansiyeli ( $E_e$ ) gibi metal çözünme reaksiyonuna dair veriler, deneyler sonucu bulunmalıdır [69].

$$E_{\text{corr}} = (E_e)_{\text{anot}} + b_{\text{anot}} \log (I_{\text{corr}}/ i_0) \quad (4.15)$$

$$I_{\text{corr}} = i_0 \exp [ 2,303 (E_{\text{corr}} - (E_e)_{\text{anot}}) / b_{\text{anot}} ] \quad (4.16)$$

## BÖLÜM 5

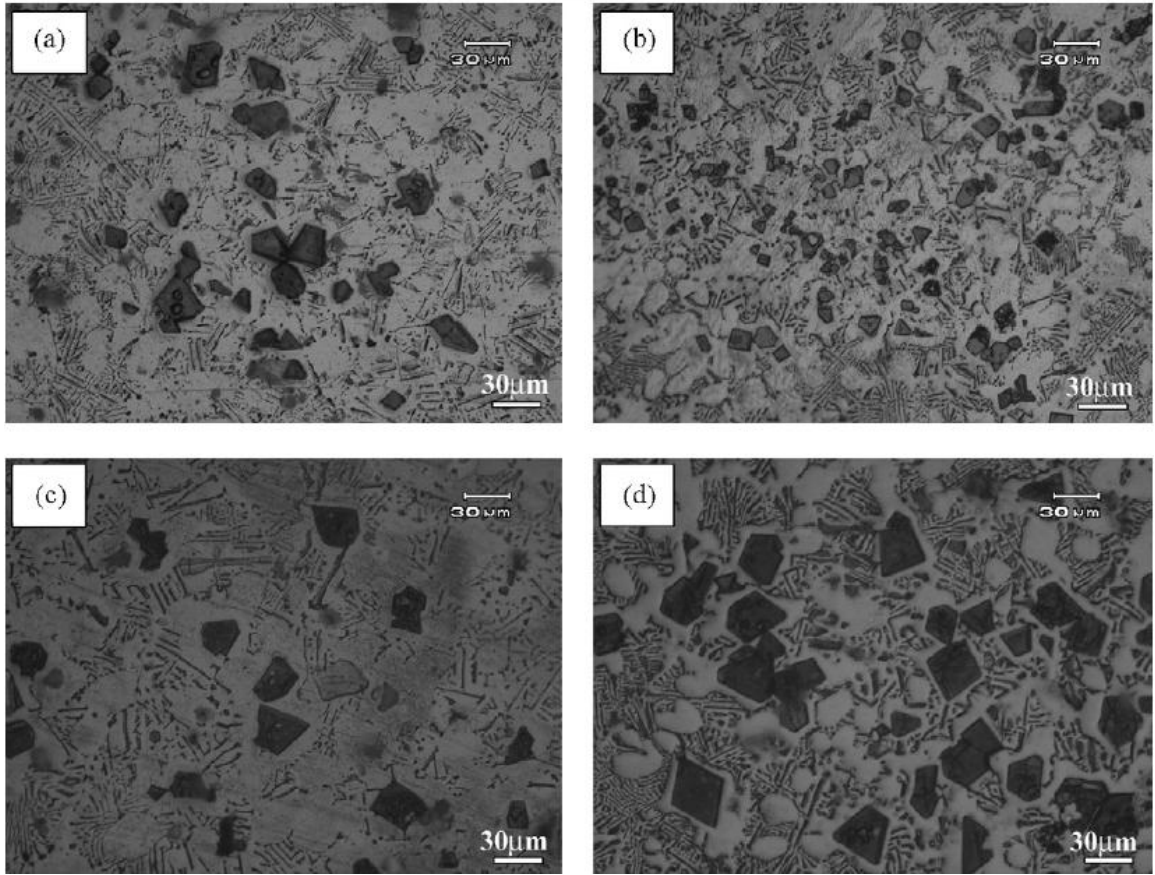
### LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 5.1. Mg ALAŞIMLARININ MİKROYAPI KARAKTERİSTİĞİ ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Tez çalışmasında üretilen kompozit malzemelerin mikro yapısında bulunan yapılar; partikül, intermetalik ve  $\alpha$ -Mg fazlarından oluşmaktadır. Bu fazlar hakkında yapılan çalışmalara göz atacak olursak;

Wang vd. yaptıkları çalışmada,  $Mg_2Si$  partiküllerinin alaşım elementlerine göre dağılım durumunu incelemişler ve XRD sonuçlarına da dayanarak aynı forma sahip yapıların  $Mg_2Si$  partikülleri olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda dışarıdan alaşıma ilave edilen alaşım elementlerinin  $Mg_2Si$  partiküllerini hacimsel ve boyutsal bakımdan değiştiğini belirlemişlerdir [75].

Guo vd. yaptıkları bir çalışmada Mg alaşımına Si ilavesinin partiküller üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki mikroyapılar bulunmuştur. Mikro yapılardan da anlaşılacağı üzere yapı içerisinde bulunan poligonal biçimdeki yapılar  $Mg_2Si$  partikülleridir. Alaşım elementi ilavesiyle bu yapıların durumu gözlemlenmiştir [76].



Şekil 5.1. Mg-5Si alaşımlarına farklı oranlarda Bi ilave ederek elde edilen optik mikroskop görüntüleri a) % 0.2 Bi, b) % 0.5 Bi, c) % 0.8 Bi ve d) 1% Bi [76].

Ahlatçı yaptığı bir çalışmada Al-Si alaşımlarına farklı oranlarda Mg ilave ederek alaşımların aşınma ve korozyon özelliklerini incelemiştir. Al-Si alaşımına Mg ilavesiyle beraber  $Mg_2Si$  partiküllerinin miktarı ve boyutu artmıştır. Bu sayede alaşımın sertlik ve aşınma direnci gelişirken korozyon direncinde bir azalma gözlemlenmiştir [77].

Jaschik vd.  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının Mg-Al ikili sistemlerinde oluşabildiğini ve bu fazın yapıda değişiklikler meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu fazın yapıda kaba ve büyük taneler oluşturmak yerine matris fazın çevresinde yani tane sınırlarında ince bir şekilde dağıldığını ifade etmişlerdir [78].



Shabadi vd. Mg–Al ikili sisteminde tane sınırlarında Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalığının oluştuğunu ve bu fazın alaşımın korozyon ve yorulma dayanımına etki ettiği belirtilmiştir [79].

Barry vd. yaptıkları çalışmada bazı Mg alaşımlarına yaşlandırma ısıl işlemi uygulamışlardır. Yaşlandırma ısıl işlemi öncesi sertlik değerleri 45–65 HV seviyelerinde iken, yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında ise 65-85 HV seviyelerine çıkmıştır [80].

Bir başka çalışmada ise AZ91 Mg alaşımının yaşlandırma ısıl işlemi öncesi sertlik değeri 60-70 HV iken yaşlandırma ısıl işlemi sonrası 110-115 HV seviyelerinde ölçülmüştür [79].

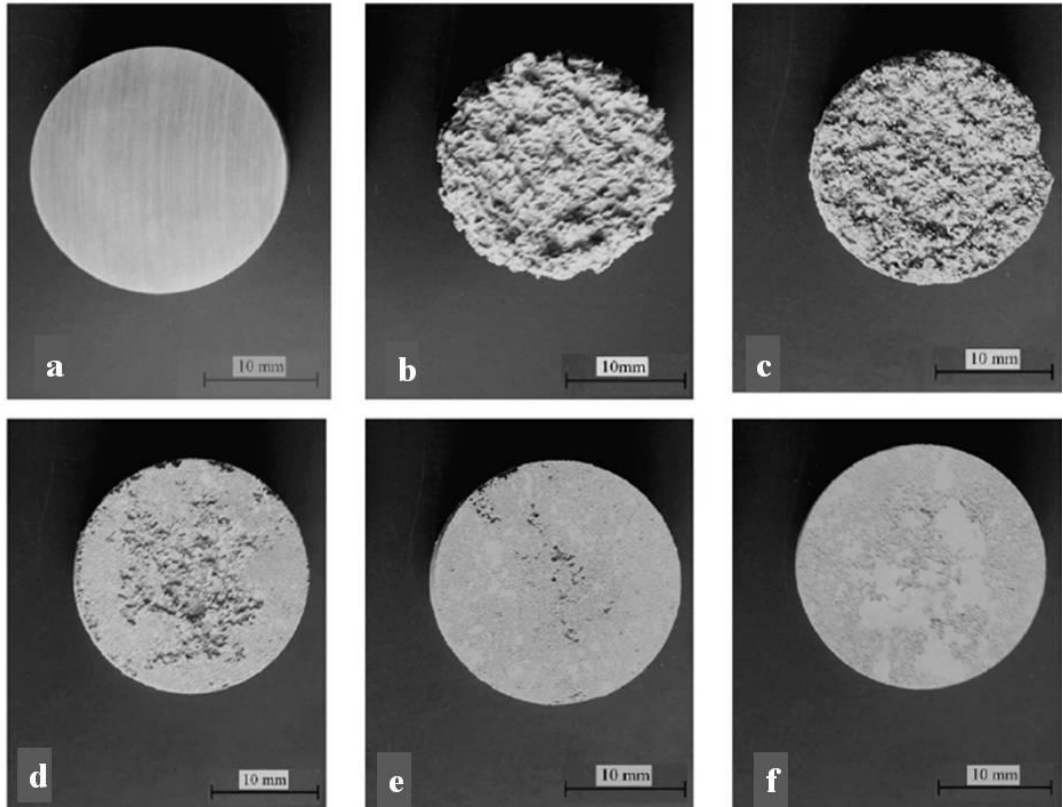
Smola vd. ise aynı yönde bir çalışma yapmış ve MgScMn ve MgScCeMn alaşımlarına ısıl işlem uygulamışlardır. Artan Mn ve Ce miktarı göz önüne alınarak çalışmalar farklı numunelere uygulanmıştır. Bu çalışmada da sertlik değerleri deney öncesi 60 HV seviyelerinde iken deney sonrası 118 HV seviyelerinde çıkmıştır [81].

Anyanwu vd. Mg-Zn-Al-Ca alaşımları üzerine çalışmış ve sertlik değeri ölçümleri yapmışlardır. Farklı oranlarla oluşturdukları alaşımların sertlik değerleri 65-115 HV arasında çeşitli değerler göstermiştir [82].

Ahlatçı ise yaptığı bir çalışmada Al<sub>12</sub>Si alaşımına farklı oranlarda Mg ilave ederek ekstrüze olarak ürettiği alaşımlarda aşınma ve korozyon deneyleri yapmıştır. Ama en önemlisi partikül boyutlarının büyük olması sebebiyle bu partiküllerin sertlik değerini ölçmeyi başarmış ve 700-800 HV(0,1) seviyelerinde bir sertlik değeri kaydetmiştir [77].

## 5.2. Mg ALAŞIMLARININ KOROZYON ÖZELLİKLERİ

Candan vd. piyasada yoğunlukla kullanılan bir Mg alaşımı olan AZ91 alaşımına farklı oranlarda Ti ilavesi yapmış ve üretilen yeni alaşımların korozyona karşı dirençlerini incelemişlerdir. AZ91 alaşımına yapılan Ti ilavesiyle alaşımlarda korozyon direnci yüksek bir artış göstermiştir. Bu artışın Mg-Al ikili sistemlerinde oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik fazına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bu intermetalik faz ötektik bir yapıda olup tane sınırlarına çökelmiştir. Sonuç olarak tane boyutu düşüş göstermiş ve artan intermetalik oranıyla korozyon direnci de artmıştır. % 3,5 g/l NaCl çözeltisi içerisinde daldırma metodu sonucunda ortaya çıkan makro görüntüler aşağıda verilmiştir (Şekil 5.2) [83].



Şekil 5.2. a) AZ91 alaşımı korozyon deneyi öncesi durumu, b) alaşımın korozyon deneyi sonrası AZ91, c) AZ91+0,2 Ti, d) AZ91+0,3 Ti, e) AZ91+0,4 Ti ve f) AZ91+0,5 Ti [83].

Candan vd. yaptıkları bir başka çalışmada yapıdaki intermetalik fazın korozyon direncine etkisini tartışmış ve bu fazın ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) korozyon ilerlemesine karşı bir

barikat konumunda bulunduğunu belirtmişlerdir. Korozyon olayı matris yapı olan  $\alpha$ -Mg yapısından başlamış ve intermetalik yapıya ulaştığında tamamen durmuştur. Sonuç olarak bu fazın yapıdaki hacim oranı ve kaba ve/veya kılcal bir durumda bulunması korozyon olayını yavaşlatmaktadır [32].

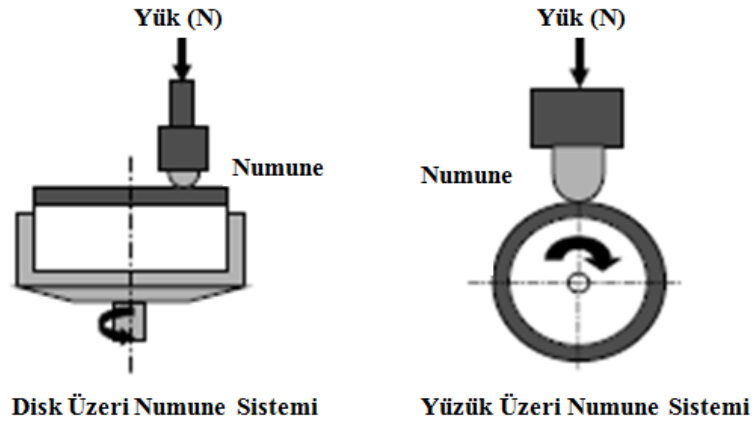
Mg–Al ikili sistemlerinde meydana gelen korozyon olayı “Mg ve Al Alaşımlarının Korozyon Direnci” isimli kitapta şu şekilde açıklanmıştır [84]. Yapıda bulunan Al metali Mg iyonlarını tetiklemektedir. Galvanik bir hücre oluşumuna sebebiyet veren bu iyonsal çözünme durumu korozyon direncini arttırmaktadır. Bu yüzden Mg ve Al arasında oluşacak bir fazın korozyon direnci çok yüksektir. Oluşan galvanik hücre ancak korozyon ortamının daha saldırgan olmasıyla oluşamaz duruma gelir. Bu saldırgan ortamda serbest hale geçen iyonlar Mg metalinden koparak solüsyon içerisine dağılır ve bu olay ortam pH değeri asidik ortamdan bazik ortama gidildikçe devam eder. Sonuç olarak bu saldırgan ortamda korozyon direnci düşer ve kopan iyonlar Mg metalinin ağırlıkça azalmasına sebep olur [84].

Üretilen kompozit malzemelerin yapısında bulunan partiküller hakkında aynı kitabın başka bir bölümünde bahsedilmiş Mg–Al–Si üçlü yapıları hakkında korozyon durumu irdelenmiştir. 6xxx, 7xxx serisi Al alaşımlarında meydana gelen  $Mg_2Si$  tanecikleri korozyon direncinde farklılık meydana getirmektedir. Bu partikülün yapısında bulunan Si elementi doğal katodik davranarak korozyonu etkilemektedir. Ancak partikül fazının bir yapıdaki hacimsel oranı korozyon direncini (-) veya (+) yönde etkilemektedir [84].

### **5.3. Mg ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ**

Mg ve Al alaşımları üzerine yazılmış bir kitapta  $Mg_2Si$  partiküllerinin alaşımın mekanik ve aşınma özelliklerine etkisi belirtilmiştir. Bu partikül taneciklerinin sertlik değerleri malzemenin kütleli sertlik değerinden çok yüksek olduğu için alaşımın hem sertliğini arttırmış hem de aşınma direncini geliştirmiştir [84].

Kutschera vd. yaptıkları bir çalışmada bazı Mg matrisli alaşımların ağırlık kayıpları baz alınarak aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Kullandıkları alaşımlara bazı takviyeler yaparak yeni kompozit malzemeler üretmişlerdir. Disk üzeri pim (numune) ve yüzük üzeri pim diye adlandırılan aşınma testlerini kullanarak alaşımların aşınma özelliklerini incelemişlerdir (Şekil 5.3). Aşınma deneyleri hava ortamında ve vakum altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma sonuçları vakum altında aşındırılan alaşımların aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir [81].



Şekil 5.3. Alaşımların aşındırıldığı deney düzenekleri [81].

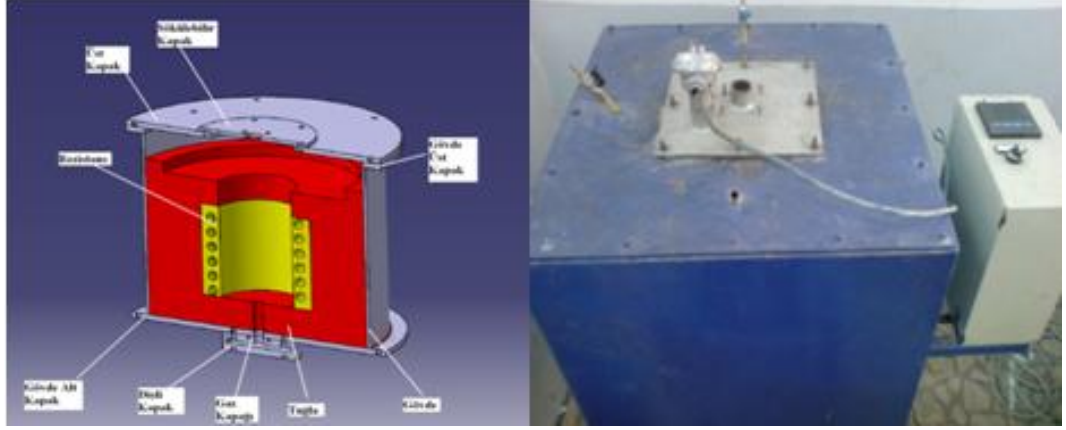
## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

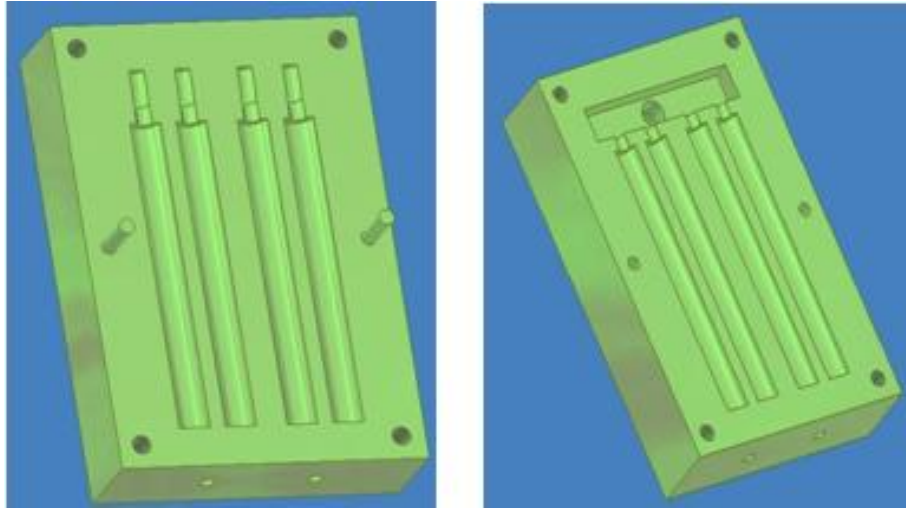
Bu çalışmanın amacı yerinde  $Mg_2Si$  partikül takviyeli Mg-%10 Al-12Si alaşımlarının aşınma ve korozyon özelliklerine Pb ilavesinin etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmada ticari % 10 Al-12Si ingot alaşımı ve saf Mg, yerinde  $Mg_2Si$  takviyeli kompozit üretimi için başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Üretilen  $Mg_2Si$  takviyeli Mg-Al-Si master alaşımına % 0-% 1 arasında 3 farklı oranda ticari kurşun ilave edilmiştir. Üretilen alaşımlar  $400^{\circ}C$ 'de 4 saat homojenleştirme ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Homojenleştirme ısıl işleminden sonra metalografik inceleme, sertlik ölçümü, korozyon ve aşınma deneyleri uygulanmıştır.

#### 6.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ

İncelenen kompozitlerin üretimi atmosfer kontrollü  $1200^{\circ}C$  kapasiteli elektrik rezistanslı fırında yapılmıştır (Şekil 6.1). Pb ilavesinden önce, Ar gazı atmosferinde ticari saflıktaki Mg-%10 Al-12Si alaşımı  $750^{\circ}C$ 'de ergitilmiş ve % 0,05 Stronsiyum (Al-ağırlıkça % 10 Sr ön alaşımı yardımı ile), % 0,2 kırmızı fosfor ve % 0,3  $NaCl+30MgCl_2+10KCl$  tuz karışımları bu ergiye ilave edilmiştir. Koruyucu madde ve Ar gazı ile kaplanmış eriyik yüzeyinden sıvı içerisine belirlenen oranlarda Pb ilave edilmiştir. Yukarıda adı geçen tüm ilaveler, oksidasyon kaybını dengelemek için ağırlıkça % 15'den daha fazla olarak şarj edilmiştir. Gaz alma işlemi, sıvı alaşıma ağırlıkça % 0,4  $C_6Cl_6$  kullanılarak yapılmıştır. Ergiyik, 20 mm çapında 250 mm uzunluğunda çubuk şekilli ingotlar üretmek için  $300^{\circ}C$ 'deki metalik kalıba dökülmüştür. Kullanılan metalik kalıbın şematik görünümü Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Döküm fırını kesit ve genel görünümü.



Şekil 6.2. Dökümün yapıldığı metalik kalıbın şematik görünümü.

## 6.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI İNCELEMESİ

Mikroyapı çalışması, standart metalografik prosedüre göre numuneleri hazırladıktan sonra optik ışık mikroskopunda (Şekil 6.3) ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. Metalografik prosedür; numuneleri 400, 600, 1000, 1500 ve 2000 mesh zımparalarla zımparalama ve ardından elmas solüsyonla (30  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  ve 1  $\mu\text{m}$ ) parlatma işlemini içermektedir. Mikroyapı resimleri, Leica DFC290 model kamera sistemli Leica DM ILM model optik ışık mikroskopunda ve ZEISS marka EVOLS10 model SEM cihazında, dağlanmamış numuneler üzerinden

çekilmiştir. SEM görüntülerinin çekilmesi sırasında mikroyapı görüntüsündeki açık ve gri renkteki lekeli bölgelerden yine aynı cihazda elektron difraksiyon taraması (EDS) analizleri yapılmıştır.



Şekil 6. 3. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik ışık mikroskobu.

Mikroyapısal bileşenlerin hacim oranı ve boyutları çizgi kesişme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bileşenlerin hacim oranları her bir numunenin beş farklı bölgesinden alınan düşük büyütmedeki resimler ve her bir resim üzerine çizilen 10 adet çizgi üzerinden yapılan ölçümlerle saptanmıştır.

### **6.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN XRD İNCELEMESİ**

İncelenen alaşımların yapısında bulunan fazlar, Rigaku D-max 2200 marka XRD cihazında tespit edilmiştir. 50 kV jeneratör gerilimi, 20 mA akımda  $20^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  açı aralığında ve  $0,07^{\circ}$  adım tarama boyutlu  $1^{\circ}/\text{dak.}$  hızda elde edilmiştir. Radyasyon oluşturmak için Cu- $K\alpha$  ışını kullanılmıştır.

#### 6.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN SERTLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İncelenen kompozitlerin sertliklerinin Pb ilavesiyle değişimini belirlemek için Shimadzu HMV mikro sertlik test cihazı kullanılmıştır. Sertlik değerleri Vickers batıcı ucu ile 200 gr ve 1000 gr batma yükü uygulanarak ölçülmüştür (Şekil 6.4). Sertlik değerleri, 10 adet başarılı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin yapısında bulunan partikül taneciklerinin de sertlik değerleri 10 gr basma yükü altında ölçülmüştür.



Şekil 6.4. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrosertlik test cihazı.

#### 6.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON DENEYLERİ

İncelenen numunelerin korozyon deneyleri oda sıcaklığında 35 g/l NaCl (% 3,5 NaCl) çözeltisi içerisinde hem ağırlık hem de korozyon potansiyeli ölçümlerine göre yapılmıştır.



### 6.5.1. Ağırlık Kaybı Metodu ile Yapılan Deneyler

Farklı oranlarda Pb içeren Mg-%10 Al-12Si alaşımları 10 mm çapında 5 mm yüksekliğinde silindirik şekilli olarak hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyleri üzerinde 3 mm çapında delik delinerek korozyona dayanıklı naylon ipliklerle çözelti içerisine daldırılmıştır. Korozyon deneyi öncesinde numunelerin tüm yüzeyleri metalografik prosedüre uygun olarak 1000 mesh zımparaya kadar parlatılmış ve deney öncesi numuneler saf su ortamında 5 dakika süre ile ultrasonik (Şekil 6.5) olarak temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur.



Şekil 6.5. Numune temizleme işlemlerinde kullanılan BEB marka ultrasonik temizleme cihazı.

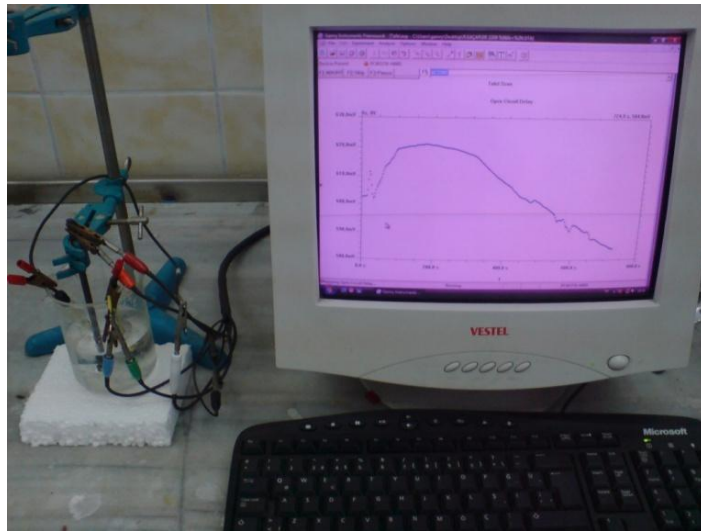
Çözelti hacminin numune yüzey alanına oranı yaklaşık olarak  $175 \text{ ml/cm}^2$ 'dir. Numunelerin ağırlık kayıpları, 3 saat aralıklarla toplam 24 saat süre içerisinde 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik terazide (Şekil 6.6) ölçülmüştür. Deney sonuçları, numunelerin birim yüzey alanı başına düşen ağırlık kaybına göre  $\text{gr/mm}^2$  cinsinden değerlendirilmiştir.



Şekil 6.6. Ağırlık kayıplarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka XS 220A model hassas terazi.

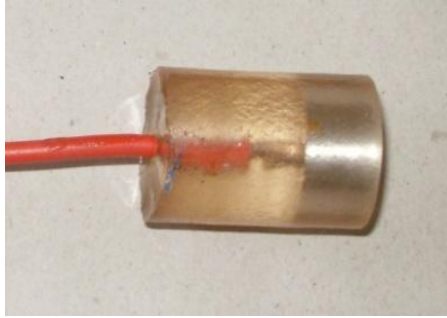
### 6.5.2. Potansiyodinamik Polarizasyon ile Yapılan Deneyler

Potansiyodinamik korozyon deneyleri, DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300mA potansiyostat/galvonostat cihazı (Şekil 6.7) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



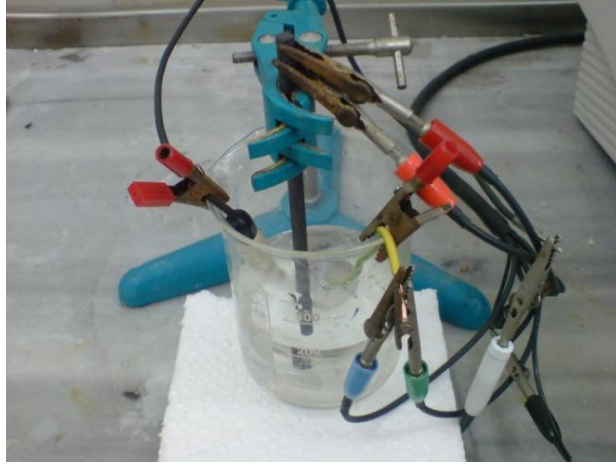
Şekil 6.7. Tafel-polarizasyon sistem düzeneği.

Korozyon deney numuneleri (çalışma elektrotu) Şekil 6.8’de görüldüğü gibi iletkenliği sağlayabilmek amacıyla arka yüzeyine 1,5 mm çapında 150 mm uzunluğunda bakır tel lehimlenmiş ve yalnızca elektrolit ile temasta olması istenen yüzeyleri açıkta kalacak şekilde reçine ile kaplanmıştır. Numunelerin yüzeyleri standart metalografik yöntemle 1000 mesh zımparaya kadar zımparalanmıştır. Korozyon deneyine başlamadan önce numuneler, saf su ortamında 5 dakika süre ile ultrasonik olarak temizlenmiş ve ardından alkol ile durulanarak kurutulmuştur.



Şekil 6.8. Potansiyostat deneylerinde kullanılan numune örneği.

Deney hücresi olarak cihazın özel cam beher sistemi kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında yapılmış olup deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak 0,197 cm<sup>2</sup> sabit yüzey alanına sahip incelenen alaşımlar, karşı elektrot görevini yapan 6mm çapında karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Çalışma elektrotu ile karbon elektrot yüzeyleri karşılıklı gelecek şekilde belirli uzaklıkta, referans elektrot ise çalışma elektrotuna olabildiğince yakın yerleştirilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Potansiyodinamik korozyon deney hücresi.

Korozyon deneyleri sırasında elektrolit içine çalışma elektrotunun ve referans elektrotunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dakika süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline ( $E_{\text{corr}}$ ) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -0,5'den 0,5 V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak çizilmiştir. DC korozyon yazılımı yardımıyla tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli ( $E_{\text{corr}}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{\text{corr}}$ ) hesaplanmıştır. Tüm deneyler, her bir alaşım grubu için en az ikişer defa olmak üzere polarizasyon eğrileri birbirlerini doğrulayınca kadar tekrar edilerek sonuçların daha güvenilir olmasına çalışılmıştır.

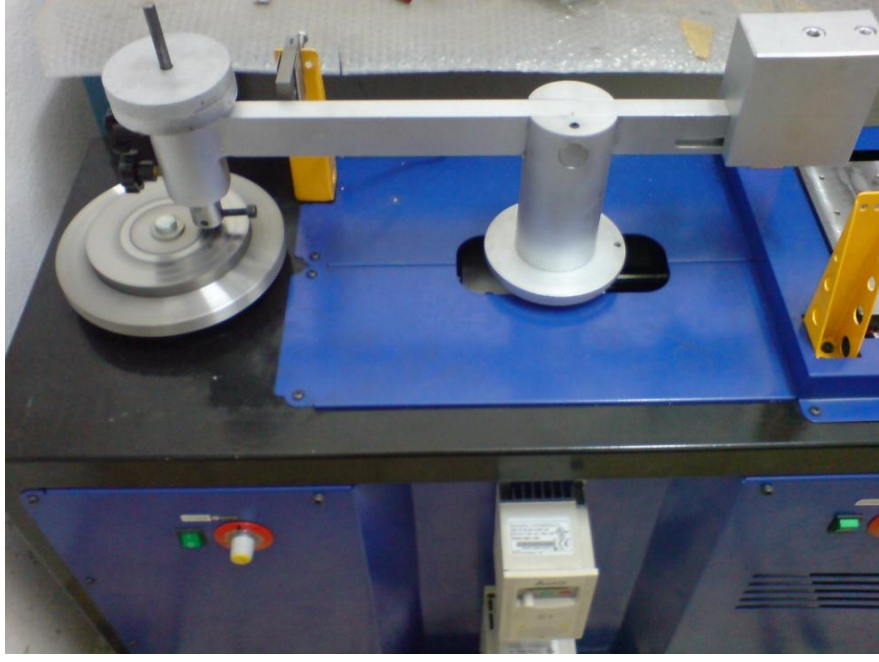
Gerek ağırlık kaybı ve gerekse potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrasında numuneler, çözelti içerisinden çıkartılarak saf su ortamında 5 dakika süre ile ultrasonik olarak temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur. Korozyon mekanizmasının belirlenmesi için korozyon yüzeyleri ve kesitleri metalografik olarak hazırlanarak optik mikroskop ve SEM ile incelenmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).

## 6.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DENEYLERİ

İncelenen kompozitlerin kuru ortam aşınma deneyleri pim üzeri disk tipi (Şekil 6.11) aşınma cihazında yapılmıştır. İncelenen numunelerin aşınma deneyleri sırasında karşı malzeme olarak AISI 4140 (DIN 1.7225) kalite ıslah çeliğinden (198 HB) imal edilmiş disk üzerinde yapılmış ve 6 mm çapında 20 mm yüksekliğinde deney numunesi kullanılmıştır.



Şekil 6.11. Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma cihazı.

Numuneler; 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 0,5 m/s kayma hızında 2000 m aralıklarla toplamda 10000 m kayma mesafesinde test edilmiştir. Deney öncesi ve sonrası numuneler 0,0001 gr hassasiyetine sahip elektronik terazide ağırlıkları ölçülmüş ve deney sonuçları ağırlık kaybına göre değerlendirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için numune yüzeyleri optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 7.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN KİMYASAL ANALİZLERİ

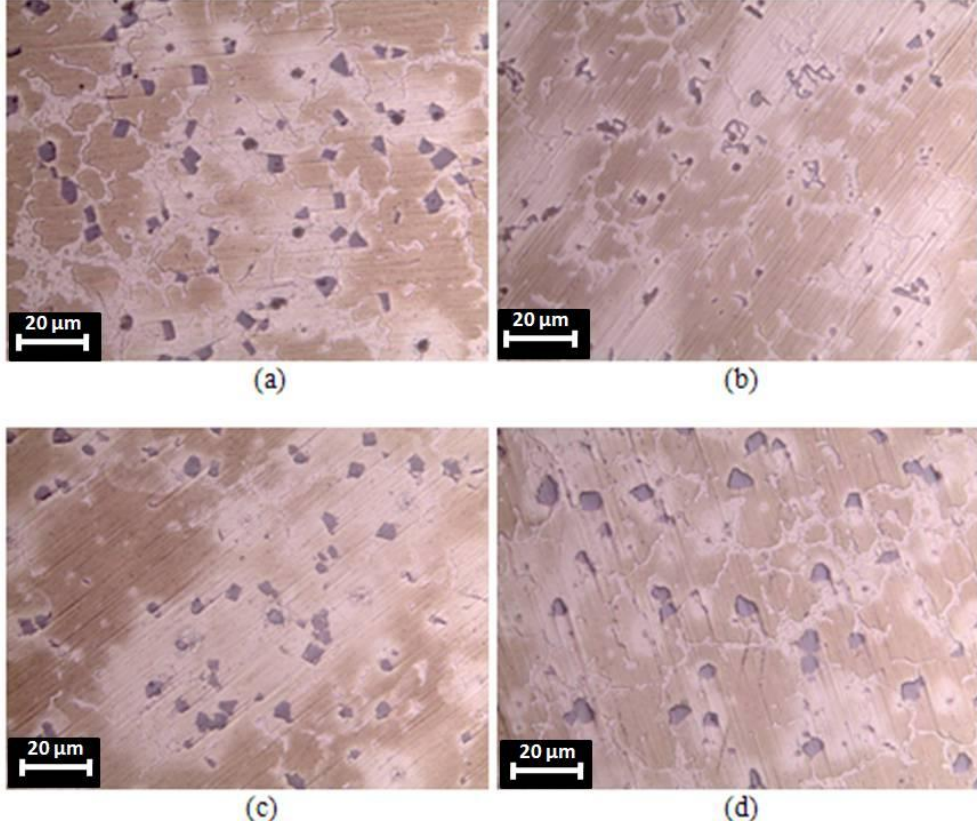
Bu çalışmada üretilen farklı oranlarda Pb içeren Mg- %10Al-12Si alaşımlarının kimyasal analizleri Çizelge 7.1 'de verilmiştir. Üretilen kompozitler MgAlSi-XPb kod sistemiyle verilmiş olup X değeri yerine 0 ile 1 arasında değişen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 7.1. Üretilen kompozitlerin kimyasal analizleri.

	Mg	Al	Si	Pb
MgAlSi-0Pb	80,23	17,42	2,25	0
MgAlSi-0.2Pb	81,69	15,75	2,01	0,31
MgAlSi-0.5Pb	82,01	15,01	2,22	0,65
MgAlSi-1Pb	81,25	14,84	2,26	1,55

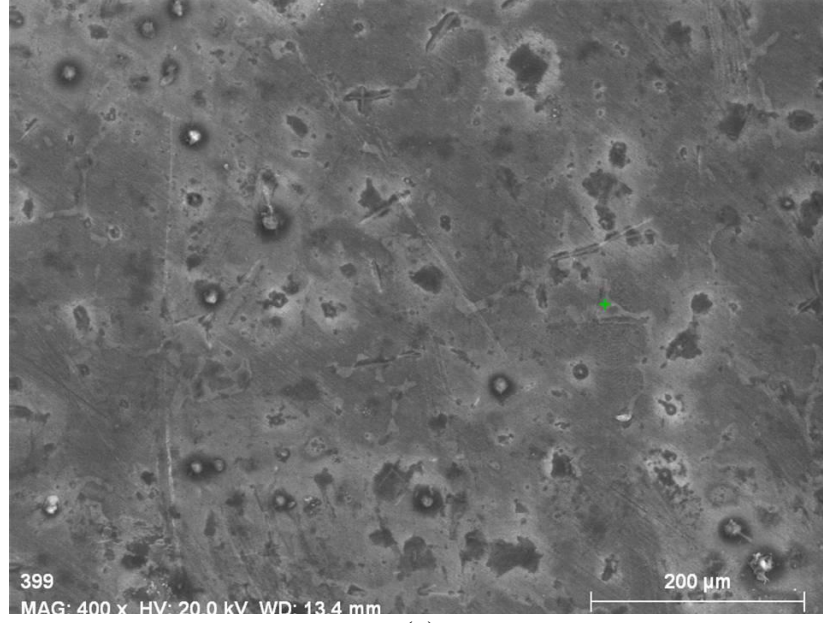
#### 7.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

Bu çalışmada üretilen farklı oranlarda Pb içeren kompozit malzemelerin optik ışık mikroskopunda çekilen mikro yapıları Şekil 7.1'de verilmiştir. İncelenen mikro yapılar matris (açık gri renkli), koyu renkli keskin köşeli partiküller ve matrisin arasında tane sınırlarında çökelmiş intermetalik fazlardan oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 7.2 'de SEM görüntüleri görülmektedir.

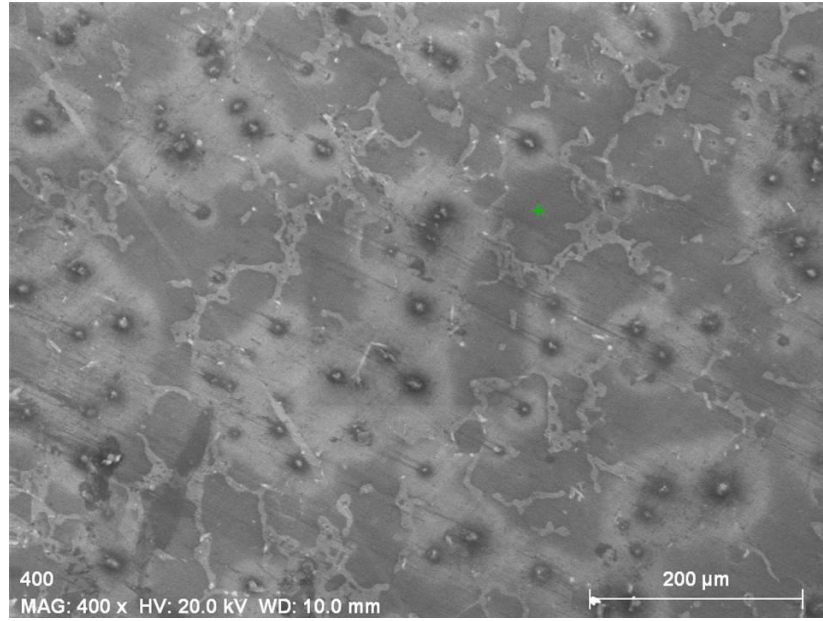


Şekil 7.1. Üretilen alaşımların optik mikroskop görüntüleri; a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0,2Pb, c) MgAlSi-0,5Pb ve d) MgAlSi-1Pb.





(a)



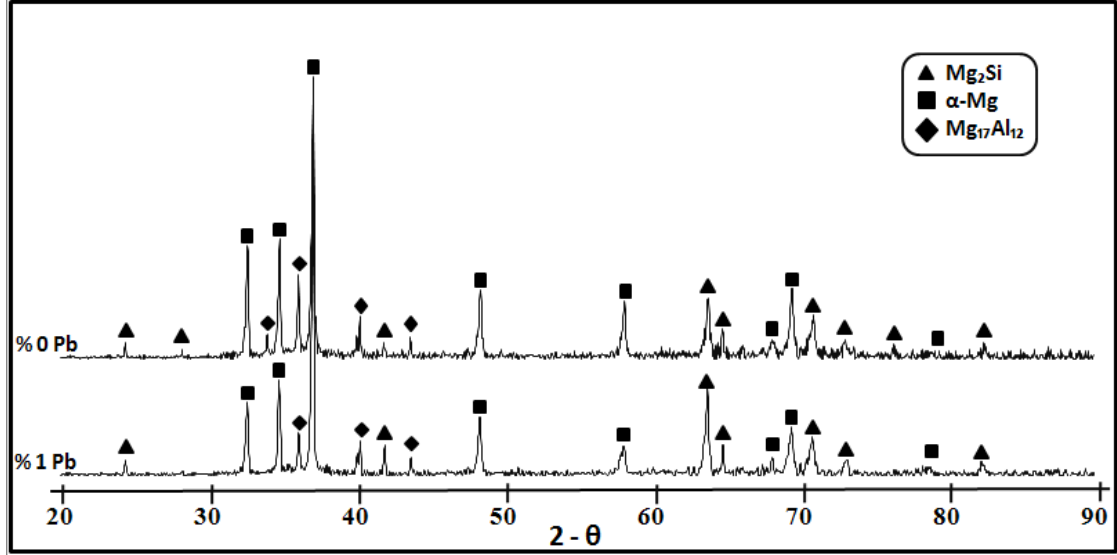
(b)

Şekil 7.2. Üretilen alaşımların SEM görüntüleri; a) MgAlSi-0Pb ve b) MgAlSi-1Pb.

### 7.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLEŞENLERİNİN YAPI ANALİZ SONUÇLARI

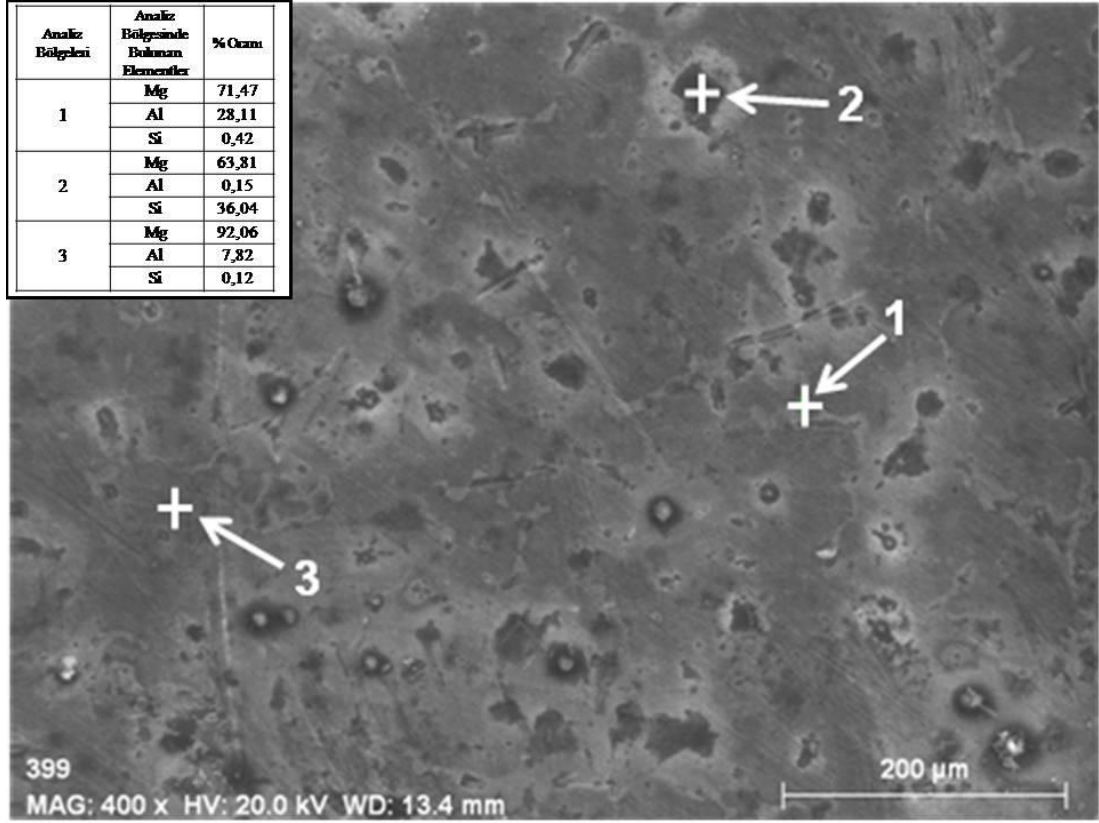
İncelenen farklı oranlarda Pb içeren MgAlSi-xPb kompozitlerin yapısında bulunan bileşenlerin yapı analizleri, XRD testi ve SEM' de gerçekleştirilen EDS testleri ile

yapılmıştır. İncelenen alaşımların XRD analiz sonuçları Şekil 7.3’de verilmiştir. Şekil 7.3’de gösterilen XRD sonuçları göz önünde bulundurularak mikroyapı bileşenleri  $Mg_2Si$  (koyu renkli keskin köşeli poligonal partiküller),  $Mg_{17}Al_{12}$  (alüvyon taşıyan bir nehir görünümünde intermetalikler) ve  $\alpha$ -Mg matrisi(kara parçası şeklinde açık gri renkli bölge)dir.



Şekil 7.3. Üretilen kompozit malzemelerin XRD paternleri.

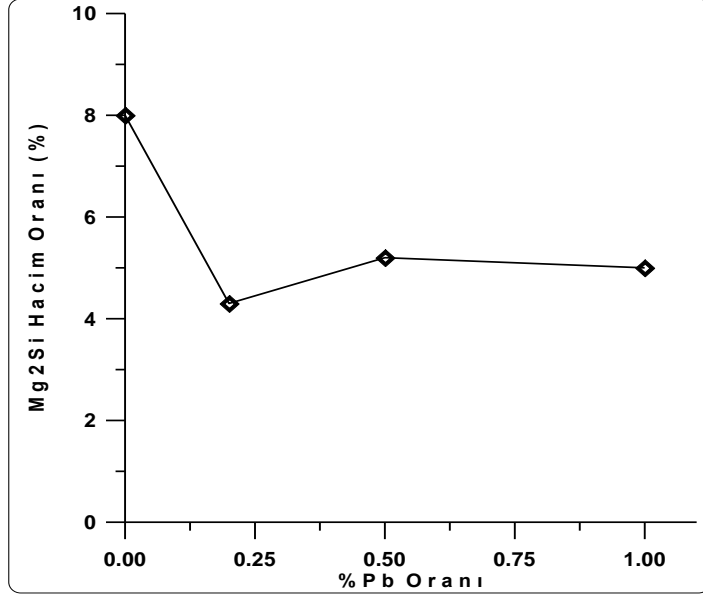
Üretilen kompozit malzemelere uygulanan EDS analiz bölgeleri Şekil 7.4’de verilmiştir. Yapıda oklarla gösterilen bölgelerin EDS analiz sonuçları ise Çizelge 7.2’de listelenmiştir.



Şekil 7.4. İncelenen MgAlSi alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

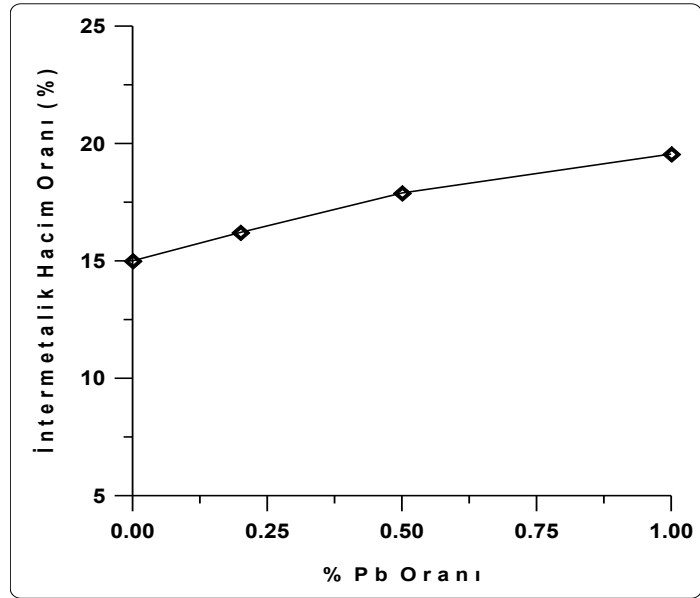
#### 7.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN GÖRÜNTÜ ANALİZ SONUÇLARI

Mikroyapı resimleri incelenerek belirlenen  $Mg_2Si$  partiküllerinin % hacim oranının Pb alaşım elementi ilavesi ile değişimi Şekil 7.5’ de verilmiştir. İncelenen alaşımlara Pb ilavesiyle  $Mg_2Si$  partiküllerinin hacim oranı azalma eğilimindedir. % 0,2 Pb ilavesiyle  $Mg_2Si$  hacim oranı belirgin bir şekilde azalmış ve artan Pb ilavesiyle yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



Şekil 7.5. Mg<sub>2</sub>Si hacim oranı.

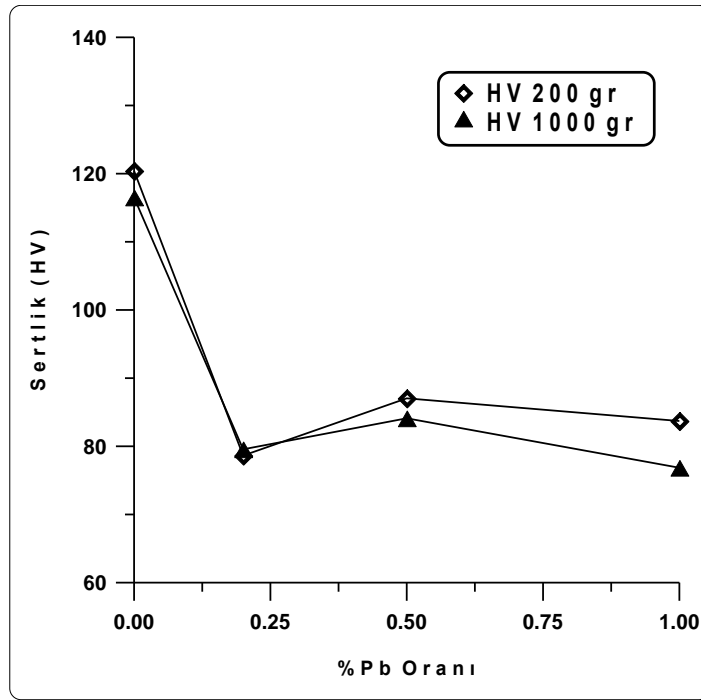
Mikroyapı analizlerinde bulunan diğer bir faz olan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik fazında ise hacim oranı giderek düşmüş ancak % 1 Pb ilavesi sonucunda diğer Pb ilavesi oranlarına göre daha yüksek bir seviyede çıkmıştır (Şekil 7.4).



Şekil 7.6. İntermetalik hacim oranı.

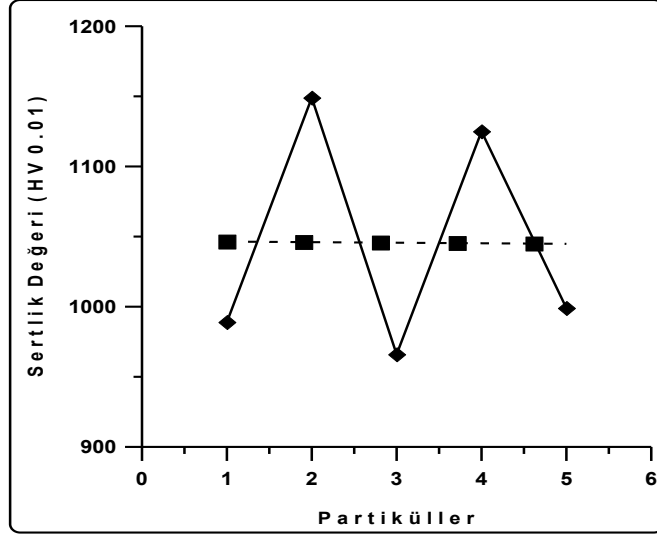
## 7.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI

İncelenen alaşımların kütesel sertlikleri (HV 0,2 ve HV 1,0) Pb içeriğine bağlı olarak Şekil 7. 7’de verilmiştir. Deneyler iki ayrı yükte yapılmış ve yaklaşık değerler bulunmuştur. Sertlik değerleri, alaşım elementi ilavesi ile düşüş eğilimindedir. Pb ilavesiz kompozitlerde sertli değeri 120 HV seviyelerinde iken Pb ilavesi sonucu 80 HV seviyelerine düşmüştür. Pb ilavesi oranı arttıkça sertliklerde aşırı bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 7.7).



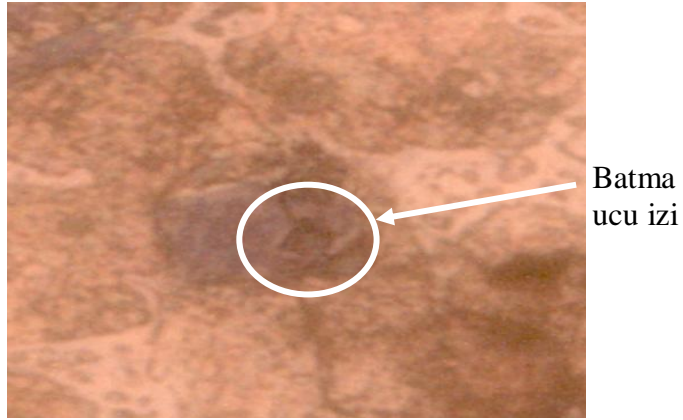
Şekil 7.7. Sertlik analizi sonuçları.

Kompozit malzemeler üzerinde yapılan kütesel sertlik ölçümleri sonrasında yapıda bulunan  $Mg_2Si$  partiküllerinin de sertlik değerleri ölçülmüş (5 adet) ve Şekil 7.8’de bu partiküllerin sertlik değerleri verilmiştir. Şekil 7.9’da ise partikül üzerinden sertlik değeri alındıktan sonra (10 gr basma yükü, HV 0.01) oluşan batma ucu izi gözükmemektedir.



Şekil 7.8. Farklı partiküllerden (5 adet) alınan sertlik değerleri.

Partikül yüzeyinden ölçülebilen sertlik değerleri sonucunda sertlik değeri ortalama olarak 1050 HV (0,01) olarak bulunmuştur.



Şekil 7.9. Sertlik ölçümü sonucu oluşan batma ucu izi.

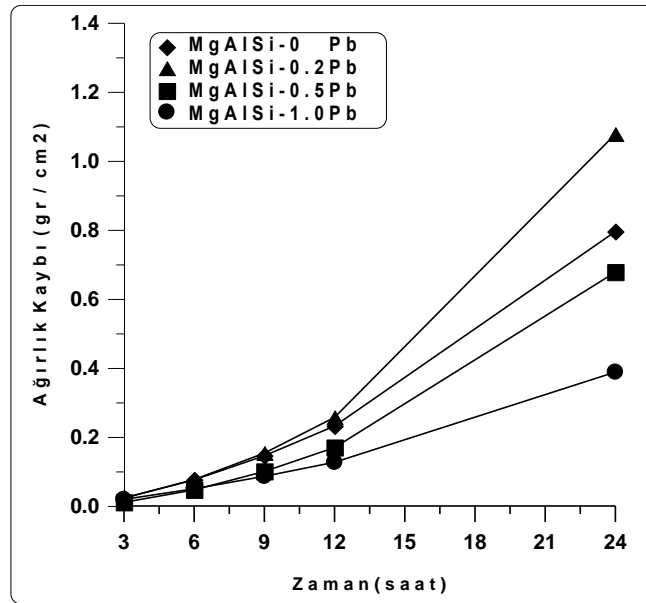
## 7.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI

Farklı oranlarda Pb elementi içeren kompozit malzemelerin daldırma yöntemiyle korozyon deneyleri ve potansiyodinamik korozyon deneyleri sonuçları alt başlıklarda verilmiştir.

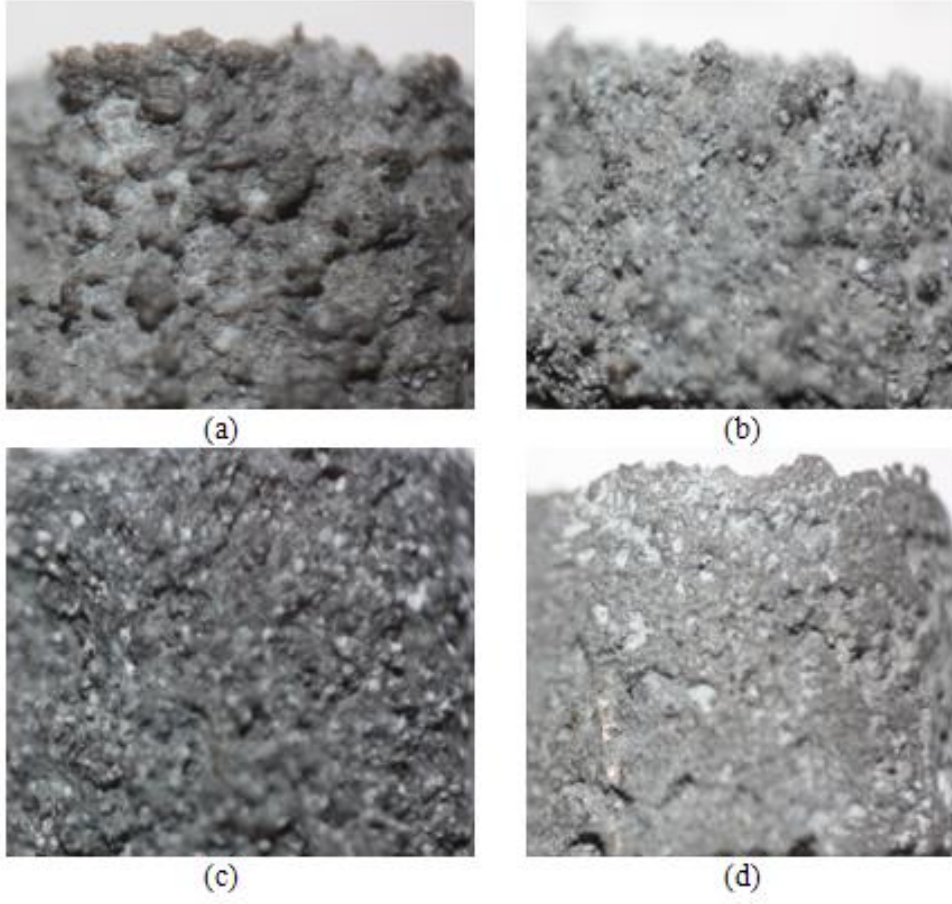
### 7.6.1. Daldırma Yöntemiyle Yapılan Korozyon Deney Sonuçları

Şekil 7.10'da incelenen alaşımların 35 g/l NaCl solüsyonundaki ağırlık kaybı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. İncelenen alaşımların ağırlık kayıpları zamana bağlı olarak kararlı bir artış sergilemiştir. Alaşımlara yapılan Pb ilavesi genel olarak ağırlık kaybını azaltmıştır. En düşük ağırlık kaybı % 1 Pb ilave edilen alaşımdan elde edilmiştir.

İncelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası korozyona uğramış yüzeylerinin makro görüntüleri ve SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de verilmiştir. Şekil 7.11'de görüldüğü gibi alaşıma Pb ilavesiyle korozyonun azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.10. MgAlSi-XPb alaşımlarının zamana bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi.



Şekil 7.11. İncelenen alaşımların daldırma korozyon sonrası makro görüntüleri  
a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0,2Pb, c) MgAlSi-0,5Pb ve d) MgAlSi-1Pb.



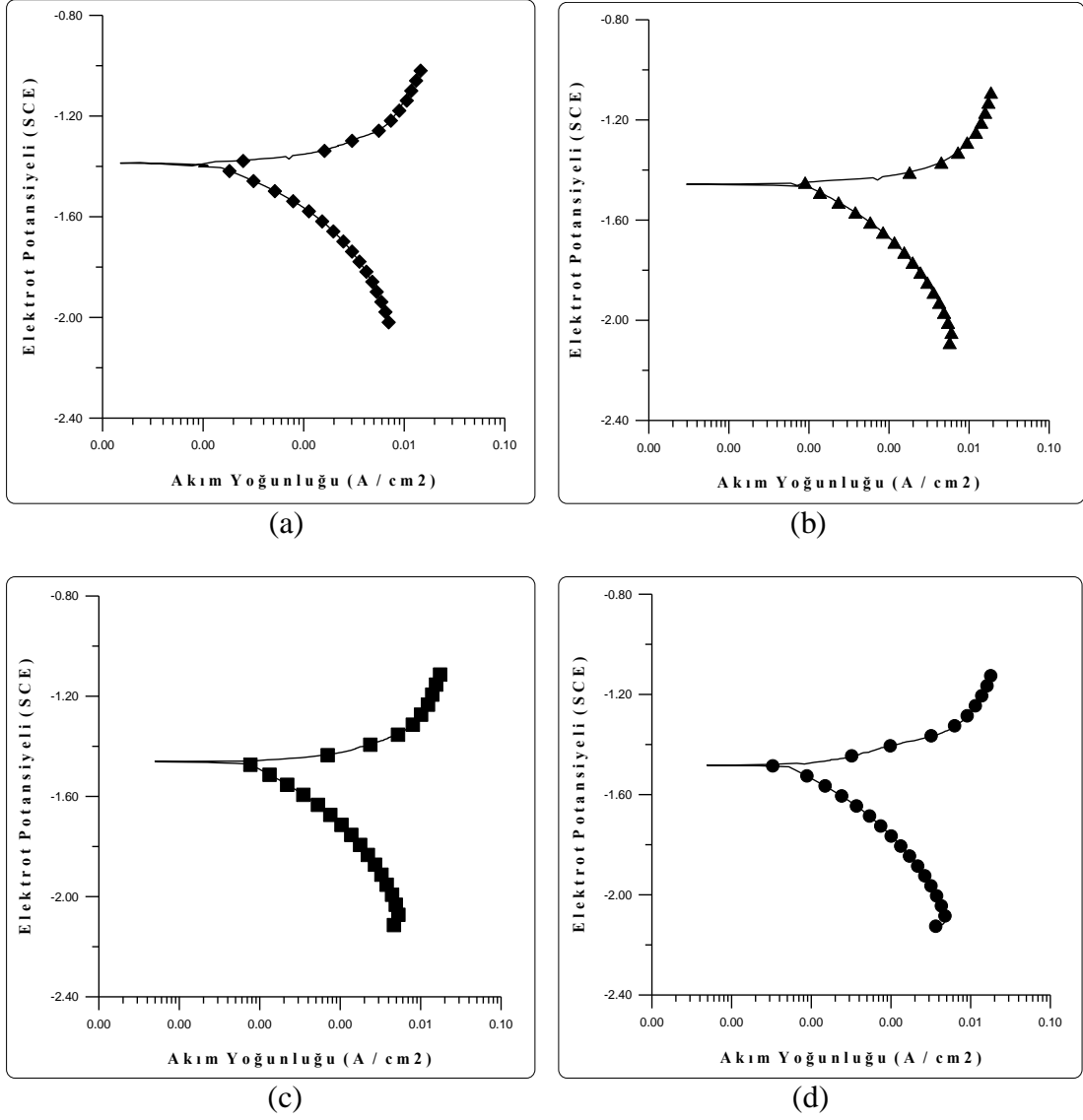
	SEM görüntüleri																		
	SEM	EDS																	
MgAlSi-0Pb		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Analiz Bölgeleri</th> <th>Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler</th> <th>% Oranı</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1</td> <td>Mg</td> <td>65.77</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>29.81</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>4.42</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">2</td> <td>Mg</td> <td>90.35</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>9.55</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0.09</td> </tr> </tbody> </table>	Analiz Bölgeleri	Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler	% Oranı	1	Mg	65.77	Al	29.81	Si	4.42	2	Mg	90.35	Al	9.55	Si	0.09
Analiz Bölgeleri	Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler	% Oranı																	
1	Mg	65.77																	
	Al	29.81																	
	Si	4.42																	
2	Mg	90.35																	
	Al	9.55																	
	Si	0.09																	
MgAlSi-1Pb		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Analiz Bölgeleri</th> <th>Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler</th> <th>% Oranı</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">1</td> <td>Mg</td> <td>56.29</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>41.71</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>2.00</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">2</td> <td>Mg</td> <td>91.43</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>8.57</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>	Analiz Bölgeleri	Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler	% Oranı	1	Mg	56.29	Al	41.71	Si	2.00	2	Mg	91.43	Al	8.57	Si	0.00
Analiz Bölgeleri	Analiz Bölgesinde Bulunan Elementler	% Oranı																	
1	Mg	56.29																	
	Al	41.71																	
	Si	2.00																	
2	Mg	91.43																	
	Al	8.57																	
	Si	0.00																	

Şekil 7.12. İncelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzey kesitlerinin SEM görüntüleri.

### 7.6.2. Tafel-Polarizasyon ile Yapılan Korozyon Deney Sonuçları

Üretilen kompozit malzemelerin 35 g/l oranındaki solüsyonda yapılan potansiyodinamik korozyon deneylerinin sonuçları Şekil 7.13’de verilmiştir. Korozyon potansiyeli/korozyon akımı eğrileri, incelenen tüm kompozitlerin korozyon potansiyellerinin yaklaşık olarak değiştiği, korozyon akımlarının ise % Pb oranının artmasıyla düştüğü göstermektedir. En yüksek korozyon akımı Pb ilavesi olmayan numunede iken % 1 Pb oranında ise korozyon akımı en düşük seviyededir.

Korozyon potansiyeli -1390 mV ile -1490 mV arasında değişirken korozyon akımı ise 525  $\mu\text{A}$  seviyelerinden 169  $\mu\text{A}$  seviyelerine kadar düşmüştür (Çizelge 7.3).



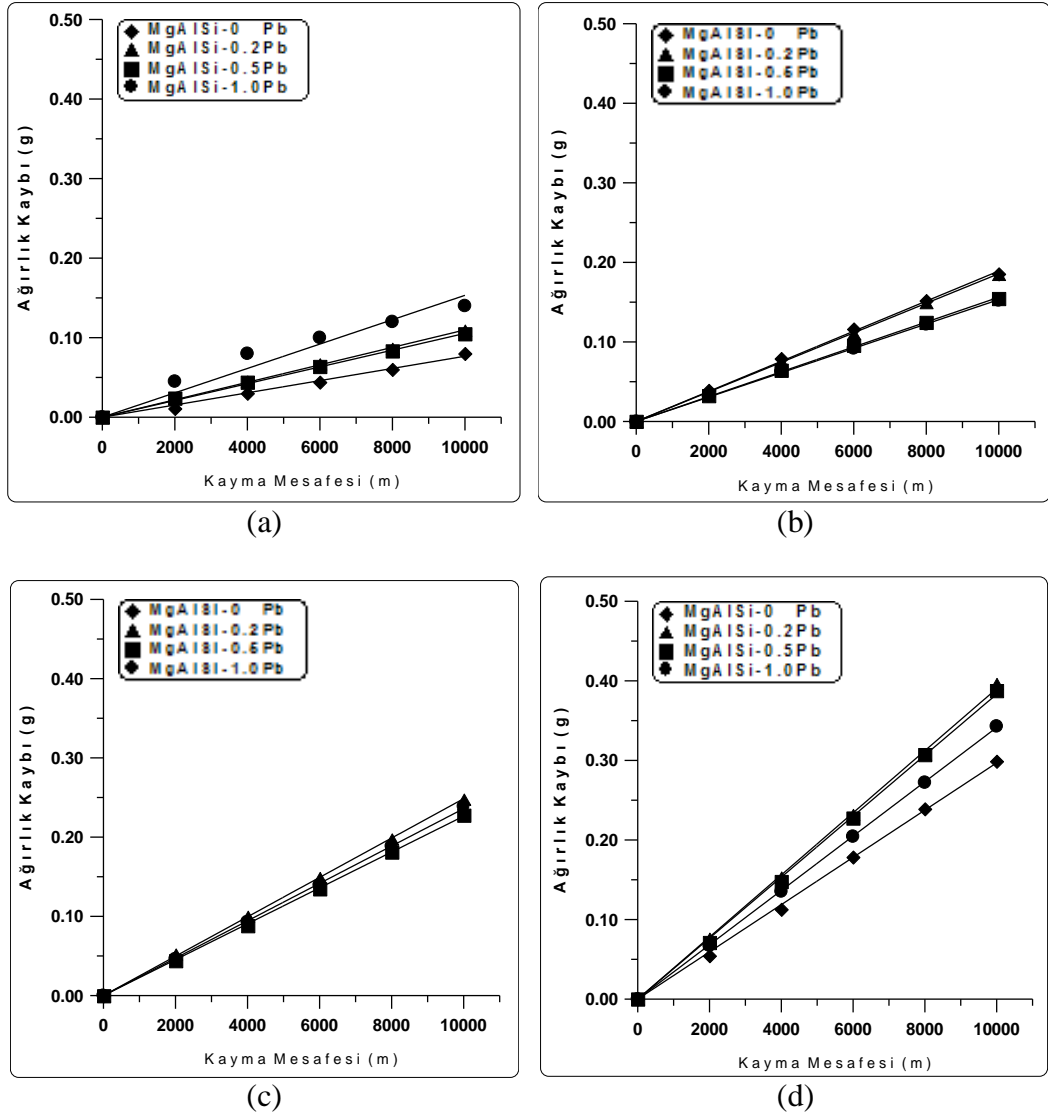
Şekil 7.13. İncelenen alaşımların polarizasyon eğrileri; a) MgAlSi-0Pb, b) MgAlSi-0.2Pb, c) MgAlSi-0.5Pb ve d) MgAlSi-1Pb.

Çizelge 7.2. Korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri.

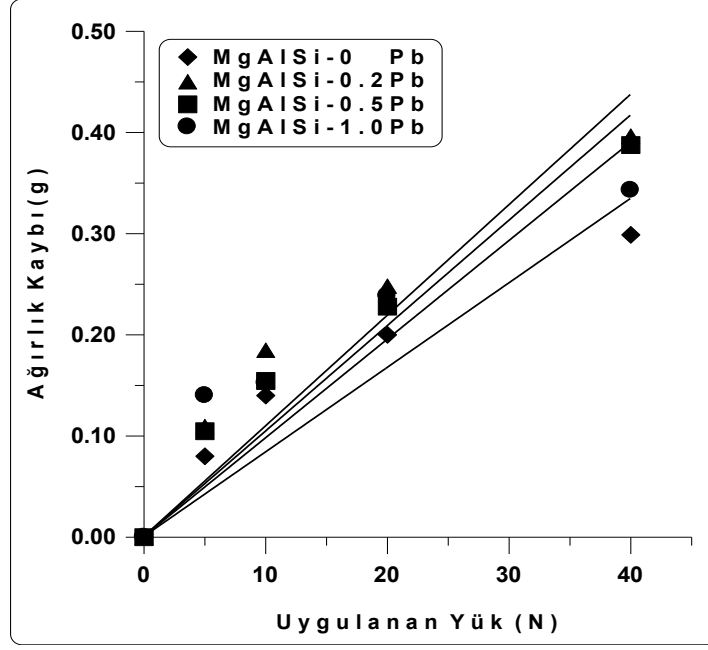
	MgAlSi-0Pb	MgAlSi-0,2Pb	MgAlSi-0,5Pb	MgAlSi-1Pb
Elektrot Potansiyeli (mV) $E_{kor}$	-1390	-1460	-1460	-1480
Korozyon Akımı ( $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ ) $I_{kor}$	525	332	230	169

## 7.7. KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DENEY SONUÇLARI

Tez çalışmasında üretilen farklı % Pb oranlarına sahip kompozit malzemelerin 5 N, 10 N, 20 N ve 40 N yük altında 2000 m aralıklı toplamda 10000 m kayma mesafesindeki ağırlık kaybına bağlı kalarak yapılan aşınma deneyi sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Deney sonuçlarına göre % 1 oranında Pb ilavesi yapılmış kompozit malzemelerin en düşük ağırlık kaybı gösterdiği gözlemlenmiştir. Pb ilavesinin artmasıyla aşınma direnci düşmüş ve kompozit malzemelerin ağırlık kayıpları giderek artış göstermiştir.

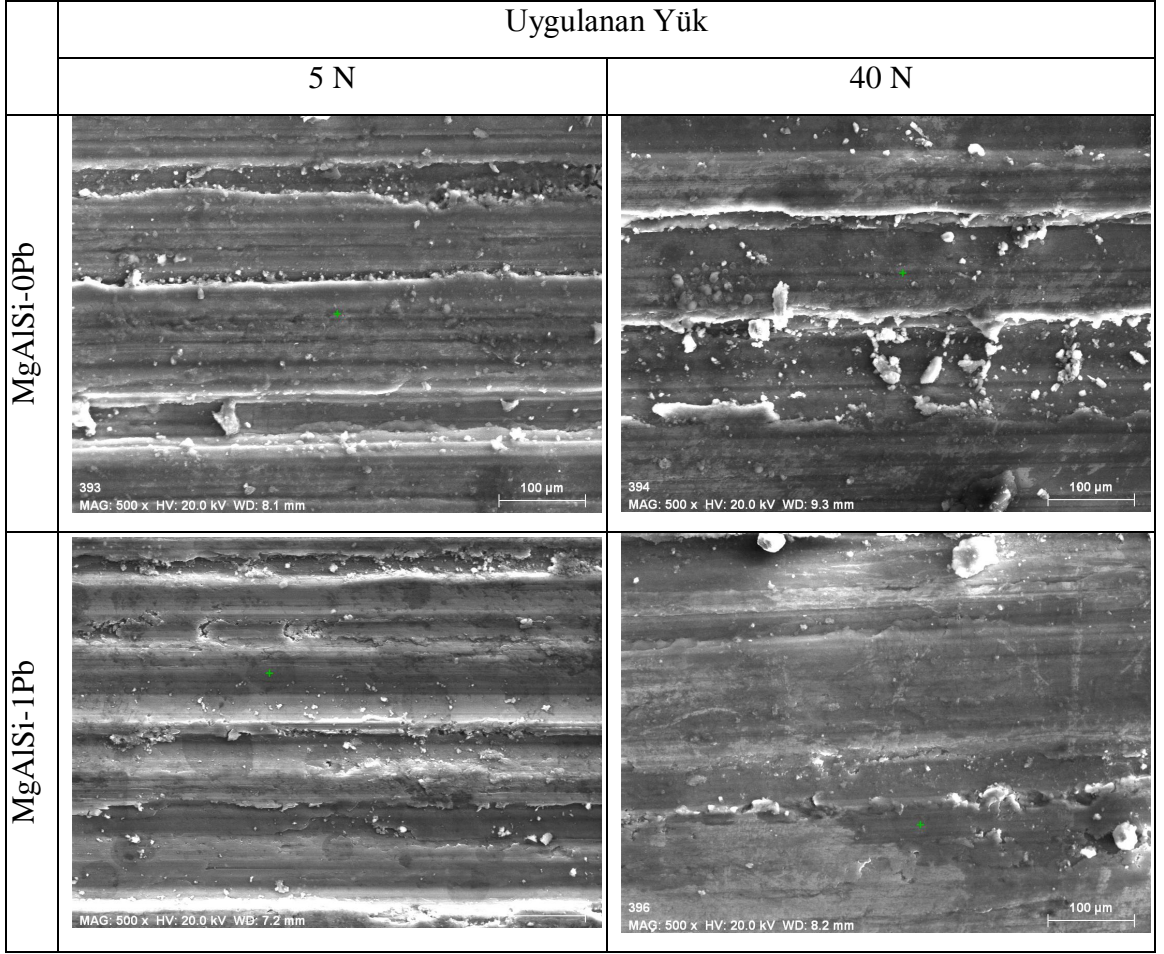


Şekil 7.14. MgAlSi-XPb alaşımlarının farklı yükler altındaki ağırlık kayıpları; a) 5 N, b) 10 N, c) 20 N ve d) 40 N.



Şekil 7.15. Toplamda 10000 m kayma mesafesi sonucundaki ağırlık kaybı grafiği.

Aşınma deneyine tabi tutulmuş kompozit malzemelerin deney sonrası SEM görüntüleri Şekil 7.16'da verilmiştir. Uygulanan yük açısından en düşük ( 5 N ) ve en yüksek ( 40 N ) yüklerin analizleri yapılmıştır. Düşük yüklerde hafif aşınma mekanizması olan adhesiv aşınma izi ve çok ince oyuklar oluşmuştur. Yüksek yüklerde ise şiddetli aşınma mekanizması olan yüzey çatlaklarının oluşumu ve ilerlemesi sonucu gerçekleşen parça kopmalarının belirtisi boşluklar ve iri oyuklar meydana gelmiştir.



Şekil 7.16. İncelenen alaşımların aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri.

## BÖLÜM 8

### DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

#### 8.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Bu çalışmada ticari olarak temin edilen Al ağırlıkça % 12 Si alaşımı ile saf Mg metali yerinde döküm yöntemiyle dökülmüştür. Oluşturulan bu kompozit malzemeler 2. bir döküm işlemine hazırlanmış ve alaşıma % 0,2, % 0,5 ve % 1 Pb ilavesi yapılmıştır. İncelenen mikro yapılar matris (açık gri renkli), koyu renkli keskin köşeli partiküller ve matrisin arasında tane sınırlarında çökelmiş intermetalik fazlardan oluşmaktadır. Bu fazların XRD ve EDS analizleri sonucunda (Şekil 7.3 ve Şekil 7.4) literatürle uyumlu olarak [45]  $\alpha$ -Mg (matris),  $Mg_2Si$  (keskin köşeli partiküller) ve  $Mg_{17}Al_{12}$  (intermetalikler) olduğu tespit edilmiştir.

İncelenen alaşımların bileşimi ötektik üstü olduğundan, katılaştırmanın ilk aşaması süresinde sıvı içerisinde oluşan çok kenarlı poligonal partiküller, birincil  $Mg_2Si$  partikülleri olarak tanımlanmıştır. Çok kenarlı  $Mg_2Si$ 'nin oluşum mekanizması, literatürde [5,23,26,34,74] açık bir şekilde şimdiye kadar açıklanmamış olmasına rağmen, Strontium, kırmızı fosfor ve tuz karışımları gibi bazı modifiye edicileri, birincil  $Mg_2Si$  partiküllerin morfolojisini kontrol etmek için  $MgAlSi$  alaşım eriyiklerine ilave edilmiştir. Var olan bir açıklama, modifiye edicilerin çekirdekleşme için aşılacağı gibi davrandığı, çekirdek sayısında artışa yol açtığı ve böylece birincil yerinde  $Mg_2Si$  partiküllerin morfolojisinin ve boyutunun değiştirildiği şeklindedir. Diğer açıklamalar ise, hem sıvı-katı ara yüzeyi hem de katı  $Mg_2Si$  fazının yüzey enerjilerinin modifikasyonu ile ya da katı-sıvı ara yüzeyinde Na veya K'un segregasyonu yardımıyla yerinde  $Mg_2Si$  çekirdeklerinin yüzeyini parçalayarak birincil yerinde  $Mg_2Si$  partiküllerinin anizotropik (aşırı) büyümesinin engellenmesi şeklindedir [5,23,26,74].

### 8.1.1. Kurşun Elementinin Mikro Yapıya Etkisi

Yapmış olduğumuz literatür çalışmasında [32,78,79] Mg-Al ikili sistemlerinde genellikle gözlemlenen intermetalik faz  $Mg_{17}Al_{12}$  fazıdır. Bu çalışmada da matrisi çevreleyen tane sınırlarında  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı belirlenmiştir. Mg metali içerisinde Pb metali 460°C sıcaklık altında % 45 seviyesine kadar çözünebilir. Pb ilavesi aynı zamanda intermetalik ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazını inceltip yapıda daha homojen dağılmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda partikül fazın ( $Mg_2Si$ ) hacim oranında da bir azalma meydana getirmiştir. Bunun başlıca sebebi yapıda oluşması muhtemel olan  $Mg_2Pb$  fazının hacimsel oranından kaynaklanmaktadır.  $Mg_2Pb$  fazı 250°C seviyelerinde oluşurken  $Mg_2Si$  partikül fazı 645°C seviyelerinde oluşmaktadır. Literatüre de dayanarak [78,79] bu fazın yapıda bulunma oranı yapıdaki dağılımda önemli bir etkidir. Ancak analizlerde  $Mg_2Pb$  fazı hacimsel oranının çok az olması sebebiyle belirlenememiştir(Şekil 7.1 - Şekil 7.5).

MgAlSi alaşımına ilave edilen Pb, çokgen şekilli partikülün ( $Mg_2Si$ ) hacim oranının azalmasına yol açmıştır (Şekil 7.5). Şekil 7.8'de alaşımın mikro yapısında bulunan  $Mg_2Si$  partikülünün üzerinden alınan sertlik değeri görülmektedir. Literatürle uyumlu olarak [77]  $Mg_2Si$  partikülünün sertliği ortalama 1050 HV civarındadır. Dolayısıyla incelenen alaşımlarda artan Pb ilavesiyle kütleli sertlik değeri düşmüştür (Şekil 7.7).

## 8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İNCELENMESİ

İncelenen alaşımlara uygulanan daldırma korozyonu ve potansiyodinamik korozyon deneyleri sonucunda Pb ilavesinin korozyon direncini arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 7.10 ve Şekil 7.11). Çizelge 7.1 'de kompozit malzemelerin potansiyodinamik korozyon deneyleri sonrası elde edilen Ekor ve Ikor değerleri gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre artan Pb miktarıyla Ekor değeri neredeyse sabit kalırken Ikor değeri düşmüştür. Alaşımlarının Ikor değerinin düşmesi korozyon direncinin artığının bir göstergesidir.

### 8.2.1. Kurşun Elementinin Korozyona Etkisi

Döküm aşamasında alaşımlara Pb ilavesi sonucunda daldırma ve potansiyodinamik korozyon verileri dikkate alınarak bakıldığında; artan Pb ilavesiyle korozyon direnci artmıştır. Alaşımlara Pb ilavesiyle  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik fazı incelmış ve yapı içerisinde daha homojen bir dağılım sergilemiştir. Literatürde de [32,78,79] görüldüğü gibi intermetalik faz korozyona karşı bir bariyer sistemi oluşturmakta ve korozyon ilerlemesini durdurmaktadır. Matris bölgesinden başlayan korozyon intermetalik fazlara rastlandığında durmakta ve alaşımın korozyon direnci artmaktadır. Şekil 7.12’de görüldüğü gibi matriste meydana gelen korozyon  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalğine geldiğinde ilerleyememiştir.

İncelenen alaşımlara daha önce bahsedildiği gibi Pb ilavesiyle  $Mg_2Si$  miktarı azalmaktadır. Bilindiği gibi  $Mg_2Si$  alaşımların korozyon direncini düşürmektedir.  $Mg_2Si$  partikülü matrise nazaran daha katodik davranmasına rağmen galvanik eş oluşturduklarında korozyon hızını arttırmaktadır. Bu çalışmada Pb ilavesiyle korozyon direncinin artması  $Mg_2Si$  miktarının azalmasına dayandırılabilir (Şekil 7.1 ve Şekil 7.5).

### 8.3. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

İncelenen alaşımların aşınma davranışı; ilave edilen Pb elementinin etkisine, uygulanan yüke, alaşımın sertliğine ve dolayısıyla alaşım elementinin % ağırlık olarak içeriğine bağlıdır. Aşınma deneyi sonucunda elde edilen yüke bağlı ağırlık kaybı grafiğinde de görüldüğü gibi (Şekil 7.12 ve Şekil 7.13) Pb ilavesiyle alaşımın sertliği düşmekte ve dolayısıyla aşınma direncide azalmaktadır. Yapıda bulunan  $Mg_2Si$  partiküllerin sertlikleri ortalama 1050 HV seviyelerindedir (Şekil 7.8). Alaşıma % 1 Pb ilavesi sonucu yapıda oluşan partikül hacim oranı düşmüş ve buna bağlı olarak alaşımların aşınma direncide azalmıştır. Pb ilavesi olmayan alaşımda  $Mg_2Si$  partiküllerinin hacim oranı fazla olduğundan aşınma direncide en yüksektir.



Aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerin SEM fotoğrafları (Şekil 7.16) aşınmaların aşınma karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. Düşük yüklerde ince yiv oluşumu ve adhesiv aşınma mekanizması aşınmaya hakimken yüksek yüklerde ise yüzeyden parça kopması ve iri yiv oluşumu şiddetli aşınma davranışını açıklamaktadır.

## BÖLÜM 9

### GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Döküm yolu ile üretilen  $Mg_2Si$  partikül takviyeli Mg-%10Al12Si alaşımının korozyon ve aşınma davranışına Pb etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Mg-%10Al12Si alaşımının içerdiği intermetalik hacim oranı % 15 iken alaşıma % 1 oranına kadar ilave edilen Pb, intermetalik hacim oranını bir miktar arttırmıştır. Ancak Pb elementinin tane inceltici etkisiyle  $Mg_2Si$  hacim oranı düşüş göstermiştir.
- 2) İncelenen alaşımların kütleli sertliği alaşımlara ilave edilen Pb elementi ile sırasıyla 120 HV seviyelerinden 80 HV seviyelerine düşmüştür. Ayrıca yapıda bulunan partiküllerin sertlik değerleri ortalama 1050 HV seviyesindedir.
- 3) İncelenen alaşımların korozyon hasarı lineer yani homojen olarak meydana gelmiş olup alaşıma Pb ilavesi ile korozyon ( $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik fazının artmasıyla) direnci artış göstermiştir.
- 4) İncelenen alaşımların aşınma hasarı düşük yüklerde karakteristik adhesiv aşınma ve ince yiv oluşumu, yüksek yüklerde ise yüzeiden parça kopması ve iri yiv oluşumu şeklinde gerçekleşmiştir.
- 5) Döküm yöntemiyle üretilen Mg matrisli kompozitlere Pb elementi yerine daha farklı alaşım elementleri ilave edilip mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.

- 6) Alaşımlar üzerinde yapılan korozyon deneyi daha farklı ortamlarda ve aşınma deneyi ise koroziv ortamda yapılabilirse daha hassas sonuçlar ortaya çıkabilir.
- 7) retilen kompozit malzemeler yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutularak aşınma ve korozyon özelliklerine etkisi incelenebilir.
- 8) Mg alaşımlarında aşılamaz bir sorun olan korozyon direncinin düşüklüğü ancak kaplama yapılarak aşılabilir. Bu yüzden yüzeye Si elementinin sementasyon tarzı bir yöntemle emdirilmesi yüzeydeki yapıyı  $Mg_2Si$  haline getirilebilir ve korozyon, aşınma gibi özellikler daha da iyileştirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Özcömert, M., “İleri malzeme teknolojileri sektör raporu”, *İstanbul Ticaret Odası*, 1-40 (2005).
2. Kramer, M.V., “Magnesium it’s alloys and compounds”, *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 1-341 (2002).
3. Housh, S., Mikucki, B. and Stevenson, A., “Selection and application of magnesium and magnesium alloys”, *ASTM Handbook*, *İcsa Publishing*, 10 (2): 455-479 (1998).
4. Kainer, K.U. and Vuch, F.B., “The current state of technology and potential for further development of magnesium applications”, *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Germany, 3-20 (2006).
5. Zhang, Z., “Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications”, Doctoral Thesis (PhD), *Faculte Des Sciences Et De Genie Universite*, Quebec-Canada, 2-75 (2000).
6. Brown, R., “Magnesium”, *Mining Journal Annual Review for 2004*, 1 (1): 1-14 (2004).
7. Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. and Wu, S., “Potential automotive uses of wrought magnesium alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).
8. Mordike, B.L. and Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, *Materials Science&Engineering A*, 302 (1): 37-45 (2001).
9. Barber, L.P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys”, M.Sc. Thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 75-105 (2004).
10. Bolstad, J., “Magnesium alloy development for intelligent magnesium designs”, *SinoMaG seminar*, Beijing-China, 4-8 (2000).
11. Sarennah, J.P., “The bolting of magnesium components in car engines”, M.Sc Thesis. , *University of Cambridge, Cambride*, 6-10 (2001).
12. ASTM International Standard Handbook, “Standard specification for magnesium alloys in ingot form for sand castings, permanent mold castings, and die castings”, *ASTM Handbook*, *İcsa Publishing*, 7 (2009).

13. Vecchiarelli, M.A., "Sand cast magnesium prototypes for automotive die casters", *SAE Technical Report Paper Series*, DOI: 10.4271/920072 (1992).
14. Dobrzanski, L.A., Tanski T., Cizek L. and Brytan Z., "Structure and properties of magnesium cast alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 567-574 (2007).
15. Durrani, S., "Optimizing convertible automobile design through the use of magnesium", *SAE International, International Congress & Exposition*, Detroit, DOI: 10.4271/930411, 930411 (1993).
16. Luo, A.A., "Materials comparison and potential applications of magnesium in automobiles", *Magnesium Technology 2000*, *Tms Publishing House*, Nashville, 89-99 (2000).
17. Watarai, H., "Trend of research and development for magnesium alloys", *Science and Technology Trends*, 18: 84-97 (2006).
18. Blawert, C., Hort, N. and Kainer, K. U., "Automotive applications of magnesium and its alloys", *Transactions of the Indian Institute of Metal*, 57 (4): 397-408 (2004).
19. Vogel, M., "Mikrostruktur und kriechverhalten von magnesium-druckgusslegierungen im system Mg-Zn-Al-Ca", Doctoral Thesis (PhD), *Max-Planck-Institut für Metallforschung*, Stuttgart, 6-20 (2002).
20. Hong, L., Gang, Z., Chun-ming, L. and Liang, Z., "Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16 (2): 76-81 (2006).
21. Bolstad, J., "Magnesium alloy development for intelligent magnesium designs", *SinoMaG seminar*, Beijing-China, 4-8 (2000).
22. Beffort, O. and Hausmann, C., "Das leichtmetall magnesium und seine legierungen", *EMPA Mg seminar*, Thun, Switzerland, 15-22 (1999).
23. Žaludová, N., "Mg-RE alloys and their applications", *WDS'05 Proceedings of Contributed Papers*, 3: 643-648 (2005).
24. Schwam, D., Wallace, J.F., Zhu, Y., Viswanathan, S. and Iskander, S., "Enhancements in magnesium die casting impact properties", Final Report, *Case Western Reserve University*, Ohio, 5-22 (2000).
25. ASTM Phase Diagram Center, "Alloy phase diagrams", *ASTM Handbook*, 3: 1-5 (1998).
26. Aizawa, T. and Song, R., "Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg<sub>2</sub>Si and Mg<sub>2</sub>Sn", *Intermetallics*, 14 (4): 382-391 (2006).

27. Chung, Y.J., Park, J.L., Kim, N.J. and Shin, K.S., “Effects of alloying elements on mechanical properties of Mg-Al alloys”, *Materials Science Forum*, 488-489: 845-848 (2005).
28. Kang, D.H., Park, S.S., Oh, S. and Kim, N.J., “Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys”, 12<sup>th</sup> International Conference on Rapidly Quenched & Metastable Materials, *Materials Science and Engineering A*, 449-451: 318-321 (2007).
29. Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U.T.S. and Pai, B.C., “Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 457 (1-2): 275-281 (2007).
30. Koç, E., “Alaşıım elementlerinin Mg döküm özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 42-43 (2008).
31. Ünal, M., “Mg alaşıımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 55-85 (2008).
32. Candan, S., Unal, M., Turkmen, M., Koc, E., Turen, Y. and Candan, E., “Improvement of mechanical and corrosion properties of magnesium alloy by lead addition”, *Materials Science and Engineering A*, 501 (1-2): 115-118 (2009).
33. Kima, J.M., Park, B.K., Jun, J.H., Kim, K.T. and Jung, W.J., “Microstructure and properties of Mg-Al based casting alloys modified with minor alloying elements”, *Materials Science*, 488-489: 147-150 (2005).
34. Zhao, H.L., Guan, S.K. and Zheng, F.Y., “Effects of Sr and B addition on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Research Society*, 22 (9): 2423-2428 (2007).
35. Duffy, L., “Magnesium alloys–zirconium containing casting alloys”, *Materials World*, 4 (1): 127–130 (1996).
36. Daisuke, Y. and Shun-ichiro, K., “Fabric development in (Mg,Fe) O during large strain, shear deformation implications for seismic anisotropy in Earth’s lower mantle”, *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 131 (3-4): 251-267(2002).
37. Belov, N.A., Eskin, D.G. and Avxentieva, N.N., “Constituent phase diagrams of the Al–Cu–Fe–Mg–Ni–Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys”, *Acta Materialia*, 53 (17): 4709-4722(2005).
38. Podosek, M.S. and Litynska, L., “Effect of itrium on structure and mechanical properties of Mg alloys”, *Materials Chemistry and Physics*, 80 (2): 472-475 (2003).

39. Hirai, K., Somekawa, H., Takigawa, Y. and Higashi, K., “Effects of Ca and Sr addition on mechanical properties of a cast AZ91 magnesium alloy at room and elevated temperature”, *Materials Science and Engineering A*, 403 (1-2): 276-280 (2005).
40. Fan, Y., Wu, G. and Zhai, C., “Effect of strontium on mechanical properties and corrosion resistance of AZ91”, *Materials Science Forum*, 546-549 (4): 567-570 (2007).
41. Kammer, C. , “Wrought alloys”, *Magnesium Casting Alloys*, 5: 204-214 (2006).
42. Lu, Y., Wang, Q., Zeng, X., Ding, W., Zhai, C. and Zhu, Y., “Effects of rare earths on the microstructure properties and fracture behavior of Mg–Al alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 278 (1-2): 66-76 (2000).
43. Polmear, I.J., “Magnesium alloys, light alloys”, *Metallurgy and Materials Science Series*, New York, 669 (2): 169-210 (1989).
44. Cao, G. and Kou, S., “Hot cracking of binary Mg–Al alloy casting”, *Materials Science and Engineering A*, 417 (1-2): 230–238 (2006).
45. Feng, X., Xuegang, M. and Yangshan, S., “Microstructures and mechanical properties of AZ91 alloy with combined additions of Ca and Si”, *Journal Materials Science*, 41 (15): 4725-4731 (2006).
46. Weichao, Z., Shuangshou, L., Bin, T., Daben, Z. and Xutao, G., “Effect of rare earths on hot cracking resistant property of Mg-Al alloys”, *Journal of Rare Earths*, 24 (3): 346-351 (2006).
47. Alision, V.V. and Krogelsky, I.V., “Tribology handbook”, *Pergamon Press*, Oxford, 2: 35-56 (1981).
48. Tuç, B., “Triboloji”, Basılmamış Ders Notları, *Gazi Üniversitesi Kütüphanesi*, Ankara, 40-100 (2003).
49. Kayalı, E. S., “Aşınma ve kaplı takımların aşınması”, Nato-TU PVD Kaplamaları Projesi, *İ.T.Ü. Kimya-Metalürji Fakültesi*, İstanbul, 5-18 (1996).
50. Kjeldsteen, P. and Trilk, N., “Wear map production on P/M materials and the defination of transition”, *The Danish for Powder Metallurgy*, Nordborg, Denmark, 50-110 (1995).
51. Trilk, N. C. and Eyre, T. S., “Tribology methodology”, *Brunel University*, Kingston Lane, Uxbridge, U.K., 114-145 (1993).
52. Yılmaz, F., “Sürtünme ve aşınma”, *9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 229-247 (1997).

53. Moore, D.F., “Principples and application tribology”, *Pergamon Press*, Oxford, 109-156 (1975).
54. Halling, J., “Principples of tribology”, *The Macmillian Press Ltd.*, United States of America, 83-98 (1983).
55. Thimmler, F. and Oberacker, R., “Introduction to powder metallurgy” , *Printed and Bound in Great Britain at the University Press*, Cambridge, 99-126 (1993).
56. Weijiu, H., Bin, H., Youxia, P. and Zhongrong, Z., “Fretting wear behavior of AZ91D and AM60B magnesium alloys”, *Wear*, 260 (11-12): 1173-1178 (2006).
57. Bedge, D. and Starcevic, J., “Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes”, *Wear*, 254 (3-4): 195-202 (2003).
58. Gediktaş, M., “Sürtünme malzemelerinin deneysel tayini”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, Gümüşsuyu, İstanbul, 10-80 (1968).
59. Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. “Engineering materials”, *Butterworth, Heineman*, 1 (1-2): 295-350 (1996).
60. Szeri, A.Z. and Graw, M., Hill, “Tribology (friction, wear, lubrication)”, *Hemisphere pub.*, Washington, (1): 30-75 (1980).
61. Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., “Engineering tribology”, *Heineman*, Boston, (1): 36-44 (2001).
62. Rigney, D.A., “Sliding wear of metals”, *Annual Review of Materials Science*, 18: 141-163 (1988).
63. Godet, M., “The third-body approach: A mechanical view of wear”, *Wear*, 100 (1-3): 437-52 (1984).
64. Sasada, T., Oike, M. and Emori, N., “The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear”, *Wear*, 97 (3): 291-302 (1984).
65. Alision, V.V. and Krogelsky, I.V., “Tribology handbook”, *Pergamon Press*, Oxford, 2: 35-56 (1981).
66. Gemalmayan, N., “Sürtünme malzemelerinin özelliklerinin deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-83 (1984).
67. Topbaş, M. A., “Endüstri malzemeleri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul, (2): 219-264 (1993).



68. Gerengi, H., “Tafel polarizasyon (tp), lineer polarizasyon (lp), harmonik analiz (ha) ve dinamik elektrokimyasal impedans spektroskopisi (deis) yöntemleriyle düşük karbon çeliği (AISI 1026), pirinç ve nikelium-118 alaşımlarının yapay deniz suyunda korozyon davranışları ve pirinç alaşımlarına benzotriazol’ün inhibitör etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 1-30 (2008).
69. Konoş, M. T., “Alüminyum-bakır-silisyum alaşımlarının sulu ortamlardaki korozyonuna lantanitlerin etkisi”, **Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-5 (2005).
70. Yakar, E., “Elektropolimerizasyon yöntemiyle polipirol ve polianilin ile kaplanmış alüminyumun asidik korozyonunun önlenmesinde farklı anyonların etkileri”, Yüksek Lisans, **Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 14-31 (2006).
71. Bilhan, H., “Çeşitli organik tükürük bileşenlerinin diş hekimliğinde kullanılan farklı döküm alaşımları ve amalgam’ın korozyonu üzerine etkisi”, Doktora Tezi, **İ.Ü. Sağlık Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-29 (2003).
72. Küçükpara, H., “Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-SiC<sub>p</sub> kompozitlerin difüzyon kaynak kabiliyetlerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 41-44 (2008).
73. Görener, A., “Al-Si matrisli kompozit malzemelerin korozyon davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 51-54 (2007).
74. Palta, A., “Yerinde oluşturulmuş Mg silisit partikül takviyeli alüminyum-magnezyum-silisyum matrisli kompozitlerin aşınma ve korozyon davranışlarına titanyum ve bakırın etkisinin incelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 15-85 (2009).
75. Liping, W., Guo E. and Baoxia M., “Modification effect of lanthanum on primary phase Mg<sub>2</sub>Si in Mg-Si alloys”, **Journal Of Rare Earths**, 26 (1): 105-109 (2008).
76. Guo, E.J., Ma, B.X. and Wang, L.P., “Modification of Mg<sub>2</sub>Si morphology in Mg-Si alloys with Bi”, **Journal Of Materials Processing Technology**, 206 (1-3): 161-166 (2008).
77. Ahlatçı, H., “Wear and corrosion behaviours of extruded Al<sub>12</sub>Si-XMg alloys”, **Materials Letter**, 62: 3490-3492(2008).
78. Jaschik, C., Haferkamp H. and Niemeyer M., “New magnesium wrought alloys”, International Congress, **Magnesium Alloys and their Applications**, 41-46(2000).

79. Rajashekhar, S., Rajan, A., Dwarakadasa, E. S., Bhat, K.L. and Gopalakrishnan, V., “Studies on cadmium and silver trace element modified AZ91C magnesium alloy”, International Congress, *Magnesium Alloys and their Applications*, 65-72 (2000).
80. Mordike, B. L. and Frank, B., “Development of high temperature creep resistant alloys”, International Congress, *Magnesium Alloys and their Applications*, 35-40 (2000).
81. Smola, B., Stulíková, I., Pelcová, J., Buch, F. and Mordike, B. L., “Aging response of Mg-rare earth alloys with low scandium content”, International Congress, *Magnesium Alloys and their Applications*, 92-97, 335-338 (2000).
82. Anyanwu, I. A. and Honda, T., “Heat and corrosion resistance of Mg-Zn-Al-Ca alloys”, International Congress, *Magnesium Alloys and their Applications*, 110-116 (2000).
83. Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y. and Candan, E., “Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (5): 1958–1963 (2011).
84. Edward, G., “Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys”, Revie R. W., *John Wiley & Sons, Inc.*, Hoboken, New Jersey, 186-221 (2010).

## ÖZGEÇMİŞ

Bünyamin ÇİÇEK 05.05.1986'da Çorum ili Alaca ilçesinde doğmuştur. İlköğrenimini Alaca Mimar Sinan İlköğretim okulunda ve lise öğrenimini de Alaca Mesleki Eğitim Merkezi Bilgisayar–Yazılım bölümünde tamamlamıştır.

2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal Öğretmenliği programına girmiş ve 2009'da Karabük Üniversitesi Metal Öğretmenliği programından iyi derece ile mezun olmuştur. 2009 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında başladığı yüksek lisans programına halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde devam etmektedir.

### ADRES BİLGİLERİ

**Adres** : Denizhan Mah.  
Zübeyde Hanım Cad.  
Depo Sok.  
No:18  
Alaca/Çorum

**Tel** : 0 555 993 51 60

**E-posta** : bcicek1986@hotmail.com