

**Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si VE Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti ALAŞIMLARININ  
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Zn  
VE Mn İLAVESİNİN ETKİSİ**

**2015  
DOKTORA TEZİ  
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Harun ÇUĞ**

**Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si VE Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti ALAŞIMLARININ KOROZYON VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE Zn VE Mn İLAVESİNİN ETKİSİ**

**Harun ÇUĞ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Metalürji ve Malzeme Mühendisliği**

**Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Kasım 2015**

Harun ÇUĞ tarafından hazırlanan “Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si VE Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti ALAŞIMLARININ KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Zn VE Mn İLAVESİNİN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI



Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 14/11/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sadettin ŞAHİN (KÜ)

İmzası



...../...../2015

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

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

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.”*

Harun ÇUĞ

## ÖZET

Doktora Tezi

### Mg5Al1Si VE Mg5Al1Ti ALAŞIMLARININ KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Zn VE Mn İLAVESİNİN ETKİSİ

Harun ÇUĞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

Kasım 2015, 158 sayfa

Bu çalışmada, döküm yöntemi ile üretilen magnezyum esaslı AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımının mikroyapı, çekme dayanımı, korozyon ve aşınma direnci üzerine farklı oranlarda Zn ve Mn elementi ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Master alaşımına Zn ve Mn ilavesi, %0,5, %1, %2 ve %4 oranındadır.

Işık Optik mikroskobu (LOM), X-ışını kırınımı (XRD) analiz cihazı ve SEM mikroskobu, mikro karakterizasyonunun yapılması için kullanılmıştır. Mekanik özellikler; sertlik ve çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri 0,5 HV yük altında, çekme testi 0,5 mm/dk çekme hızında test edilmiştir. Korozyon testleri ağırlık kaybı ve potansiyodinamik polarizasyon ölçüm metodları ile 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltisi içerisinde yapılmıştır. Aşınma testi ise pin on-disk tipi aşınma cihazında 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 0,5 m/s kayma hızında 2000 m aralıklarla toplamda 12000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı sonuçları Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si ve Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti master alaşımlarına Zn ve/veya Mn elementi ilavesi ile tane boyutunun incelendiğini ortaya koymuştur. Mikroyapı karakterizasyonu neticesinde bileşiminde %1 Si içeren AS41 ve Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si master alaşımının mikroyapısında α-Mg matris içinde düşük oranda Zn ve Mn ilavesi ile Mg<sub>2</sub>Si partikülleri ve Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> tane sınırı intermetalığı oluşurken yüksek oranda (%4) Zn ve Mn ilave edildiği zaman Mg<sub>2</sub>Si ve Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazları ile birlikte α-Mg matris içinde sırasıyla MgZn fazı ve Al<sub>6</sub>Mn fazı meydana gelmiştir. Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti master alaşımında bileşime ilave edilen %1 Ti elementi herhangi bir faz oluşturmazken, yapıda sadece Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> tane sınırı intermetalığı gözlenmiştir. Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si master alaşımına %4 oranında Zn ve Mn ilavesinde gözlenen fazlar %4 oranında Zn ve Mn ilave edilen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti master alaşımında da ortaya çıkmıştır.

Her bir master alaşıma Zn ve/veya Mn ilavesi ile sertlik ve mekanik özelliklerde artış gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerine Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde 85 HV ile %44 artışla ulaşılmıştır. En yüksek akma mukavemeti ise yine Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde 108 MPa ile %38 yükselme ile sağlamıştır. Si elementi ilaveli alaşımların Ti ilaveli alaşımlardan daha yüksek sertlik ve mukavemete sahip olması yapıda oluşan Mg<sub>2</sub>Si fazına dayandırılmaktadır.

Korozyon dayanımı en yüksek olan Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-4Zn alaşımında yapıda oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazı (β) ve MgZn intermetalik fazlarının korozyon oluşumuna karşı bariyer etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Ti içeren master alaşımının korozyon direnci Si içeren master alaşımının direncinden daha yüksek bulunmuştur. Ağırlık kaybına göre yapılan korozyon deneyi sonrası yüzeyden ve kesitten gerçekleştirilen optik mikroyapı, stereo mikroskop ve SEM incelemeleri ile EDS analizleri; korozyonun yüzeyden iç kısımlara lineer olarak ilerlediğini göstermiştir. Bu durum master alaşıma ilave edilen Ti elementinin katı eriyik oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Ağırlık kaybı ölçüm testlerine benzer olarak potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrası Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-4Zn alaşımının en düşük korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) değerine sahip olması yapıda katı eriyik oluşturan Ti elementi gibi bariyer etkisi oluşturan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> ve MgZn fazına dayandırılmaktadır.

Aşınma sonuçları mukavemet sonuçları ile uyumlu olarak değiştiği görülmektedir. Aşınma deneyi sonuçlarında ağırlık kaybı kayma mesafesi grafikleri, sabit kayma hızında kümülatif ağırlık kaybı kayma mesafesi ile lineer olarak değişmiştir. Mg5Al1Si master alaşımı, Mg5Al1Ti master alaşımından daha iyi aşınma dayanımı gösterirken, Mg5Al1Si-4Zn alaşımı en yüksek aşınma dayanımı sergilemiştir.

Aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde abrasif aşınma karakteristiğini gösteren yivlerin olduğu gözlemlenmiştir. Master alaşımının çinko içeriğinin artması ve uygulanan yükün azalması oluşan yivlerin genişliği ve derinliğini azaltmıştır. Uygulanan yükün artması ile aşınma izler daha derin ve geniş, plastik deformasyon ile numune yüzeyi dışına doğru uzamış çapaklanmalar görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Aşınma, döküm, korozyon, magnezyum alaşımları, mikroyapı.

**Bilim Kodu** : 915.1.193

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **THE EFFECTS OF THE Zn AND Mn ADDITION ON THE CORROSION AND MECHANICAL PROPERTIES BEHAVIOURS OF THE Mg5Al1Si AND Mg5Al1Ti ALLOYS**

**Harun ÇUĞ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgy And Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI**

**November 2015, 158 pages**

In this study, the effect of Zn and Mn additions on microstructure, tensile strength, corrosion and wear properties of AS41, Mg5Al1Si and Mg5Al1Ti magnesium master alloys produced by casting was investigated. The percentages of Zn and Mn added to the master alloy are 0.5%, 1%, 2% and 4%.

Optical microscope (LOM), X-ray diffraction analysis (XRD) and SEM were used for microstructure observation. The hardness and tensile test were used for mechanical behaviour of specimens. Hardness test was performed with the 0.5 HV force, tensile test was performed with a crosshead speed of 0.5 mm/min. The corrosion test were performed in 30gr/l NaCl+10ml/l HCl solution to determine weight loss and potentiodynamic polarization. The wear tests were carried out with



four different normal loads of 5N, 10N, 20N and 40N in total 12000 m slide distance at 2000 m intervals with 0.5 m/s slide speed were applied to all specimens.

The microstructure results show that, the grain size of Mg5Al1Si and Mg5Al1Ti alloys decrease with addition of Zn and/or Mn elements. As a result of the microstructural characterization, Mg<sub>2</sub>Si particles and Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetallic phases of AS41 and Mg5Al1Si contained 1% Si were formed in  $\alpha$ -Mg matrix by small amount of Zn and Mn additions whereas MgZn and Al<sub>6</sub>Mn intermetallic phases also were obtain at AS41 and Mg5Al1Si alloy with higher Zn and Mn (4%) addition alloys element. The addition of 1% Ti in Mg5Al1Ti alloy did not create any phase and only Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> grain boundary intermetallic occurred in the structure. Furthermore, MgZn phase in  $\alpha$ -Mg matrix was observed when 4% Zn addition was made and Al<sub>6</sub>Mn phase was formed with the addition of 4% Mn.

The mechanic and hardness properties of master alloys increased with addition of Mn and/or Zn alloying elements. The highest hardness (85HV) values were obtained at Mg5Al1Si master alloy with 4% Zn addition The highest yield strength (108 MPa) were obtained again at Mg5Al1Si master alloy with 4% Zn addition.

In Mg5Al1Ti-4Zn alloy, which showed the highest corrosion resistance, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> and MgZn intermetallic phases act as barrier to corrosion formation. Ti addition to the master alloys made better contribution to corrosion resistance than Si. The microstructure images taken from both surface and cross section of the specimens after weight loss corrosion test, stereoscopic images, SEM images and EDS analysis showed that corrosion started at the surface and proceeded to liner regions.

The lowest corrosion current density ( $I_{corr}$ ) was obtained for Mg5Al1Ti-4Zn alloy at potentiodynamic polarization tests and this is attributed to the presence of Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> and MgZn intermetallic phases which are act as a strong barrier for corrosion such as Ti element.

According to wear test results the weight loss sliding distance figure changed linearly with cumulative weight loss sliding distance at constant sliding speed. Mg5Al1Si

master alloy showed higher wear resistance than Mg5Al1Ti master alloy whereas Mg5Al1Si-4Zn was the best wear resistant alloy among the tested alloys. The wear test result showed that, the small grooves which is characteristic of abrasive wear were obtained at surface of specimens. However the increase of Zn and applied load decreased deep and wideness of grooves.

**Key Word** : Casting, corrosion, magnesium alloys, microstructure, wear.

**Science Code** : 915.1.193



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI'ya, deney çalışmalarım ve tez yazım sırasında kıymetli yardımlarından faydalandığım Doç. Dr. Yavuz SUN'a ve Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasını tamamlayabilmem için KBÜ-BAP-13/2-DR-006 numaralı proje ile finansal kaynak sağlayan Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bana yürekten inanan saygıdeğer anneme ve babama teşekkür ederim. Son olarak bu tezi hazırlama sürecinde; sabır, metanet ve anlayışıyla beni manen sürekli destekleyen çok kıymetli eşim ve hayat arkadaşım Mehtap ÇUĞ'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Bu çalışmayı biricik oğlum Ahmet Emir'e atfediyorum.

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL.....  | ii           |
| ÖZET .....  | iv           |
| ABSTRACT.....   | vii          |
| TEŞEKKÜR.....   | x            |
| İÇİNDEKİLER .....   | xi           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | xv           |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....   | xx           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                               | xxii         |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 1 .....   | 1            |
| GİRİŞ .....   | 1            |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 2 .....   | 5            |
| MAGNEZYUM .....   | 5            |
| 2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ .....                          | 5            |
| 2.2. MAGNEZYUMUN ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI.....                  | 6            |
| 2.3. MAGNEZYUMUN ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI .....            | 8            |
| 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA<br>ETKİSİ ..... | 11           |
| 2.5. MAGNEZYUM - ALUMİNYUM İKİLİ SİSTEMİ.....                     | 18           |
| 2.5.1. Mg-Al-Si Alaşımları.....                                   | 19           |
| 2.5.2. Mg-Al-Zn Alaşımları.....                                   | 19           |
| 2.5.3. Mg-Al-RE Alaşımları .....                                  | 20           |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 3 .....   | 21           |
| KOROZYON .....  | 21           |
| 3.1. KOROZYON NEDİR? .....  | 21           |
| 3.1.1. Kimyasal Korozyon.....                                     | 21           |

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| 3.1.2. Elektrokimyasal Korozyon .....                       | 21           |
| 3.2. KOROZYON ÇEŞİTLERİ .....                               | 24           |
| 3.2.1. Çukur Korozyonu .....                                | 24           |
| 3.2.2. Galvanik Korozyon.....                               | 25           |
| 3.2.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu .....                      | 26           |
| 3.2.4. Kabuk Altı Korozyonu.....                            | 26           |
| 3.2.5. Fili Form Korozyonu .....                            | 27           |
| 3.2.6. Seçimli Korozyon .....                               | 27           |
| 3.2.7. Taneler Arası Korozyon.....                          | 28           |
| 3.2.8. Gerilmeli Korozyon .....                             | 28           |
| 3.2.9. Yorulmalı Korozyon .....                             | 29           |
| 3.2.10. Erozyonlu Korozyon.....                             | 29           |
| 3.3. KOROZYON HIZININ ÖLÇÜMÜ .....                          | 30           |
| 3.3.1. Kütle Azalması Yöntemi .....                         | 30           |
| 3.3.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi .....                    | 30           |
| 3.3.3. Alternatif Akım Empedans Ölçme Yöntemi .....         | 31           |
| 3.3.4. Tafel Elektro-Polarizasyon Yöntemi .....             | 32           |
| <b>BÖLÜM 4 .....</b>  | <b>36</b>    |
| <b>AŞINMA.....</b>  | <b>36</b>    |
| 4.1. AŞINMA NEDİR?.....                                     | 36           |
| 4.1.1. Aşınmanın Temel Unsurları .....                      | 37           |
| 4.1.2. Aşınma Mekanizmaları.....                            | 38           |
| 4.1.2.1. Yapışma Aşınması (Adhesiv Aşınma).....             | 38           |
| 4.1.2.2. Kazıma Aşınması (Abrasiv Aşınma) .....             | 40           |
| 4.1.2.3. Erozyon Aşınma (Erozif) Veya Tribo Oksidasyon..... | 41           |
| 4.1.2.4. Yorulma Aşınması .....                             | 42           |
| 4.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ .....             | 43           |
| 4.2.1. Ağırlık Farkı Metodu.....                            | 44           |
| 4.2.2. Kalınlık Farkı Metodu .....                          | 45           |
| 4.2.3. İz Değişimi Metodu .....                             | 45           |
| 4.2.4. Radyoizotop Metodu .....                             | 45           |

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| BÖLÜM 5 .....  | 47           |
| LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 47           |
| 5.1. MAGNUZYUM ALAŞIMLARININ MİKROYAPI<br>KARAKTERİSTİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....                                    | 47           |
| 5.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON ÖZELLİKLERİ .....  | 48           |
| 5.3. MG ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ.....  | 50           |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 6 .....  | 51           |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....  | 51           |
| 6.1. ERGİTME İLE ALAŞIM ÜRETİMİ.....   | 51           |
| 6.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU .....  | 53           |
| 6.2.1. Numune Hazırlama.....   | 53           |
| 6.2.2. Mikroskop İncelemesi Ve Faz Analizi .....   | 53           |
| 6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ .....   | 55           |
| 6.4. MEKANİK DENEYLER .....  | 56           |
| 6.4.1. Sertlik Deneyi .....  | 56           |
| 6.4.2. Çekme Deneyi .....  | 57           |
| 6.5. KOROZYON DENEYLERİ.....   | 58           |
| 6.5.1. Ağırlık Kaybı Ölçülen Korozyon Deneyleri (Daldırmalı Korozyon) ....   | 58           |
| 6.5.2. Korozyon Potansiyeli/Akım Yoğunluğu Ölçülen Korozyon Deneyleri<br>(Potansiyodinamik Polarizasyon Deneyleri) ..... | 59           |
| 6.6. AŞINMA DENEYİ.....  | 62           |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 7 .....  | 64           |
| DENEYSEL SONUÇLAR .....  | 64           |
| 7.1. MİKROYAPI SONUÇLARI.....  | 64           |
| 7.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI .....  | 72           |
| 7.3. SEM ANALİZ SONUÇLARI.....   | 74           |
| 7.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜM SONUÇLARI.....   | 78           |
| 7.5. MEKANİK DENEY SONUÇLARI .....   | 79           |
| 7.5.1. Sertlik Deneyi Sonuçları.....   | 80           |
| 7.5.2. Çekme Deneyi Sonuçları .....  | 81           |
| 7.6. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI .....   | 82           |

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 7.6.1. Daldırmalı Korozyon Deneyi Sonuçları .....                                   | 82                  |
| 7.6.2. Potansiyodinamik Polarizasyon İle Yapılan Korozyon Deneyi<br>Sonuçları ..... | 86                  |
| 7.6.3. Korozyon Deneyleri Sonrası Yüzey Ve Yüzey Altı Görünüm .....                 | 89                  |
| 7.7. AŞINMA DENEY SONUÇLARI .....   | 110                 |
| 7.7.1. Ağırlık Kaybı Sonuçları.....   | 110                 |
| 7.7.2. Aşınma Deneyi Sürtünme Katsayısı Sonuçları .....                             | 117                 |
| 7.7.3. Aşınma Deneyi Sonrası Yüzey Görünümü .....                                   | 118                 |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 8 .....   | 124                 |
| DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....  | 124                 |
| 8.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER.....   | 124                 |
| 8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....   | 130                 |
| 8.3. AŞINMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ .....  | 143                 |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 9 .....   | 150                 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....  | 150                 |
| KAYNAKLAR .....   | 153                 |
| <br>  |                     |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 161                 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1. Otomobil üretiminde Mg alaşımlarından üretilebilecek alaşımlar ve kazanç değerleri. .... | 8  |
| Şekil 2.2. AZ serisi alaşımlardan üretilmiş bazı döküm parçaları.....                               | 9  |
| Şekil 2.3. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler. ....                              | 10 |
| Şekil 2.4. AE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu. ....                                 | 10 |
| Şekil 2.5. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları.....   | 11 |
| Şekil 2.6. Mg-Al denge diyagramı. ....  | 13 |
| Şekil 2.7. Mg-Si denge diyagramı.....   | 13 |
| Şekil 2.8. Mg-Zn denge diyagramı.....   | 14 |
| Şekil 2.9. Mg-Mn denge diyagramı.....   | 15 |
| Şekil 2.10. Mg-Sn denge diyagramı.....  | 16 |
| Şekil 2.11. Mg-Ti denge diyagramı.....  | 16 |
| Şekil 2.12. Si İlaveli Mg alaşımlarının genel mikro yapısı).....                                    | 19 |
| Şekil 2.13. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi.....                        | 20 |
| Şekil 3.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar. ....      | 23 |
| Şekil 3.2. Çukur korozyon işleyiş şeması.....   | 25 |
| Şekil 3.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi. ....  | 25 |
| Şekil 3.4. Korozyonunun şematik gösterimi. ....   | 26 |
| Şekil 3.5. Fili form korozyonun şematik gösterimi.....  | 27 |
| Şekil 3.6. Seçimli korozyonun şematik gösterimi.....  | 27 |
| Şekil 3.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge. ....                                     | 28 |
| Şekil 3.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi.....  | 28 |
| Şekil 3.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi.....  | 29 |
| Şekil 3.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi. ....  | 29 |
| Şekil 3.11. Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması ....                                       | 31 |
| Şekil 3.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri.....  | 33 |
| Şekil 4.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi. ....                                 | 37 |
| Şekil 4.2. Adhesiv aşınma ....  | 39 |
| Şekil 4.3. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri.....   | 40 |



|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.4. Abrasiv aşınma.....   | 41 |
| Şekil 4.5. Tribo oksidasyon aşınması.....  | 42 |
| Şekil 4.6. Yorulma aşınması.....   | 43 |
| Şekil 4.7. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi.....   | 43 |
| Şekil 5.1. Alaşımların korozyon deneyi öncesi ve sonrası durumları .....   | 49 |
| Şekil 6.1. İncelenen alaşımların üretim akış şeması.....   | 51 |
| Şekil 6.2. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan elektrik rezistanslı fırının ..   | 52 |
| Şekil 6.3. Dökümün yapıldığı metalik kalıbın görünümü.....   | 53 |
| Şekil 6.4. Mikroyapı ve karakterizasyon incelemelerinde kullanılan cihazlar.....   | 55 |
| Şekil 6.5. Ağırlık ve yoğunluk ölçümü için kullanılan elektronik tartı.....  | 56 |
| Şekil 6.6. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrosertlik test cihazı.....   | 56 |
| Şekil 6.7. Çekme testinde kullanılan SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazı.....  | 57 |
| Şekil 6.8. Çekme deneyi numune ölçüleri.....   | 58 |
| Şekil 6.9. Temizleme işlemlerinde kullanılan ultrasonik temizleme cihazı.....  | 58 |
| Şekil 6.10. Potansiyodinamik/Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.....   | 60 |
| Şekil 6.11. Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu.....  | 60 |
| Şekil 6.12. Statik korozyon deney hücresi.....   | 61 |
| Şekil 6.13. Pim üzeri disk tipi aşınma cihazı.....   | 62 |
| Şekil 7.1. Master alaşımlara ait düşük büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....  | 66 |
| Şekil 7.2. Master alaşımlara ait yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....   | 67 |
| Şekil 7.3. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların düşük büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....   | 68 |
| Şekil 7.4. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....  | 69 |
| Şekil 7.5. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımların düşük büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....   | 70 |
| Şekil 7.6. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımların yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....  | 71 |
| Şekil 7.7. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı tane boyutu değişimi.....  | 72 |
| Şekil 7.8. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları ile Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların XRD analiz sonuçları..... | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 7.9. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların SEM görüntüleri. ....  | 75  |
| Şekil 7.10. Şekil 7.9'daki Mg5Al1Ti-4Mn numunesine ait SEM görüntüsünden alınan çizgisel EDS analiz sonucu. ....   | 76  |
| Şekil 7.11. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı yoğunluk değerleri. ....  | 78  |
| Şekil 7.12. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı olarak sertlik değerleri. ....  | 80  |
| Şekil 7.13. İncelenen alaşımların akma dayanımı, max çekme dayanımı ve uzama (%) değerleri. ....   | 81  |
| Şekil 7.14. İncelenen alaşımlarının zamana bağlı korozyon kayıpları. ....  | 84  |
| Şekil 7.15. İncelenen alaşımların içeriğine bağlı pH ve iletkenlik (s) değerleri. ....   | 86  |
| Şekil 7.16. İncelenen alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri. ....   | 87  |
| Şekil 7.17. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı olarak korozyon akımı ve korozyon potansiyeli grafiği. ....   | 89  |
| Şekil 7.18. Master alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....  | 90  |
| Şekil 7.19. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....  | 91  |
| Şekil 7.20. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....  | 92  |
| Şekil 7.21. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzey SEM görüntüleri. ....                            | 93  |
| Şekil 7.22. İncelenen AS41 master alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları. ....   | 95  |
| Şekil 7.23. İncelenen Mg5Al1Si-4Zn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları. ....  | 96  |
| Şekil 7.24. İncelenen Mg5Al1Si-4Mn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları. ....  | 97  |
| Şekil 7.25. İncelenen Mg5Al1Ti-4Zn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları. ....  | 98  |
| Şekil 7.26. İncelenen Mg5Al1Ti-4Mn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları. ....  | 99  |
| Şekil 7.27. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası kesitten alınan optik ışık mikroskop görüntüleri. .... | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 7.28. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası kesitten SEM görüntüleri..... | 102 |
| Şekil 7.29. İncelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası alaşım içeriğine bağlı mm/gün ve mm/yıl cinsinden ölçülen kesit incelme hızı.....  | 104 |
| Şekil 7.30. İncelenen alaşımlara ait potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....   | 105 |
| Şekil 7.31. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....   | 106 |
| Şekil 7.32. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri. ....   | 107 |
| Şekil 7.33. Potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası hasara uğramış numunede korozyon ilerleme görüntüsü.....   | 108 |
| Şekil 7.34. İncelenen alaşımların Potansiyodinamik Polarizasyon korozyon deneyi sonrası alaşım içeriğine bağlı mm/dakika ve mm/yıl cinsinden ölçülen korozyon ilerleme hızı.....  | 110 |
| Şekil 7.35. İncelenen alaşımlarının 5N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri. ....   | 113 |
| Şekil 7.36. İncelenen alaşımlarının 10N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri. ....  | 114 |
| Şekil 7.37. İncelenen alaşımlarının 20N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri. ....  | 115 |
| Şekil 7.38. İncelenen alaşımlarının 40N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri. ....  | 116 |
| Şekil 7.39. Alaşım içeriğine bağlı sürtünme katsayısı değerleri. ....   | 118 |
| Şekil 7.40. İncelenen AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının 5N ve 40N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.....                                     | 119 |
| Şekil 7.41. İncelenen Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ve/veya Mn elementi ilavesinin 5 N ve 40 N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.....                    | 120 |
| Şekil 7.42. İncelenen Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ve/veya Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.....                      | 121 |
| Şekil 7.43. İncelenen AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntüleri. ....   | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 7.44. İncelenen Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ve Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntülerine etkisi. ....                      | 123 |
| Şekil 7.45. İncelenen Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ve Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntülerine etkisi. ....                      | 123 |
| Şekil 8.1. İncelenen alaşımlardaki $1/\sqrt{Tane}$ boyutu( $1/\sqrt{mm}$ )'na bağlı Akma ve Çekme dayanımının değişim grafiği. ....                                     | 127 |
| Şekil 8.2. İncelenen alaşımlarda yoğunluğa bağlı Akma ve Çekme dayanımı değişim grafiği. ....   | 128 |
| Şekil 8.3. İncelenen alaşımlarda sertlik değerine bağlı Akma ve Çekme dayanımının değişim grafiği. ....   | 129 |
| Şekil 8.4. İncelenen alaşımların spesifik akma/max çekme dayanımlarının alaşım içeriğine bağlı olarak değişimi. ....  | 130 |
| Şekil 8.5. Daldırma korozyonu sonrası korozyon hızı değerleri. ....   | 132 |
| Şekil 8.6. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde mm/yıl cinsinden korozyon hızının değişimi. ....   | 135 |
| Şekil 8.7. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde birim alan başına ağırlık kayıplarının mm/yıl cinsinden korozyon hızına dönüştürülmesi. .... | 138 |
| Şekil 8.8. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı korozyon akımı değerlerine göre mm/yıl cinsinden korozyon hızının değişim grafiği. ....                         | 140 |
| Şekil 8.9. İncelenen alaşımların yüke bağlı aşınma hızı değişimi. ....  | 144 |
| Şekil 8.10. İncelenen alaşımların yüke bağlı aşınma hızı değişimi. ....   | 145 |
| Şekil 8.11. İncelenen alaşımların başlangıç durumdaki ve kararlı durumdaki aşınma hızının alaşım içeriğine bağlı değişim grafiği. ....                                  | 147 |
| Şekil 8.12. Şekil 8.11'deki verilerden elde edilen alaşım içeriğine bağlı başlangıç durumdaki ve kararlı durumdaki relativ aşınma direnci. ....                         | 148 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|  |     |
|--|-----|
| Çizelge 2.1. Alaşım elementleri ve kısaltmaları. ....  | 7   |
| Çizelge 2.2. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri. ....   | 7   |
| Çizelge 2.3. İkili Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar. ....   | 12  |
| Çizelge 3.1. Korozyon türleri. ....  | 24  |
| Çizelge 4.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler. ....  | 39  |
| Çizelge 7.1. Üretimi yapılan alaşımların kimyasal analiz sonuçları. ....   | 65  |
| Çizelge 7.2. Tane boyutu ölçüm değerleri. ....   | 72  |
| Çizelge 7.3. Alaşımların noktasal EDS analiz sonuçları. ....   | 77  |
| Çizelge 7.4. İncelenen alaşımların yoğunluk değerleri. ....  | 78  |
| Çizelge 7.5. İncelenen alaşımların sertlik ve çekme deneyinden elde edilen mekanik özellik değerleri. ....   | 79  |
| Çizelge 7.6. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen daldırma korozyon deneyi sonrası ağırlık kayıpları. ....   | 83  |
| Çizelge 7.7. İncelenen alaşımların içinde ağırlık kaybı deneyine tabi tutuldukları 30 gr/l NaCl+10 ml/l HCl korozyon çözeltisinin 23,7 °C sıcaklıktaki pH ve iletkenlik(S) değerleri. ....                             | 85  |
| Çizelge 7.8. İncelenen alaşımların korozyon akım yoğunluğu ve korozyon potansiyel değerleri. ....  | 88  |
| Çizelge 7.9. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde daldırma korozyonu sonrası mm/gün ve mm/yıl cinsinden ölçülen kesit incelme hızı değerleri. ....  | 103 |
| Çizelge 7.10. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde Potansiyodinamik Polarizasyon korozyon deneyleri sonrası mm/dakika ve mm/yıl cinsinden ölçülen korozyon ilerleme hızı değerleri. ....    | 109 |
| Çizelge 7.11. AS41 master alaşımının, Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımlarının, 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000-12000 metre mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerleri. .... | 111 |
| Çizelge 7.12. AS41 master alaşımının, Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımlarının, 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000-12000 metre mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerleri. .... | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| Çizelge 7.13. Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si master alaşımına Zn ve Mn elementi ilavesinin pin-on disk aşınma deneyinde 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000–12000 metre mesafedeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri. .... | 117 |
| Çizelge 7.14. Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti master alaşımına Zn ve Mn elementi ilavesinin pin-on disk aşınma deneyinde 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000–12000 metre mesafedeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri. .... | 117 |
| Çizelge 8.1. Daldırılmalı korozyon sonrası grafiklerin eğimleri alınarak elde edilen korozyon hızı değerleri. ....  | 131 |
| Çizelge 8.2. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içindeki daldırma korozyonu sonrası ağırlık kaybına göre mm/yıl cinsinden ampirik korozyon incelme hızlarının değişimi. ....                                  | 134 |
| Çizelge 8.3. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içindeki daldırma korozyonu sonrası 5. ve 24. saatlerdeki ağırlık kaybına göre mm/yıl cinsinden ampirik korozyon incelme hızlarının değişimi. ....            | 137 |
| Çizelge 8.4. İncelenen alaşımların korozyon akımı değerlerine bağlı mm/yıl cinsinden ampirik korozyon ilerleme hızı değişim değerleri. ....   | 139 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

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

### KISALTMALAR

- XRD : X-Ray Diffraction (X- Işını Difraksiyonu)  
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)  
EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)  
ASTM : Amerikan Malzeme Ve Test Standartları Kurumu  
SCE : Saturated Calomel Electrode (Doymun Kalomel Elektrot)  
LOM : Light Optical Microscope (Optik Mikroskop)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Otomotiv, havacılık, telekomünikasyon uygulamalarında hafif malzemeler üzerinde artan talep nedeniyle, Mg ve alaşımları üzerine bilim ve sanayinin dikkati gün geçtikçe daha da artırmaktadır (Kulekci, 2008). Çeliğin yoğunluğunun dörtte biri, alüminyumun yoğunluğunun ise üçte ikisine sahip olan Mg esaslı alaşımların yoğunluğu yapısal metaller arasında en düşük değerdir. Magnezyum alaşımları ağırlık oranına göre sahip olduğu gücü ile, "ultralight" maddeler olarak takdire şayan bir role sahiptir (Chen ve Alpas, 2000; Blawert, 2004; Batel, 2012).

Günümüzde enerji kaynaklarının ve ekolojik dengenin 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 (Vecchiarelli, 1992). Örneğin araç ağırlığında yaklaşık 100 kg'lık bir azalma ile 100 km'de 0.5 litre bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır (Dobrzanski vd., 2007). Ağırlıktan 40 kg'lık azalma, atmosfere verilen egzoz gazlarında da azalma sağlamaktadır (Dobrzanski vd., 2007). Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin mutlaka hafif, aynı zamanda da güvenilir malzeme kullanması zorunludur. Bu kapsamda özellikle otomobil üretiminde ağırlıktan azalma üretici firmaların en önemli hedefi haline gelmiştir (Durrani, 1993). Otomotiv endüstrisinin Magnezyum (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 (Luo, 2000; Barber, 2004).



Japon taşıtlarında bugün Mg çok hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde de otomobil üretiminde Mg kullanımı artarak gelişmektedir. Bu konudaki gelişmeler Alman otomobilleri için de geçerlidir (Durrani 1993).

Malzeme seçiminde geri dönüşebilirlik dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için etken bir faktör haline gelmiştir. Avrupa Birliği'nin hedefi otomobillerinde kullanılacak malzemelerin, 2016 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzemelerden üretmektir. Japonya'da ise yeni otomobillerde 2016 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (Gaines vd., 1996; Housh vd., 1998).

Mg ve Mg alaşımları, diğer yandan yüksek spesifik mukavemet ve bükülmezliği, iyi döküm ve işlenebilirlik özellikleri, iyi sönümlene kapasitesi, elektromanyetik etkenlere karşı iyi zırh özelliği, efektif ısı dışarı dağıtımı, magnezyum alaşımlarını mühendislik uygulamalarında aday malzemeler arasında en üst sıralarda tutmaktadır (Aghion vd., 2001). Magnezyumun dünya yüzeyinde en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci element olması da avantajdır (Alsa vd., 2009). Ancak, Mg'un kristal yapısının hegzagonal sıkı paket (HSP) olmasından kaynaklanan şekillenebilirlik ve ergitme sırasında yanma gibi döküm problemleri nedeni ile üzerinde Al kadar çalışmalar yapılamamıştır (Westengen and Aune, 2006).

Mg listelenen olumlu özelliklerine rağmen mühendislik uygulamalarındaki yeri düşük aşınma direnci ile sınırlıdır. Bu alaşımların mekanik ve aşınma vasıflarının geliştirilmesi, uygun bir döküm prosedürü yoluyla alaşım elementleri ekleyerek mümkündür. (Blawert vd., 2004). Mg esaslı alaşımlara ilave edilen başlıca alaşım elementleri Al, Si, Zn ve Mn'dir. (Guangyin vd., 2003; Ma vd., 2011).

Alüminyum ve çinko, magnezyuma katılan asıl alaşımlama elementleridir. Magnezyumun alüminyum ile alaşımlanması, genellikle korozyon direncini arttırmaktadır. Alüminyum ve çinko alaşımlama elementleri, başlangıçta alaşımın oksitlenme hızını arttırmaktadır ve bu oksit tabakası korozyonun ilerlemesini engelleyici rol oynamaktadır. Ayrıca alüminyum ve çinko, magnezyuma yeterli bir mukavemet kazandırmak için kullanılmaktadırlar (Guangyin vd., 2003).

Mg esaslı alaşımlarda alaşım elementi olarak Al, Mg'un katı çökelti dayanımını, ergiyin dökülebilirliğini geliştirir ve döküm alaşımlarının mikro gözeneklerini azaltır. Ayrıca Al katkısı alaşımın sertliğini, dayanımını ve katılma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini azaltmaktadır (Dobrzanski vd., 2007). Si ise Mg alaşımlarının dökülebilirliğini ve akıcılığını düşürmektedir. Si atomları, oda sıcaklığında katı halde  $Mg_2Si$  intermetalik oluşturur. Mg alaşımlarına ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini ve sürünme direncini geliştirir (Cao vd., 2006). Zn, tane sınırlardaki ötektik miktarını artırarak, alaşımın katılma sıcaklığını düşürmektedir. Zn, alaşımın sertliğini, çekme mukavemetini ve aynı zamanda ergiyiğin akıcılığını artırmaktadır (Zhang vd., 2007; Santos vd., 2007; Sun vd., 2015).

Mg elementinin mühendislik uygulamalarındaki avantajları nedeni ile birçok element ilavesi ile Mg'nin özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Buna karşılık, Ti elementinin Mg alaşımlarının korozyon özelliklerine etkisi hakkında bilgi literatürde sınırlıdır (Sudholz vd., 2009). Alaşıma ilave edilen Ti, az da olsa tane inceltici görevi yapar. Ti düşük yoğunluklu hafif ve güçlü bir metaldir. Ti'nin metal olarak en ünlü kimyasal özelliği korozyona karşı gösterdiği müthiş direncidir. Neredeyse platin kadar dirençli olan Ti elementi asitlerin, klor gazının ve yaygın tuz çözeltilerinin maruziyetine karşı koyabilecek yeterliliktedir (Matthew, 1998 ve Zhao, 2009).

Mg esaslı alaşımlardan AZ ve AM serisi alaşımların üretilebilirliği ve özellikleri üzerine literatürde birçok çalışma varken, Mg esaslı AS serisi alaşımlardan %5'e kadar Al içeren AS41 hakkında bir kaç yayın haricinde çalışma yoktur. AS41 alaşımı üstün sürünme direnci ve ısıya karşı dayanıklıdır. Bu da yüksek ayrışma sıcaklıklarında tane sınırlarında istikrarlı intermetalik bileşiklerin varlığından kaynaklanmıştır. Si'ca zengin fazların çökmesi nedeniyle AS41 alaşımı yüksek sıcaklıkta AZ91 ve AM60 alaşımlarına göre dikkat çekici ölçüde yüksek bir kayma direncine sahiptir. Üstün sürünme direnci ve ısıya karşı dayanıklı olduğu bilinen AS41 alaşımının diğer mekanik özelliklerinin bilinmesi için araştırılması gerekmektedir (Yu vd., 2009).

Bu çalışmanın ana hedefi, (%5'e kadar) Al içeren ve Al'un yanı sıra Si ve Ti elementi ilaveli  $Mg_5Al_1Si$  ve  $Mg_5Al_1Ti$  koda sahip master alaşımlara %0,5'den %4'e kadar

Zn ve Mn alaşım elementi ilavesi ile alaşımlandırma neticesinde korozyon ve mekanik özelliklerdeki gelişimin incelenmesini kapsamaktadır.



## BÖLÜM 2

### MAGNEZYUM

#### 2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Sir Humphrey Davy tarafından 1808 yılında keşfedilen magnezyum, dünyada en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir. Yerkabuğunun %2.7'sinde ve okyanusların %0.13'ünde bulunması sebebiyle Mg, yer kabuğunda yaygın olarak bulunan ve Periyodik Tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir (Kramer, 2002). Saf Mg'un mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir (Housh, 1998; Kainer, 2006).

|                      |  |
|----------------------|--|
| Simgesi              | : Mg   |
| Atom numarası        | : 12   |
| Atom ağırlığı        | : 24.312 g/mol                                       |
| Kaynama noktası      | : 1090 °C  |
| Ergime noktası       | : 650 °C   |
| Yoğunluğu            | : 1.74 g/cm <sup>3</sup>                             |
| Elektron düzeni      | : 3s <sup>2</sup>                                    |
| Kristal yapısı       | : Hegzagonal sıkı paket                              |
| Çekme Dayanımı       | : 80-180 MPa   |
| Young Modülü         | : 45 GPa   |
| Çekme (katı-sıvı)    | : 4.2 %  |
| Atom hacmi           | : 14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)                      |
| Özgül ısı            | : 0.25 cal/g °C                                      |
| Isı iletkenliği      | : 156 W/m <sup>2</sup> K, s.cm.°C (oda sıcaklığında) |
| Elektrik iletkenliği | : 22.4 m/(Ω mm <sup>2</sup> )(oda sıcaklığında)      |

Mg, yapısal uygulamalarda kullanılabilir ve gün geçtikçe kullanımı da artan en hafif metaldir. Doğada saf olarak bulunamayan bu metal genelde oksit halde ve diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Sanayide artan kullanımı nedeniyle Mg sanayi metalleri arasında bulunmaktadır (Housh, 1998; Kramer, 2002).

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 (Zhang, 2000).

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 (Gaines, 1996).

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 (Mordike ve Ebert, 2001).

## **2.2. MAGNEZYUMUN 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 2.1'de yaygın bir şekilde kullanılan

alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir (Gaines, 1996; Barber 2004; Kainer, 2006).

Çizelge 2.1. Alaşım elementleri ve kısaltmaları (Gaines vd.1996, Barber 2004).

| 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 (Patel, 2012).

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 2.2'de gösterilmiştir (Zhang, 2000; Bolstad, 2000; Sarennah, 2001).

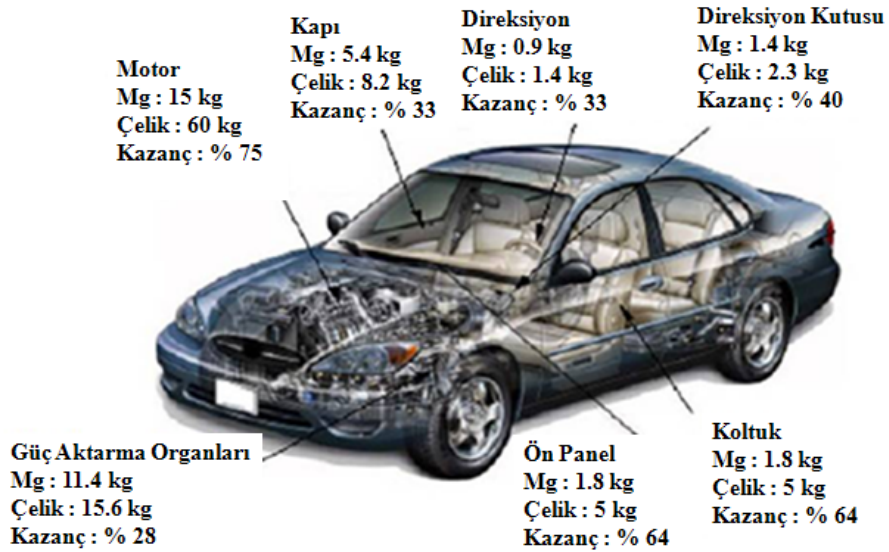
Çizelge 2.2. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94).

| Alaşım Elementi | Magnezyum 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       | 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       | 0.20 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      | 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. |
| 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. MAGNEZYUMUN 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. 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 (Dobrzanski, 2007). 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. 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 (Luo, 2000; Barber, 2004).

Şekil 2.1'de otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere Mg alaşımları otomobillerin hemen her kısmında kullanılmaktadır (Watarai, 2006).



Şekil 2.1. Otomobil üretiminde Mg alaşımlarından üretilebilecek alaşımlar ve kazanç değerleri (Watarai, 2006).

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 (Blawert vd., 2004).

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 (Zhang, 2000; Vogel, 2002).

AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar, kamera ve mobil telefonlarda kullanılır. Şekil 2.2’de AZ serisi alaşımlarından üretilmiş döküm parçalar görülmektedir (Dobrzanski vd., 2007).



**Tekerlek Jantı**



**Bisiklet Maşası**



**Güverte Desteği**



**Silindir Ana Kapağı**



**Direksiyon**

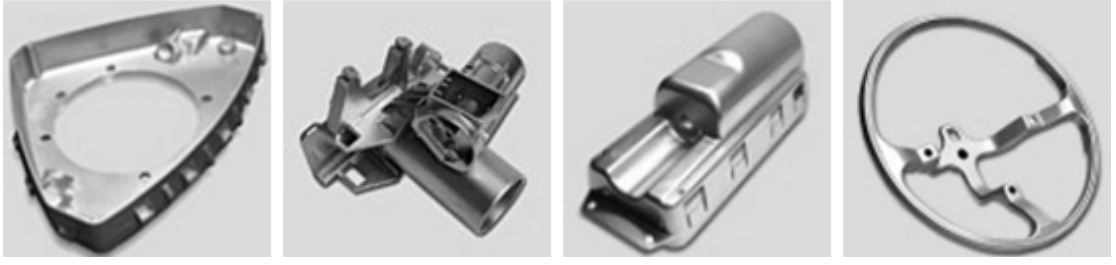


**Motor Pistonları**

Şekil 2.2. AZ serisi alaşımlardan üretilmiş bazı döküm parçaları (Dobrzanski vd., 2007).

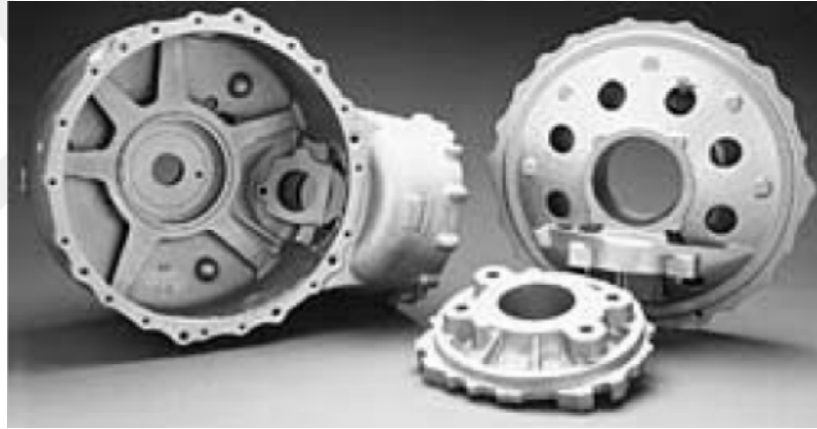
Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorpsiyon özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapımında kullanılır. Şekil 2.3’de AM alaşımından dökülmüş parçalar görülmektedir (Bolstad, 2000; Mordike and Ebert, 2001; Beffort and Hausmann, 2004; Li, 2004).





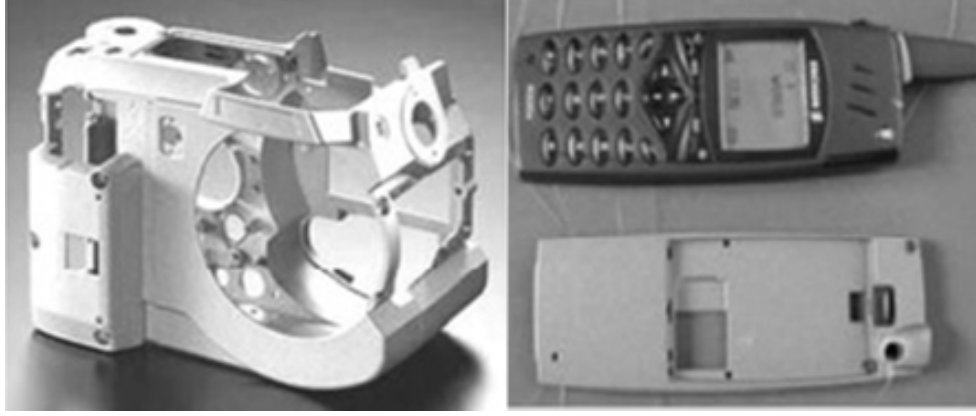
Şekil 2.3. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler (Bolstad, 2000; Mordike ve Ebert, 2001; Beffort ve Hausmann, 2004; Li, 2004; Landkof, 2005).

AE43 alaşımları 200 °C' nin üzerindeki servis koşullarında, transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılır (Zhang 2000). Şekil 2.4'de AE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu görülmektedir (Mordike ve Kainer 1998; Žaludová, 2005).



Şekil 2.4. AE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu (Mordike ve Kainer, 1998).

Süper hafif Li katkılı Mg esaslı alaşımlar bilgisayar elemanı olarak plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir (Dobrzanski vd., 2007). Şekil 2.5'de Li katkılı Mg alaşımından dökülmüş kamera ve cep telefon kutusu görülmektedir.



Şekil 2.5. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları (Dobrzanski vd., 2007).

#### 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM 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 (Zhang 2000; Johansson 2002; Barber 2004).

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 (Mordike ve Kainer, 1998; Zhang 2000). Çizelge 2.3'de ikili Mg alaşımlarında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik verileri verilmiştir.

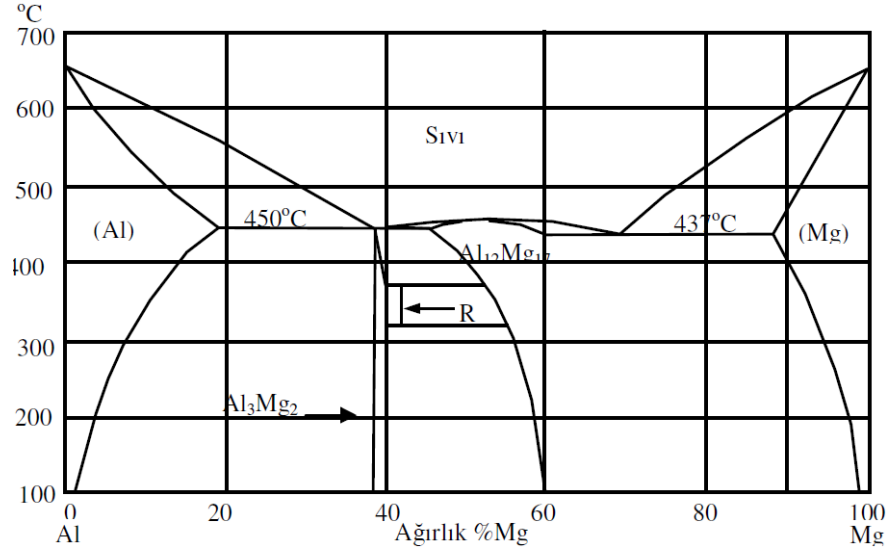
Çizelge 2.3. İkili Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar (Mordike ve Kainer, 1998).

| 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.

### Alüminyum

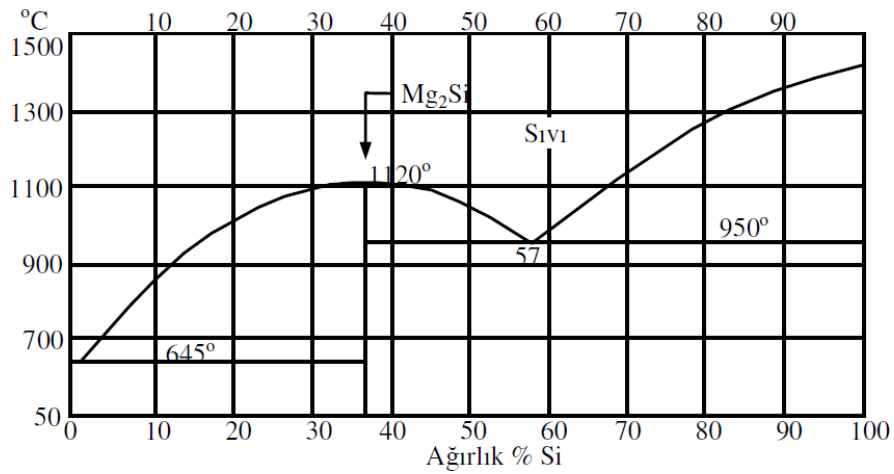
Mg esaslı alaşımlarda Al, en fazla kullanılan alaşım elementidir ve magnezyumdaki maksimum çözünürlüğü % 12,7'dir. Al katkısı alaşımın çekme dayanımını, sertliğini ve katılma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini ve darbe dayanımını azaltmaktadır. Ergiyeğin dökülebilirliğini geliştirmesinin yanı sıra 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> intermetalığı düşük sıcaklıklarda ( $\leq 120$  °C) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir. Şekil 2.6'da Mg-Al ikili faz denge diyagramı görülmektedir (Schwam vd., 2000; Johansson, 2002; Barber, 2004).



Şekil 2.6. Mg-Al denge diyagramı (Guthrie vd.,1996; Baker 1998).

### Silisyum

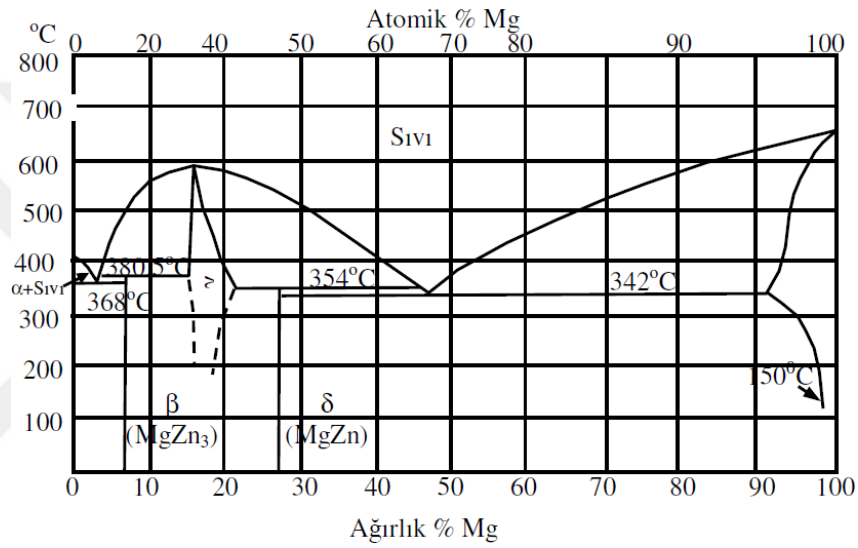
AS serisi magnezyum alaşımlarında bulunan Silisyum (Si), alaşımın yüksek sıcaklıklarda dayanımını arttırmaktır. Eğer alaşımda Fe de varsa Si, Mg alaşımlarının korozyona karşı direncini azaltır (Zhang, 2000; Vogel, 2002). Si atomları Mg matrisi içerisinde, oda sıcaklığında katı halde Mg<sub>2</sub>Si intermetalik fazını oluşturur (Aizawa ve Song, 2006). Kuma dökümlerde oluşan Mg<sub>2</sub>Si fazı basınçlı dökümlerde oluşumuna göre yavaş soğumadan dolayı kabadır ve bu da alaşımı kırılğan yapmaktadır (Kima vd., 2005). Şekil 2.7’de Mg–Si denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.7. Mg-Si denge diyagramı (Baker, 1998; Aizawa ve Song, 2006).

## Çinko

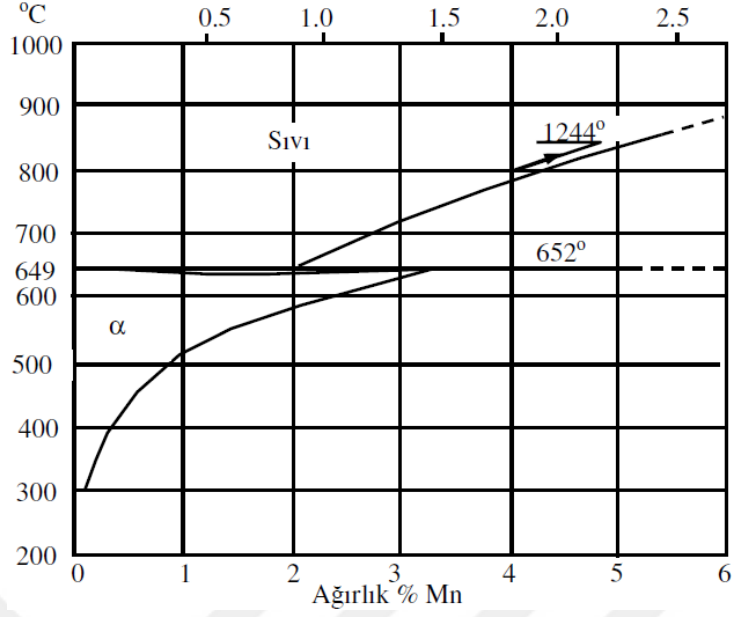
Tane sınırlardaki ötektik miktarını artıran Zn, alaşımın katılaşma sıcaklığını düşürmektedir. Korozyon özelliklerinde Cu'nun kötü etkisini yok etmek için Zn ilave edilmektedir (Schwam vd., 2000; Barber, 2004; Watarai, 2006). Zn, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında sertliği, dayanımı ve aynı zamanda eriyiğin akıcılığını artırmaktadır. Ayrıca Zn alaşımın çekme mukavemetini artırır (Zhang, 2000; Barber 2004).



Şekil 2.8. Mg-Zn denge diyagramı (Zhang, 2000; Schwam vd., 2000).

## Mangan

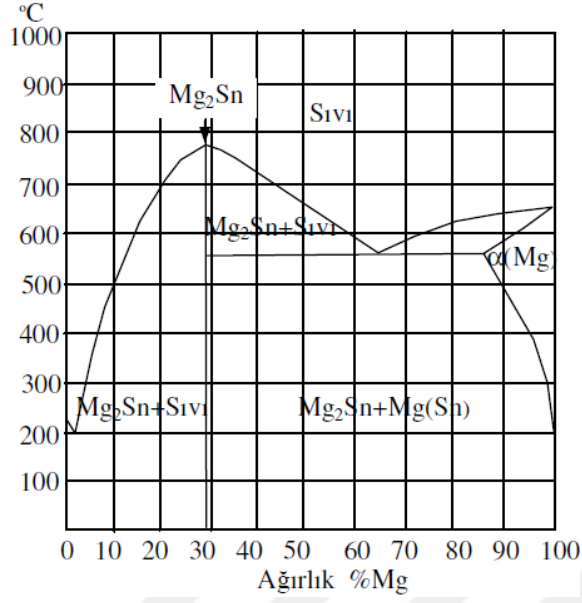
Alaşıma ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini artırmak için %0.1 – 0.5 arasında kullanılır. Mn'in Mg alaşımlarında, korozyon direncine etkisi fazladır. Fe-Mn çökeltilerinde, Fe'in kontrolü için Mn kullanılır. Mn, Mg alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ve Fe'in etkisini azalttığı için, korozyonu engeller. Fakat Mg alaşımlarının dayanımında Mn' in etkisi azdır (Schwam vd., 2000). Şekil 2.9'da Mg-Mn denge diyagramına göre Mn, Mg içersinde %3.4'e kadar sıcaklığa bağlı olarak katı eriyik oluşturabilmektedir.



Şekil 2.9. Mg-Mn denge diyagramı (Baker, 1998).

### Kalay

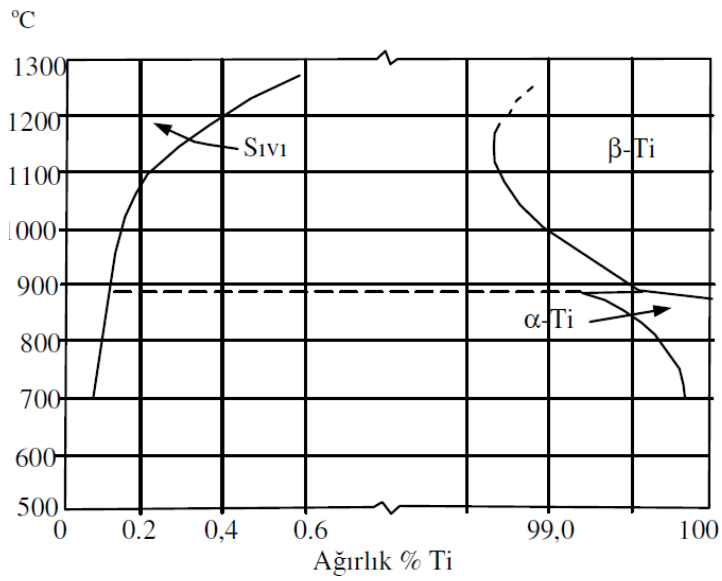
Kalay (Sn), Mg'dan daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve Mg' dan daha az akıcılığı olan bir elementtir. Mg'a ilave edilen Sn, alaşımın sünekliğini artırır, sıcak işlem sırasında da alaşımın çatlama eğilimini azalttığı için aynı zamanda alaşımın işlenebilirliğini de arttırmaktadır (Chung vd., 2005). Sn içeren alaşımda  $Mg_2Sn$  intermetalik faz oluşumu soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızlarında çubuk tipi  $Mg_2Sn$  partiküllerin gözlenmesi Mg matrisi ile birlikte olur (Kang vd., 2007). Şekil 2.10'da Mg-Sn denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.10. Mg-Sn denge diyagramı (Baker, 1998; Aizawa ve Song, 2006).

### Titanyum

Alaşıma ilave edilen Titanyum (Ti), genellikle ince taneli bir yapı elde etmek için eklenir ve Mg içinde çok az çözünürlüğe sahiptir. Hızlı katılaşma ile Mg alaşımları Ti'un çözünürlük miktarı artırılabilir. Ayrıca titanyum magnezyumun korozyona karşı direncini de artırır. Bu durum titanyumun galvanik potansiyelinin düşük olmasından kaynaklanır (Zhao vd., 2007).



Şekil 2.11. Mg-Ti denge diyagramı (Baker 1998).

### 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 (Zhang, 2000; Barber, 2004).

### 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 (Zhang, 2000; Schwam vd., 2000; Vogel 2002).

### Gümüş

Gümüş (Ag) elementi katkısı Mg alaşımlarının sertliği geliştirir, ancak Ag' nin pahalı oluşundan dolayı kullanımı sınırlıdır (Baker, 1998).

### 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 (Hirai vd., 2005; Fan vd., 2007).

### 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 (Kammer, 2006).

### 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 (Lu vd., 2000; Zhang, 2000; Barber, 2004).

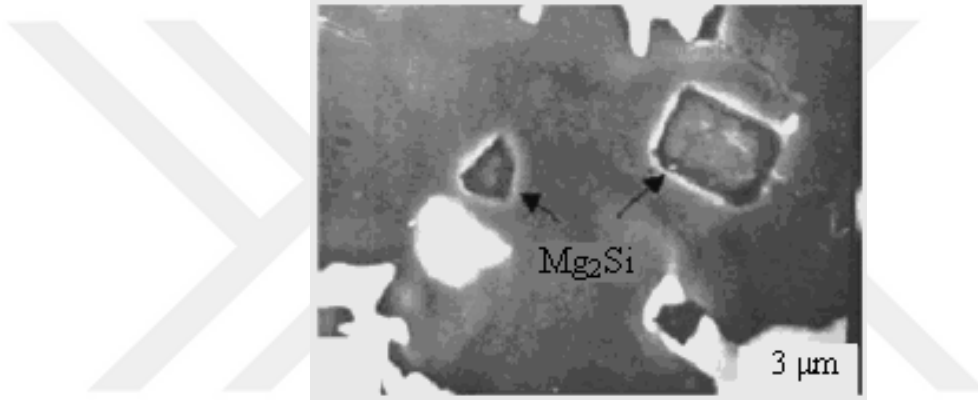
### **2.5. MAGNEZYUM - ALUMİNYUM İKİLİ SİSTEMİ**

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 (Zhang, 2000; Barber, 2004).

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 dörtlü alaşımlar oluştururlar. En fazla kullanılan alaşım elementleri Al, Zn, Mn ve Zr dir. RE, Y ve Ca genellikle yüksek sıcaklıklar için kullanılır (Zhang, 2000).

### 2.5.1. Mg-Al-Si Alaşımları

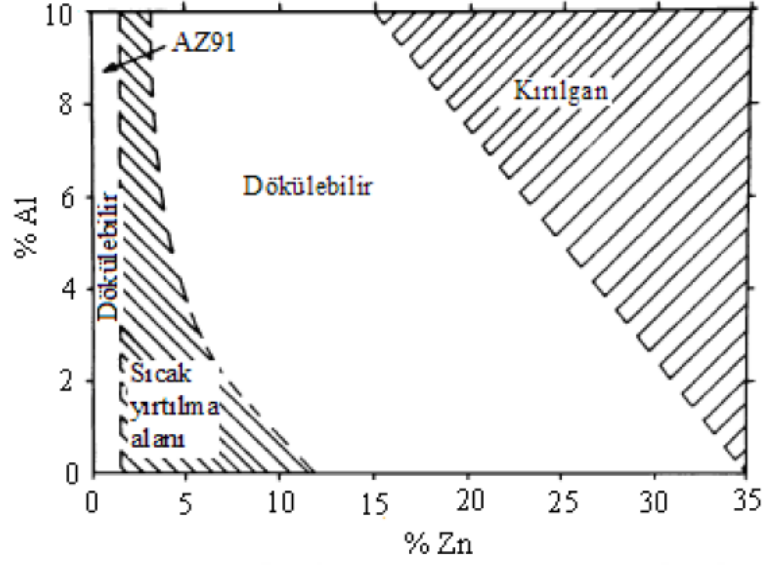
Mg alařımlarında 150 °C' ye kadar sűrűnme direncini geliřtirmek için AS41 (% 4.2 Al, % 1 Si, % 0.35 Mn) ve AS21 (% 2.2 Al, %1 Si, % 0.3 Mn) basınçlı dűkűm alařımları geliřtirilmiřtir. Bu alařımın dayanımı, hızlı katılařma sonucu ince taneli yapıya sahip olan Mg<sub>2</sub>Si fazından kaynaklanmaktadır. Alařım kuma dűkűm uygulamalarında yavař soğumadan dolayı Mg<sub>2</sub>Si fazının kaba taneli olmasına sebebiyet verdiğinden kullanılamamıřtır. Őekil 2.12'de Si'lu Mg alařımının genel mikro yapısı gűrűlmektedir (Zhang, 2000; Feng vd., 2006).



Şekil 2.12. Si ilaveli Mg alaşımlarının genel mikro yapısı (Feng vd., 2006).

### 2.5.2. Mg-Al-Zn Alaşımları

Mg-Al-Zn alařım sistemi, Mg dűkűm alařımlarında önemli bir yere sahiptir. 1913 yılında keřfedilen bu alařım sistemi daha sonra bir çok arařtırmacı tarafından geliřtirilmiřtir (Zhang 2000; Zhang vd., 2006). Őekil 2.13'de Mg-Al-Zn esaslı dűkűm alařımlarının dűkűlebilirlik aralıkları verilmiřtir.



Şekil 2.13. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi (Polmear, 1989; Zhang vd., 1998; Zhang vd., 2006).

### 2.5.3. Mg-Al-RE Alaşımları

RE' nin %1'den fazla eklenmesiyle, Mg- Al esaslı alaşımların sürünme dirençlerinde iyileşme olduğu görülmüştür. Belli başlı toprak alkali elementler RE, kararlı  $Mg_{12}RE$  intermetalik bileşiği oluşturduğundan; hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda kararlıdır ve düzenli bir matris yapısına sahiptirler. Artan Al içeriği ile birlikte dökülebilirliğin yükselmesine rağmen, RE' nin sürünme dirençlerindeki etkisi, bir dereceye kadar Al ilavesini sınırlı kılar. RE miktarı arttıkça sıcak yırtılma eğilimi azalmaktadır (Zhang, 2000; Kima, 2005; Weichao vd., 2006).

## **BÖLÜM 3**

### **KOROZYON**

#### **3.1. 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 (Gerengi, 2008). Korozyon olayı kendi içerisinde 2 sınıfta incelenebilir. Bunlar;

##### **3.1.1. 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 (Gerengi, 2008).

##### **3.1.2. 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 (Konus, 2005).

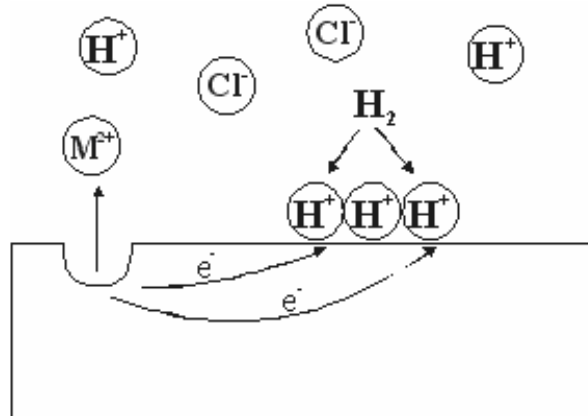
Korozyon tepkimeleri, çoğu metallerin termodinamik kararsızlığı sonucu (Au, Pt, Ir ve Pd gibi soy metaller dışında) veya dış akımların etkisiyle yürür. Metal korozyonu ister anodik ister katodik tepkime ile denetlensin, çoğu hallerde korozyon hızı, yük aktarım basamağı ile sınırlanır. Metal iyonları oluştuğu zaman elektrik devresi tamamlanarak sürekli bir akım yolu sağlanmış olur (Konus, 2005).

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 (Konus, 2005; Yakar, 2006).

Sulu çözelti kimyasında korozyon elektrokimyasal tepkimelerle gerçekleşir. Bu tepkimelerde anotta metal yükseltgenir, katot da ise çözeltideki reaktif indirgenir (Yakar, 2006).

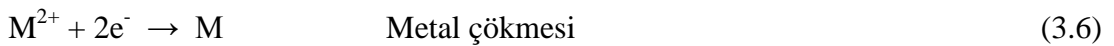
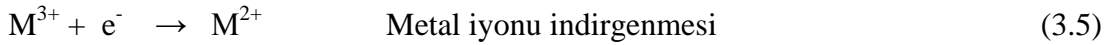


Bu tepkimeler metal yüzeyinde aynı anda ve aynı hızda gerçekleşirler. Yani korozyon sırasında anottaki yükseltgenme hızı katottaki indirgenme hızına eşittir. Şekil 3.1'de HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olayların şematik gösterimi görülmektedir (Yakar, 2006).



Şekil 3.1. HCl ortamında metalin korozyonu sırasında gerçekleşen elektrokimyasal olaylar (Yakar, 2006).

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 (Yakar, 2006). 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 (Yakar, 2006).

## 3.2. KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Mühendislik açısından daha önemli olan bölgesel korozyon 2 ana başlık altında incelenebilir (Çizelge 3.1). Bunlar;

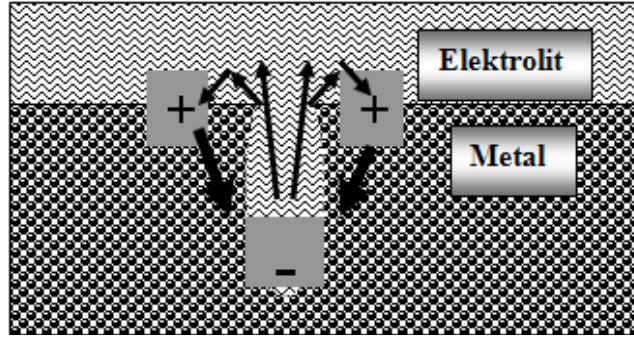
- Makro Korozyon
- Mikro Korozyon

Çizelge 3.1. Korozyon türleri (Yakar, 2006).

| 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  |                           |

### 3.2.1. 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 (Küçükara, 2008).

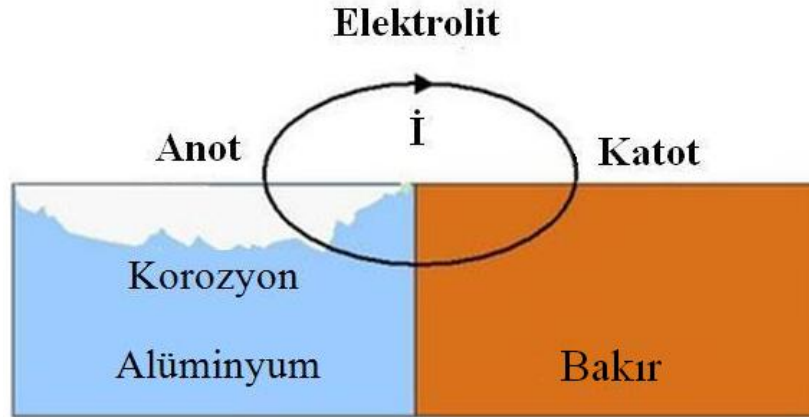


Şekil 3.2. Çukur korozyon işleyiş şeması (Bilhan, 2003)

Çukurun dibi anot görevi görürken, çukur ağzındaki yüzeyler katot görevi görmektedirler. İyonik akım elektrolitten geçerken, elektronik akım metalden geçer (Şekil 3.2) (Bilhan, 2003).

### 3.2.2. Galvanik Korozyon

İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Metallerden daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur (Şekil 3.3). Böylece bir korozyon hücresi meydana gelir. Bu hücrede yalnız anot olan metal korozyona uğrar (Bilhan, 2003).



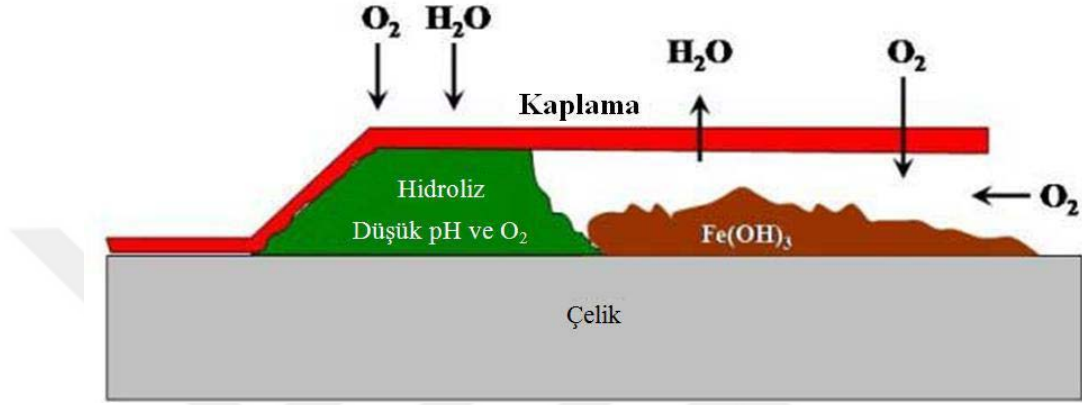
Şekil 3.3. Galvanik korozyonun şematik gösterimi (Bilhan, 2003).





### 3.2.5. Fili Form Korozyonu

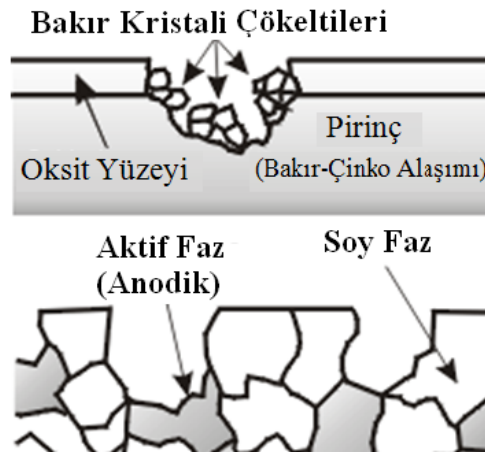
Metallerin yüzeyinde bulunan boya v.b. kaplamaların altında kaplama kalınlığının incelmesi bölgeden başlayarak kaplama altında devam eden bir korozyon türüdür (Şekil 3.5) (Küçükçara, 2008).



Şekil 3.5. Fili form korozyonunun şematik gösterimi (Küçükçara, 2008).

### 3.2.6. Seçimli Korozyon

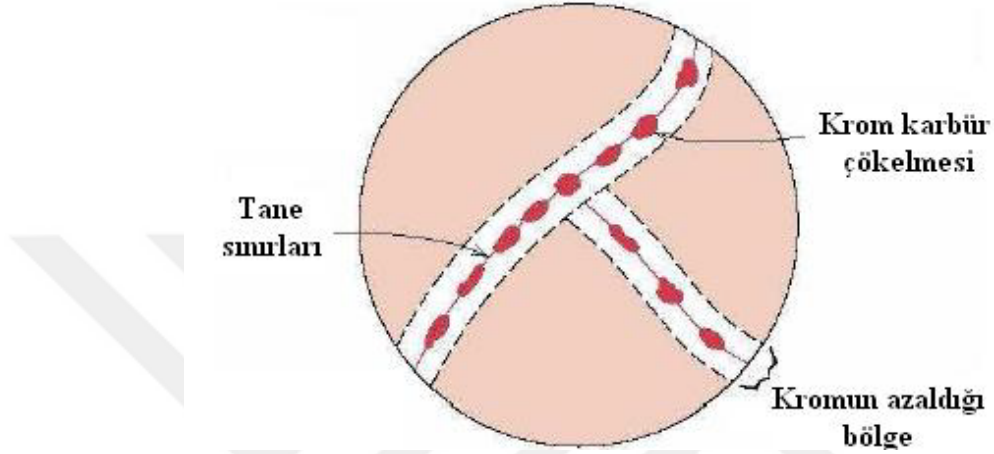
Bir alaşım içerisinde alaşıma katılmayıp serbest kalan elementlerin bir tanesinin korozyona uğrayıp diğer elementin korozyona uğramaması durumudur. Pirinç malzemeler bu korozyon türüne en iyi örneklerdir (Şekil 3.6) (Küçükçara, 2008).



Şekil 3.6. Seçimli korozyonunun şematik gösterimi (Küçükçara, 2008).

### 3.2.7. Taneler Arası Korozyon

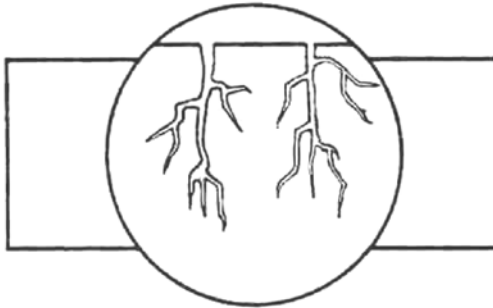
Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür (Şekil 3.7) (Küçükpara, 2008).



Şekil 3.7. Taneler arası korozyonun meydana geldiği bölge (Görener, 2007).

### 3.2.8. 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 oluşturmaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur (Şekil 3.8) (Görener,2007).



Şekil 3.8. Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi (Görener,2007).

### 3.2.9. Yorulmalı Korozyon

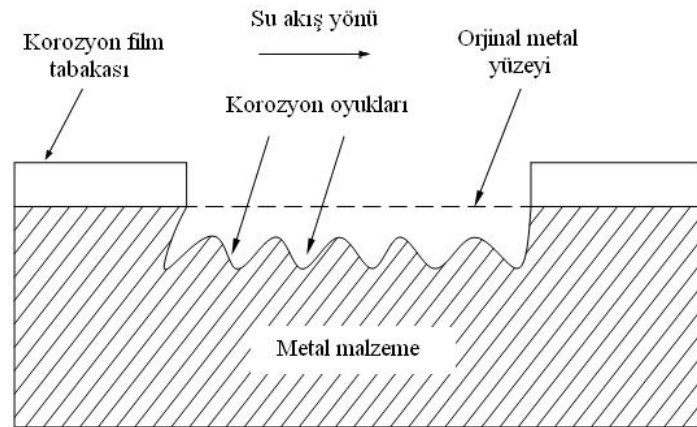
Periyodik olarak yükleme-boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş halde bulunan metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisiyle çatlayabilir. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede çatlamasına neden olur (Şekil 3.9) (Küçük kara, 2008).



Şekil 3.9. Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi (Küçük kara, 2008).

### 3.2.10. 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 3.10) (Küçük kara, 2008).



Şekil 3.10. Erozyonlu korozyonun şematik gösterimi (Küçük kara, 2008).

### 3.3. 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 (Konus, 2005).

#### 3.3.1. Kütle Azalması Yöntemi

Kütle kaybından korozyon hızı belirlenirken çözünmenin homojen olması ve korozyon ürünlerinin ya tamamen çözünür veya uygun bir çözeltilde çözünerek metal yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir (Konus, 2005).

$$\text{Korozyon hızı} = \frac{\text{kütle azalması}}{\text{metal yüzey alanı} \times \text{zaman}} \quad (3.7)$$

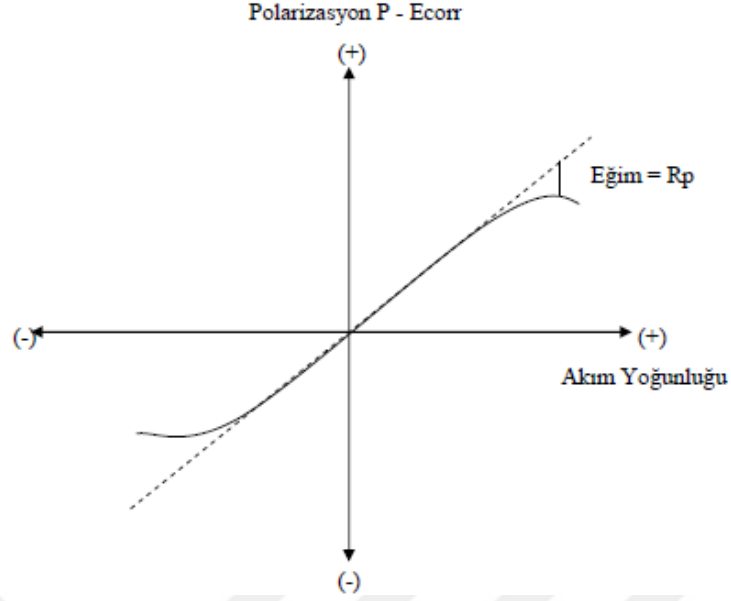
Bu yöntemde korozyon akımı Faraday yasası ile şöyle bulunabilir:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\Delta m \cdot F \cdot n}{\Delta t \cdot M} \quad (3.8)$$

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 (Konus, 2005).

#### 3.3.2. 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 3.11) (Konus, 2005).



Şekil 3.11. Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması (Yakar, 2006).

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

$$I_{corr} = \Delta m \cdot F \cdot n / \Delta t \cdot M_k \quad (3.9)$$

Burada;  $\Delta m$  ağırlık azalması, F Faraday sabiti; n alınan verilen elektron sayısı,  $M_k$  metalin atom gramının kütlesi,  $\Delta t$  zaman aralığıdır (Yakar, 2006).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad (3.10)$$

$I_{corr}$  korozyon akımını,  $\beta_a$  ve  $\beta_c$  sırasıyla anodik ve katodik tafel sabitlerini,  $R_p$  polarizasyon direncini gösterir (Yakar, 2006).

### 3.3.3. 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 (Yakar, 2006).

### 3.3.4. 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 (Yakar, 2006).

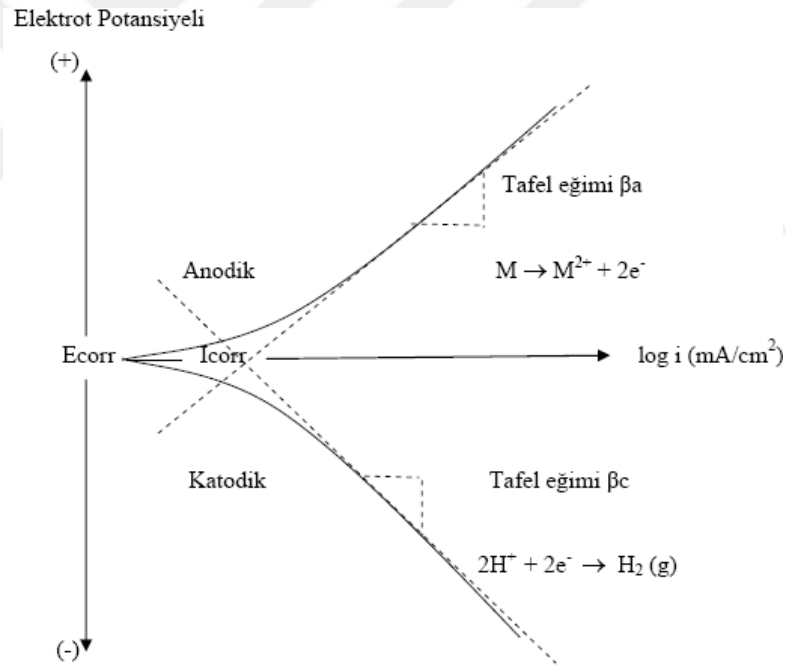
Korozyon metali ve çözelti arasında anodik ve katodik reaksiyonların oluşup dengeye gelmesiyle oluşur. Anodik reaksiyonda açığa çıkan elektron katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Bu yolla korozyon hızının belirlenmesi, korozyona uğrayan metalin anot ve katot yüzeyleri arasındaki akımı ölçülerek 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 (Gerengi, 2008).

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 (Gerengi, 2008).

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 3.12'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 3.12). Bu eğrilerin ekstra polarizasyonu alındığında kesişen noktadaki korozyon potansiyeli, buna karşılık gelen akım ise korozyon akımıdır. Korozyon akımı korozyon hızı hakkında bilgi verir (Gerengi, 2008).

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 (Gerengi, 2008).



Şekil 3.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri (Gerengi, 2008).

Anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda gerçekleştiğinden elektrot potansiyeli karma bir potansiyel değere yani E<sub>corr</sub>'a ulaşır. Buna karşılık gelen akımda I<sub>corr</sub> korozyon akımı olur (Gerengi, 2008).



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 ( $I_{corr}$ ) 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 (Konus, 2005).

Metal çözünmesi akım yoğunluğunu veren eşitlik:

$$I_{anot} = i_0 \exp(\beta\eta nF/RT) \quad (3.11)$$

Katodik ve anodik reaksiyonlar bir korozyon işlemi olarak birleştirildiğinde, metal çözülümünden kaynaklı anodik akım, redüksiyon nedeniyle oluşan eşit katodik akım ile dengelenmelidir. Bu durumda  $I_{corr}$  korozyon akımıdır ve sadece tek bir potansiyelde gerçekleşebilir, o da  $E_{corr}$ , yani korozyon potansiyelidir.  $E_{corr}$ 'un değeri temel bir termodinamik anlama sahip değildir (Konus, 2005).

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  $i_{anot} + i_{katot}$  toplamıdır ve korozyon potansiyelinde ( $E_{corr}$ ) 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 ( $b_{anot}$ ,  $b_{katot}$ ), denge potansiyeli ( $E_e$ ) gibi metal çözünme reaksiyonuna dair veriler, deneyler sonucu bulunmalıdır (Konus, 2005).

$$E_{corr} = (E_e)_{anot} + b_{anot} \log(I_{corr}/i_0) \quad (3.12)$$

$$i_{\text{corr}} = i_0 \exp \left[ \frac{2,303}{b_{\text{anot}}} (E_{\text{corr}} - (E_e)_{\text{anot}}) \right] \quad (3.13)$$



## BÖLÜM 4

### AŞINMA

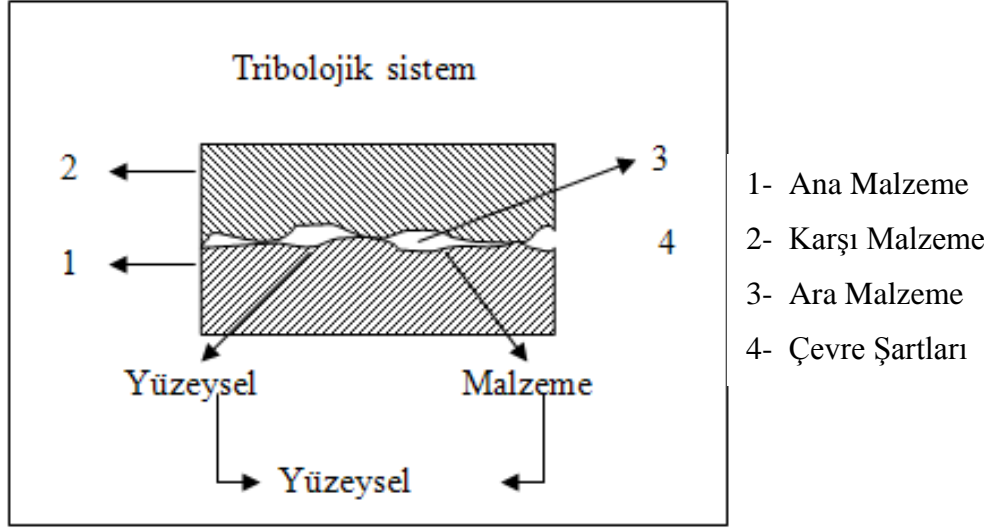
#### 4.1. AŞINMA NEDİR?

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 (Alision, 1981).

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, mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması, yavaş fakat devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi ve isteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir. Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma aşınma değildir (Tuç, 2003).

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısı şartları ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistem, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi;

- Ana malzeme (aşınan)
- Karşı malzeme (aşındıran)
- Ara malzeme
- Çevre ortamı (Yük, hareket) elemanlarından meydana gelir (Kayalı, 1996).



Şekil 4.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi (Kjeldsteen, 1995).

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 (Kjeldsteen, 1995; Yılmaz, 1997).

#### 4.1.1. 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 (Halling, 1983).

#### **4.1.2. Aşınma Mekanizmaları**

Bir tribolojik sistemin elemanları arasındaki karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri ve bundan dolayı da farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir (Weijiu, 2006).

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

Evrensel bir aşınma türü olmadığı için, aşınmayı test edecek makine ve metot yoktur. Laboratuvar testleri, aşınma türünün servis şartlarını taklit etmeyi amaçlar (Yılmaz, 1997).

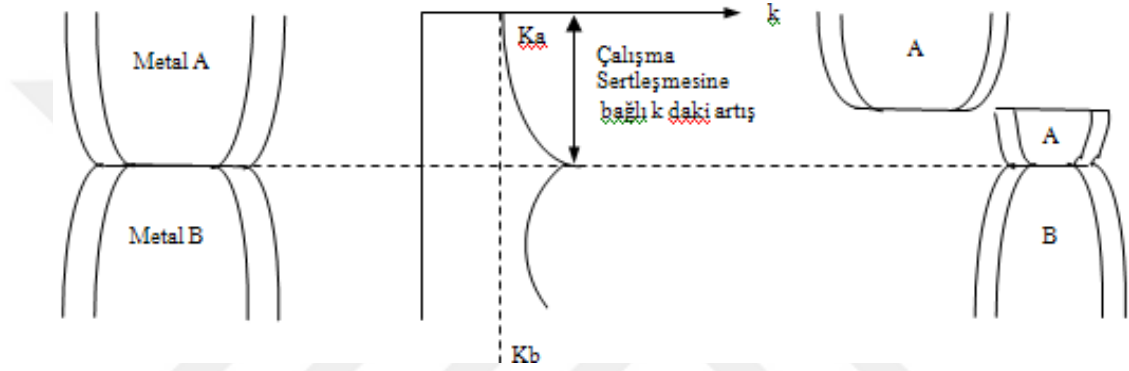
##### **4.1.2.1. Yapışma Aşınması (Adhesiv Aşınma)**

Yapışma aşınması olarak da bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının hazırlayıcısı olarak bulunmaz (Halling, 1983).

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 aşılar ve plastik deformasyon meydana gelir. 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 (Ashby, 1996).

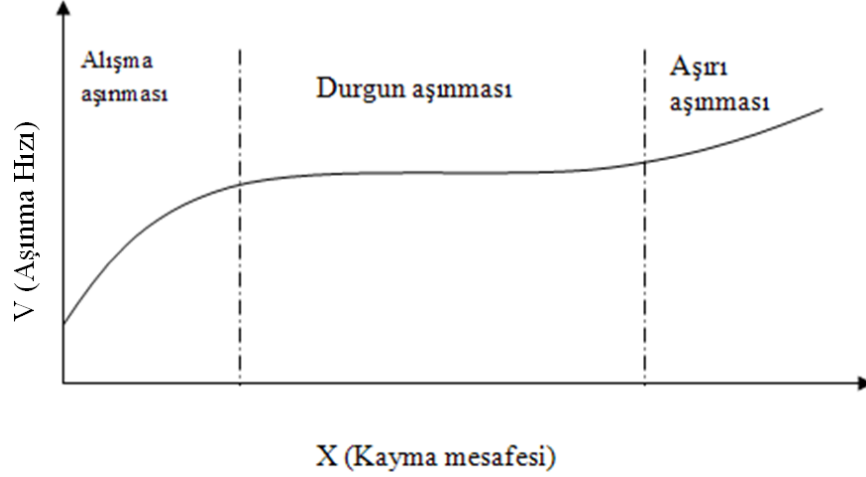
Şekil 4.2 'de görüldüğü gibi A ve B atomları arasındaki yapışma yeteri kadar iyi ise, yumuşak olan A metalinden kopan parçacıklar taşınacaktır. Eğer, A ve B malzemeleri aynı ise, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelecektir. Çizelge 4.1'de metallerin yapışmasını (adhezyonu) etkileyen faktörler gösterilmektedir (Ashby, 1996).



Şekil 4.2. Adheziv aşınma (Ashby, 1996).

Çizelge 4.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler (Yılmaz, 1997).

| Özellik                              | Tür veya Büyüklük | Adhezyon Katsayısı |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|
| 1. Yüzeye 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            | $b^2$              |



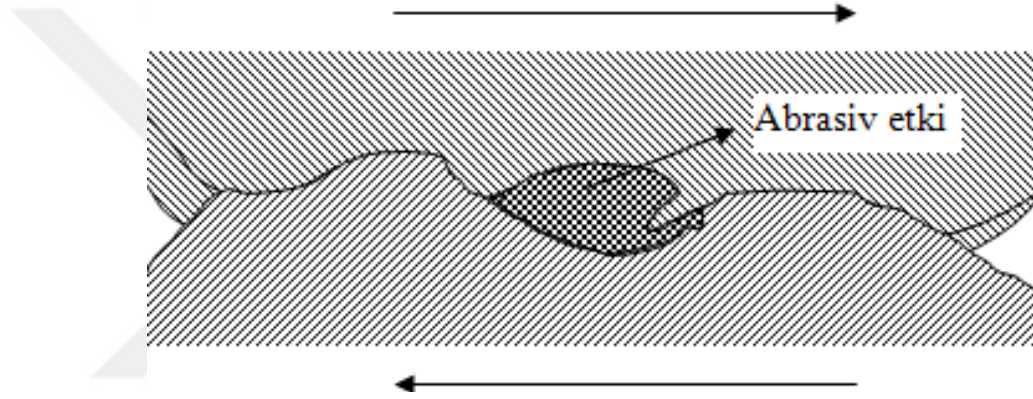
Şekil 4.3. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri (More, 1975).

Adhesiv aşınma; Şekil 4.3’de görüldüğü gibi üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir. Yüzeyle hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeyle 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 (Szeri, 1980).

#### 4.1.2.2. 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 malzemenin parça kopartılması olayı ile benzer işlem gösterirler (Ashby,1996). Yüzeyle baskı kuvveti uygulandığı zaman sert yüzey üzerindeki asperitler (aşındırıcı yüzeyindeki nano tepelikler) yumuşak yüzeye gömülür. Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman asperitler yumuşak

yüzeyi kazırlar. Aşınma; yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Şekil 4.4'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 (Stachowiak, 2001).



Şekil 4.4. Abrasiv aşınma (Kayalı, 1996).

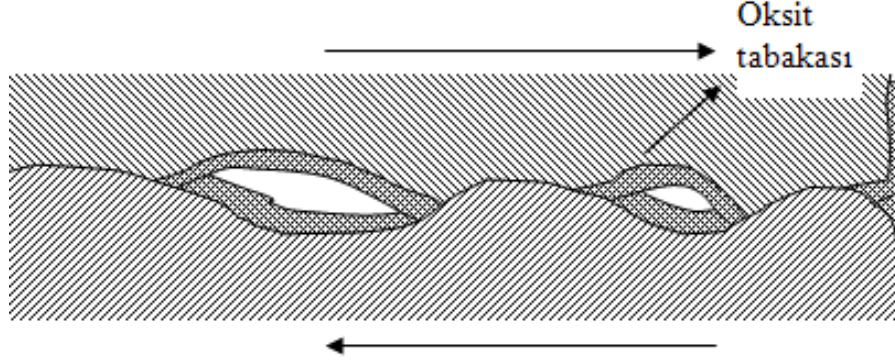
Kayma ve abrasiv aşınma arasındaki fark çok belirgin değildir. Her ikisi de temiz yüzeylerde partikül (talaş) oluşmadan önce, meydana gelen deformasyona bağlı olarak bir aşınma alanı halkasının parçalarıdır (Rigney, 1998). Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrasiv duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin, kaymanın ilk aşamalarında oluşan partiküller her iki kayma bileşenini de aşındırabilir. Sert partiküllerin boyutunun kritik bir değer altına düşmesine göre abrasiv aşınmadan kayma aşınmasına bir geçiş olduğu belirtilmiştir (Sasada, 1984).

#### 4.1.2.3. 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. Şekil 4.5.'de tribo oksidasyon aşınma görülmektedir.

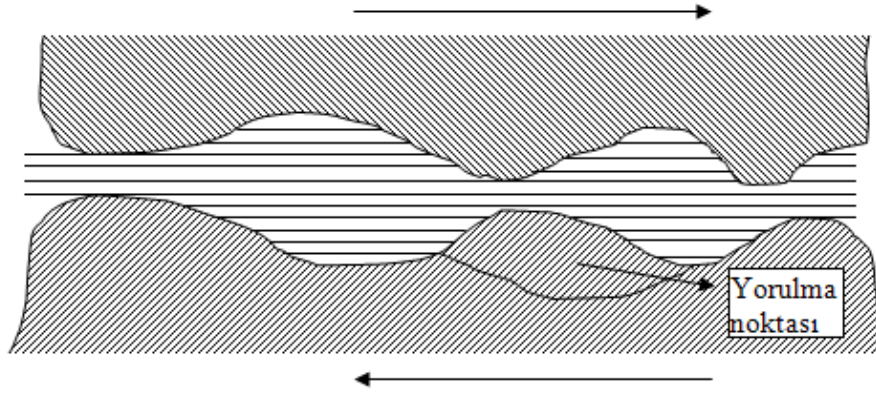


Şekil 4.5. Tribo oksidasyon aşınması (Kayalı, 1996).

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 (Alision, 1981).

#### 4.1.2.4. Yorulma Aşınması

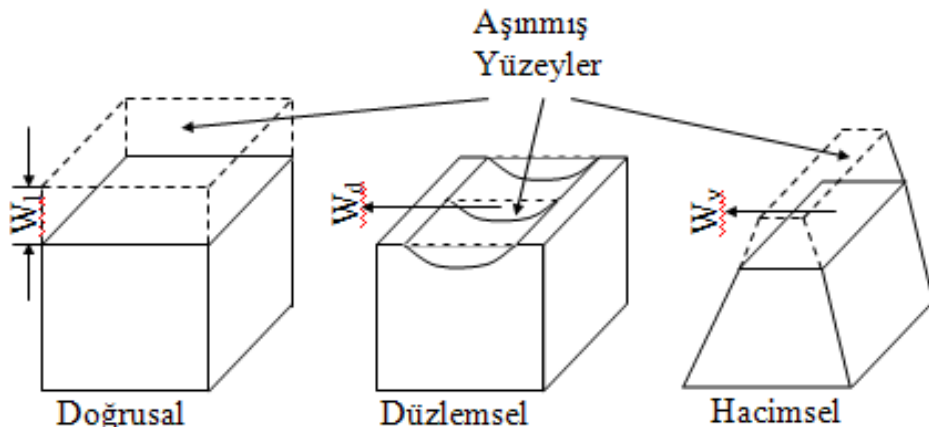
Temas yüzeylerinde oluşan küçük çukurcuklar halinde kendini gösterir. Genellikle dişli çarklar, kamlar ve rulmanlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde oluşur ve zamanla yorulma sonucu zararlı hale gelirler. Bu elastik ve plastik olayların devam etmesi sonucu mikro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



Şekil 4.6. Yorulma aşınması (Kayalı, 1996).

#### 4.2. 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 4.7'de doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma gösterilmiştir (Kayalı, 1996).



Şekil 4.7. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi (Kayalı, 1996).

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 (Yılmaz, 1997). Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

- Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınmanın değerlerinin ölçüldüğü deneylerdir.
- 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.

#### 4.2.1. 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 (Yılmaz, 1997);

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S} \text{ (mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{ m}^{-1}) \quad \text{Burada;} \quad (4.3)$$

$W_a$  = 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.

$$W_r = \frac{1}{W_a} (\text{N.m} / \text{mm}^{-3}) \quad (4.4)$$

#### 4.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi ve bu ölçümün başlangıç değeri ile karşılaştırması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile  $\mu\text{m}$  duyarlılığında ölçülmelidir (Yılmaz 1997).

#### 4.2.3. İz Değişimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu iz karakteristیک bir boyutunun (örneğin çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucu izidir. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutundaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir (Yılmaz 1997).

#### 4.2.4. 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 değiştirmeden

ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarda kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir (Yılmaz, 1997).



## BÖLÜM 5

### LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 5.1. MAGNUZYUM 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;

Liping ve arkadaşları 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 (Liping, 2008).

Guo ve arkadaşları 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 (Guo, 2008).

Ahlatcı 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 (Ahlatcı, 2008).

Jaschik ve arkadaşları;  $Mg_{17}Al_{12}$  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 (Jaschik, 2000).

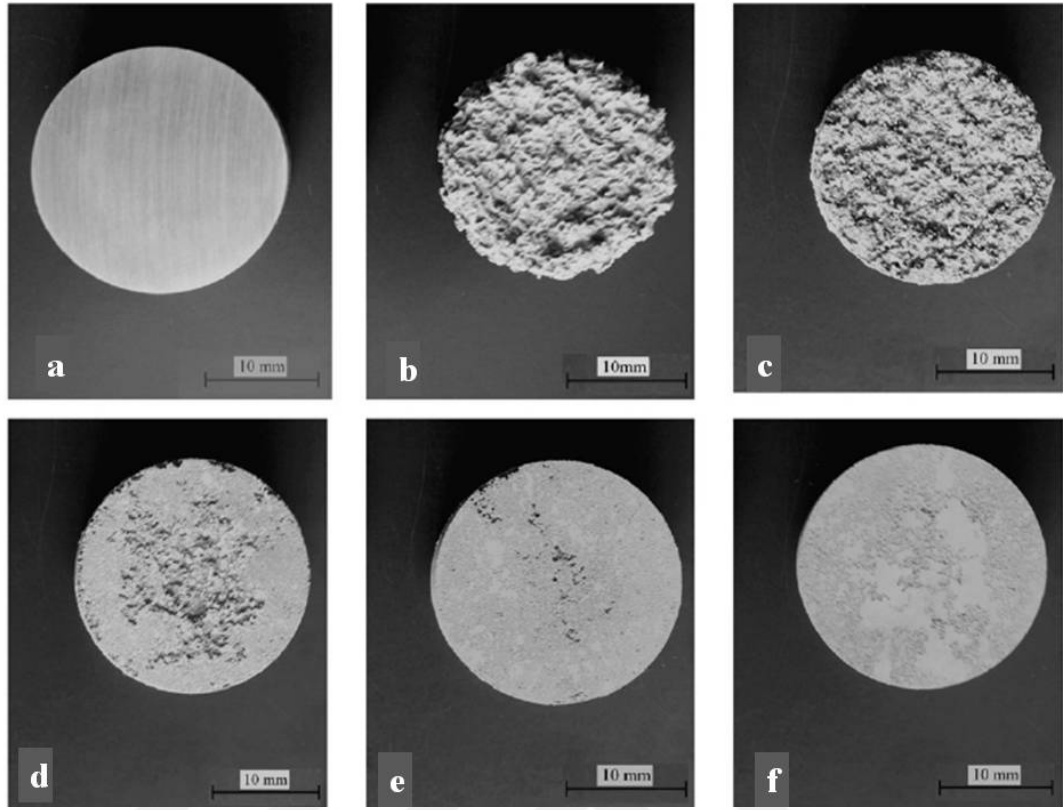
Rajashekhar ve ekibi; Mg–Al ikili sisteminde tane sınırlarında  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalığının oluştuğunu ve bu fazın alaşımın korozyon ve yorulma dayanımına etki ettiği belirtilmiştir (Rajashekhar, 2000).

Mordike ve arkadaşları 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 (Mordike, 2000).

Smola ve arkadaşları; da 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 (Smola, 2000).

## **5.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON ÖZELLİKLERİ**

Candan ve arkadaşları; 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 5.1) (Candan, 2011).



Şekil 5.1. 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 (Candan, 2011).

Candan ve arkadaşlarının 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. (Candan, 2009).

Mg–Al ikili sistemlerinde meydana gelen korozyon olayı “Mg ve Al Alaşımlarının Korozyon Direnci” isimli kitapta şu şekilde açıklanmıştır (Edward, 2010). 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 ortamdaki bazik ortama gidildikçe devam eder. Sonuç olarak bu saldırgan ortamda korozyon direnci düşer ve kopan iyonlar Mg metalinin ağırlıkça azalmasına sebep olur.

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

Taltavull ve diğ. yaptıkları çalışmada ingota dökümle üretilmiş ve ısıl işlem uygulanmamış AM50B (5,25 Al, 0,3 Mn, 0,1 Zn, 0,05 Si) magnezyum alaşımını pin on disk yöntemi ile F114 çelik disk üzerinde aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testler oda sıcaklığında, kuru kayma yöntemiyle, 10-250N arasında yükler uygulanarak 0,1-1 m/sn hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda temel aşınma mekanizmaları abresiv, tabakalara ayrılma, edezif, oksidasyon, plastik deformasyon ve aşırı plastik deformasyon olarak belirtilmiştir (Taltavull, 2014)

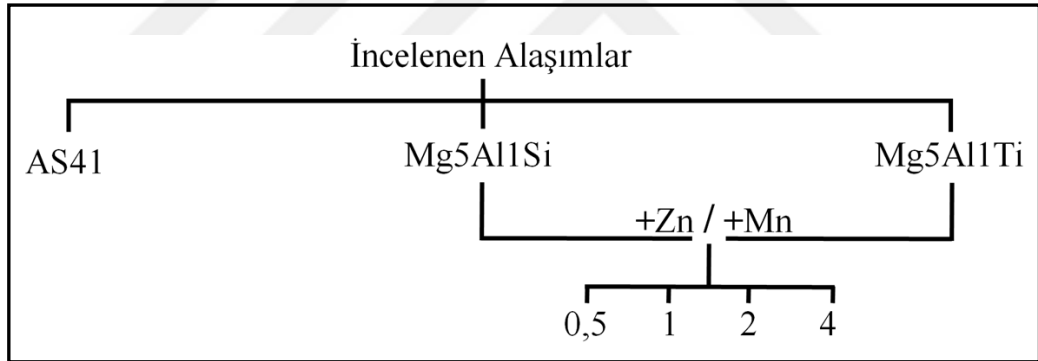
Abresif ve oksidasyonla aşınma mekanizması uygulanan düşük yüklerde (10-40N) ve yavaş aşınma hızlarında (0,1-0,3 m/sn) belirlenmiştir. Tabakalara ayrılma, adezyon ve oksidasyon aşınma mekanizmaları orta şiddette uygulanan yükler (40-80N) ile yavaş kayma hızlarında (0,1-0,3 m/sn) ve düşük ve orta yüklerin (10-80N) orta ve yüksek kayma hızlarında (0,5-1 m/sn) uygulandığı ortamlarda olduğu tanımlanmıştır. Plastik deformasyon uygulanan orta ve yüksek yüklerde (80-150N) ve düşük ve orta kayma hızlarında (0,1-0,5 m/sn) belirlenmiştir. Son olarak aşırı plastik deformasyon uygulanan yüksek yüklemelerin (150-250N) düşük ve orta kayma hızlarında (0,1-0,5 m/sn) ve ayrıca orta ve yüksek yüklemelerin (150-250N) en yüksek kayma hızlarında (1 m/sn) belirlenmiştir. Orta derecede aşınmanın olduğu kısımlarda Abresif, adezif, tabakalara ayrılma ve oksidasyon ana aşınma mekanizması olarak bulunurken, şiddetli aşınmanın olduğu kısımlarda plastik ve aşırı plastik deformasyon aşınma mekanizmalarının olduğu belirtilmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada döküm yolu ile üretilmiş AS41alaşımı ile karşılaştırmalı olarak döküm Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının ve bu master alaşımlarına farklı oranlarda Zn ve Mn ilave edilerek üretilmiş alaşımların korozyon ve mekanik özelliklerine alaşım elementinin etkisi incelenmiştir.

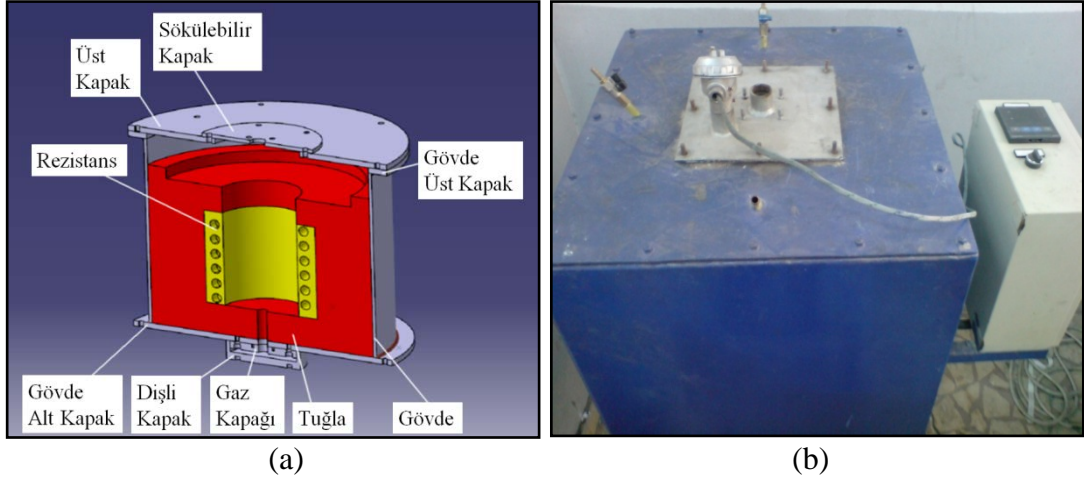
Bu çalışmada kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş 19 farklı alaşımın bileşim akış şeması Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. İncelenen alaşımların üretim akış şeması.

#### 6.1. ERGİTME İLE ALAŞIM ÜRETİMİ

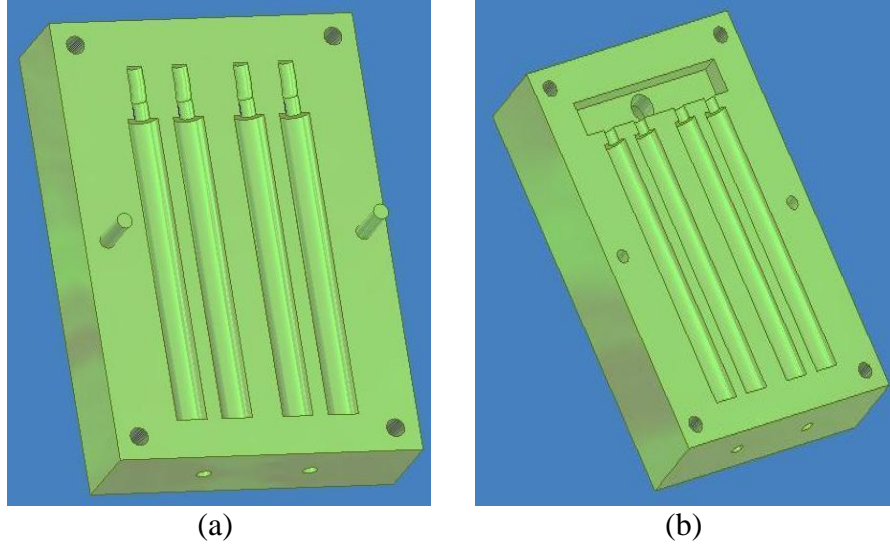
İncelenen alaşımların ergitme ve döküm işlemleri Şekil 6.2'de gösterilen özel olarak üretilmiş, 1200 °C kapasiteli atmosfer kontrollü elektrik rezistanslı fırında (Palta, 2009), yapılmıştır.



Şekil 6.2. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan elektrik rezistanslı fırının a) kesitten çizim ve b) dıştan gerçek görünümü.

İncelenen alaşımların üretimi için %99,9 saflıktaki Mg matris alaşımı olarak ve Al12Si, Al30Si, Al10Ti referans alaşımları ise Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının üretimi için kullanılmıştır.

Daha sonra 800 °C’de ergitilmiş Mg5Al1Si ve/veya Mg5Al1Ti master alaşımlarına, ağırlıkça %0,5 %1, %2 ve %4 oranlarında Zn ve/veya Mn alaşım elementi ile % 0,05 Stronsiyum (Al-ağırlıkça % 10 Sr ön alaşımı yardımı ile), %0,2 kırmızı fosfor ve % 0,3 NaCl+30MgCl<sub>2</sub>+10KCl tuz karışımları ilave edilmiştir. Burada alaşımlama haricinde yapılan ilavenin amacı çekirdeklenme ve ergiyin yüzeyini örterek atmosferden korumaktır. Yukarıda adı geçen tüm ilaveler, oksidasyon kaybını dengelemek için ağırlıkça % 15 daha fazla olarak şarj edilmiştir. Ergiyik yüzeyi koruyucu tuz karışımı maddenin yanı sıra Argon ve SF6 gazı ile kaplanmıştır. Ergiyik, 20 mm çapında 250 mm uzunluğunda çubuk şekilli ingotlar üretmek için 300 °C’de ısıtılmış metalik kalıba dökülmüştür. Kullanılan metalik kalıbın çizimi Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Dökümün yapıldığı metalik kalıbın a) alt ve b) üst kısmının çizim görünümü.

Bu çalışmada incelenen master alaşımları ve farklı oranlarda Zn ve Mn elementi ilave edilmiş tüm alaşımlar daha homojen bir yapı elde etmek için ön dökümden sonra bir kez daha ergitilerek dökülmüştür.

## 6.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

### 6.2.1. Numune Hazırlama

Numuneler, metalografik olarak hazırlanması amacıyla öncelikle 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalarla zımparalanıp, % 0,3'lük alümina ile parlatma işleminden sonra %2'lik nital ile dağlanmıştır. Dağlama süresi malzemeye göre değişiklik göstermiştir. Si elementi içerikli alaşımlar yaklaşık 20 saniyede dağlanırken Ti elementi içerikli alaşımlar ortalama 70 saniyede dağlanmıştır.

### 6.2.2. Mikroskop İncelemesi Ve Faz Analizi

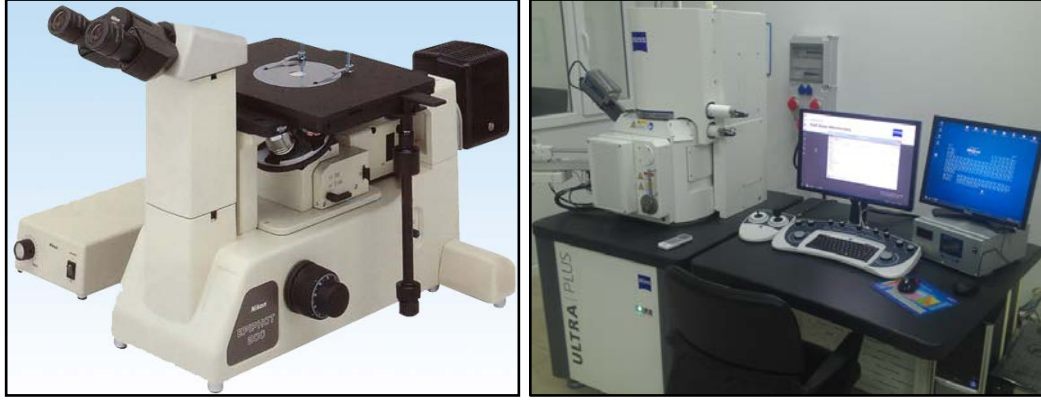
Bu çalışmada metalografik olarak hazırlanmış numunelerin mikroyapı incelemesi ile mekanik ve korozyon deneyleri sonrası hasara uğramış numune yüzey görüntülerinin incelenmesi optik ışık mikroskobu, stereo mikroskop ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Tüm optik mikroyapı görüntüleri için Nikon Epiphot 200 Model optik ışık mikroskobu ve Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka enerji dağılımı, element analizi (EDS) aparatına sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

İncelenen alaşımların tane boyutunu ölçmek için Optik Mikroskop yardımıyla elde edilen mikroyapı görüntülerinden doğrusal kesiştirme (Heyn usulü) yöntemi ile tane boyutu hesaplanmıştır (Salman, 2014). Tatminkar bir ortalama için birbirine paralel 5 çizgi üzerinde ölçümler yapılmıştır. Çizgi boyları ( $\mu\text{m}$  olarak) ortalama kesilen tane sayısına bölünerek ortalama kesişme uzunluğu diğer bir tabirle tane boyutu bulunmuştur. Diğer çizgilerdeki değerler de toplanarak beşe bölünmüştür.

Korozyon ve aşınma testleri sonrası hasara uğramış numunenin hasar mekanizmasının belirlenmesi için numune yüzeyleri ve yüzey altı kesit görüntüleri, optik ışık mikroskobu ve SEM cihazlarının yanı sıra Nikon Shuttle Pix P-400R Model Stereo Mikroskop yardımı ile incelenmiştir.

İncelenen numunelerin mikroyapısında oluşan fazların analizi için Rigaku Ultra IV model X-ışınları cihazı kullanılmıştır. X-ışını, 40 kV jeneratör gerilimi altında, 20 mA akımda  $20^{\circ}$ - $90^{\circ}$  açı aralığında ve  $0,02^{\circ}$  adım tarama boyutunda elde edilmiştir. Radyasyon oluşturmak için Cu- $K\alpha$  ışını kullanılmıştır.

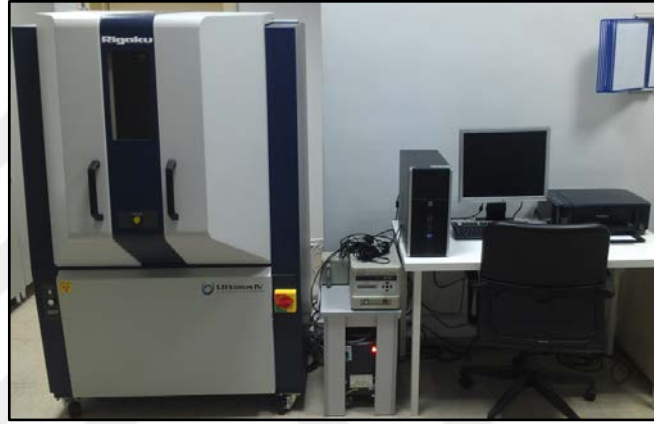


(a)

(b)



(c)



(d)

Şekil 6.4. Mikroyapı ve karakterizasyon incelemelerinde kullanılan a) Nikon Epiphot 200 Model optik ışık mikroskobu, b) Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu (SEM), c) Nikon Shuttle Pix P-400R Model stereo mikroskop, d) Rıgaku Ultra IV model X-ışınları cihazı (XRD).

### 6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ

Üretilen alaşımların yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre Precisa yoğunluk ölçüm kitine (Şekil 6.5a) sahip Precisa marka XS 220A model 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik tartıda (Şekil 6.5b) ölçülmüştür. Numunelerin yoğunlukları  $g/cm^3$  biriminde tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.5. Ağırlık ve yoğunluk ölçümü için kullanılan a) Precisa yoğunluk ölçüm kiti ve b) Precisa marka XS 220A model 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik tartı.

#### 6.4. MEKANİK DENEYLER

Üretilen alaşımların mekanik özellikleri, sertlik ölçümü ve çekme deneyi ile belirlenmiştir.

##### 6.4.1. Sertlik Deneyi

İncelenen alaşımların kütleli sertlikleri, Shimadzu HMV2 mikro sertlik test cihazında, Vickers batıcı ucu ile 500 gr (HV0,5) batma yükü uygulanarak ölçülmüştür (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Shimadzu HMV2 mikrosertlik test cihazı.

Numunelerin sertlik değerleri numunenin en dışından merkezine doğru eşit aralıklarla 10 adet başarılı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

#### 6.4.2. Çekme Deneyi

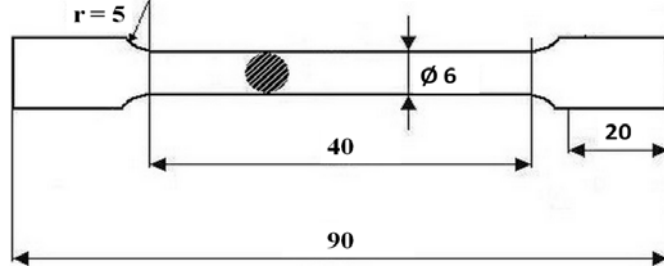
Üretilen alaşımların çekme deneyleri Karabük Üniversitesi bünyesinde bulunan 50 kN kapasiteli SHIMADZU AG-IS marka çekme cihazında (Şekil 6.7) yapılmıştır. Çekme deneyi sonrası incelenen alaşımların akma mukavemeti, max çekme mukavemeti ve % uzama değerleri kaydedilmiştir. İncelenen alaşımların mekanik özellikleri, 4 adet başarılı ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.7. Çekme testinde kullanılan SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazı.

Çekme deneylerinde kullanılan numuneler ASTM E 8M-99 standardına göre hazırlanmış ve şematik olarak Şekil 6.8'de gösterilmiştir.





Şekil 6.8. Çekme deneyi numune ölçüleri.

## 6.5. KOROZYON DENEYLERİ

İncelenen numunelerin korozyon deneyleri, ISO 11846 standardında belirtildiği gibi taneler arası korozyonu hızlandıran 30 g/l NaCl + 10 ml/l HCl bileşimindeki korozyon çözeltisi içerisinde hem ağırlık kaybı hem de korozyon potansiyeli/akım yoğunluğu ölçümlerine göre yapılmıştır.

### 6.5.1. Ağırlık Kaybı Ölçülen Korozyon Deneyleri (Daldırmalı Korozyon)

Farklı oranlarda Zn ve Mn içeren Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti alaşımları ile AS41 alaşımından 15 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde silindirik şekilli olarak numuneler ASTM G1-90 standardına göre hazırlanmıştır. Numuneler korozyona dayanıklı naylon file yardımı ile korozyon çözeltisine daldırılmıştır. Bundan dolayı ağırlık kaybı ölçümü ile yapılan korozyon deneyine daldırmalı korozyon deneyi adı verilmiştir.



Şekil 6.9. Temizleme işlemlerinde kullanılan ultrasonik temizleme cihazı.

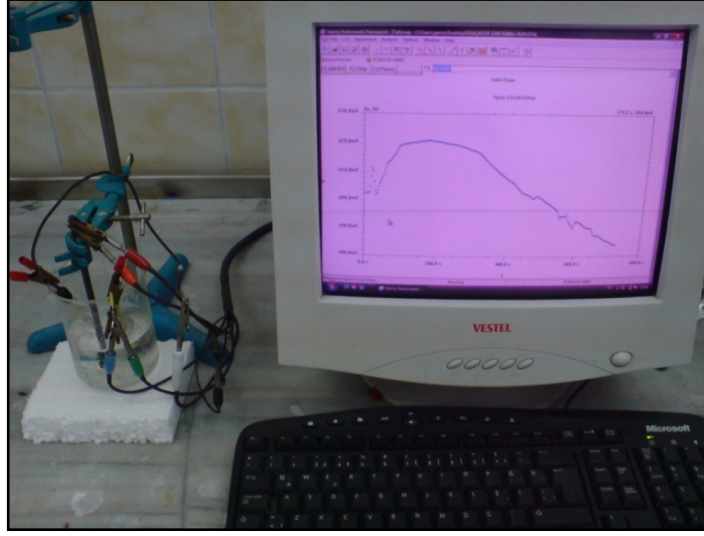
Korozyon deneyi öncesinde numunelerin tüm yüzeyleri metalografik prosedüre uygun olarak 1200 mesh zımparaya kadar zımparalanmış, yüzey alanları  $\text{cm}^2$  cinsinden ölçülmüştür.

Korozyon deneyi öncesi ve korozyon deneyi sonrasında temizleme işlemi için %10 Nitrik ( $\text{HNO}_3$ ) asitte 30 saniye bekletilen numuneler, daha sonra alkol ortamında 3 dakika süre ile ultrasonik (Şekil 6.9) olarak temizlenmiş ve ardından tekrar alkol ile durularak kurutulmuştur.

Numunelerin ağırlık kayıpları, Precisa marka XS 220A model 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik tartı ile (Şekil 6.5) ilk 6 saat süresince 1'er saat aralıklarla, 6-12 saat arasında 2'şer saat aralıklarla, 12-24 saat arasında ise 4'er saat aralıklarla toplam 24 saat süre içerisinde ölçülmüştür. Deney sonuçları, numunelerin birim yüzey alanı başına düşen ağırlık kaybına göre  $\text{gr}/\text{cm}^2$  cinsinden değerlendirilmiştir. Ağırlık kaybı deneyi bittikten sonra numune çözeltilerden çıkartılmış ve çözeltilerin pH ve S biriminde iletkenlik değerleri ölçülmüştür.

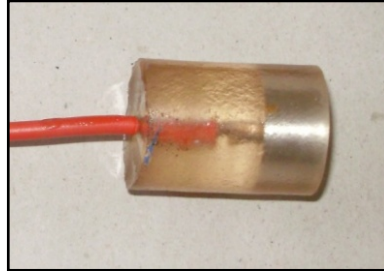
#### **6.5.2. Korozyon Potansiyeli/Akım Yoğunluğu Ölçülen Korozyon Deneyleri (Potansiyodinamik Polarizasyon Deneyleri)**

Potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri, DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300mA potansiyostat/galvonostat cihazı (Şekil 6.10) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. Potansiyodinamik/Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.

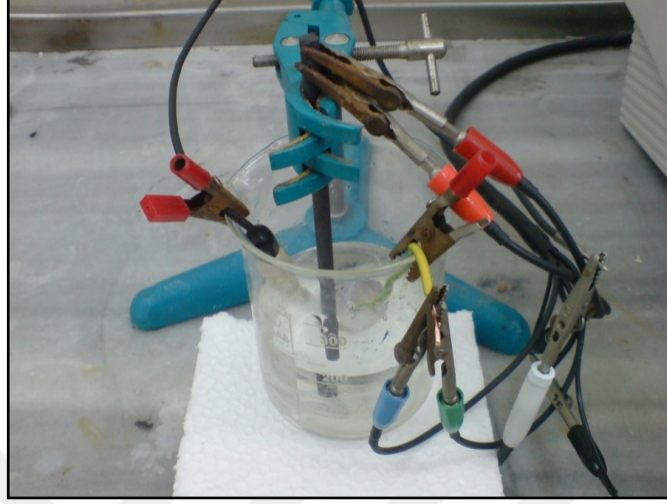
Korozyon deney numuneleri (çalışma elektrotu) Şekil 6.11’de görüldüğü gibi iletkenliği sağlayabilmek amacıyla arka yüzeyine 1,5 mm çapında 150 mm uzunluğunda bakır tel lehimlenmiş ve numunelerin yalnızca elektrolit ile temasta olması istenen yüzeyleri açıkta kalacak şekilde reçine ile kaplanmıştır. Numunelerin yüzeyleri standart metalografik yöntemle 1200 mesh zımparaya kadar zımparalanmış ve ardından parlatılmıştır.



Şekil 6.11. Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu.

Deney hücresi olarak 300 ml beher kap kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında yapılmış olup deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak  $0,785 \text{ cm}^2$  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 elektroduna olabildiğince yakın yerleştirilmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Statik korozyon deney hücresi.

Korozyon deneyleri sırasında elektrolit içine çalışma elektrotunun ve referans elektrotunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 75 dakika süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline ( $E_{corr}$ ) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -1.00V'dan 1.00 V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak çizilmiştir. DC korozyon yazılımı yardımıyla tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) hesaplanmıştır. Tüm deneyler polarizasyon eğrileri birbirlerini doğrulayınca kadar tekrar edilerek sonuçların daha güvenilir olmasına çalışılmıştır.

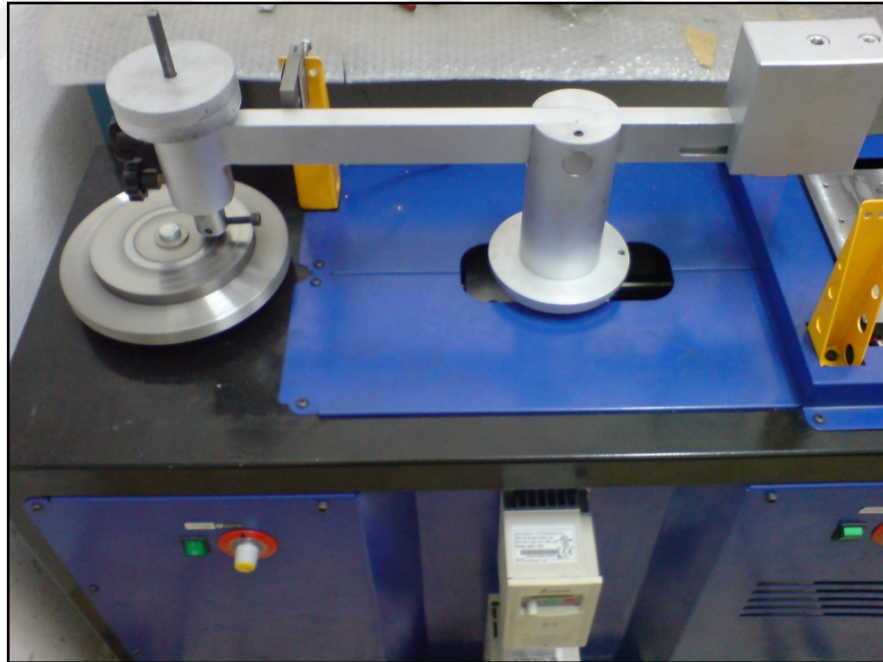
Gerek daldırmalı korozyon ve gerekse potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrasında numuneler saf su ortamında temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur. Korozyon mekanizmasının belirlenmesi ve/veya kalınlık yönünde korozyonun ilerleme hızının belirlenmesi için korozyon yüzeyleri doğrudan ve kesitleri metalografik olarak hazırlandıktan sonra optik ışık mikroskobu, stereo mikroskop ve SEM ile incelenmiştir.

Daldırmalı korozyon deneyi öncesi kesit kalınlığı bilinen numunelerin deneyden sonra son kesit kalınlığı optik ışık mikroskobu altında ölçülerek numune kesitinde meydana gelen incelme miktarları mm cinsinden hesaplanmıştır.

Potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri sonrası numunelerin mm cinsinden kalınlıklarında meydana gelen incelme diğer bir değişle korozyonun numune içerisinde ilerlemesi Nikon Shuttle Pix P-400R Model stereo mikroskopla (Şekil 6.4) tespit edilmiştir.

## 6.6. AŞINMA DENEYİ

İncelenen alaşımların kuru ortam aşınma deneyleri pim üzeri disk tipi (Şekil 6.13) aşınma cihazında yapılmıştır. İncelenen numunelerin aşınma deneyleri sırasında karşı malzeme olarak 59 HRC sertliğine sahip 4140 kalite çelik disk ve 7 mm çapında 20 mm yüksekliğinde deney numunesi kullanılmıştır.



Şekil 6.13. Pim üzeri disk tipi aşınma cihazı.

Aşınma deneyleri pim üzeri disk tipi aşınma cihazında 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 0,5 m/s kayma hızında 2000 m aralıklarla toplamda 12000 m kayma

mesafesinde test edilmiştir . Deney öncesi ve her 2000 m aralıklarla numunelerin, 0,1 mg hassasiyetine sahip elektronik terazide (Şekil 6.5) ağırlıkları ölçülmüş ve deney sonuçları ağırlık kaybına göre değerlendirilmiştir. Aşınma deney cihazında karşı diskin dönme yönüne ters yerleştirilen load cell yardımıyla yatay kuvvetler ölçülmüş ve uygulanan kuvvete oranlanarak sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için numune yüzeyleri stereo mikroskop ve SEM'de incelenmiştir.



## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 7.1. MİKROYAPI SONUÇLARI

Kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının ve bu alaşımlara %0,5-%4 oranında Zn ve/veya Mn elementi ilave edilerek üretilmiş incelenen alaşımların düşük ve yüksek büyütmedeki mikroyapı resimleri Şekil 7.1–Şekil 7.6'da verilmiştir. Düşük büyütmede çekilen mikroyapı fotoğraflarında (Şekil 7.1, Şekil 7.3 ve Şekil 7.5) kalın bir çizgi görünümlü ağ yapısı halinde tane sınırları vardır. Çizelge 7.2'de tane boyutu ölçüm sonuçları, Şekil 7.7'de ise incelenen master alaşımların alaşım içeriğine bağlı tane boyutu değişim grafiği verilmiştir. İncelenen AS41 master alaşımı daha ince tane boyutuna sahipken Mg5Al1Ti master alaşımının tane boyutu daha iridir. Master alaşımlarının Zn ve/veya Mn ilave edilmesiyle tane boyutu incelmıştır. Çizelge 7.1. ve Şekil 7.7'de üretilen alaşımlardan AS41 master alaşımının tane boyutu 121  $\mu\text{m}$ , Mg5Al1Si master alaşımının tane boyutu 125  $\mu\text{m}$  ve Mg5Al1Ti master alaşımının tane boyutu ise 156  $\mu\text{m}$  bulunmuştur. Her iki master alaşıma Zn ve/veya Mn elementi ilavesi ile tane boyutunda azalma tespit edilmiştir. Mg5Al1Si master alaşımlarda en düşük tane boyutu %4 Zn ilave edilerek üretilen alaşımında 95  $\mu\text{m}$  iken Mg5Al1Ti master alaşımında en düşük tane boyutu yine %4 Zn ilave edilerek üretilen alaşımında 128  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür.

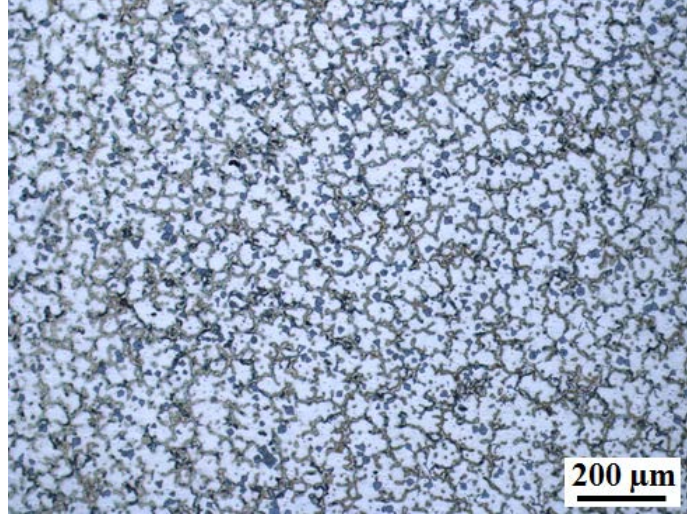
Yüksek büyütmedeki mikroyapılar incelendiğinde (Şekil 7.2, Şekil 7.4 ve Şekil 7.6) yapının genelde  $\alpha$ -Mg ana matrisi içerisinde ağırlıklı olarak tane sınırları boyunca uzanan gri renkli parlak görünümlü intermetalik fazlardan meydana geldiği görülmektedir. Yapıda ayrıca iğnesel ve çin yazısı şekilli gri renkli fazlar (Şekil 7.2 ve Şekil 7.4) ile çokgen şekilli koyu renkli partiküller de oluşmaktadır.

Bu çalışmada incelenen Mg alaşımlarının hazırlanmasında %99,8 saflıktaki Mg, matris alaşımı olarak ve Al<sub>12</sub>Si, Al<sub>30</sub>Si, Al<sub>10</sub>Ti referans alaşımları, ayrıca element haldeki Zn ve Mn kullanılmıştır. Ön alaşımlama ile üretimi gerçekleştirilen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si ve/veya Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti master alaşımlarına dört farklı oranda ağırlıkça %0,5 %1, %2 ve %4 oranlarında Zn ve/veya Mn alaşım elementi ilavesi ile üretimi yapılan alaşımların kimyasal analizleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

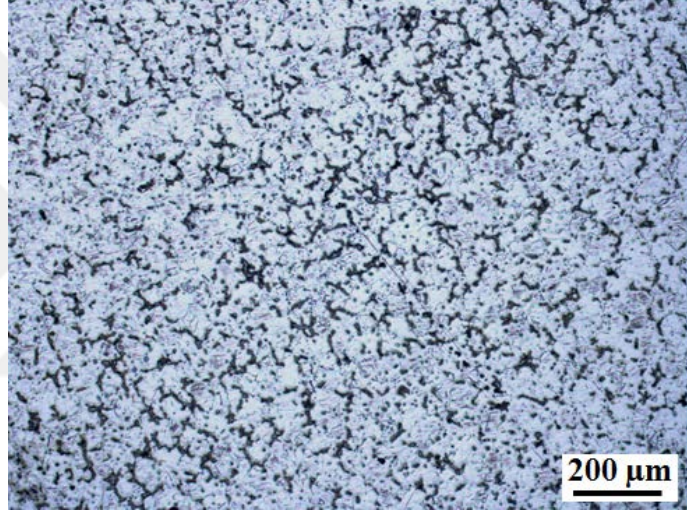
Çizelge 7.1. Üretimi yapılan alaşımların kimyasal analiz sonuçları.

| Sıra No | Bileşim                                  | Alaşım elementi |     |     |     |      |       |
|---------|--|-----------------|-----|-----|-----|------|-------|
|         |  | Al              | Si  | Ti  | Zn  | Mn   | Mg    |
| 1       | AS41                                     | 4,4             | 1,1 | -   | 0,1 | 0,35 | Kalan |
| 2       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si       | 4,6             | 1,2 | -   | -   | -    | Kalan |
| 3       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-0,5Zn | 4,7             | 0,9 | -   | 0,5 | -    | Kalan |
| 4       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-1Zn   | 4,7             | 0,9 | -   | 0,9 | -    | Kalan |
| 5       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-2Zn   | 4,8             | 1,0 | -   | 2,1 | -    | Kalan |
| 6       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-4Zn   | 4,5             | 1,2 | -   | 3,8 | -    | Kalan |
| 7       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-0,5Mn | 4,6             | 1,1 | -   | -   | 0,6  | Kalan |
| 8       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-1Mn   | 4,6             | 1,0 | -   | -   | 1,1  | Kalan |
| 9       | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-2Mn   | 4,7             | 0,9 | -   | -   | 2,0  | Kalan |
| 10      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Si-4Mn   | 4,4             | 1,1 | -   | -   | 4,1  | Kalan |
| 11      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti       | 4,6             | -   | 1,1 | -   | -    | Kalan |
| 12      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-0,5Zn | 4,7             | -   | 0,9 | 0,4 | -    | Kalan |
| 13      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-1Zn   | 4,7             | -   | 0,9 | 1,0 | -    | Kalan |
| 14      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-2Zn   | 4,6             | -   | 1,0 | 1,9 | -    | Kalan |
| 15      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-4Zn   | 4,8             | -   | 1,0 | 3,9 | -    | Kalan |
| 16      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-0,5Mn | 4,7             | -   | 1,0 | -   | 0,5  | Kalan |
| 17      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-1Mn   | 4,6             | -   | 0,9 | -   | 1,2  | Kalan |
| 18      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-2Mn   | 4,4             | -   | 1,1 | -   | 2,2  | Kalan |
| 19      | Mg <sub>5</sub> Al <sub>1</sub> Ti-4Mn   | 4,7             | -   | 1,0 | -   | 4,0  | Kalan |

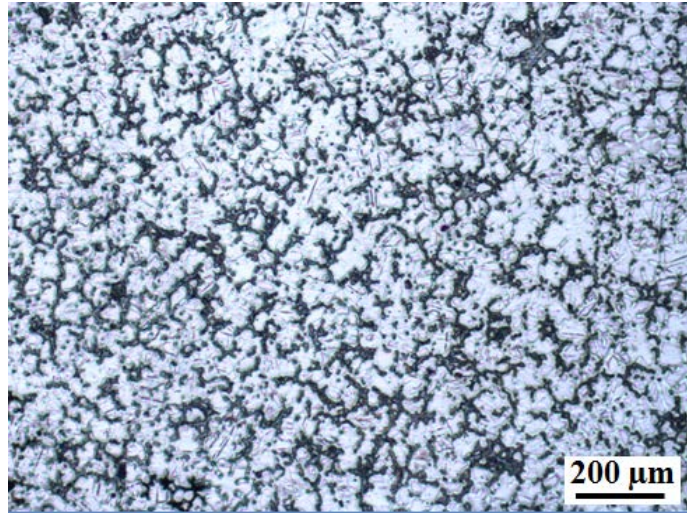




(a)

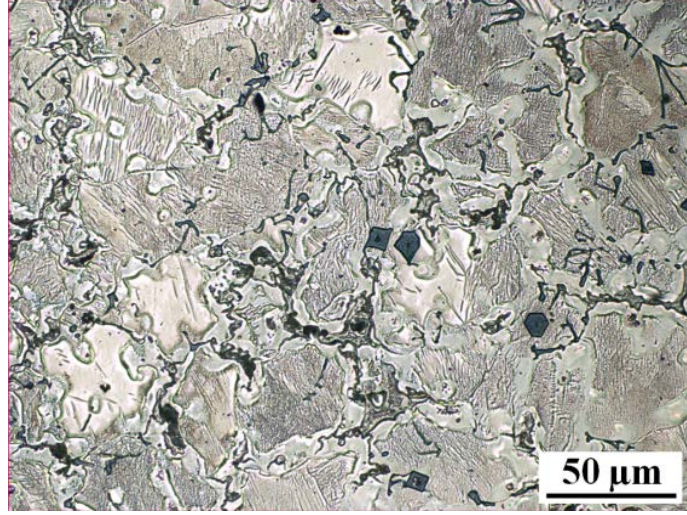


(b)

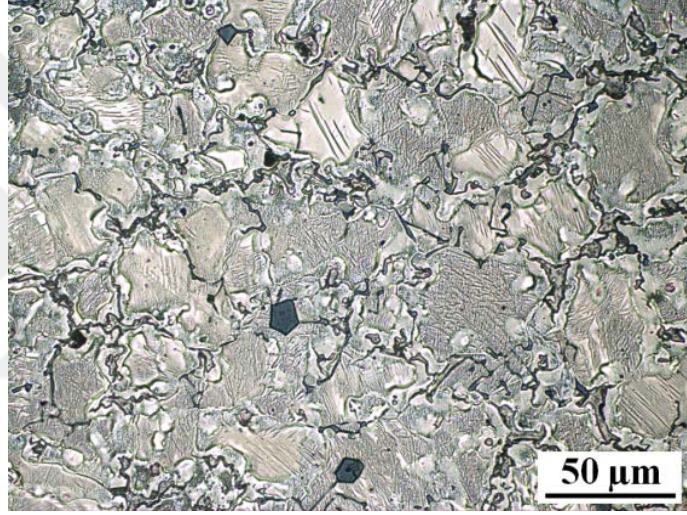


(c)

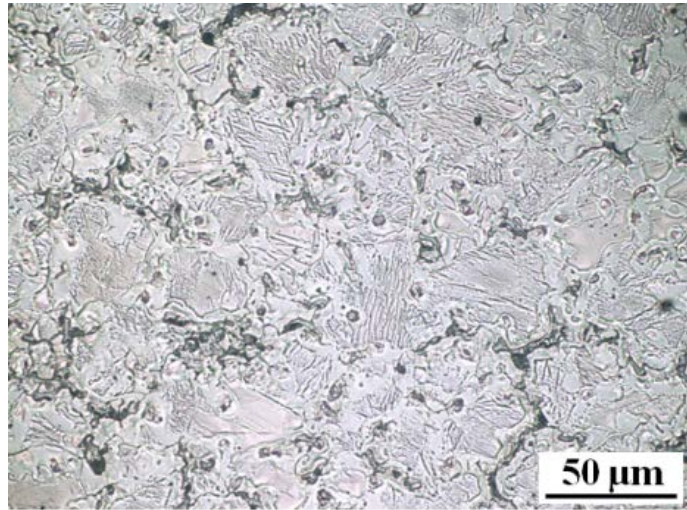
Şekil 7.1. a) AS41, b) Mg5Al1Si ve c) Mg5Al1Ti master alaşımlara ait düşük büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.



(a)

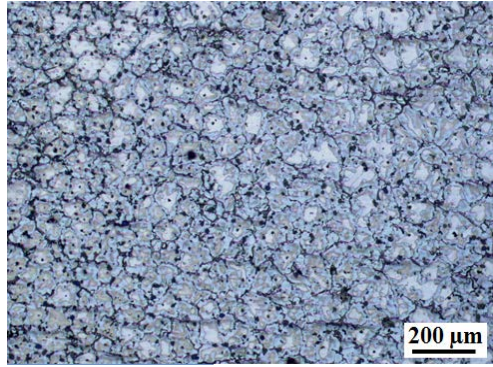
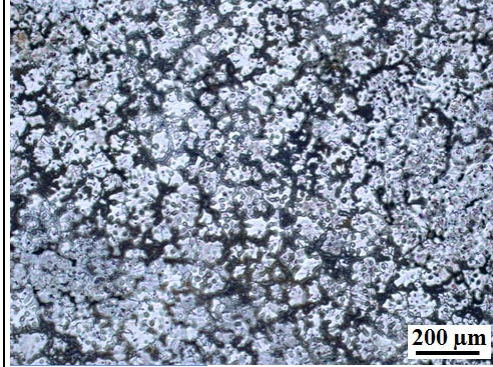
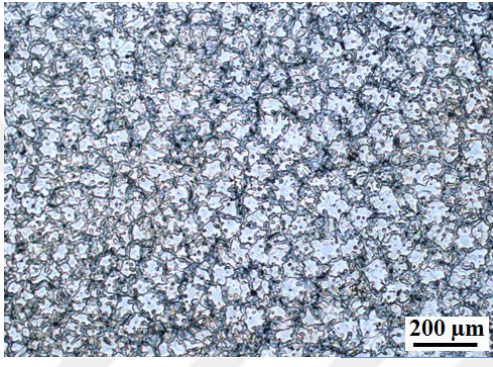
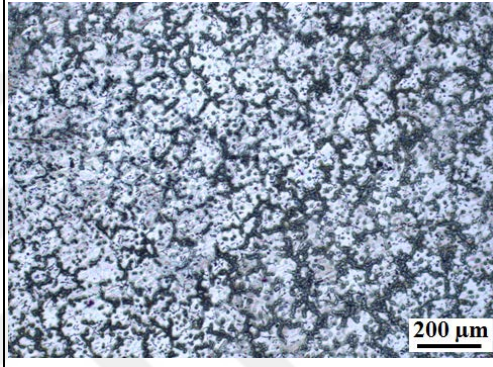
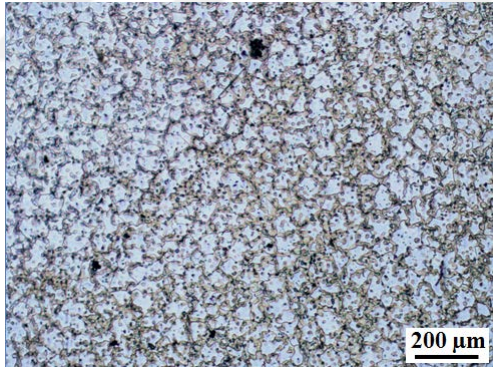
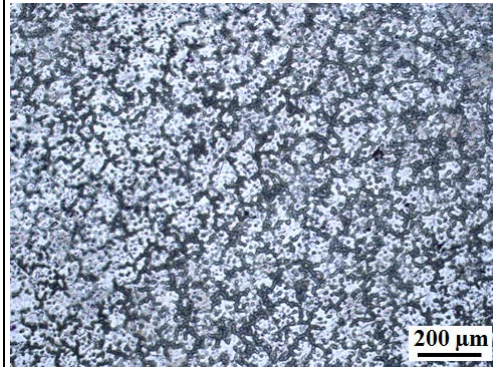
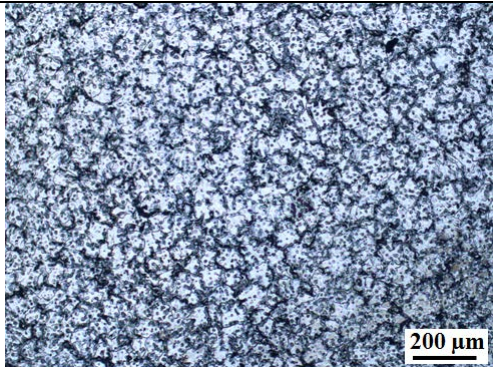
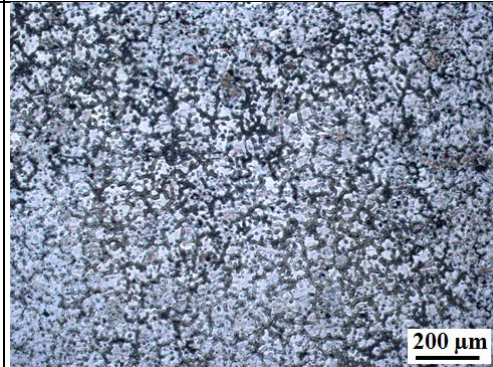


(b)

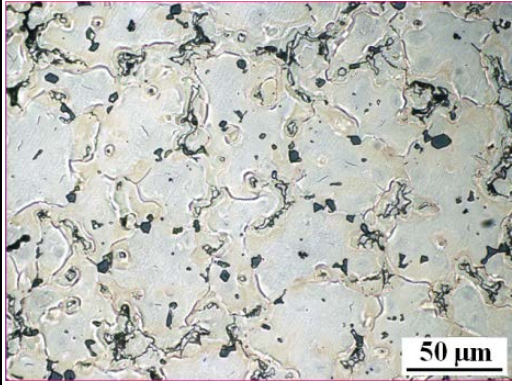
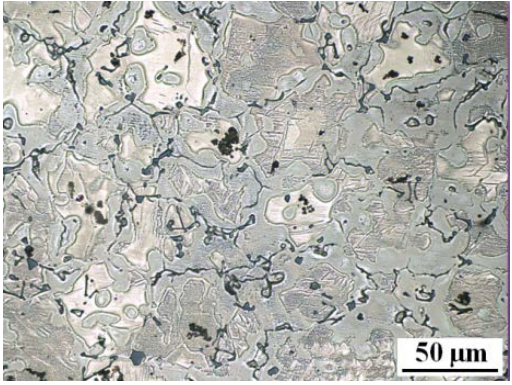
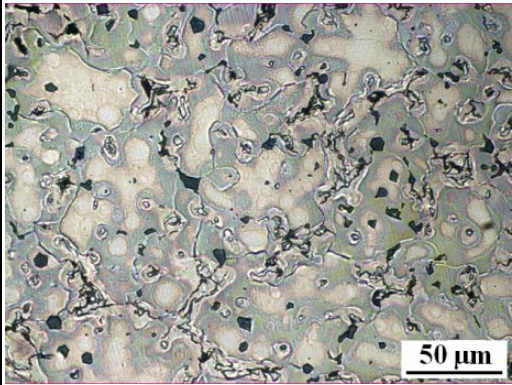
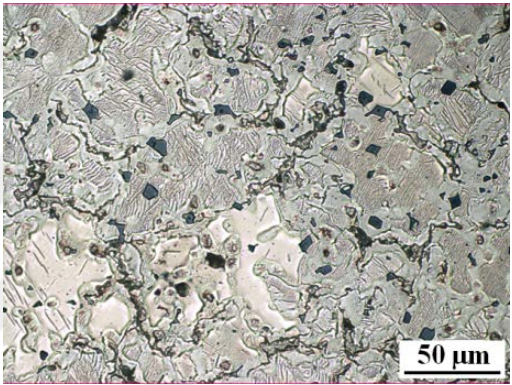
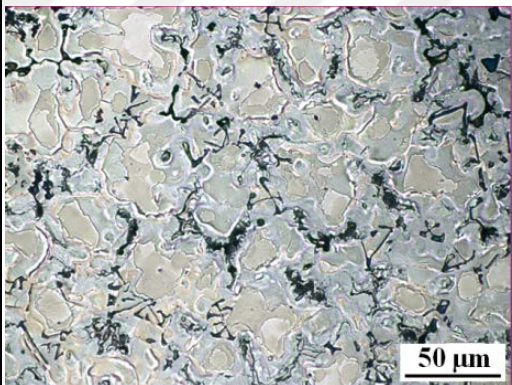
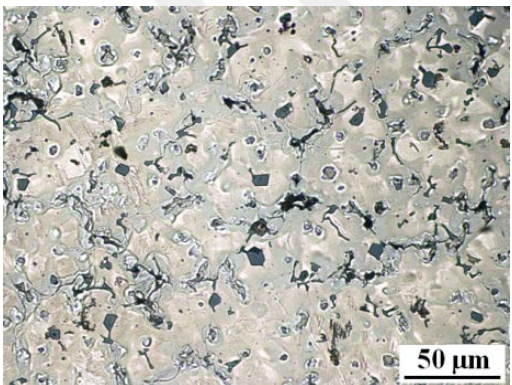
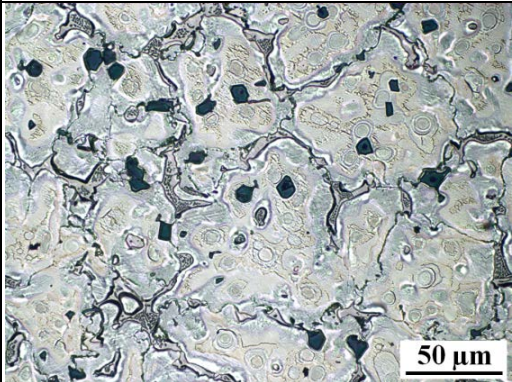
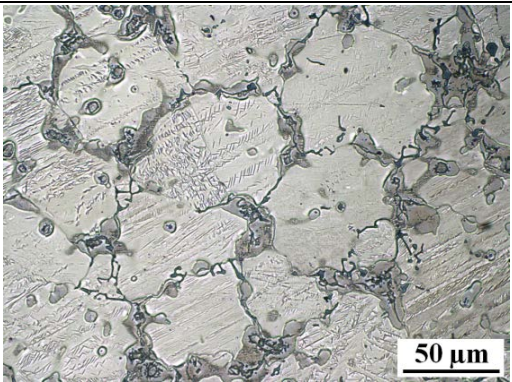


(c)

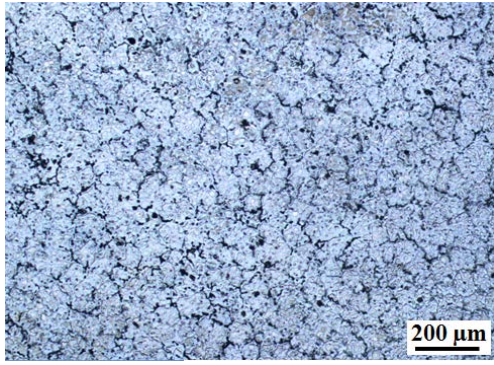
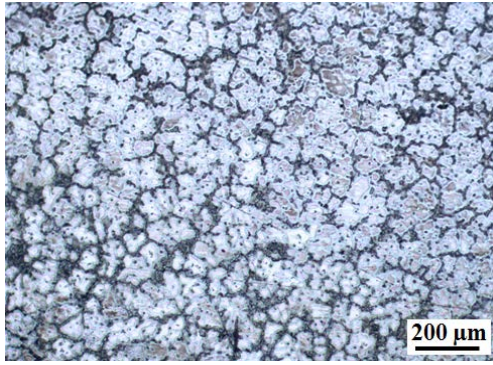
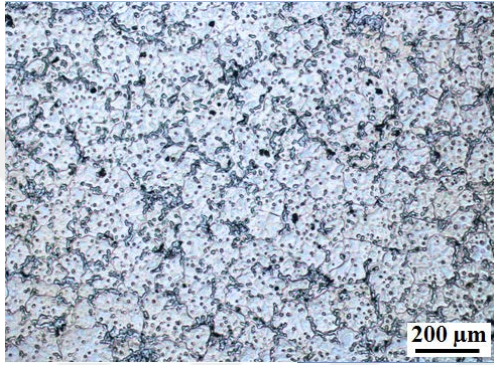
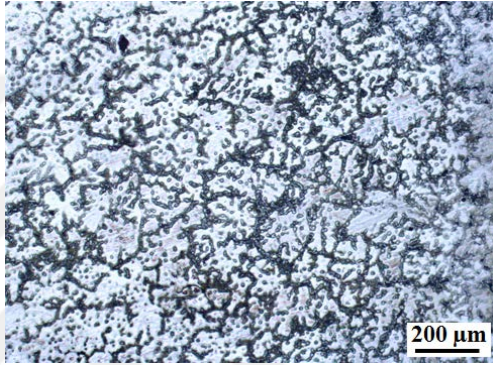
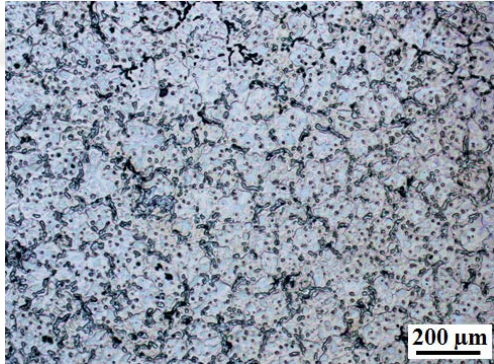
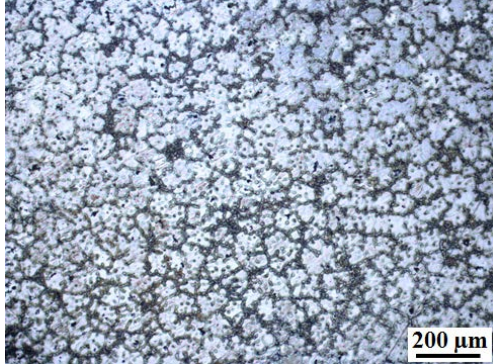
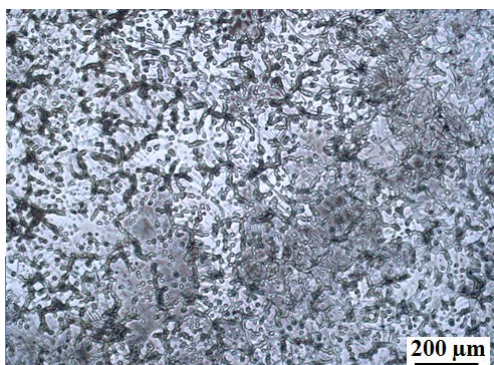
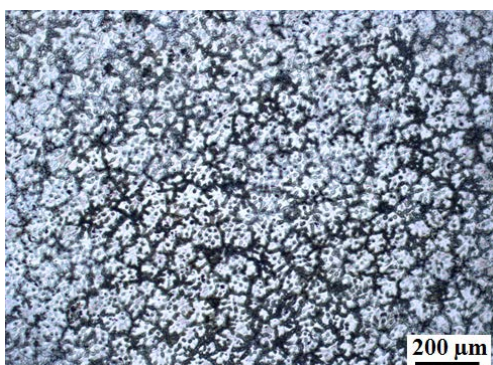
Şekil 7.2. a) AS41, b) Mg5Al1Si ve c) Mg5Al1Ti master alaşımlara ait yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

| % Bileşim | Alaşım Elementi   |  |
|-----------|---|--|
|           | Mg5Al1Si-XZn  | Mg5Al1Si-XMn   |
| 0,5       |    |    |
| 1         |   |   |
| 2         |  |  |
| 4         |  |  |

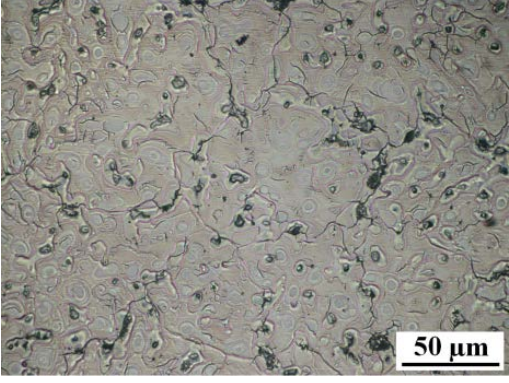
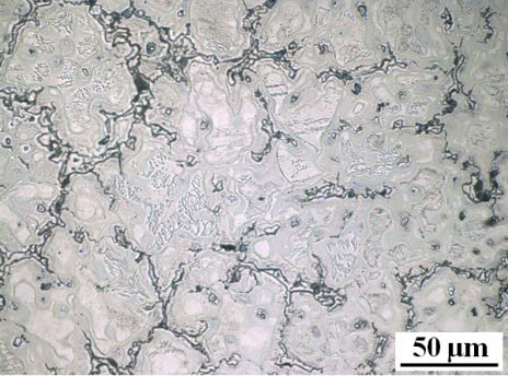
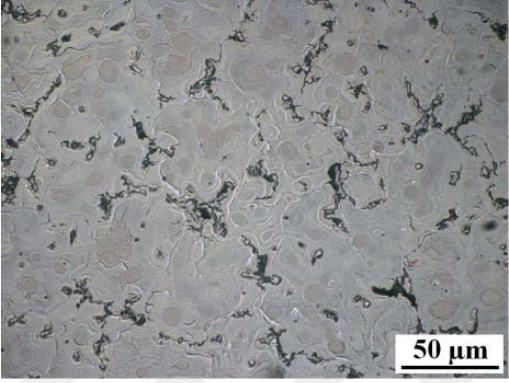
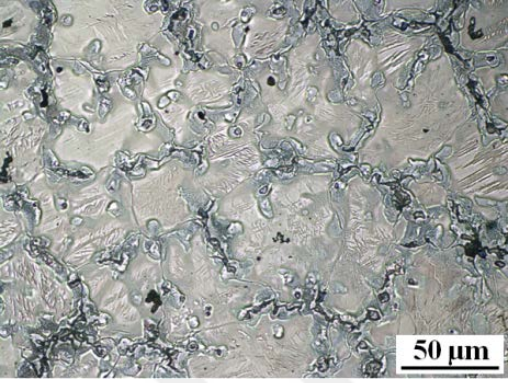
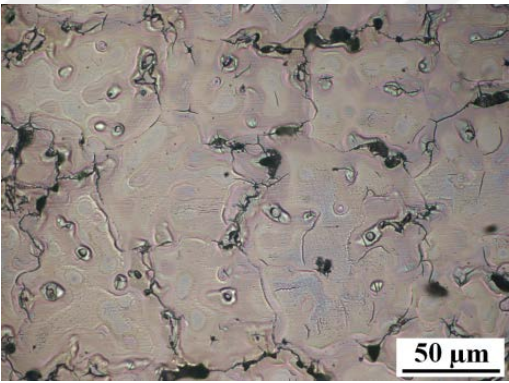
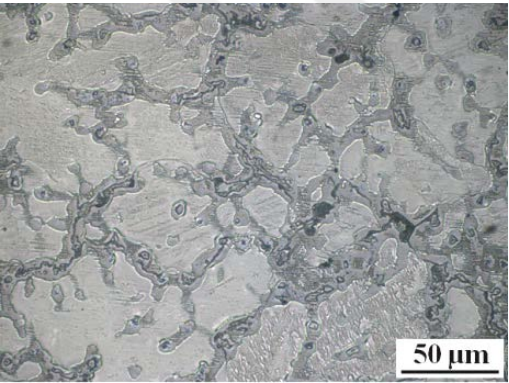
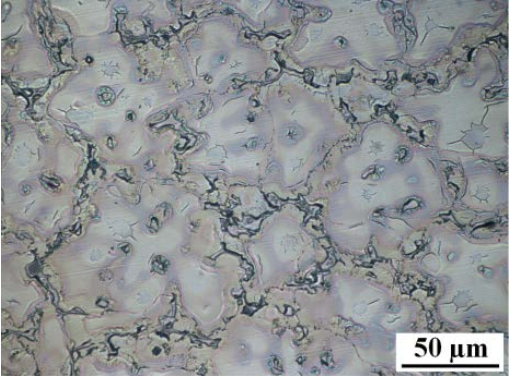
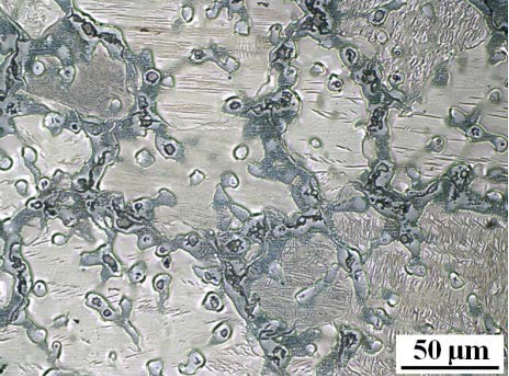
Şekil 7.3. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların düşük büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

| % Bilesim | Alaşım Elementi   |  |
|-----------|---|--|
|           | Mg5Al1Si-XZn  | Mg5Al1Si-XMn   |
| 0,5       |    |    |
| 1         |   |   |
| 2         |  |  |
| 4         |  |  |

Şekil 7.4. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların ylık btytmedeki mikroyapı gortntleri.

| % Bilesim | Alaşım Elementi   |  |
|-----------|---|--|
|           | Mg5Al1Ti-XZn  | Mg5Al1Ti-XMn   |
| 0,5       |    |    |
| 1         |   |   |
| 2         |  |  |
| 4         |  |  |

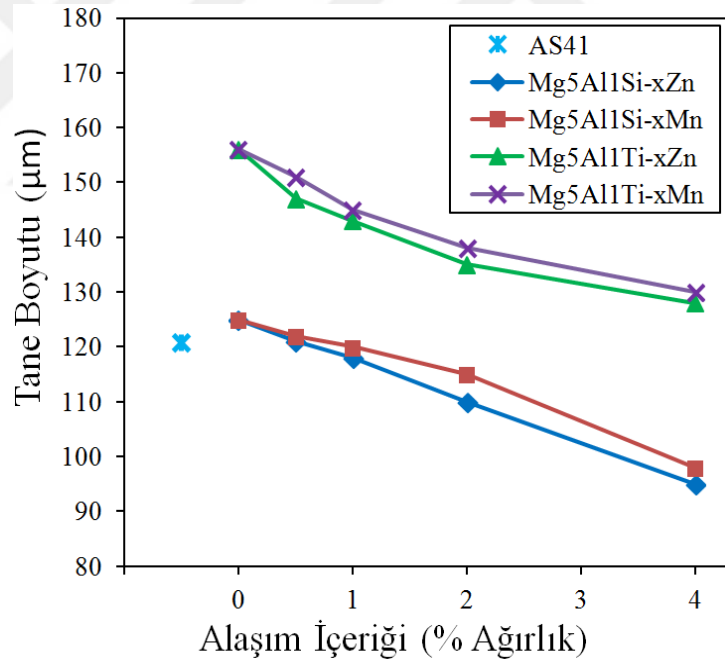
Őekil 7.5. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alařımların dűŐuk bűyűtmedeki mikroyapı gűrűntűleri.

| % Bileşim | Alaşım Elementi   |  |
|-----------|---|--|
|           | Mg5Al1Ti-XZn  | Mg5Al1Ti-XMn   |
| 0,5       |    |    |
| 1         |   |   |
| 2         |  |  |
| 4         |  |  |

Şekil 7.6. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımların yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

Çizelge 7.2. Tane boyutu ölçüm değerleri.

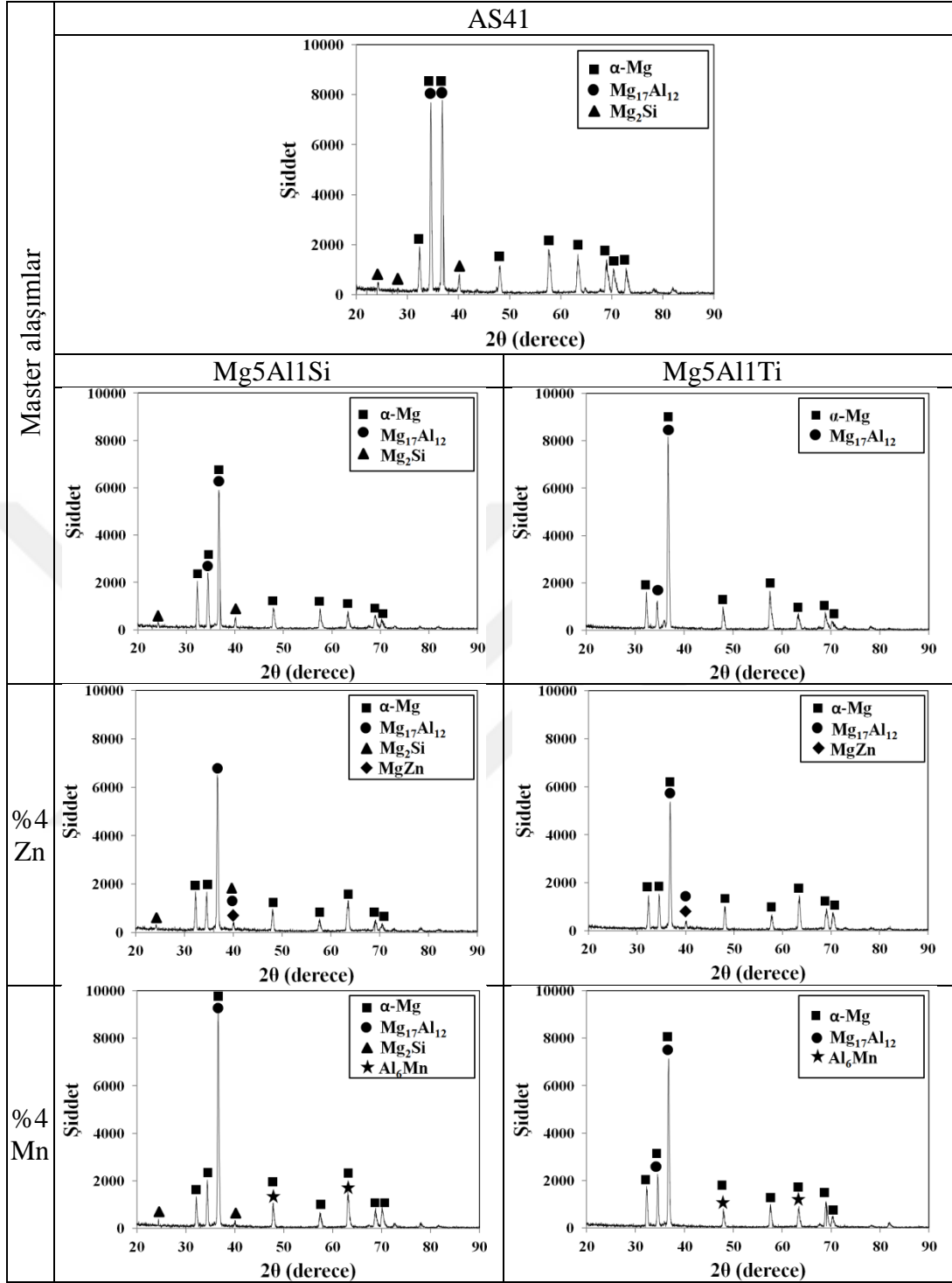
| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Tane Boyutu ( $\mu\text{m}$ ) | Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Tane Boyutu ( $\mu\text{m}$ ) |     |     |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-----|-----|
| AS41          |                             | 121                           | AS41          |                             | 121                           |     |     |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0                             | Mg5Al1Ti      | Zn                          | 0                             |     |     |
|               |                             | 0,5                           |               |                             | 125                           | 0,5 | 156 |
|               |                             | 1                             |               |                             | 118                           | 1   | 147 |
|               |                             | 2                             |               |                             | 110                           | 2   | 143 |
|               |                             | 4                             |               |                             | 95                            | 4   | 135 |
|               | Mn                          | 0                             |               | Mn                          | 0                             | 156 |     |
|               |                             | 0,5                           |               |                             | 122                           | 0,5 | 151 |
|               |                             | 1                             |               |                             | 120                           | 1   | 145 |
|               |                             | 2                             |               |                             | 115                           | 2   | 138 |
|               |                             | 4                             |               |                             | 98                            | 4   | 130 |



Şekil 7.7. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı tane boyutu değişimi.

## 7.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI

Şekil 7.8'de master alaşımlarının ve master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilavesinin XRD analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.8. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları ile Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların XRD analiz sonuçları.

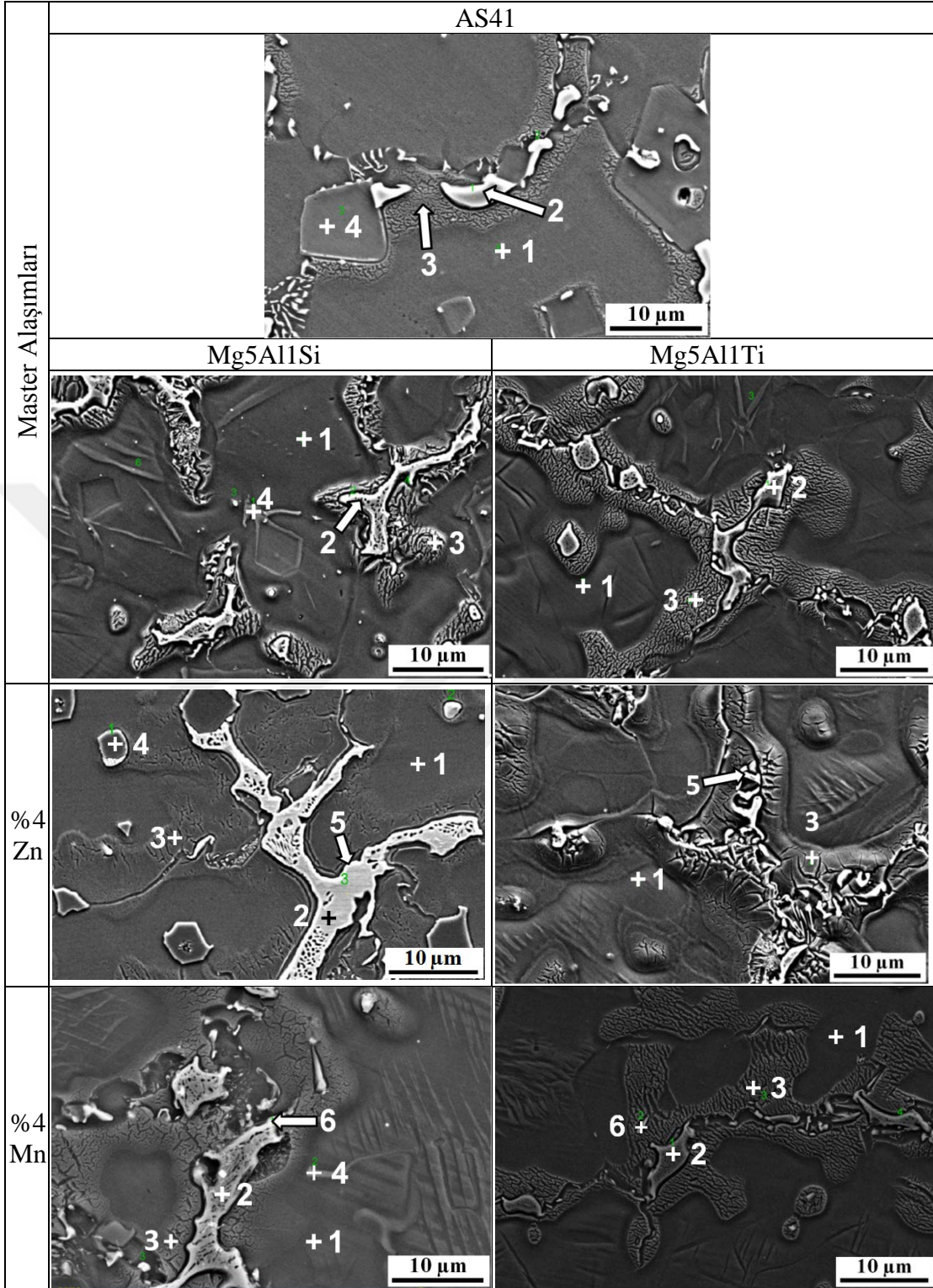


AS41 ve Mg5Al1Si master alaşımların XRD analiz sonuçlarına bakıldığında (Şekil 7.8)  $\alpha$ -Mg ana matrisi içerisinde  $Mg_2Si$  ve  $Mg_{17}Al_{12}$  fazlarının oluştuğu gözlenmiştir. Mg5Al1Ti master alaşımına ilave edilen Ti elementinin  $\alpha$ -Mg ana matriste herhangi bir faz oluşturmadığı ve yapıda sadece  $\alpha$ -Mg matrisi içinde  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının oluştuğu Şekil 7.8'den görülmektedir.

Şekil 7.8'den grldğu gibi Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde  $\alpha$ -Mg matrisi içinde oluşan  $Mg_2Si$  ile  $Mg_{17}Al_{12}$  fazlarının yanı sıra MgZn fazının ve %4 Mn elementi ilave edildiğinde ise MgZn fazının yerine  $Al_6Mn$  fazının oluştuğu görülmektedir. Mg5Al1Si master alaşımında oluşan fazlara benzer olarak Mg5Al1Ti master alaşımında  $\alpha$ -Mg matrisi içinde  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının yanı sıra Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn elementi ilave edildiğinde, MgZn fazı ve %4 Mn ilave edildiğinde ise  $Al_6Mn$  bileşiği oluşmuştur.

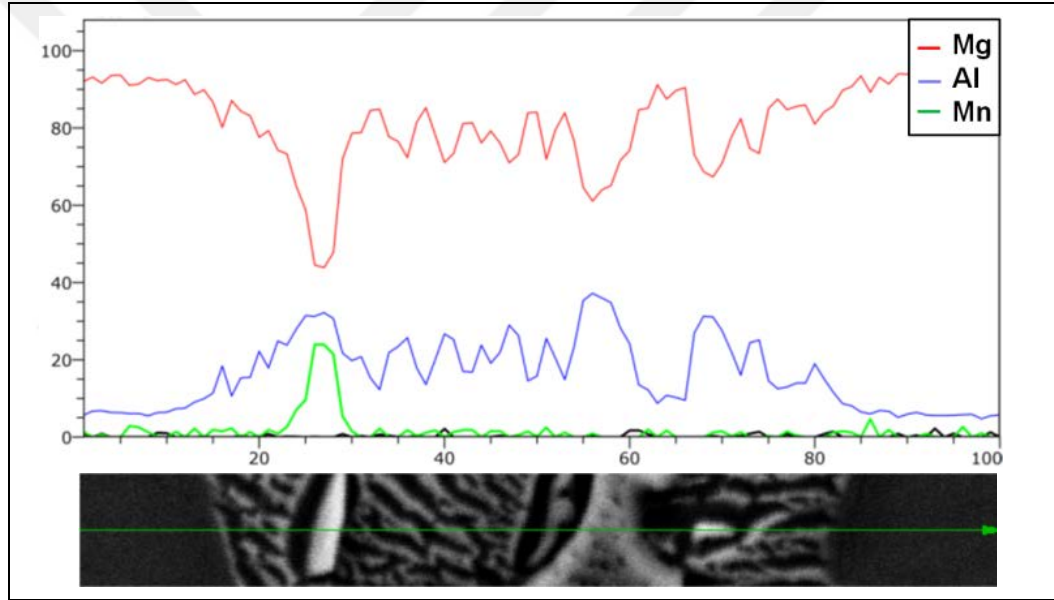
### 7.3. SEM ANALİZ SONUÇLARI

İncelenen alaşımların SEM morfolojisi ve EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 7.9 ve izelge 7.3'de gösterilmiştir. SEM mikrofotoğrafları üzerinde 1 rakamı ile  $\alpha$ -Mg matrisi gösterilirken tane sınırları boyunca yerleŐmiŐ gri renkli fazlar 2 rakamı, tane sınırından tane içi yönünde büyümüŐ ötektik faz 3 rakamı, iğnesel Çin yazısı ve/veya çokgen fazlar ise 4 rakamı ile iŐaretlenmiŐtir. 4 rakamı ile iŐaretilen fazlar Mg5Al1Ti master alaşımında gözlenmemiŐtir. Zn ve Mn ilave edilmiş Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti alaşımlarının SEM görüntüsünde 2 rakamı ile gösterilen intermetalikiğin sınırı ile 3 nolu ötektik faz sınırında açık parlak renkli 5 ve 6 rakamı ile gösterilen fazlar ekirdeklenmiŐtir. SEM mikrofotoğraflarında 1'den 6'ya kadar gösterilen bu noktalar EDS analizlerinin yapıldığı bölgeler olup EDS analiz sonuçları izelge 7.3'de verilmiştir.



Şekil 7.9. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların SEM görüntüleri.

XRD analiz sonuçları ile uyumlu olarak Çizelge 7.3'de verilen EDS analiz sonuçları, AS41 ve Mg5Al1Si master alaşımlarının  $\alpha$ -Mg matrisi (1 rakamı, Şekil 7.9) içinde  $Mg_2Si$  partiküllerinin (4 rakamı),  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliklerinin (2 rakamı, Şekil 7.9), tane sınırı boyunca katılaşarak tane içine doğru büyüyen  $\alpha$ -Mg- $Mg_{17}Al_{12}$  ötektik yapının (3 rakamı, Şekil 7.9) oluştuğunu doğrulamaktadır. Mg5Al1Ti master alaşımında  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalikliği ve  $\alpha$ -Mg- $Mg_{17}Al_{12}$  ötektik yapı gözlenmesine rağmen Si elementi içermediğinden  $Mg_2Si$  partikülleri oluşmamıştır. Ayrıca Mg5Al1Ti master alaşımında bulunan %1 Ti içeriği yapı içerisinde herhangi bir faz oluşturmamıştır ve sonuç olarak yapı içerisinde katı eriyik olarak dağıldığı düşünülmektedir.



Şekil 7.10. Şekil 7.9'daki Mg5Al1Ti-4Mn numunesine ait SEM görüntüsünden alınan çizgisel EDS analiz sonucu.

Şekil 7.9'daki SEM mikrofotografı üzerinden alınan EDS analiz sonuçları (Çizelge 7.3), master alaşımlarına ağırlıkça %4 Zn ilavesi ile üretilen alaşımlarda 5 rakamı ile gösterilen bölgenin ağırlıkça yüksek oranda Zn içermesinden dolayı MgZn fazının olduğunu ortaya çıkarmıştır. Benzer olarak, EDS analiz sonuçları (Çizelge 7.3) %4 Mn ilavesi ile üretilen alaşımlarda 6 rakamı ile gösterilen bölgenin Mn elementince zengin  $Al_6Mn$  olduğunu göstermiştir. Şekil 7.10, incelenen Mg5Al1Ti-4Mn alaşımının mikroyapısında 6 rakamı ile işaretli fazın çizgisel EDS analiz sonucunu vermektedir. Şekil 7.10'a göre açık parlak renkli fazın, matrise kıyasla

daha düşük oranda Mg içerikli (Çizelge 7.3), Al ve Mn elementlerince zengin olduğunu göstermiştir.

Çizelge 7.3. Alaşımların noktasal EDS analiz sonuçları.

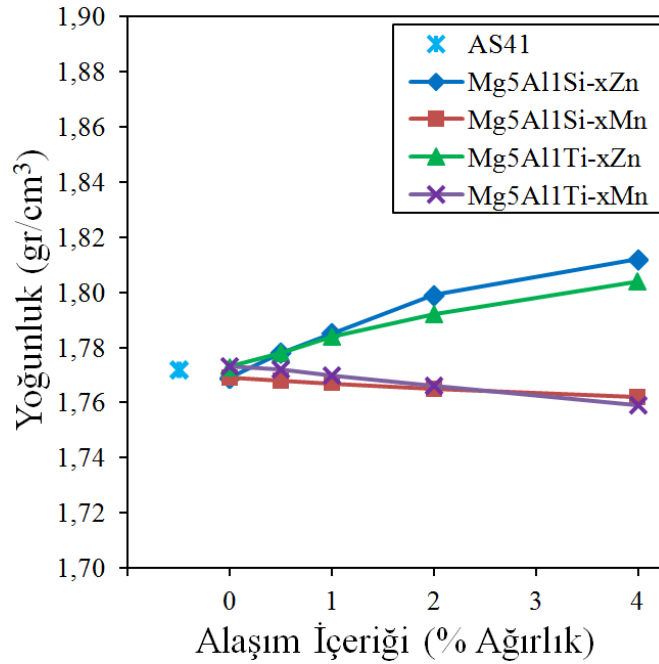
| EDS Noktaları | Alaşım Elementi | İncelenen Alaşımlarda Ölçülen % Ağırlıkça Elementel Analiz |          |                 |                 |          |                 |                 |
|---------------|-----------------|--|----------|-----------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|
|               |                 | AS41   | Mg5Al1Si | Mg5Al1Si<br>4Zn | Mg5Al1Si<br>4Mn | Mg5Al1Ti | Mg5Al1Ti<br>4Zn | Mg5Al1Ti<br>4Mn |
| 1             | Mg              | 95,72  | 95,50    | 92,48           | 99,60           | 97,15    | 97,57           | 97,75           |
|               | Al              | 4,28   | 4,50     | 2,94            | -               | 2,05     | 2,43            | 2,25            |
|               | Si              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Ti              | -  | -        | -               | -               | 0,80     | -               | -               |
|               | Zn              | -  | -        | 4,58            | -               | -        | -               | -               |
|               | Mn              | -  | -        | -               | 0,40            | -        | -               | -               |
|               | 2               | Mg   | 63,83    | 60,97           | 63,07           | 62,08    | 63,38           | 66,20           |
| Al            |                 | 36,17  | 39,03    | 36,93           | 37,92           | 36,62    | 30,16           | 36,62           |
| Si            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Ti            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | 2,74            | 0,15            |
| Zn            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | 0,90            | -               |
| Mn            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | 0,53            |
| 3             |                 | Mg   | 75,13    | 81,43           | 61,17           | 63,26    | 83,88           | -               |
|               | Al              | 24,87  | 18,57    | 38,83           | 36,74           | 16,12    | -               | 39,33           |
|               | Si              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Ti              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Zn              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Mn              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | 4               | Mg   | 61,12    | 62,02           | 55,51           | 64,34    | -               | -               |
| Al            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Si            |                 | 38,88  | 37,98    | 44,49           | 35,66           | -        | -               | -               |
| Ti            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Zn            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Mn            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| 5             |                 | Mg   | -        | -               | 41,93           | -        | -               | 52,22           |
|               | Al              | -  | -        | 15,52           | -               | -        | 3,00            | -               |
|               | Si              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Ti              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | Zn              | -  | -        | 42,55           | -               | -        | 44,88           | -               |
|               | Mn              | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
|               | 6               | Mg   | -        | -               | -               | 34,44    | -               | -               |
| Al            |                 | -  | -        | -               | 56,28           | -        | -               | 46,60           |
| Si            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Ti            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Zn            |                 | -  | -        | -               | -               | -        | -               | -               |
| Mn            |                 | -  | -        | -               | 9,28            | -        | -               | 18,33           |

#### 7.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜM SONUÇLARI

İncelenen alaşımların Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçüm değerleri,  $\text{gr/cm}^3$  biriminde Çizelge 7.4'de verilmiştir. Alaşım içeriğine bağlı olarak yoğunluk değişimi Şekil 7.11'de çizilmiştir.

Çizelge 7.4. İncelenen alaşımların yoğunluk değerleri.

| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ ) | Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ ) |     |       |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-----|-------|
| AS41          |                             | 1,772                         | AS41          |                             | 1,772                         |     |       |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0                             | 1,769         | Mg5Al1Ti                    | Zn                            | 0   | 1,773 |
|               |                             | 0,5                           | 1,778         |                             |                               | 0,5 | 1,778 |
|               |                             | 1                             | 1,785         |                             |                               | 1   | 1,784 |
|               |                             | 2                             | 1,799         |                             |                               | 2   | 1,792 |
|               |                             | 4                             | 1,812         |                             |                               | 4   | 1,804 |
|               | Mn                          | 0                             | 1,769         |                             | Mn                            | 0   | 1,773 |
|               |                             | 0,5                           | 1,768         |                             |                               | 0,5 | 1,772 |
|               |                             | 1                             | 1,767         |                             |                               | 1   | 1,770 |
|               |                             | 2                             | 1,765         |                             |                               | 2   | 1,766 |
|               |                             | 4                             | 1,762         |                             |                               | 4   | 1,759 |



Şekil 7.11. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı yoğunluk değerleri.

Master alaşımların (AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti) yoğunlukları, birbirine yakın olup ortalama olarak 1,77 gr/cm<sup>3</sup> değerine sahiptirler. Master alaşımlarına Mn ilavesi ile yoğunlukta bir miktar azalma, Zn ilavesi ile de artma görülmektedir. İncelenen alaşımlarda en yüksek yoğunluğa 1,812 gr/cm<sup>3</sup> değeri ile Mg5Al1Si-4Zn alaşımı sahip iken Mg5Al1Ti-4Mn alaşımı en düşük yoğunluk (1,759 gr/cm<sup>3</sup>) değerini sergilemiştir.

## 7.5. MEKANİK DENEY SONUÇLARI

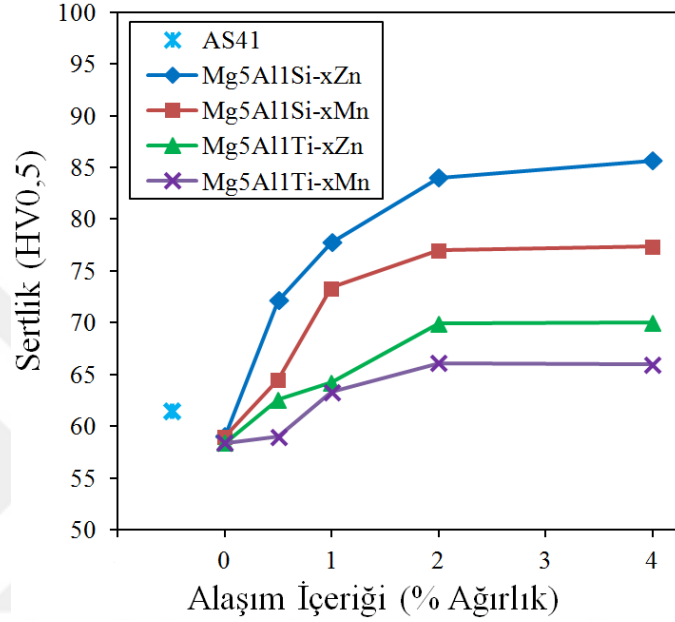
Bu çalışmada incelenen alaşımların mekanik özellikleri, sertlik ölçümü ve çekme testi ile belirlenmiştir. Çekme testiyle akma dayanımı, max çekme dayanımı ve % uzama değerleri llmştir. Sertlik lm ve çekme testi neticesinde elde edilen veriler izelge 7.5'de verilmiştir.

Çizelge 7.5. İncelenen alaşımların sertlik ve çekme deneyinden elde edilen mekanik özellik değerleri.

| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Sertlik (HV0,5) | Akma Dayanımı (MPa) | Max ekme Dayanımı (MPa) | Uzama (%) |      |
|---------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|-----------|------|
| AS41          |                             | 61,5            | 83                  | 110                      | 5,14      |      |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0               | 59,0                | 78                       | 108       | 4,91 |
|               |                             | 0,5             | 72,2                | 88                       | 121       | 5,53 |
|               |                             | 1               | 77,7                | 95                       | 131       | 5,85 |
|               |                             | 2               | 84,2                | 102                      | 135       | 6,16 |
|               |                             | 4               | 85,7                | 108                      | 137       | 6,33 |
|               | Mn                          | 0               | 59,0                | 78                       | 108       | 4,91 |
|               |                             | 0,5             | 64,5                | 83                       | 116       | 5,38 |
|               |                             | 1               | 73,4                | 91                       | 124       | 5,69 |
|               |                             | 2               | 77,0                | 98                       | 127       | 5,82 |
|               |                             | 4               | 77,4                | 103                      | 129       | 6,04 |
| Mg5Al1Ti      | Zn                          | 0               | 58,4                | 73                       | 105       | 4,78 |
|               |                             | 0,5             | 62,6                | 78                       | 110       | 4,99 |
|               |                             | 1               | 64,2                | 83                       | 113       | 5,23 |
|               |                             | 2               | 69,9                | 87                       | 116       | 5,49 |
|               |                             | 4               | 70,0                | 91                       | 120       | 5,61 |
|               | Mn                          | 0               | 58,4                | 73                       | 105       | 4,78 |
|               |                             | 0,5             | 59,0                | 76                       | 105       | 4,80 |
|               |                             | 1               | 63,3                | 80                       | 107       | 4,97 |
|               |                             | 2               | 66,1                | 83                       | 111       | 5,31 |
|               |                             | 4               | 66,2                | 85                       | 114       | 5,45 |

### 7.5.1. Sertlik Deneyi Sonuçları

İncelenen alaşımların Çizelge 7.5'de verilen HV0,5 cinsinden sertlik değerleri kullanılarak Şekil 7.12'de alaşım içeriğine bağlı olarak sertlik değişim grafiği çizilmiştir.



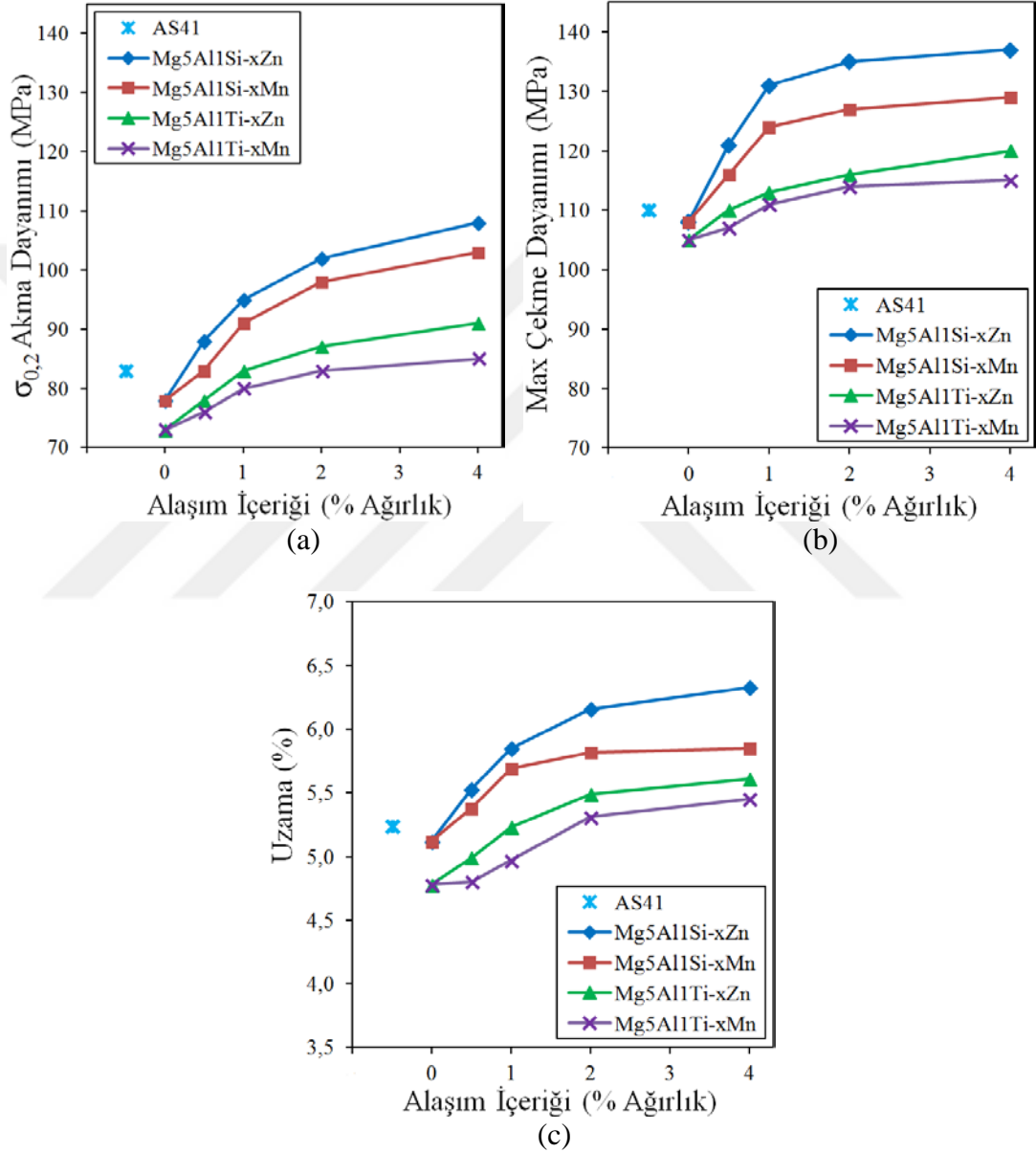
Şekil 7.12. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı olarak sertlik (HV0,5) değerleri.

İncelenen master alaşımların sertlik değerleri hemen hemen birbirine yakın olup AS41 master alaşımının sertlik değeri 61,5 HV ve Mg5Al1Si alaşımının sertliği 59 HV iken Mg5Al1Ti master alaşımının sertlik değeri 58,4 HV olarak ölçülmüştür. Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına ilave edilen ağırlıkça %2 element miktarı ile sertlik artışında hızlı bir yükselme var iken daha fazla alaşım elementi ilavesi ile sertlikteki artış yavaşlamıştır. Her iki master alaşımında da Zn ilavesinin sertlik artışındaki etkisi, Mn ilavesinin sertlik artışındaki etkisinden fazladır.

Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde sertlik değeri 85,5 HV'ye, %4 Mn ilave edildiğinde sertlik değeri 77,5 HV'ye yükselmektedir. Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde sertlik değeri 70 HV ve %4 Mn ilave edildiğinde sertlik değeri 66,2 HV olmaktadır.

## 7.5.2. Çekme Deneyi Sonuçları

İncelenen alaşımlara ait, Çizelge 7.5'de verilen akma, maksimum çekme mukavemeti ve % uzama değerleri kullanılarak alaşım içeriği ile mekanik özelliklerdeki değişim grafiği Şekil 7.13'de çizilmiştir.



Şekil 7.13. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı a) Akma dayanımı, b) Max çekme dayanımı ve c) Uzama (%) değerleri.

Belirli bir alaşım içeriğinde Mg5Al1Si master alaşımına sahip alaşımlar Mg5Al1Ti master alaşımına sahip alaşımlardan daha yüksek akma ve çekme değeri



sergilemiştir. AS41 master alaşımının akma dayanımı 83 MPa, max çekme dayanımı ise 110 MPa'dır. Mg5Al1Si master alaşımının akma dayanımı 78 MPa, max çekme dayanımı 108 MPa iken bu değerler %4 Zn ilavesinde akma dayanımı 108 MPa, max çekme dayanımı 137 MPa, %4 Mn ilavesinde akma dayanımı 103 MPa, max çekme dayanımı ise 129 MPa olmaktadır. Mg5Al1Ti master alaşımının akma dayanımı 73 MPa, max çekme dayanımı 105 MPa dır. Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde akma dayanımı 91 MPa, max çekme dayanımı 120 MPa, %4 Mn ilave edildiğinde akma dayanımı 85 MPa, max çekme dayanımı 114 MPa ölçülmüştür.

şekil 7.13(c)'de alaşım içeriği ile % uzama değerlerinin değişimini göstermektedir. Alaşım içeriği ile mukavemetteki artışa rağmen % uzama değerinde de bir miktar artış gözlenmiştir. Master alaşımın Zn ile alaşımlandırılması halinde elde edilen yüzde uzama, Mn ile alaşımlandırılmasında elde edilen % uzama değerinden bir miktar daha yüksektir.

## **7.6. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI**

Bu çalışmada incelenen alaşımlarının 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltilisi içerisinde korozyon deney sonuçları hem zamana göre ağırlık kaybı ve hem de potansiyodinamik polarizasyon ile korozyon potansiyeli ve korozyon akımı ölçümü yapılarak incelenmiştir. Ağırlık kaybı ölçümü yapılarak geręekleřtirilen korozyon deneyleri daldırmalı korozyon olarak adlandırılmıştır.

### **7.6.1. Daldırmalı Korozyon Deneyi Sonuçları**

İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltilisi içerisindeki 24 saat sürede meydana gelen ağırlık kaybı değerleri Çizelge 7.6'da verilmiştir.

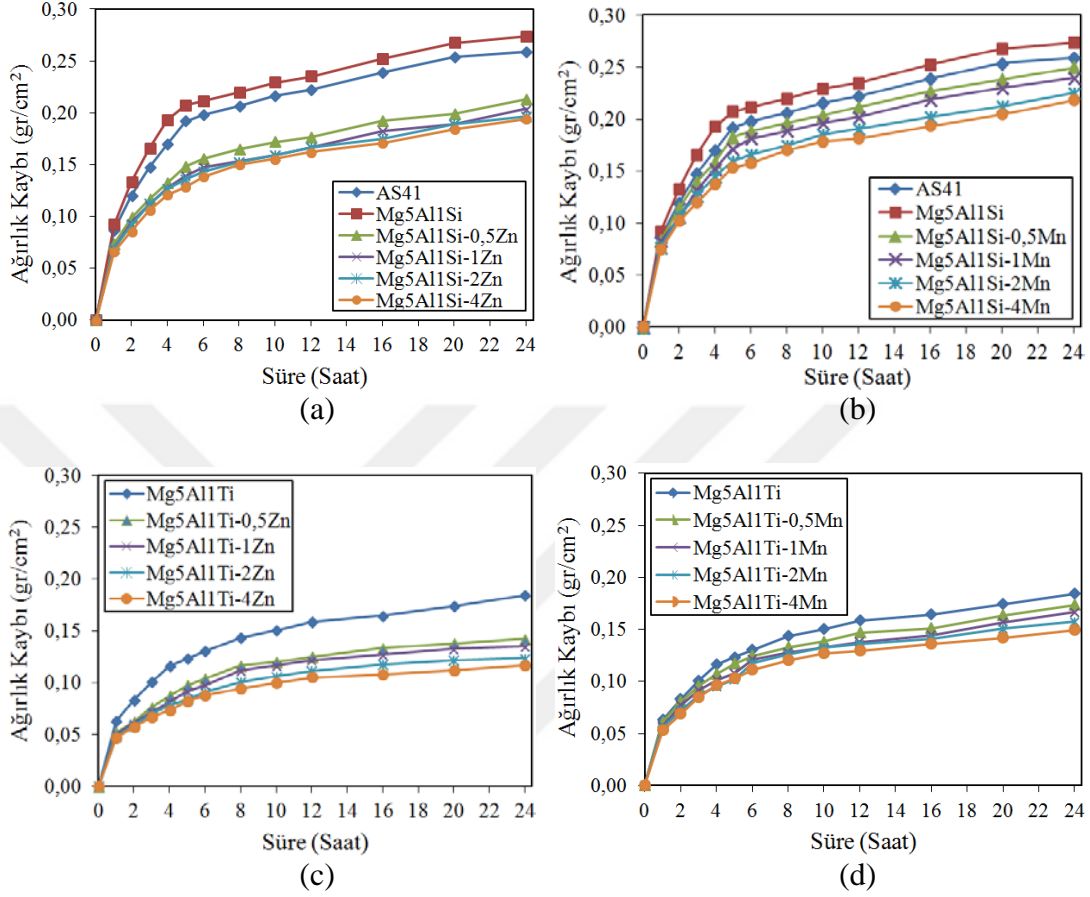
Çizelge 7.6. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen daldırma korozyon deneyi sonrası ağırlık kayıpları.

| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Zamana (Saat) Bağlı Ağırlık Kayıpları (gr/cm <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               |                             | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 8     | 10    | 12    | 16    | 20    | 24    |       |
| AS41          |                             | 0,086   | 0,120 | 0,147 | 0,170 | 0,192 | 0,198 | 0,206 | 0,216 | 0,222 | 0,239 | 0,254 | 0,259 |       |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0   | 0,092 | 0,133 | 0,166 | 0,193 | 0,207 | 0,211 | 0,219 | 0,229 | 0,235 | 0,252 | 0,267 | 0,273 |
|               |                             | 0,5   | 0,073 | 0,099 | 0,116 | 0,132 | 0,148 | 0,156 | 0,165 | 0,172 | 0,176 | 0,192 | 0,199 | 0,213 |
|               |                             | 1   | 0,069 | 0,094 | 0,111 | 0,127 | 0,139 | 0,147 | 0,153 | 0,159 | 0,167 | 0,183 | 0,189 | 0,204 |
|               |                             | 2   | 0,069 | 0,091 | 0,112 | 0,126 | 0,135 | 0,143 | 0,152 | 0,161 | 0,167 | 0,175 | 0,192 | 0,197 |
|               |                             | 4   | 0,066 | 0,086 | 0,106 | 0,121 | 0,129 | 0,138 | 0,150 | 0,155 | 0,162 | 0,171 | 0,184 | 0,194 |
|               | Mn                          | 0   | 0,092 | 0,133 | 0,166 | 0,193 | 0,207 | 0,211 | 0,219 | 0,229 | 0,235 | 0,252 | 0,267 | 0,273 |
|               |                             | 0,5   | 0,083 | 0,114 | 0,139 | 0,159 | 0,183 | 0,188 | 0,197 | 0,204 | 0,212 | 0,227 | 0,238 | 0,250 |
|               |                             | 1   | 0,083 | 0,106 | 0,131 | 0,152 | 0,171 | 0,181 | 0,189 | 0,196 | 0,202 | 0,219 | 0,230 | 0,239 |
|               |                             | 2   | 0,077 | 0,106 | 0,127 | 0,145 | 0,159 | 0,166 | 0,175 | 0,186 | 0,191 | 0,202 | 0,212 | 0,225 |
|               |                             | 4   | 0,075 | 0,102 | 0,120 | 0,137 | 0,153 | 0,158 | 0,170 | 0,178 | 0,181 | 0,193 | 0,204 | 0,218 |
| Mg5Al1Ti      | Zn                          | 0   | 0,063 | 0,083 | 0,101 | 0,116 | 0,123 | 0,131 | 0,144 | 0,150 | 0,158 | 0,165 | 0,174 | 0,184 |
|               |                             | 0,5   | 0,052 | 0,062 | 0,076 | 0,087 | 0,098 | 0,104 | 0,117 | 0,120 | 0,125 | 0,134 | 0,138 | 0,142 |
|               |                             | 1   | 0,050 | 0,061 | 0,072 | 0,081 | 0,092 | 0,097 | 0,112 | 0,117 | 0,122 | 0,127 | 0,133 | 0,135 |
|               |                             | 2   | 0,048 | 0,059 | 0,070 | 0,078 | 0,084 | 0,091 | 0,101 | 0,106 | 0,111 | 0,118 | 0,122 | 0,124 |
|               |                             | 4   | 0,047 | 0,057 | 0,067 | 0,073 | 0,082 | 0,088 | 0,094 | 0,099 | 0,105 | 0,108 | 0,112 | 0,116 |
|               | Mn                          | 0   | 0,063 | 0,083 | 0,101 | 0,116 | 0,123 | 0,131 | 0,144 | 0,150 | 0,158 | 0,165 | 0,174 | 0,184 |
|               |                             | 0,5   | 0,061 | 0,081 | 0,095 | 0,107 | 0,117 | 0,125 | 0,133 | 0,138 | 0,147 | 0,151 | 0,164 | 0,173 |
|               |                             | 1   | 0,057 | 0,077 | 0,091 | 0,101 | 0,108 | 0,121 | 0,128 | 0,133 | 0,138 | 0,144 | 0,157 | 0,166 |
|               |                             | 2   | 0,056 | 0,072 | 0,086 | 0,095 | 0,102 | 0,117 | 0,126 | 0,133 | 0,136 | 0,141 | 0,151 | 0,158 |
|               |                             | 4   | 0,053 | 0,069 | 0,084 | 0,096 | 0,103 | 0,111 | 0,121 | 0,127 | 0,129 | 0,136 | 0,142 | 0,149 |

Çizelge 7.6'daki veriler kullanılarak Şekil 7.14'de süreye bağlı olarak ağırlık kaybının değişimi çizilmiştir.

İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltisi içerisindeki 24 saat süre sonunda ağırlık kayıpları (Çizelge 7.6) göz önüne alındığında Mg5Al1Si master alaşımı Mg5Al1Ti master alaşımdan daha fazla ağırlık kaybına uğramıştır. Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ilave edilen alaşımda 0,194 gr ağırlık kaybı oluşurken, %4 Mn ilave edilmiş Mg5Al1Si master alaşımında 0,218 gr ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn Mn ilavesi ile üretilen alaşım 0,116 gr ağırlık kaybı ile en düşük ağırlık kaybı sergilerken, %4 Mn ilavesi ile üretilen alaşımda ise 0,149 gr ağırlık kaybı ölçülmüştür. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da

zamana bağlı olarak ağırlık kaybının artışı ilk 5 saat içinde hızlı bir şekilde yükselirken 5'inci saatten sonra ağırlık kaybı kararlı bir şekilde değişmiştir.



Şekil 7.14. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn, b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımlarının zamana bağlı korozyon kayıpları.

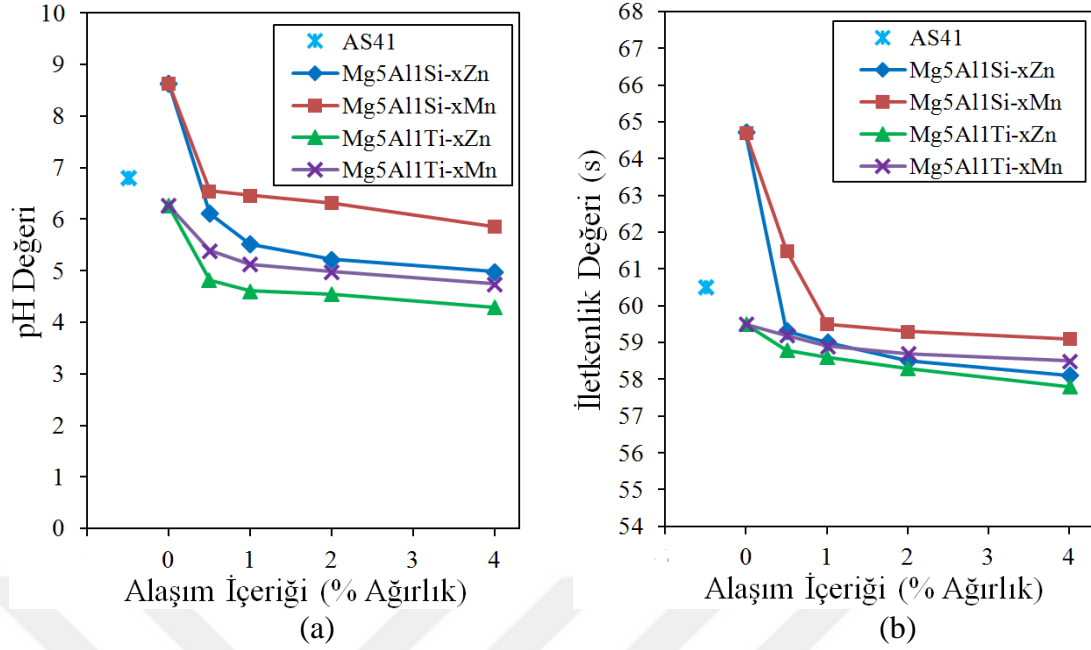
Belirlenen korozyon çözeltisi içerisine daldırarak gerçekleştirilen daldırmalı korozyon deneyinin bitiminden sonra korozyon hücresi içinde kalan çözeltinin pH ve iletkenlik (S) ölçüm sonuçları Çizelge 7.7'de verilmiştir. Korozyon çözeltisinin pH'ı 23,7 °C sıcaklığında ölçülmüştür. Çizelge 7.7'den yararlanılarak alaşım içeriği ile pH ve iletkenliğin (S) değişimi Şekil 7.15'de verilmiştir.

İçinde daldırmalı korozyon deneylerinin yapıldığı 3gr/L NaCl+10ml/L HCl çözeltisinin deney öncesi pH'ı 4,29 iken korozyon deneyleri sonrası çözeltinin pH'ı artmıştır. İncelenen alaşımın içeriğine bağlı olarak değişen pH değerinin 8,64'e kadar yükseldiği gözlenmiştir.

İncelenen master alaşımlarının sahip olduğu çözeltilerin pH'ı, Zn/Mn elementleri ile alaşımlandırılmış alaşımların sahip olduğu çözeltilerin pH'ından daha yüksektir. İncelenen master alaşımları arasında, daha yüksek ağırlık kaybı gösteren Mg5Al1Si master alaşımın sahip olduğu çözeltinin pH'ı 8,64 iken en düşük ağırlık kaybı gösteren Mg5Al1Ti master alaşımın pH'ı 6,77 olarak ölçülmüştür. Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Si alaşımının pH'ı, Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Si alaşımından daha düşüktür. Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Ti alaşımının sahip olduğu çözeltinin pH'ı 4,29'a kadar düşmüştür.

Çizelge 7.7. İncelenen alaşımların içinde ağırlık kaybı deneyine tabi tutuldukları 30 gr/l NaCl+10 ml/l HCl korozyon çözeltisinin 23,7 °C sıcaklıktaki pH ve iletkenlik(S) değerleri.

| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | pH   | İletkenlik (S) | Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | pH   | İletkenlik (S) |      |      |
|---------------|-----------------------------|------|----------------|---------------|-----------------------------|------|----------------|------|------|
| AS41          |                             | 6,80 | 60,5           | AS41          |                             | 6,80 | 60,5           |      |      |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0    | 8,64           | 64,7          | Mg5Al1Ti                    | Zn   | 0              | 6,27 | 59,5 |
|               |                             | 0,5  | 6,11           | 59,3          |                             |      | 0,5            | 4,82 | 58,8 |
|               |                             | 1    | 5,52           | 59,0          |                             |      | 1              | 4,61 | 58,6 |
|               |                             | 2    | 5,22           | 58,5          |                             |      | 2              | 4,55 | 58,3 |
|               |                             | 4    | 4,98           | 58,1          |                             |      | 4              | 4,29 | 57,8 |
|               | Mn                          | 0    | 8,64           | 64,7          |                             | Mn   | 0              | 6,27 | 59,5 |
|               |                             | 0,5  | 6,55           | 61,5          |                             |      | 0,5            | 5,40 | 59,2 |
|               |                             | 1    | 6,47           | 59,5          |                             |      | 1              | 5,13 | 58,9 |
|               |                             | 2    | 6,32           | 59,3          |                             |      | 2              | 4,99 | 58,7 |
|               |                             | 4    | 5,86           | 59,1          |                             |      | 4              | 4,74 | 58,5 |

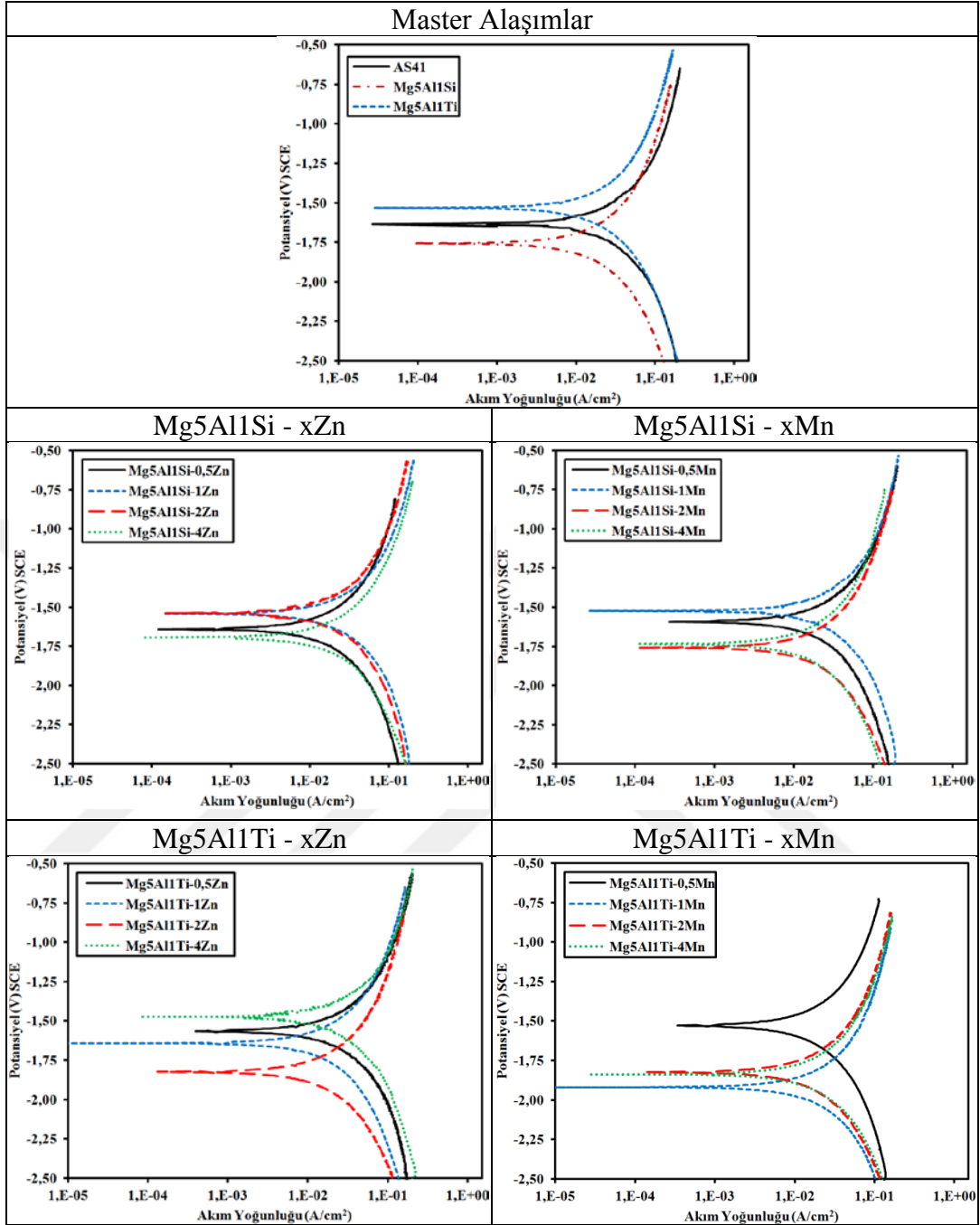


Şekil 7.15. İncelenen alaşımların içeriğine bağlı a) pH ve b) iletkenlik (s) değerleri.

Master alaşımlara ait çözeltinin iletkenlik değeri, Zn/Mn elementleri ile alaşımlandırılmış alaşımlara ait çözeltilerin iletkenlik değerinden daha yüksektir. Mg5Al1Si master alaşımına ait çözeltinin iletkenlik değeri 64,7 iken en düşük ağırlık kaybı gösteren Mg5Al1Ti master alaşımının iletkenlik değeri 59,5 olarak ölçülmüştür. Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Si alaşımının iletkenlik değeri, Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Si alaşımından daha düşüktür. Zn/Mn ile alaşımlandırılmış Mg5Al1Ti alaşımına ait çözeltinin iletkenlik değeri 57,8'e kadar düşmüştür.

### 7.6.2. Potansiyodinamik Polarizasyon İle Yapılan Korozyon Deneyi Sonuçları

İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 7.16'da verilmiştir. Şekil 7.16'da verilen eğrilerden korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) ve korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) değerleri ölçülmüş olup Çizelge 7.8'de liste halinde sunulmuştur.



Şekil 7.16. İncelenen alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

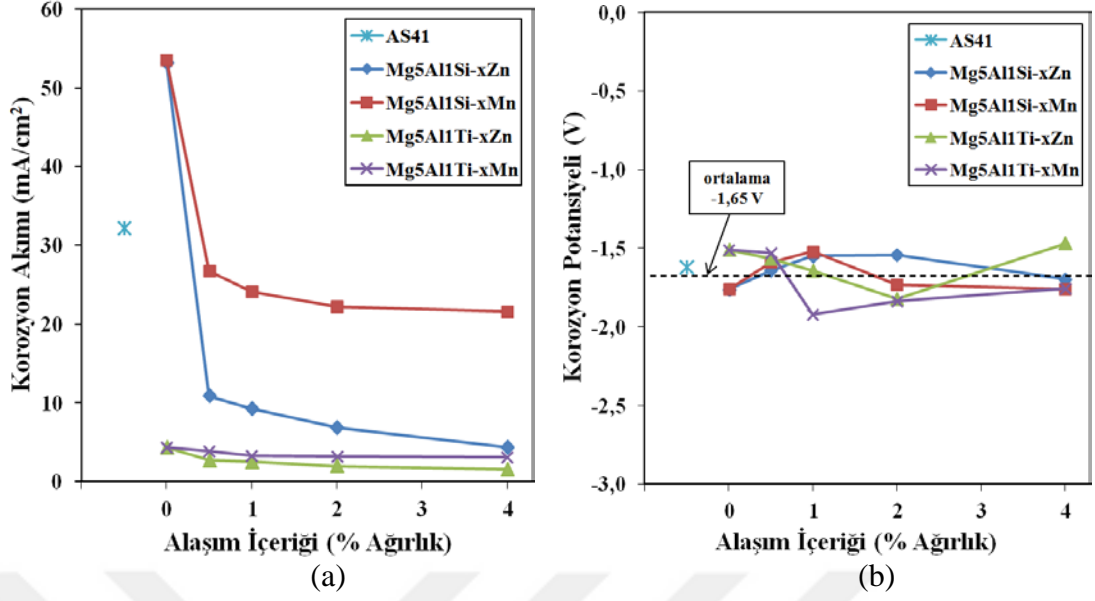
İncelenen AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının  $I_{corr}$  akım yoğunluğu değerleri sırasıyla  $32,15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $53,12 \text{ mA/cm}^2$  ve  $4,33 \text{ mA/cm}^2$ 'dir. Buradan da Mg5Al1Ti master alaşımının daha yuğsek korozyon direnci sergilediği sonucu çıkarılmaktadır. Çizelge 7.8'den yararlanarak incelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerlerinin değişimi Şekil 7.17'de gösterilmiştir.

Şekil 7.17'den Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %0,5'ten %4'e kadar Zn ve Mn elementi ilavesi ile korozyon akım yoğunluğunun önemli miktarda düştüğü görülmüştür. Mg5Al1Si-0,5Mn alaşımı 26,70 mA/cm<sup>2</sup> ile en yüksek akım yoğunluğuna sahipken, %4 Zn elementi içeren Mg5Al1Ti master alaşımı 1,55 mA/cm<sup>2</sup> ile en düşük akım yoğunluğu sergilemiştir.

İncelenen alaşımların E<sub>corr</sub> değerlerine (Şekil 7.17) bakıldığında alaşım içeriği ile korozyon potansiyellerinin değişiminin birbine yakın bir değer sergilediği görülmektedir. Bu çalışmada incelenen tüm alaşımlar için korozyon potansiyel değerinin (E<sub>corr</sub>) ortalaması -1,65 V olduğu tespit edilmiştir. İncelenen alaşımlar arasında Mg5Al1Ti-1Mn alaşımı diğerlerinden biraz daha düşük (-1,919 V) korozyon potansiyeline sahiptir.

Çizelge 7.8. İncelenen alaşımların korozyon akım yoğunluğu ve korozyon potansiyel değerleri.

| Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Korozyon Akım Yoğunluğu I <sub>corr</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | Korozyon potansiyeli E <sub>corr</sub> (mV) | Master Alaşım | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Korozyon Akım Yoğunluğu I <sub>corr</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | Korozyon Potansiyeli E <sub>corr</sub> (mV) |      |        |
|---------------|-----------------------------|---|---|---------------|-----------------------------|---|---|------|--------|
| AS41          |                             | 32,15   | -1,620                                      | AS41          |                             | 32,15   | -1,620                                      |      |        |
| Mg5Al1Si      | Zn                          | 0   | 53,12                                       | -1,760        | Mg5Al1Ti                    | Zn  | 0   | 4,33 | -1,510 |
|               |                             | 0,5   | 10,85                                       | -1,640        |                             |   | 0,5   | 2,71 | -1,566 |
|               |                             | 1   | 9,24  | -1,547        |                             |   | 1   | 2,49 | -1,642 |
|               |                             | 2   | 6,82  | -1,542        |                             |   | 2   | 1,99 | -1,824 |
|               |                             | 4   | 4,32  | -1,694        |                             |   | 4   | 1,55 | -1,470 |
|               | Mn                          | 0   | 53,50                                       | -1,760        |                             | Mn  | 0   | 4,33 | -1,510 |
|               |                             | 0,5   | 26,70                                       | -1,590        |                             |   | 0,5   | 3,86 | -1,527 |
|               |                             | 1   | 24,10                                       | -1,520        |                             |   | 1   | 3,25 | -1,919 |
|               |                             | 2   | 22,20                                       | -1,760        |                             |   | 2   | 3,19 | -1,757 |
|               |                             | 4   | 21,57                                       | -1,730        |                             |   | 4   | 3,11 | -1,838 |



Şekil 7.17. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı olarak a) Korozyon akımı ve b) Korozyon potansiyeli grafiği.

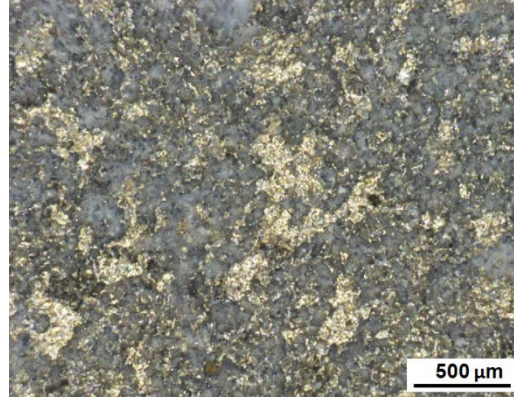
### 7.6.3. Korozyon Deneyleri Sonrası Yüzey Ve Yüzey Altı Görünüm

Bu çalışmada incelenen alaşımların korozyon deneyi sonrası yüzey ve yüzey altı görünümleri, daldırmalı korozyon ve potansiyodinamik polarizasyon deneyleri olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

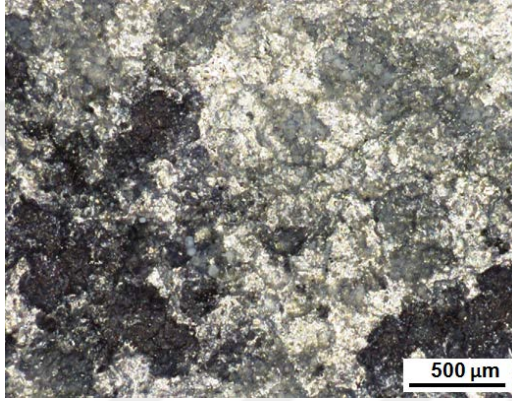
#### 7.6.3.1. Daldırmalı Korozyon Sonrası Görünüm

İncelenen alaşımların 30 gr/l NaCl + 10 ml/l HCl çözeltisi içinde 24 saat süre içinde daldırmalı korozyon sonrası deney numunelerinin yüzeyinden Shuttle Pix stereo mikroskop (Şekil 7.18–Şekil 7.20) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Şekil 7.21) ile birlikte EDS sonuçları (Şekil 7.22–Şekil 7.26) alınmıştır. Şekil 7.27 ve Şekil 7.28 sırasıyla yüzey altından alınan optik ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerini vermektedir.

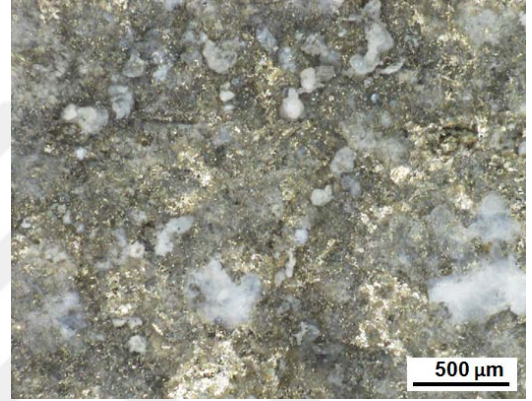




(a)



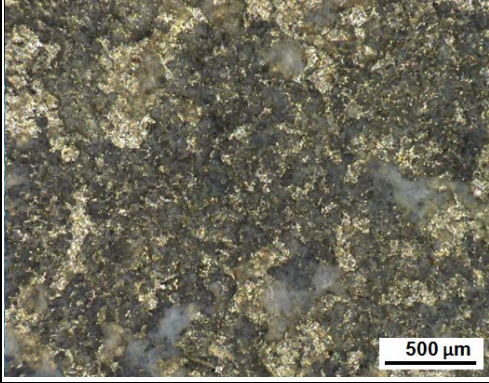
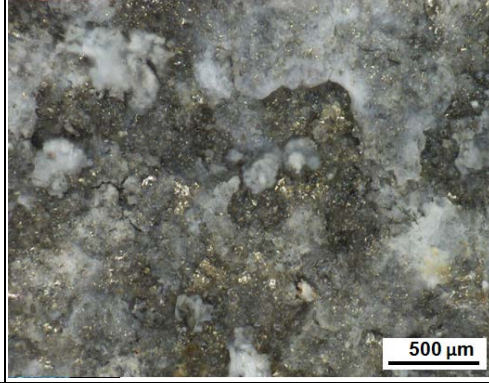
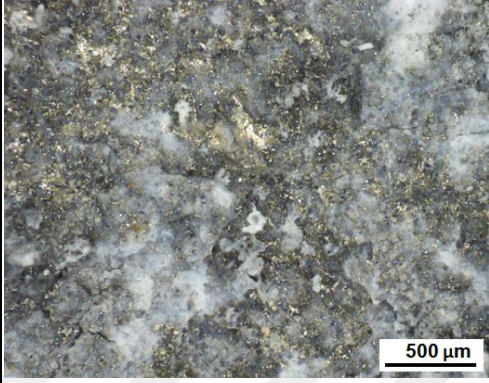
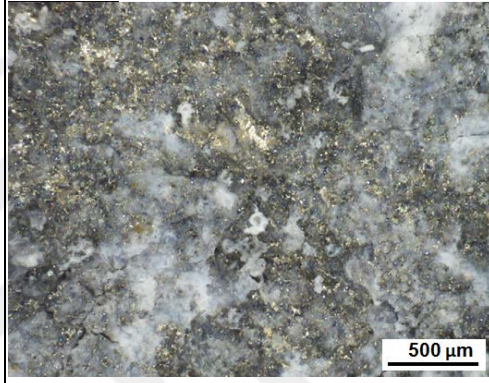
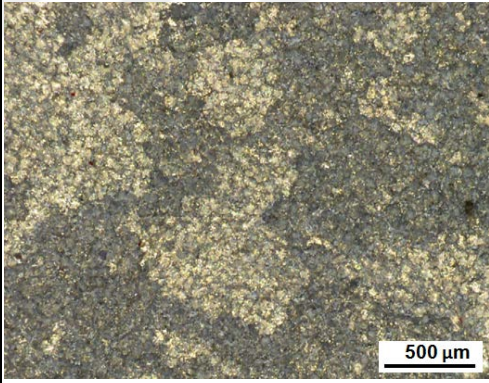
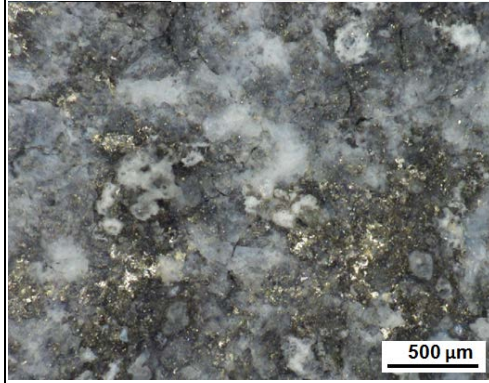
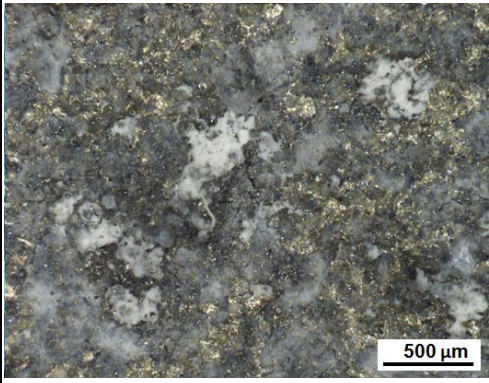
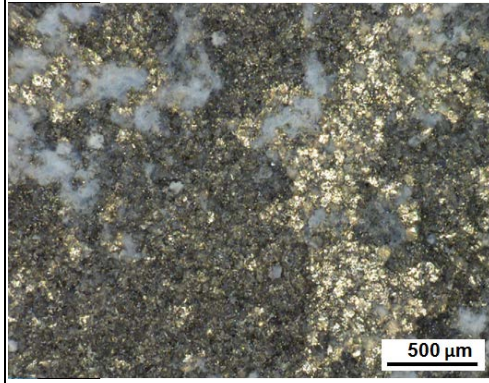
(b)



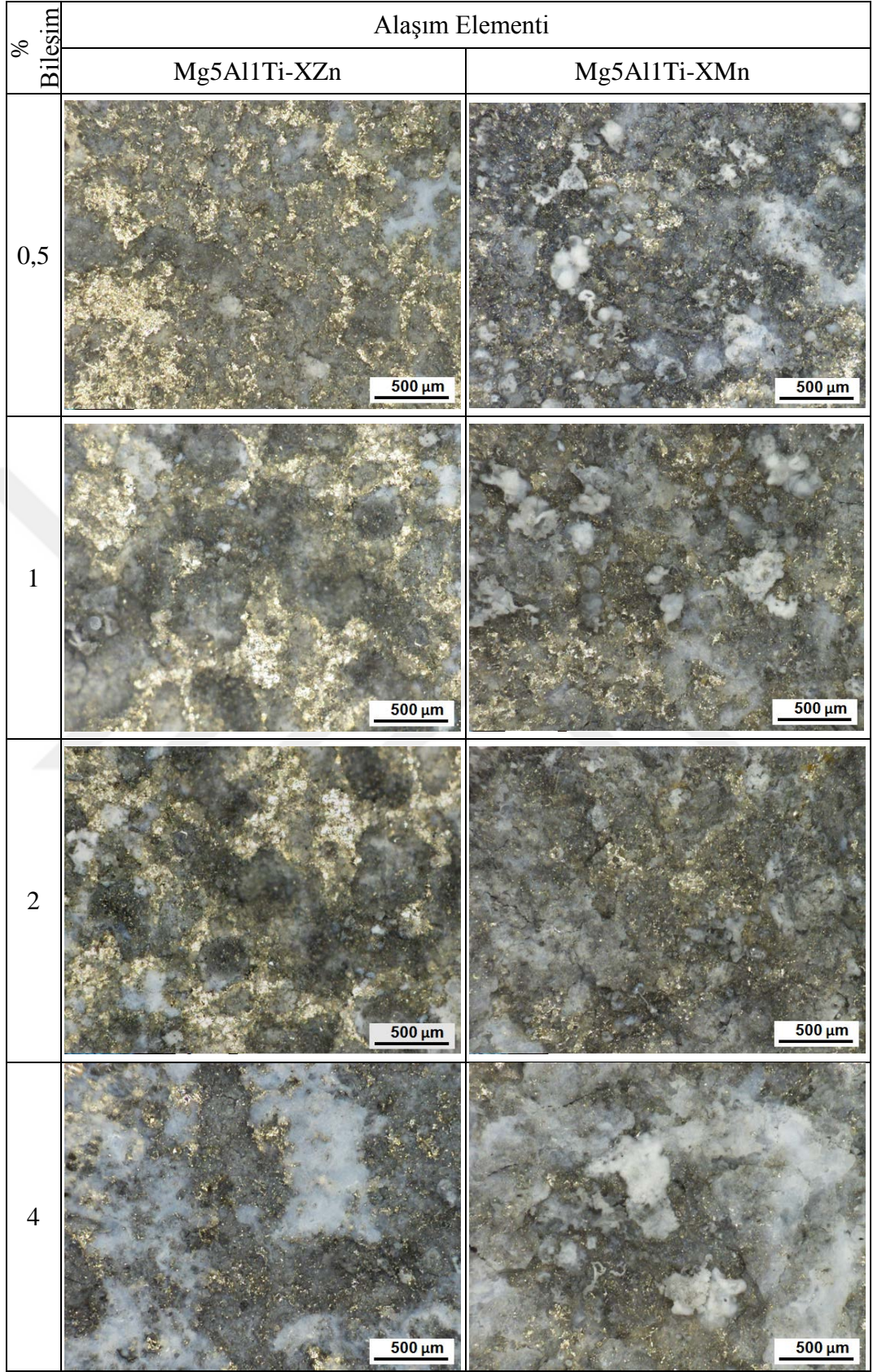
(c)

Şekil 7.18. Master alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri a) AS41, b) Mg5Al1Si ve c) Mg5Al1Ti.

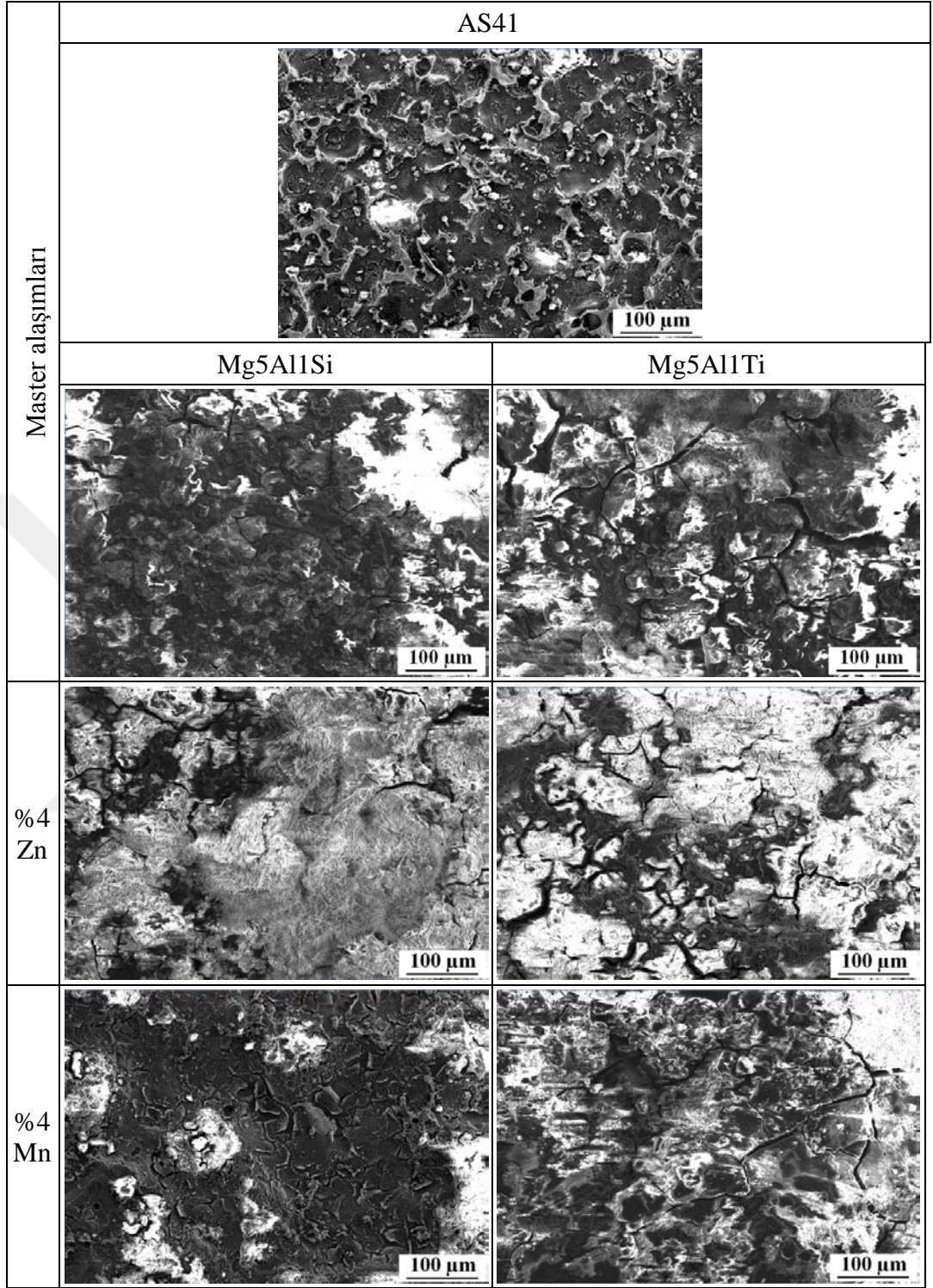
Şekil 7.18–Şekil 7.20'de verilen daldırmalı korozyon sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri, korozyon ürünü (oksit filmi) ile kaplandığını, yüzeyin bir kısmının koyu gri renkli ve bulutsu ya da keskin sarı rengi andıran beyaz renkli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Özellikle Zn elementi içeren Mg5Al1Ti alaşımların korozyon sonrası yüzeylerinde beyaz bölgelerin çoğunlukta olduğu görülmüştür.

| % Bileşim | Alaşım Elementi   |  |
|-----------|---|--|
|           | Mg5Al1Si-XZn  | Mg5Al1Si-XMn   |
| 0,5       |    |    |
| 1         |   |   |
| 2         |  |  |
| 4         |  |  |

Şekil 7.19. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri.

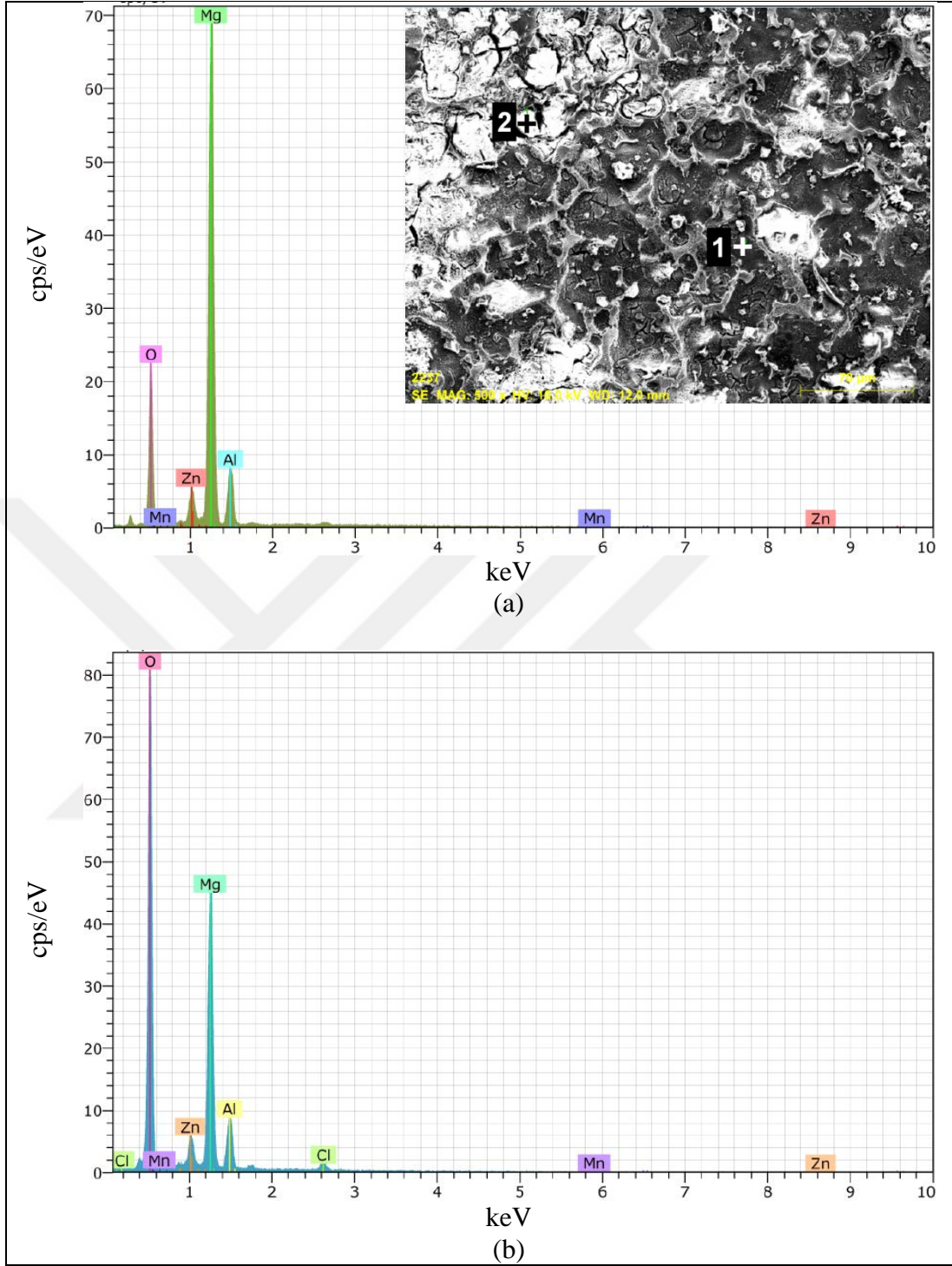


Şekil 7.20. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri.

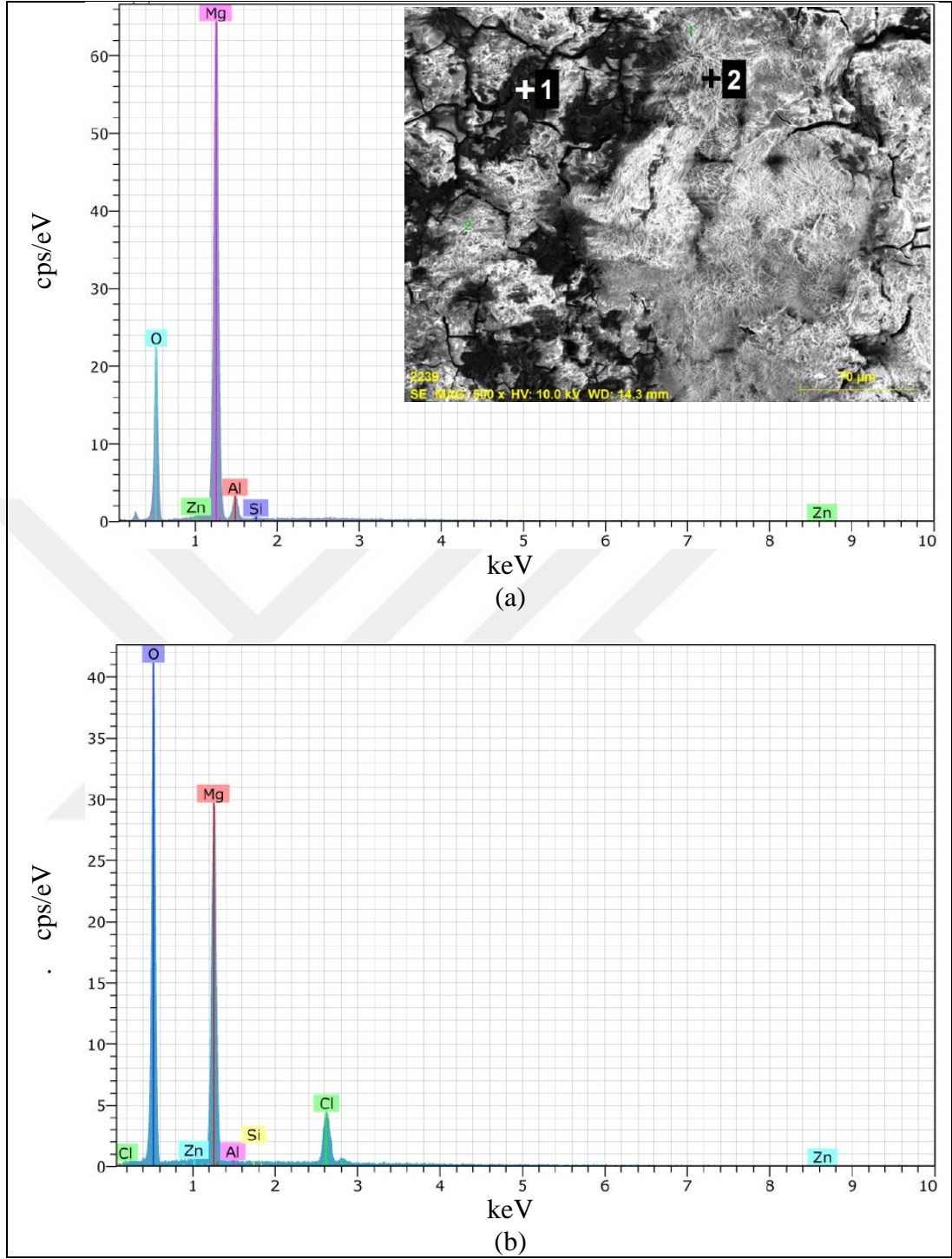


Şekil 7.21. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelelen alaşımların daldırma korozyonu sonrası yüzey SEM görüntüleri.

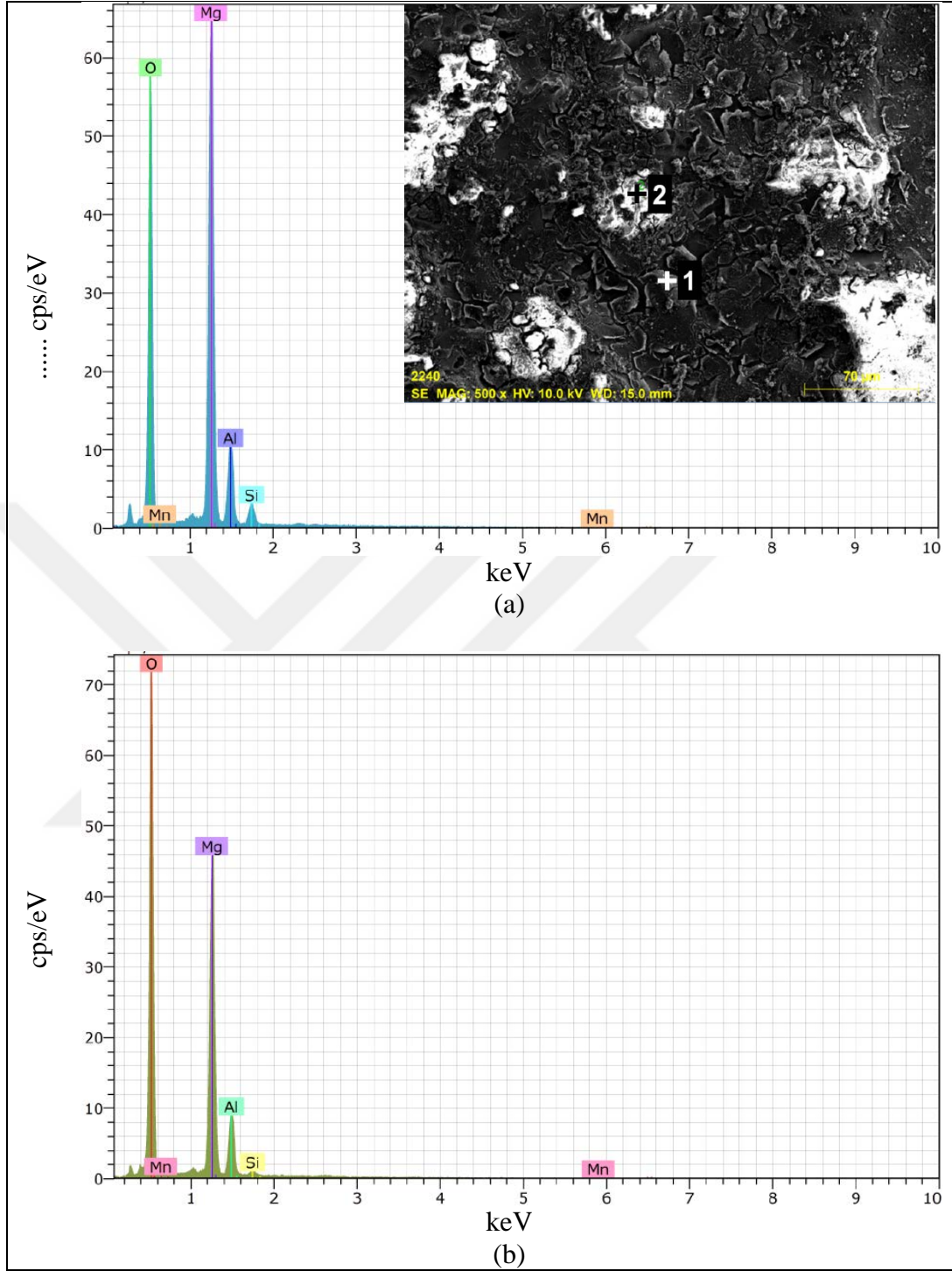
Bu çalışmada incelenen master alaşımların ve %4 oranında Zn/Mn elementi içeren alaşımların daldırma korozyon deneyi sonrası yüzeyden çekilen SEM mikrofotograflarından (Şekil 7.21), koyu gri renkli pürüzlü bölgelerin ve açık parlak renkli göreceli olarak düz bölgelerin var olduğu gözlenmiştir. Açık parlak düz bölgeler kılcal çatlaklar içermektedir. Kılcal çatlak bulunmasından dolayı buralarda oluşan oksit tabakasının sert-gevrek karakterde olduğuna işaret etmektedir. Şekil 7.21'de %4 oranında Zn elementi içeren Mg5Al1Ti alaşımının daldırma korozyon deneyi sonrası yüzeyinde daha fazla kılcal çatlak içeren düz, sert-gevrek oksit plakası oluşmuştur. Şekil 7.18-Şekil 7.20 arasında incelenen alaşımların daldırma korozyon deneyi sonrası yüzey Shuttle Pix stereo mikroskop görüntülerindeki keskin sarı rengi ya da bulutu andıran beyaz renkli bölgeler, SEM mikrofotograflarında açık parlak kılcal çatlak içeren düz bölgelere karşılık gelmektedir.



Şekil 7.22. İncelenen AS41 master alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde a) 1 ve b) 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.

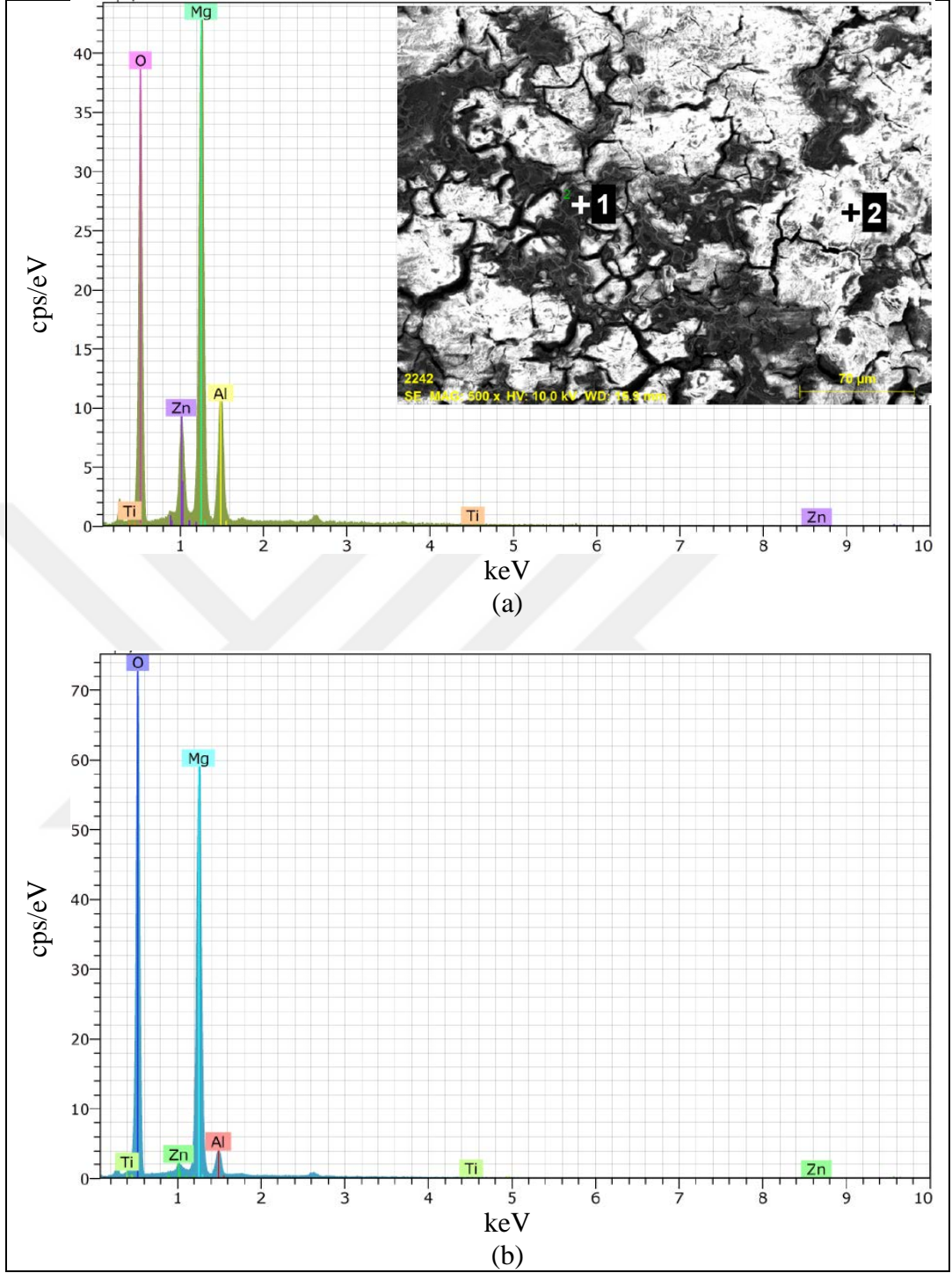


Şekil 7.23. İncelenen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si-4Zn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde a) 1 ve b) 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.

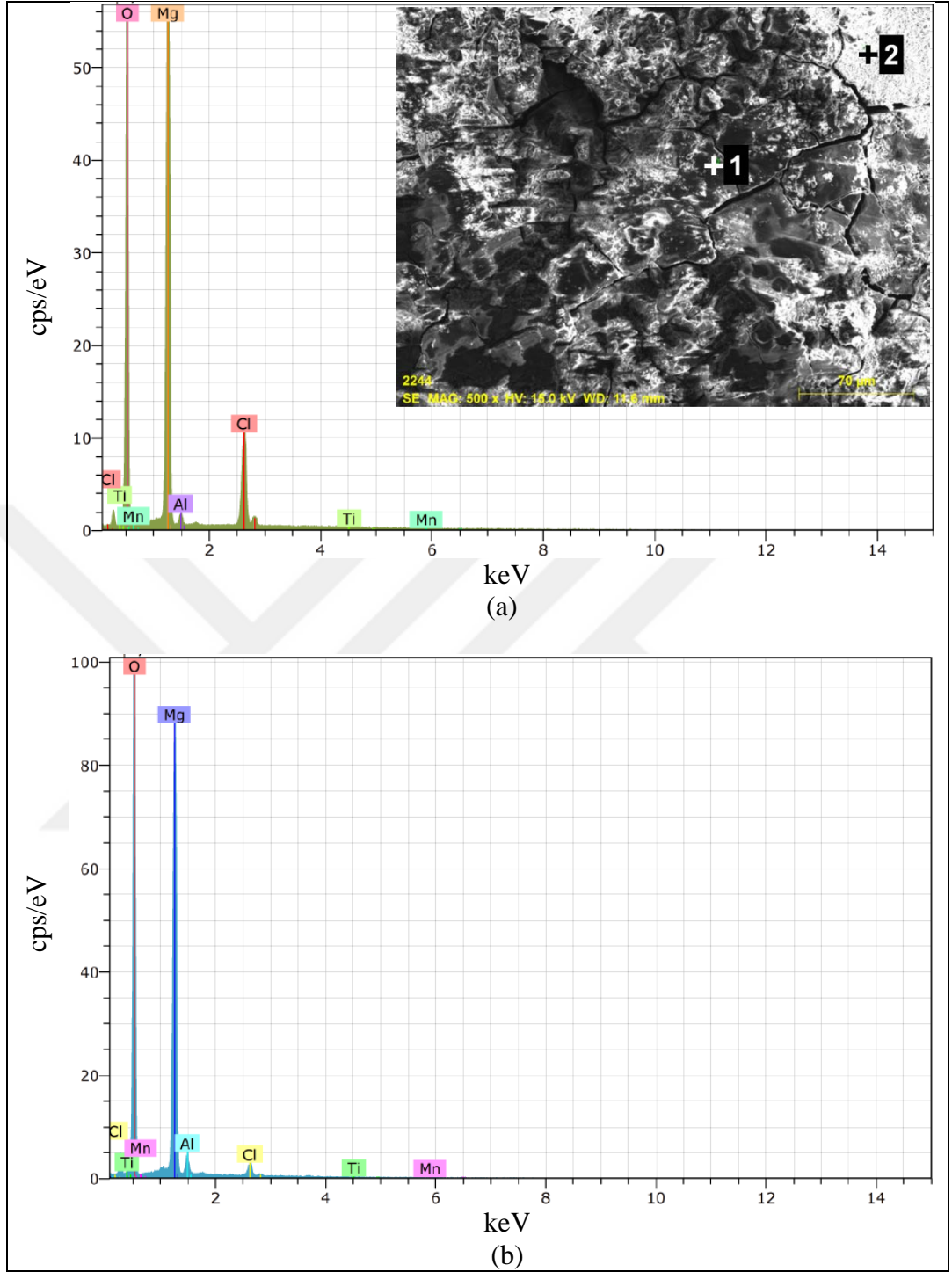


Şekil 7.24. İncelenen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si-4Mn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde a) 1 ve b) 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.





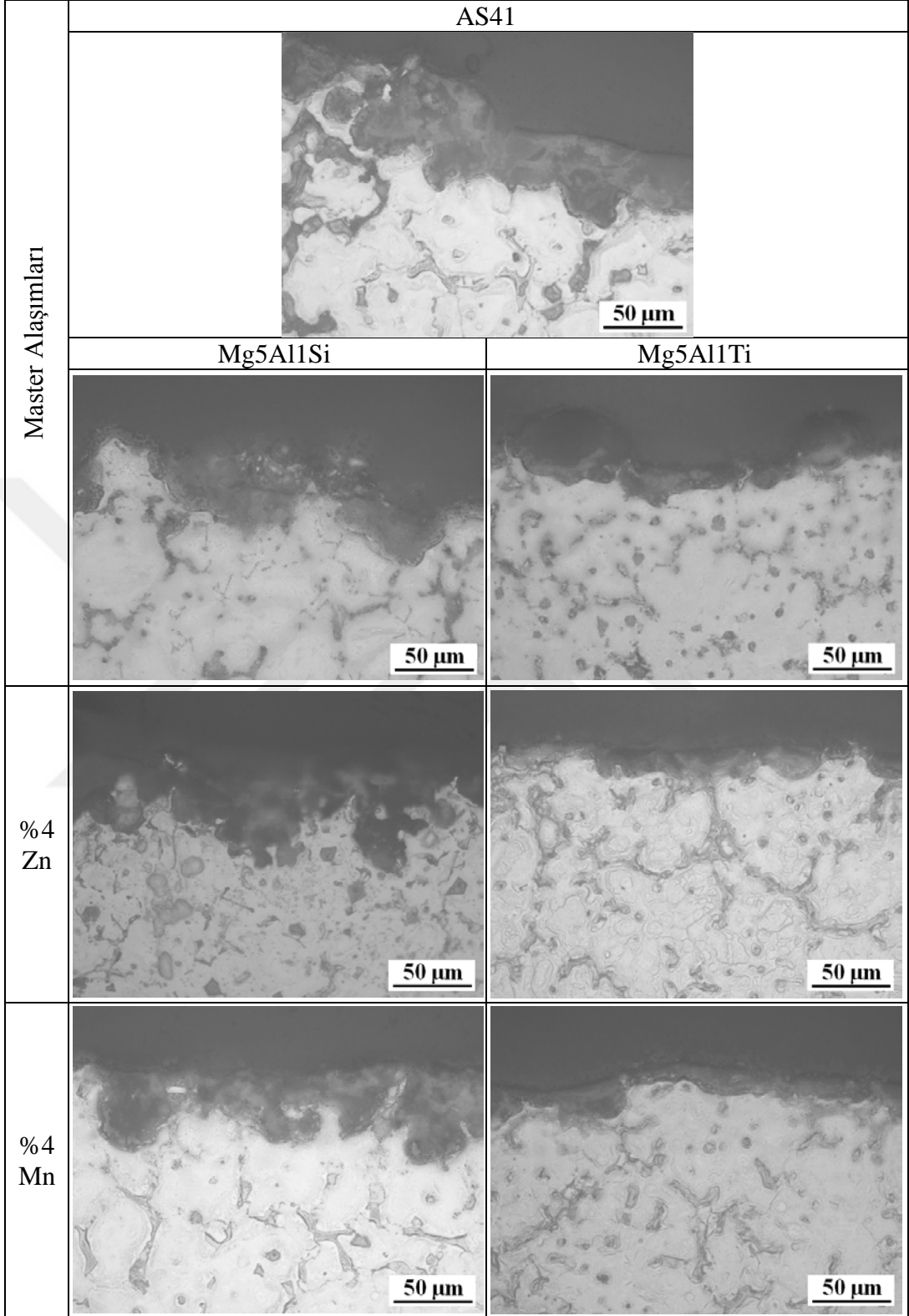
Şekil 7.25. İncelenen Mg5Al1Ti-4Zn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde a) 1 ve b) 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.



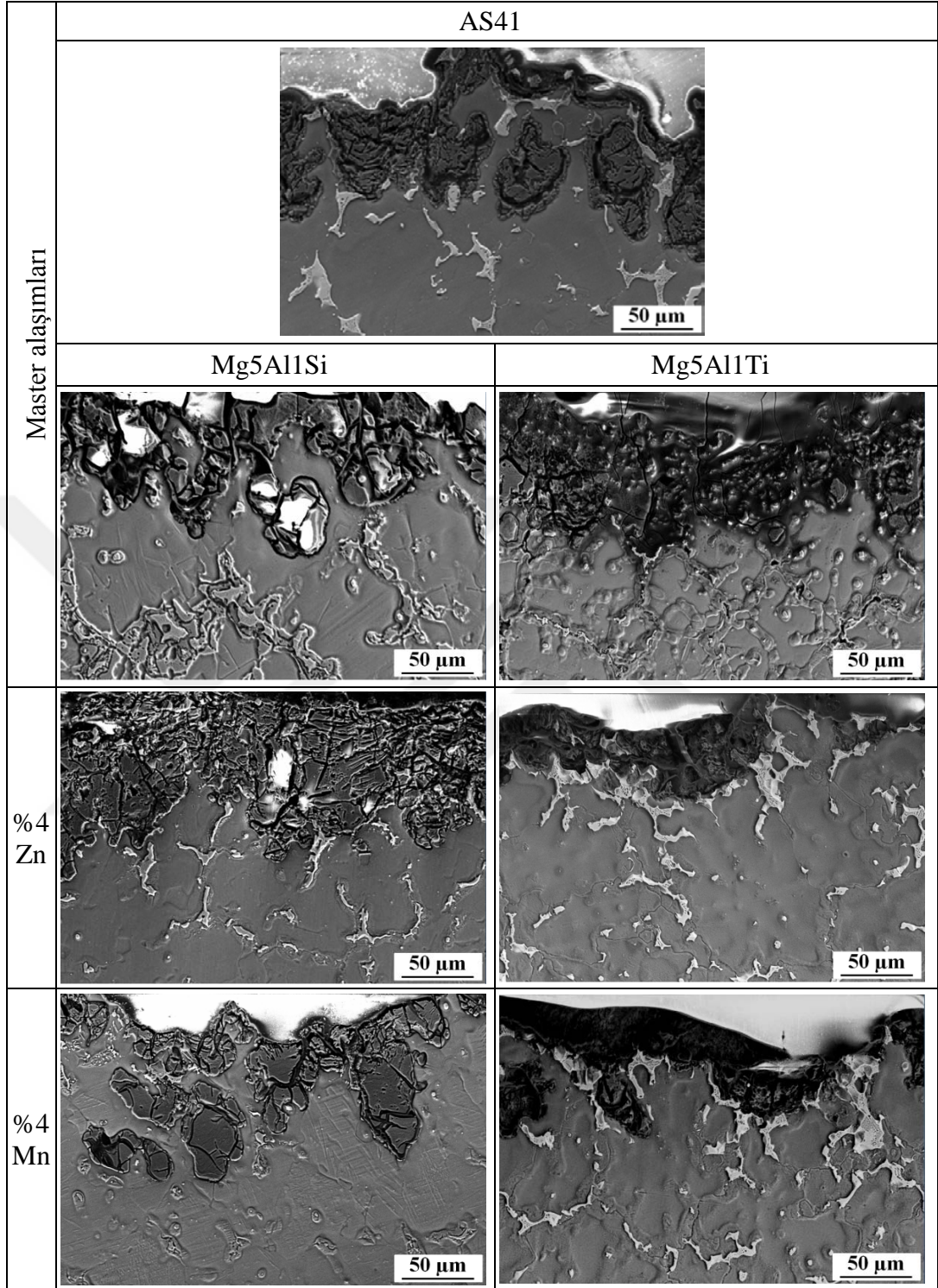
Şekil 7.26. İncelenen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-4Mn alaşımına ait daldırma korozyonu sonrası yüzeyde a) 1 ve b) 2 numaralı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.

Daldırma korozyon deneyi sonrası yüzeyden alınan SEM mikro fotoğraflarındaki (Şekil 7.21) koyu gri - pürüzlü ve açık parlak - düz bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları Şekil 7.22-Şekil 7.26'da sırasıyla AS41 master ve %4 oranında Zn/Mn içeren Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti alaşımları için verilmiştir. SEM görüntüleri üzerinden seçilen 1 numaralı bölgeler koyu gri-pürüzlü iken, 2 numaralı bölgeler ise açık parlak-düz'dür. 1 numaralı bölgelerde düşük oksijen içerikli oksit tabakası mevcut iken 2 numaralı bölgelerdeki oksit tabakaları yüksek oksijen içermektedir. Yüksek oksijen içerikli bölgelerde genellikle kılcal çatlaklar yer almaktadır. Mg5Al1Ti-4Zn/Mn alaşımının yüzeyinden alınan EDS analiz sonuçları, diğer alaşımlara kıyasla daha yüksek oranda oksijen tespit etmiştir.

Korozyon deneyi sonrası numunenin yüzey altı optik ışık mikroskobu ve SEM görünümünde (Şekil 7.27 ve Şekil 7.28) Zn/Mn ile alaşımlı ve alaşımsız Mg5Al1Si ve AS41 master alaşımların yüzeyinde oluşan oksit tabakası daha kalın ve boşluklu iken incelenen Mg5Al1Ti-4Zn/Mn alaşımının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının daha ince ve sıkı olduğu gözlenmiştir. Buna ilave olarak Mg5Al1Ti-4Zn/Mn alaşımında oksit tabakasının ilerleyişi intermetalikler tarafından durdurulmuştur.



Şekil 7.27. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası kesitten alınan optik ışık mikroskop görüntüleri.

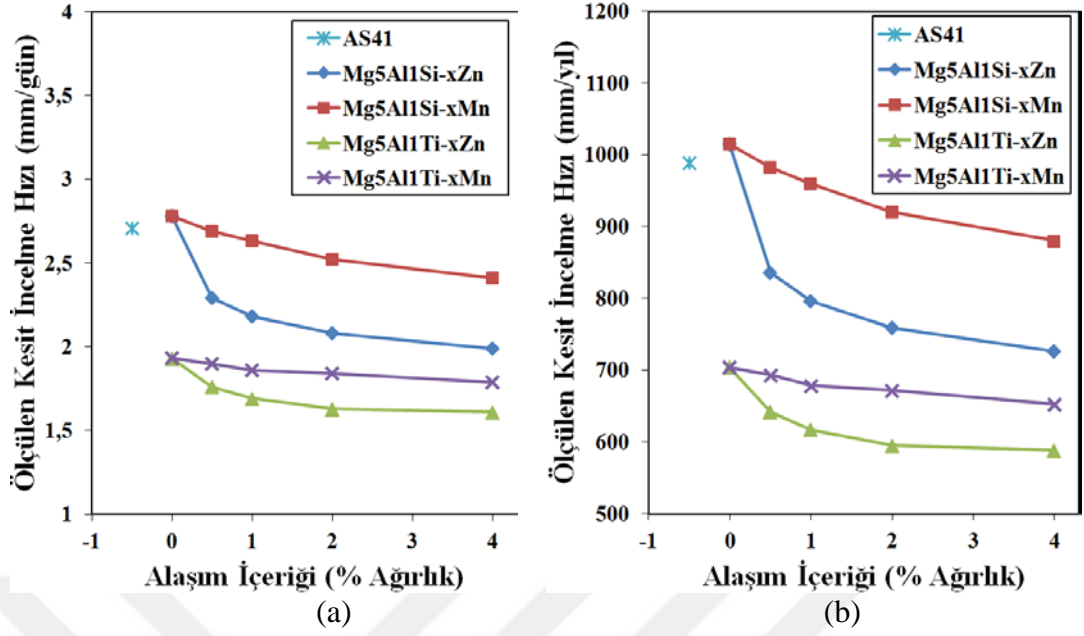


Şekil 7.28. AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilmiş incelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası kesitten SEM görüntüleri.

Daldırma korozyon deneyi öncesi belirli kesit kalınlığına sahip numunelerin 1 gün süren deneyden sonra kesit kalınlığı stereo mikroskopta mm cinsinden ölçülmüştür. Son kesit kalınlığı ölçülürken korozyon deneyi süresince oluşan oksit tabakasının kalınlığı dikkate alınmayarak sadece kesitte geriye kalan ortalama metal kalınlığı tespit edilmiştir. Daldırma korozyon deneyi öncesi ve sonrası numunelerin ölçülen kesit kalınlıklarının farkı incelme miktarı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.9. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde daldırma korozyonu sonrası mm/gün ve mm/yıl cinsinden ölçülen kesit incelme hızı değerleri.

| Master Alaşımlar | Alaşım elementi (% Ağırlık) |     | Ölçülen kesit incelme hızları |          | Master Alaşımlar | Alaşım elementi (% Ağırlık) |     | Ölçülen kesit incelme hızları |          |
|------------------|-----------------------------|-----|-------------------------------|----------|------------------|-----------------------------|-----|-------------------------------|----------|
|                  |                             |     | (mm/gün)                      | (mm/yıl) |                  |                             |     | (mm/gün)                      | (mm/yıl) |
| AS41             |                             |     | 2,71                          | 989      | AS41             |                             |     | 2,71                          | 989      |
| Mg5Al1Si         | Zn                          | 0   | 2,78                          | 1015     | Mg5Al1Ti         | Zn                          | 0   | 1,93                          | 704      |
|                  |                             | 0,5 | 2,29                          | 836      |                  |                             | 0,5 | 1,76                          | 642      |
|                  |                             | 1   | 2,18                          | 796      |                  |                             | 1   | 1,69                          | 617      |
|                  |                             | 2   | 2,08                          | 759      |                  |                             | 2   | 1,63                          | 595      |
|                  |                             | 4   | 1,99                          | 726      |                  |                             | 4   | 1,61                          | 588      |
|                  | Mn                          | 0   | 2,78                          | 1015     |                  | Mn                          | 0   | 1,93                          | 704      |
|                  |                             | 0,5 | 2,69                          | 982      |                  |                             | 0,5 | 1,90                          | 693      |
|                  |                             | 1   | 2,63                          | 960      |                  |                             | 1   | 1,86                          | 679      |
|                  |                             | 2   | 2,52                          | 920      |                  |                             | 2   | 1,84                          | 672      |
|                  |                             | 4   | 2,41                          | 880      |                  |                             | 4   | 1,79                          | 653      |



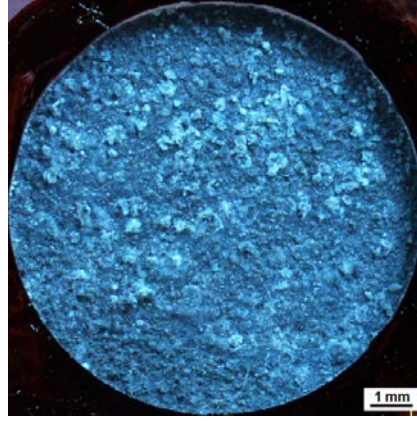
Şekil 7.29. İncelenen alaşımların daldırma korozyonu sonrası alaşım içeriğine bağlı a) mm/gün ve b) mm/yıl cinsinden ölçülen kesit incelme hızı.

Ölçülen kesit incelme miktarı deney süresi 24 saat yani 1 gün olduğu için mm/gün biriminde, 1 yıldıki incelme hızını bulmak için mm/gün değeri 365 ile oranlayarak mm/yıl'a çevrilmiş ve her iki değer de Çizelge 7.9'da verilmiştir. Çizelge 7.9'daki değerler kullanılarak alaşım içeriğine bağlı olarak mm/gün ve mm/yıl cinsinden ölçülen kesit incelme hızı grafikleri Şekil 7.29'da çizilmiştir.

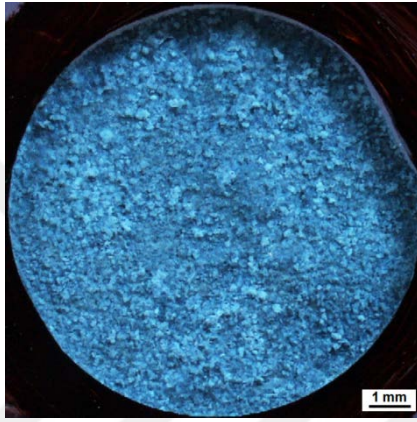
Çizelge 7.9 ve Şekil 7.29'a baktığımızda ölçülen kesit incelme hızı değerleri Çizelge 7.6 ve Şekil 7.14'deki ağırlık kaybı değerleri ile uyum içindedir. Ağırlık kayıplarında olduğu gibi en yüksek incelme hızı 1015 mm/yıl ile Mg5Al1Si master alaşımına aittir. Master alaşımları kendi aralarında kıyasladığımızda Mg5Al1Si master alaşımı Mg5Al1Ti master alaşımından daha yüksek ölçülen kesit incelme hızına sahiptir. En düşük incelme hızı sergileyen alaşım Mg5Al1Ti-4Zn alaşımıdır.

### 7.6.3.2. Potansiyodinamik-Polarizasyon Sonrası Görünüm

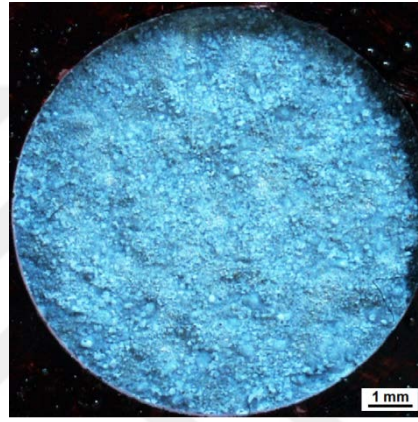
İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri sonrası numunelerin yüzeyinden alınan Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri Şekil 7.30 - Şekil 7.32'de verilmiştir.



(a)



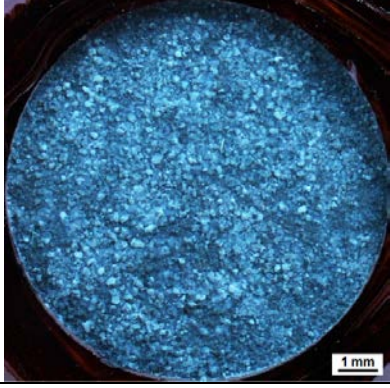
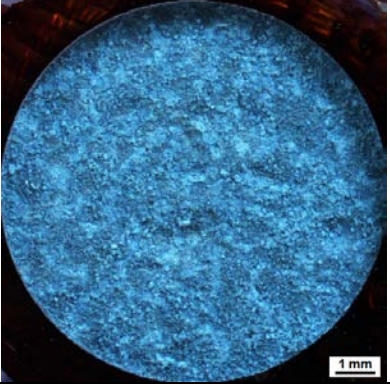
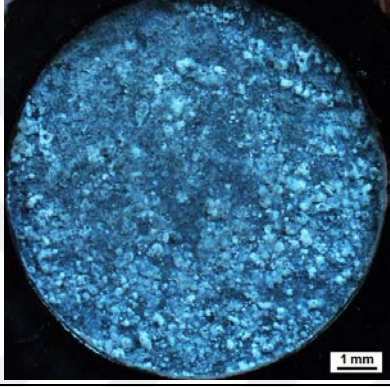
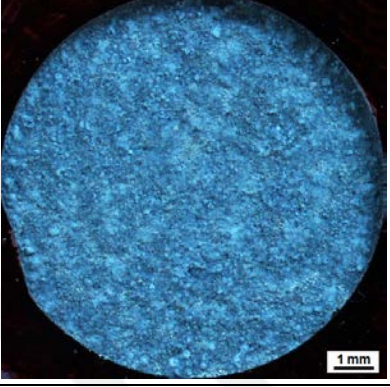
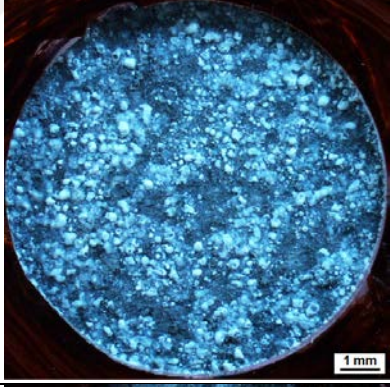
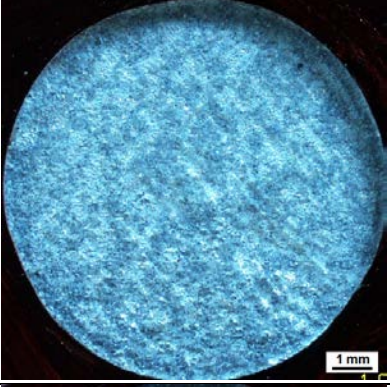
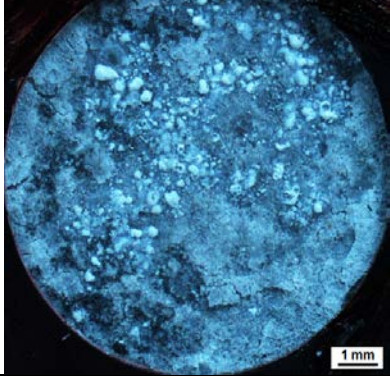
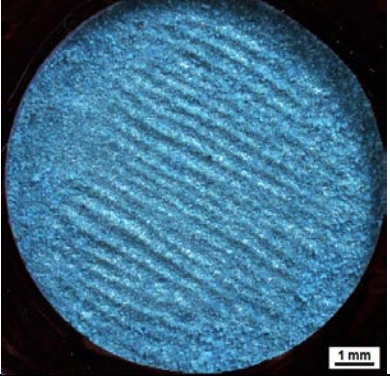
(b)



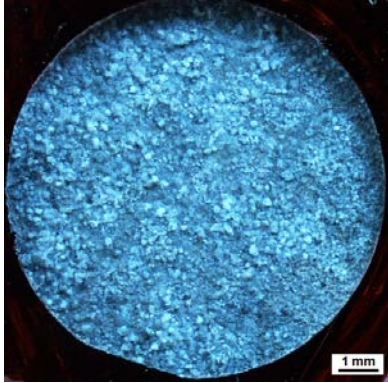
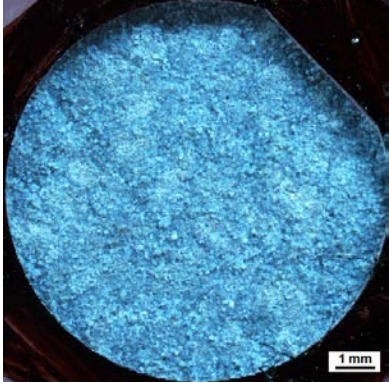
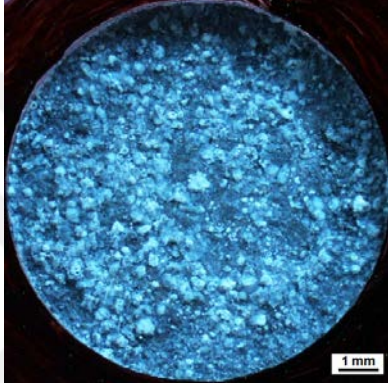
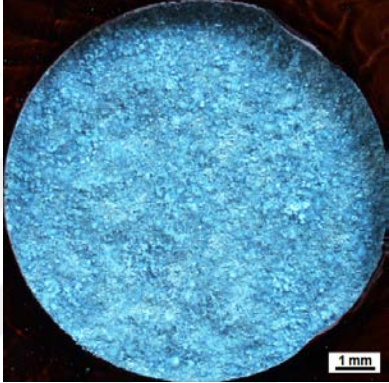
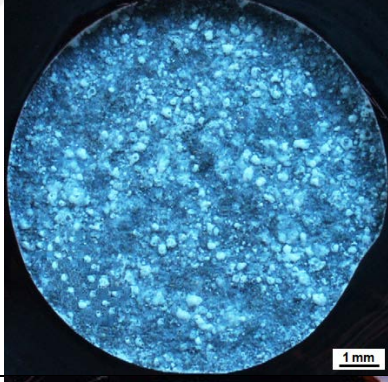
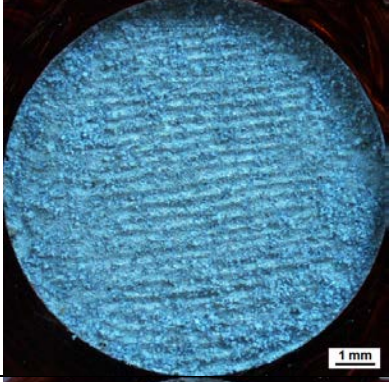
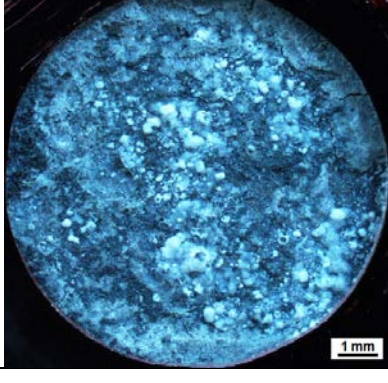
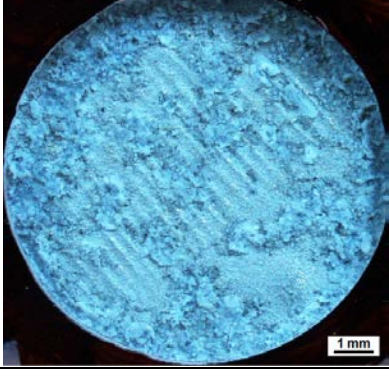
(c)

Şekil 7.30. İncelenen a) AS41, b) Mg5Al1Si ve c) Mg5Al1Ti master alaşımlara ait potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri.



| %<br>Ağırlık | Alaşım Elementi   |  |
|--------------|---|--|
|              | Mg5Al1Si-XZn  | Mg5Al1Si-XMn   |
| 0,5          |    |    |
| 1            |   |   |
| 2            |  |  |
| 4            |  |  |

Şekil 7.31. İncelenen Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntüleri.

| %<br>Ağırlık | Alaşım Elementi   |  |
|--------------|---|--|
|              | Mg5Al1Ti-XZn  | Mg5Al1Ti-XMn   |
| 0,5          |    |    |
| 1            |   |   |
| 2            |  |  |
| 4            |  |  |

Şekil 7.32. İncelenen Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası yzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop g3r3nt3leri.

Potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri sonrası yüzeyin Shuttle Pix Stereo mikroskop görüntüleri, Zn elementi içeren alaşımlarda daha koyu ve Mn elementi içeren alaşımlarda daha açık renkli bir korozyon tabakası oluştuğunu göstermiştir. Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımının her ikisinde de %2 Mn elementi ilavesinde korozyonun malzeme yüzeyinde dalga oluşumu şeklinde bir iz bıraktığı görülmektedir. Bu durumu açıklamada yardımcı olacağı düşünülen alaşımların düşük ve yüksek büyütme optik ışık mikroskop altında mikroyapı görüntülerine bakıldığında tanelerde herhangi bir yönlenmenin olmadığı gözlenmektedir.



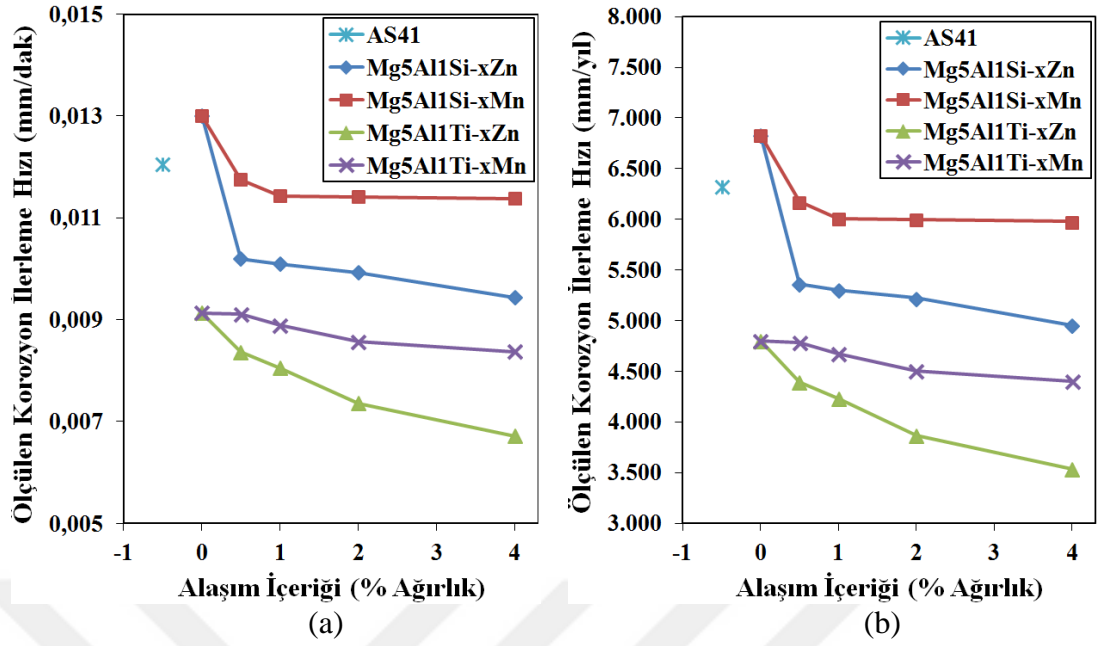
Şekil 7.33. Potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası hasara uğramış numunede korozyon ilerleme görüntüsü.

İncelen en alaşımların verilen korozyon çözeltisi içinde 75 dakika süre ile yapılan potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri sonrası alkol ile ultrasonik olarak temizlenmiş reçineye gömülü numuneler üzerinden (Şekil 7.33) 3D imaj analiz software programına sahip Shuttle Pix stereo mikroskop yardımı ile mm cinsinden bir korozyon ilerlemesi ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler testin süresi olan 75 dakika ile oranlanarak ölçülen korozyon ilerleme hızı mm/dakika cinsinden bulunmuştur. Dakikadaki ilerleme hızı, mm/yıl cinsinden numunelerde bir yılda oluşacağı öngörülen korozyon ilerleme hızı verilerine dönüştürülmüştür. Elde edilen mm/dakika ve mm/yıl cinsindeki her iki değer Çizelge 7.10'da verilmiştir. Çizelge

7.10'daki veriler kullanılarak mm/dakika ve mm/yıl olarak ölçülen korozyon ilerleme hızı alaşım ilerleme hızına bağlı olarak Şekil 7.34'de çizilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar Potansiyodinamik Polarizasyon deneyi sonucunda elde edilen  $I_{corr}$  değerleri ile uyumludur.  $I_{corr}$  değeri en yüksek olan Mg5Al1Si master alaşımı 6833 mm/yıl değeri ile en fazla korozyon ilerleme hızına sahip alaşımdır. Mg5Al1Ti-4Zn alaşımı ise 3532 mm/yıl değeri ile en az korozyon ilerleme hızına sahiptir.

Çizelge 7.10. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde Potansiyodinamik Polarizasyon korozyon deneyleri sonrası mm/dakika ve mm/yıl cinsinden ölçülen korozyon ilerleme hızı değerleri.

| Master Alaşımları | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Ölçülen Korozyon İlerleme Hızı |          | Master Alaşımları | Alaşım elementi (% Ağırlık) | Ölçülen Korozyon İlerleme Hızı |          |         |      |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|---------|------|
|                   |                             | (mm/dakika)                    | (mm/yıl) |                   |                             | (mm/dakika)                    | (mm/yıl) |         |      |
| AS41              |                             | 0,01204                        | 6328     | AS41              |                             | 0,01204                        | 6328     |         |      |
| Mg5Al1Si          | Zn                          | 0                              | 0,01300  | 6833              | Mg5Al1Ti                    | Zn                             | 0        | 0,00913 | 4800 |
|                   |                             | 0,5                            | 0,01020  | 5361              |                             |                                | 0,5      | 0,00836 | 4394 |
|                   |                             | 1                              | 0,01009  | 5305              |                             |                                | 1        | 0,00805 | 4233 |
|                   |                             | 2                              | 0,00993  | 5221              |                             |                                | 2        | 0,00736 | 3868 |
|                   |                             | 4                              | 0,00943  | 4955              |                             |                                | 4        | 0,00672 | 3532 |
|                   | Mn                          | 0                              | 0,01300  | 6833              |                             | Mn                             | 0        | 0,00913 | 4800 |
|                   |                             | 0,5                            | 0,01175  | 6174              |                             |                                | 0,5      | 0,00911 | 4786 |
|                   |                             | 1                              | 0,01143  | 6006              |                             |                                | 1        | 0,00889 | 4674 |
|                   |                             | 2                              | 0,01141  | 5999              |                             |                                | 2        | 0,00857 | 4506 |
|                   |                             | 4                              | 0,01137  | 5978              |                             |                                | 4        | 0,00837 | 4401 |



Şekil 7.34. İncelenen alaşımların Potansiyodinamik Polarizasyon korozyon deneyi sonrası alaşım içeriğine bağlı a) mm/dakika, b) mm/yıl cinsinden ölçülen korozyon ilerleme hızı.

## 7.7. AŞINMA DENEY SONUÇLARI

İncelenen alaşımlarının pin-on-disk aşınma cihazında 5-40N arasında uygulanan yük altında 12 km kayma mesafesinde yapılan aşınma deney sonuçları, ağırlık kaybı verileri ve sürtünme katsayısı değeri olarak verilmiştir. Aşınma mekanizmasının belirlenmesi için aşınma deneyi sonrası numune yüzeylerinin stereo mikroskop ve SEM görüntüleri incelenmiştir.

### 7.7.1. Ağırlık Kaybı Sonuçları

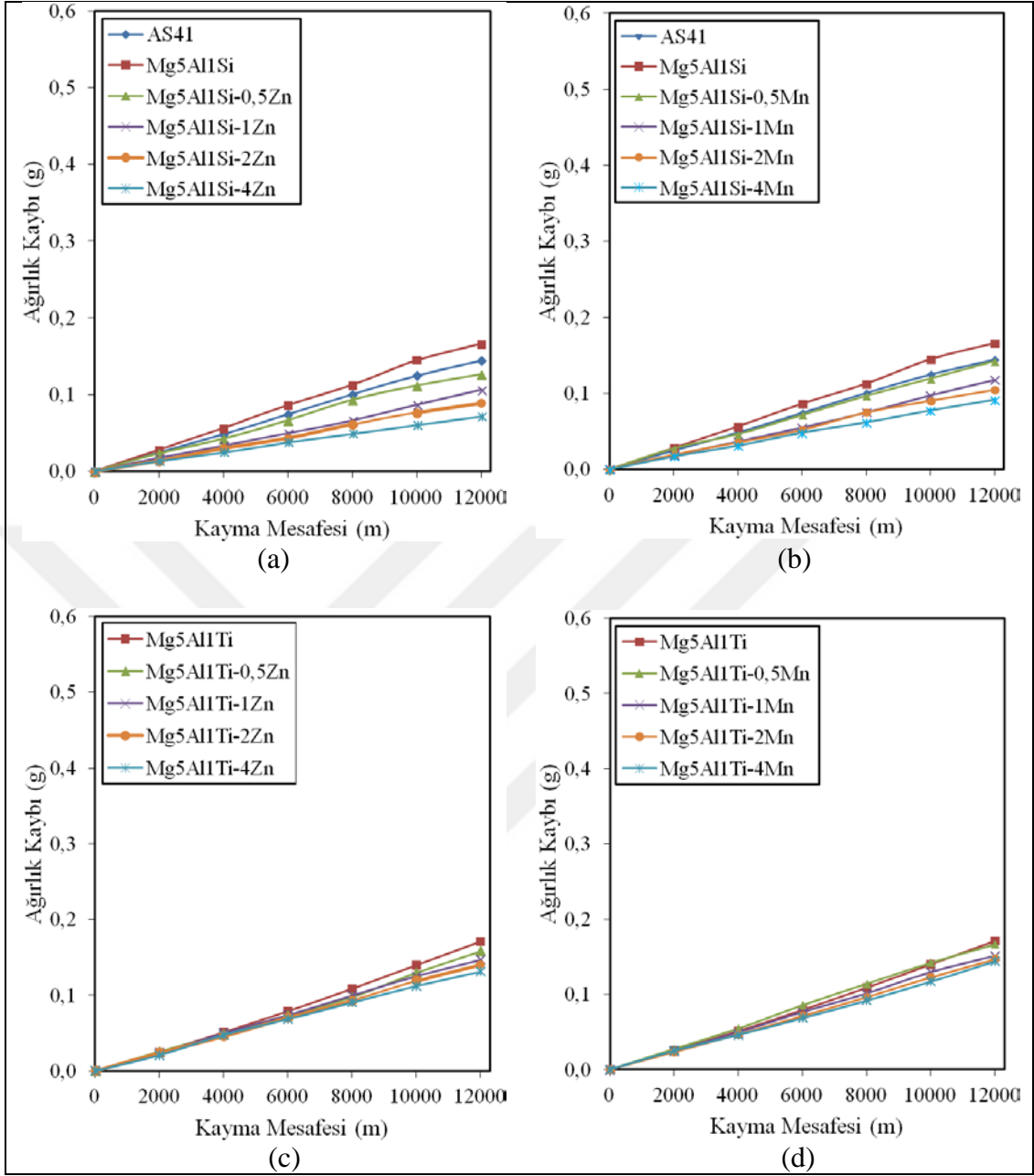
İncelenen alaşımların pin-on-disk aşınma deneyi sonrası ağırlık kayıpları izelge 7.11 ve izelge 7.12'de verilmiştir. Çizelge 7.11 ve izelge 7.12'den çizilen Ağırlık kaybı - Kayma mesafesi grafikleri Şekil 7.35-Şekil 7.38'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.11. AS41 master alaşımının, Mg5Al1Si-XZn ve Mg5Al1Si-XMn alaşımlarının, 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000-12000 metre mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerleri.

| Yük | Mesafe (metre) | AS41   | Mg5Al1Si | Mg5Al1Si -XZn |        |        |        | Mg5Al1Si -XMn |        |        |        |
|-----|----------------|--------|----------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|     |                |        |          | 0,5           | 1      | 2      | 4      | 0,5           | 1      | 2      | 4      |
| 5N  | 2000           | 0,0248 | 0,0282   | 0,0234        | 0,0175 | 0,0136 | 0,0130 | 0,0275        | 0,0193 | 0,0185 | 0,0168 |
|     | 4000           | 0,0483 | 0,0563   | 0,0424        | 0,0333 | 0,0299 | 0,0244 | 0,0461        | 0,0354 | 0,0366 | 0,0310 |
|     | 6000           | 0,0744 | 0,0862   | 0,0664        | 0,0495 | 0,0432 | 0,0374 | 0,0713        | 0,0521 | 0,0551 | 0,0480 |
|     | 8000           | 0,1006 | 0,1125   | 0,0932        | 0,0661 | 0,0614 | 0,0486 | 0,0964        | 0,0751 | 0,0749 | 0,0616 |
|     | 10000          | 0,1248 | 0,1445   | 0,1115        | 0,0867 | 0,0764 | 0,0601 | 0,1191        | 0,0905 | 0,0974 | 0,0773 |
|     | 12000          | 0,1445 | 0,1660   | 0,1263        | 0,1061 | 0,0888 | 0,0712 | 0,1419        | 0,1049 | 0,1177 | 0,0912 |
| 10N | 2000           | 0,0475 | 0,0526   | 0,0362        | 0,0361 | 0,0278 | 0,0265 | 0,0456        | 0,0362 | 0,0333 | 0,0316 |
|     | 4000           | 0,0921 | 0,1011   | 0,0735        | 0,0718 | 0,0573 | 0,0523 | 0,0883        | 0,0739 | 0,0669 | 0,0634 |
|     | 6000           | 0,1362 | 0,1535   | 0,1124        | 0,1093 | 0,0883 | 0,0789 | 0,1316        | 0,1105 | 0,0995 | 0,096  |
|     | 8000           | 0,1819 | 0,2044   | 0,1491        | 0,1451 | 0,1195 | 0,1022 | 0,1777        | 0,1477 | 0,133  | 0,1281 |
|     | 10000          | 0,2289 | 0,2504   | 0,1901        | 0,1812 | 0,148  | 0,1326 | 0,2151        | 0,1884 | 0,1636 | 0,1554 |
|     | 12000          | 0,2706 | 0,2873   | 0,2323        | 0,2134 | 0,1769 | 0,1605 | 0,2562        | 0,2251 | 0,1981 | 0,1887 |
| 20N | 2000           | 0,0646 | 0,0670   | 0,0536        | 0,0483 | 0,0441 | 0,0418 | 0,0611        | 0,0557 | 0,0490 | 0,0460 |
|     | 4000           | 0,1296 | 0,1319   | 0,1070        | 0,0962 | 0,0879 | 0,0840 | 0,1204        | 0,1090 | 0,0977 | 0,0911 |
|     | 6000           | 0,1970 | 0,1987   | 0,1629        | 0,1436 | 0,1335 | 0,1262 | 0,1811        | 0,1636 | 0,1473 | 0,1372 |
|     | 8000           | 0,2713 | 0,2730   | 0,2171        | 0,1915 | 0,1777 | 0,1682 | 0,2501        | 0,2264 | 0,1957 | 0,1826 |
|     | 10000          | 0,3363 | 0,3470   | 0,2715        | 0,2445 | 0,2239 | 0,2107 | 0,3021        | 0,2779 | 0,2512 | 0,2260 |
|     | 12000          | 0,3918 | 0,4052   | 0,3301        | 0,2902 | 0,2677 | 0,2528 | 0,3603        | 0,3283 | 0,2959 | 0,2761 |
| 40N | 2000           | 0,0793 | 0,0843   | 0,0706        | 0,0655 | 0,0562 | 0,0521 | 0,0735        | 0,0665 | 0,0628 | 0,0565 |
|     | 4000           | 0,1575 | 0,1651   | 0,1410        | 0,1301 | 0,1121 | 0,1043 | 0,1509        | 0,1356 | 0,1239 | 0,1120 |
|     | 6000           | 0,2371 | 0,2447   | 0,2116        | 0,1964 | 0,1674 | 0,1574 | 0,2361        | 0,2067 | 0,1882 | 0,1774 |
|     | 8000           | 0,3158 | 0,3255   | 0,2830        | 0,2609 | 0,2335 | 0,2103 | 0,3095        | 0,2746 | 0,2521 | 0,2383 |
|     | 10000          | 0,3947 | 0,4045   | 0,3540        | 0,3262 | 0,2860 | 0,2620 | 0,3799        | 0,3451 | 0,3187 | 0,2954 |
|     | 12000          | 0,4724 | 0,4915   | 0,4231        | 0,3852 | 0,3393 | 0,3121 | 0,4424        | 0,4173 | 0,3780 | 0,3441 |

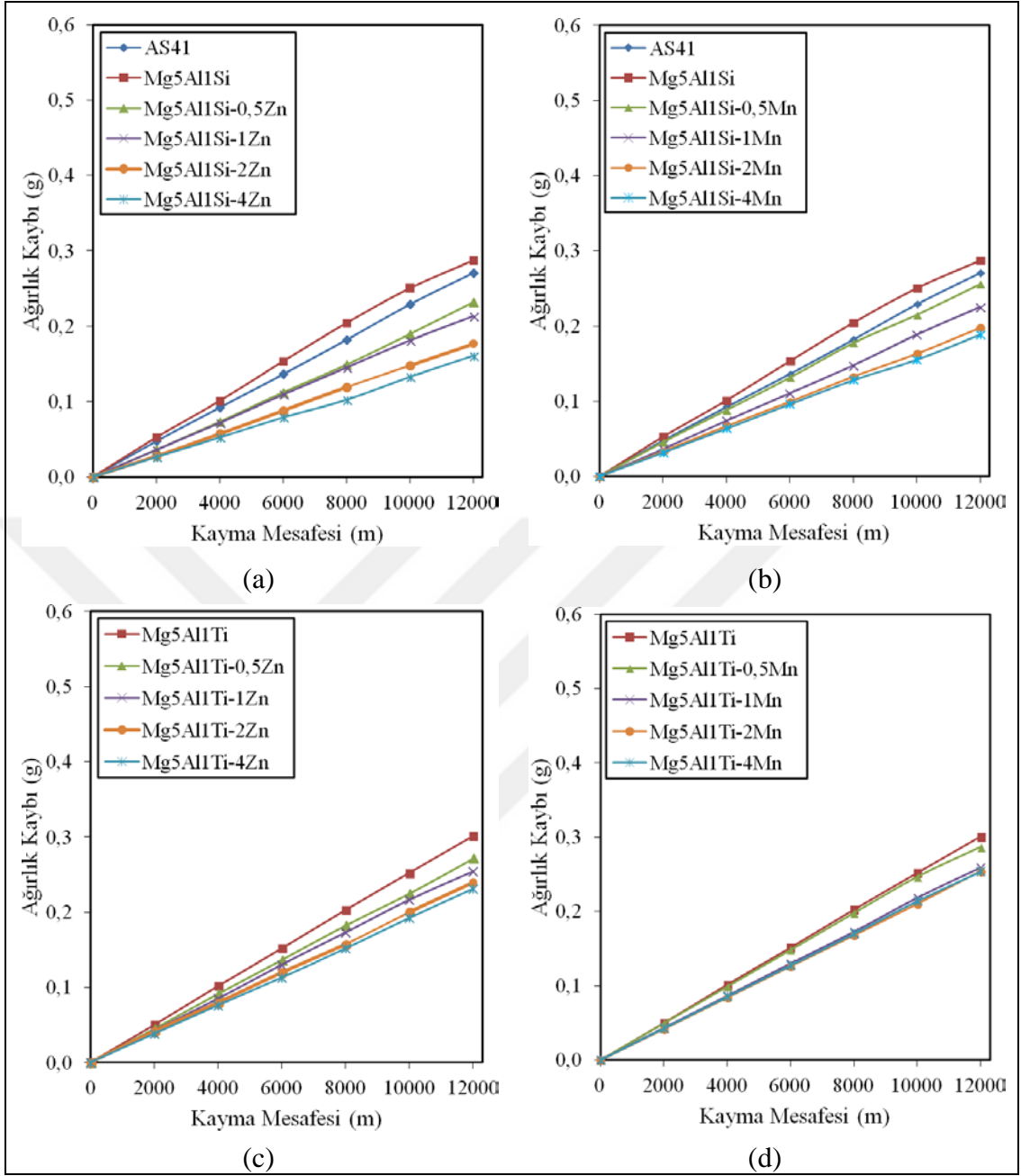
Çizelge 7.12. AS41 master alaşımının, Mg5Al1Ti-XZn ve Mg5Al1Ti-XMn alaşımlarının, 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000-12000 metre mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerleri.

| Yük | Mesafe (metre) | AS41   | Mg5Al1Ti | Mg5Al1Ti -XZn |        |        |        | Mg5Al1Ti -XMn |        |        |        |
|-----|----------------|--------|----------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|
|     |                |        |          | 0,5           | 1      | 2      | 4      | 0,5           | 1      | 2      | 4      |
| 5N  | 2000           | 0,0248 | 0,0249   | 0,0259        | 0,0240 | 0,0239 | 0,0210 | 0,0270        | 0,0247 | 0,0243 | 0,0230 |
|     | 4000           | 0,0483 | 0,0510   | 0,0486        | 0,0460 | 0,0499 | 0,0477 | 0,0544        | 0,0458 | 0,0494 | 0,0464 |
|     | 6000           | 0,0744 | 0,0792   | 0,0736        | 0,0704 | 0,0739 | 0,0685 | 0,0853        | 0,0683 | 0,0764 | 0,0710 |
|     | 8000           | 0,1006 | 0,1086   | 0,0975        | 0,0928 | 0,0997 | 0,0905 | 0,1137        | 0,0915 | 0,1010 | 0,0958 |
|     | 10000          | 0,1248 | 0,1400   | 0,1298        | 0,1187 | 0,1252 | 0,1122 | 0,1418        | 0,1168 | 0,1296 | 0,1222 |
|     | 12000          | 0,1445 | 0,1709   | 0,1581        | 0,1406 | 0,1469 | 0,1312 | 0,1660        | 0,1439 | 0,1512 | 0,1464 |
| 10N | 2000           | 0,0475 | 0,0499   | 0,0447        | 0,0427 | 0,0414 | 0,0382 | 0,0494        | 0,0434 | 0,0425 | 0,0416 |
|     | 4000           | 0,0921 | 0,1015   | 0,0913        | 0,0850 | 0,0796 | 0,0762 | 0,0987        | 0,0865 | 0,0852 | 0,0840 |
|     | 6000           | 0,1362 | 0,1513   | 0,1364        | 0,1300 | 0,1197 | 0,1131 | 0,1479        | 0,1300 | 0,1274 | 0,1260 |
|     | 8000           | 0,1819 | 0,2024   | 0,1821        | 0,1727 | 0,1571 | 0,1515 | 0,1977        | 0,1726 | 0,1699 | 0,1677 |
|     | 10000          | 0,2289 | 0,2518   | 0,2247        | 0,2162 | 0,1997 | 0,1922 | 0,2464        | 0,2184 | 0,2140 | 0,2101 |
|     | 12000          | 0,2706 | 0,3008   | 0,2712        | 0,2540 | 0,2392 | 0,2311 | 0,2865        | 0,2590 | 0,2537 | 0,2541 |
| 20N | 2000           | 0,0646 | 0,0698   | 0,0639        | 0,0607 | 0,0569 | 0,0544 | 0,0654        | 0,0628 | 0,0609 | 0,0607 |
|     | 4000           | 0,1296 | 0,1392   | 0,1287        | 0,1211 | 0,1119 | 0,1116 | 0,1322        | 0,1306 | 0,1216 | 0,1210 |
|     | 6000           | 0,1970 | 0,2080   | 0,1934        | 0,1825 | 0,1709 | 0,1615 | 0,2006        | 0,1904 | 0,1845 | 0,1803 |
|     | 8000           | 0,2713 | 0,2783   | 0,2576        | 0,2414 | 0,2286 | 0,2201 | 0,2733        | 0,2559 | 0,2420 | 0,2398 |
|     | 10000          | 0,3363 | 0,3483   | 0,3232        | 0,3021 | 0,2868 | 0,2794 | 0,3387        | 0,3223 | 0,3016 | 0,2992 |
|     | 12000          | 0,3918 | 0,4174   | 0,3870        | 0,3629 | 0,3462 | 0,3391 | 0,3969        | 0,3782 | 0,3653 | 0,3614 |
| 40N | 2000           | 0,0793 | 0,0859   | 0,0801        | 0,0777 | 0,0742 | 0,0712 | 0,0845        | 0,0822 | 0,0803 | 0,0740 |
|     | 4000           | 0,1575 | 0,1730   | 0,1609        | 0,1427 | 0,1404 | 0,1390 | 0,1792        | 0,1646 | 0,1619 | 0,1486 |
|     | 6000           | 0,2371 | 0,2650   | 0,2416        | 0,2239 | 0,2090 | 0,2075 | 0,2576        | 0,2530 | 0,2468 | 0,2249 |
|     | 8000           | 0,3158 | 0,3559   | 0,3258        | 0,3013 | 0,2914 | 0,2830 | 0,3328        | 0,3295 | 0,3213 | 0,2999 |
|     | 10000          | 0,3947 | 0,4408   | 0,4075        | 0,3800 | 0,3643 | 0,3553 | 0,4124        | 0,4073 | 0,3951 | 0,3742 |
|     | 12000          | 0,4724 | 0,5193   | 0,4791        | 0,4622 | 0,4454 | 0,4257 | 0,4935        | 0,4861 | 0,4690 | 0,4371 |

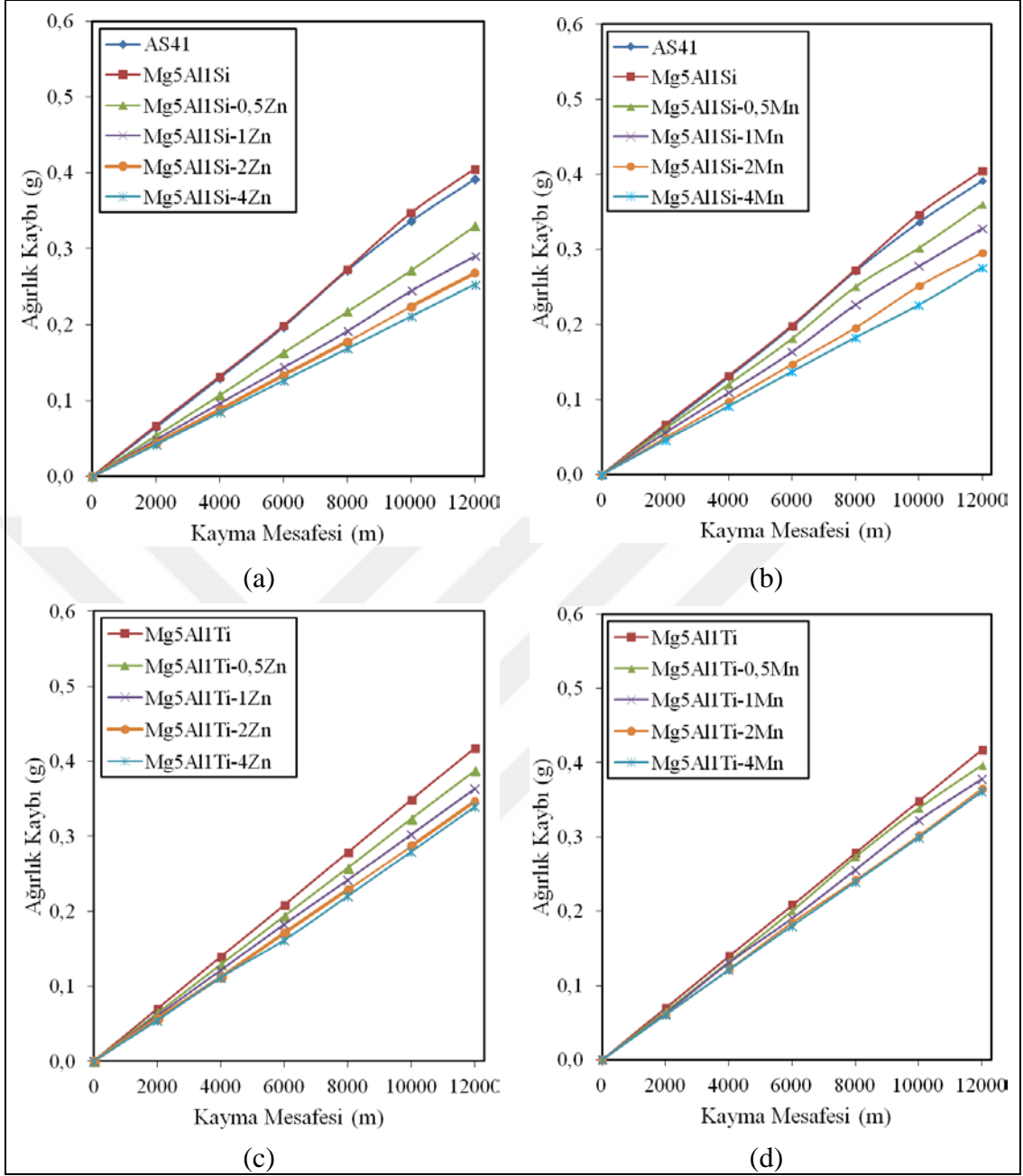


Şekil 7.35. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn , b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımlarının 5N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri.



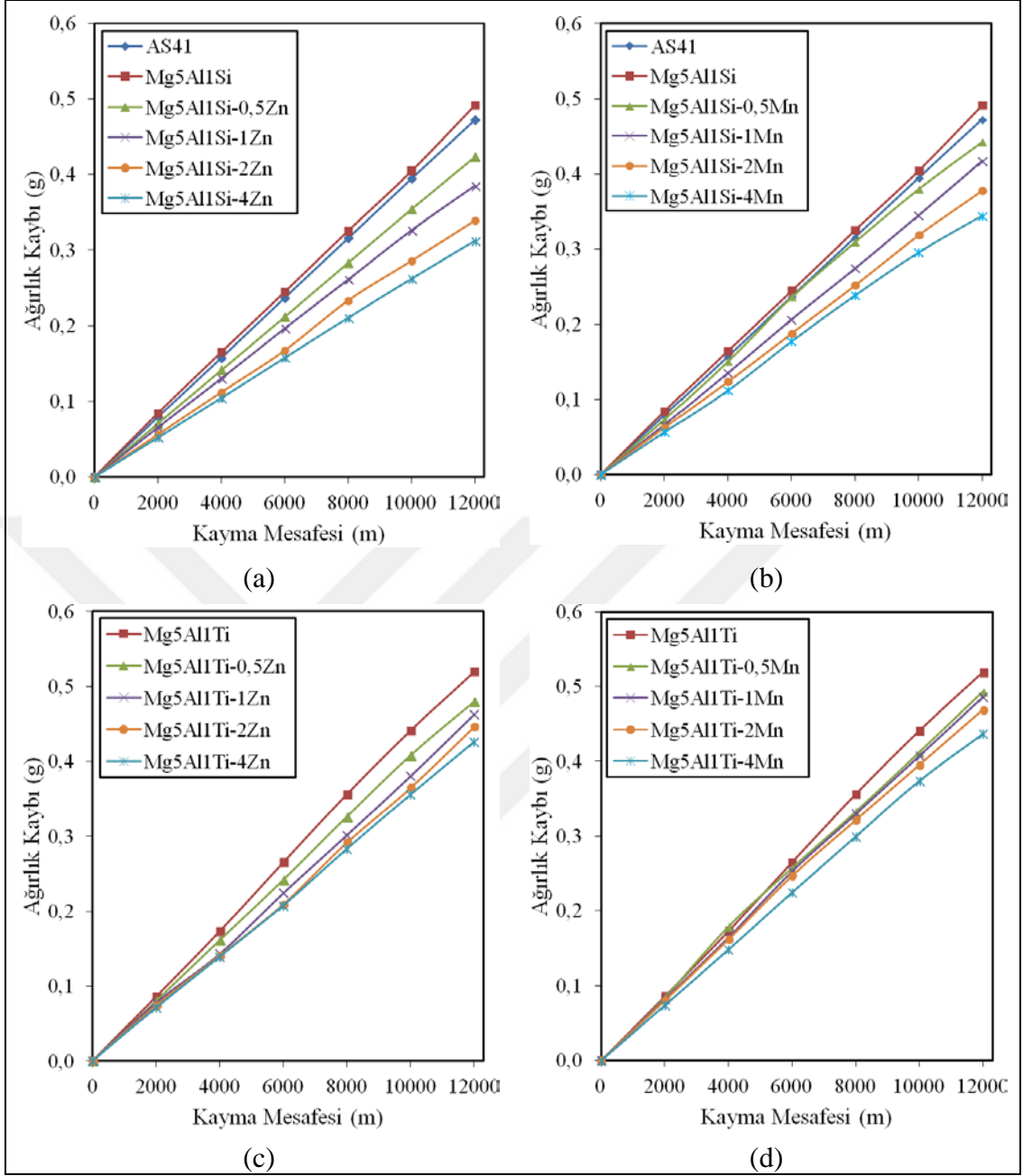


Şekil 7.36. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn, b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımlarının 10N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri.



Şekil 7.37. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn, b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımlarının 20N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri.

Ağırlık kaybı kayma mesafesi grafikleri, sabit kayma hızında kümülatif ağırlık kaybı kayma mesafesi ile lineer olarak değişmiştir. Master alaşımlara ilave edilen alaşım elementlerinin aşınma davranışına etkisi uygulanan yüke bağlı olarak değişim göstermiştir.



Şekil 7.38. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn, b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımlarının 40N yük altındaki kayma mesafesine bağlı ağırlık kaybı değerleri.

Belirli bir kayma mesafesi için tüm yüklerde alaşım elementi içeriğinin artması ile ağırlık kaybı azalmıştır. Belirli bir yük ve mesafe için master alaşımlarından en yüksek mekanik özelliğe (sertlik, max çekme) sahip olan AS41 alaşımı diğer master alaşımlara nazaran daha az ağırlık kaybı sergilediği, Mg5Al1Si master alaşımının ise Mg5Al1Ti master alaşımdan daha fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir.

40 N'luk yük için 12000 metre kayma mesafesinde Mg5Al1Si master alaşıma %4 Zn ilavesi ile üretilen alaşımda 0,3121gr ağırlık kaybı oluşurken, %4 Mn ilavesi ile üretilen alaşımda 0,3441gr ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ilavesi ile üretilen alaşımda 0,4257gr ağırlık kaybı, %4 Mn ilavesi ile üretilen alaşımda ise 0,4371gr ağırlık kaybı görülmektedir.

### 7.7.2. Aşınma Deneyi Sürtünme Katsayısı Sonuçları

İncelenen alaşımlarının pin-on-disk aşınma cihazında 5N–40N yük altında 12 km kayma mesafesinde yapılan aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14'de verilmiştir.

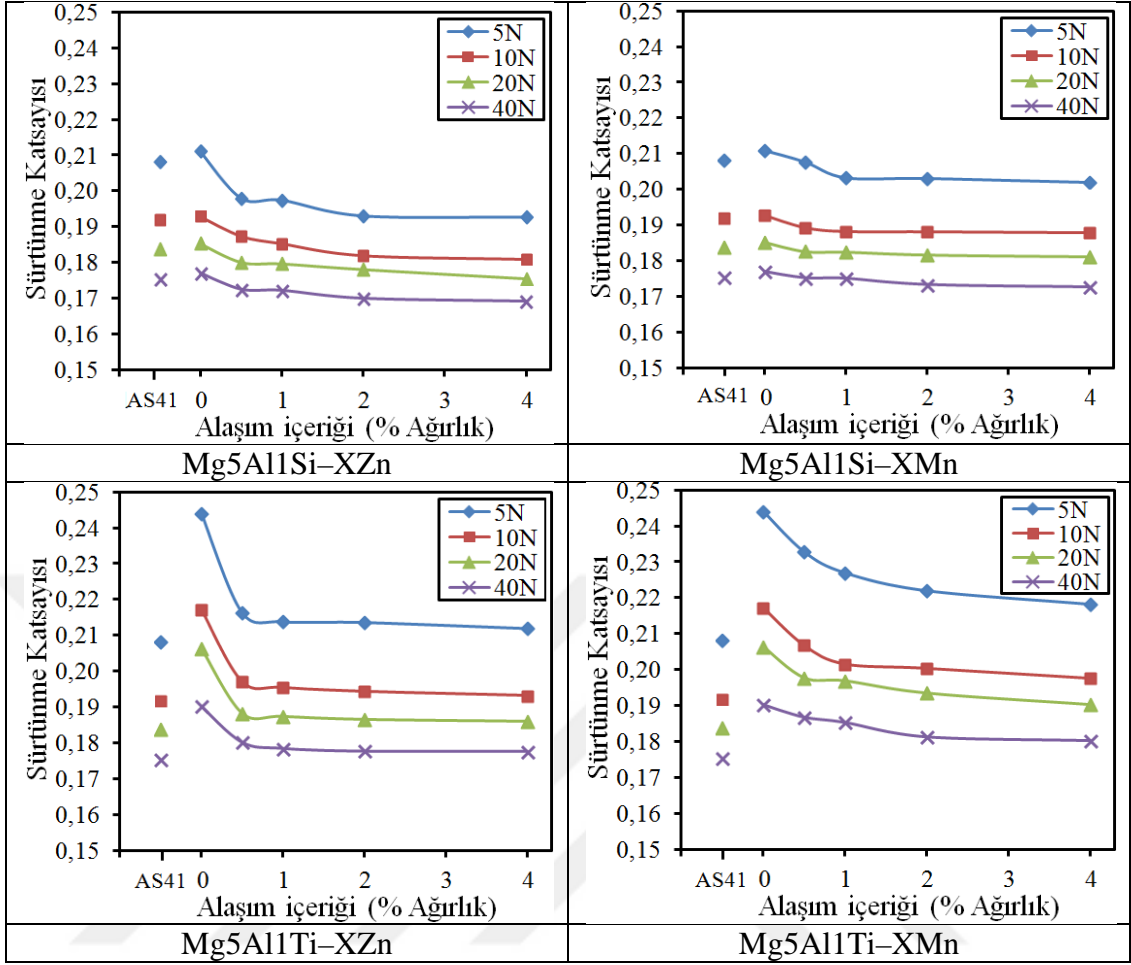
Çizelge 7.13. Mg5Al1Si master alaşımına Zn ve Mn elementi ilavesinin pin-on disk aşınma deneyinde 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000–12000 metre mesafedeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri.

| Yük | AS41  | Mg5Al1Si | Mg5Al1Si–XZn |       |       |       | Mg5Al1Si–XMn |       |       |       |
|-----|-------|----------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|     |       |          | 0,5          | 1     | 2     | 4     | 0,5          | 1     | 2     | 4     |
| 5N  | 0,208 | 0,211    | 0,198        | 0,197 | 0,193 | 0,193 | 0,208        | 0,203 | 0,203 | 0,202 |
| 10N | 0,192 | 0,193    | 0,187        | 0,185 | 0,182 | 0,181 | 0,189        | 0,188 | 0,188 | 0,188 |
| 20N | 0,184 | 0,185    | 0,180        | 0,180 | 0,178 | 0,175 | 0,182        | 0,182 | 0,182 | 0,181 |
| 40N | 0,175 | 0,177    | 0,172        | 0,172 | 0,170 | 0,169 | 0,175        | 0,175 | 0,173 | 0,173 |

Çizelge 7.14. Mg5Al1Ti master alaşımına Zn ve Mn elementi ilavesinin pin-on disk aşınma deneyinde 5N, 10N, 20N ve 40N yük altında 2000–12000 metre mesafedeki ortalama sürtünme katsayısı değerleri.

| Yük | AS41  | Mg5Al1Ti | Mg5Al1Ti -XZn |       |       |       | Mg5Al1Ti -XMn |       |       |       |
|-----|-------|----------|---------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
|     |       |          | 0,5           | 1     | 2     | 4     | 0,5           | 1     | 2     | 4     |
| 5N  | 0,208 | 0,244    | 0,216         | 0,214 | 0,214 | 0,212 | 0,233         | 0,227 | 0,222 | 0,218 |
| 10N | 0,192 | 0,217    | 0,197         | 0,195 | 0,194 | 0,193 | 0,207         | 0,201 | 0,200 | 0,197 |
| 20N | 0,184 | 0,206    | 0,188         | 0,187 | 0,186 | 0,186 | 0,198         | 0,197 | 0,193 | 0,190 |
| 40N | 0,175 | 0,190    | 0,180         | 0,178 | 0,178 | 0,178 | 0,187         | 0,185 | 0,181 | 0,180 |

Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14'deki değerler kullanılarak çizilen alaşım içeriğine bağlı sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 7.39'da verilmiştir.

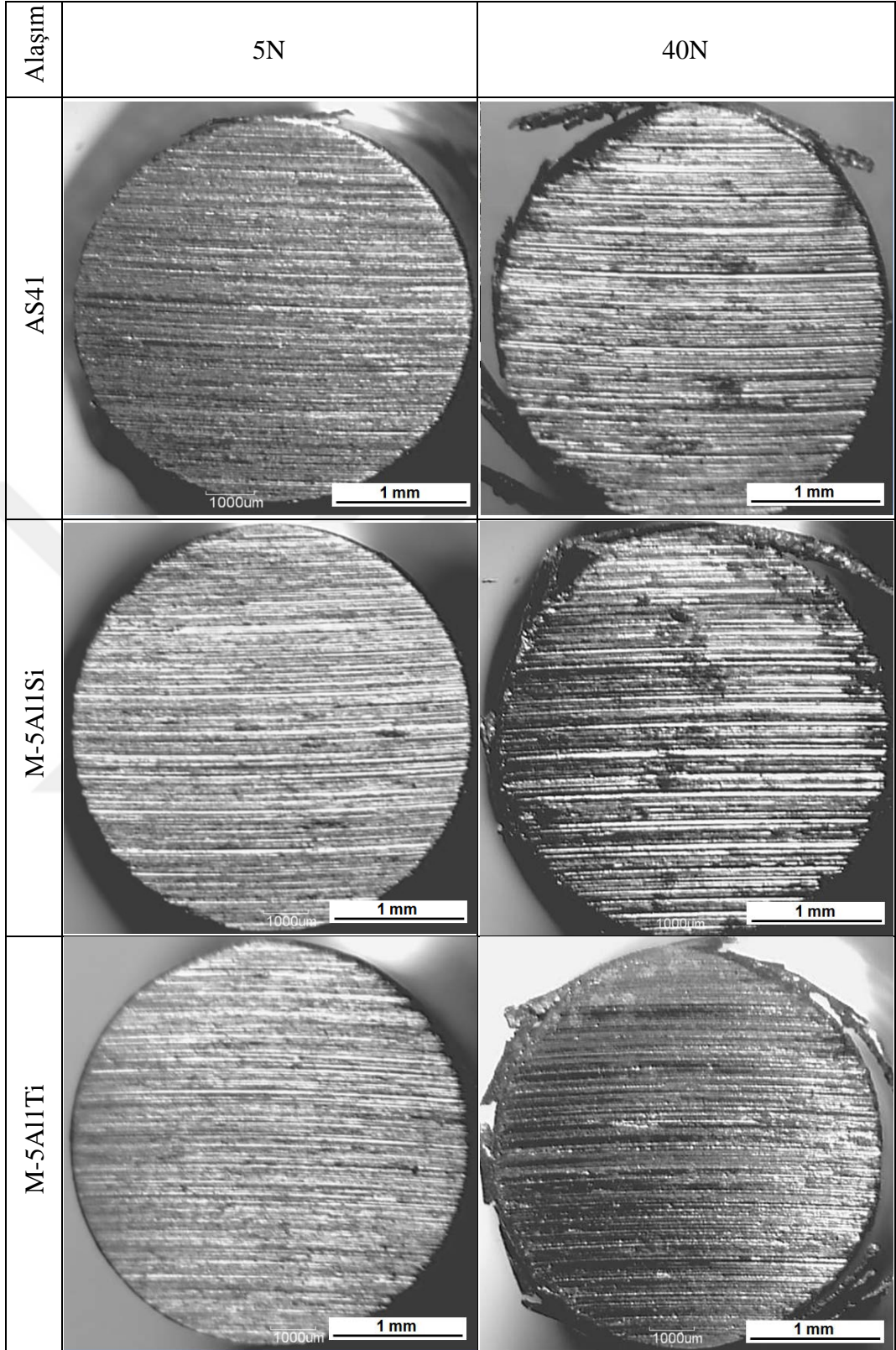


Şekil 7.39. Alaşım içeriğine bağlı sürtünme katsayısı değerleri.

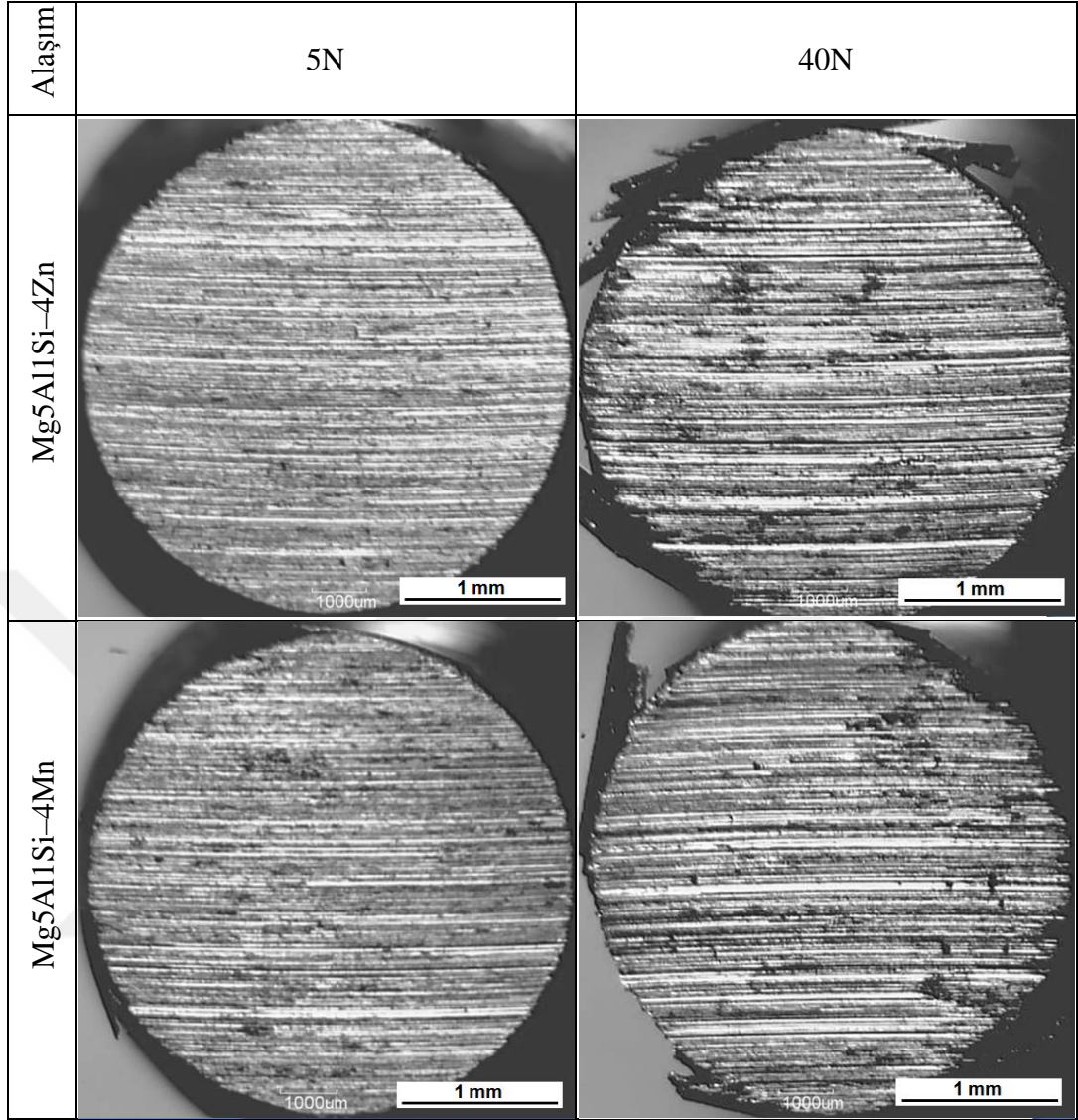
Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14'e baktığımızda tüm alaşımlarda uygulanan yük miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır. Master alaşımlara Zn ve Mn ilave miktarı arttıkça sürtünme katsayı değeri azalmaktadır. Ağırlık kayıpları ile orantılı olarak Mg5Al1Ti master alaşımı 5N yük altında 0,244 ve 40N yük altında 0,190 değeri ile en yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Mg5Al1Si-4Zn alaşımında ise 5N yük altında 0,193 ve 40N yük altında 0,169 değeri ile en düşük sürtünme katsayısı ölçülmüştür.

### 7.7.3. Aşınma Deneyi Sonrası Yüzey Görünümü

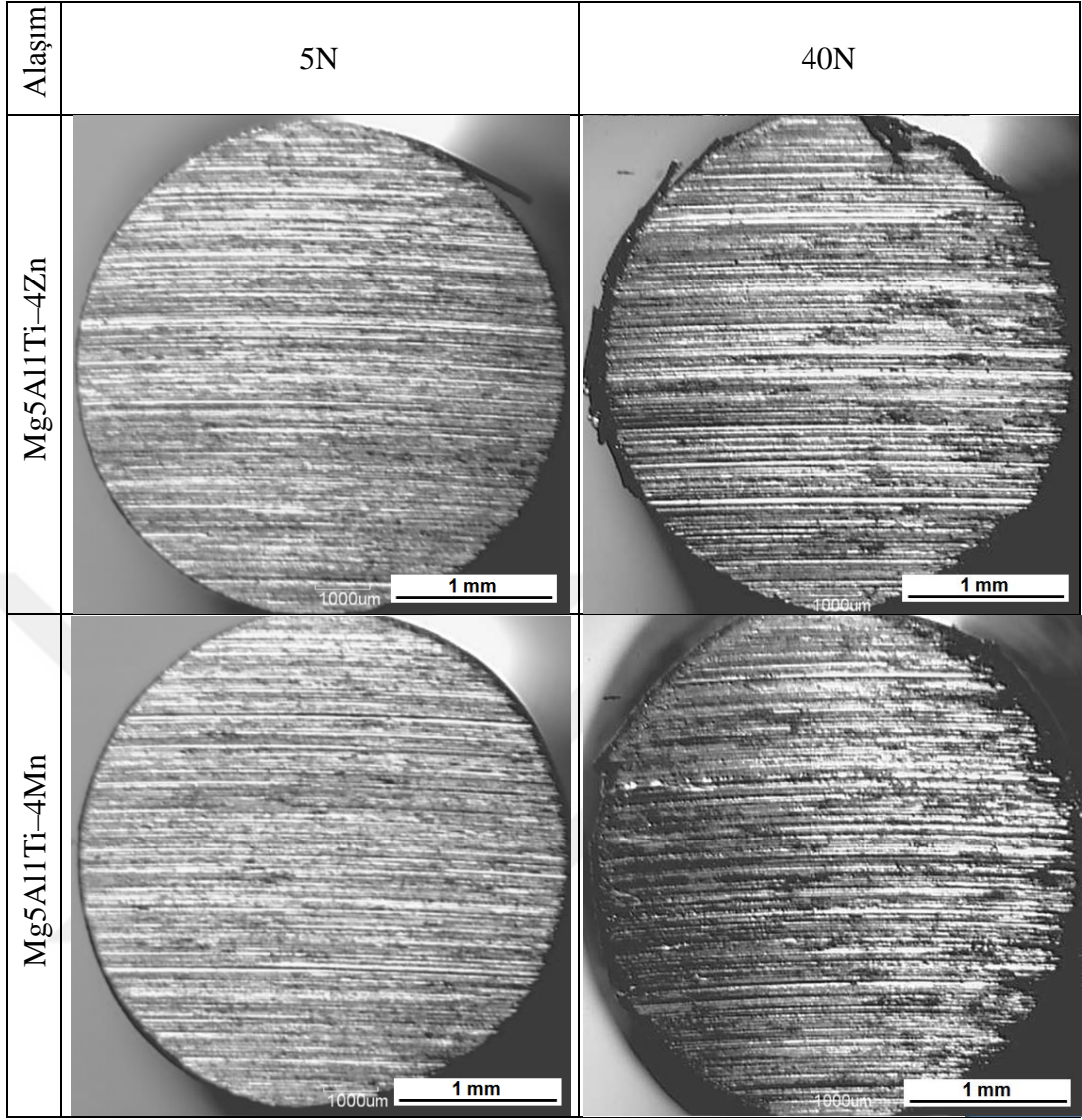
Bu çalışmada pin-on disk aşınma deneyinde 5N ve 40N yük altında 12000 metre kayma mesafesi neticesinde incelenen numunelerin stereo mikroskop makro görüntüleri Şekil 7.40–Şekil 7.42 arasında ve yüksek büyütmede SEM görüntüleri Şekil 7.43–Şekil 7.45 arasında verilmiştir.



Şekil 7.40. İncelenen AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının 5N ve 40N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.



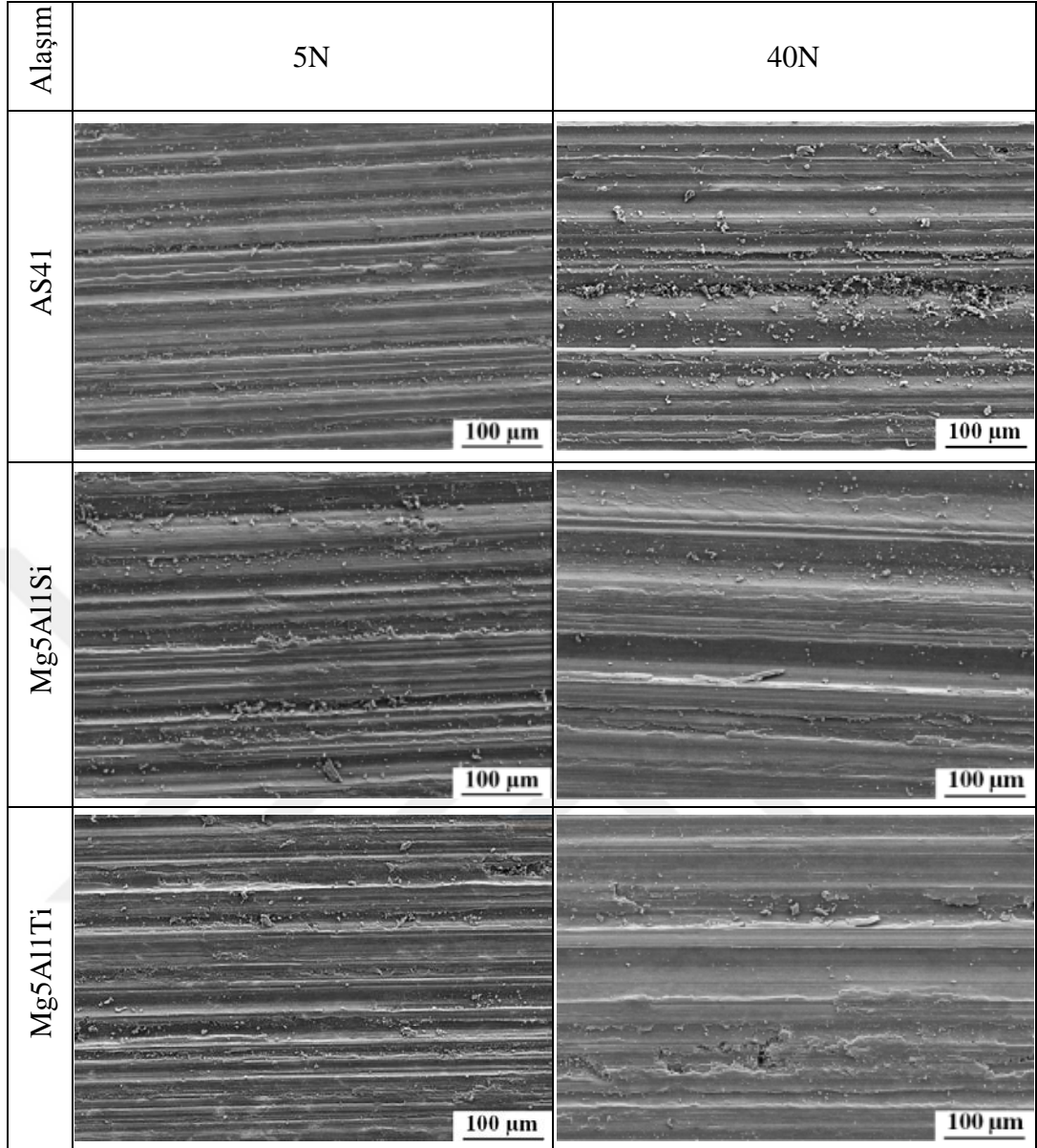
Şekil 7.41. İncelenen Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ve/veya Mn elementi ilavesinin 5 N ve 40 N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.



Şekil 7.42. İncelenen Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ve/veya Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında 12000 metre kayma mesafesindeki aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri.

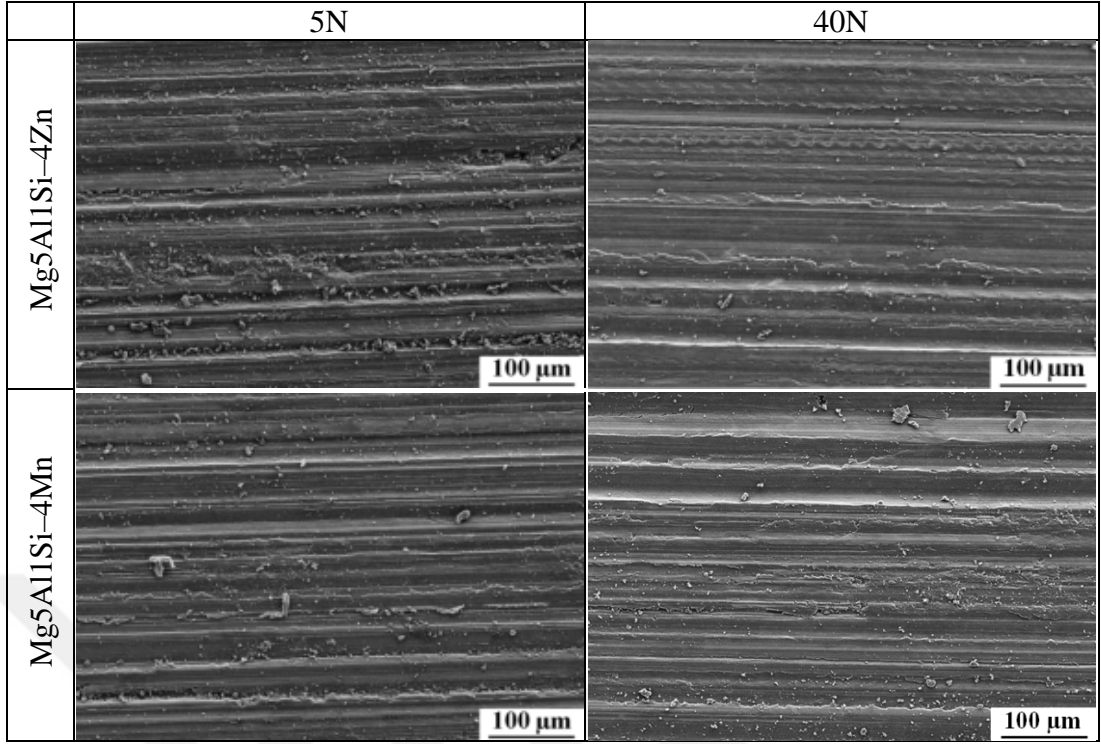
Şekil 7.41-Şekil 7.43'deki stereo mikroskop aşınma izi görüntülerinde düşük yükte (5N) ince yiv oluşumu, yüksek yükte (40N) ise iri yiv oluşumu ve buna ek olarak aşınma ürünlerinin koptuktan sonra malzemeyi terk etmediği, parçaya sıvanarak apak oluşumu meydana geldiği anlaşılmaktadır.



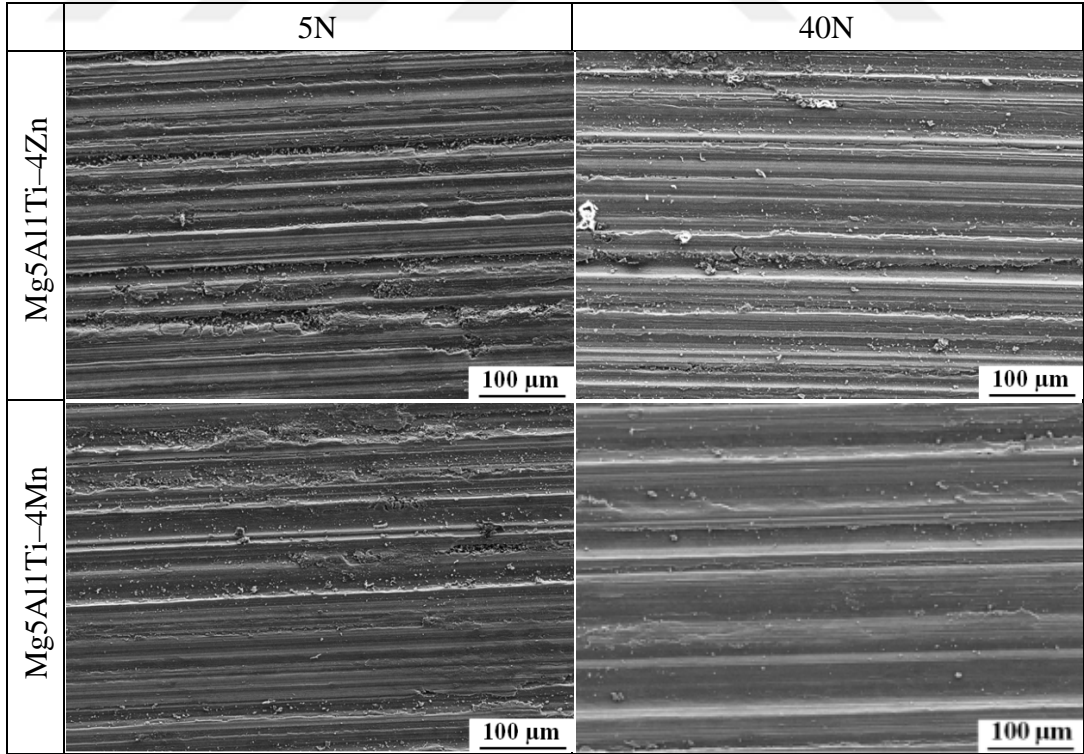


Şekil 7.43. İncelenen AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarının 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Aşınma deneyi sonrası aşındırılan yüzeylerin SEM fotoğrafları (Şekil 7.43–Şekil 7.45) alaşımların aşınma karakteriŐtięi hakkında bilgi vermektedir. Düşük yüklerde ince yiv oluşumu meydana gelirken yüksek yüklerde ise iri yiv oluşumu görülmektedir. Aşınma ağırlık kaybının en fazla olduğu Mg5Al1Ti master alaşımında diğer master alaşımlarına rağmen oluşan yivin daha geniş ve derin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.44. İncelenen Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ve Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntülerine etkisi.



Şekil 7.45. İncelenen Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn ve Mn elementi ilavesinin 5N ve 40N yük altında aşınma yüzeyi SEM görüntülerine etkisi.

## BÖLÜM 8

### DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

#### 8.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER

AS41, Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımları, bu master alaşımlara %0,5–%4 oranında Zn ve Mn elementi ilave edilip oda sıcaklığında soğuma işlemi uygulanarak üretilmiş alaşımların mikroyapıları Şekil 7.2–Şekil 7.4'de verilmiştir.

AS41 ve Mg5Al1Si master alaşımlarının tane sınırlarında, mikroyapıda gri renkli  $Mg_{17}Al_{12}$  ve  $\alpha$ -Mg- $Mg_{17}Al_{12}$  ötektik faz ağı görülmektedir. Taneler daha çok bu ötektik faz tarafından çevrilmiştir (Ma, 2011; Jiang, 2012). Şekil 7.9'daki SEM fotoğraflarında da görüldüğü gibi Mg5Al1Si master alaşımındaki %1 Si ilavesi ile yapıda fark edilir iğnesel ve çin yazısı şekilli (Chinese script) fazlar ile çokgen şekilli koyu renkli partiküller de oluşmaktadır. Çalışmada elde edilen bu bulgular literatürde Mg alaşımlarına Si ilave edilen diğer çalışmaların bulgularıyla örtüşmektedir (Aizawa, 2006; Ben Hamu, 2008; Chen, 2009). Mg5Al1Si master alaşımlarının mikroyapısına benzer olarak Mg5Al1Ti master alaşımının mikroyapısında da  $\alpha$ -Mg matris ve tane sınırı boyunca uzanan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliği görülmektedir. Literatürle uyumlu olarak (Candan 2009; Ai, 2012; Choi, 2014) Mg5Al1Ti master alaşımının XRD sonuçlarına (Şekil 7.8) bakıldığında ilave edilen Ti elementinin herhangi bir faz oluşturmadığı gözlenmiştir.

XRD analizlerine göre (Şekil 7.8) Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 Zn elementi ilavesi ile tane sınırlarında  $Mg_{17}Al_{12}$  ve MgZn fazlarının oluştuğu açıkça görülmektedir. Şekil 7.9'daki SEM fotoğraflarından anlaşılacağı gibi MgZn intermetaliği tane sınırlarındaki  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının içinde daha parlak görümlü şekilde oluşmaktadır (Cai, 2012; Nama, 2014). Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına %4 Mn ilavesinde ise  $Mg_{17}Al_{12}$  fazlarının yanı sıra  $Al_6Mn$  fazı ortaya

çıkmiştir.  $Al_6Mn$  fazı SEM fotoğraflarında (Şekil 7.10) parlak ve küçük iğnemsî şekilde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada XRD analizi sonuçlarıyla (Şekil 7.8) varlıkları kanıtlanan faz ve intermetaliklerin kimyasal bileşimi ve morfolojik yapıları literatür ile benzerlik taşımaktadır (Mingbo, 2009; Durmaz, 2009; Ghorbania, 2012).

SEM incelemelerindeki bir diğer ayrıntı ise  $Mg_5Al_1Si$  master alaşımında tane sınırlarında oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı bütün halde iken  $Mg_5Al_1Ti$  master alaşımındaki parçalı haldedir.  $Mg_5Al_1Ti$  master alaşımında parçalı haldeki  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı %4 Zn ve/veya Mn ilavesi ile daha da küçük parçalara ayrılmaktadır (Candan, 2011).

İncelenen alaşımların mekanik özellikleri hakkında yorum yapabilmek için mikroyapı sonuçları ve mekanik özellik sonuçlarının beraber incelenmesi gerekmektedir.

Çizelge 7.5 ve Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'deki sonuçlara bakıldığında Si ilavesi ile oluşan  $Mg_2Si$  fazı mukavemet değerlerini artırmaktadır.  $Mg_5Al_1Ti$  master alaşımı ise diğer master alaşımlara nazaran daha düşük mekanik özellikler sergilemiştir. Bunun sebebi olarak  $Mg_5Al_1Ti$  alaşımında Ti elementinin sadece katı ergiyik sertleşmesi ile mukavemet artışı sağlaması belirli bir ikincil intermetalik faz oluşumu ile mukavemetlenme sergilememesi olarak düşünülebilir. Ti elementinin Mg alaşımlarına %0,6 ilavesine kadar mekanik özelliklerde iyileşme göstermediği literatürde de rapor edilmiştir (Wang, 2008; Ben Hamu, 2008; Liping 2008; Guo 2008; Asla 2009; Ai 2012; Candan, 2011).

Çizelge 7.2'deki tane boyutu ölçüm değerleri incelendiğinde alaşıma ilave edilen Zn ve/veya Mn elementi ilavesi ile master alaşımlara nazaran tane boyutunun incelendiği görülmektedir. Çizelge 7.2'deki tane boyutu değerleri ve Çizelge 7.5'deki mekanik özellikler beraber incelendiğinde, küçülen tane boyutu sebebiyle süneklikle birlikte mukavemet değerlerinin arttığı görülmektedir (Lee, 2007; Maleki, 2011; Ghorbani, 2012).

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'e bakıldığında çekme deneyi sonuçları ile sertlik değerleri arasında paralel bir ilişki bulunmaktadır.  $Mg_5Al_1Si$  master alaşımına Zn elementi

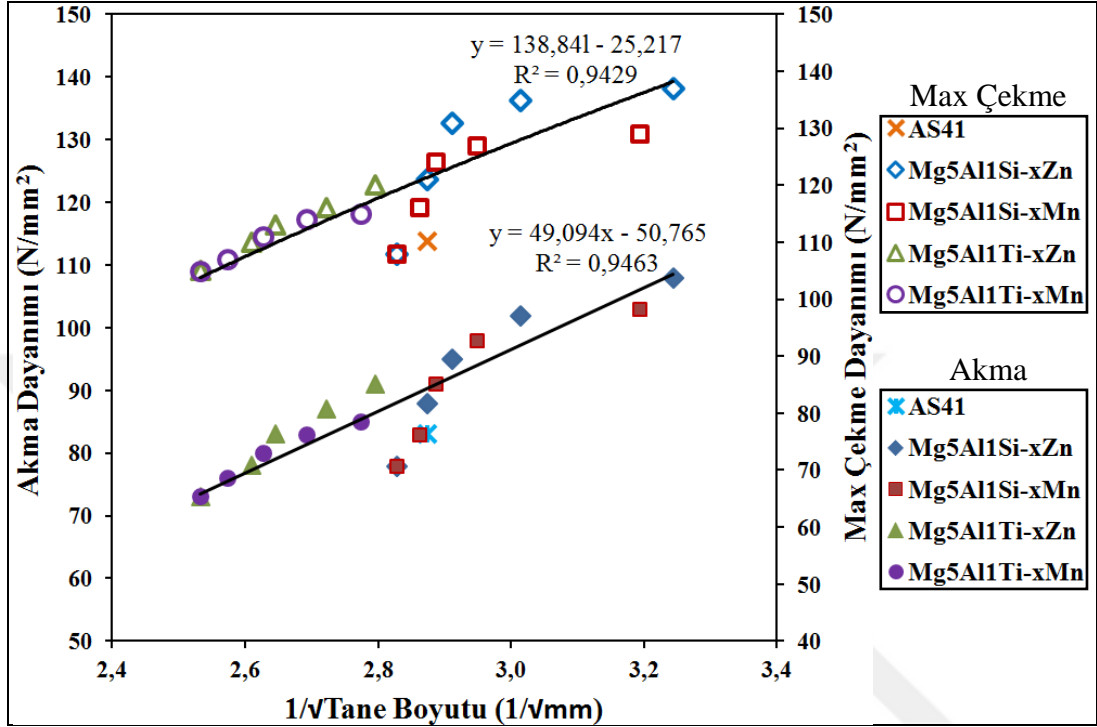
ilavesi ile SEM görüntüleri (Şekil 7.9) ve XRD analiz sonuçlarında (Şekil 7.8) tespit edilen  $Mg_2Si$  ve  $MgZn$  fazları ile mekanik özelliklerin arttığı deney sonuçlarında görülmüştür, bu fazların mekanik özellikleri olumlu yönde etkiledikleri literatürde rapor edilmektedir (Ahlatcı, 2008; Yu, 2010; Cai, 2012; Choi, 2014). Mg alaşımlarına ilave edilen Si elementinin mekanik özelliklerinin incelendiği diğer bir çalışmada çekme dayanımındaki artış yapıda oluşan  $Mg_2Si$  intermetalik fazına bağlanmaktadır. (Koç, 2013).

Mg–Zn–Si alaşımının mekanik özellikleri hakkında yapılan literatür çalışmasında (Guangyin, 2003) alaşıma %4 - %8 Zn ilave edilmiştir. %4 Zn ilavesinden sonra uzama miktarında düşüş meydana gelmiştir. Şekil 7.13'deki % uzama değerlerinde %4'e kadar Zn ilavesinde uzama miktarında bir miktar artış gözlenmiş olsa bile Guangyin arkadaşlarının yaptığı çalışma göz önüne alındığında %4 ilave miktarından sonra uzama miktarının azalacağı öngörülmektedir (Guangyin, 2003). Benzer çalışmalarda da Zn ilavesi ile çekme dayanımının artışından bahsedilmektedir (Yu, 2010; Cai, 2012; Choi, 2014).

Bu çalışmada incelenen master alaşımlara Mn elementi ilavesi ile mekanik özelliklerde iyileşme görülmektedir (Şekil 7.13). Mn elementi ilavesi ile mekanik özelliklerde meydana gelen bu iyileşmenin, mikroyapı sonuçlarına göre Mn ilavesi ile tane boyutunun incelmeye (Şekil 7.7) ve yapıda oluşan  $Al_6Mn$  fazına (Şekil 7.8) dayandırılmaktadır. Literatürde Mg alaşımlarına Mn elementi ilavesi ile tane boyutunun incelendiği ve mekanik özelliklerin arttığı bildirilmiştir (Zhang, 2000, Wang vd., 2012).

Şekil 7.11'deki incelenen alaşımların yoğunluk değerlerine bakıldığında master alaşımların ( $AS41$ ,  $Mg5Al1Si$  ve  $Mg5Al1Ti$ ) yoğunluklarının birbirine yakın oldukları görülmektedir. Master alaşımlarına Mn ilavesi ile yoğunlukta bir miktar azalma olurken, Zn ilavesi ile de artma meydana gelmiştir. Alaşımlarda en yüksek yoğunluğa  $Mg5Al1Si-4Zn$  alaşımı sahip iken  $Mg5Al1Ti-4Mn$  alaşımı en düşük değerini sergilemiştir.

Bu çalışmada incelenen alaşımların mekanik özelliklerinin deneysel sonuçlardan elde edilen tane boyutuna, yoğunluğa ve sertlik değerlerine göre değişimi sırasıyla Şekil 8.1–Şekil 8.4'de sunulmuştur.



Şekil 8.1. İncelenen alaşımlardaki  $1/\sqrt{Tane}$  boyutu( $1/\sqrt{mm}$ )'na bağlı Akma ve Çekme dayanımının değişim grafiği.

İncelenen alaşımların akma ve max çekme dayanımlarının  $1/\sqrt{Tane}$  boyutuna göre değişim grafiği Şekil 8.1'de verilmiştir. Burada akma dayanımı ile tane boyutu arasındaki ilişki Hall Petch denklemi ile açıklanmaktadır (Carlton ve Ferreira, 2007).

$$\sigma_A = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2} \quad (8.1)$$

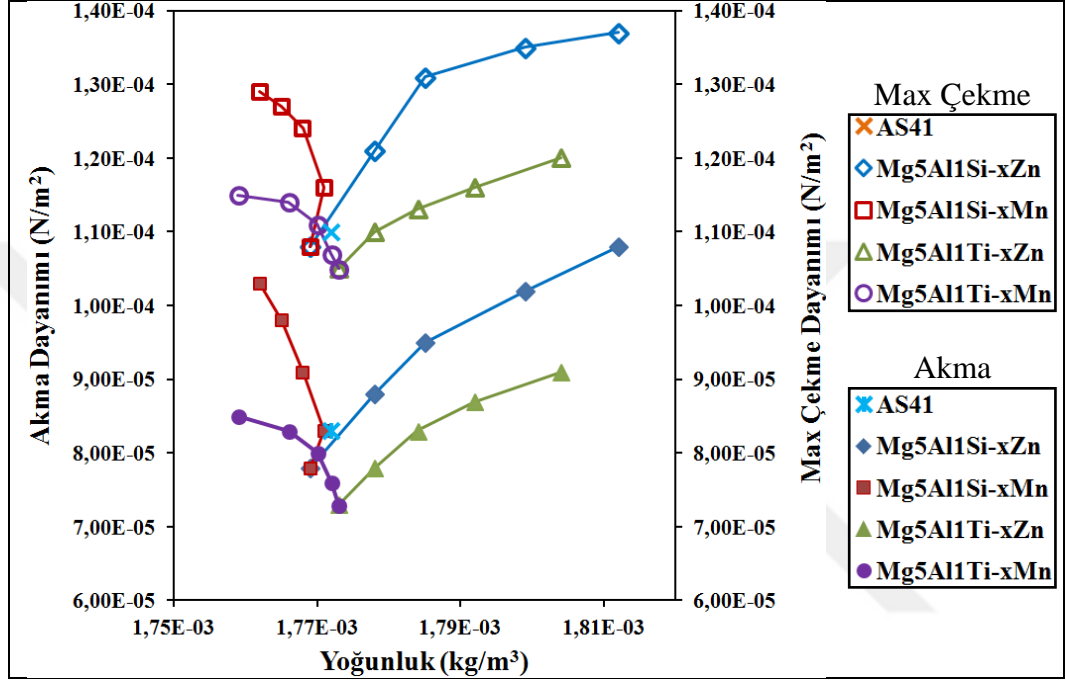
$\sigma_A$  = Akma dayanımı

$\sigma_0$  ve  $k$  = Malzeme sabiti

$d$  = Tane boyutu

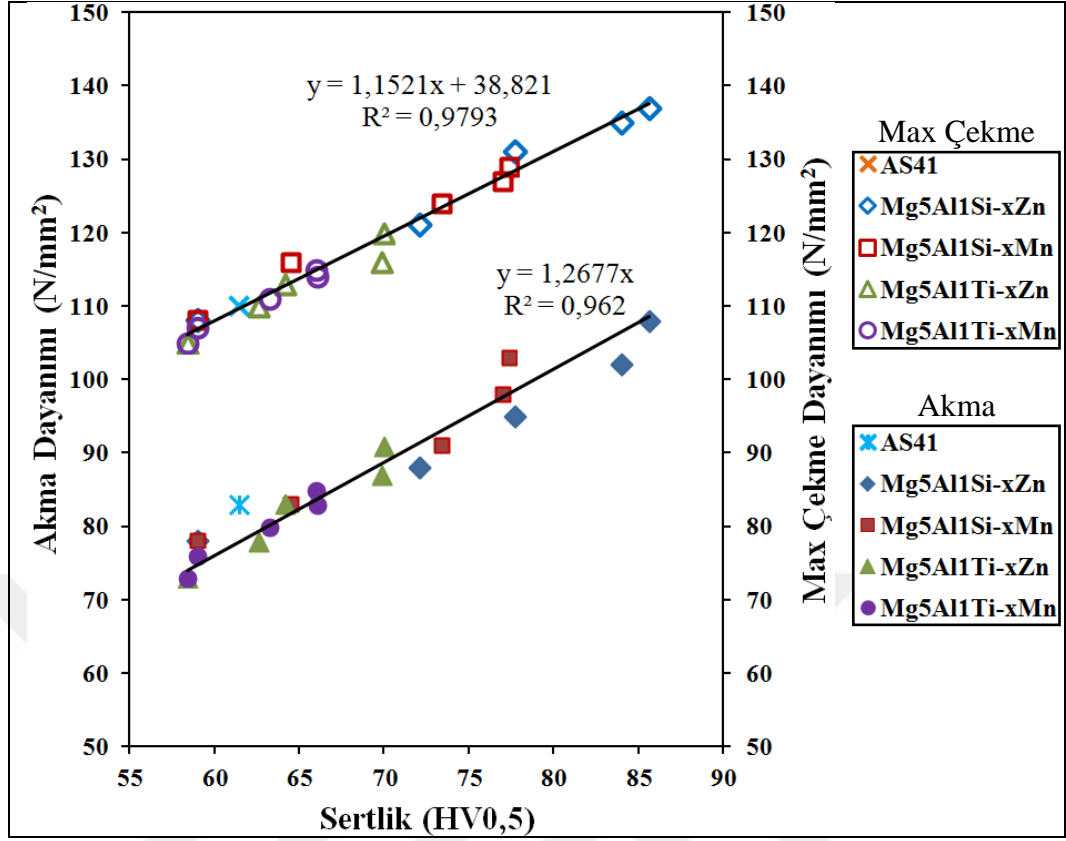
Burada  $\sigma_0$  dislokasyon hareketini başlatmak için gerekli gerilim değerini, diğer bir ifade ile sürtünme gerilmesini,  $k$  ise pekleşme üssü değerini verir ve şekildeki grafiğin eğiminden elde edilir. Şekil 8.1'deki grafikte x ekseninde sağa doğru

ilerledikçe tane boyutu düşmektedir. Grafikteki  $R^2$ , eğim doğrusu üzerindeki noktaların saçılma değerini verir ve 1 değerine ne kadar yakın olursa k katsayısının o kadar güvenilir olduğunu gösterir. Burada akma dayanımı için  $R^2$  değeri 0,94 bulunmuştur ve eğimden elde edilen k katsayısının güvenilir olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 8.2. İncelenen alaşımlarda yoğunluğa bağlı Akma ve Çekme dayanımı değişim grafiği.

İncelenen alaşımlarda yoğunluk ile akma ve max çekme dayanımı arasındaki değişim Şekil 8.2'de verilmiştir. Şekil 8.2'de master alaşımlarına belirli bir oranda Mn elementi ilavesi ile alaşımın yoğunluğu düşerken mukavemeti artmakta, master alaşımlara Zn elementi ilavesi halinde alaşımın hem yoğunluğu hem de mukavemeti artmaktadır. İncelenen alaşımlarda belirli bir yoğunluk değerinde ve sabit Zn ve/veya Mn içeriğinde %1 Si içeren alaşımların mukavemeti %1 Ti içeren alaşımın mukavemetinden daha yüksektir.



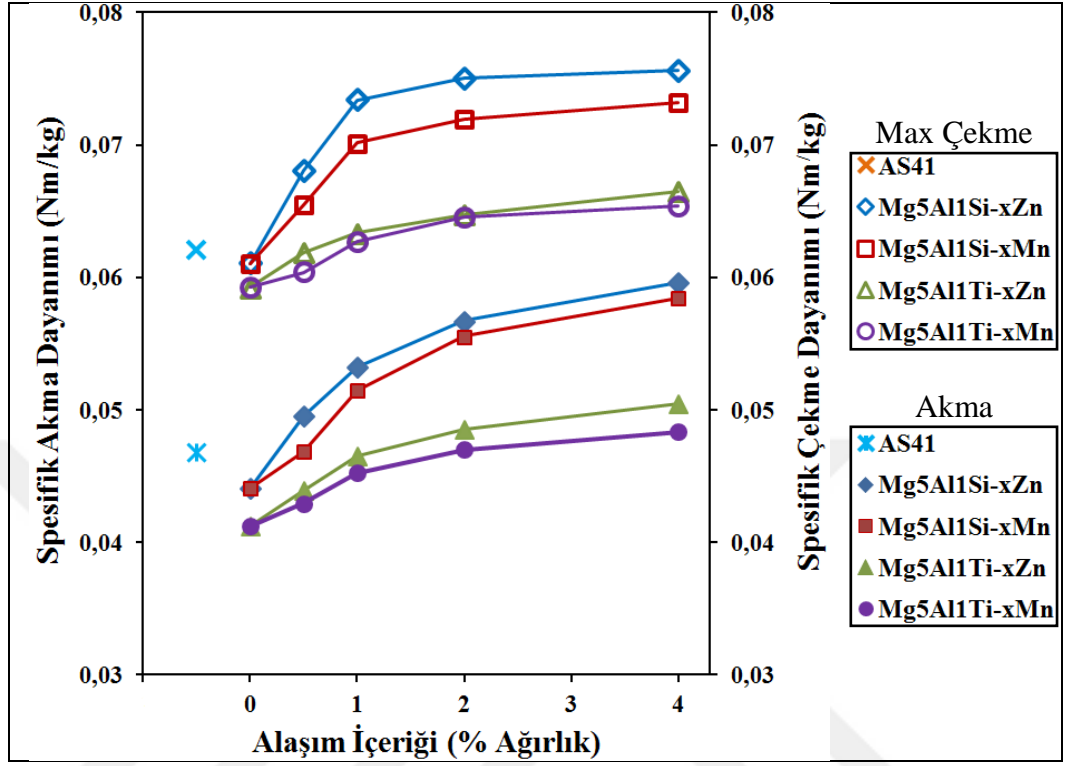
Şekil 8.3. İncelenen alaşımlarda sertlik değerine bağlı Akma ve Çekme dayanımının değişim grafiği.

İncelenen alaşımlarda akma ve çekme dayanımındaki değerlerin sertliğe göre değişim grafiği Şekil 8.3'de verilmiştir. Grafikteki akma dayanımı - sertlik ve max çekme dayanımı - sertlik değerlerinden eğim çizgisi geçirilmiş ve eğim üzerinde formül gösterilmiştir. Akma dayanımı/sertlik değerine göre elde edilen eğim formülündeki  $R^2$  0,96 iken max çekme dayanımı/sertlik değerine göre elde edilen eğim formülündeki  $R^2$  0,97 olarak bulunmuştur ve bu durum eğim çizgisinden bulunan değerlerin güvenilir olduğunu teyit etmektedir. Literatürde akma dayanımı ile sertlik arasında bir katsayı olduğu, sertlik değerini ile akma dayanımı/sertlik grafiğinin eğiminden bulunan formüldeki y değeri ile çarpıldığında akma değerinin bulunacağı aktarılmaktadır (Gasko, 2011). Bu bilgiye dayanarak bu çalışmada kullanılan alaşımlardan herhangi bir alaşımın sertlik değeri ile Şekil 8.3'deki akma dayanımı için bulunan y değeri çarpıldığında o alaşımın akma dayanımını vermektedir. Bu çalışmada incelenen master alaşımlara farklı oranlarda Zn ve/veya Mn ilavesi ile üretilen alaşımların Vickers cinsinden sertlik değerini 1,15 katsayısı ile çarpıp, yaklaşık 38 ilave edildiğinde alaşımının akma dayanımı bulunmaktadır.



$$HV = 1,15 \times \sigma_{akma} + 38$$

(8.2)



Şekil 8.4. İncelenen alaşımların spesifik akma/max çekme dayanımlarının alaşım içeriğine bağlı olarak değişimi.

Alaşımların spesifik mukavemet (akma dayanımı/yoğunluk - max çekme dayanımı/yoğunluk) değerlerinin alaşım içeriğine göre değişim grafiği Şekil 8.4'de verilmiştir. Spesifik mukavemet değerleri Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına Zn ve/veya Mn elementi ilave miktarı ile uyumlu olarak artış göstermektedir. İncelenen master alaşımlara %4 Zn ve/veya Mn alaşım elementi ilavesinde master alaşımlar arasındaki fark en yüksek değere ulaşmıştır.

## 8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İRDELENMESİ

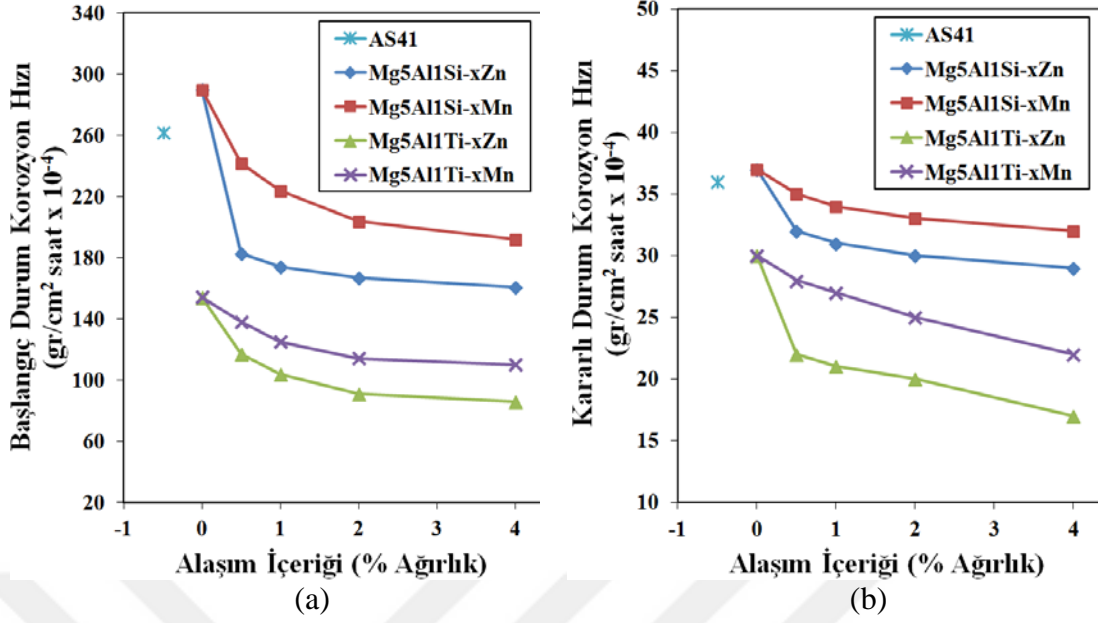
İncelenen alaşımların korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde ağırlık kaybına göre yapılan korozyon deneyi sonuçları ile potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyi sonuçları birbirleri ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle iki farklı korozyon deneyi sonucu beraber değerlendirilecektir. Ağırlık kaybı ve (Şekil 7.14)

potansiyodinamik korozyon sonuçları (Şekil 7.30 - Şekil 7.32 ve Şekil 7.34) Mg5Al1Si master alaşımının korozyon dayanımının Mg5Al1Ti master alaşımının korozyon dayanımından daha düşük olduğunu göstermektedir. Her iki master alaşımda da Zn ve/veya Mn elementi ilavesi korozyon dayanımını artırmıştır. Fakat %X Zn elementi ilavesinin %X Mn elementi ilavesine nazaran korozyon dayanımının artmasına katkısı daha fazla olmuştur (Cai, 2012; Choi, 2014; Nama, 2014).

İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl+10ml/l HCl çözeltisi içinde daldırma korozyonu sonrası Çizelge 7.6'daki ağırlık kaybı değerleri kullanılarak çizilen Şekil 7.14'deki süreye bağlı ağırlık kayıpları grafiklerinin eğimi alınarak gr/cm<sup>2</sup>saat biriminde korozyon hızı değerleri ölçülmüş ve Çizelge 8.1'de verilmiştir. Şekil 7.14'deki grafik başlangıç ve kararlı durum olmak üzere iki farklı eğim verdiği için eğimden bulunan başlangıç ve kararlı durum korozyon hızı olmak üzere iki farklı sonuç bulunmuştur.

Çizelge 8.1. Daldırma korozyon sonrası grafiklerin eğimleri alınarak elde edilen korozyon hızı değerleri.

| Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık |     | Başlangıç durum korozyon hızı (gr/cm <sup>2</sup> saat x10 <sup>-4</sup> ) | Kararlı durum korozyon hızı (gr/cm <sup>2</sup> saat x10 <sup>-4</sup> ) | Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık |     | Başlangıç durum korozyon hızı (gr/cm <sup>2</sup> saat x10 <sup>-4</sup> ) | Kararlı durum korozyon hızı (gr/cm <sup>2</sup> saat x10 <sup>-4</sup> ) |
|---------------|---------------------------|-----|--|--|---------------|---------------------------|-----|--|--|
|               |                           |     |  |  |               |                           |     |  |  |
| AS41          |                           |     | 262  | 36   | AS41          |                           |     | 262  | 36   |
| Mg5Al1Si      | Zn                        | 0   | 290  | 37   | Mg5Al1Ti      | Zn                        | 0   | 154  | 30   |
|               |                           | 0,5 | 183  | 32   |               |                           | 0,5 | 117  | 22   |
|               |                           | 1   | 174  | 31   |               |                           | 1   | 104  | 21   |
|               |                           | 2   | 167  | 30   |               |                           | 2   | 91   | 20   |
|               |                           | 4   | 161  | 29   |               |                           | 4   | 86   | 17   |
|               | Mn                        | 0   | 290  | 37   |               | Mn                        | 0   | 154  | 30   |
|               |                           | 0,5 | 242  | 35   |               |                           | 0,5 | 138  | 28   |
|               |                           | 1   | 224  | 34   |               |                           | 1   | 125  | 27   |
|               |                           | 2   | 204  | 33   |               |                           | 2   | 114  | 25   |
|               |                           | 4   | 192  | 32   |               |                           | 4   | 110  | 22   |



Şekil 8. 5. Daldırma korozyonu sonrası, a) başlangıç ve b) kararlı durum korozyon hızı değerleri.

Daldırma korozyonu sonrası Çizelge 8.1'deki başlangıç ve kararlı durum korozyon hızı değerleri kullanılarak Şekil 8.5'deki grafik çizilmiştir. Şekil 8.5'deki grafik incelendiğinde başlangıç durum korozyon hızı değerlerinin, kararlı durum korozyon hızı değerlerinden yaklaşık 7 kat büyük olduğu görülmüştür. Grafikten aynı zamanda Mg5Al1Si-XZn/Mn alaşımının ve Mg5Al1Ti-XZn/Mn alaşımından daha yüksek korozyon hızına sahip olduğu anlaşılmaktadır. İntermetalik fazlar Mg alaşımlarının korozyon direncinde önleyici etkiye sahiptir (Song ve Atres, 1999). Bu intermetalik fazların korozyona karşı direnci artırabilmeleri için belirli oranlarda olması gerekebilmektedir. İncelenen master alaşımları tartışıldığında Mg5Al1Si master alaşımında bulunan %1 oranındaki Si elementi ilavesi ile yapıda poligonal ve iğnesel şekilde oluşan Mg<sub>2</sub>Si fazı alaşımın korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Ben Hamu ve arkadaşları Mg-Zn-Mn alaşımının korozyon dayanımına Mg<sub>2</sub>Si fazının rolünü araştırdıkları çalışmalarında % 0,5 ve %1 Si takviye ettikleri alaşımlardaki korozyon dayanımının %2 Si takviye ettikleri alaşımdan daha düşük olduğunu gözlemledikleri bu tezdeki sonuçları destekler niteliktedir. Mg5Al1Ti master alaşımında bulunan %1 oranındaki Ti elementi katı eriyik oluşturarak korozyona karşı dayanımı artırdığı görülmüştür. Literatürde Ti ilavesiyle magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımının arttığı görülmektedir. Ti elementinin oksijen afinitesinin yüksek olması nedeniyle oluşturduğu koruyucu oksit

filmi korozyon hızını azaltan etki olabileceği bildirilmektedir (Ben Hamu, 2008; Candan, 2009).

Korozyon deneyi sonuçlarına göre en yüksek korozyon dayanımına sahip alaşım Mg5Al1Ti-4Zn alaşımıdır. Bu alaşımın korozyon dayanımının yüksek olmasının nedeni olarak SEM (Şekil 7.9), EDS (Çizelge 7.3) ve XRD (Şekil 7.8) sonuçlarında tespit edilen yapıda oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> (β) ve MgZn fazlarıdır. Mg5Al1Ti alaşımına Zn elementi ilavesi sonucu mikroyapıda ötektik fazın içinde çökelen MgZn fazı (Şekil 7.9), korozif ortamda bir oksit filmi oluşturduğu, bu sayede korozyon direncinin arttığı rapor edilmiştir (Lunder, 1989; Song, vd., 1998; Ben Hamu, 2008; Koç, 2013; Lotfabadi, 2013).

Matris içerisindeki hacim oranına bağlı olarak β fazı, eğer hacim oranı küçük ve rastgele dağılmış iseler galvanik katod olarak davranış sergilemekte ve korozyon ilerlemesini hızlandırmaktadır. Yüksek hacim oranına sahip β fazı ise anodik bariyer olarak davranmakta ve korozyon hızını engelleyebilmektedir (Song ve Atres, 1999).

Ayrıca Zn ve Mn elementlerinin karşılaştırmalı olarak korozyon dayanımlarının araştırıldığı çalışmalarda Zn ilaveli alaşımların Mn ilaveli alaşımlardan daha iyi korozyon direncine sahip olduğu rapor edilmiştir. Bu durum Zn ilavesi ile oluşan MgZn fazının korozyona karşı koruyucu bariyer oluşturmasına dayandırılmaktadır. (Lunder, 1989; Song vd., 1998; Koç, 2013; Lotfabadi, 2013). Zn elementinin korozyon dayanımına etkisi hakkında yapılan çalışmalarda %5 Zn takviyesine kadar korozyon dayanımında iyileşme gözlemlenmiştir (Cai, 2012).

$$\text{mm/yıl} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (8.3)$$

Burada;

$$\text{mm/yıl} = \text{Korozyon hızı (mm/yıl)}$$

$$K = \text{Sabit sayı (mm/yıl)} = 8,76 \times 10^4$$

$$T = \text{Test süresi (h, saat)}$$

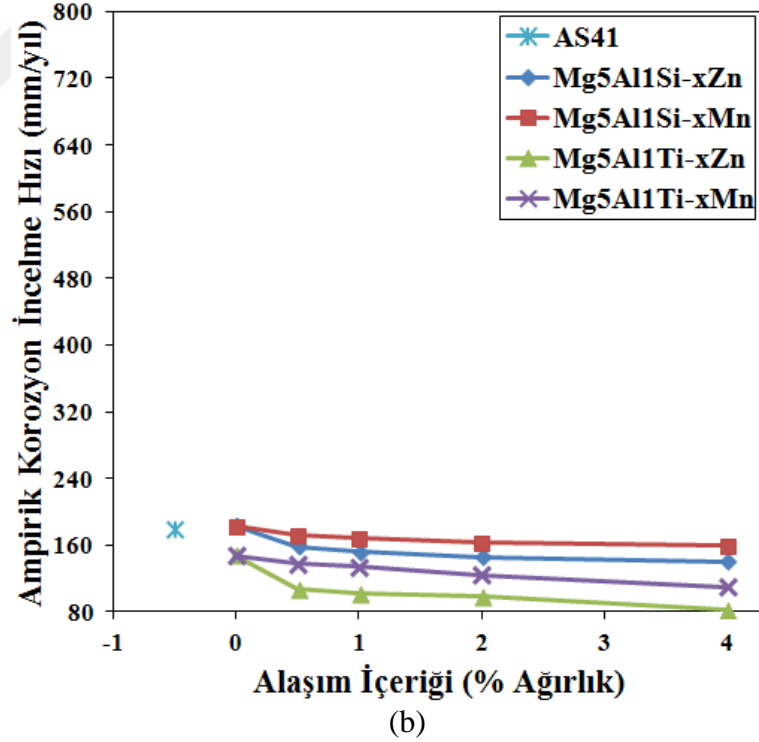
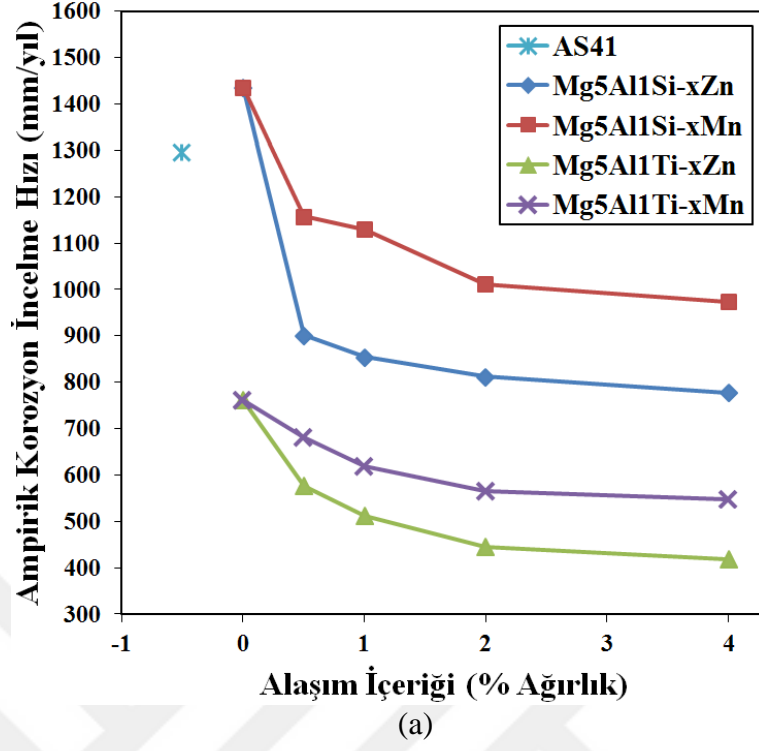
$$W = \text{Test süresi sonundaki ağırlık kaybı (gr) (ilk ağırlık - son ağırlık)}$$

D = Numune yoğunluğu (gr/cm<sup>3</sup>)

A = Korozyona maruz kalan alan (cm<sup>2</sup>)

Çizelge 8.2. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içindeki daldırma korozyonu sonrası ağırlık kaybına göre mm/yıl cinsinden ampirik korozyon incelme hızlarının değişimi.

| Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | Başlangıç Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | Kararlı Durum Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | Başlangıç Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | Kararlı Durum Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) |     |     |
|---------------|---------------------------|--|--|---------------|---------------------------|--|--|-----|-----|
| AS41          |                           | 1295   | 178  | AS41          |                           | 1295   | 178  |     |     |
| Mg5Al1Si      | Zn                        | 0  | 1436   | 183           | Mg5Al1Ti                  | Zn   | 0  | 761 | 148 |
|               |                           | 0,5  | 902  | 158           |                           |  | 0,5  | 576 | 108 |
|               |                           | 1  | 854  | 152           |                           |  | 1  | 511 | 103 |
|               |                           | 2  | 813  | 146           |                           |  | 2  | 445 | 98  |
|               |                           | 4  | 778  | 140           |                           |  | 4  | 418 | 83  |
|               | Mn                        | 0  | 1436   | 183           |                           | Mn   | 0  | 761 | 148 |
|               |                           | 0,5  | 1157   | 173           |                           |  | 0,5  | 682 | 138 |
|               |                           | 1  | 1130   | 168           |                           |  | 1  | 619 | 134 |
|               |                           | 2  | 1012   | 164           |                           |  | 2  | 565 | 124 |
|               |                           | 4  | 974  | 159           |                           |  | 4  | 548 | 110 |



Şekil 8.6. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde a) başlangıç durumundaki ve b) kararlı durumdaki mm/yıl cinsinden korozyon hızının değişimi.

Ampirik korozyon incelme hızı değerlerinin hesaplanması için Çizelge 7.6'da verilen zamana karşı  $g/cm^2$ saat biriminde ağırlık kaybı sonuçlarından yararlanılmıştır. Başlangıç korozyon hızı bölgesi 5. saatin sonunda son bulmakta iken, kararlı durum korozyon hızı bölgesi 24. saatin sonuna kadar (Şekil 7.14) devam etmektedir. Çizelge 8.1'de  $gr/cm^2$ saat olarak verilen başlangıç ve kararlı durum korozyon hızları Denklem 8.3 kullanılarak ampirik başlangıç korozyon incelme hızı ve ampirik kararlı durum korozyon incelme hızı verileri Çizelge 8.2'de ve bu çizelgeden yararlanılarak çizilen alaşım içeriği - ampirik korozyon incelme hızı grafiği Şekil 8.6'da verilmiştir.

Daldırmalı korozyon neticesinde elde edilen verilere göre hesaplanan Çizelge 8.2'de tablo halinde, Şekil 8.6'da grafik halinde verilen alaşım içeriğine bağlı olarak başlangıç ve kararlı durumdaki korozyon hızının değerleri birbirlerinden farklılık göstermektedir. Başlangıç durumdaki korozyon hızının değerleri alaşım içeriğine bağlı olarak yaklaşık 1500 mm/yıl ile 400 mm/yıl aralığında değişirken kararlı durum korozyon hızı değerleri oldukça düşük seviyelerde 180 mm/yıl ile 80 mm/yıl aralığındadır. AS41 master alaşımının başlangıç durumdaki korozyon hızını 1295 mm/yıl iken, kararlı durumdaki korozyon hızı değeri 178 mm/yıl'dır. Bu büyük fark diğer incelenen alaşımlar için de geçerlidir.

Bu durum literatürle birlikte şu şekilde açıklanabilir (Doruk, 1982). Korozyonun devam edebilmesi için anot ve katotdaki korozyon ürünlerinin giderilmesi gerekir. Bazı durumlarda, hidrojen gazı katotda çok yavaş birikir ve metal yüzeyinde oluşan hidrojen tabakası korozyon reaksiyonunu yavaşlatır. Bu olay katodik polarizasyon olarak bilinir. İncelenen alaşımların Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'deki kesitten alınan optik mikroskop ve SEM görüntülerinde korozyon ilerlemesinin  $\alpha$ -Mg'de olduğu, yapıdaki intermetaliklerin, özellikle  $Mg_5Al_1Ti-4Zn$  alaşımında korozyona karşı bariyer olarak görev yaptığı görülmektedir. Daldırma korozyon deneylerinin ilk 5 saatinde bu denli hızlı bir korozyonun yaşanması anot olarak davranan  $\alpha$ -Mg üzerinde katot olarak görev yapabilecek korozyon tabakası üzerinde yeterli hidrojen tabakası oluşması ve korozyonun  $\alpha$ -Mg'de ilerleyerek şiddetli korozyon kaybına neden olması şeklinde açıklanabilir.

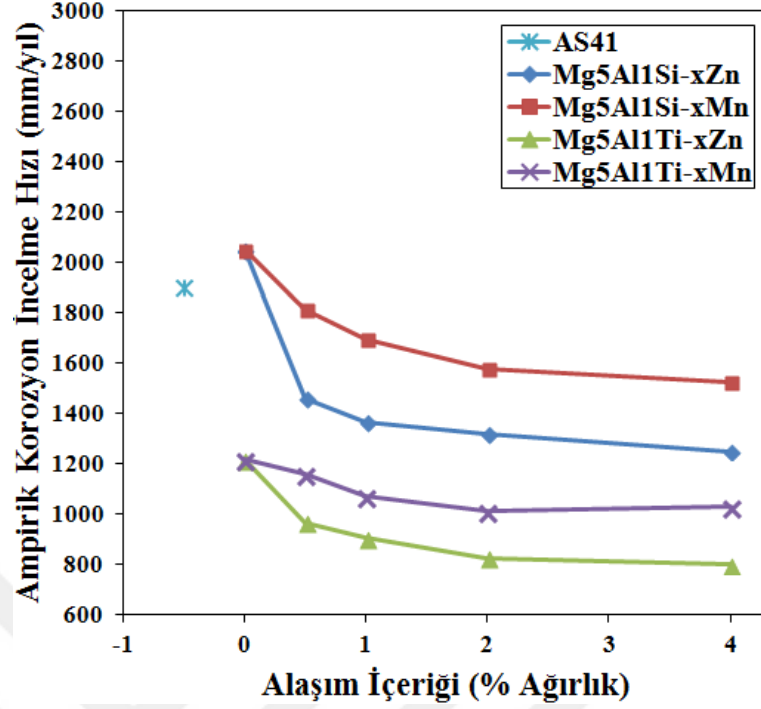
İncelenen alaşımların daldırılmalı korozyon deneyinde kararlı durum bölgesinde korozyonun yavaşlamasının nedeni olarak ilerleyen korozyon süresine bağlı olarak korozyon tabakası üzerinde katod olarak görev yapacak yeterli hidrojen tabakası oluşumu gerçekleşmemiş ve korozyonun iç kısımlara ilerleyememesi neticesinde ağırlık kaybının azaldığı söylenebilir.

Buna ilave olarak başlangıç ve kararlı durum bölgelerinin bittiği süreye karşılık gelen sırası ile 5. ve 24. saatlerdeki birim alan başına ağırlık kayıpları dikkate alınarak mm/yıl cinsinden korozyon hızları Denklem 8.3 yardımıyla tekrar hesaplanarak Çizelge 8.3'de verilmiş olup Şekil 8.7'de gösterilmiştir.

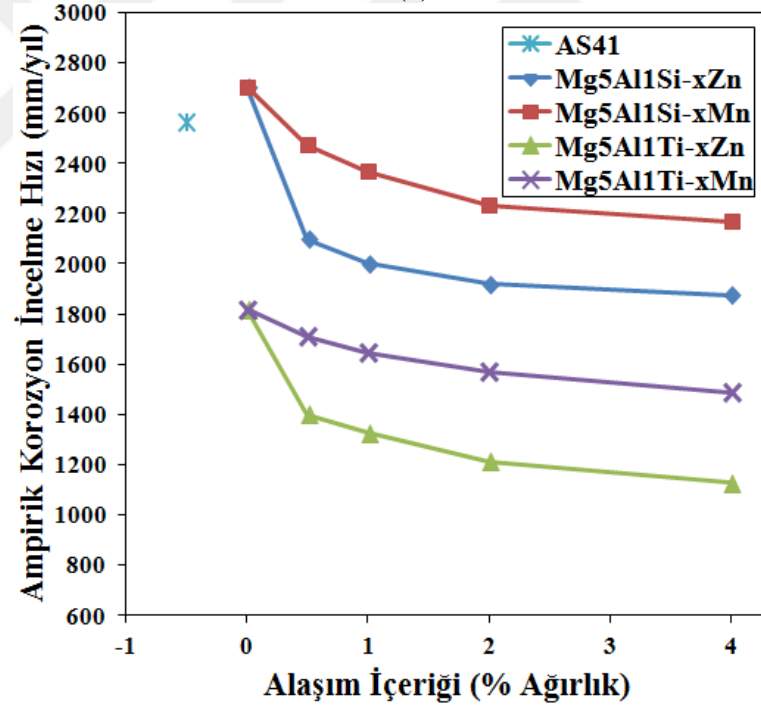
Çizelge 8.3. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içindeki daldırma korozyonu sonrası 5. ve 24. saatlerdeki ağırlık kaybına göre mm/yıl cinsinden ampirik korozyon hızlarının değişimi.

| Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | 5. Saatteki Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | 24. Saatteki Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | 5. Saatteki Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) | 24. Saatteki Ampirik Korozyon İncelme Hızı (mm/yıl) |
|---------------|---------------------------|--|---|---------------|---------------------------|--|---|
| AS41          |                           | 1898   | 2561  | AS41          |                           | 1898   | 2561  |
| Mg5Al11Si     | Zn                        | 0  | 2050  | Mg5Al11Ti     | Zn                        | 0  | 1215  |
|               |                           | 0,5  | 1458  |               |                           | 0,5  | 966   |
|               |                           | 1  | 1364  |               |                           | 1  | 903   |
|               |                           | 2  | 1315  |               |                           | 2  | 821   |
|               |                           | 4  | 1247  |               |                           | 4  | 796   |
|               |                           | 0  | 2050  |               |                           | 0  | 1215  |
|               | Mn                        | 0,5  | 1810  |               | 0,5                       | 1157   |   |
|               |                           | 1  | 1695  |               | 1                         | 1069   |   |
|               |                           | 2  | 1578  |               | 2                         | 1012   |   |
|               |                           | 4  | 1521  |               | 4                         | 1026   |   |





(a)



(b)

Şekil 8.7. İncelenen alaşımların 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içinde a) 5. saatin sonundaki ve b) 24. saatin sonundaki birim alan başına ağırlık kayıplarının mm/yıl cinsinden korozyon hızına dönüştürülmesi.

Şekil 7.29b, Şekil 8.6b ve Şekil 8.7b kararlı durum incelme hızları birlikte irdelendiğinde alaşımların incelme hızı sıralamasının değişmediği görülmüştür. Daldırma korozyon deneyi sonrasında kesitten metalografik olarak hazırlanıp mm

cinsinden incelme hız değeri ölçülen Şekil 7.29b grafiği gerçek incelme hız grafiği kabul edildiğinde Şekil 8.7b'de verilen değerlerin Şekil 8.6b'deki değerlere kıyasla daha anlamlı olduğu gözlemlenmektedir.

Tafel polarizasyon ölçümü ile yapılan korozyon deneyi sonuçlarında  $i_{corr}$  değerleri daldırmalı korozyon deneyindeki ağırlık kaybı değerleri ile örtüşmektedir. Mg-5Al1Ti matrisli alaşımlar Mg-5Al1Si alaşımlara nazaran daha düşük  $i_{corr}$  değerine sahiptir. Aynı şekilde Zn ilaveli alaşımlar Mn ilaveli alaşımlara nazaran daha düşük  $i_{corr}$  değeri sergilemiştir.

İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı korozyon akımı değerlerine göre mm/yıl cinsinden korozyon hızının değişimi Denklem 8.3 yardımı ile hesaplanarak, değerler Çizelge 8.4'de verilmiştir. Çizelge 8.4'deki değerler kullanılarak alaşım içeriğine bağlı ampirik korozyon ilerleme hızı çizilmiştir ve Şekil 8.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.4. İncelenen alaşımların korozyon akımı değerlerine bağlı mm/yıl cinsinden ampirik korozyon ilerleme hızı değişim değerleri.

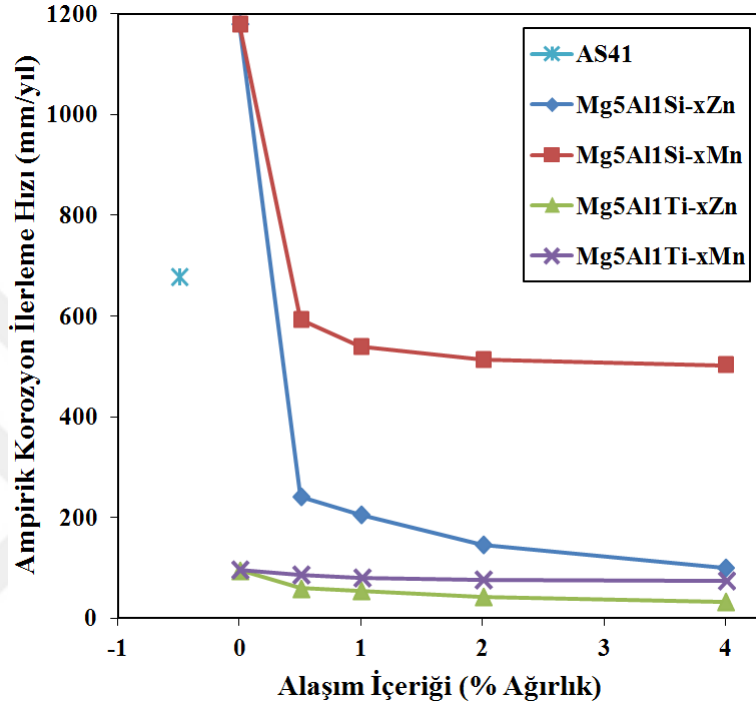
| Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | Ampirik Korozyon İlerleme Hızı (mm/yıl) | Master Alaşım | Alaşım elementi % Ağırlık | Ampirik Korozyon İlerleme Hızı (mm/yıl) |  |       |
|---------------|---------------------------|---|---------------|---------------------------|---|--|-------|
| AS41          |                           | 676,84                                  | AS41          |                           | 676,84                                  |  |       |
| Mg5Al1Si      | Zn                        | 0                                       | Mg5Al1Ti      | Zn                        | 0                                       |  |       |
|               |                           | 0,5                                     |               |                           | 95,73                                   |  |       |
|               |                           | 1                                       |               |                           | 59,44                                   |  |       |
|               |                           | 2                                       |               |                           | 54,16                                   |  |       |
|               |                           | 4                                       |               |                           | 42,65                                   |  |       |
|               | Mn                        | 0                                       |               | Mn                        | 0                                       |  |       |
|               |                           | 0,5                                     |               |                           | 95,73                                   |  |       |
|               |                           | 1                                       |               |                           | 85,93                                   |  |       |
|               |                           | 2                                       |               |                           | 79,90                                   |  |       |
|               |                           | 4                                       |               |                           | 75,62                                   |  |       |
|               |                           |   |               | 502,39                    |   |  | 72,85 |

$$\frac{W}{A.t} = \frac{M.i}{n.F} \times \frac{1}{\rho} \quad (8.3)$$

$i: \frac{A}{cm^2}$  Akım yoğunluğu

$F: \frac{A.s}{mol}$

$\rho: \frac{g}{cm^3}$  Yoğunluk



Şekil 8.8. İncelenen alaşımların alaşım içeriğine bağlı korozyon akımı değerlerine göre mm/yıl cinsinden korozyon hızının değişim grafiği.

İncelenen alaşımların korozyon akımı değerlerine bağlı mm/yıl cinsinden korozyon hızlarının değişim değerleri (Şekil 8.8) incelendiğinde sonuçların ağırlık kaybına göre yapılan korozyon deneyi sonuçları (Şekil 7.29, Şekil 8.6 ve Şekil 8.7) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Mg5Al1Si master alaşımının korozyon hızı 1180,61 mm/yıl değeri ile en yüksek korozyon hızına sahiptir. Mg5Al1Si master alaşımına %0,5 oranında Zn ve/veya Mn elementi ilave edildiğinde korozyon incelleme hızının keskin bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu fark Ti elementi içeren alaşımlarda çok daha azdır. Mg5Al1Ti master alaşımı ve master alaşıma %4'e kadar Zn ve/veya Mn ilave edildiğinde korozyon ilerleme hızının düşüşünün yavaşladığı Şekil 8.7'den anlaşılmaktadır.

Şekil 7.29b, Şekil 8.6b ve Şekil 8.7b'deki mm/yıl cinsinden kararlı durum daldırmalı korozyon incelme hızı değerleri ile Şekil 7.34'deki mm/yıl cinsinden potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyi değerleri beraber incelendiğinde belli bir alaşım için potansiyodinamik polarizasyonda ilerleme hızının yaklaşık 6 kat daha büyük olduğu görülmektedir. Halbuki daldırma korozyonunda numune 24 saat çözelti içerisinde bekletilirken potansiyodinamik polarizasyon sadece 75 dakika bekletilmiştir. Bu durum olarak potansiyodinamik polarizasyonda aşırı gerilim uygulanması ile korozyonun yüzeyden itibaren numune içerisine ilerlemesinden kaynaklanmıştır.

İncelenen alaşımların 30 gr/l NaCl + 10 ml/l HCl çözeltisi içinde 24 saat süre içinde daldırmalı korozyon sonrası deney numunelerinin yüzeyinden alınan Shuttle Pix stereo mikroskop (Şekil 7.18 - Şekil 7.20), taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Şekil 7.21) ve EDS sonuçları (Şekil 7.22 ve Şekil 7.26) ile yüzey atından alınan optik ışık mikroskobu (Şekil 7.27), taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Şekil 7.28) birlikte irdelenmiştir.

Şekil 7.18 - Şekil 7.20'de verilen daldırma korozyonu sonrası yüzeye ait Shuttle Pix stereo mikroskop görüntülerindeki bölgelerin, korozyon neticesinde anot davranarak hasara uğrayan ve yaklaşık 1 mm kadar yüzey altına indiği için kalınlık farkından dolayı daha koyu gri renkli bölgeler, korozyonda katot olarak davranan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalığının de keskin sarı rengi andıran beyaz bölgelerle kaplı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.21'deki yüzeyden alınan SEM görüntülerinde ise AS41 master alaşımında tane sınırlarında bir ağ şeklinde çökelen ve korozyonda katot olarak davrandığı için hasara uğramayarak matrise göre daha yüksek olduğu görülen  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı açık şekilde ayırt edilmektedir. SEM görüntülerindeki düz parlak bölgeler kılcal çatlaklar içeren bölgelerin oksit tabakası olduğu Şekil 7.22 - Şekil 7.26'daki EDS sonuçlarından anlaşılmış ve kılcal çatlak bulunmasından dolayı buralarda oluşan korozyon ürünü düz ve sert-gevrek oksit tabakası olarak tanımlanmıştır. Ti ilave edilen alaşımlarda daha fazla oksit tabakası olduğu düşünülen beyaz bölgenin olması Ti elementinin oksijene afinitesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 7.22 - Şekil 7.26'da master alaşımları ve %4 Zn ile %4 Mn elementi içeren alaşımlar için verilen daldırma korozyon deneyi sonrası yüzeyden alınan EDS analiz sonuçları incelendiğinde SEM görüntüleri üzerinden seçilen 1 numaralı bölgeler koyu gri pürüzlü bölgelerin Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'deki kesitten alınan optik mikroskop ve SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi daldırma korozyonunda anot olarak davranan  $\alpha$ -Mg ağırlıklı olduğu EDS piklerinden de anlaşılmaktadır. 2 numaralı açık parlak-düz bölgelerin oksit tabakası olduğu yüksek oksijen içeriğinden anlaşılmaktadır. Yüksek oksijen içerikli bölgelerde genellikle kılcal çatlaklar yer almaktadır. Genel olarak Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti master alaşımına %4 Zn ve/veya Mn ilave edildiğinde 2 numaralı bölgelerdeki oksijen miktarının daha yüksek olması Ti elementinin oksijene olan afinitesinden kaynaklandığına dayandırılmaktadır.

Korozyon deneyi sonrası numunelerin yüzey altı optik ışık mikroskobu ve SEM görünümünde (Şekil 7.27 ve Şekil 7.28) Zn/Mn ile alaşımlı ve alaşımsız Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si ve AS41 master alaşımların yüzeyinde oluşan oksit tabakası daha kalın ve boşluklu iken incelenen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-xZn/Mn alaşımının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının daha ince ve sıkı olduğu gözlenmiştir. Buna ilave olarak Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-xZn/Mn alaşımında oksit tabakasının ilerleyişi intermetalikler tarafından durdurulmuştur.

İncelenen alaşımlaraki daldırma korozyonu sonrasında kesitten alınan Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'deki optik mikroskop ve SEM görüntülerine bakıldığında Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Si ve AS41 master alaşımların yüzeyinde oluşan oksit tabakası daha kalın ve boşluklu iken incelenen Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-xZn/Mn alaşımının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının daha ince ve sıkı olduğu gözlenmiştir. Diğer yandan  $\alpha$ -Mg anot olarak davranmış ve korozyon  $\alpha$ -Mg'de ilerlemiştir. Özellikle Mg<sub>5</sub>Al<sub>1</sub>Ti-%4Zn alaşımının Şekil 7.28'deki SEM görüntüsüne bakıldığında korozyonun ilerlemesine engel oluşturacak şekilde bariyer görevi yapan fazın EDS sonuçlarından da teyit edildiği gibi ötektik yapı içerisindeki MgZn fazı ve Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalığı olduğu anlaşılmaktadır.

Burada yapılan çalışmayı destekleyen Ambat arkadaşlarının AZ91D alaşımının pH'ı 7.5 olan %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde ağırlık kaybı deneyleri ve potansiyodinamik

polarizasyon deneyleri ile korozyon ve elektrokimyasal davranışına içyapı bileşenlerinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında tane boyutu daha küçük olan ve ince  $\beta$  fazına sahip olan malzemenin, biraz daha düşük korozyon hızı ve biraz daha iyi pasifleşme yeteneği sunduğunu belirtmişlerdir (Ambat vd 2000).

AZ91 magnezyum alaşımının klorür ortamındaki korozyon davranışına  $\beta$  fazının ( $Mg_{17}A_{12}$ ) dağılımının etkili olduğunu belirttikleri çalışmada tane sınırları boyunca çökelen, sürekli bir ağ şeklindeki  $\beta$  fazının korozyon direnci sağladığı, magnezyum matrisine göre daha soy olduğu ve bir korozyon engeli olarak hareket ettiğini belirtmişlerdir (Lunder, 1989).

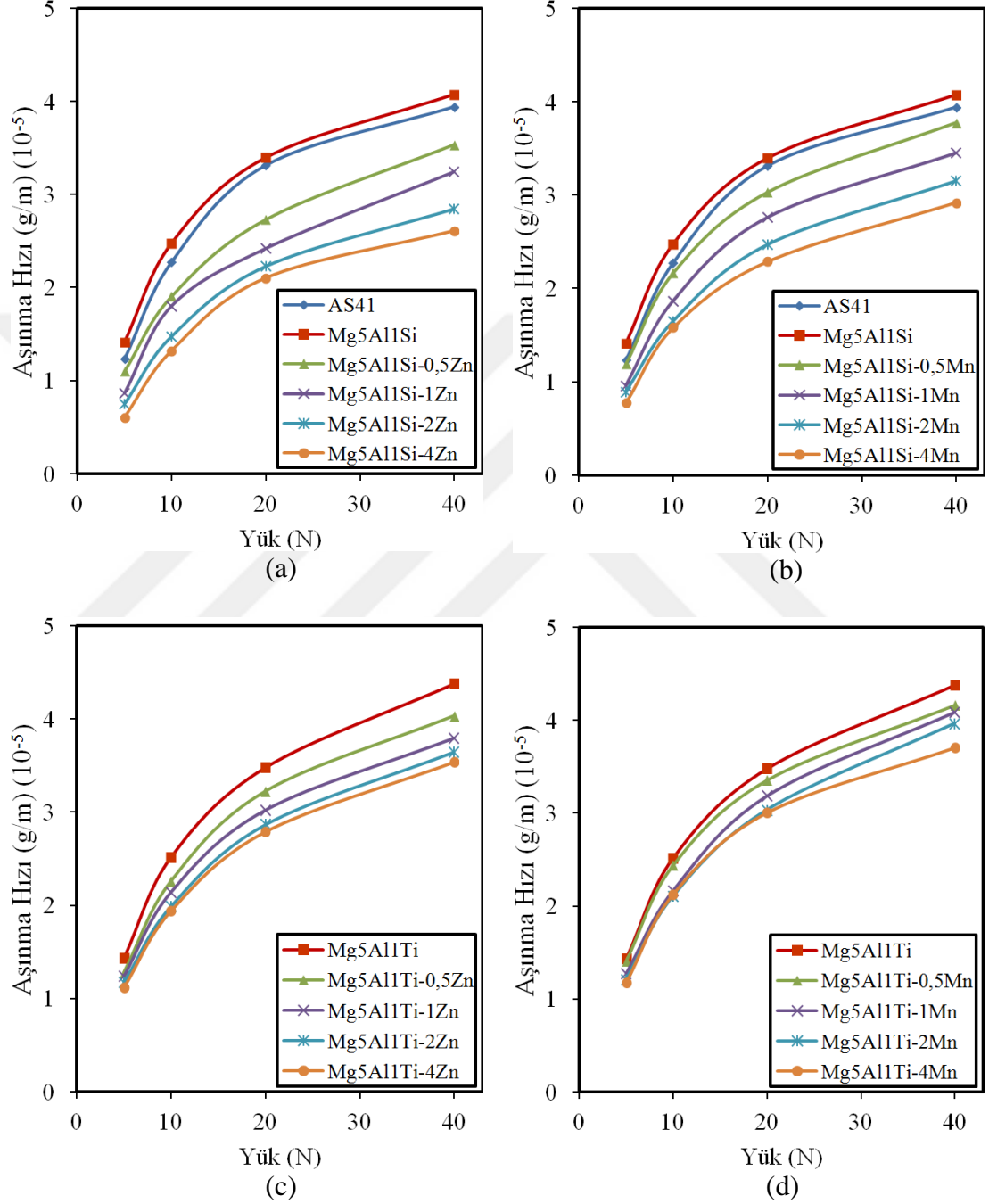
AZ21, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon davranışını incelemişler; korozyon hızına göre alaşımların  $AZ61 < AZ21 < AZ91$  şeklinde sıralandığını belirtmişlerdir. Onlara göre  $\beta$  fazı, çözelti içerisinde çok kararlı ve etkin bir katottur  $\beta$  fazı, biri engel ve diğeri galvanik katot olmak üzere iki rol üstlenir. Eğer  $\beta$  fazı,  $\alpha$ -Mg matrisi içerisinde taneler arasında çökelti halinde küçük miktarlarda mevcutsa, bu durumda esas olarak galvanik bir katot olarak görev yapar ve  $\alpha$ -Mg matrisinin korozyonunu hızlandırır. Eğer  $\beta$  fazının miktarı fazlaysa, o zaman  $\beta$  fazı esas olarak alaşımın korozyonunu önleyecek şekilde anodik bir engel olarak davranabilir (Song vd., 1998).

Potansiyodinamik polarizasyon sonrası yüzeyden alınan Shuttle Pix stereo mikroskop Şekil 7.30 - Şekil 7.32 görüntülerinden xZn elementi içeren alaşımlarda yüzeyde çatlaklar meydana geldiği ve bunun da oluşan korozyon tabakasının sert ve gevrek oluşundan kaynaklandığı ve daldırmalı korozyon testlerinden elde edilen verilerle uyumlu olduğu söylenebilir. Oluşan bu sert ve gevrek tabaka korozyonun iç kısımlara ilerlemesi engelleyebileceğinden bahsedilebilir.

### **8.3. AŞINMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ**

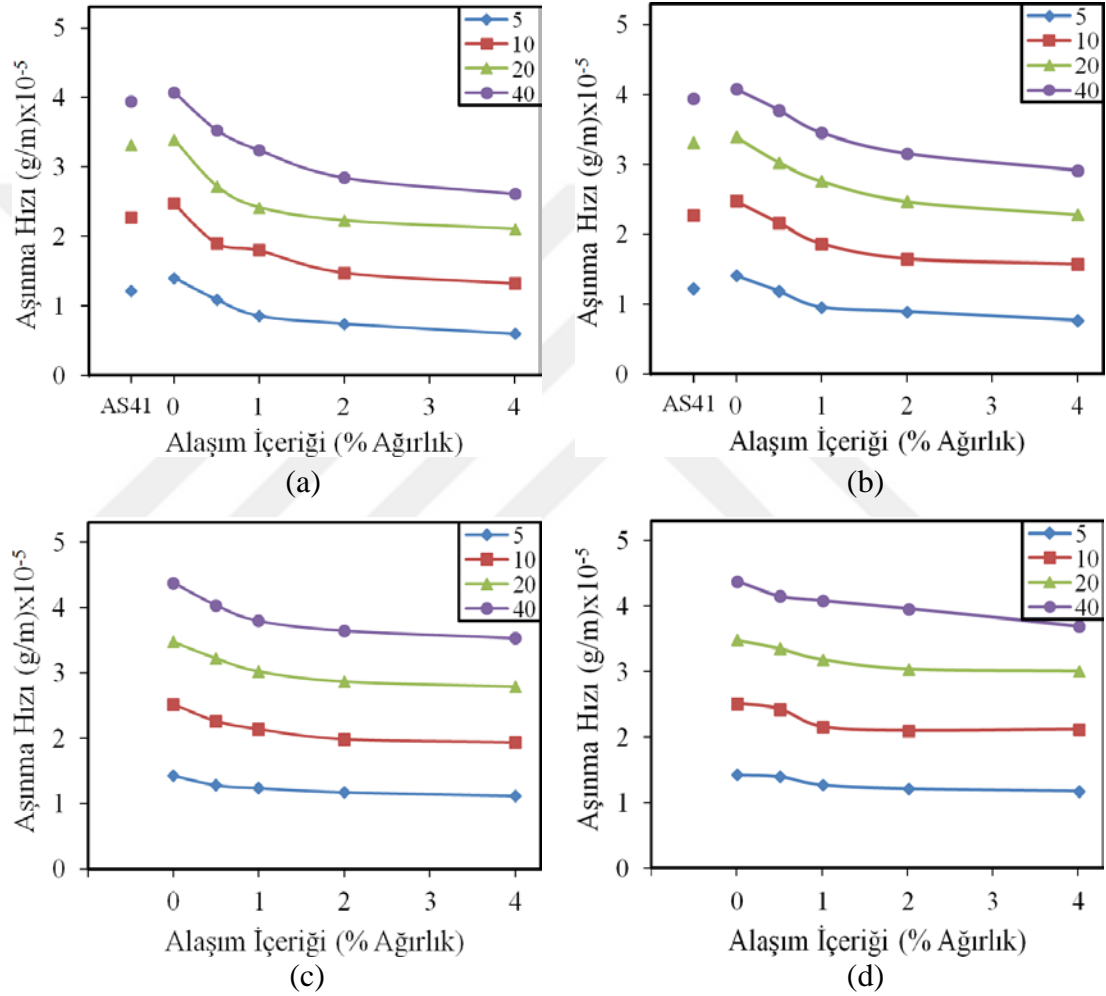
İncelenen alaşımlarının pin-on-disk aşınma cihazında 5-40N yük altında 12 km kayma mesafesinde yapılan aşınma deneyi sonucu ağırlık kaybı verileri ve sürtünme

katsayısı değeri, aşınma mekanizmasının belirlenmesi için aşınma deneyi sonrası numune yüzeylerinden çekilen Shuttle Pix stereo mikroskop ve SEM görüntüleri birlikte irdelenmiştir.



Şekil 8.9. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn , b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımların yüke bağlı aşınma hızı değişimi.

Şekil 7.35 - Şekil 7.38 incelendiğinde ağırlık kaybı kayma mesafesi grafikleri, sabit kayma hızında kümülatif ağırlık kaybı kayma mesafesi ile lineer olarak değiştiği görülmektedir. Master alaşımlara ilave edilen alaşım elementlerinin aşınma davranışına etkisi uygulanan yüke bağlı olarak değişim göstermiştir. Belirli bir kayma mesafesi için tüm yüklerde alaşım elementi içeriğinin artması ile ağırlık kaybı azalmıştır.



Şekil 8.10. İncelenen a) AS41 ve Mg5Al1Si-xZn , b) AS41 ve Mg5Al1Si-xMn, c) Mg5Al1Ti-xZn ve d) Mg5Al1Ti-xMn alaşımların yüke bağlı aşınma hızı değişimi.

Şekil 8.9'da yer alan farklı yükler için çizilmiş ağırlık kaybı grafiklerinin eğimi alınarak elde edilen aşınma hızı değerlerinin uygulanan yüke göre değişimi Şekil 8.9'da verilmiştir. Şekil 8.9'da yüke bağlı aşınma hızı grafiğine bakıldığında uygulanan 20N'luk yükün incelenen alaşımlar için eşik değer olduğu ve grafiklerini iki kısma ayırdığı açıkça görülmektedir. Uygulanan 20N yüke kadar hızlı bir



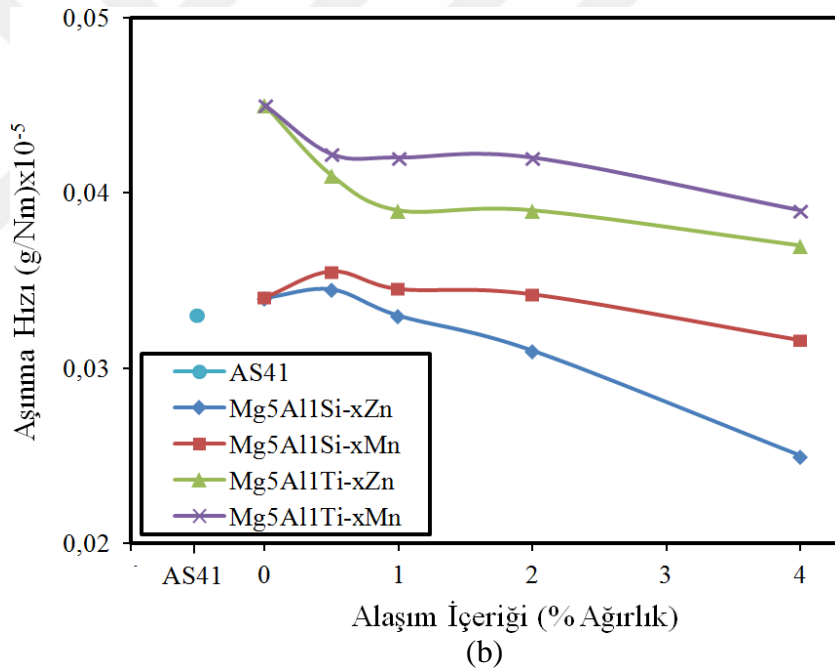
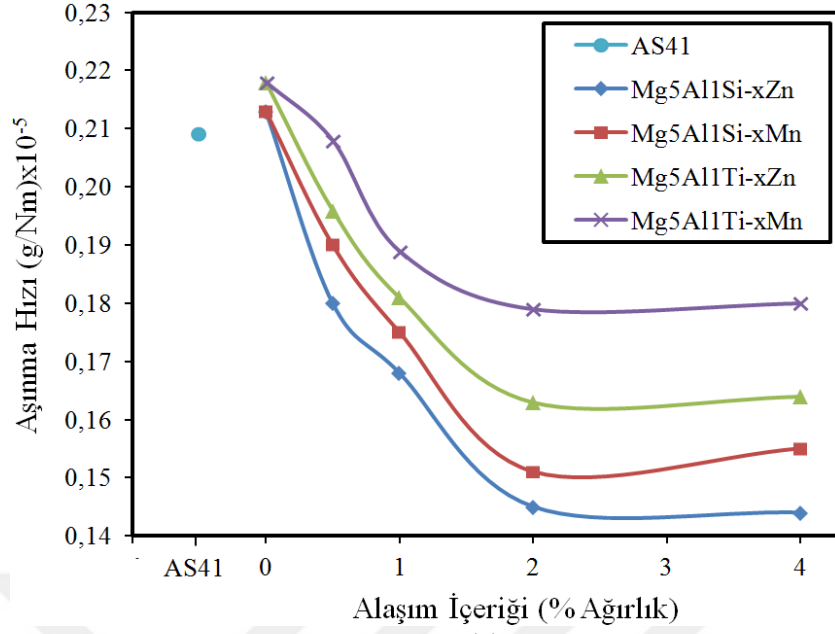
başlangıç aşınma hızı meydana gelirken, 20N ile 40 N yükler arasında daha kararlı durumdaki aşınma hızı meydana gelmiştir.

Yüke bağlı aşınma hızı grafiğini yükün etkisinden bağımsız hale getirmek için grafiklerin eğimi alınmıştır. Böylelikle Şekil 8.10'daki alaşım içeriğine bağlı g/m cinsinden aşınma hızı grafiği elde edilmiştir.

Verilen bir yükte ve verilen bir kayma mesafesinde en fazla ağırlık kaybı Mg5Al1Ti alaşımı sergilerken en düşük ağırlık kaybı Mg5Al1Si-4Zn alaşımından test edilen numune üzerinde ölçülmüştür. Şekil 8.10'dan da görüldüğü gibi %2'ye kadar alaşım içeriği ile aşınma hızı orta hızda azalırken %2 ve %4 arasındaki alaşım içeriğinde sabit kararlı bir aşınma hızı belirlenmiştir. Belirli bir yük altında Mg5Al1Si master alaşımı Mg5Al1Ti master alaşımından daha düşük aşınma hızı sergilemiştir. Mg5Al1Si master alaşımına XZn ilavesi ile elde edilen aşınma hızı, XMn ilavesi ile belirlenen aşınma hızından bir miktar düşüktür.

Tüm yüklerde Zn ilavesi Mn ilavesine nazaran daha iyi bir aşınma direnci sergilemiştir. Bu durum Zn ilaveli alaşımların sertliği ve mekanik özelliklerin daha yüksek olmasına dayandırılabilir. Literatürde de bahsedildiği gibi uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır (Dasa, 2010). Kahev ve arkadaşları Mg-Al-Zn alaşımının aşınma davranışı ile ilgili yaptığı benzer bir çalışmada farklı kayma hızlarında aşınma deneyi yapmıştır. 0,5 kayma hızında yaptığı deneyde 10N-30N yükler arasında kararlı bir aşınma, 50N-100N yüklerde ise daha şiddetli bir aşınma meydana geldiğini tespit etmiştir (Asla, 2010).

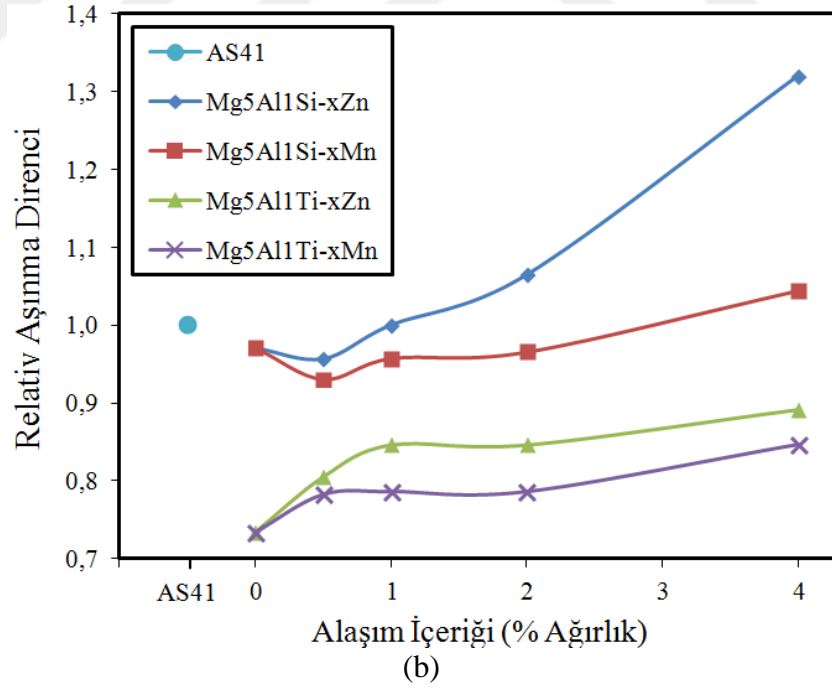
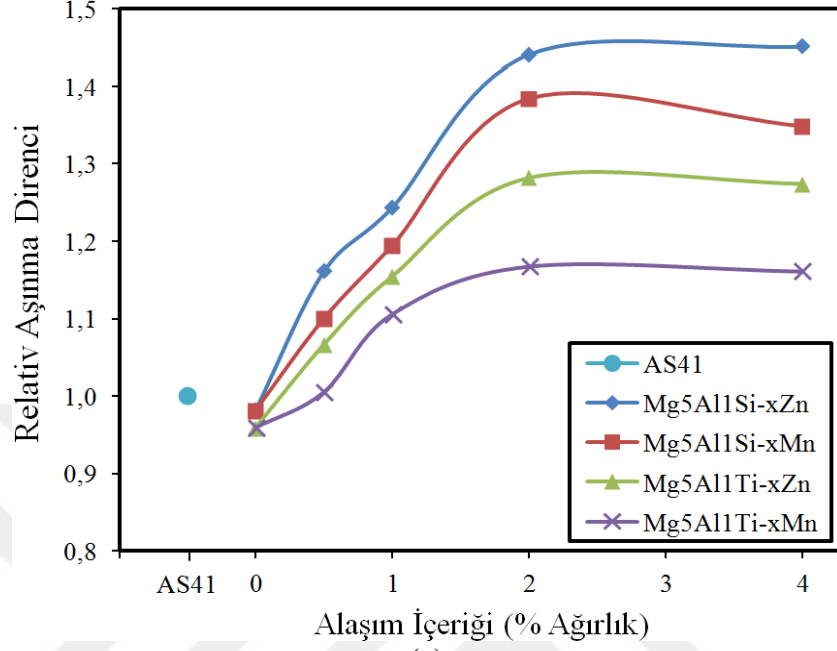
Şekil 8.10'da verilen değerler kullanılarak başlangıç ve kararlı durumdaki aşınma hızı değerlerinin yükten bağımsız olarak değişimi Şekil 8.11'de verilmiştir.



Şekil 8.11. İncelenen alaşımların a) başlangıç durumdaki ve b) kararlı durumdaki aşınma hızının alaşım içeriğine bağlı değişim grafiği.

Şekil 8.11'deki grafiğe bakıldığında başlangıç durumdaki aşınma hızı değerinin kararlı durumdaki aşınma hızı değerinden 3-4 kat büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca başlangıç durumdaki aşınma hızı değerleri %2 alaşım içeriğine kadar hızlı bir şekilde azalırken %2 alaşım içeriğiyle birlikte aşınma hızı sabit kalmıştır.

Kararlı durum aşınma hızı koşulunda AS41'e göre diğer incelenen alaşımların relativ (göreceli) aşınma dirençlerinin değişimi Şekil 8.12'de verilmiştir.



Şekil 8.12. Şekil 8.11'deki verilerden elde edilen alaşım içeriğine bağlı a) başlangıç durumdaki ve b) kararlı durumdaki relativ aşınma direnci.

AS41 alaşımının aşınma hızı referans olarak alınarak diğer alaşımların başlangıç ve kararlı durum relativ aşınma dirençleri hesaplanarak Şekil 8.12' verilmiştir. AS41 alaşımının relativ aşınma direnci 1 olarak kabul edildiğinde ....

Aşınma sonuçlarına bakıldığında genel olarak Si elementi içerikli alaşımlar Ti elementi içerikli alaşımlardan daha iyi aşınma dayanımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar da çalışmada tespit edilen mekanik özelliklerle uyumaktadır. Si ilavesinin Mg'un aşınma davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalarda normal yüklemelerde artan Si ilavesinin Mg-Si alaşımlarında aşınma oranını azalttığı belirtilmiştir (Ahlatcı, 2008; Kumar, 2013).

Çizelge 7.13 ve izelge 7.14'e baktığımızda tüm alaşımlarda uygulanan yük miktarı arttıa sürtünme katsayısı azalmaktadır. Alaşım içeriğine göre sürtünme katsayısı değişimi mekanik özellik ve aşınma ağırlık kaybı sonuçları ile uyum içerisinde dir. Şekil 7.40 ve Şekil 7.42'deki incelenen alaşımların aşınma deneyi sonrası stereo mikroskop makro görüntüleri incelendiğinde, ürünlerinin koptuktan sonra malzemeyi terk etmediği, parçaya sıvanarak apak oluşumu meydana getirdiği görülmektedir. Artan yük ile beraber sürtünme katsayısındaki düşüş bu sıvanmalara dayandırılabilir.

## BÖLÜM 9

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; AS41, MgAl1Si, Mg5Al1Ti master alaşımları ve Mg5Al1Si, Mg5Al1Ti master alaşımlarına %0,5, %1, %2 ve %4 oranlarında Zn ve/veya Mn elementi ilave edilen alaşımların optik mikroskop, stereo mikroskop, EDS aparatına sahip taramalı elektron mikroskobu, X ışınları cihazı ile metalografik incelemeleri ve yapı analizleri yapılmış, mekanik özelliklerinin belirlemek amacıyla sertlik ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İncelenen alaşımların korozyon dayanımlarını belirlemek için 30gr/l NaCl + 10ml/l HCl çözeltisi içerisinde farklı sürelerde daldırma korozyonu ve potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri uygulanmıştır. Alaşımların aşınma özelliklerini belirlemek için kuru ortamda pin-on-disk aşınma cihazında 5-40N yük altında 12 km kayma mesafesinde aşınma deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Mikroyapı sonuçları Mg5Al1Si ve Mg5Al1Ti master alaşımlarına Zn ve/veya Mn elementi ilavesi ile tane boyutunun incelendiğini göstermiştir. Mg5Al1Si master alaşımına %4 Zn ilave edildiğinde iğnesel çin yazısı ve/veya çokgen görümlü Mg<sub>2</sub>Si ile tane sınırları boyunca Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazlarının yanı sıra MgZn fazının ve %4 Mn elementi ilave edildiğinde ise MgZn fazının yerine Al<sub>6</sub>Mn fazının oluştuğu görülmektedir. Mg5Al1Si master alaşımında oluşan fazlara benzer olarak α-Mg matrisi içinde Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazının yanı sıra Mg5Al1Ti master alaşımına %4 Zn elementi ilave edildiğinde, MgZn fazı ve %4 Mn ilave edildiğinde ise Al<sub>6</sub>Mn bileşiği tespit edilmiştir.

Her bir master alaşıma Zn ve/veya Mn ilavesi ile sertlik ve mekanik özellikler de artış gözlenmiştir. Master alaşımları kıyaslandığında Si elementi ilaveli alaşımların

Ti ilaveli alaşımlardan daha yüksek sertlik ve mukavemete sahip olması  $Mg_2Si$  fazına dayandırılmaktadır.

Daldırma korozyonu sonrasında hesaplanan başlangıç korozyon hızı 1300 mm/yıl ile 400 mm/yıl aralığında değişirken kararlı durum korozyon hızı değerleri 180 mm/yıl ile 80 mm/yıl aralığında değişmiştir. Daldırma korozyonu sonrası korozyon numunelerinde meydana gelen incelme değerlerinden hesaplanan mm/yıl cinsinden incelme hızı değerleri ise 1000 mm/yıl ile 600 mm/yıl bandında değişim göstermiştir. Alaşım içeriğine bağlı olarak belirlenen bu değerde örneğin %2 alaşım içeriğinde korozyon hızı değeri en yüksek olan alaşım  $Mg_5Al_1Si-2Mn$  alaşımı iken korozyon hızı değeri en düşük olan alaşım  $Mg_5Al_1Ti-2Zn$ 'dir.

Daldırma korozyon deneyi sonrası yüzeyden ve kesitten optik mikroyapı görüntüleri, stereo mikroskop görüntüleri, SEM görüntüleri ve EDS analizleri; korozyonun yüzeyden iç kısımlara ilerlediğini,  $Mg_5Al$ 'ye ilave edilerek master alaşımları oluşturan Si ve Ti elementlerinin korozyon ilerlemesindeki rollerinin etkili olduğunu göstermiştir. Korozyon dayanımı en yüksek olan  $Mg_5Al_1Ti-4Zn$  alaşımında yapıda oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı ( $\beta$ ) ve  $MgZn$  intermetalik fazlarının korozyon oluşumuna karşı bariyer etkisi gösterdiği tespit edilmiştir.

Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrası  $Mg_5Al_1Ti-4Zn$  alaşımının en düşük korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) değerine sahip olması yapıda katı eriyik oluşturan Ti elementi ve korozyon oluşumuna karşı bariyer etkisi oluşturan  $Mg_{17}Al_{12}$  ve  $MgZn$  fazına dayandırılmaktadır.

Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrası hesaplanan korozyon ilerleme hızı 7000 mm/yıl ile 3500 mm/yıl arasında saçılım göstermektedir. Korozyon akım yoğunluğuna ( $I_{corr}$ ) göre yapılan korozyon hızı değerleri ise 1200 mm/yıl ile 70 mm/yıl arasında saçılım göstermektedir. Buradan ampilik bağıntılarla hesaplanan değerlerle gerçekte ölçülen değerlerin örtüşmediği görülmektedir. bu denli yüksek çıkması nedeni devreden sürekli alım geçmesi nedeni ile hidrojen gazı katotda birikmediği için metal yüzeyinde korozyonu yavaşlatacak bir hidrojen tabakası oluşamamasından kaynaklanabilir.

Aşınma sonuçları mukavemet sonuçları ile uyumlu olarak değiştiği görülmektedir. Uygulanan yükün artması ile aşınma numuneleri üzerinde oluşan izler daha verin ve geniş hale gelmiş, plastik deformasyon sonucu çapaklanmalar görülmüştür. Aşınma deneyi sonuçlarında ağırlık kaybı kayma mesafesi grafikleri, sabit kayma hızında kümülatif ağırlık kaybı kayma mesafesi ile lineer olarak değişmiştir. Master alaşımlardan Mg5Al1Si master alaşımı daha iyi aşınma dayanımı gösterirken Mg5Al1Si-4Zn alaşımı en yüksek aşınma dayanımı sergilemiştir.

İleriki çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur;

Çalışma kapsamında üretilen alaşımlara farklı koşullarda uygulanacak ısı işleminin mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi incelenebilir.

Bu çalışmada master alaşımlardan biri olan AS41 alaşımının yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin iyi olduğu rapor edildiği için bu çalışmaya ilave olarak sürünme davranışı incelenebilir.

Dayanım-Sertlik ilişkisi ve Dayanım-Tane boyutu ilişkisi grafiklerinin eğiminden çıkartılan ampirik bağıntıların daha geniş alaşım standartları için yaygınlaştırılması yapılabilir ve böylece katsayımın optimizasyonu sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Aghion, E., Bronfin, B., and Elizer, D., “The role of the magnesium industry in protecting the environment”, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 381–385 (2001).
- Ai X., and Quan G., “Effect of Ti on the Mechanical Properties and Corrosion of Cast AZ91 Magnesium Alloy”, *The Open Materials Science Journal*, 6: 6–13 (2012).
- 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: 382–391 (2006).
- Altun, H., Sen, S., ve Gavgalı, M., “Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Özellikleri”, *Atatürk Üniversitesi Makine Muhendisliği*, Erzurum, 70–83 (2002).
- Arrabal, R., Mingo, B., Pardo, A., Matykina, E., Mohedano, M., Merino, M. C., Rivas, A., and Maroto, A., “Role of alloyed Nd in the microstructure and atmospheric corrosion of as–cast magnesium alloy AZ91”, *Corrosion Science*, 97: 38–48 (2015).
- Asla, K. M., Masoudib, A., and Khomamizadehb F., “The effect of different rare earth elements content on microstructure, mechanical and wear behavior of Mg–Al–Zn alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 527: 2027–2035 (2010).
- Asla, K. M., Tarib, A., and Khomamizadehb, F., “The effect of different content of Al, RE and Si element on the microstructure, mechanical and creep properties of Mg–Al alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 523: 1–6 (2009).
- Baker, H., "Alloy Phase Diagrams", *Asm Handbook*, 3: 280–285 (1998).
- Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U., and Pai, B. C., “Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science & Engineering*, 457: 275–281 (2007).
- Barber, L., “Worcester Polytechnic Institute”, Master Thesis, *Worcester*, 100–120 (2004).
- Barber, L. P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium–aluminum alloys”, Yüksek Lisans Tezi, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 5–40 (2004).
- Beffort, O., and Hausmann, C., “Das Leichtmetall Magnesium und seine egierungen”, *EMPA Mg seminar*, Thun, 15–22 (1999).



- Ben-Hamu, G., Eliezer, D., and Shin, K. S., “The role of Mg<sub>2</sub>Si on the corrosion behavior of wrought Mg–Zn–Mn alloy”, *Intermetallics*, 16: 860–867 (2008).
- Blawert, C., Hort, N., and Ku, K., “Automotive applications of magnesium and its alloys”, *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 57: 397–408 (2004).
- Bolstad, J., “Magnesium Alloy Development for Intelligent Magnesium Designs”, *SinoMaG seminar*, Beijing–China, 8–14 (2000).
- Bowles, A. L., and Caceres, C. H., “Anomalous Hardness Behaviour of High Pressure Die–Cast Mg–Al Alloys”, *Metallurgical Science and Technology*, Associato alla Unione Stampa Periodica Italiana, Torino, 25–26 (1983).
- Brown, R., “Magnesium”, *Mining Journal Annual Review for*, 1–14 (2004).
- Cai, S., Lei, T., Li, N., and Feng, F., “Effects of Zn on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg–Zn alloys”, *Materials Science and Engineering C*, 32: 2570–2577 (2012).
- 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: 1958–1963 (2011).
- Candan, Ş., Kusdemir, H., Türkmen, M., Koç, E., Ünal, M. and Candan, E., “Effect of Ti additions on corrosion behaviour of AZ91 magnesium alloys” **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)**, Karabük, 60–65 (2009).
- Cao, G, Kou, S. “Hot cracking of binary Mg–Al alloy castings”, *Materials Science and Engineering*, 417: 230–238 (2006).
- Cao, P., Qian, M. and David, H., “Effect of manganese on grain refinement of Mg–Al based alloys,” *Scripta Materialia*, 54: 1853–1858 (2006).
- Carlton, C. E., and Ferreira, P. J., “What is behind the inverse Hall–Petch effect in nanocrystalline materials”, *Acta Materialia*, 55: 3749–3756 (2007).
- Cashion, S. P., Ricketts, N. J., Frost M. T., Korn, C., “The Protection of Molten Magnesium and its Alloys During Die–Casting, CSIRO”, *Manufacturing Science and Technology*, 3–9. (2000).
- Chen, H., and Alpas, A. T., “Sliding wear map for the magnesium alloy Mg–9Al–0.9 Zn (AZ91),” *Wear*, 246: 106–116 (2000).
- Chen, K., Li, Z. Q., Liu, J. S., Yang, J. N., Sun, Y. D., and Bian, S. G., “The effect of Ba addition on microstructure of in situ synthesized Mg<sub>2</sub>Si/Mg–Zn–Si composites,” *Journal of Alloys and Compounds*, 487: 293–297 (2009).
- Choi, J. Y., and Kim, W. J., “Significant effects of adding trace amounts of Ti on the microstructure and corrosion properties of Mg–6Al–1Zn magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 614: 49–55 (2014).

- Choong, D. L., “Effect of grain size on the tensile properties of magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 459: 355–360 (2007).
- 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*, 60: 845–848 (2005).
- Çıtak, K., “Magnezyum alaşımları seçim ve kullanım kriterleri”, *Metal Dünyası Dergisi*, Eylül, 68–80 (2004).
- Cizek, L., Greger, M., Dobrzanski, L. A., Juricka, I., Kocich, R., Pawlica, and L., Tanski, T. “Mechanical properties of magnesium alloy AZ91 at elevated temperature”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18: 203–206 (2006).
- Cizek, L., Hanus, A., Sozanska, M., Tanski, T., and Pawlica, L., “Structure Characteristics of Magnesium Alloys With Admixture of Aluminium, Silicon and Zirconium” *Acta Metallurgica Slovaca*, 13: 531–538 (2007).
- Cong, M., Li, Z., Liu, J., Yan, M., Chen, K., and Sun, Y., “Effect of Ca on the microstructure and tensile properties of Mg–Zn–Si alloys at ambient and elevated temperature”, *Journal of Alloys and Compounds*, 539: 168–173 (2012).
- Dasa, S., Morales, A. T., and Alpas, A. T., “Microstructural evolution during high temperature sliding wear of Mg–3% Al–1% Zn (AZ31) alloy”, *Wear*, 268: 94–103 (2010).
- Dobrzanski, L. A., Tanski, T., Cizek, L., and Brytan, Z., “Structure and properties of magnesium cast alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192: 567–574 (2007).
- Doruk, M., “Korozyon ve Önlenmesi”, *ODTÜ*, Ankara (1982).
- Duffy, L., “Magnesium Alloys–Zirconium Containing Casting Alloys”, *Materials World*, 4: 127–130 (1996).
- Durmaz A. “Yerinde oluşturulmuş magnezyum silisit partikül takviyeli alüminyum–magnezyum–silisyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine mangan ve kurşunun etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 46–60 (2009).
- Durrani, S., “Optimizing Convertible Automobile Design Trough the Use of Magnesium”, *SAE Technical Report*, 930411 (1993).
- Eliezer, D., Aghion, E., and Froes, F. H., “Magnesium Science, Technology and Applications”, *Advanced Performance Materials*, 1: 201–212 (1998).
- Fan, Y., Wu, G., and Zhai, C., “Effect of Strontium on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of AZ91”, *Materials Science*, 1: 567–570 (2007).

Feng, X., Xuegang, M., and Yangshan, S., “Microstructures and mechanical properties of AZ91 alloy with combined additions of Ca and Si”, *Journal Materials and Science*, 41: 4725–4731 (2006).

Friedrich, H., and Schumann, S., “Research for a new age of magnesium in the automotive industry”, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 276–281 (2001).

Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., and Wu, S., “Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1–7 (1996).

Gasko, M., and Rosenberg, G., “Correlation between hardness and tensile properties in ultra-high strength dual phase steels – short communication” *Materials Engineering*, 18: 155–159 (2011).

Ghorbania, M. R., Emamy, M., Khorshidib, R., Rasizadehghania, J. and Emamic, A. R. “Effect of Mn addition on the microstructure and tensile properties of Al–15%Mg2Si composite”, *Materials Science and Engineering A*, 550: 191–198 (2012).

Guangyin, Y., Manping, L., Wenjiang, D., and Inoue, A., “Mechanical properties and microstructure of Mg–Al–Zn–Si–base alloy”, *Materials Transactions*, 44: 458–462 (2003).

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).

Güven, O., “Alüminyum silisyum magnezyum döküm alaşımlarının yapı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ*, İstanbul (2006).

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: 276–280 (2005).

Housh, S., Mikucki, B., and Stevenson, A., “Selection and Application of Magnesium and Magnesium Alloys”, *ASM Handbook*, 10<sup>th</sup> Edition, 2: 455–479 (1998).

Jiang, J., Wang, Y., Li Y., Shan, W., and Luo, S., “Microstructure and mechanical properties of the motorcycle cylinder body of AM60B magnesium alloy formed by combining die casting and forging”, *Materials and Design*, 37: 202–210 (2012).

Johansson, S., "Magnesium Alloys, Summary of chapter 1–7 in Light alloys by I. J. Polmear", *Engineering Materials*, 5: 17–20 (2002).

Juchmann, P., "Technology of Magnesium and Magnesium Alloys", *Forming*, 269–315 (2006).

- Kainer, K. U., "The Current State of Technology and Potential For Further Development of Magnesium Applications" *Wiley-Vch*, Germany, 3–20 (2006).
- Kammer, C., "Wrought Alloys", *Magnesium Casting Alloys*, 204–214 (2006).
- Kang, D. H, Park, S. S., Oh, S., Kim, N. J., "Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg–Sn based alloys", *Materials Science & Engineering*, 449 (451): 318–321. (2007).
- 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: 149–150 (2005).
- King, J. F., "Technology of Magnesium and Magnesium Alloys", *Magnesium Technology*, 219–225 (2006).
- Koç E. "Biyouyumlu Magnezyum Alaşımlarının Araştırılması" Doktora tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 82–110 (2013).
- Kramer, "Magnesium It's Alloys and Compounds", *U.S Geological Survey Open-FileReport*, USA, 1–341 (2002).
- Kulekci, M. K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, 39: 851–865 (2008).
- Kumar, K. K. A., Pillai, U. T. S., and Pai, B. C. M., "Chakraborty Dry sliding wear behaviour of Mg–Si alloys" *Wear*, 303: 56–64 (2013).
- Kurze, P., "Corrosion and Surface Protections, Magnesium Technology", *Springer*, 1: 431–494 (2006).
- Landkof, B., "Magnesium alloys applications", *Magnesium Alloys Science, Technology and Application*, 8: 293–316 (2005).
- Li, N., "Automotive Magnesium Applications and Life Cycle Environmental Assesment", *3. International Conference on SF6 and the Environment*, Scottsdale, Arizona, 1–26. (2004).
- Lin, M. C., Tsai, C. Y. and Uan, J. Y., "Converting hcp Mg–Al–Zn alloy into bcc Mg–Li–Al–Zn alloy by Electrolytic deposition and diffusion of reduced lithium atoms in a molten salt electrolyte LiCl–KCl", *Scripta Materialia*, 56: 597–600 (2007).
- 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).
- Lotfabadia, A. F., Idris, M. H., Ourdjini, A., Kadir, M. R. A., Farahany, S., and Rad, H. R. B., "Thermal characteristics and corrosion behaviour of Mg–xZn alloys for biomedical applications", *Bull. Mater. Sci.*, 36 (6): 1103–1113 (2013).

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*, 278: 66–76 (2000).

Ma, G. R., Li, X. L., Li, L., Wang, X., and Li, Q. F., "Modification of Mg<sub>2</sub>Si morphology in Mg–9%Al–0.7%Si alloy by the SIMA process", *Materials Characterization*, 62: 360–366 (2011).

Maleki, N., Meratian, M., Panjepour, M., and Foroozmehr, A., "The effect of Zinc on the morphology and wear resistance of Mg<sub>2</sub>Si–reinforced magnesium matrix composites" *18th International Conference On Composite Materials*, Korea (2011).

Matthew, J., Donachie, J., and Titanium, A., "Technical Guide", *Metals Park*, OH: ASM International, ISBN 0-87170-309-2, 11, (1998).

Mingbo, Y., and Jia. S., "Modification and refinement mechanism of Mg<sub>2</sub>Si phase in Sr containing AZ61–0.7Si magnesium alloy", *China Foundry*, 6: 37–42 (2009).

Mordike, B. L., and Ebert, T., "Magnesium Properties–applications–potential", *Materials Science & Engineering A*, 302: 37–45 (2001).

Mordike, B. L., and Kainer, K. U., "Magnesium Alloys and Their Applications", *Werkstoff- Informationsgesellschaft*, Frankfurt, 34–47, 125–132, 289–294, 477–482 (1998).

Nama, N. D., Mathesh, M., Thang, V. L., and Nguyen, H. T., "Corrosion behavior of Mg–5Al–xZn alloys in 3.5 wt.% NaCl solution", *Journal of Alloys and Compounds*, 616: 662–668 (2014).

Palta, A., "Yerinde oluşturulmuş magnezyum 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, 36–44 (2009).

Palta, A., Sun, Y., and Ahlatci, H., "Effect of copper addition on wear and corrosion behaviours of Mg<sub>2</sub>Si particle reinforced composites", *Material Design*, 36: 451–458 (2012).

Patel, B., Chaudhari, G. P. and Bhingole, P. P., "Microstructural evolution in ultrasonicated AS41 magnesium alloy," *Material Letters*, 66: 335–338 (2012).

Podosek, M. S, and Litynska, L., "Effect of yttrium on structure and mechanical properties of Mg alloys", *Materials Chemistry and Physics*, 80: 472–475 (2003).

Polmear, I. J., "Magnesium Alloys", *Metallurgy and Materials Science Series*, New York, 169–210 (1989).

Qudong, W., Wenzhou, C., Xiaoqin Z., Yizhen L., Wenjiang, D., Yanping, Z., Xiaoping, X., "Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy", *Journal Of Materials Science*, 36: 3035–3040 (2001).

Qudong, W., Yizhen, L., Xiaqin, Z., Wenjiang, D., Yanping, Z., Qinghua, L., and Jie, L., "Study on the fluidity of AZ91+xRE magnesium alloy", *Materials Science and Engineering*, 271: 109–115 (1999).

Salman, S., ve Gülsoy, Ö., "Metalografi Bilimi", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, (2014).

Santos, G. A., Neto, C. M., Osorio, W. R. and Garcia, A., "Design of mechanical properties of a Zn27Al alloy based on microstructure dendritic array spacing," *Material Design*, 28: 2425–2430 (2007).

Sarennah J. P., "The Bolting of Magnesium Components in Car Engines", Master Thesis, *University of Cambridge*, Cambridge, 6–10 (2001).

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).

Seçgin, G. O., "İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile üretilmiş AZ31 magnezyum alaşımının korozyon davranışının incelenmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5–54 (2012).

Song, G. L., and Atrens, A., "Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys", *Advanced Engineering Materials*, 1 (1): 11–33 (1999).

Sudholz, A. D., Birbilis, N., Bettles, C. J., and Gibson, M. A., "Corrosion behaviour of Mg-alloy AZ91E with atypical alloying additions", *Journal of Alloys and Compounds*, 471 (1–2): 109–115 (2009).

Sun, A., Sui, X., Li, H., and Wang, Q., "Interface microstructure and mechanical properties of zinc–aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy," *Material Design*, 67: 280–284 (2015).

Sun, Y., ve Ahlatci, H., "Mechanical and wear behaviors of Al–12Si–XMg composites reinforced with in situ Mg<sub>2</sub>Si particles", *Material Design*, 32: 2983–2987 (2011).

Ünver, G., "AZ91 magnezyum alaşımına Ti ve Cr alaşım elementlerinin ilavesinin özelliklere etkisinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 20–30 (2011).

Wang, L., Guo, E., and Ma, B., "Modification effect of lanthanum on primary phase Mg<sub>2</sub>Si in Mg–Si alloys", *Journal of Rare Earths*, 26: 105–109 (2008).

Yu, L., Nakata, K., and Liao, J., "Microstructures and mechanical properties in friction stir zone of thixo–molded AS41 mg alloy," *Materials Transactions*, 50: 2378–2383 (2009).

Yu, Z., Zhao, H. Y., Hu, X. D., and Ju, D. Y., "Effect of elements Zn, Sn and In on microstructures and performances of AZ91 alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 318–323 (2010).

Zhang, J., Guob, Z. X., Pan, F., Li, Z., and Luo, X., "Effect of composition on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Al alloys," *Materials Science and Engineering A*, 456: 43–51 (2007).

Zhang, Z., and Couture, A., "An Investigation of the Properties of Mg–Zn–Al Alloys", *Scripta Mater*, 39 (1): 45–53 (1998).

Zhao, P., Wang, Q., Zhai, C., and Zhu, Y., "Effects of strontium and titanium on the microstructure, tensile properties and creep behavior of AM50 alloys", *Materials Science and Engineering*, 1: 318–326, 2007.



## ÖZGEÇMİŞ

Harun ÇUG, 1981 yılında Karabük'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Safranbolu'da, lise öğrenimini ise Karabük Anadolu Ticaret Meslek Lisesi Bilgi İşlem bölümünde tamamladı.

2001 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal Öğretmenliği programını kazanmış olup, 2005 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğrenimini 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2010 yılında başladığı doktora öğrenimine halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda devam etmektedir. Harun ÇUG evli ve bir çocuk babasıdır.

### **ADRES VE İLETİŞİM BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Demir Çelik Kampüsü  
Balıklarkayası Mevkii / 78050 KARABÜK

Tel : (544) 842 6208

E-posta : hcug@karabuk.edu.tr