

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALAY VE ÇİNKO ELEMENTLERİNİN  
MAGNEZYUM METALİNE İLAVESİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Met.ve Malz. Müh. Seda KESKİN**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZ. MÜH.  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. S.Can KURNAZ**

**OCAK 2011**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

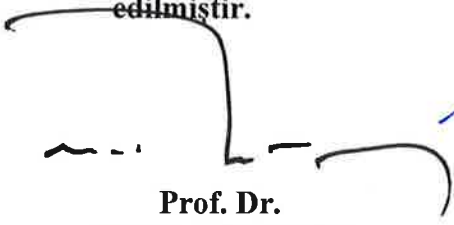
**KALAY VE ÇİNKO ELEMENTLERİNİN  
MAGNEZYUM METALİNE İLAVESİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Met.ve Malz. Müh. Seda KESKİN**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZ. MÜH.**

Bu tez 24/01/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Mehmet DURMAN  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
S. Can KURNAZ  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Uğur SARAÇ  
Üye

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılması hususunda büyük yardımını gördüğüm saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. S.Can KURNAZ 'a minnettarım. Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım özellikle Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Araştırma Görevlilerinden Hüseyin Şevik'e, Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Mustafa KARA'ya ve Mühendislik Fakültesi Teknikerleri Ebubekir Cebeci, Ersan DEMİR ve Metin GÜNAY 'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca TESLAB'da yapmış olduğum test ve incelemelerde yardımcı olan Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e ve tüm laboratuvarlarını kullanmama izin veren Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Cuma BİNDAL'a saygılarımı sunarım.

Her türlü zorluğa rağmen beni yalnız bırakmayan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

|   |      |
|---|------|
| TEŞEKKÜRLER.....  | ii   |
| İÇİNDEKİLER .....   | iii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....  | vi   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....  | vii  |
| TABLolar LİSTESİ.....   | xi   |
| ÖZET.....   | xii  |
| SUMMARY.....  | xiii |
| BÖLÜM 1.  |      |
| GİRİŞ.....  | 1    |
| BÖLÜM 2.  |      |
| MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI .....   | 4    |
| 2.1. Giriş.....   | 4    |
| 2.2. Magnezyum Elementinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....                             | 6    |
| 2.3. Magnezyum Alaşımının Simgeleme Dizgesi.....  | 7    |
| 2.4. Magnezyum Alaşımaları.....   | 8    |
| 2.4.1. Magnezyum-Alüminyum alaşımaları.....   | 12   |
| 2.4.2. Magnezyum-Alüminyum-Çinko alaşımaları.....   | 14   |
| 2.4.3. Magnezyum-Kalay alaşımaları.....   | 19   |
| 2.4.4. Alkalın ve/veya nadir elementlerin eklenmesi ile<br>magnezyum döküm alaşımaları..... | 20   |
| 2.4.5. Magnezyum alaşımalarının katılaşma davranışı.....                                    | 22   |
| 2.4.6. Magnezyum alaşımalarındaki intermetalikler.....                                      | 25   |
| 2.5. Magnezyum Alaşımının Korozyon Özellikleri.....   | 27   |
| 2.5.1. Galvanik korozyon.....   | 30   |

|  |    |
|--|----|
| 2.5.2. Oyuk korozyonu.....                                   | 31 |
| 2.5.3. Korozyondan korunma yöntemleri.....                   | 32 |
| <br>   |    |
| BÖLÜM 3.   |    |
| MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....               | 34 |
| 3.1. Giriş.....  | 34 |
| 3.2. Kum Kalıba Döküm.....                                   | 39 |
| 3.3. Kokil Kalıba Döküm.....                                 | 39 |
| 3.3.1. Alçak basınçlı döküm.....                             | 43 |
| 3.3.2. Vakumlu kalıcı kalıba döküm.....                      | 44 |
| 3.3.3. Boşaltma döküm.....                                   | 44 |
| <br>   |    |
| BÖLÜM 4.   |    |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                     | 45 |
| 4.1. Çalışma Programı.....                                   | 45 |
| 4.2. Kullanılacak Deney Malzemeleri.....                     | 45 |
| 4.3. Fırın Tasarımı.....                                     | 47 |
| 4.4. Alaşımların Üretimi.....                                | 51 |
| 4.5. Alaşımların Kimyasal Analizi.....                       | 53 |
| 4.6. Metalografi Çalışmaları.....                            | 55 |
| 4.7. Mekanik Testler.....                                    | 56 |
| 4.7.1. Sertlik deneyi.....                                   | 56 |
| 4.7.2. Çekme deneyi.....                                     | 56 |
| 4.7.3. Basma deneyi.....                                     | 59 |
| 4.7.4. Korozyon deneyi.....                                  | 59 |
| <br>   |    |
| BÖLÜM 5  |    |
| DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....                        | 63 |
| 5.1. Alaşımların Mikroyapısı.....                            | 63 |
| 5.2. Mekanik Testler.....                                    | 76 |
| 5.2.1. Üretilen alaşımlarda sertlik deneyi ve sonuçları..... | 77 |
| 5.2.2. Üretilen alaşımlarda çekme deneyi ve sonuçları.....   | 80 |
| 5.2.3. Üretilen alaşımlarda basma deneyi ve sonuçları.....   | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.4. Üretilen alaşımlarda korozyon deneyi ve sonuçları..... | 89  |
| BÖLÜM 6   |     |
| SONUÇLAR.....   | 96  |
| KAYNAKLAR.....  | 99  |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 104 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                    |   |
|--------------------|---|
| HSP                | : Hegzagonal sıkı paket   |
| °C                 | : Santigrad derece  |
| g/mol              | : gram/mol oranı  |
| g/ cm <sup>3</sup> | : gram/santimetreküp  |
| ASTM               | : Amerikan standart   |
| ppm                | : parts per million (milyonda bir)  |
| SF <sub>6</sub>    | : Sülfür hegzaflorür  |
| AZ91               | : %9 Alüminyum ve % 1 Çinko içeren magnezyum alaşımı                            |
| AM60               | : %6 Alüminyum ve % 0 Mangan içeren magnezyum alaşımı                           |
| RE                 | : Nadir elementler  |
| QE                 | : Neobyum elementinin gümüş ile kullanılmasıyla meydana gelen magnezyum alaşımı |
| WE                 | : İtiryum elementi ile alaşımlandırılmış magnezyum alaşımı                      |
| N                  | : Normalite   |
| HP                 | : Yüksek saflık   |
| mm                 | : Milimetre   |
| µm                 | : Mikrometre  |
| OM                 | : Optik mikroskop   |
| SEM                | : Taramalı electron mikroskopu  |
| XRD                | : X ışınları difraksiyonu (X-ray diffraction)                                   |
| EDS                | : Enerji ayırma spektrometresi (Energy dispersive spektrometer)                 |
| N/mm <sup>2</sup>  | : Newton/milimetrekare  |
| Kg/mm <sup>2</sup> | : Kilogram/milimetrekare  |
| MPa                | : Megapascal  |
| GPa                | : Gigapascal  |
| HRB                | : Brinell sertlik birimi  |

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| HV                | : Vickers sertlik birimi              |
| $\delta$          | : Yoğunluk                            |
| EW                | : Equivalent ağırlık                  |
| mA                | : Miliamper                           |
| mpy               | : Yılda miliinç (milli-inch per year) |
| V                 | : Volt                                |
| mV/s              | : Milivolt/dakika                     |
| $\varepsilon$ (%) | : Yüzde uzama                         |
| $I_{kor}$         | : Korozyon akımı                      |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.1.  | a) Magnezyumda alt tane oluşumu, b) magnezyumda bazal kayma ve ikizlenme ve c) yüksek sıcaklıkta tane sınırı kayması... | 5  |
| Şekil 2.2.  | Başlangıç düzeninde Pramidal düzlemler.....   | 6  |
| Şekil 2.3.  | Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı.....  | 13 |
| Şekil 2.4.  | Mg-Al alaşımının (AM60) tipik mikroyapı görüntüsü.....  | 14 |
| Şekil 2.5.  | Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi....   | 15 |
| Şekil 2.6.  | Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı.....  | 16 |
| Şekil 2.7.  | AZ91 alaşımının mikroyapısı.....  | 18 |
| Şekil 2.8.  | AZ91 alaşımın mikroyapıda tane görünüşü.....  | 18 |
| Şekil 2.9.  | Magnezyum-Kalay ikili denge diyagramı.....  | 20 |
| Şekil 2.10. | Çeşitli bileşimlerdeki Mg-Al alaşımlarında a) Lamel, b) lifli, c) parçalı ayrılmış ve d) tamamen ayrılmış yapı.....     | 23 |
| Şekil 2.11. | AM60 alaşımına Sn ilavesinin tane boyutuna etkisi.....  | 24 |
| Şekil 2.12. | Magnezyum döküm alaşımları ile GD-AlSi <sub>9</sub> Cu <sub>3</sub> alaşımlarının korozyon testleri.....                | 30 |
| Şekil 2.13. | AM60 alaşımının oyuk korozyon mekanizması.....  | 32 |
| Şekil 3.1.  | a) Sıcak kamaralı döküm makinesi, b) Soğuk kamaralı döküm makinesi.....   | 38 |
| Şekil 3.2.  | Düşük basınçlı döküm sistemi.....   | 38 |
| Şekil 3.3.  | Menteşeli bir kokil kalıp örneği.....   | 39 |
| Şekil 3.4.  | İki parçalı bir kokil kalıpta döküm işleminin gösterimi.....  | 41 |
| Şekil 3.5.  | Alçak basınçlı döküm.....   | 43 |
| Şekil 4.1.  | Döküm yapılan kalıbın katı modelleme programındaki görüntüsü.....   | 48 |
| Şekil 4.2.  | Dökümde üretilen plakaların katı modelleme programındaki görüntüsü.....   | 48 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.3.  | Döküm yapılan potanın katı modelleme programındaki şematik görüntüsü.....  | 49 |
| Şekil 4.4.  | Döküm için özel tasarlanan fırının katı modelleme programındaki şematik görüntüsü.....                                     | 49 |
| Şekil 4.5.  | Kurulan fırın sisteminin fotoğraf şeklinde görüntüsü.....  | 50 |
| Şekil 4.6.  | Kurulan fırın sisteminde potanın fotoğraf görüntüsü.....   | 50 |
| Şekil 4.7.  | Kurulan fırını çalıştırma sistemi.....   | 51 |
| Şekil 4.8.  | Üretilen saf magnezyum+%1Zn+%1Sn alaşımının fotoğraf görüntüsü.....  | 52 |
| Şekil 4.9.  | Üretilen saf magnezyum+%1Zn+%3Sn alaşımının fotoğraf görüntüsü.....  | 53 |
| Şekil 4.10. | Kimyasal analizde kullanılan Alevli Atomik Absorpsiyon Spektrometri cihazının görüntüsü.....                               | 54 |
| Şekil 4.11. | Çekme numunesi.....  | 56 |
| Şekil 4.12. | Üretilen çekme numuneleri.....   | 57 |
| Şekil 4.13. | Çekme testi cihazının görüntüsü.....   | 57 |
| Şekil 4.14. | Çekme numunesinin çekme cihazındaki konumu.....  | 58 |
| Şekil 4.15. | Çekme cihazı verilerinin bilgisayar ortamına aktarımı.....   | 58 |
| Şekil 4.16. | Üretilen basma deneyi numunesi ve boyutları.....   | 59 |
| Şekil 4.17. | Üretilen korozyon deneyi numunesi ve boyutları.....  | 60 |
| Şekil 4.18. | Korozyon deneyi numunesinin katı modelleme programında çizilmiş görüntüsü ve boyutları.....                                | 60 |
| Şekil 4.19. | Korozyon deney cihazı .....  | 62 |
| Şekil 4.20. | Korozyon deneyi ekipmanları.....   | 62 |
| Şekil 5.1.  | a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3, d) Alaşım 4, e) Alaşım 5, f) Alaşım 6 ve g) Alaşım 7'nin mikroyapı görüntüleri..... | 64 |
| Şekil 5.2.  | Saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilave edilen alaşımların XRD analizleri.....   | 65 |
| Şekil 5.3.  | Saf magnezyuma ağırlıkça %1 çinko (Zn) ve % kalay (Sn) ilave edilen alaşımların XRD analizleri.....                        | 65 |
| Şekil 5.4.  | Kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin saf magnezyumun tane boyutuna etkisi.....                                   | 67 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 5.5.  | a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3, d) Alaşım 4, e) Alaşım 5, f) Alaşım 6 ve g) Alaşım 7'nin SEM görüntüleri.....   | 68 |
| Şekil 5.6.  | Alaşım 1'in EDS analizi.....   | 71 |
| Şekil 5.7.  | Alaşım 2'nin EDS analizi.....  | 71 |
| Şekil 5.8.  | Alaşım 3'ün EDS analizleri.....  | 72 |
| Şekil 5.9.  | Alaşım 4'ün EDS analizleri.....  | 73 |
| Şekil 5.10. | Alaşım 5'in EDS analizleri.....  | 74 |
| Şekil 5.11. | Alaşım 6'nın EDS analizleri.....   | 75 |
| Şekil 5.12. | Alaşım 7'nin EDS analizleri.....   | 76 |
| Şekil 5.13. | Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi.....  | 78 |
| Şekil 5.14. | Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama akma mukavemet değerlerinin gösterimi.....   | 80 |
| Şekil 5.15. | Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama yüzde (%) uzama değerlerinin gösterimi.....  | 81 |
| Şekil 5.16. | Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama çekme mukavemet değerlerinin gösterimi.....  | 82 |
| Şekil 5.17. | Çekme deneyi sonrası kalay ve çinko ilaveli alaşımların kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3, d) Alaşım 4, e) Alaşım 5, f) Alaşım 6, g) Alaşım 7... | 86 |
| Şekil 5.18. | Basma deneyi sonrası numunenin görüntüsü.....  | 88 |
| Şekil 5.19. | Alaşımların ortalama basma mukavemet değerlerinin gösterimi...   | 88 |
| Şekil 5.20. | Tüm alaşımların $I_{kor}$ (mA) değerlerinin gösterimi.....   | 91 |
| Şekil 5.21. | Tüm alaşımların korozyon hızı değerlerinin gösterimi.....  | 92 |
| Şekil 5.22. | Ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların tafel eğrileri (%3,5 NaCl).....   | 94 |
| Şekil 5.23. | Ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilaveli alaşımların tafel eğrileri (%3,5 NaCl).....  | 95 |

## TABLULAR LİSTESİ

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tablo 2.1. | Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı.....                      | 4  |
| Tablo 2.2. | Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları.....            | 9  |
| Tablo 2.3. | Alaşım elementlerinin Magnezyum metali üzerindeki etkileri.....   | 10 |
| Tablo 2.4. | Basınçlı döküm uygulamalarında Sülfür hegzaförür kullanımı...     | 12 |
| Tablo 2.5. | Katı fazlar ve sembolleri.....                                    | 16 |
| Tablo 4.1. | Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçları.....               | 55 |
| Tablo 5.1. | Alaşımların ortalama tane boyutları.....                          | 66 |
| Tablo 5.2. | Uygulanan mekanik testlerin sonuçları.....                        | 77 |
| Tablo 5.3. | Elde edilen korozyon değerlerinin ortalaması.....                 | 90 |
| Tablo 5.4. | Bazı korozyon çözeltilerinden alınan kimyasal analiz sonuçları... | 93 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Magnezyum Alaşımaları, Kalay, Çinko, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Korozyon Davranışları

Bu çalışma da, saf magnezyumun mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerinde kalay ilavesinin (ağ. % 1-3-5) etkisi incelenmiştir. Kalay ilavesine ek olarak, sabit değerde çinko (ağ. % 1), kalay içeren alaşımlara ilave edilmiştir. Alaşımlar, kontrollü atmosfer altında kokil döküm yapılarak üretilmiştir.

Sonuçlarda, kalay ilavesinin mikroyapıyı modifiye etmiş ve tane boyutu azalmıştır. Çinko ilavesinde de daha küçük taneler gözlenmiştir. X ışınları difraktometresinde, tüm alaşımlarda ana fazların  $\alpha$ -Mg,  $Mg_2Sn$  olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca test edilen tüm alaşımlarda Zn esaslı intermetalikler gözlenmemiştir. Saf magnezyumun sertlik ve basma mukavemetleri, Sn ilavesinin ağırlıkça %5'e doğru artmasıyla artmıştır. Buna rağmen, saf magnezyumun çekme mukavemeti ağırlıkça %3 Sn ilavesine kadar artmıştır. Aynı durum ağırlıkça %1 Zn içeren alaşımlarda da gözlenmiştir, fakat Sn ilaveli alaşımlardan daha mukavemetlidir. En iyi uzama Mg-ağ.%3 Sn-ağ.%1 Zn alaşımında görülmüştür. Saf magnezyumun korozyon hızı, alaşım elementinin %5 Sn ilavesine doğru yükselmesiyle birlikte azalır. Zn ilavesinde, alaşımların korozyon direnci, Sn ilaveli alaşımlar ile kıyaslandığında artmıştır.

# THE ADDITION OF TIN AND ZINC ELEMENTS IN MAGNESIUM METAL AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES

## SUMMARY

Key Words: Magnesium alloys, Tin(Sn), Zinc(Zn), Microstructure, Mechanical Properties, Corrosion Behaviors

In this study, the effect of tin (wt. % 1-3-5) on the microstructure, mechanical and corrosion properties of pure magnesium were investigated. In addition tin, a constant value of Zn (wt. % 1) was added to alloys with Sn. The alloys were produced under a controlled atmosphere by a gravity-casting process.

The results show that the addition of Sn element modified the microstructure and decreased the grain size. In the case of Zn addition, the smaller grains were obtained. X-ray diffractometry revealed that the main phases are  $\alpha$ -Mg, Mg<sub>2</sub>Sn in the all of alloys. Furthermore, it is not observed any Zn based intermetallics in all alloys tested. The hardness and compressive strength of pure-Mg increased by adding Sn up to 5wt.% however, the tensile strength of pure-Mg increased by adding Sn up to 3wt.%. A similar trend is also observed in the alloys containing 1wt% Zn, but more strong than with only Sn. The greatest elongation were exhibited by Mg-3wt.% Sn-1wt.% Zn. The corrosion rate of pure-Mg decreased with increasing alloying element up to 5wt.% Sn. In the case of Zn addition, the corrosion resistance of alloys increased when compared with only Sn alloys.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelecek yıllar için anahtar amaçlardan birisi büyüyen çevresel tehlikeleri azaltmak için CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması olacaktır. Bu durum göz önüne alınarak, konstrüksiyon malzemesi olarak hafif metallerin kullanımı gelecekte önemini arttıracaktır. Bu nedenle, demirli bileşiklerden hafif metallere geçilmesinin altında, ağırlık azaltılması, verimliliğin artırılması, yakıt tüketiminin düşürülmesi ve çevrenin korunması gibi ihtiyaçlar yatmaktadır. Bununla beraber özgül ağırlığının düşüklüğü bu malzemeleri cazip kılsa da, endüstriyel boyutta uygulanma sıklığı umulanın altındadır. Bunun nedeni maliyet ve mekanik/tribolojik özellikler açısından rekabet unsurunun eksikliğidir. Uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde, mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk oranları gibi malzeme özelliklerinin önemli olduğu ağırlığa duyarlı alanlarda kullanılan malzemelerin mukavemet limitlerinin zorlanması bu alanda önemli gelişmelere sebep vermiştir. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet, sertlik ve diğer mekanik özelliklerini koruyabilen düşük yoğunluklu malzemelere ihtiyaç duyulur. Mg alaşımları düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemet/ağırlık oranından dolayı bu endüstriye hakim olan Al alaşımlarına bir alternatif olarak gelişmektedir. Buna karşın, 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 [1,2].

1930'lu yılların başında magnezyum metalinin önemini anlayan Almanya saf magnezyum metaline çeşitli elementler ilave ederek alaşımlandırma yapmış ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için ilk adımları atmıştır. Nitekim ilk çalışmalar otomobiller içerisindeki aksamlar olmuştur ki en tanınmış örnek olarak VW – Beetle verilebilir. 1939'lu yıllarda üretilmeye başlanan bu otomobillerin içerisinde kullanılan metalik parçalar (örneğin vites kutusu, elektrik jeneratörlerinin kolları gibi) olarak her geçen gün magnezyum döküm alaşımları kullanılmaya başlanmıştır.

1962'de kullanılan toplam magnezyum ağırlığı 17 kg'a ulaşmıştır ki total ağırlık çelik ile karşılaştırıldığında 50 kg'lık bir kazanç söz konusu olmuştur. 1972 yılında Volkswagen grup toplamda 42 bin ton magnezyum alaşımı tüketmiştir.

Diğer üreticiler ise bazı kompleks parçaların üretiminde magnezyumu kullanmışlardır (örneğin traktör kaputu, helikopterlerin ana vites kutusu, zeplin makineleri için krank kutuları, soğutma kulelerinin fan pervaneleri gibi). Tüm dünyada magnezyum üretimi 1986'da 322.000 ton'dan, 1990 yılına kadar 360.000 ton'a çıkmıştır. 2000 yılında bu miktarın 436.000 ton, 2028'de ise hedefin 498.000 ton olacağı belirtilmektedir.

Yapılan bu tahminlere rağmen günümüzde dünyadaki hızlı gelişmelere paralel olarak magnezyum üretimindeki artış hedeflerinin anormal boyutlara ulaştığı görülmektedir. Bir araştırma firması olan Roskill'in verdiği değerlere göre, 2004 yılında magnezyum üretimi 660.000 ton/yıl ve 2008 yılında 964.000 ton/yıl değerlerine ulaşmıştır[3,4].

Benzer sayılar, başlıca otomotiv üreticilerinde bilinmektedir. Ford, her bir aracında ortalama 2,3 kg yani her yıl 16.000 ton magnezyum kullanmaktaydı. 2005'te 45.000 tona yükselmiştir. 2020'de Ford, her bir aracında 113 kg kullanarak günümüzdeki oranlara göre 870.000 ton civarlarında magnezyum kullanacağı tahmin edilmektedir.[5]

Günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum alaşımları neredeyse tüm endüstriyel gravity ve basınçlı döküm yöntemleri (kum, sürekli ve yarı sürekli kalıp ve kabuk döküm, hassas döküm ve kokil kalıba döküm gibi) ile üretilebilmektedir. Kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen parçalar yerçekimi kuvveti kullanılarak elde edilir. Diğer döküm yöntemlerinden bu döküm yöntemini ayıran en önemli özellik seri üretim maliyet fiyatlarının düşük olmasıdır. Ayrıca daha uniform döküm parçaların üretiminin sağlanması, boyutsal toleransları ve yüzey kalitesi kokil kalıba döküm yöntemini cazip hale getirmektedir.



Bu çalışmanın amacı, saf magnezyumun mekanik özelliklerini geliştirmek için değişik oranlarda alaşım elementleri ilave edilerek alaşımlandırma yapılmasıdır. Bu nedenle, saf magnezyuma %1, 3, 5 kalay (Sn) alaşım elementi ayrıca %1 çinko (Zn) sabit değer tutularak yine %1, 3, 5 oranlarında kalay (Sn) alaşım elementi ilave edilmiştir. Üretim yöntemi olarak kontrollü atmosfer altında metal kalıba kokil döküm kullanılmıştır ve üretilen alaşımların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın 1. bölümünü genel bakış oluşturmaktadır. 2. ve 3. bölümde teorik çalışma gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada yapılmış deneysel işleyiş 4. bölümde tanımlanacaktır. 5. bölümde ise üretilmiş alaşımların mikroyapı karakterizasyonu ve alaşım elementlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenecektir. Son bölüm olan 6. bölümde sonuçlar özetlenecektir.

## BÖLÜM 2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

### 2.1.Giriş

Magnezyum ve alaşımları, düşük yoğunluğu ile tüm yapı malzemeleri arasında spesifik mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasından dolayı endüstride hakim olan alüminyum ve alaşımlarına bir alternatif olarak geliştirilmektedir. Magnezyum, alüminyumdan %36, demirden %78 daha hafiftir. Bu sebeplerle modern teknoloji olan uzay, uçak ve otomotiv parçalarında kullanım için magnezyum, göz alıcı bir malzemedir. 1970'deki yakıt krizinden beri, düşük emisyon ve düşük yakıt tüketimi için araçların ağırlıkları düşürülmeye çalışılmaktadır[13].Birinci ve İkinci Dünya Savaşı yıllarında magnezyum alaşımlarının kullanımı artmaya başlamış fakat magnezyumun en önemli problemi oda sıcaklığında şekillendirilebilme kabiliyetinin oldukça düşük ve maliyetinin yüksek olması sebebiyle büyük ölçekli üretimler gerçekleştiremediği için çok fazla ilerleme olmamıştır. Son yıllarda yeni talepler bu durumu değiştirmeye başlamıştır. Önümüzdeki 10 yılda gelişme hızında, her yıl %7 artış olacağı tahmin edilmektedir.[6]

Tablo 2.1. Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı

| Element | Al  | Fe  | Mg  | Ti   | Zn   | Ni    | Cu   | Pb    |
|---------|-----|-----|-----|------|------|-------|------|-------|
| % oran  | 7,5 | 4,7 | 2,7 | 0,58 | 0,02 | 0,018 | 0,01 | 0,002 |

Magnezyum, Tablo 2.1 den görüldüğü gibi yaklaşık olarak yer kabuğunun %2,7'sini oluşturur[3-7,8]. Çeşitli ham maddelerden magnezyum metali üretilebilmektedir. Metalik magnezyum elementi şu anda dünyada kullanılabilir en düşük yoğunluğa sahip metaldir. Ekonomik olarak kazanılabilir magnezyum minerali, 11 ülkede 38 önemli yatakta 380 milyon ton olarak çıkarılmaktadır. Magnezyumun kazanıldığı üç temel kaynak bulunmaktadır. Bunlar; Deniz suyu, Mineral kayalar ve asbestir. Dünya'daki en büyük magnezyum yatakları şu şekilde dağılmıştır[3]:

Kuzey Amerika: ABD, Kanada

Güney Amerika: Brezilya

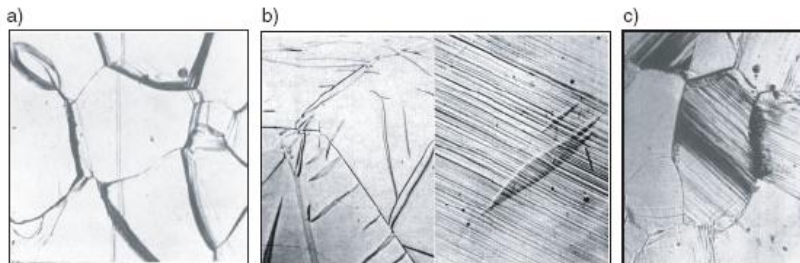
Avrupa: Norveç, Avusturya, Çekoslovakya, Yunanistan, Türkiye, Rusya,  
Yugoslavya

Asya: Çin, Hindistan, K.Kore

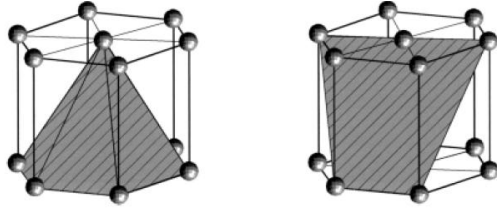
Okyanusya: Avustralya

Afrika

Magnezyum, hegzagonal sıkı paket yapıya sahiptir, diğer kristal yapılar ile karşılaştırıldığında daha az kayma sistemine sahiptir ve bu nedenle özellikle düşük sıcaklıklarda deforme edebilmek son derece kısıtlıdır. Oda sıcaklığındaki kayma sistemi  $\{0001\}$  bazal düzleminde  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  yönünde ve  $225^\circ\text{C}$  üzerinde  $\{10\bar{1}1\}$  ve  $\{10\bar{1}2\}$  piramidal ve  $\{1010\}$  prizma kayma düzlemleri aktiftir. Oda sıcaklığı deformasyonu, başlıca bazal düzlemlerdeki kaymalar ile gerçekleşir.  $225^\circ\text{C}$ 'de aktifleşen piramidal düzlemler plastik deformasyonu kabiliyetinde artışa neden olur. Şekil 2.1 a ve b'de görüldüğü gibi yapılan çalışmalar sonucu saf magnezyumda 8-70MPa gerilme aralığında ve  $90\text{-}300^\circ\text{C}$  aralığında  $\{0001\}$  düzleminde bazal kayma, ikizlenme ve alt tane oluşumu gözlemlenmiştir. Bunlar birincil sürünme bölgesindeki mekanizmalardır. Yüksek sıcaklıklarda,  $250^\circ\text{C}$  üzeri, bazal olmayan piramidal ve prizma kayma düzlemlerinde(şekil 2.1.c) ve tane sınırı deformasyonu ve kayması meydana gelir. Şekil 2.2'de magnezyum metalinde oluşan piramidal düzlemler gösterilmektedir.



Şekil 2.1. a) Magnezyumda alt tane oluşumu b) magnezyumda bazal kayma ve ikizlenme c) yüksek sıcaklıkta tane sınırı kayması



Şekil 2.2. Başlangıç düzeninde piramidal düzlemler

Saf metalik magnezyum çoğu teknolojik uygulama için istenilen özellikleri sağlayamamaktadır. Magnezyumun alaşımlandırılması mukavemet, süneklik, korozyon direnci, sürünme direnci gibi özellikleri elde etmek için gerçekleştirilir[9].

## 2.2.Magnezyum Elementinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

1,74 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip magnezyum metali ilk olarak İngiltere’de Joseph Black tarafından keşfedilmiştir. 1808 yılında Sir Humphrey Davey tarafından saf olarak magnezya ve civa-II-oksit (HgO) karışımından izole edilmiştir. 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[10]. Saf Mg’un mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir[11,12];

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| Simgesi           | Mg                     |
| Atom Ağırlığı     | 24,312 g/mol           |
| Atom Numarası     | 12                     |
| Ergime Noktası    | 650 °C                 |
| Kaynama Noktası   | 1090 °C                |
| Yoğunluğu         | 1,74 g/cm <sup>3</sup> |
| Kristal Yapısı    | Hegzagonal Sıkı Paket  |
| Elektron Düzeni   | 3s <sup>2</sup>        |
| Young Modülü      | 45 GPa                 |
| Çekme Dayanımı    | 80-180 MPa             |
| Çekme (katı-sıvı) | % 4.2                  |
| Akma Dayanımı     | 20 MPa                 |
| Brinell Sertlik   | 30                     |
| Poison Oranı      | 0,35                   |

|                      |  |
|----------------------|--|
| Elastik Modülü       | 44,5 GPa   |
| Atom Hacmi           | 14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)                          |
| Özgül Isısı          | 0,25 cal/g °C  |
| Elektrik İletkenliği | 22,4 m/( $\Omega$ mm <sup>2</sup> ) (oda sıcaklığında) |
| Isı İletkenliği      | 156 W/ m°K, s.cm.°C (oda sıcaklığında)                 |
| Kaynama Isısı        | 32.517 kcal/atomgram                                   |

### 2.3. Magnezyum Alaşımlarını Simgeleme Dizgesi

Amerikan standartları (ASTM), magnezyum alaşımlarının tanınmasında kullanılan bir simgeleme dizgesi geliştirmiştir (ASTM B 296). Bu dizge, uygulamada çok yerde geçtiği için yardımcı olur kanısıyla, burada kısaca açıklanmıştır[9].

Magnezyum alaşımlarının simgeleri sırasıyla iki harf, iki rakam ve bir harf olmak üzere 5 birimdir, ayrıca alaşımın işlem durumunu belirtmek üzere alaşımın temel beş birimli simgesinden bir kısa çizgi ile ayrılan, işlem simgeleri eklenir. İşlem simgeleri, alüminyum alaşımları için kullanılanlar ile aynıdır.

Magnezyum alaşımlarının beş birimli temel simgelerinin ilk iki harfi, alaşımın bileşimindeki en önemli iki alaşım elementini belirler. En yüksek yüzde oranlısı önce ve ikinci en yüksek yüzde oranlısı ondan sonra olmak üzere yan yana yazılırlar. Elementleri belirtmek üzere kullanılan harfler aşağıda gösterilmektedir. Eğer iki en yüksek yüzde oranı eşit ise, harfler alfabetik sıralamadaki öncelikle kullanılır.

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| A- alüminyum                | L- berilyum |
| B- bizmut                   | M- mangan   |
| C- bakır                    | N- nikel    |
| D- kadmiyum                 | P- kurşun   |
| E- nadir toprak elementleri | Q- gümüş    |
| F- demir                    | S- silis    |
| H- toryum                   | T- kalay    |
| K- zirkonyum                | Z- çinko    |

Simgede üçüncü ve dördüncü birim olarak kullanılan iki rakam, harflerle belirtilen iki en önemli alaşım elementinin tam rakama yuvarlaklaştırılmış yüzde oranlarını simgeler. Eğer yüzde değeri kesirli ise bu, en yakın tam rakama dönüştürülür. Örneğin, % 6.3, 6; %3.35, 3 olarak kullanılır[9,13].

## 2.4. Magnezyum Alaşımları

Diğer birçok metal gibi magnezyum metali de saf olarak çok nadir kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen magnezyumun hemen tüm özelliklerinin iyileştirilmesi için alaşımlama kullanılmaktadır. 1908 yılında magnezyum alaşımları için Alman firması “Chemische Fabrik Griesheim” tarafından ilk adımlar atılmış olmasına rağmen magnezyum döküm alaşımlarının geliştirilmesi 1925 yılında yine Almanya’da yapılan çalışmalar ile başlamıştır[3,14-16]. 1930 ile 1965 yılları arasında Mg-Al-Zn-Mn sistemine bağlı alaşımlar, ticari olarak kullanılıyordu. Bu kullanılan alaşımlardan en yaygın olanı AZ91 alaşımıydı. Nitekim ilk çalışmalar otomobiller içerisindeki aksamlar olmuştur ki en tanınmış örnek olarak VW – Beetle verilebilir.

Magnezyum alaşımları mükemmel işlenebilirliği ile düşük ağırlıklı malzemeler için istenen boşluğu doldurmasına rağmen hala alüminyum ve plastikler ile yarışmamaktadır. Ana faktörü düşük ve sabit maliyetlerde dünya pazarına sunulamaması ve tatmin edici mekanik özelliklerin sağlanamaması oluşturmaktadır. Bu nedenle hala araştırmacılar magnezyum alaşımları üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir ve ana konuları aşağıdaki başlıklar oluşturmaktadır[3]:

- Alaşım geliştirme
- Hızlı soğuma
- Üretim teknolojileri
- Kompozitler
- Korozyondan koruma
- Geri dönüşüm

Bu konu başlıkların takibinde araştırmacıların amacını da aşağıdaki maddeler oluşturmaktadır:

- Birincil malzemelerin düşük maliyette üretilebilmesi
- Alaşım çeşitlerinin genişletilebilmesi, ki bu sürünme davranışının geliştirilmesi ve spesifik ağırlığın düşürülmesi için gerekmektedir.
- Yenilikçi üretim metotları geliştirmek
- Geliştirilmiş kaplama teknikleri ile korozyon direncini arttırmak
- Hızlı soğuma proseslerinden faydalanabilme
- En iyi şekilde magnezyum matriksli kompozitlerin kullanım alanlarının geliştirilmesi
- İkincil geri dönüşüm tesislerinin kurulması ile geri dönüşüm kavramını genişletmek

Magnezyum parçaların sahip olduğu avantajlara rağmen halen dünya pazarında yerini tam olarak alamamıştır ki avantajları ve kullanım sınırlamaları tablo 2.2'de sunulmuştur[3,4,8].

Tablo 2.2. Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları

| Avantajları  | Dezavantajları  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bütün metalik malzemelerin arasında en düşük yoğunluğa sahip</li> <li>- Yüksek spesifik mukavemet</li> <li>- Kokil ve basınçlı döküm için iyi dökülebilirlik ve kullanım</li> <li>- Yüksek kesme hızında kolay işlenebilirlik</li> <li>- İnert gaz altında iyi kaynaklanabilirlik</li> <li>- Geliştirilmiş korozyon direnci</li> <li>- Plastikler ile karşılaştırıldığında iyi mekanik özellik, daha iyi elektrik ve termal iletkenlik, geri dönüşüm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Birkaç alaşıma sahip olması</li> <li>- Oda sıcaklığında düşük süneklilik ve tokluğa sahip</li> <li>- Yüksek sıcaklıkta limitli özellikler, sürünme direnci gibi</li> <li>- Yüksek kimyasal reaksiyon</li> <li>- Yüksek döküm çekilmesi</li> <li>- Yüksek üretim maliyetleri</li> </ul> |

Magnezyum alaşımları neredeyse tüm üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir. Kullanılan üretim yöntemlerinden bir tanesi de döküm yöntemidir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı döküm, thixocasting, savurma döküm, sürekli döküm ve kum döküm olarak sıralanabilir. Farklı magnezyum alaşımları için farklı yöntemler uygulanmakta ve bu alaşımlar farklı mekanik özellikler göstermektedir. Genellikle magnezyum alaşımları otomobil parçalarında, savunma ve uzay sanayinde, diz üstü bilgisayarlar, kamera cep telefonu gibi elektronik aletlerin aksamlarında kullanılmak üzere basınçlı döküm tekniği ile üretilirler[3,17-19].

Magnezyum alaşımlarının geliştirilmesinde, Al, Be, Ca, Li, Mn, Si, Ag, Th, Zn, Sn ve Zr elementleri katılarak mikroalaşımlandırma denenmektedir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen yeni magnezyum alaşımlarında nadir toprak metalleri kullanılmaktadır. Bu elementlerin Mg metali üzerindeki etkileri aşağıdaki tablo 2.3'de verilmiştir[3,15,20-23].

Tablo 2.3. Alaşım elementlerinin Magnezyum metali üzerindeki etkileri

|    |   |
|----|---|
| Al | Magnezyum alaşımının çekme mukavemetini ve sertliğini artırır. Katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi( $Mg_{17}Al_{12}$ ) düşük sıcaklıkta( $<120^{\circ}C$ ) alaşımın mukavemetine katkıda bulunur. Yüksek oranlarda ilavesi mikro poroziteyi artırır. Dökülebilirliği artırır. |
| Be | Çok düşük konsantrasyonlarda ( $<30ppm$ ) erimiş metal yüzeyinde oksidasyonu azaltır. Mg-Al alaşımlarında, berilyum tane kabalaşmasına neden olabilir.  |
| Ca | Kararlı intermetalik bileşen $Mg_2Ca$ ergime sıcaklığının $715^{\circ}C$ olması sürünme direncini artırır ve tane küçülmesinde pozitif etki yapar. Aynı zamanda, ergimiş metalin oksidasyonunu biraz durdurur. Buna karşın, korozyon davranışı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.          |
| Li | Ortam sıcaklığında katı eriyik sertleşmesi oluşturur. Yoğunluğu düşürür ve sünekliği artırır.   |
| Mn | Mangan, Fe-Mn çökelti bileşeni vasıtası ile magnezyum eriyiğindeki demir içeriğini kontrol etmekte kullanılır. Alaşımların sürünme direncini arttırabilir ve demir kontrolü ile korozyon direncini geliştirir. Ama magnezyum alaşımlarının mukavemetinde çok az etkiye sahiptir.          |



Tablo 2.3. ( devamı )

|    |  |
|----|--|
| Si | Silisyum oluşturduğu kararlı silisit $Mg_2Si$ intermetalliğinden dolayı yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirebilir. Ama magnezyum alaşımlarının dökülebilirliğini düşürür. Silisyum korozyona etkisi göz ardı edilebilir.  |
| Ag | Nadir elementler ile yüksek sıcaklıkta mukavemeti ve sürünme direncini artırır fakat aynı zamanda korozyon direncini azaltır.  |
| Th | Magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta mukavemetini ve sürünme direncini artırır fakat radyoaktif elementtir.   |
| Zn | Ergimiş metalin akıcılığını artırır ve tane inceltici etki gösterir buna karşın mikro porozite oluşumuna eğilim gösterir.  |
| Zr | Katılaşma esnasında Zr'ca zengin partiküller Mg tanelerinin heterojen çekirdeklenmesine neden olur. Bu nedenle, Zr elementi Si, Al ve Mn ile kullanılmadığı zaman çok güçlü tane inceltici etkiye sahiptir. Sonuç olarak, ortam sıcaklığında çekme mukavemetini geliştirir.  |
| RE | Tüm nadir elementler magnezyum ile sınırlı çözünürlük içermektedir ki bundan dolayı çökelme sertleşmesi mümkündür. Buda sürünme davranışını, korozyon davranışını ve yüksek sıcaklık mukavemetini artırır. Teknik alaşım elementleri olarak yitrium, neodyum ve cerium dur. Yüksek maliyetlerinden dolayı genelde yüksek teknolojik alaşımlarda kullanılırlar.   |
| Sn | Kalay, magnezyum alaşımlarında tane inceltici etkiye sahiptir, aynı zamanda sünekliliğini artırır. Sıcak işlem sırasında alaşımın çatlama eğilimini azaltır. Bundan dolayı da alaşımın işlenebilirliğini de artmaktadır. Sn içeren alaşımda Mg ile birlikte $Mg_2Sn$ intermetalik fazı oluşur. Bu intermetalik fazın ergime sıcaklığı $770^{\circ}C$ 'dir. Bu nedenle Mg-Sn esaslı alaşımlar yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sürünme direncine sahiptir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygundur. Ayrıca sıcaklık ile çözünürlüğün değişebilir olması Mg-Sn alaşım sistemlerini yaşlandırma ile sertleştirme işlemi için cazip kılmaktadır. Kalay ilavesi, alaşımın sertlik, çekme-basma mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. |

Sıvı magnezyum normal atmosferde çok hızlı bir biçimde oksijen ile reaksiyona girer. Bu yüzden, bugün sülfür hegzaförür(SF<sub>6</sub>) içeren gaz karışımları sıvı magnezyumu korumak için kullanılmaktadır. Eriyik magnezyum yüzeyini korumak için renksiz, kokusuz ve zehirsiz SF<sub>6</sub> gazı hacimce %0,2-0,5 arasında CO<sub>2</sub> veya kuru hava gibi gazlar ile karışım halinde kullanıldığında yeterli koruma sağlanabilmektedir. Tablo 2.4 basıçlı döküm ile üretilecek magnezyum alaşımları için önerilen örnek gaz karışımlarını göstermektedir[21-26].

Tablo 2.4. Basıncılı döküm uygulamalarında Sülfür hegzaförür kullanımı

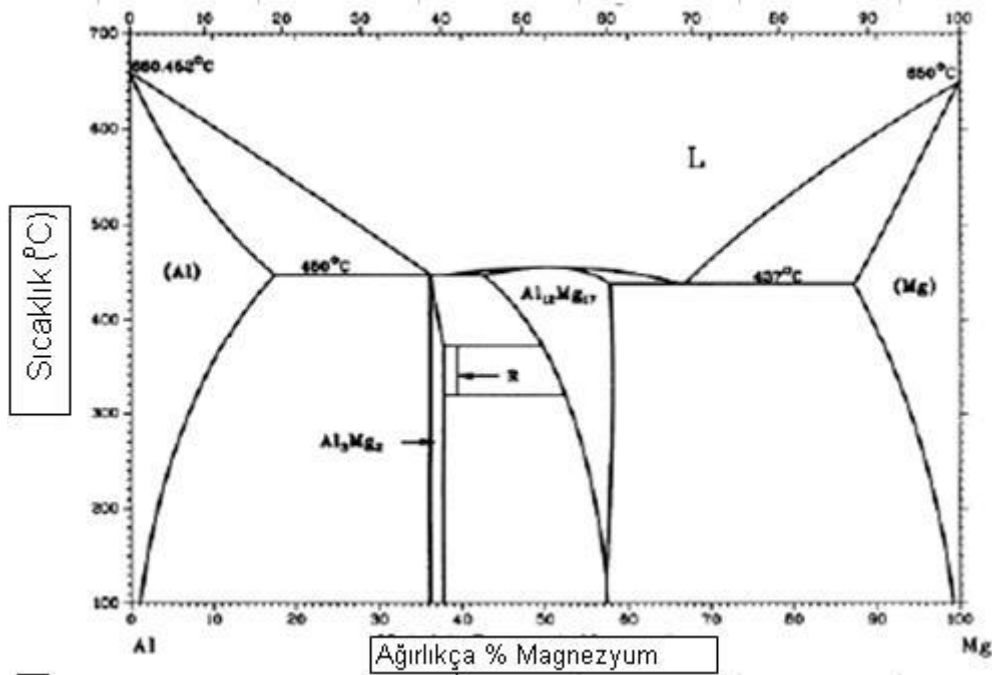
| Ergime Sıcaklığı(°C) | Önerilen koruyucu gaz karışımı(% hac.)            | Yüzey karıştırma | İşlem durumu    |               |
|----------------------|---|------------------|-----------------|---------------|
|                      |   |                  | Kalıntı Flaks** | Eriyik Koruma |
| 650-705              | Hava+0.04 SF <sub>6</sub> *                       | Yok              | Yok             | Mükemmel      |
| 650-705              | Hava+0.2 SF <sub>6</sub>                          | Var              | Yok             | Mükemmel      |
| 650-705              | 75 hava+ 25 CO <sub>2</sub> + 0.2 SF <sub>6</sub> | Var              | Var             | Mükemmel      |
| 705-760              | 50 hava+ 50 CO <sub>2</sub> + 0.3 SF <sub>6</sub> | Var              | Yok             | Çok iyi       |
| 705-760              | 99,8 CO <sub>2</sub> + 0.2 SF <sub>6</sub>        | Var              | Var             | Mükemmel      |

\* Kontrol koşulları altında minimum konsantrasyon

\*\* Daha önceki işlemlerden gelebilir.

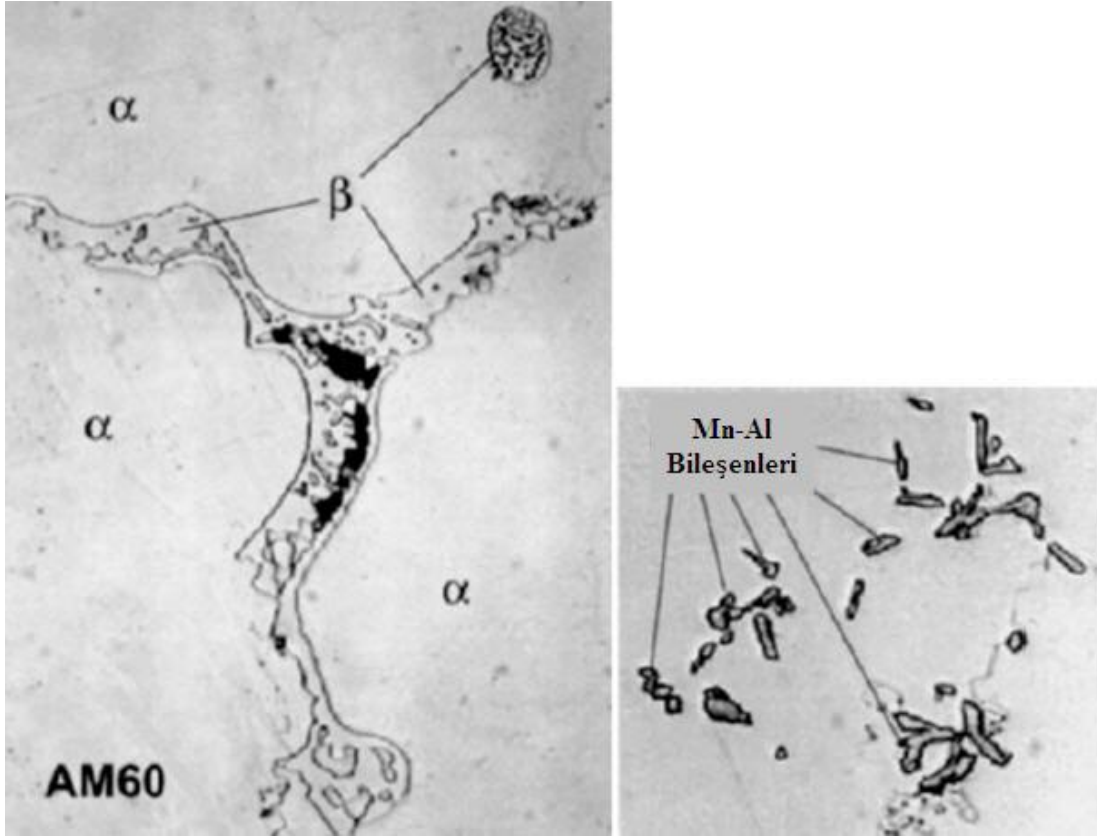
#### 2.4.1. Magnezyum-Alüminyum alaşımları

Magnezyum alaşımlarında en yaygın olarak Mg-Al sistemi kullanılmaktadır. Şekil 2.3'de Mg-Al ikili denge diyagramı görülmektedir. Denge diyagramından da görüldüğü gibi, 437°C gibi çok düşük sıcaklıkta ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ötektik reaksiyon,  $L \leftrightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha(Mg)$ , düşük sıcaklıkta meydana gelir(437°C). Bu ötektik sıcaklıkta alüminyumun maksimum çözünürlüğü %12,7 ve azalan sıcaklık ile alüminyumun çözünürlüğü de keskin bir şekilde azalır. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sisteminin alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi sağlayabileceğini göstermektedir[9, 27, 28].



Şekil 2.3. Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı[29]

Mg-Al alaşımlarında % 2'den daha fazla alüminyum içerdiği zaman döküm mikroyapısında  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalliği görülür. Eğer alaşımlarda alüminyum içeriği % 8'in üzerinde ise ağ yapısını tamamlamamış  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalliği tane sınırları boyunca dağılım gösterir ve bu durum sünekliliğin hızlı bir şekilde düşmesine neden olur. Yaklaşık 420°C'de çözelti işlemi  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalliğinin çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir ve her iki durumda çekme mukavemeti ve sünekliliği artırır. 150°C ile 250°C aralığında  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalliği çökebilir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar. Buna karşın, Mg-Al alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmak için gerekli özellikleri taşıyabilir. Çinko, mangan, silisyum, nadir elementler gibi elementleri Mg-Al alaşım sistemine ilave edilerek özelliklerin geliştirilmesi sağlanır[9].



Şekil 2.4. Mg-Al alaşımasının (AM60) tipik mikroyapı görüntüsü( $\alpha$  : Mg,  $\beta$  :  $Mg_{17}Al_{12}$  ve farklı şekillerdeki Al-Mn bileşenleri)[30]

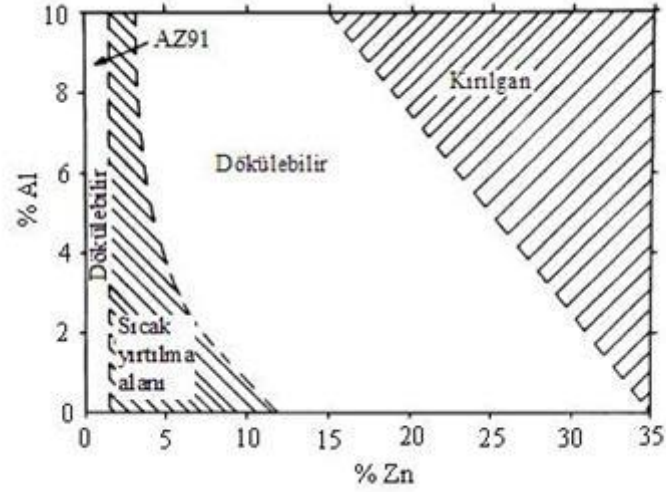
AM60 (Mg-6Al-Mn) alaşımı Mg-Al sisteminde en yaygın kullanılan alaşımdır. Şekil 2.4 'de tipik AM60 alaşımasının mikroyapısı görülmektedir. Mg-Al alaşım sistemine üçüncü alaşım elementi olarak mangan ilavesi, Fe-Mn çökelti bileşeni vasıtası ile magnezyum eriyiğindeki demir içeriğini kontrol etmekte kullanılır. Demir kontrolü ile korozyon direnci geliştirilir. Ayrıca sırasıyla düşük ve yüksek oranda magnezyum içeren  $(Mg-Al-Mn)_1$  ve  $(Mg-Al-Mn)_2$  fazları bu alaşımlarda bulunmaktadır. Bu fazlar Mg-Al alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemetini de geliştirebilir. Bu alaşım AZ91(Mg-9Al-1Zn) alaşımından daha yüksek süneklilik gösterir ve yüksek performans beklenen arabaların tekerleklerinin özel gereksinimleri için kullanılır[3, 28].

#### 2.4.2. Magnezyum-Alüminyum-Çinko alaşımları

Mg-Al-Zn alaşım sistemi, Mg döküm alaşımları içinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu alaşım sistemi ilk olarak 1913 yılında deneysel olarak keşfedilmiş ve daha sonra

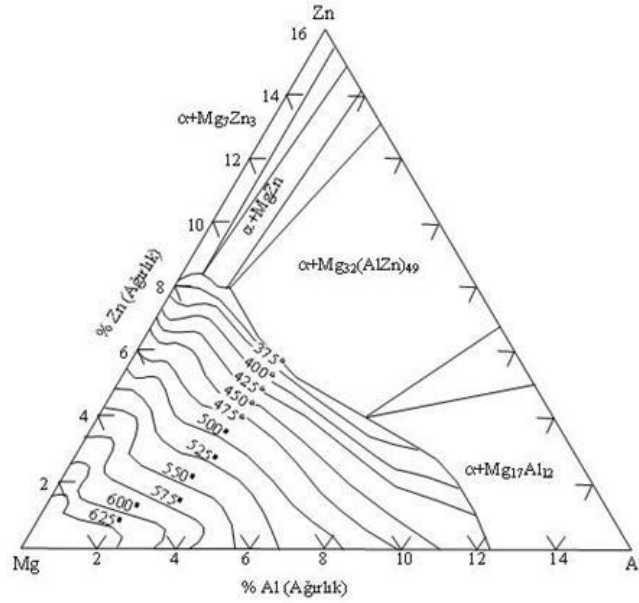
birçok araştırmacı tarafından araştırılıp geliştirilmiştir [9].

şekil 2.5’de Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirlik aralıkları verilmiştir.



şekil 2.5. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi[31]

şekil 2.5’de gösterilen diyagramda görüldüğü gibi sistem dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge, düşük Zn’da dökülebilir bölgedir. Bu bölgede  $\alpha$  (Mg) ve  $Mg_{17}Al_{12}$  fazları vardır ve AZ alaşımı bu bölgededir. İkinci bölge, sıcak yırtılma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü bölge, yüksek Zn’da dökülebilir bölgedir. Yani yüksek çinkolu alaşımın dökülebilirliğini gösterir ve  $Mg_{32}(AlZn)_{49}$  intermetalik bileşiği bu bölgededir. Dördüncü bölge ise kırılgan bölgedir.



Şekil 2.6. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı [9]

Şekil 2.6’da gösterilen Mg-Al-Zn alaşım sisteminin üçlü faz diyagramında Al’ca zengin bölge incelendiğinde, üç temel metalik faz olduğu görülmektedir. Bunlar; MgZn, Mg<sub>32</sub>(Al,Zn)<sub>49</sub> ve Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>’dir. Bazı durumlarda Al<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Zn<sub>2</sub> fazı 393°C’den yüksek sıcaklıklarda ortadan kaybolur. Mg<sub>32</sub>(Al,Zn)<sub>49</sub> fazının oluşma sıcaklığı 535°C’dir. α+MgZn ve α+Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> ötektik fazlarının ergime sıcaklıkları sırasıyla 347°C ve 460°C’dir[9,31]. Aşağıda bu katı fazlar ve sembolleri tablo olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Katı fazlar ve sembolleri[9]

| Faz                               | Sembol | Sıcaklık Aralığı (°C) | Faz   | Sembol | Sıcaklık Aralığı (°C) |
|-----------------------------------|--------|-----------------------|---|--------|-----------------------|
| (Al)                              | -      | <660.5                | Mg <sub>7</sub> Al <sub>3</sub>                 | δ      | 342-325               |
| (Mg)                              | -      | <650                  | MgZn  | ε      | <347                  |
| Zn                                | -      | <419.6                | Mg <sub>3</sub> Al <sub>3</sub>                 | ζ      | <416                  |
| Mg <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>   | β      | <453                  | MgZn <sub>2</sub>                               | η      | <590                  |
| Mg <sub>23</sub> Al <sub>30</sub> | x      | 450-428               | Mg <sub>2</sub> Zn <sub>11</sub>                | θ      | <381                  |
| Mg <sub>18</sub> Al <sub>52</sub> | y      | -                     | Mg <sub>32</sub> (AlZn) <sub>49</sub>           | τ      | <535                  |
| Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub> | γ      | <460                  | Al <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> Zn <sub>2</sub> | φ      | 393-?                 |

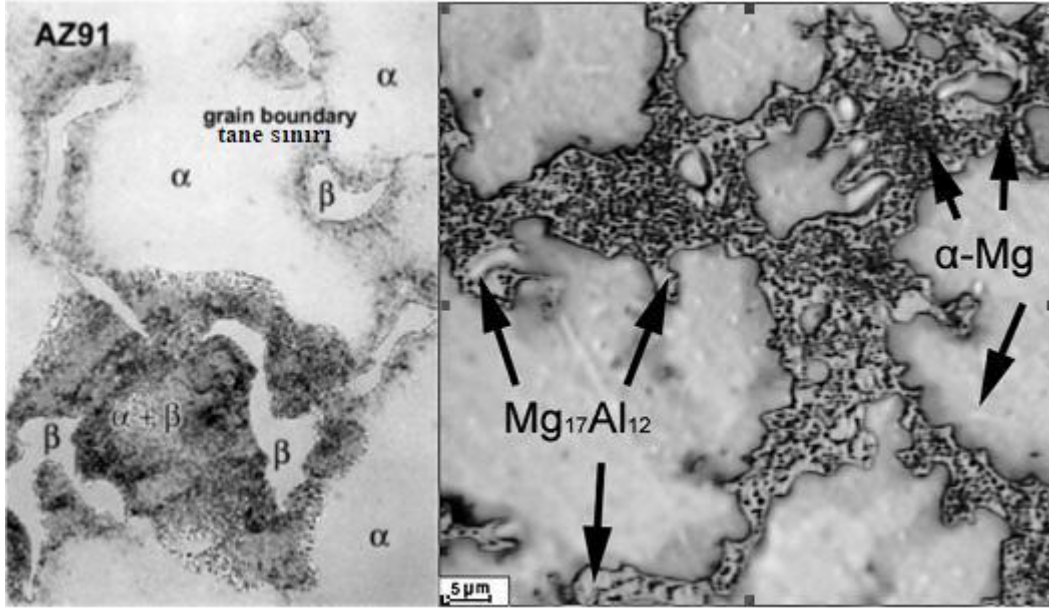
Mg-Al-Zn sisteminde sıvı bölgesindeki en yüksek sıcaklık Al'un ergime sıcaklığı olan  $660^{\circ}\text{C}$ 'dir. Üçlü ötektik reaksiyon sıcaklığı olan  $338^{\circ}\text{C}$  en düşük sıcaklık noktasıdır( $\text{sıvı} \leftrightarrow \epsilon + (\text{Mg}) + \tau$ ). Bu intermetalik fazlar içinde en yüksek çözünme sıcaklığına sahip iki faz  $\text{Mg}_{32}(\text{AlZn})_{49}$  ( $\tau$ ) ve  $\text{MgZn}_2$  ( $\eta$ ) fazlarıdır ve sıcaklıklarında sırasıyla  $\tau = 535^{\circ}\text{C}$  ve  $\eta = 590^{\circ}\text{C}$ 'dir.[9,31].

Mg-Al-Zn sistemlerinde AZ91 serisi iyi döküm özelliği ve mekanik özelliği olmasından dolayı en çok kullanılan ticari, yapısal Mg alaşımıdır. AZ91 alaşımı otomotiv endüstrisinde kokil kalıp döküm olarak kullanıldığından son yıllarda incelenmek için ilgi çekmektedir.

Alaşımın özelliklerini ve mikroyapılarını geliştirmek için değişik alaşımlamalar uygulanmaktadır. Örneğin; bu alaşım elementlerinden biri olan Ca'un oksidasyonu azalttığı, sızıntı emniyetini artırdığı, sıcak uygulamalara ( $130 - 150^{\circ}\text{C}$ ) olan yeteneği artırdığı fakat %0,2'den fazla olduğu zaman, alaşımı kırılganlaştırdığı ve sıcak yırtılma eğilimini artırdığı gözlenmiştir[9]. Bununla birlikte AZ91 için en iyi sürünme direncinin oda sıcaklığında gerçekleştiği rapor edilmiştir[9].

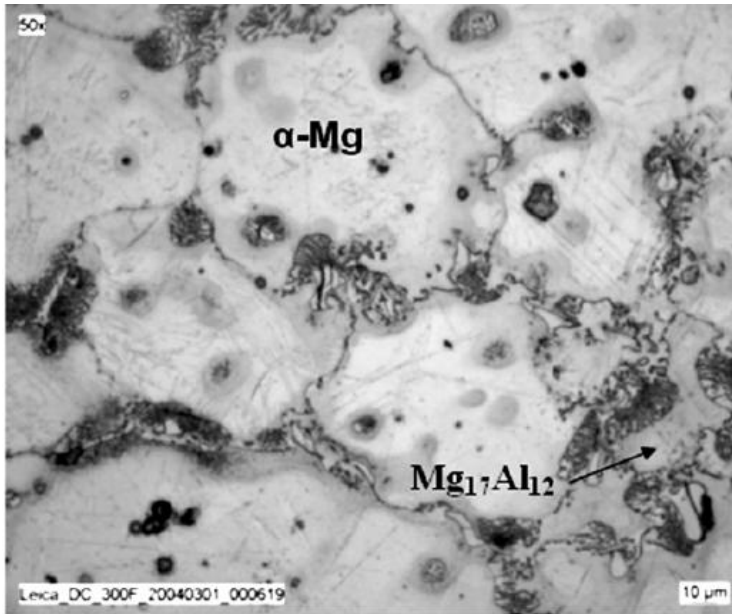
Mg-Al alaşımlarında, Zn/Al oranı 1/3 oranını aştığında mikroyapıda üçlü Mg-Al-Zn fazı görülür. Böylece faz oluşumu ve alaşımın denge katılaşma karakteristikleri ikili Mg-Al faz diyagramı ile anlaşılabilir(Şekil 2.3). AZ91'in dengeli katılaşması, birincil Mg olan  $\alpha$  (Mg) katı eriyik çekirdeklenmesi ile yaklaşık  $600^{\circ}\text{C}$ 'de başlar. Bu çekirdekler büyür ve katılaşma  $470^{\circ}\text{C}$ 'de son bulur[9].  $\alpha$ -Mg ve  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  fazından oluşmuş ayrı bir ötektik oluşumu mikroyapıda görülür. Böylece denge dışı AZ91'in mikroyapısı  $\alpha$ -Mg ve bir intermetalik faz olan  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 'den oluştuğu anlaşılır.

Şekil 2.7'de AZ91 alaşımının mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 2.7. AZ91 alaşımının mikroyapısı [30, 32]

Normal dökülen AZ91'deki tane sınırları baskın bir şekilde  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik fazı ile çevrili olduğu için ısıtılma işlemi sonucu tane sınırları kolayca görülmektedir[33]. Şekil 2.8'de AZ91 alaşımının mikroyapısında tanelerinin resmi görülmektedir.



Şekil 2.8. AZ91 alaşımının mikroyapıda tane görünüşü [34]

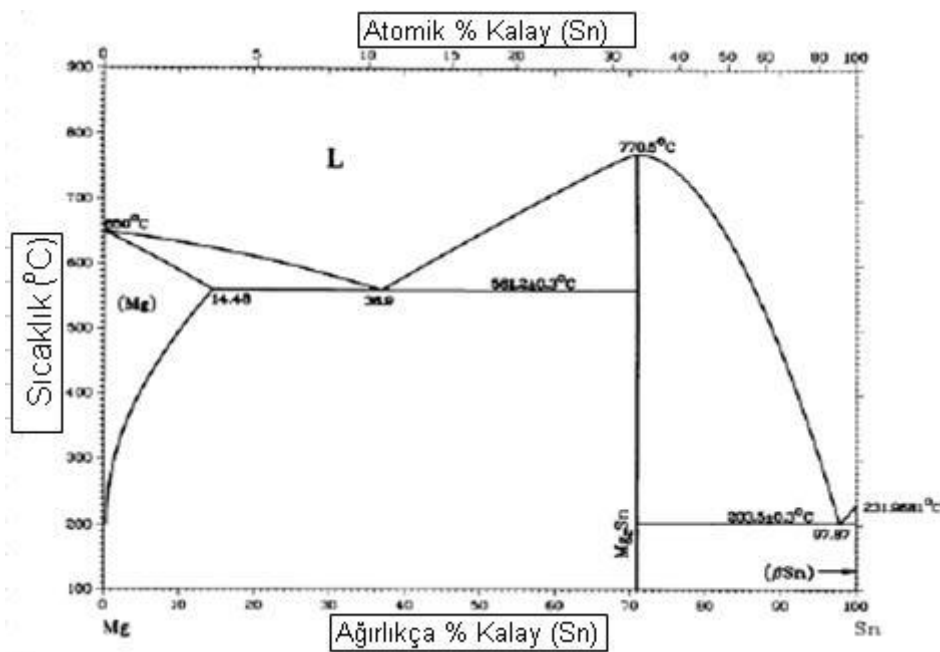


Kokil kalıba döküm numunelerinin kaba tane boyutu, basınçlı dökümün yaklaşık olarak 10 katı kadardır. Bu hızlı katılaşma hızlı soğumadan dolayı olur ve ergiyik birçok çekirdeklenme oluşturur. Ayrıca tane artışı, kalıp dolumu sırasında ince tanelerin oluşumuna katkıda bulunur. Enjekte edilmiş ergiyiğin yüksek hızı ergiyikte türbilans oluşturur. Bu türbilans, kalıp yüzeyinde henüz çekirdeklenmemiş dendritlerin kırılmasına neden olur ve sonunda tane sayısı artmaktadır. Bundan başka, kalıp boşluğu bazı döküm teknikleri ile hızlı bir şekilde doldurulduğu zaman oluşan damlacıklar yeni çekirdeklenme yüzeyleri oluşturabilmektedirler[9].

### 2.4.3. Magnezyum-Kalay alaşımları

Kalay (Sn) ilaveli magnezyum alaşımları ilk olarak 1934 yılında denenmiştir. Magnezyum-Kalay alaşımları literatürde (AT) olarak isimlendirilmektedir. Son günlerde, yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyeli olduğuna inanılan Mg-Sn esaslı alaşımlara ilgi artmıştır. Şekil 2.9'da görülen Mg-Sn sistemi, genellikle çökeltme prosesi ile özelliklerinin kontrol edildiği bilinen tek sistemdir. Mg-Sn ikili alaşımları için maksimum katılaşma aralığı  $67^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu aralık Mg-Al ( $136^{\circ}\text{C}$ ) ve Mg-Zn ( $283^{\circ}\text{C}$ ) ikili alaşımlarına göre daha dardır. Mg-Sn alaşımlarında ayrık çekinti ve sıcak yırtılma gibi döküm hataları, Mg-Al ve Mg-Zn alaşımlarından daha az ciddiyettedir. İkili faz diyagramına göre (Şekil 2.10),  $\alpha$ -Mg katı çözelti içinde Sn çözünürlüğü  $561^{\circ}\text{C}$  ötektik dönüşüm sıcaklığında %14,85'ten,  $200^{\circ}\text{C}$ 'de %0,45'e keskin bir biçimde düşer. Bu, yaşlanmaya karşı üretilen alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için gerekli kaynağı temin eder. Sn içeren magnezyum alaşımları  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  intermetalığı içermektedir. Mevcut  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  intermetalığı termal kararlılığa sahiptir ve bu alaşımlarda sürünme direncini geliştiren en önemli unsurdur. Mg-Sn alaşımlarında intermetalik faz  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  ( $770^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  ( $462^{\circ}\text{C}$ ) fazından daha yüksek ergime noktasına sahiptir. Bu nedenle Mg-Sn esaslı alaşımlar yüksek sıcaklıklarda Mg-Al esaslı alaşımlardan daha yüksek sürünme direncine sahiptir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygundur. Ayrıca sıcaklık ile çözünürlüğün değişebilir olması Mg-Sn alaşım sistemlerini yaşlandırma ile sertleştirme işlemi için cazip kılmaktadır[35,36].

Son dönemlerdeki Japonya patentli çalışmalara göre, Mg alaşımlarına ağırlıkça %5'e kadar kalay ilavesi bu alaşımların çekme mukavemetini ve sürünme direncini arttırmaktadır. Buna karşın, alüminyum ve/veya çinko elementi içeren alaşımlarda korozyon direncini düşürmektedir. Günümüzde halen bu alaşımlar ticari bir değer kazanamamıştır ve araştırmacılar bu alaşımların çeşitli kombinasyonları üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda Mg-Sn ikili alaşım sistemine çeşitli oranlarda kalsiyum (Ca) ilavesi ile dökülebilirlik, sürünme ve korozyon direncinde önemli gelişmeler elde edilmiştir.[ 35,37-42]



Şekil 2.9. Magnezyum-Kalay ikili denge diyagramı[38]

#### 2.4.4. Alkalın ve/veya nadir elementlerin eklenmesi ile Magnezyum döküm alaşımları

Son yıllarda, çoğu alüminyum içeren magnezyum alaşım sistemleri alkalın element veya nadir elementlerin(RE) eklenmesi ile geliştirilmiştir. Geliştirilmiş alaşımlar QE, WE ve HK harfleri ile tanımlanmıştır. İlave edilen nadir elementlerden bir tanesi Neodim'dur(Nd). Nd elementi gümüş (Ag) ile kullanılır ve QE ile tanımlanır. Nd elementnin ilavesinin amacı, kararlı çökelti partikülleri oluşturmaktır. Bu alaşım yüksek sıcaklıkta sürünme direnci gerektiren uzay endüstrisinde kullanılmaktadır.

Alternatif olarak magnezyum nadir elementler ve itriyum ile alaşımlandırılmış ve WE kodlaması kullanılmıştır. İtiryum elementinin magnezyum içinde yüksek çözünürlüğü, bu elementi ilgi çekici kılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda WE54 (Mg-5.25Y-3.5RE(Nd)-0.45Zr) ve WE43(Mg-4Y-2.25RE(Nd)) alaşımlarının geliştirilmesini sağlamıştır. Bu alaşımlar, QE alaşımlarından daha iyi sürünme ve korozyon direnci göstermişlerdir[30].

Mg-Al-Ca-RE alaşımı, Nissan Patentli ve Honda patentli alaşımın ACM522(Mg-5Al-2Ca-2RE) her ikisi de AE42(%4Al-%2RE) alaşımının üzerinde sürünme direnci göstermektedir. ACM522 alaşımında Al-Ca intermetaliklerine ek olarak Al-RE çökeltileri için Al/RE/Ca oranının önemi büyüktür. Bu alaşım Honda tarafından hibrid arabanın yağ deposunda kullanılır[43].

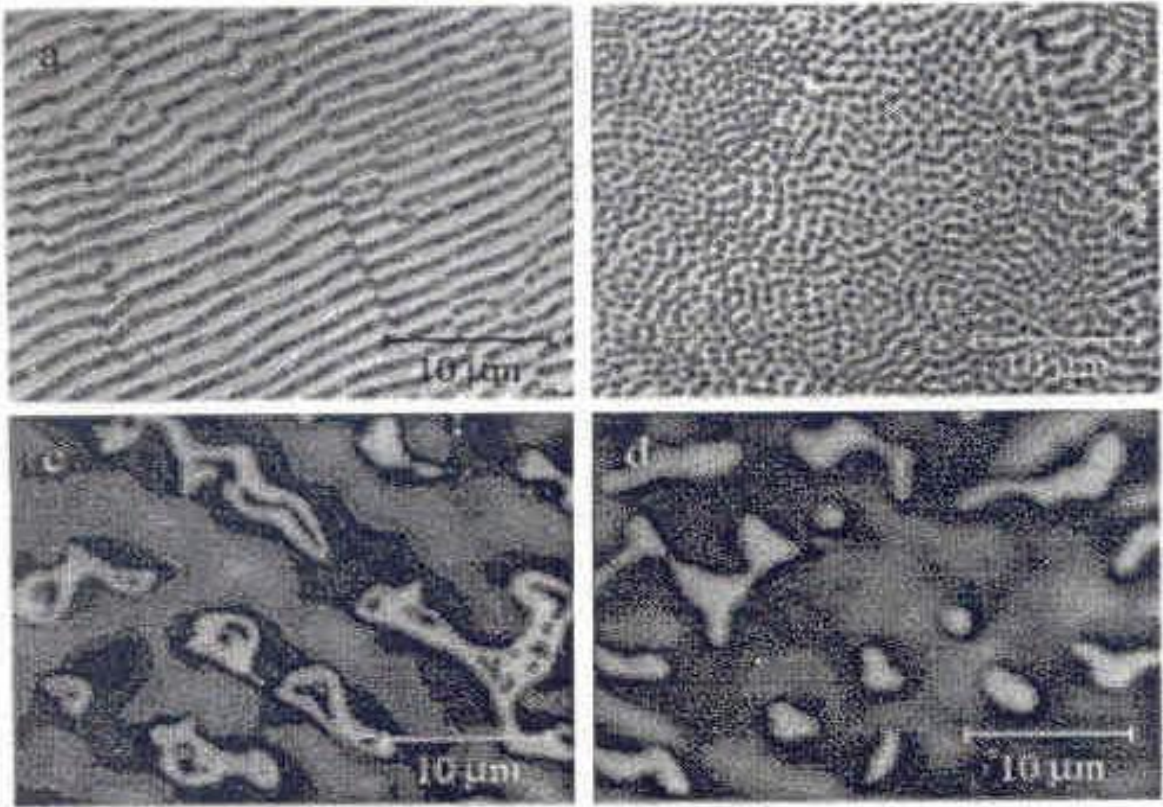
Dead Sea Magnezyum ve Volkswagen AG. Patentli Opsiyonel Sr ve Zn eklemiş Mg-Al-Ca-RE bazlı bir başka alaşım sistemidir. İki alaşımın kodları MRI153 ve MRI230 dur ve bu alaşımlar sırası ile 150°C ve 180°C’de iyi yüksek sıcaklık performansına sahiptir. Dahası MRI 153 AZ91 alaşımı gibi iyi dökülebilirlik özelliğine sahiptir. Bu alaşım sistemi kompleks olması, element sayısının fazla olmasından dolayı, mukavemet, sürünme direnci ve dökülebilirliğin optimum kombinasyonunu bulmak için daha fazla çalışmaya gereksinim duyulmaktadır[43].

Noranda ve General Motors tarafından geliştirilen Ca ve Sr ilaveli alaşım sistemlerinde nadir elementler mevcut değildir. Noranda alaşım düşük miktarda Ca ve Sr içeren Mg-Al-Sr-Ca alaşımlarıdır(AJX). Noranda “N” alaşımı olarak kodlanan alaşım 150°C’de AS41 alaşımı ile karşılaştırılabilir bir sürünme direncine sahiptir. Ayrıca bu alaşım 175°C sıcaklıkta AE42 alaşımı ile karşılaştırıldığında daha iyi sürünme direncine sahip olduğu görülmüştür. General motor versiyonu bir miktar Ca ve az miktarda Sr ilaveli Mg-Al-Sr-Ca(AXJ) alaşımıdır ve süper sürünme direnci sergiler[43].

#### 2.4.5. Magnezyum alaşımlarının katılaşma davranışı

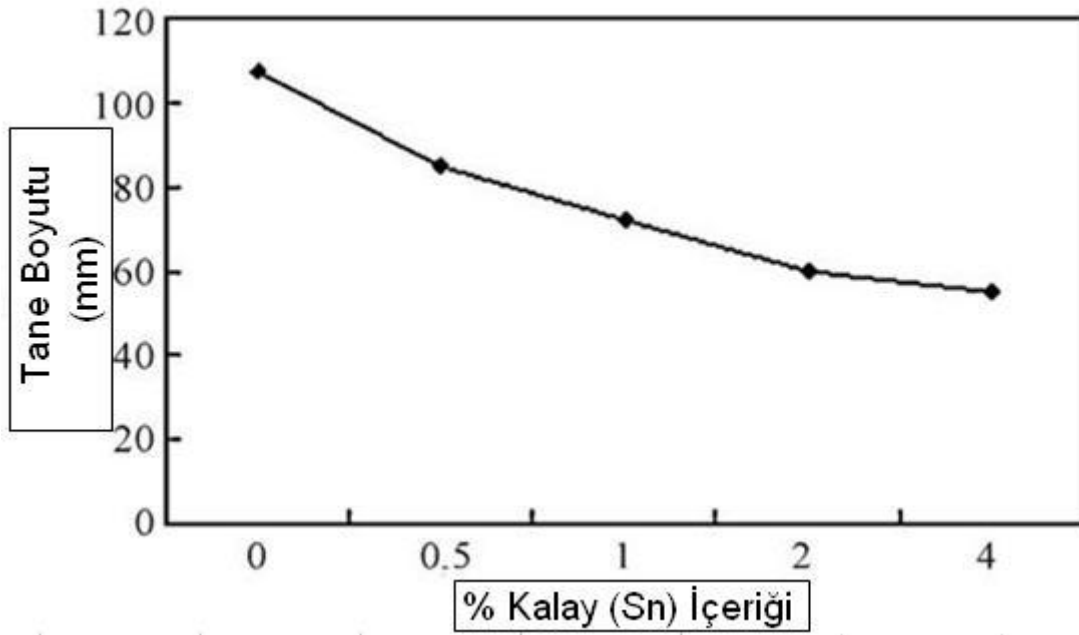
Magnezyum-alüminyum alaşımlarının mikroyapısı birincil tanelerin ve ötektik yapının her ikisinde çekirdeklenmesine ve büyüme karakteristiğine bağlı olacaktır. Bu nedenle, katılaşma esnasında alaşım elementleri, tane incelticiler ve soğuma hızı döküm alaşımının mikroyapı ve özellikleri üzerinde etkili olacaktır. Çekirdeklenme tane incelticiler kullanılarak kontrol edilebilir. Magnezyum döküm alaşımlarındaki tane incelticiler alüminyum alaşımlarındaki gibi iyi bir şekilde anlaşılmamıştır. Mg-Al ikili sisteminde birincil dendritler ve ötektik yapının büyüme morfolojisi alüminyum içeriğine ve soğuma hızına oldukça bağlıdır. Mg-Al sistemi için güçlü bir tane inceltici mevcut değildir.

Zirkonyum, bazı magnezyum alaşımları için başarılı bir tane incelticidir. Buna karşın, alüminyum ve zirkonyum magnezyum alaşımlarında bir arada bulunmaz çünkü kolayca kararlı Al-Zr intermetalıği oluşturabilirler[23]. Bunun yanında, çoğu Mg-Al alaşımları yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilmektedir ve bu yöntem çok yüksek soğuma hızlarına sahiptir ki bu durum çekirdeklenme için önemli bir itici gücü oluşturur. Bu çekirdeklenme artışına neden olur ve bu nedenle birincil tanelerin sayısı artar. Böylece tane inceltici ihtiyacı azalır. Mg-Zn ve Mg-RE(nadir element) sistemlerine ait alaşımlara Zr ilavesi yapıldığı zaman çok sayıda ince tanelerin oluştuğu görölmüştür. Zr elementinin tane inceltici mekanizması çok iyi anlaşılmış durumda değildir. Ama tane inceltici mekanizmanın Zr ve Mg'un benzer latis parametresi ve kristal yapısına sahip olmasından kaynaklandığına inanılmaktadır[15, 30, 44, 45].



Şekil 2.10. Çeşitli bileşimlerdeki Mg-Al alaşımlarında a) Lamel, b) lifli, c) parçalı ayrılmış ve d) tamamen ayrılmış yapı[47]

Birincil tane morfolojisi ve ötektik oluşumu birbiriyle oldukça ilişkilidir. Birincil fazın boyut ve şekli katılaşma esnasında oluşan ötektik boyutunu etkiler ve bu alaşımın bileşimine ve katılaşma hızına bağlı olarak ötektik dört farklı morfolojide oluşmasına neden olacaktır. Şekil 2.10'da magnezyum alaşımlarında oluşabilecek ötektik yapılar gösterilmektedir. Mg-Al sisteminde ötektik yapı,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalikidir. Hemen tüm Mg-Al alaşımlarında (ağırlıkça %2 Al ve daha fazlası) bu ötektik oluşur. Ötektik yapı genel olarak tam veya parçalı ayrılmış şekildedir. Tam ayrılmış yapıda (Şekil 2.10d), “ötektik” Mg birincil dendritleri çevreler ve intermetalik faz kaba partiküller veya çevrelenmiş dendritler arasında ince tabaka şeklinde varolur. Parçalı ayrılmış ötektik (Şekil 2.10c) yapı benzerdir. Buna karşın, “ötektik” Mg yapısının tamamı birincil dendritleri çevrelemez, bir miktarı intermetalik faz içerisinde adacıklar şeklinde katılaşır. Tamamen ayrılmış ötektik yapı genellikle basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiş alaşımlarda rastlanırken, parçalı ayrılmış ötektik yapı daha düşük soğuma hızlarına sahip üretim yöntemlerinde oluşur[47].



Şekil 2.11. AM60 alaşımına Sn ilavesinin tane boyutuna etkisi[46]

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda, kalay (Sn) alaşım elementinin magnezyum ve alaşımlarında tane inceltici etkiye sahip olduğu ve mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür(Şekil 2.11). Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyeli olduğuna inanılan Mg-Sn alaşımlara ilgi artmıştır. Mg-Sn ikili alaşımları için maksimum katılma aralığı  $67^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu aralık Mg-Al ( $136^{\circ}\text{C}$ ) ve Mg-Zn ( $283^{\circ}\text{C}$ ) ikili alaşımlarına göre daha kısıtlıdır. Dolayısıyla Mg-Sn alaşımlarında büzülme(çekinti) ve sıcak yırtılma gibi döküm hataları, Mg-Al ve Mg-Zn alaşımlarından daha az görülmektedir.  $\alpha$ -Mg katı çözelti içinde Sn çözünürlüğü  $561^{\circ}\text{C}$  ötektik dönüşüm sıcaklığında %14.85'ten  $200^{\circ}\text{C}$ 'de %0.45'e keskin bir biçimde düşmektedir. Bu özelliği ile Mg-Sn alaşımları çökeltme sertleşmesi ile mukavemet artırma yöntemine elverişli alaşımlardır. Mg-Sn alaşımlarında intermetalik faz  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  (ergime noktası  $770^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  (ergime noktası  $462^{\circ}\text{C}$ ) fazından daha yüksek ergime noktasına ve termal kararlılığa sahiptir. Bu nedenle Mg-Sn esaslı alaşımlar yüksek sıcaklıklarda Mg-Al esaslı alaşımlardan daha yüksek sürünme direnci göstermektedir.

Hongmei Liu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, saf magnezyuma ağırlıkça %1-10 kalay (Sn) ilavesi ile oluşturulan alaşımlarda mikroyapı, çekme özellikleri ve sürünme davranışları incelenmiştir.

Mikroyapı çalışmalarında, birincil  $\alpha$ -Mg fazının dentrit ve ikincil dentritik kol aralıklarının, kalay içeriğinin artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Dentritik kol aralıkları, alaşımların mekaniksel özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Kalay alaşım elementinin bu etkisi temel olarak katılaşma esnasında katı-sıvı ara yüzeyinde bulunarak aşırı soğuma etkisi oluşturmaya bağlanmaktadır. Bu durumda tane büyümesini engelleyerek tane inceltici etkiyi oluşturur. Yapılan deneysel çalışmalarda bu etki tespit edilmiş ve kalay ilavesinin belli oranlara kadar mekanik özellikleri arttırdığı görülmüştür. Kim ve arkadaşlarının Mg-Al-Zn alaşımında çeşitli oranlarda Sn ilavesi ile yaptığı çalışmada benzer sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Bir başka çalışmada, Şevik ve arkadaşlarının AM60 alaşıma kalay ilavesinin mekanik özellikler etkisi üzerine olmuş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir[35,36,46].

#### **2.4.6. Magnezyum alaşımlarındaki intermetalikler**

İntermetalik fazlar hemen tüm magnezyum alaşımlarında mevcuttur. Bu intermetalik bileşenler mikroyapı ve mekanik özellikleri optimize ederken çok önemli rol oynar. Magnezyum alaşımlarındaki intermetaliklerin etkisi yüksek sıcaklıkta termal kararlılığa ve düşük sıcaklıkta çözünübilirliğe bağlıdır[13,43].

İntermetalik çökeltiler tavlama esnasında yeniden kristalleşme çekirdeklenmesini arttırabilir ve bu durum ince taneli yapı elde etmeyi sağlar. Ayrıca, intermetalik çökeltiler tavlama esnasında tane büyümesini engeller. Kumarın araştırmaları göstermiştir ki, AZ91 alaşımının yüksek sıcaklıktaki ekstrüzyonu esnasında dinamik yeniden kristalleşme ile 5 mikrondan daha küçük taneler üretilebilir. Mohri ve arkadaşları Mg-4Y-3RE alaşımının termo mekaniksel işlemi ile mikroyapıyı incelterek mukavemetini ve sünekliliğini iyileştirebildiğini göstermişlerdir. Termo mekaniksel prosesten sonra veya esnasında, yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve/veya boşluklar ortaya çıkabilir. Bu hataların oluşumu çözelti atomlarının difüzyonunu hızlandırabilir ki bu durum yaşlanma kinetiğini iyileştirir. Diğer taraftan, çözelti atomları minimum enerji ihtiyaçlarından dolayı bu hatalarda birikmeyi tercih ederler. İntermetalik çökeltiler bu bölgelerde oluşmayı tercih eder ki intermetalik çökeltilerin dağılımını etkileyebilir.

İkinci fazlar termomekanik proseslerin ve tavlama işleminin kombinasyonu kullanıldığı zaman sadece tane sınırlarında değil aynı zamanda tane içinde de oluşabilirler[13,26].

AZ, ZK ve WE alaşımları gibi dövme ve döküm alaşımlarının her ikisinde de çökelme sertleşmesi yapılabilir. Mg-Al alaşımlarının yaşlandırma işlemi  $Mg_{17}Al_{12}$  fazların çökeltmesi ile alakalıdır. Mg-Zn alaşımlarında, çökelme sertleşmesinde yer alan intermetalik çökelteleri,  $[0001]_{Mg}$  yönüne paralel uzun eksen de  $\beta_1$  dikdörtgensel çubuklar ve magnezyum matrisinin bazal düzlemine paralel uzun yüzeyde hegzagonal tabletler  $\beta_2$  içerir. WE alaşımlarında, yaşlandırma prosesi  $\beta'$  ( $Mg_{12}NdY$ ),  $\beta_1$  çökelteleri ve son denge fazı  $\beta'$  ( $Mg_{14}Nd_2Y$ ) ile alakalıdır. Yarı kararlı  $\beta'$  fazı ortorombik Bravais latis kafes yapısına sahiptir ve latis parametreleri  $a=0.64nm$ ,  $b=2.223nm$  ve  $c=0.521nm$ 'dir. Denge fazı  $\beta'$  yüzey merkezli kristal yapıya sahiptir[13].

Çökelme sertleşmesi yapılabilir, dövme magnezyum alaşımları için, bileşim belirleme işlemi yapısal çelik ve alüminyum alaşımları ile bazı benzerliklere sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda magnezyum matris içerisinde geniş çözünebilirlik aralığına sahip çözelti atomlarına ihtiyaç vardır. Sıcaklık azaltıldığı zaman, düşük sıcaklıkta ikincil fazlar çökelebilir diye çözelti atomunun çözünürlüğü uygun bir şekilde azalır. Düşük sıcaklıklarda normalde düşük termal kararlılığa sahip intermetalikler oluşur. Bu  $\beta$  fazı ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) çökelteleri gibi yüksek sıcaklıkta çözünmez ve düşük sıcaklıklarda yaşlandırılabilir. Katılma esnasında oluşmuş intermetalikler ile karşılaştırıldığında daha küçük boyutlara sahiplerdir. Denge durumuna ulaşılmadan önce, buradaki intermetalikler çökelteler birkaç yarı kararlı işlemde geçirilir. Bu yarı kararlı fazlar genelde magnezyum matris ile ilgili kristalografik oriyantasyona sahiptir. Magnezyum alaşımlarında, intermetalik çökelteler dislokasyonlar ile etkileşimleri sayesinde düşük sıcaklıklarda mukavemet arttırmak için kullanılır[13,43].



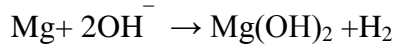
## 2.5. Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Özellikleri

1.74 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğu ile magnezyum alaşımları en hafif yapı malzemesidir. Otomobil üretiminde, portatif aletlerde, bilgisayarlarda, uçak ve diğer hafif makine üretiminde önemli avantajlara sahiptir. Maalesef, magnezyumun düşük korozyon direncine sahip olması yaygın kullanılabilirliğini engellemektedir[3,48]. Magnezyumun atmosferik ortamda kullanılmasının yaygınlaştırılması için iyileştirilmeye çalışılan ana konulardan bir tanesi de korozyon direncini arttırmaktır.

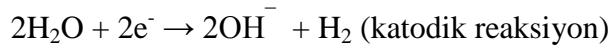
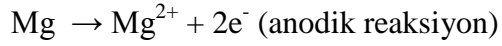
Magnezyum metalini alaşımlandırma için en yaygın kullanılan alaşım elementleri Al, Zn ve Mn'dir. Buna karşın, Fe, Co, Ni ve Cu gibi elementler magnezyum alaşımlarının korozyon direncini olumsuz etkiler. Magnezyum ve alaşımları galvanik korozyona çok duyarlıdır ve özellikle de galvanik korozyon metal içinde oluşan pitting (çukurcuklar) nedeni ile mekanik kararlılığın azalmasına neden olur. Korozyon, yüksek saflıktaki özellikle de ağır metal empüritelerden (demir, nikel ve bakır gibi) kaçınılarak üretilen alaşımlar ile engellenebilir. Bunun dışında, alüminyum içeren magnezyum alaşımlarının korozyon direnci iyileştirilebilir. Örneğin, AZ91, AZ61 ve AZ31 alaşımlarına % 5 NaCl içeren solüsyon içerisinde yapılan korozyon deneylerinde alüminyum içeriğinin azalması ile korozyon hızının arttığı gözlenmiştir[49,50]. Ayrıca, magnezyum alaşımlarının dökümü esnasında demir elementinin kontrolünü sağladığı için mangan alaşım elementinin ilavesi yapılarak korozyon direnci iyileştirilir. Fakat gereğinden fazla ilave edilirse mangan elementi alüminyum ile reaksiyona girerek AlMn(Fe) fazı oluşturur ve bu faz diğer fazlardan daha soy olduğundan dolayı magnezyum alaşımlarının korozyon direncini düşürür[50].

Aynı zamanda dizaynın, temas yüzeyinin korumasının iyi yapılması da korozyon hızını azaltır. Korozyona karşı koruma için en etkili yollardan bir tanesi üretilmiş alaşımın yüzeyinin kaplanmasıdır[43,51,52].

Saf veya alkalin suda, magnezyum yüzeyinde pasifleşmiş Mg(OH)<sub>2</sub> kristalin film tabakası oluşur. Aşağıdaki reaksiyon meydana gelecektir[3,52]:



Bu reaksiyon aşağıdaki kısmi reaksiyonların toplamını oluşturmaktadır:



Bu tabaka  $\text{pH} < 10$  solüsyonlarda kararlı değildir. Bu durum, magnezyum latis içerisindeki geometrik hatalardan dolayı tabaka içerisinde yüksek basma gerilimlerine neden olur ve bu da tabakada çatlakların oluşmasına neden olur. Bu nedenle magnezyum ortamla etkileşime girer ve korozyon başlar. Korozyon esnasında hidrojen açığa çıkar ve pasif tabakanın daha da deforme olmasına neden olur. Tabaka,  $\text{pH} > 10.5$  olan saf alkalın solüsyonda çok karardır ve  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  çatlakları kapatarak sızdırmazlık rolü oynar.

Klorit, sülfid veya karbonatlı iyonlar içeren solüsyonlar,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  pasif tabakayı parçalar ve magnezyum solüsyon ile temas edip korozyona uğrar. Kromik asit ve florik asit gibi mineral asitler magnezyum için çok tehlikelidir[3]. Korunmasız magnezyum, eksoz gazları, asit yağmurları veya tuzlar tarafından çok sıklıkla yukarıda anlatılan korozyon tipine maruz kalır.

Metal yüzeyi  $\text{pH}$  derecesi 11 civarında dengede olan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'nin oluşumu sebebiyle bölgesel  $\text{pH}$  artışlarına maruz kalır. Film tarafından sağlanan koruma buyüzden yüksek dayanım gösterir. Magnezyum, serbest grupların filme karşı gösterdikleri etkilerde ve küçük hacimli sularda korozyona karşı dirençlidir. Atmosferle etkileşen magnezyum karbondioksit ile tepkimeye girerek su sızdırmaz hidroksit filmi gibi davranan magnezyum karbonat formunu oluşturur.

Yüksek saflıktaki magnezyum bu nedenle yüksek korozyon direnci potansiyeline sahip olmaktadır. Magnezyum alaşımlarının atmosfer altındaki performansı demirden daha iyidir.

Ortaya çıkan problemler, metal veya alaşımın katot etkili malzeme ile galvanik çift oluşturması ya da doğal çevre koşullarının koruyucu film oluşumuna neden olmasını önlediği zamanlarda ve empürite elementlerinin galvanik hücre reaksiyonlarının ilerlediği katmanlarda mevcut bulunması problemleri ortaya çıkartmaktadır[53].

Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, saf magnezyumun 1 Normalite NaCl çözeltisi içinde farklı pH değerlerinde gösterdikleri elektrokimyasal polarizasyon davranışlarını, hidrojen gelişim oranlarını ve ICPAES yardımıyla çözünen magnezyumun miktarını ölçmüşlerdir. Magnezyum üzerinde oluşan filmin korozyon kontrolünde önemli bir etken olduğunu ve uygulanan elektrot potansiyeli arttırıldığında bu filmin kalınlığının azaldığını göstermişlerdir[54].

Song ve arkadaşları, başka bir çalışmada AZ21, AZ91 ve AZ501 'in korozyon davranışını anlayabilmek için 1N NaCl içinde pH:11'de elektrokimyasal polarizasyon akımlarını, elektrokimyasal AC impedans spektroskopilerini, hidrojen gelişim oranı ve magnezyum çözünme hızı ölçme çalışmaları yapmışlardır[55]. Sonuç olarak korozyon hızının AZ501, AZ21, AZ91 seklindeki sırayla değiştiğini göstermiş ve bunun, alaşım mikroyapılarındaki farklılıktan kaynaklandığını belirlemişlerdir. Bu nedenle elektron mikroskobu ve optik mikroskop yardımıyla alaşım mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda,  $\beta$  ötektik faz karışımının çözelti içinde kararlı ve etkili bir katot olduğunu ve yapıda bulunuşuna göre iki farklı davranışta hareket ettiğini saptamışlardır. Song ve arkadaşlarına göre, eğer  $\beta$  ötektik faz karışımı  $\alpha$  matriks içinde küçük miktarlarda bulunuyorsa, galvanik katot gibi hareket eder ve  $\alpha$  matriksin korozyon hızını arttırmaktadır. Diğer yandan eğer  $\beta$  ötektik faz karışımı miktarı yüksekse anodik bariyer gibi hareket eder ve alaşım tümüyle korozyona uğramaktadır. Song ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalarda  $\alpha$  matriks içindeki Al miktarı artışının, anodik çözünme hızını ve katodik hidrojen gelişim oranını arttırdığını görmüşlerdir.  $\alpha$  matriks içinde bulunan Zn'nin ise tam tersi bir etki yaratacağını öne sürmüşlerdir [55].

### 2.5.1. Galvanik korozyon

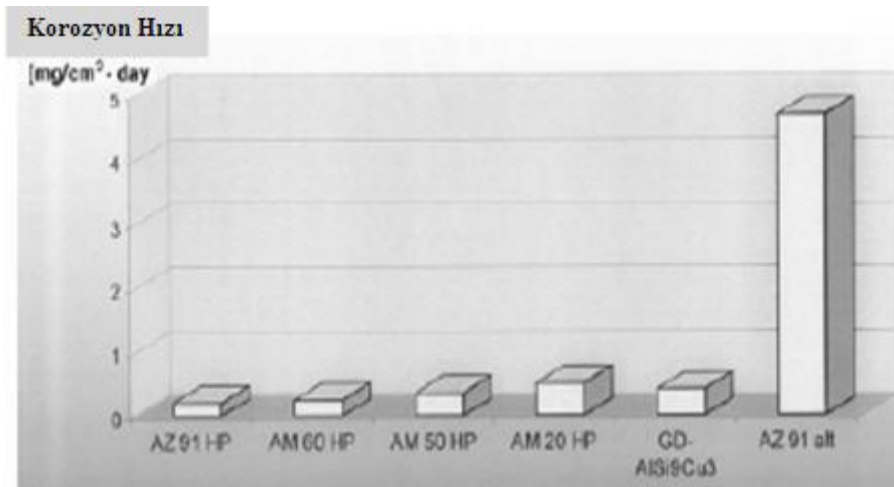
Magnezyum alaşımları galvanik korozyona karşı oldukça hassastır[28,30]. Galvanik korozyon için temel gereksinimler galvanik elementlerin oluşumudur. Bu korozyon türüne iki nedenden dolayı rastlanır[3].

1. Magnezyum alaşımları daima soy ağır metaller özellikle Fe, Cu, Ni gibi bileşenler içerir.
2. Hemen hemen hiçbir magnezyum üretim tekniğinde, magnezyum diğer harcanabilir metaller ile temas halinde olmaz.

Birinci neden ele alındığında,

Ağır metal özellikle demir, bakır veya nikel içeren magnezyum alaşımlarında en sık rastlanan korozyon türü galvanik korozyondur. Alaşımlar sulu ortam ile etkileşimde oldukları zaman ağır metaller magnezyum için katodik etki oluşturur ve bu da çok yoğun galvanik korozyona neden olur. Tüm proses spesifik anyonlar(klorit, sülfid gibi) tarafından desteklenir. Yüksek saflıktaki (HP) magnezyum alaşımlar bu oluşumu engellemek için geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir[3, 52].

şekil 2.12'de tuz püskürtme yöntemi ile yapılmış korozyon testlerinin (DIN 50021-SS) sonuçlarında magnezyum alaşımları ile GD-AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> alaşımının karşılaştırılmaları görülmektedir[3].



şekil 2.12. Magnezyum döküm alaşımları ile GD-AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> alaşımlarının korozyon testleri

İkinci neden ele alındığında, birbiri ile elektriksel etkileşimde bulunan iki metal farklı potansiyele sahip olurlar. Yüksek farklılık, daha az soy olan magnezyum(anot) metali çözünecektir. Galvanik korozyon için alınabilecek tedbirler; kuru atmosferde, magnezyum için galvanik korumaya ihtiyaç yoktur.

Yoğun korozyon ortamı olduğu zaman, aşağıdaki tedbirler önerilmektedir:

1. Magnezyum ve diğer metalik malzemeler arasındaki elektriksel etkileşim izolasyon ile engellenmelidir. Bakır, nikel, demir veya paslanmaz çelik ile diğer temas ettirilmemelidir.
2. Al/Mg alaşımları (AlMg 2.5, AlMg4.5Mn, AlMgSi1), veya çinko, kalay veya kadmilyum içeren alaşımlarda çok az galvanik korozyon görülür. Çelik ve alüminyum vidalar kullanıldığı zaman korozyon etkileşimi kaplanmış contalar kullanılarak kolayca etkileşim ortadan kaldırılabilir.
3. Kontak alanlarında elektrolit birikmelerinden kaçınılmalı.

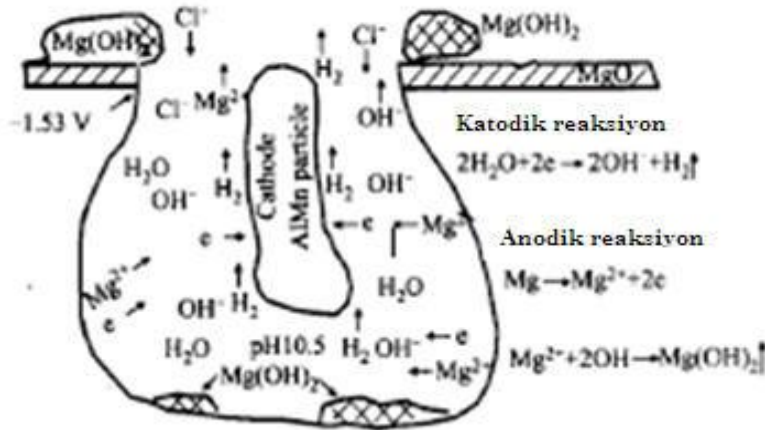
### 2.5.2. Oyuk korozyonu

Magnezyum tabiatı gereği pasif bir metaldir. Çukur korozyonu oksidasyonun olmadığı ortamda magnezyumun klorlu iyonlara maruz kalması sonucunda meydana gelecektir. Genel olarak, korozyon çukurları pasifizasyonun kırılması sonucu  $Mg_{17}Al_{12}$ , AlMn gibi ikincil faz partiküllerinin bitişiğindeki kusurlu bölgelerde başlar. Daha sonrasında elektrolitik hücre oluşur ve ikincil faz partikülleri(AlMn, AlMnFe,  $Mg_{17}Al_{12}$ ,  $Mg_2Cu$ ) katot ve Mg matriks çevresinde anot olarak davranır. Örneğin, ekstrüzyon ile üretilmiş AM60 %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakılırsa AlMn partikülleri çevresinde çukurlar meydana gelir[3,50].

Şekil 2.13'te AM60 alaşımının oyuk korozyon mekanizması gösterilmektedir.

Birincil olarak, atmosferde alaşım üzerinde koruyucu oksit film oluşacaktır.  $MgO$ 'in potansiyeli 1 Volt'tur. Sonrasında sodyum klorürlü bir çözeltiye maruz kaldığı zaman  $Cl^-$  iyonları AlMn partiküllerinin sınırında  $\alpha$ -Mg matriksinde absorblanacaktır.

Eğer MgO'nin kırılma potansiyeli serbest korozyon potansiyeline ulaşırsa,  $\alpha$ -Mg anot olarak çözülmeye başlayacak ve korozyon çekirdeklenmesi AlMn partiküllerine yakın yerde başlayacaktır. Sonuçta çekirdeklenme ilerleyerek korozyon çukuru oluşacaktır[50].



Şekil 2.13. AM60 alaşımının oyuk korozyon mekanizması[50]

### 2.5.3. Korozyondan korunma yöntemleri

Magnezyum ve alaşımları için üç ana koruma yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar;

- Magnezyum alaşımlarının saflık derecelerini maksimuma çıkarılması,
- Spesifik alaşım elementlerinin eklenmesi,
- Magnezyum alaşımlarının yüzey işlemleri.[3,48,56].

Magnezyum alaşımlarının saflıklarının artırılması daha öncede değinildiği gibi ağır metallerin alaşım içerisinde minimuma indirilmesi ile mümkündür. Klasik alaşım elementleri magnezyumun korozyon direncini çok fazla arttırmamaktadır. Spesifik alaşım elementlerinin (Nd, LZ ve Ce gibi) eklenmesi magnezyum alaşımlarının korozyon davranışını olumlu yönde etkilemektedir.

Nadir toprak elementlerinin elektro-kimyasal standart potansiyelleri magnezyumunkine yakındır. Bu nedenle galvanik korozyona karşı koruma sağlarlar. Örneğin; WE54 (%5 Y, %3.5 Nd ve diğer RE, %0.5 Zr) 300°C'ye kadar ısıl direnci ve mükemmel korozyon direnci gösterirler[3].

Magnezyum alaşımlarını korozyondan korumanın bir diğer yolu da yüzey işlemleri ile magnezyum alaşımlarının modifiye edilmesi sonucunda korozif ortamdan yalıtılmasıdır. Fakat yüzey işlemlerinin istenilen yararı sağlaması için bazı önemli başlangıç kriterlerini sağlaması gerekmektedir.

1. En iyi şekilde yüzey korunsa bile malzeme yüksek saflık da olmadığı zaman iyi bir sonuç alınmaz.
2. Magnezyum basınçlı döküm alaşımlarının döküm çeperleri sıkı paket alana sahiptir. Asit temizleyici veya mekanik işlemler ile bu tabaka kaldırılabilir ve daha sonra yüzey koruma işlemleri gerçekleştirilir.
3. Yüzey koruma işlemi için döküm boşluklarının minimum olması gerekir.

## **BÖLÜM 3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

### **3.1.Giriş**

Ham malzemeyi kullanılabilir bileşen haline getirmek için en ekonomik üretim yöntemlerinden bir tanesi döküm ile üretimdir[57]. Yüksek basınçlı döküm, gravity döküm( kum kalıba döküm ve sürekli kalıba döküm), sıkıştırma döküm ve çeşitli yarı-katı döküm metotları mevcuttur. Döküm ile üretilmiş alaşımlar kullanılan yöntemlere göre farklı mekanik özellikler içerirler[3, 7,58].

Genel olarak bakıldığında döküm yolu ile şekillendirilen magnezyum miktarında özellikle 1995 yılından itibaren önemli artışlar gözlenmektedir. Bu çok kuvvetli artış, ekstraktif araştırma-geliştirme, yeni magnezyum yataklarının açılması ve var olanlarının genişlemesi ile gerçekleşmiştir. Magnezyum dökümünde meydana gelen global büyümenin önümüzdeki yüzyılda da hızlı bir gelişme göstereceği tahmin edilmektedir[59].

Özel bir parça için döküm yöntemi seçiminde tasarım şekli, arzu edilen mekanik ve nihai yüzey özellikleri, üretilecek toplam döküm parça adedi ve alaşımların dökülebilirliği belirleyicidir. Dökümde kullanılacak çok fazla alaşım çeşidi mevcut olmasına rağmen, her alaşım her döküm yönteminde kullanıma uygun değildir[59].

Al alaşımları 2-2.5 mm kesit kalınlıklarına kadar dökülebilirken Mg alaşımları 1-1.5 mm kesit kalınlığına kadar dökülebilen bir metaldir. Mg alaşımlarının dökülmesindeki ana problem, oksitlenme ve yanma kaybıdır.



Havacılıkta kullanılan Mg esaslı parçaların büyük oranının döküm yoluyla üretildiği göz önüne alınırsa parça üretiminde döküm problemlerinin çözümü ana öncelikler arasında yer almaktadır[9, 59].

Magnezyum döküm alaşımları genellikle, dışarıdan ısı uygulamalı bir çelik karbon (<math>C</math> <math><0,12</math>) potada ergitilir. Çelik pota çok yaygın olarak kullanılır, çünkü magnezyum normal döküm sıcaklıklarında (magnezyum 650°C' de ergir) çelikle çok yavaş reaksiyona girer. Ergiyik magnezyum prosesi için en yaygın uygulama yöntemi, metali aynı anda ergitme ve potadan kalıba dökmektir. Kalıptaki demir sıvı magnezyum alaşımı içinde daha az çözüldüğünden, alaşımın kalıba yapışma eğilimi, alüminyum alaşımlarına göre daha azdır. Buna bağlı olarak kalıp ömrü alüminyum parçalara kıyasla 2-3 kat daha uzundur.

Ancak ergiyik magnezyum ve alaşımları havada oksitlenme ve yanma eğilimindedirler ve bu nedenle ergiyik magnezyum yüzeyleri hava ile oksidasyondan korunmalıdır. Bugün çoğu modern dökümhaneler, hava-kükürt hekzaflorit gaz karışımı ( $SF_6$ ) şeklinde bir örtüsüz proses kullanmaktadır[26].

Mg alaşımının ergitilmesinde ve dökümünde koruyucu olarak kullanılan gazların (Ar,  $SF_6$ , N ve HFC-134a) etkileri araştırmacıların ilgisini çekmektedir[26]. Döküm malzemesi içindeki curuf kalıntıları korozyon dayanımını düşürmektedir. Günümüzde  $SF_6$  içeren gaz karışımları sıvı Mg'yi korumak için daha sık kullanılmaktadır. Tipik koruyucu gaz karışımı için aşağıda üç örnek verilmiştir[25,60-62].

1- AZ91 650-725°C → Hava+%2  $SF_6$

2- AZ91 650-725°C → %75 Hava+%25  $CO_2$ +%0,2  $SF_6$

3- AZ91 650-725°C → %50 Hava+%50  $CO_2$ +%0,3  $SF_6$

$SF_6$ , %5'in üstündeki konsantrasyonlarda kullanıldığında, Mg için çok iyi bir koruyucu olmakta, ancak çelik kalıplarla ve pota ile reaksiyona girmektedir.

Mg alaşımlarına çok az miktarda berilyum (Be) ilavesi alaşımın yanmasını engelleyici etkisi vardır. Alaşımların ergitilmesinde özel olarak dizayn edilip hazırlanmış ergitme ocakları kullanılmaktadır. Bu ocaklarda Mg alaşımları atmosfer ortamından tamamen uzak ve koruyucu gaz altında ergitmeler yapılmıştır[60-62].

Magnezyum ve alaşımlarının üretiminde kullanılan döküm teknikleri 4 grupta toplanır. Bunlar; [9,59,63]

- 1) Kum kalıba döküm
- 2) Kokil kalıba döküm
- 3) Basıncılı döküm
- 4) Yarı-katı döküm

Döküm süreçlerinden birinin seçimi diğer döküm malzemelerine benzer bir şekilde büyüklük, gerekli tolerans ve üretim miktarına göre belirlenir.[9]

Magnezyum alaşımları için birçok değişik döküm yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı döküm, thixocasting, savurma döküm, sürekli döküm ve kum dökümdür. Farklı magnezyum alaşımları için farklı yöntemler uygulanmakta ve bu alaşımlar farklı mekanik özellikler göstermektedir. Genellikle magnezyum alaşımları otomobil parçalarında, meskenlerde ve elektrik parçalarında kullanılmak üzere pres döküm tekniği ile üretilirler. Pres döküm yönteminin genel avantajları şunlardır:

1. Yüksek hassasiyet,
2. İyi döküm yüzeyi,
3. Yüksek retilbilirlik,
4. İnce kesitli ve kompleks şekilli parçaları üretimi.

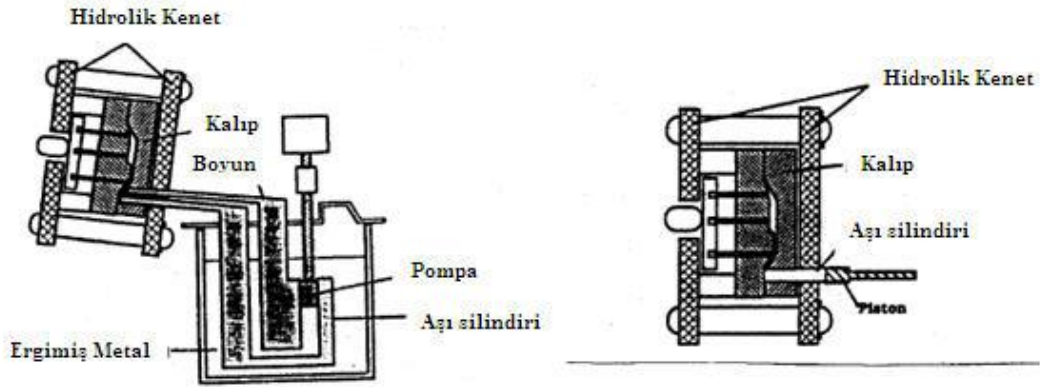
Pres döküm yönteminin magnezyum ve alaşımlarının üretimindeki en önemli avantajları ise,

1. Hafiflik,
2. İyi işlenebilirlik,
3. Yüksek ısılatma kapasitesi,
4. Yüksek spesifik dayanım,
5. İyi dökülebilirlik,
6. Düşük ergime sıcaklığı,
7. Düşük ergitme enerjisidir[59].

Magnezyum alaşımlarının pres dökümü için sıcak veya soğuk kamaralı teknolojiler uygulanmaktadır. Bu yöntemde sıvı metal, pistonlar vasıtası ile kalıba itilir. Şekil 3.1 (a) ve (b)'de sıcak kamaralı döküm makinesinin şematik resmi verilmiştir. Bu yöntemin avantajları şunlardır;

1. Yüksek üretilebilirlik,
2. Metalin çok iyi korunması,
3. Düşük metal sıcaklığı ve
4. Uzun kalıp ömrü.

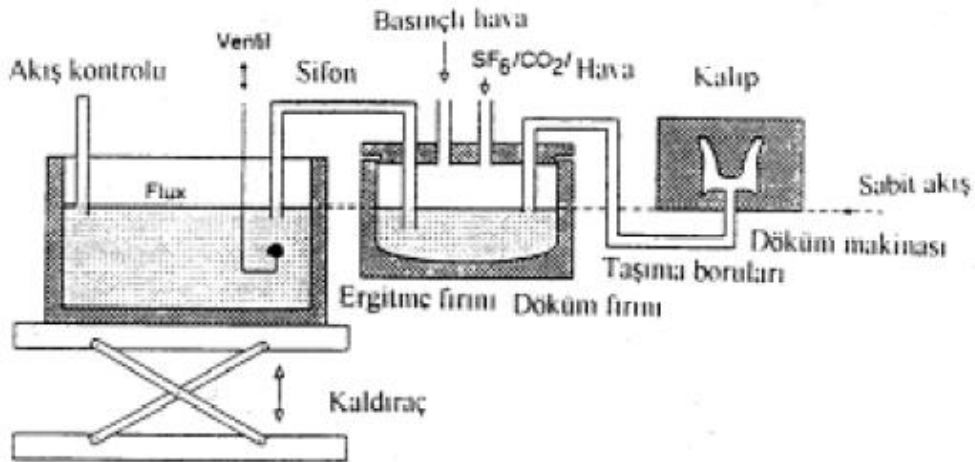
Buna karşılık yöntemin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin makineler pahalı ve komplikedir. Ayrıca bakımları pahalıdır. Sıcak kamaralı yöntemde nispeten küçük magnezyum alaşımı parçalar dökülür.



Şekil 3.1. a) Sıcak kamaralı döküm makinesi, b) Soğuk kamaralı döküm makinesi[59]

Soğuk kamaralı pres dökümde ise pistonlar ertitme fırınından dağıtırlar (Şekil 3.1b). Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları sıcak kamaranınkinin tam tersidir. Bu metotta sıvı metal fırın içinden doğrudan silindirler vasıtası ile taşındığından magnezyum metali oksidasyondan korunur. Yeni döküm teknolojileri vakum altında döküm, squeeze döküm yöntemlerinin magnezyum alaşımlarına uygulanması ve magnezyum matriks kompozitlerin (MMC) üretilmesine yöneliktir[59].

Magnezyum alaşımlarının döküm yöntemlerinden biri olan düşük basınçlı döküm tekniği tamamen kapalı sistemde yapılan ertitme ve döküm nedeniyle çok kaliteli, temiz alaşım üretimini sağlar. Şekil 3.2’de düşük basınçlı döküm sisteminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 3.2. Düşük basınçlı döküm sistemi[59]

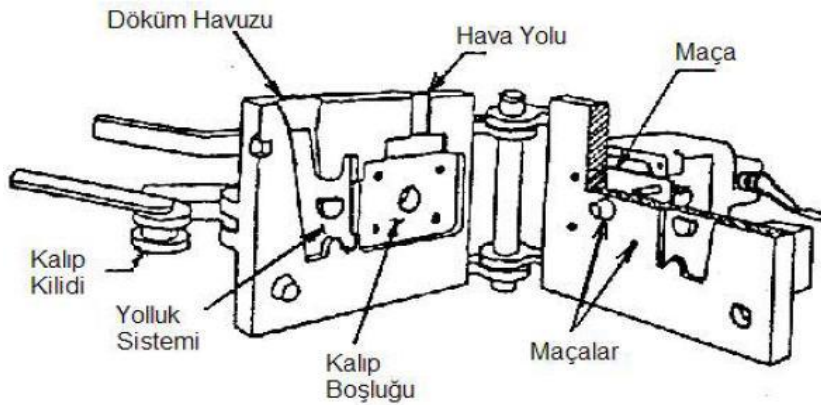
### 3.2.Kum Kalıba Döküm

Kum kalıp dökümü, bilinen geleneksel döküm yöntemidir. Bu yöntemde kum aralarından hava alacağından Mg'un yanma tehlikesine karşı önlemler alınmalıdır. Kalıp boşluğu koruyucu gaz ile korunmalıdır. Mg alaşımlarında bilinen ve uygulanan en iyi kum döküm yöntemi kabuk kalıpcılığıdır[59,63]. Bu kalıpta kumlar arasında reçine tabaka oluştuğundan Mg'un kalıp içinde yanma tehlikesi azalmış olacaktır.

Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımları genelde kolay dökülmelerine rağmen, belli durumda sınırlılıkları vardır. Kum kalıba döküldüklerinde mikro çekme gösterirler ve 95°C'in üzerindeki sıcaklıklardaki uygulamalar için uygun olmadığı gözlenmiştir.EZ33A alaşımında kuma dökümler çok iyi dayanım gösterirler[9,59,63].

### 3.3.Kokil Kalıba Döküm

Kokil kalıp döküm, iki ya da daha fazla parçadan oluşan metal kalıba döküm teknolojisidir. Aynı şekilli birçok parçanın dökümü hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Sıvı metal yer çekimi etkisiyle kalıba girer. Bu yöntem çok sayıda üretilecek, karmaşık biçimli ve boyut toleransları dar parçalar için tercih edilir. Kalıp malzemesinin dökülecek metalin gerektirdiği refrakterliğe sahip olması gerekir ve çoğu zaman özel dökme demir veya çelik kullanılır. Düşük sıcaklıklarda ergiyen metaller için kalıp malzemesi olarak bronz da kullanılabilir[63].



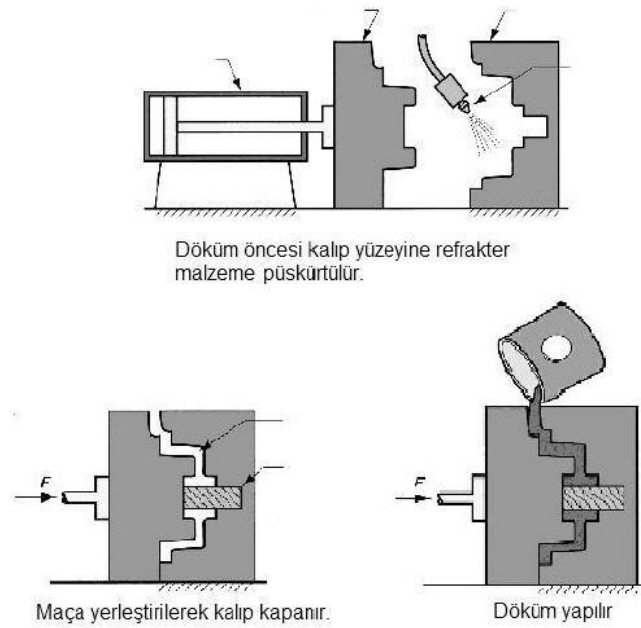
Şekil 3.3. Mentşeli bir kokil kalıp örneği[63]

Kokil dökümde tek bir kalıpla demir esaslı malzemelerden 3000-10000, magnezyum ve alüminyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerden ise 100000'e kadar parça dökülebilmektedir[63].

Metal yani kokil kalıba döküm yönteminde katılaşma sırasında soğuma, kum kalıplardan daha hızlıdır. Bu nedenle dökülen üretilen malzemenin iç yapısı daha ince taneli olur. Boyut hassasiyeti  $\pm 0,25$  mm olduğundan, parça yüzeylerinin temizleme işlemini gerektirmeyecek kadar yüksek kalitededirler[63].

Kum dökümle kıyaslandığında kokil kalıp dökümünün üstünlüğü; boyutsal toleransları ve yüzey kalitesi sayesinde, daha uniform döküm parçaların üretiminin sağlanmasıdır. Döküm işleminin süresinin uzaması ile ergimiş metal, kalıba keskin bir türbilans ve sıçrama ile girer. Ergimiş metalin uzun sürede düşmesini önlemek amacıyla eğik döküm makinesi, üretimde sıklıkla kullanılmaktadır[9].

Metal kalıplarda kullanılan maçalar metal, kum veya alçıdan yapılabilir. Maçaların metal malzemedan, yani kalıbın bir parçası olması durumunda, bunların biçimi parçanın soğuyarak büzülmesi sonrasında çıkarılması zorlaştırmayacak şekilde olmalıdır. Bu mümkün değil ise, metal olmayan maçalar da yani kum veya alçı maça kullanılır. Bu yöntemde de, yarı kalıcı kalıba döküm denir. Kalıp ömrünü arttırmak için kalıp boşluğu döküm öncesinde refrakter malzemelerle kaplanır ve bu sayede parçanın kalıptan çıkarılması kolaylaştırılır[63].



Şekil 3.4. İki parçalı bir kokil kalıpta döküm işleminin gösterimi[63]

Şekil 3.3 ve 3.4, kokil kalıpların genellikle açılıp kapanan ya da daha çok parçadan oluştuğunu göstermektedir. Kalıp kapandıktan sonra oluşan boşluğa ergimiş metal dökülür. Katılaşma beklendikten sonra kalıp açılarak dökülen parça çıkarılır. Bu işlemler elle yapılabileceği gibi, bir tertibat yardımıyla veya mekanizmaya geçirilmesi halinde makineler tarafından da yapılabilmektedir[63].

Kalıp üretiminde kalıp boşluğu ve diğer kanallar talaşlı imalat yöntemiyle açılır. Kalıp malzemesi geçirgen olmadığından hava kanalları açılması zorunludur. Kokil kalıp tasarımı genellikle büyük deneyim ister ve önceden yapılan katı modelleme programları işlemleriyle oluşabilecek döküm hataları en aza indirilerek tasarım gerçekleştirilebilmektedir.

Kalıp cidar kalınlıkları çoğunlukla 18 ile 50 mm arasında seçilir. Metal kalıpların cidar kalınlığının belirlenmesinde ısı girdi ve çıktılarının dikkate alınması gerekmektedir. Bunun sebebi, kokil kalıba döküm yönteminin başarısı kalıbın sürekli çalışma sırasındaki sıcaklığa bağlıdır ve gerektiğinde kalıp soğutulabilmektedir. Ayrıca döküm başlangıcında ergimiş metalin kalıba düzgün bir şekilde dolması için birçok kez kalıp önceden ısıtılır[63].

Daha yüksek döküm sıcaklıklarına çıkabilmek için, kalıcı kalıpların malzemesi metal dışında refrakter özelliği daha iyi olan malzemelerde kullanılabilir. Grafit kalıplar buna örnektir. Bu kalıplar alüminyum ve magnezyum gibi alaşımlarda az sayıda parça üretimi için tercih edilir. Fakat döküm sıcaklığı arttıkça kalıp ömrü azalır ve bu kalıplar çok çabuk aşındıkları için özel uygulamalarda kullanılırlar[63].

Kokil kalıba döküm gerçekleştirildikten sonra eğer mümkünse parça tam soğuma gerçekleşmeden hemen çıkarılır ve bu sayede dökülen parçanın oda sıcaklığına kadar serbestçe büzülmesi sağlanır.

Kokil (metal) kalıba döküm yönteminin avantajları;

1. Üretilen parçanın yüzey kalitesinin iyi olması
2. Temizleme masraflarının düşük olması,
3. Hassas boyut toleransları,
4. İnce taneli içyapı sayesinde mekanik özellikleri daha iyi,
5. Seri üretim için ekonomik bir uygulama.

Bu yöntemin dezavantajları ise;

1. Her malzemenin bu yöntem ile dökülememesi,
2. Bazı dökülen parçalar için kalıptan çıkarma güçlüğü,
3. Sadece küçük parçaların üretimi için uygun olması,
4. Kokil kalıp maliyet gerektirdiğinden ancak seri üretimde ekonomik olması.

Kokil kalıba döküm genellikle demir dışı metallerin dökümü için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle üretilen parçalara örnek, hidrolik fren silindirleri, biyel kolları, soğutucu kompresör gövdeleri, mutfak eşyaları ve alüminyum daktilo parçaları verilebilir[63].

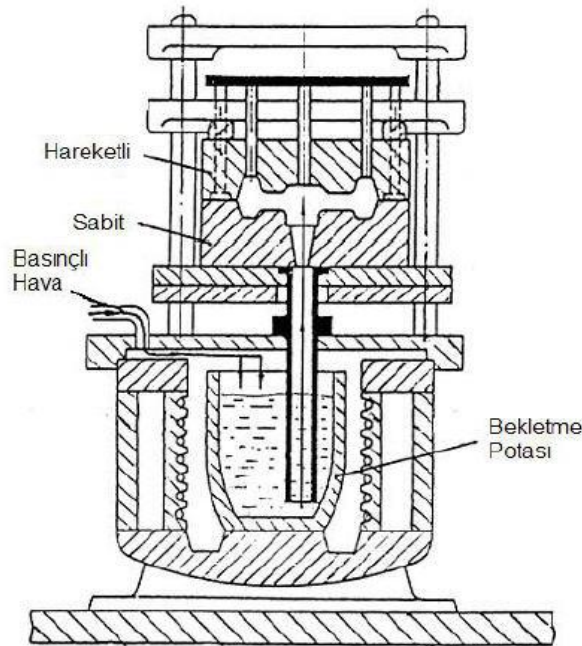


Mg-Al-Zn tipi alaşımlar kokil döküm yöntemiyle üretilen alaşımlardır. Bu yöntemde Mg alaşımları Al alaşımlarından çok daha hızlı dökülür. Al alaşımlarına göre kalıp ömrü daha uzundur.

Çünkü Mg'da kalıp yüzeyine yapışma riski daha az, Al'da ise daha fazladır. Doğru bir biçimde kullanıldığında ve korunduğunda, koruyucu kaplama yöntemleri ile de kalıp ömrü daha da çok artırılabilir. Mg alaşımının farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri Al ile karşılaştırıldığında, farklı pota malzemeleri kullanılır. Ergimiş Mg, ergimiş Al'da olduğu gibi Fe ile reaksiyona girmez. Bu nedenle Mg ve alaşımları, Fe ve çelik potalarda ergitilebilir ve tutulabilir[9].

### 3.3.1. Alçak basınçlı döküm

Dar kalıp boşluklarına sahip kalıcı kalıplarda metalin yerçekimi yardımıyla dolması zordur. Böyle durumlarda alçak basınçlı döküm yönteminden yararlanılır. Şekil 4.3'te bir alçak basınçlı döküm makinesi gösterilmektedir. Metal alttan ve sıcaklığın kontrol edildiği bir haznedan beslenir. Metal bekletme potasının ortasından basıldığında daha temiz bir döküm elde edilir[63].



Şekil 3.5. Alçak basınçlı döküm[63]

### **3.3.2.Vakumlu kalıcı kalıba döküm**

Bu yöntemde ergimiş metalin bulunduğu bölgeye basınç uygulamak yerine, kalıp boşluğuna vakum yapılır. Buradaki vakumun görevi, ergimiş metalin içindeki gazların giderilmesine yardımcı olmak ve kalıp boşluğunda bulunan havayı uzaklaştırmaktır[63].

### **3.3.3.Boşaltma döküm**

Kokil kalıba dökümde katılaşma kalıp yüzeylerinde başlamaktadır. Bu katılaşma ile kalıp yüzeyine komşu bölgelerde bir kabuk oluşur ve bu kabuğun kalınlığı bekleme süresi ile ayarlanabilmektedir. Eğer parçanın tam olarak katılaşması beklenmeden orta kısımlardaki sıvı metal kalıptan dışarı boşaltılırsa, içi boş döküm parçaları elde edilebilir. Bu yöntemle üretilmiş parçalarda parçanın dış yüzey kalitesi iyidir. Fakat parçanın mekanik dayanımı ve iç yüzey kalitesinin iyi olması beklenmemelidir. Çinko, kurşun gibi metallerden üretilen heykeller, oyuncaklar, lamba ayakları boşaltma döküm yöntemiyle üretilen uygulamalara örnek gösterilebilir[63].

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Çalışma Programı

Bu çalışma da, saf magnezyuma sırasıyla ağırlıkça %1, 3, 5 kalay alaşım elementi ve ağırlıkça %1 çinko alaşım elementi sabit tutularak aynı şekilde ağırlıkça %1, 3, 5 kalay alaşım elementi ilave edilmiştir. Üretim yöntemi olarak kontrollü atmosfer altında metal kalıba kokil döküm yöntemi kullanılmıştır ve üretilen alaşımların karakterizasyonunu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen alaşımlara sertlik testi, kimyasal analiz, çekme, basma ve korozyon testleri uygulanmıştır. Bu deneyler optik mikroskop(OM) çalışmaları ile desteklenmiştir. Ayrıca üretilen bu alaşımlar üzerinde daha ayrıntılı mikroyapı, XRD, EDS ve SEM çalışmaları yapılarak oluşabilecek başka bileşiklerin varlığı araştırılmıştır.

### 4.2. Kullanılacak Deney Malzemeleri

Saf magnezyum ve farklı element ilavesi ile elde edilecek alaşımların üretimi için, ağırlıkça %1 Sn , %3 Sn, %5 Sn kullanılmıştır ve bunlara ek olarak çinko alaşım elementi ilavesi ile oluşabilecek değişimleri görebilmek için ağırlıkça % 1 Zn sabit alınarak ağırlıkça aynı değerler %1 Sn , % 3 Sn ,% 5 Sn kullanılmıştır.

Saf Magnezyum



Saf Kalay



### Saf Çinko



Magnezyum alaşımlarının kontrollü atmosfer altında metal kalıba kokil döküm yöntemi ile üretilmesi esnasında eriyiğin korunması için % 99 CO<sub>2</sub> +%1 SF<sub>6</sub> gaz karışımı kullanılmıştır.

### Koruyucu Gaz ( % 99 CO<sub>2</sub> +%1 SF<sub>6</sub>)



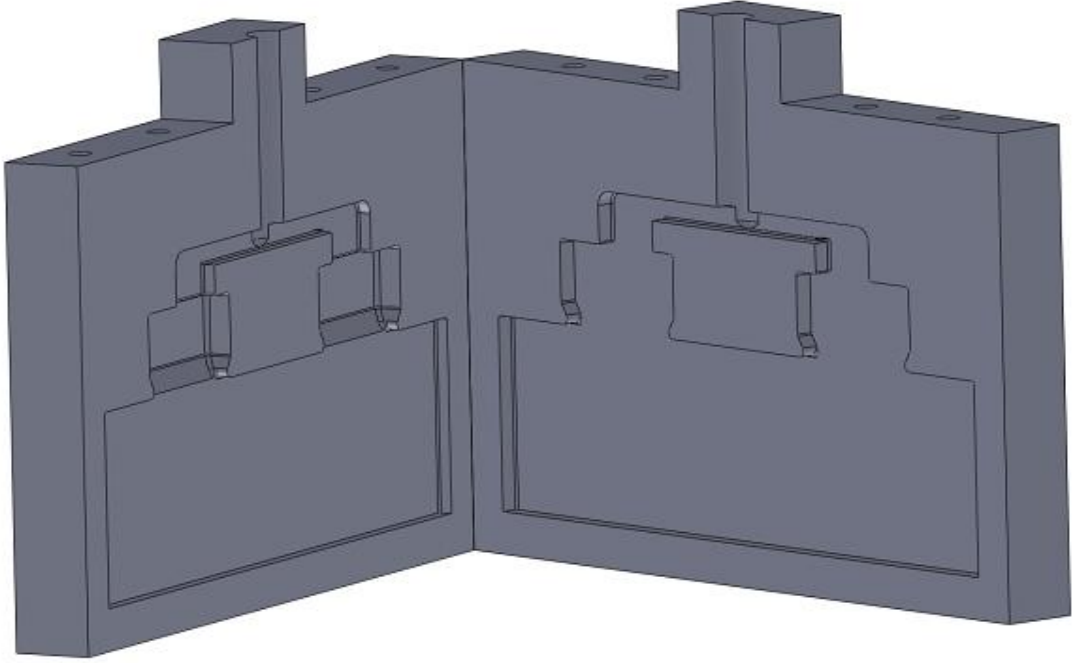
Kullanılan koruyucu gaz SF<sub>6</sub> (sülfür hegzoflorür), havadan beş kat daha ağırdır. SF<sub>6</sub> gazı içindeki F gazları, Mg yüzeyinde MgF<sub>2</sub> oluşturarak Mg'un dışarıyla temasını kesecek ince koruyucu bir tabaka meydana getirir. Böylece oksitlenmeyi engeller.

### 4.3.Fırın Tasarımı

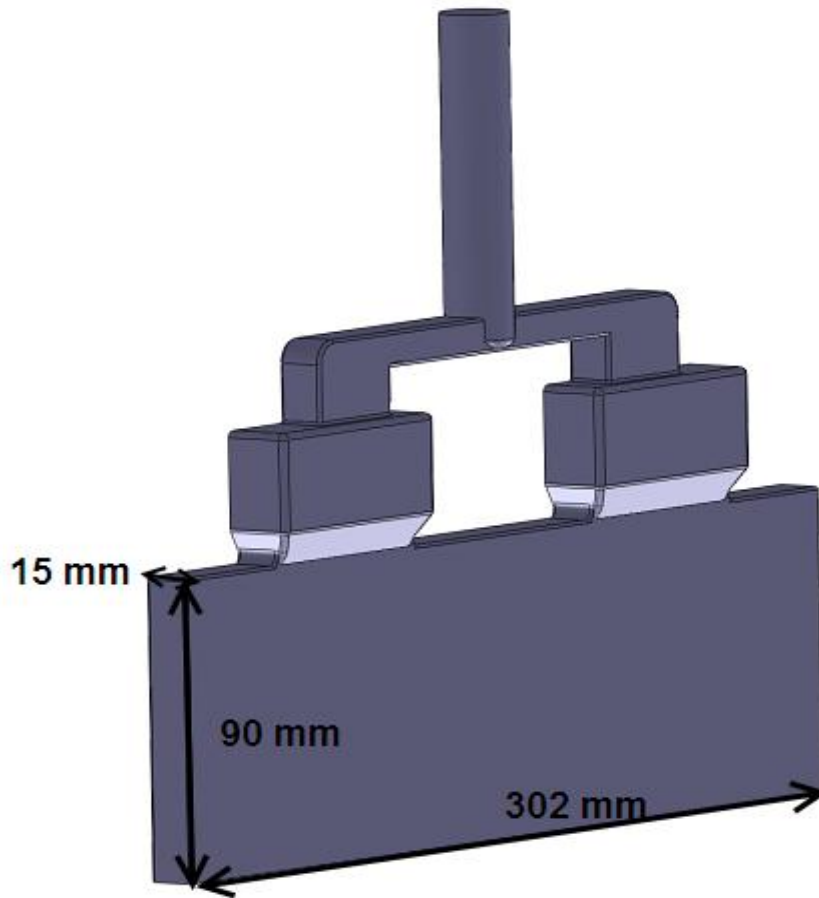
Bu çalışmada, öncelikle döküm yapılacak fırın tasarımı yapılmıştır. Kullanılacak kalıp, lamel grafitli dökme demir ile önce katı modelleme programında tasarlanmış, döküm hatalarına bakılarak en mükemmel döküm gerçekleştirilen kalıp tasarımı uygulanarak üretilmiştir. Kalıbın ısıtılması için yan yüzeylerine toplam 8 adet resistans yerleştirilmiş ve bir yan yüzey kenarından vakum deliği açılmıştır. Vakumu tam olarak sağlayabilmek için kalıp çevresine her bir dökümde 300°C'ye dayanıklı silikon conta çekilmiş ve yolluk giriş kısmına da boyutlarına göre bakır contalar kesilerek yerleştirilmiştir.

Ergitme potasında ise ergime aralığı 1400-1450°C olan ısıya dayanıklı, kolay reaksiyona girmeyen, üstün oksidasyon direncine sahip, yüksek Cr ve Ni içeren ostenitik paslanmaz çeliği olan 310 paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Refrakter malzemesi olarak 1200°C'de çalışabilen remlite45 izole beton malzemesi kullanılmıştır. Remlite45 izole beton malzemesi, iyi bir mukavemete sahip olup püskürtme veya döküm olarak uygulanabilen bir malzemedir. Saf su karıştırılarak fırın dizaynına özel yapılan kalıplara dökülüp bir gün bekletilip kurutularak hazırlanmıştır.

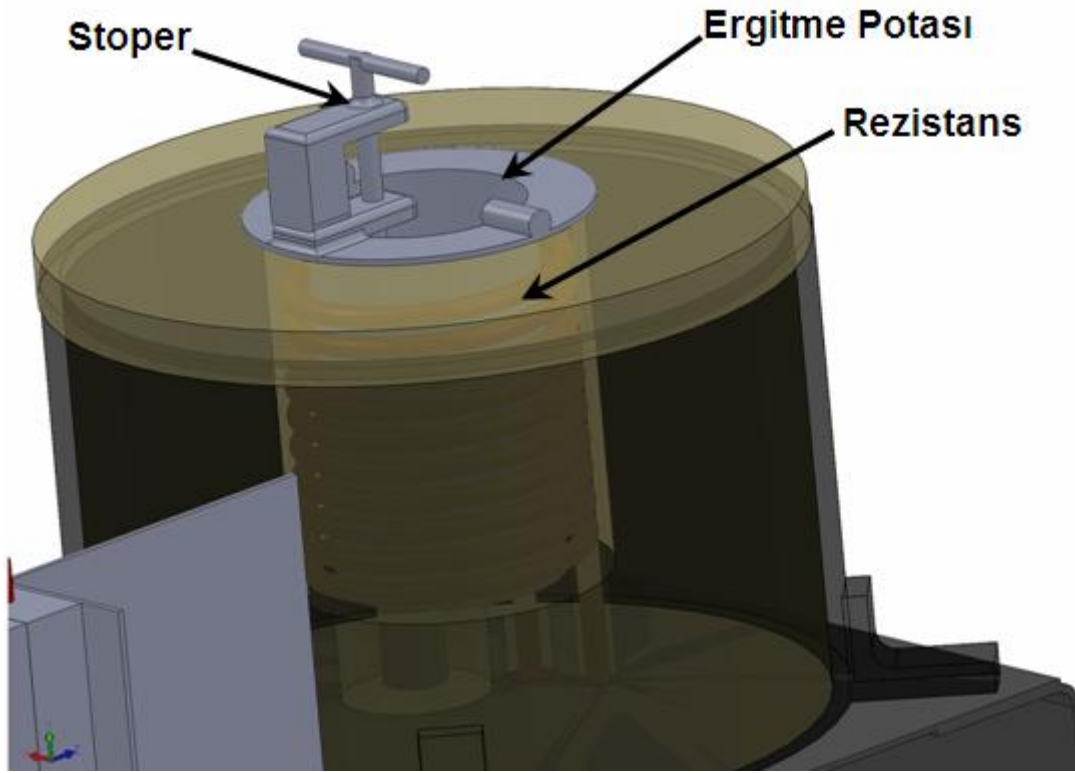
Fırın taban ve yan levhalarında en az 37 kg/mm<sup>2</sup> veya 370 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip olan basit karbonlu çelik levhalar kullanılmıştır. Kalıbın kolaylıkla açılıp kapanabilmesi için pnömatik sistem eklenmiştir.



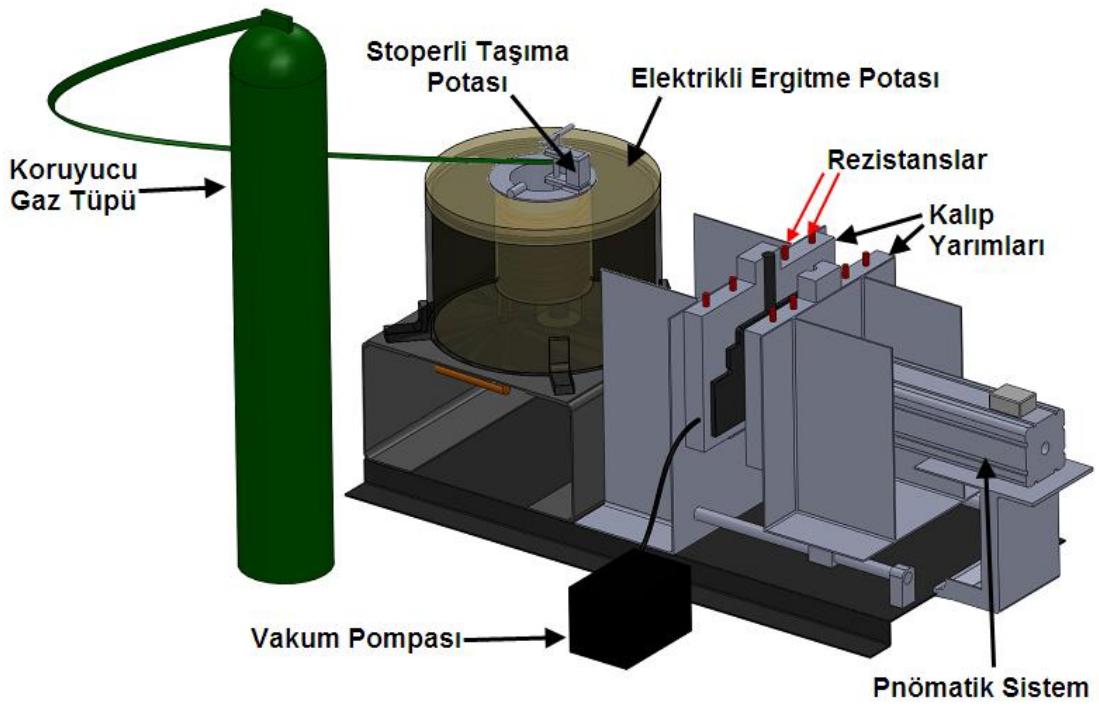
Şekil 4.1. Döküm yapılan kalıbın katı modelleme programındaki görüntüsü



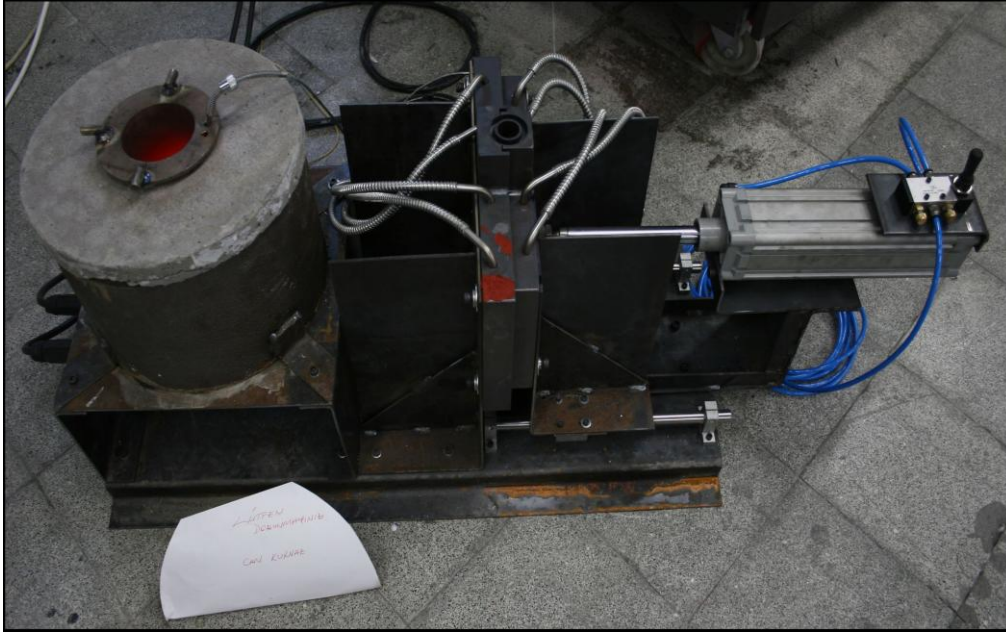
Şekil 4.2. Dökümde üretilen plakaların katı modelleme programındaki görüntüsü (15x90x302mm)



Şekil 4.3. Döküm yapılan potanın katı modelleme programındaki şematik görüntüsü



Şekil 4.4. Döküm için özel tasarlanan fırının katı modelleme programındaki şematik görüntüsü

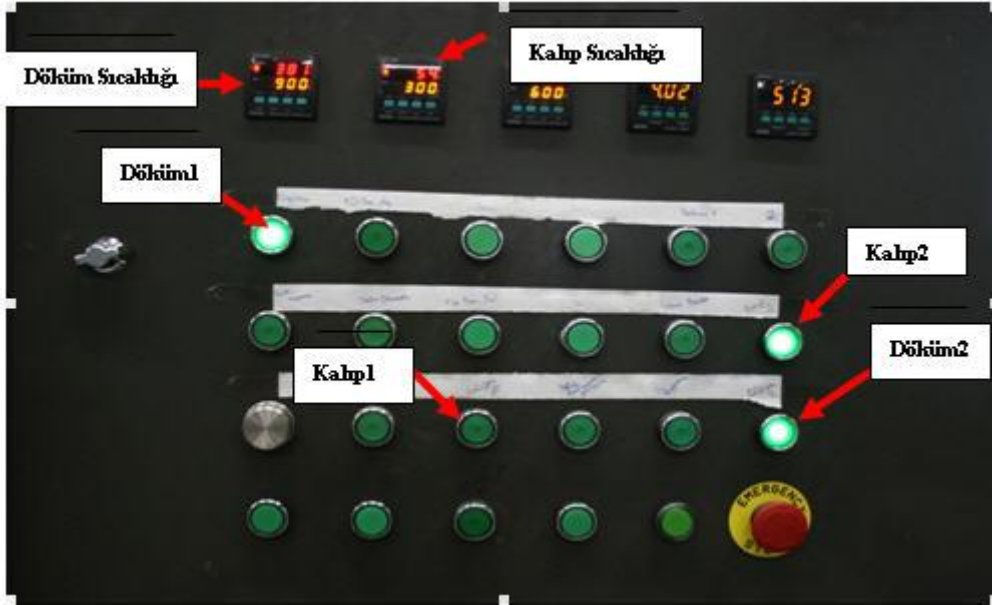


Şekil 4.5. Kurulan fırın sisteminin fotoğraf şeklinde görüntüsü



Şekil 4.6. Kurulan fırın sisteminde potanın fotoğraf görüntüsü





Şekil 4.7. Kurulan fırını çalıştırma sistemi

Fırının çalışma isteminde, önce döküm1 ardından döküm2 düğmelerine basarak ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir. Döküm sıcaklığı aşağı yukarı tuşları ile istenilen sıcaklık ölçüsüne getirilmektedir. Kalıp da aynı şekilde kalıp1 ardından kalıp2 düğmelerine basılarak kalıp sıcaklığı aşağı yukarı ok düğmeleriyle istenilen sıcaklığa getirilip ısıtılmaktadır.

#### 4.4. Alaşımların Üretimi

Üretim iki kademeli yapılmıştır. Alaşımların üretiminin ilk kademesinde 2 KW gücünde, 1100°C'ye çıkabilen bir fırında saf magnezyum, koruyucu gaz atmosferinde 310 paslanmaz çelik pota içerisinde ergitilmiştir. Ergime esnasında elde edilmesi amaçlanmış alaşım için gerekli alaşım elementleri ilave edilmiştir. Her bir alaşım için eriyik 870°C sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir. Bekleme esnasında tasarlanan kontrollü atmosfer altında metal kalıba kokil döküm fırınına ait özel tasarlanıp üretilmiş kalıbın etrafına vakum tam sağlanabilmesi için 300°C'ye dayanıklı silikon conta çekilerek ve yolluk ağzına bakır contalar yerleştirilerek 250°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır.

Bekleme gerçekleştikten sonra pota, fırının ergitme kısmından alınarak kalıp üstüne alınmış ve sabit bir şekilde sıkıştırılmıştır. Aynı zamanda vakum açılmış ve kontrollü atmosfer ortamında segregasyonu önlemek amacıyla karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlemler bittikten sonra potanın stoperi açılarak ısınan kalıba ergimiş metalin dökümü gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda anlatılan prosedür kullanılarak sırasıyla Saf Mg, Saf Mg+%1Sn, Saf Mg+%3Sn, Saf Mg+%5Sn, Saf Mg+%1Zn+%1Sn, Saf Mg+%1Zn+%1Sn, Saf Mg+%1Zn+%3Sn, Saf Mg+%1Zn+%5Sn alaşımları üretilmiştir. Üretilen alaşımların birkaç görüntüsü aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Üretilen saf magnezyum+%1Zn+%1Sn alaşımının fotoğraf görüntüsü



Şekil 4.9. Üretilen saf magnezyum+%1Zn+%3Sn alaşımının fotoğraf görüntüsü

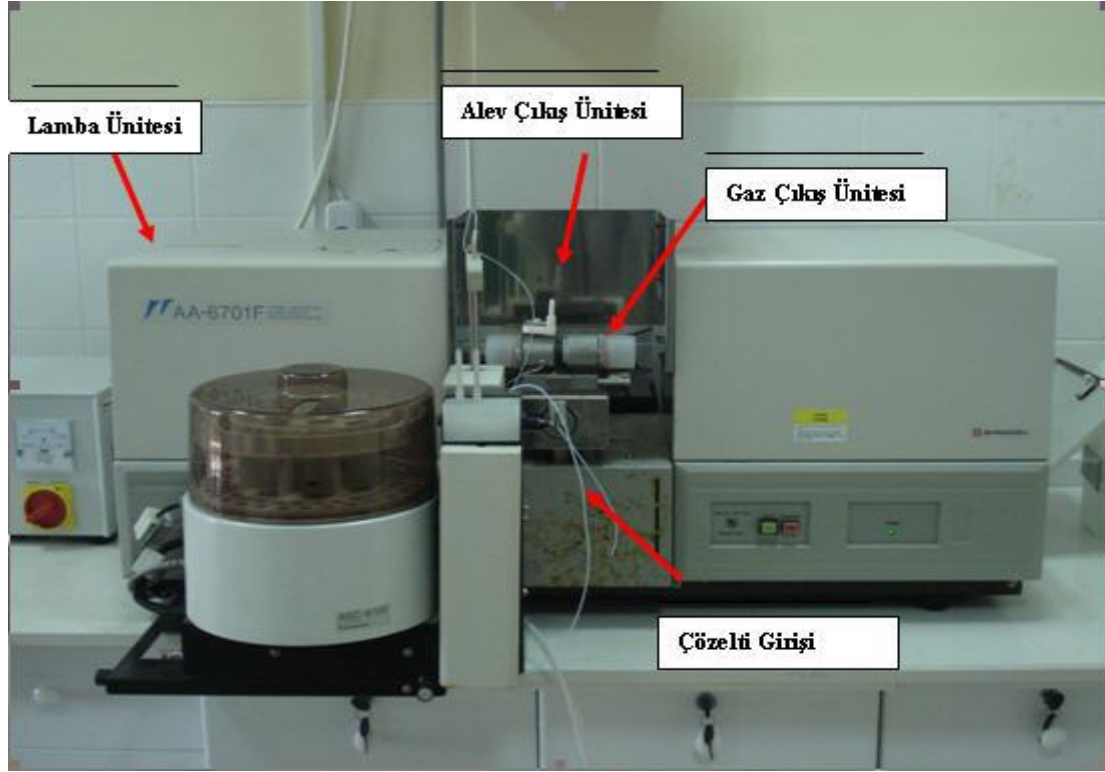
Fotoğraflarda üretilen plakaların yüzeylerinde yüzey hataları gözükse de kesim yapıldığında ve zımpara yapıldığında malzeme içinde temiz bir yüzey elde edilmiştir.

Magnezyum yanıcı bir malzeme olduğundan dolayı havayla direk reaksiyona girmektedir. Bundan dolayı plaka yüzeylerinde böyle görüntülerin oluşması normal olarak karşılanmaktadır. Hazırlanan 3 mm'lik et kalınlığındaki çekme numunelerinin diğer sayfalardaki yüzey görüntülerinde yüzeylerin temizliği açıkça görülmektedir.

#### 4.5. Alaşımların Kimyasal Analizi

Üretilen numunelerden hazırlanan ince tozların kimyasal analizi, kimya laboratuvarında alevli atomik absorpsiyon spektrometrik (AAS) tekniği ile tayin edilmiştir. Hazırlanan tozların analizinin yapılması için, gerekli bileşenler sulu faza çekilmiştir. Uygulanan çözünürleştirme işlemi ile seyreltilmiş ve belli bir hacme tamamlanarak magnezyum, kalay, çinko oranları alevli atomik absorpsiyon spektrometri cihazı ile ölçülmüştür.

Atomik absorpsiyon spektroskopisi, yüksek sıcaklıkta gaz halinde bulunan element atomlarının elektromanyetik ışınları absorplaması temeli üzerinedir. Absorplanan elektromanyetik ışınlar genellikle ultraviyole ve görünür alan ışınlarıdır.



Şekil 4.10. Kimyasal analizde kullanılan Alevli Atomik Absorpsiyon Spektrometri cihazının görüntüsü

Bu işlem, elementi bileşik halinde ihtiva eden bir çözeltinin sis halinde yüksek sıcaklıktaki bir alev içine püskürtülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Alevde buharlaştırılan atomların elektronları uyarılarak buldukları temel düzeyden uyarılmış enerji düzeyine geçmektedir. Uyarılmış elektronlar temel enerji düzeylerine dönerken iki düzey arasındaki enerji farkına eşit ışınlar yaymaktadır. Bu ışın spektrofotometre ile ölçülmüştür. Böylece elde edilen emisyon spektrumu incelenen element atomunun karakteristiğini vermektedir. Her bir element için farklı lambalar kullanılmıştır. Lambalarda anot ve katot kısımları bulunmaktadır. Katot lambasına gelen rezonans ışınlar, temel haldeki atomları uyarmaktadır ve bundan dolayı şiddetlerini azaltmaktadır. Monokromatör, çalışılan ışının istenen dalga boyundaki ışınını ayırır ve dedektöre iletmektedir. Burada ışın güçlendirilerek

elektrik sinyaline dönüştürülmektedir ve daha sonra bu sinyal cihazın bilgisayar ünitesinden gerekli veriler şeklinde verilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 4.1’de yapılan kimyasal analiz sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlar, yapılan dökümlerde alaşımların doğru oranlarda karıştırılıp gerçekleştirildiğini net bir şekilde göstermektedir.

Tablo 4.1. Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçları

| Numune Adı       | Kod Adı  | Mg (%) | Sn(%) | Zn(%) |
|------------------|----------|--------|-------|-------|
| Saf Magnezyum    | Alaşım 1 | 99,99  | -     | -     |
| Mg + %1 Sn       | Alaşım 2 | 99,09  | 0,91  | -     |
| Mg + %3 Sn       | Alaşım 3 | 97,06  | 2,94  | -     |
| Mg + %5 Sn       | Alaşım 4 | 95,13  | 4,87  | -     |
| Mg + %1Zn + %1Sn | Alaşım 5 | 98,238 | 0,915 | 0,847 |
| Mg + %1Zn + %3Sn | Alaşım 6 | 96,26  | 2,86  | 0,880 |
| Mg + %1Zn + %5Sn | Alaşım 7 | 94,203 | 4,88  | 0,917 |

#### 4.6. Metalografi Çalışmaları

Üretilen alaşımların mikro yapılarını incelemek için standart metalografik işlemler uygulanmıştır. İlk önce 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh’lik zımparalardan geçirilen numuneler daha sonra 0,05µm’lik alümina pasta kullanılarak parlatılmıştır. Dağlayıcı kimyasal olarak hacimce %5 nitrik asit + % 95 etil alkol kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler, görüntü analiz yöntemi ile tane boyutları ölçülerek optik mikroskopta(OM) ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Ayrıca XRD, EDS analizleri yapılmıştır.

## 4.7. Mekanik Testler

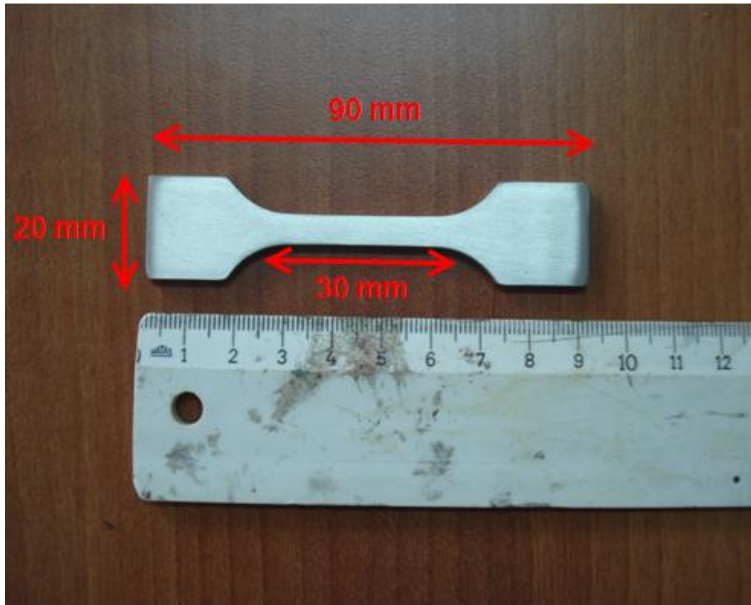
### 4.7.1. Sertlik deneyi

Üretilen alaşımların sertlik deneyleri 31,25/2.5/30 kombinasyonuna sahip Brinell sertlik(BHN) skalasında Brooks marka sertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Tüm alaşım sınıflarından alınan numuneler üzerinde 15'er ölçüm yapıp sertlik değeri olarak bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

### 4.7.2. Çekme deneyi

15 mm et kalınlığında üretilen plaka şeklindeki alaşımların yüzeylerinden önce torna ardından frezeden geçirilerek talaş kaldırılmış ve 3mm et kalınlığına indirilmiştir. Daha sonra proengineering programında çekme numunesi çizimi yapılarak CNC'de çekme numuneleri hazırlanmıştır. Ardından bu çekme numunelerinin yüzeyleri, çentik etkisi oluşturabilecek herhangi bir sebep olmaması için 240, 400, 600 ve 800 mesh'lik zımparalarla temizlenmiştir.

Aşağıda üretilen çekme numunelerinin fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Çekme numunesi

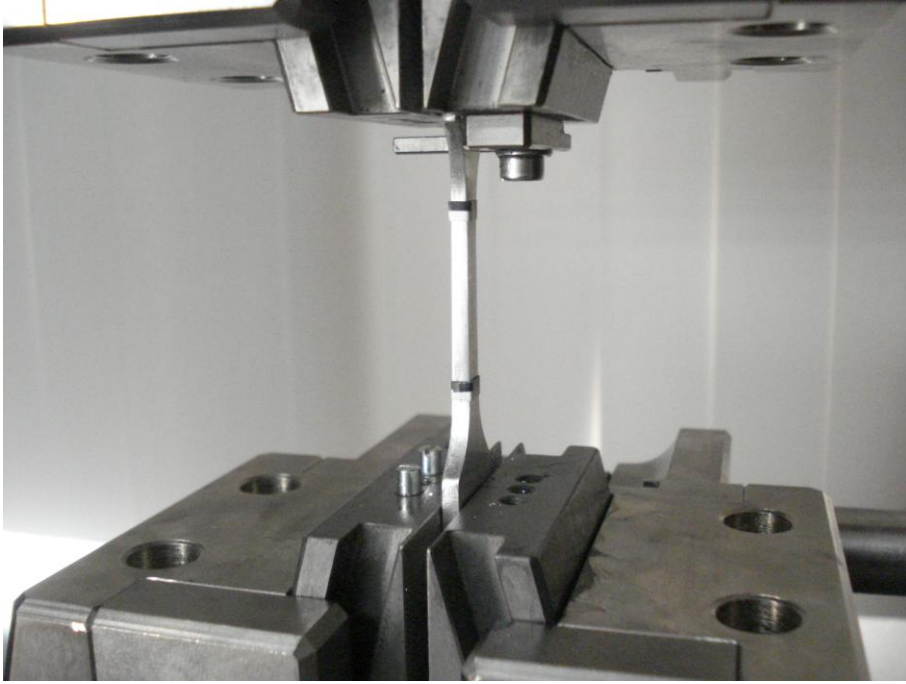


Şekil 4.12. Üretilen çekme numuneleri

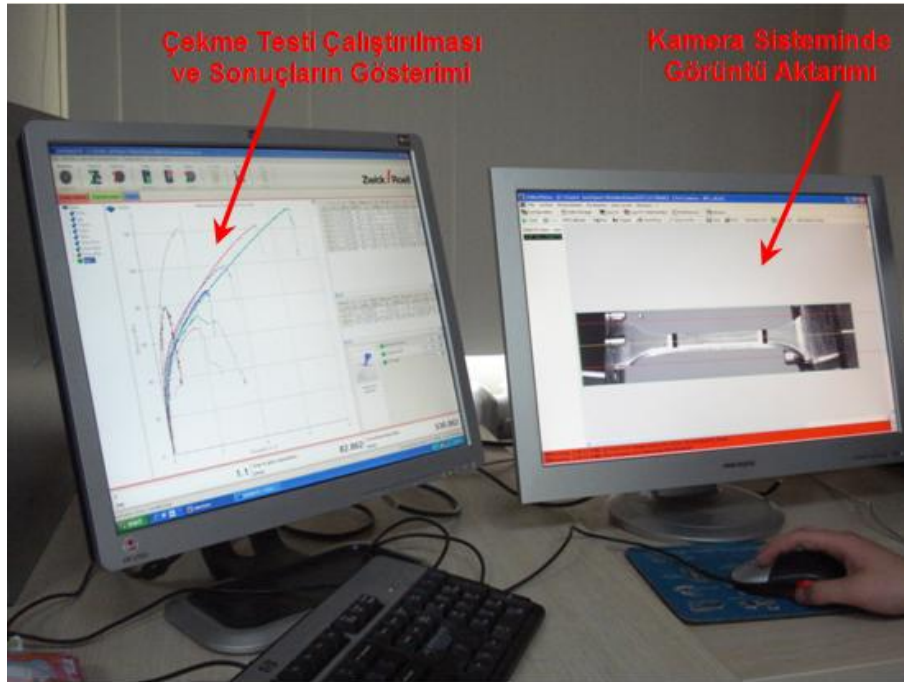
Üretilen alaşımların çekme deneyleri INSTRON 3367 30KN'luk çekme cihazında yapılmıştır. Her bir numunenin çekme mukavemeti hesaplanırken 8 adet numune kullanılmıştır ve çekme hızı da 1 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. Ayrıca deney sonrası kırık yüzeylerin SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir.



Şekil 4.13. Çekme testi cihazının görüntüsü



Şekil 4.14. Çekme numunesinin çekme cihazındaki konumu

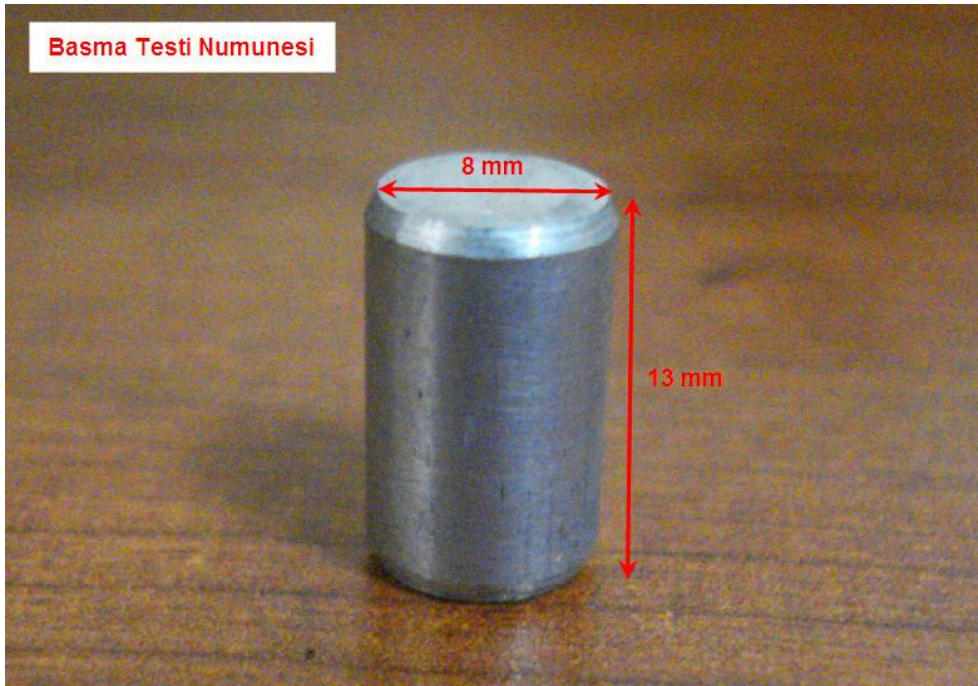


Şekil 4.15. Çekme cihazı verilerinin bilgisayar ortamına aktarımı



### 4.7.3. Basma deneyi

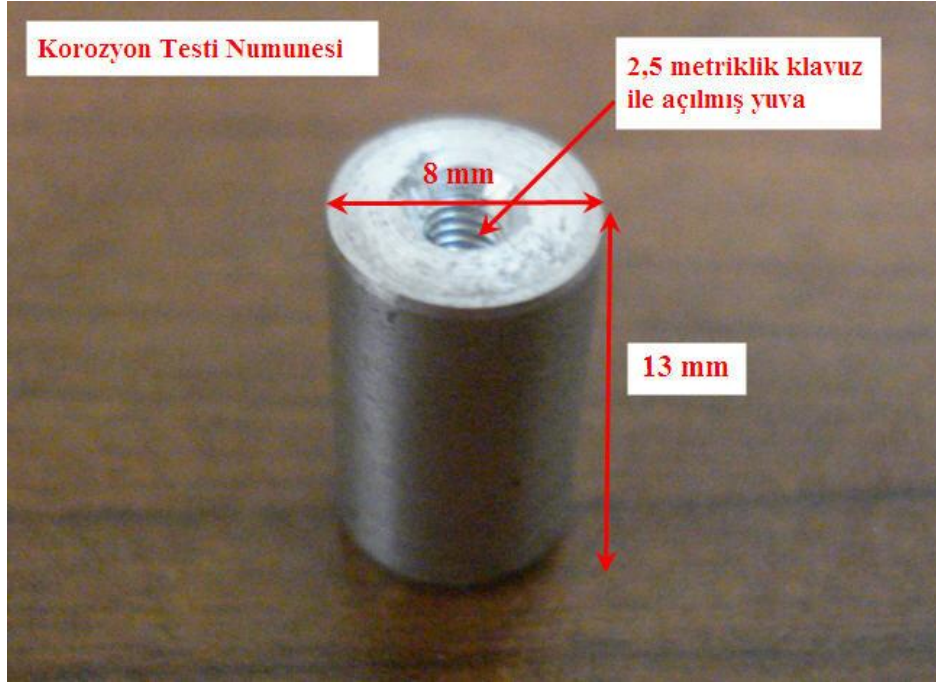
Üretilen alaşımların basma deneyleri INSTRON 3367 30KN'luk basma cihazında yapılmıştır. 8mm çapında 13 mm yüksekliğinde silindirik basma numuneleri hazırlanmıştır. Her bir numunenin basma mukavemeti hesaplanırken 3'er numune kullanılmıştır ve basma hızı da 2 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.16'da hazırlanan basma numuneleri ve boyutları gösterilmektedir.



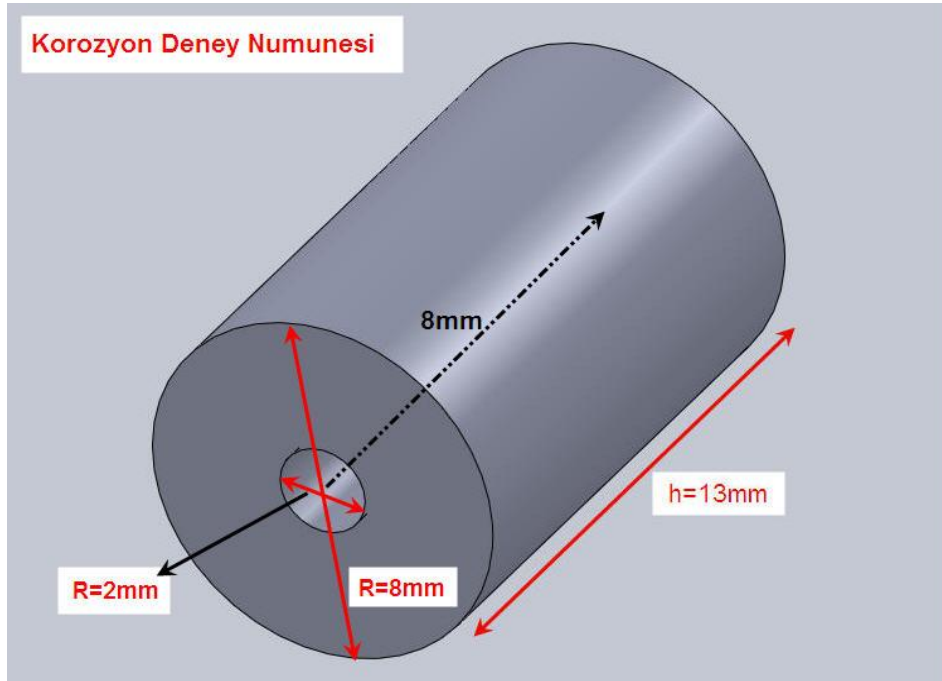
Şekil 4.16. Üretilen basma deneyi numunesi ve boyutları

### 4.7.4. Korozyon deneyi

Üretilen alaşımların korozyon testleri, ağırlıkça % 3,5 NaCl içerecek 2000 ml'lik (pH 5,6) çözeltiler hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon testi gerçekleştirilmeden önce her bir numune 1200 mesh'lik zımparadan geçirilmiştir. Zımparalama işleminden sonra saf alkol içeren ultrasonik banyoda 15 dakika tutularak her bir numunenin yüzeyi temizlenmiştir. Deney sonrasında ise oluşan bazı çözeltilerde kimyasal analiz yapılmıştır. Şekil 4.17 ve 4.28'de hazırlanan korozyon numuneleri ve boyutları gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Üretilen korozyon deneyi numunesi ve boyutları



Şekil 4.18. Korozyon deneyi numunesinin katı modelleme programında çizilmiş görüntüsü ve boyutları

8 mm çapında, 13 mm yüksekliğinde silindirik korozyon numuneleri hazırlanmış ve bu numunelerin üst yüzeylerinden 2,5 metriklik klavuz ile yuva açılmıştır.

Yoğunluklar hesaplandıktan sonra bilgisayar ortamına aktarılmış ve korozyon düzeneğine numuneler yerleştirip %3,5 NaCl içeren çözelti ilave edilerek deney başlatılmıştır. Deneyden tam ve kesin sonuçlar elde etmek için her alaşımdan 3'er kere korozyon deneyi yapılmıştır ve deney sonrasında tafel eğrileri,  $E_{kor}$  (V),  $i_{kor}$  (mA), korozyon hızı (mpy) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar;

$$\text{Korozyon Hızı} = K \cdot (i_{kor} / \delta) \cdot EW \quad (4.1)$$

formülü ile yapılmıştır.

Burada K:  $3,27 \cdot 10^{-3}$  mmgr/ $\mu$ A.cm sabittir, yoğunluk birimi gr/cm<sup>3</sup>, korozyon hızı birimi mm/yıl (mpy),  $i_{kor}$  birimi mA ve equivalent ağırlık (EW) magnezyum için mol ağırlığının 1/2'si kadardır yani 12,155 değerindedir.

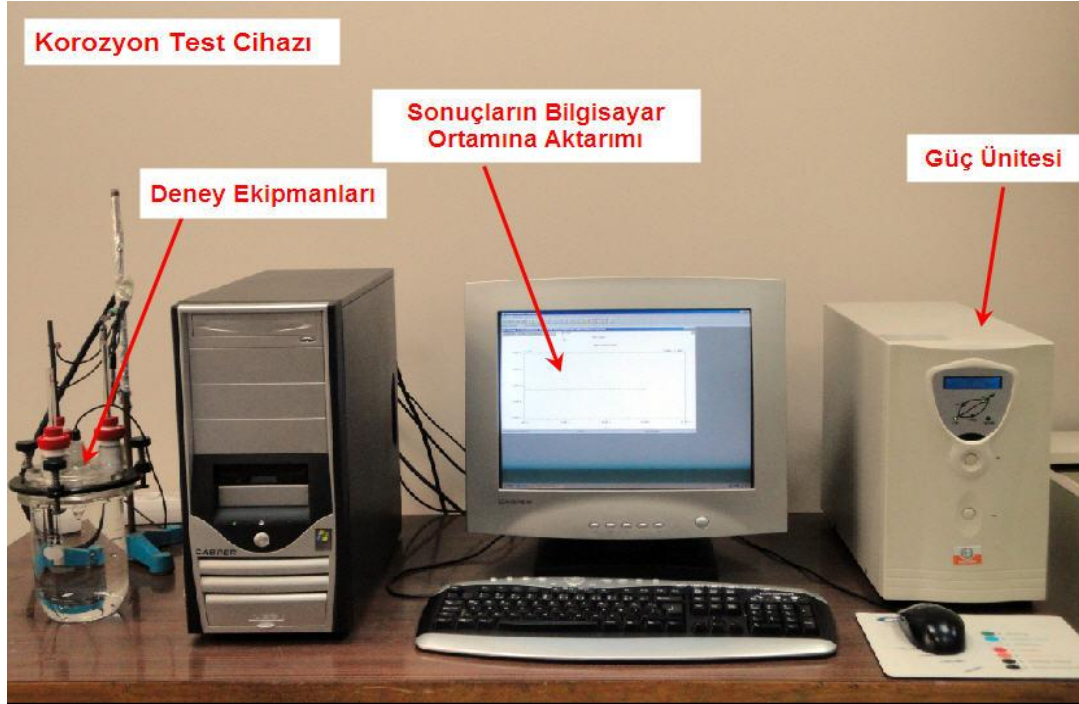
Korozyon deneyleri açık atmosferde ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneylerinde kullanılan numuneler herhangi bir ısıl işleme tabii tutulmamıştır.

Deneyler, GAMRY INSTRUMENTS PCI4/750 potentiostat/galvanostat cihazı kullanılarak pyrex bir cam hücre içerisinde 3 elektrot tekniği ile yapılmıştır. Referans elektrot olarak kalomel Ag/AgCl<sub>3</sub> (Doymuş KCl çözeltisi), yardımcı elektrot olarak da grafit çubuk kullanılmıştır.

Çözeltiye maruz kalan numune alanı dışındaki kısımlar izole edilmiştir. Numunelerin korozyon davranışı potentiodynamic polarizasyon (Tafel) ile incelenmiştir.

Potentiodynamic polarizasyon ölçümleri -2;2 arasında voltaj uygulanarak 5 mV/s hızda yapılmıştır. Korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu Tafel extrapolation methodu kullanılarak tespit edilmiştir. Bu sayede alaşım elementi ilave edilmiş numunelerin korozyon davranışları birbiriyle kıyaslanmıştır.

Şekil 4.19 ve 4.20'de korozyon deneylerinin gerçekleştirildiği cihazın görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.19. Korozyon deney cihazı

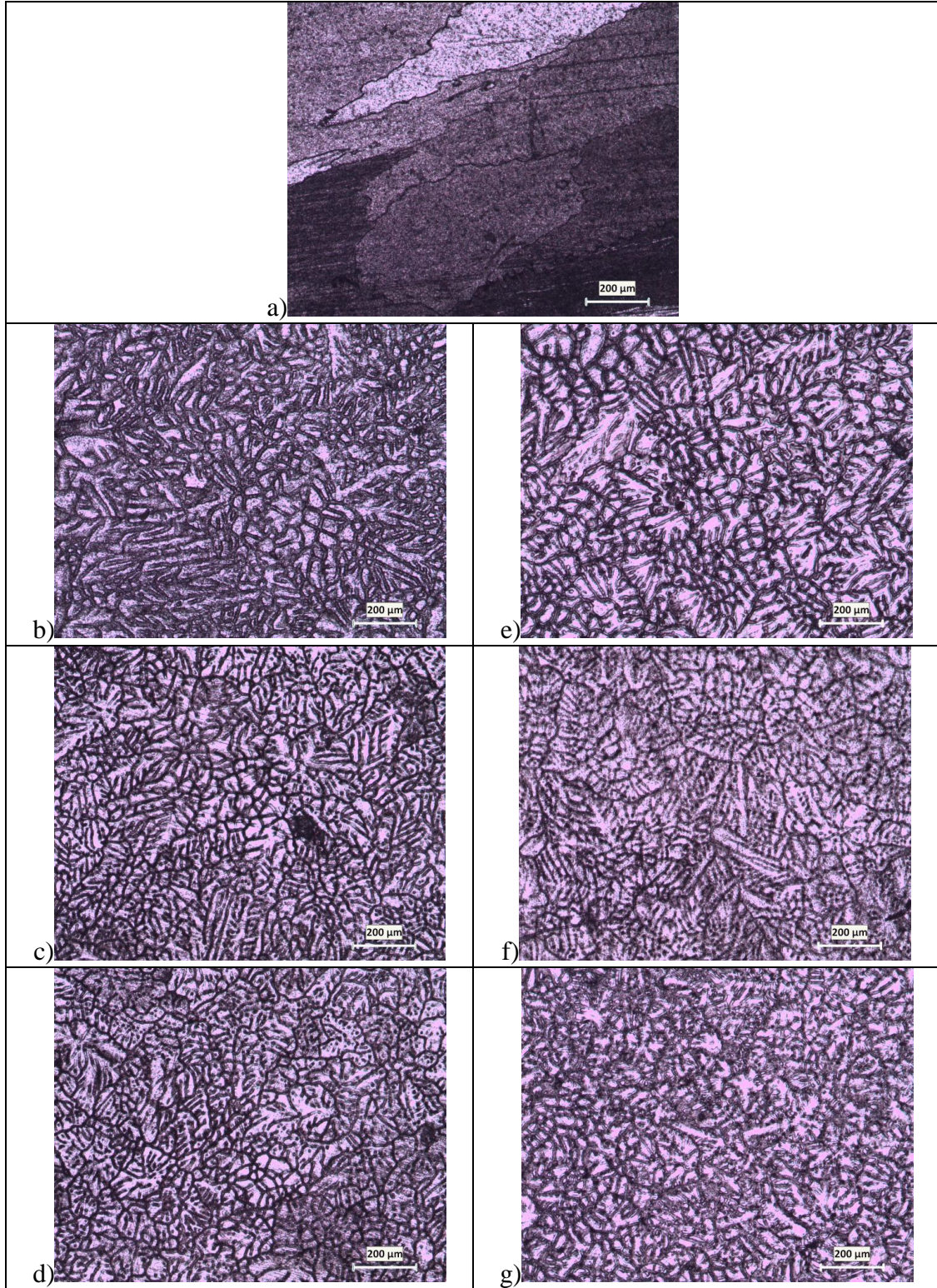


Şekil 4.20. Korozyon deneyi ekipmanları

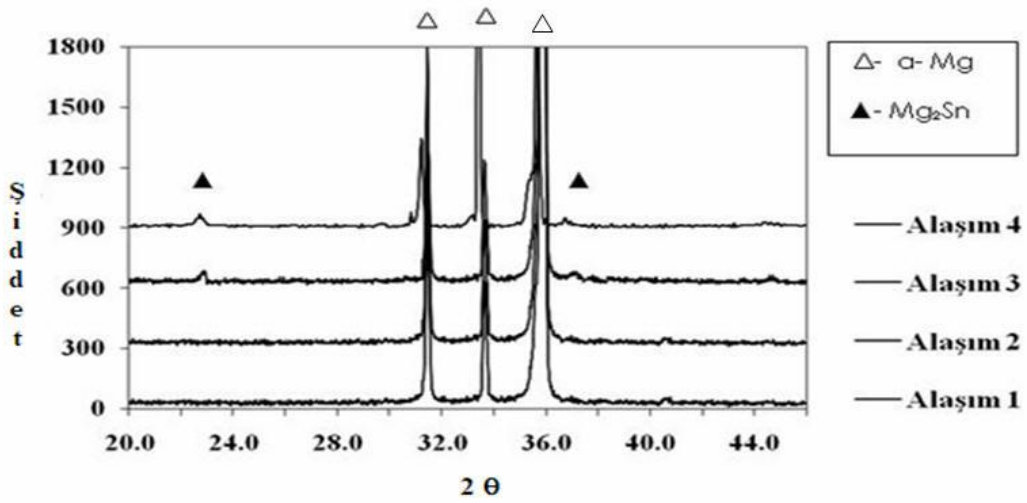
## BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

### 5.1. Alaşımın Mikroyapısı

Saf magnezyum ve ağırlıkça %1(Alaşım 2), %3(Alaşım 3) ve %5(Alaşım 4) kalay(Sn) ilaveli alaşımların farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 5.1 (a), (b), (c) ve (d)'de görülmektedir. Şekil 5.1 (a)'da görüldüğü gibi, saf magnezyum(Alaşım 1) başlıca  $\alpha$ -Mg olarak bilinen irili ufaklı ve uzunlamasına tanelerden oluşmaktadır. Şekil 5.1 (b)'de saf magnezyuma ağırlıkça %1 Sn(Alaşım 2) ilavesinin mikroyapıya etkisi görülmektedir. Kalay ilavesi ile saf magnezyumun mikroyapısında dentritler oluştuğu ve tane boyutunun kalay ilavesi ile keskin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Şekil 5.1 (c)'den görüldüğü gibi, ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesinin %1'den %3'e yükselmesi ile birlikte dentritik kol aralıklarında gözle görülür bir azalma olduğu ve tane boyutlarının daha da küçüldüğü görülmektedir. Şekil 5.1 (d)'de Alaşım 4 yani saf magnezyuma % 5 kalay (Sn) ilaveli alaşımın optik mikroskop görüntüsünde, kalay ilavesi arttıkça dentritler daha da artarak tane boyutu daha da küçülmüştür. Şekil 5.2'de saf magnezyum ve kalay ilaveli alaşımların X-ışınları sonucu verilmektedir. Literatür kısmında bahsedildiği gibi, kalay elementi 561°C'de yaklaşık ağırlıkça %14.85 değerlerinde magnezyum içerisinde çözünmektedir ve yüksek ergime sıcaklığına sahip Mg<sub>2</sub>Sn (770°C) intermetalığı içermektedir(Şekil 5.2). Bu çalışmada gerçekleştirilen X-ışınları sonuçlarına göre Alaşım 1'e ağırlıkça %3 ve daha fazla kalay (Sn) ilavesi ile Mg<sub>2</sub>Sn intermetalığı oluşmaktadır. Ayrıca kalay ilavesinin artışı ile mevcut intermetalığın (Mg<sub>2</sub>Sn) pik şiddetinin yükseldiği görülmekte ve bu da bünyedeki Mg<sub>2</sub>Sn intermetalığının arttığını göstermektedir.

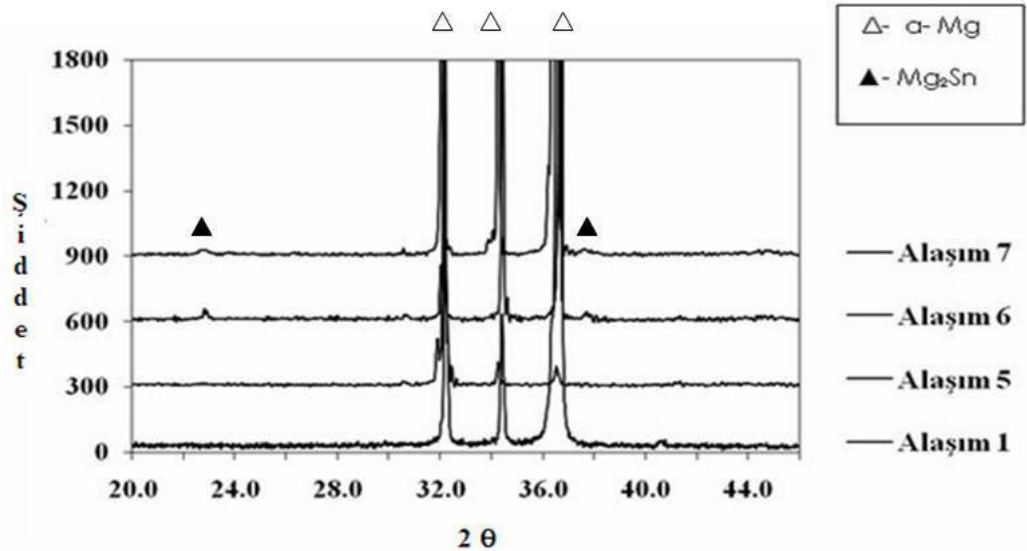


Şekil 5.1. a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3, d) Alaşım 4, e) Alaşım 5, f) Alaşım 6 ve g) Alaşım 7'nin mikroyapı görüntüleri



Şekil 5.2. Saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilave edilen alaşımların XRD analizleri

Alaşım 2, 3 ve 4'e ağırlıkça %1 çinko(Zn) ilavesi ile üretilen Alaşım 5, 6 ve 7'nin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.1 (e), (f) ve (g)'de görülmektedir. Bu optik mikroskop görüntülerinden görüldüğü gibi, ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi tane boyutunun daha fazla küçülmesine neden olmuştur. Şekil 5.3'te bu alaşımlara yapılan XRD sonuçları verilmektedir. Alaşım 2, 3 ve 4' e ilave edilen ağırlıkça %1 çinko (Zn) ile herhangi bir yeni faz oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 5.3. Saf magnezyuma ağırlıkça %1 çinko (Zn) ve % kalay (Sn) ilave edilen alaşımların XRD analizleri

Hongmei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, saf magnezyuma ağırlıkça %1-10 kalay (Sn) ilave ederek kalay alaşım elementinin, saf magnezyumda tane inceltici etkiye sahip olduğu ve belli bir orana kadar mekanik özelliklerin iyileştiğini rapor edilmiştir[35].

Kim ve arkadaşlarının Mg-Al-Zn alaşımında çeşitli oranlarda Sn ilavesi ile yaptığı çalışmada da kalay alaşım elementinin magnezyum ve alaşımlarında tane inceltici etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır[36].

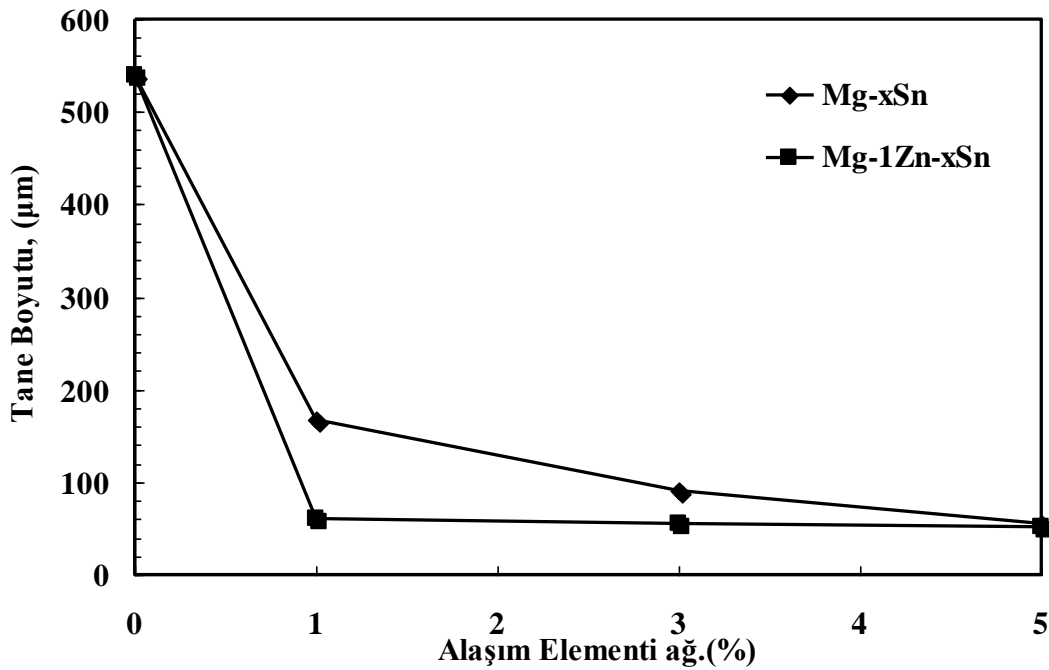
Şevik ve arkadaşlarının AM60 alaşıma kalay ilavesinin mekanik özellikler etkisi üzerine olmuş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir[46]. Bir başka bir çalışma da, Sasaki ve arkadaşlarının Mg-Sn-Zn alaşımı üzerine olmuştur. Aynı şekilde, kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin magnezyum ve alaşımlarında tane inceltici etkiye sahip olduğu ve mekanik özellikleri iyileştirdiği rapor edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, temel tane inceltme mekanizmasının heterojen çekirdeklenme olduğu düşünülmüştür[35,36,46,64,65].

Tablo 5.1. Alaşımların ortalama tane boyutları

| <b>Ağırlıkça %Sn İçeriği</b> | <b>Mg-xSn Tane Boyutu,(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Mg-1Zn-xSn Tane Boyutu, (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|------------------------------|--|---|
| <b>0</b>                     | <b>540</b>   | <b>540</b>  |
| <b>1</b>                     | <b>168</b>   | <b>60</b>   |
| <b>3</b>                     | <b>91</b>  | <b>55</b>   |
| <b>5</b>                     | <b>55</b>  | <b>51</b>   |

Bu çalışma da, görüntü analiz yöntemi ile üretilen alaşımların tane boyutları ölçülmüştür. Tablo 5.1’de elde edilen tane boyutu sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçların grafiksel gösterimi de Şekil 5.4’te verilmiştir. Şekil 5.4’ten ve Tablo 5.1’deki sonuçlardan görüldüğü gibi, Alaşım 1’in tane boyutu ortalama 540  $\mu\text{m}$  olarak ölçülürken, Alaşım 2, 3 ve 4 sırasıyla 168, 91 ve 55  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

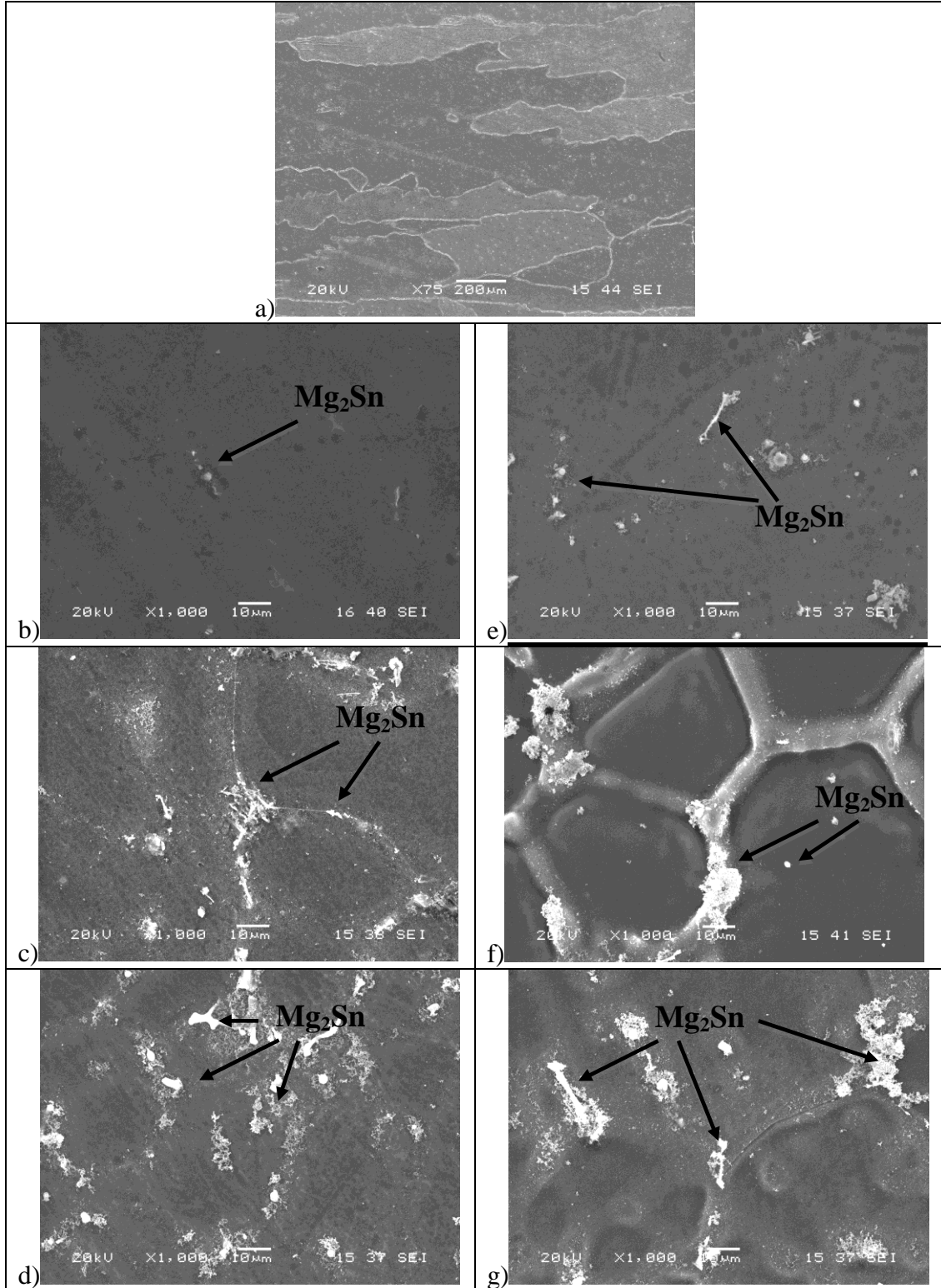




Şekil 5.4. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin saf magnezyumun tane boyutuna etkisi

Tablo 5.1 ve Şekil 5.4'e bakıldığında, ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımlara daha sonra ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilave edilerek elde edilen alaşımların (Alaşım 5, 6, 7) ortalama tane boyutları görülmektedir. Alaşım 1'in tane boyutu 540 µm iken Alaşım 5, 6 ve 7'nin ortalama tane boyutları sırasıyla 60, 55, 51 µm olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşılacak üzere, bu alaşımlara ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi tane boyutunu daha da düşürmüştür. Çinko alaşım elementi saf magnezyum ve ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımlarda tane inceltici bir etkiye neden olmuştur.

Daha önce bahsedildiği gibi Sn ve Zn alaşım elementlerinin oda sıcaklığında Mg içerisinde çözünürlüğü yok denecek kadar azdır. Bu nedenle, tane boyutundaki azalma birincil olarak ilave edilen alaşım elementlerinin katılaşma esnasında katı/sıvı arayüzeyine itilerek yapısal aşırı soğuma bölgelerinin artışına neden olmasıdır. İkincil neden ise muhtemelen katılaşma esnasında ilk katılan  $Mg_2Sn$  intermetalığı,  $\alpha$ -Mg'un katılaşması esnasında heterojen çekirdeklenme rolü oynamış olmasıdır. Zn alaşım elementi ilavesinin de yeni bir faz meydana getirmeden,  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_2Sn$  intermetalığının içerisinde çözünerek heterojen çekirdeklenmeye katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.5. a) Alışım 1, b) Alışım 2, c) Alışım 3, d) Alışım 4, e) Alışım 5, f) Alışım 6 ve g) Alışım 7'nin SEM görüntüleri

Şekil 5.5'te, saf magnezyum ve saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların daha ayrıntılı SEM mikroyapıları (a), (b), (c) ve (d)'de görülmektedir.

Alaşımlar, birincil  $\alpha$ -Mg matriksi (koyu renk), iki farklı morfolojide bulunan  $Mg_2Sn$  (beyaz renk) ve ikinci bileşen  $Mg_2Sn$  fazı (beyaz ince partiküller) ile meydana gelmektedir. Kalay ilavesinin artışıyla  $Mg_2Sn$  intermetalığının mevcudiyeti ve boyutu artmıştır.

Şekil 5.5 (a)'de görüldüğü gibi, saf magnezyum  $\alpha$ -Mg olarak bilinen dentritik ve ötektik yapıdan oluşmasının yanı sıra tane yapısının uzunlamasına ve irili ufaklı boyutlardan oluştuğu net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 5.5 (b)'de Alaşım 2'nin yani saf magnezyuma ağırlıkça %1 kalay (Sn) ilaveli alaşımın SEM görüntüsünden görüldüğü gibi, kalay ilavesi ile beyaz bölgeler yani XRD sonuçlarında elde edilen (Şekil 5.2) mevcut  $Mg_2Sn$  intermetalığı oluşmaktadır.

Şekil 5.5 (c)'de Alaşım 3'ün SEM görüntüsünden, saf magnezyuma ağırlıkça % 3 kalay (Sn) ilavesi ile beyaz bölgelerin ( $Mg_2Sn$  intermetalığının) daha da arttığı ve tane sınırları boyunca yayıldığı görülmektedir.

Şekil 5.5 (d)'de Alaşım 4 yani saf magnezyuma ağırlıkça % 5 kalay (Sn) ilaveli alaşımın SEM görüntüsünden de, aynı şekilde beyaz bölgelerin ( $Mg_2Sn$  intermetalığının) daha fazla arttığı ve bu bölgelerin tane sınırları boyunca yayılarak tane boyutunu daha da küçülttüğü net bir şekilde görülmektedir.

Sonuç olarak SEM görüntülerinden, saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi arttıkça yapıda meydana gelen  $Mg_2Sn$  intermetalığının varlığı artmış (beyaz bölgeler) ve bu intermetalığın tane sınırları boyunca yayıldığı görülmüştür.

Şekil 5.5 (e), (f) ve (g)'de ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımlara, ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi ilaveli alaşımların ayrıntılı SEM görüntüleri verilmektedir.

Şekil 5.5 (e)'de Alaşım 5'in SEM görüntüsü verilmektedir. Saf magnezyuma ağırlıkça %1 kalay (Sn) ve %1 çinko (Zn) ilave edildiğinde, mikroyapıda tane boyutu daha da küçüldüğü görülmüştür. Şekil 5.3'te Alaşım 5, 6 ve 7'ye yapılan XRD

sonuçlarında ağırlıkça %1 çinko (Zn) elementi ilavesi ile yapıda herhangi bir yeni faz oluşmadığı görülmüştür. Oluşan herhangi yeni bir faz olmadığı için tane sınırları boyunca yayılan beyaz bölgeler  $Mg_2Sn$  intermetalidir.

Şekil 5.5 (f)'de Alaşım 6 yani saf magnezyuma ağırlıkça % 3 kalay (Sn) ve % 1 çinko (Zn) ilaveli alaşımın SEM görüntüsünde, tane sınırları boyunca yayılan  $Mg_2Sn$  intermetalinin miktarı artmış ve taneler daha da küçülmüştür. Alaşım 3'e yani saf magnezyuma ağırlıkça % 3 kalay (Sn) ilave edilen alaşıma göre, ağırlıkça %1 Zn ilave edilmesiyle taneler daha da incelmıştır.

Şekil 5.5 (g)'de Alaşım 7'nin SEM mikroyapı görüntüsü görülmektedir. Saf magnezyuma ağırlıkça % 5 kalay (Sn) ve % 1 çinko (Zn) ilavesiyle beyaz bölgeler ( $Mg_2Sn$ ) tane sınırları boyunca yayılarak daha da artmış ve tane boyutu daha da küçülmüştür.

Son dönemlerde bu konuyla ilgili yapılan literatür çalışmalarda da hemen hemen aynı sonuçlar gözlenmiştir. Magnezyuma, ağırlıkça % kalay (Sn) alaşım elementi ilavesi ile oluşan  $Mg_2Sn$  intermetalinin varlığı tespit edilmiş ve bu alaşım elementinin tane inceltici etkisine sahip olduğu anlaşılmıştır.

Ayrıca magnezyuma, ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi belli bir orana kadar mekanik özellikleri iyileşmekte, belirli bir orandan sonra kalay (Sn) ilavesinin artmasıyla  $Mg_2Sn$  intermetalinin mevcudiyetinin daha da artarak kabalaşması sonucu mekanik özellikleri kötüleştirdiği rapor edilmiştir[35,36,46,65].

Şekil 5.6'dan başlayarak Şekil 5.12'ye kadar alaşımların ayrıntılı EDS analizleri verilmektedir.

| Analiz No | % Mg   | % O    | % Si  | % Ni   | Toplam | Atomik Oran Mg/Sn |
|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------------------|
| 1         | 59,242 | 30,982 | 3,165 | 16,087 | 100    | -                 |

Şekil 5.6. Alaşım 1'in EDS analizi

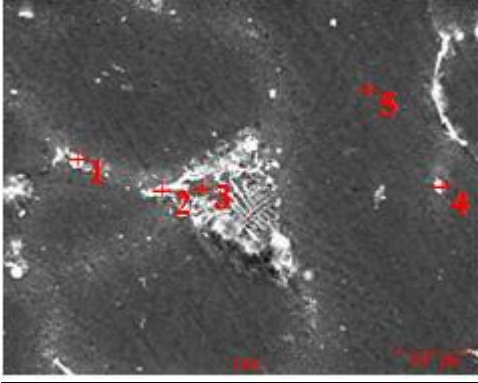
Şekil 5.6'da Alaşım 1 yani saf magnezyumun detaylı EDS analizi görülmektedir. Yapılan 1 numaralı EDS analizi sonucunda yapıda, yüksek oranda magnezyum ve çok düşük oranlarda oksijen (O), silisyum (Si) ve nikel (Ni ) gibi empirüteler bulunmuştur. Bu gibi safsızlıkların varlığının sebebi, muhtemelen külçe magnezyumun üretiminden kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Mg/Sn atomik oranı sıfır olduğundan yapıda sadece  $\alpha$ -Mg bulunmaktadır.

| Analiz No | % Mg   | % Sn   | % Si  | Toplam | Atomik Oran Mg/Sn |
|-----------|--------|--------|-------|--------|-------------------|
| 1         | 66,361 | 26,535 | 7,104 | 100    | 2,5               |

Şekil 5.7. Alaşım 2'nin EDS analizi

Şekil 5.7’de Alaşım 2 yani saf magnezyuma ağırlıkça %1 kalay (Sn) ilaveli alaşımın EDS analizi verilmiştir.

Kalay alaşım elementi ilavesi ile mikroyapı değişime uğrayarak beyaz bölgeler oluşmaya başlamıştır. Şekil 5.7’de analiz no 1’de Mg/Sn atomik oranı değerinden de anlaşıldığı gibi, bu beyaz bölgelerin  $Mg_2Sn$  intermetalığı olduğu ispatlanmış ve bu intermetalığın tane sınırları boyunca yayıldığı görülmüştür(Şekil 5.1b, Şekil 5.5b). Ayrıca analiz no 1 sonucunda çıkan silisyum gibi empirütelerin, muhtemelen külçe magnezyumun üretiminden kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Sonuç itibariyle elde edilen EDS sonuçları X-ışınları ile bir bütünlük sağlamaktadır.



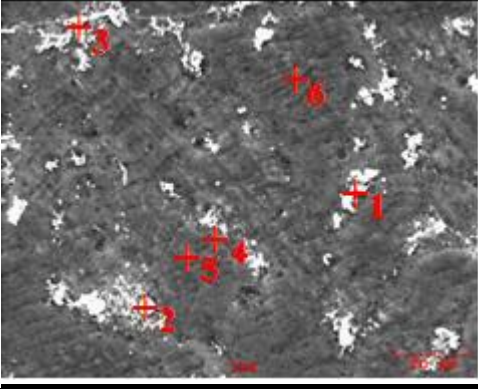
| Analiz No | % Mg   | % Sn   | % Si  | Toplam | Atomik Oran Mg/Sn |
|-----------|--------|--------|-------|--------|-------------------|
| 1         | 61,794 | 35,521 | 2,546 | 100    | 1,74              |
| 2         | 61,630 | 36,884 | 1,353 | 100    | 1,67              |
| 3         | 96,407 | 3,593  | -     | 100    | -                 |
| 4         | 68,323 | 31,677 | -     | 100    | 2,15              |
| 5         | 99,788 | 0,212  | -     | 100    | -                 |

Şekil 5.8. Alaşım 3’ün EDS analizleri

Şekil 5.8’de Alaşım 3 yani saf magnezyuma ağırlıkça %3 kalay (Sn) ilaveli alaşımın EDS analizleri görülmektedir.

Ağırlıkça % kalay (Sn) alaşım elementi ilavesi arttıkça beyaz bölgeler Alaşım 1'e göre daha da artmıştır. Bu beyaz bölgelerden alınan EDS analiz no 1, 2 ve 4 sonucunda belli oranlarda magnezyum (Mg), kalay (Sn) bulunmuştur.

Analiz no 1, 2 ve 4'deki Mg/Sn atomik oranı değerleri göz önüne alındığı zaman, bu beyaz bölgelerin  $Mg_2Sn$  intermetalığı olduğu anlaşılmış ve tane sınırları boyunca yayıldığı görülmüştür(Şekil 5.5c). Ayrıca Şekil 5.8'de analiz no 3 ve 5,  $\alpha$ -Mg'u göstermektedir.



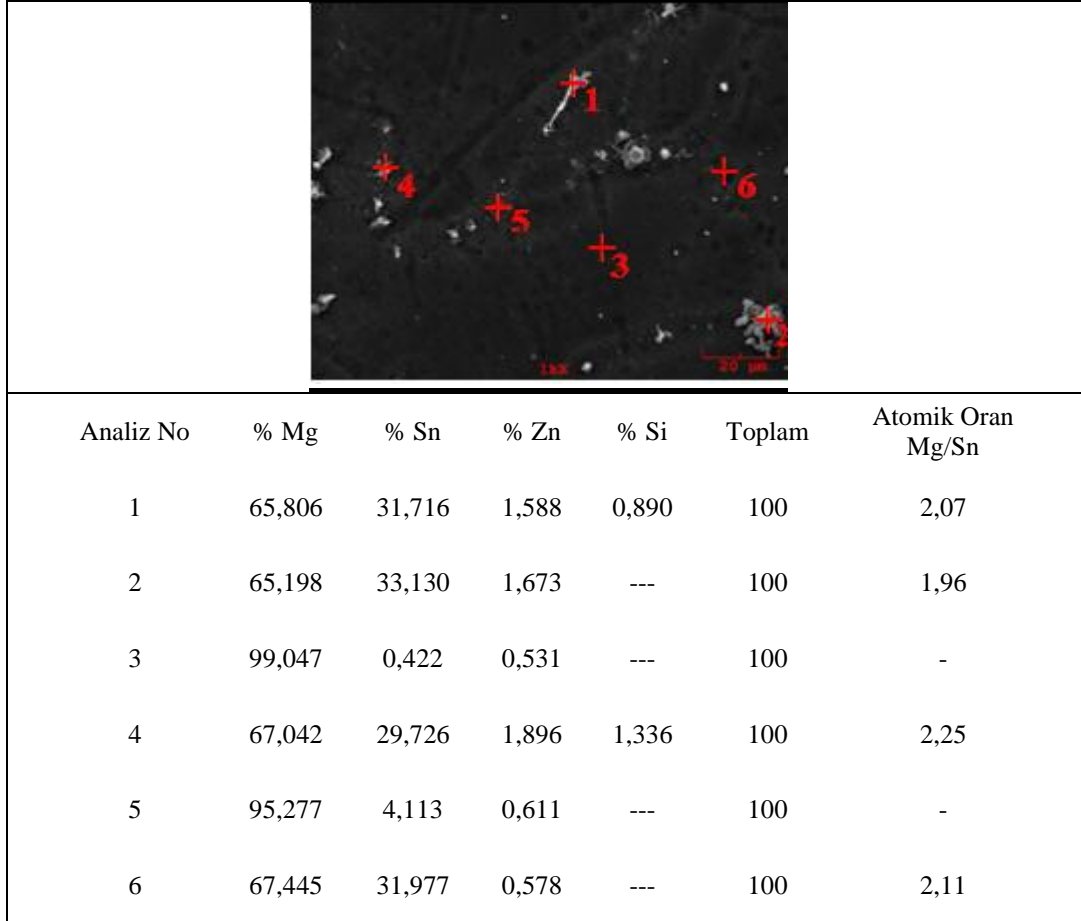
| Analiz No | % Mg   | % Sn   | % Si  | Toplam | Atomik Oran Mg/Sn |
|-----------|--------|--------|-------|--------|-------------------|
| 1         | 71,131 | 23,702 | 5,167 | 100    | 3,00              |
| 2         | 63,412 | 32,464 | 4,124 | 100    | 1,95              |
| 3         | 66,375 | 33,625 | ---   | 100    | 1,97              |
| 4         | 99,648 | 0,352  | ---   | 100    | -                 |
| 5         | 99,734 | 0,266  | ---   | 100    | -                 |
| 6         | 99,696 | 0,304  | ---   | 100    | -                 |

Şekil 5.9. Alaşım 4'ün EDS analizleri

Şekil 5.9'da Alaşım 4 yani saf magnezyuma ağırlıkça %5 kalay (Sn) ilaveli alaşımın ayrıntılı EDS analizleri görülmektedir.

Ağırlıkça % kalay (Sn) alaşım elementi ilavesi arttıkça beyaz bölgeler daha da artmıştır. Şekil 5.9 analiz no 1, 2 ve 3'te görüldüğü gibi, bu beyaz bölgeler Mg/Sn

atomik oran değeri yaklaşık 2 veya 2'den daha fazla olması şartıyla kalayın (Sn) magnezyum (Mg) ile yaptığı  $Mg_2Sn$  intermetalğine ait olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda ötektik- $\alpha$  miktarı da artmıştır(Şekil 5.9 analiz no 4,5,6).



Şekil 5.10. Alaşım 5'in EDS analizleri

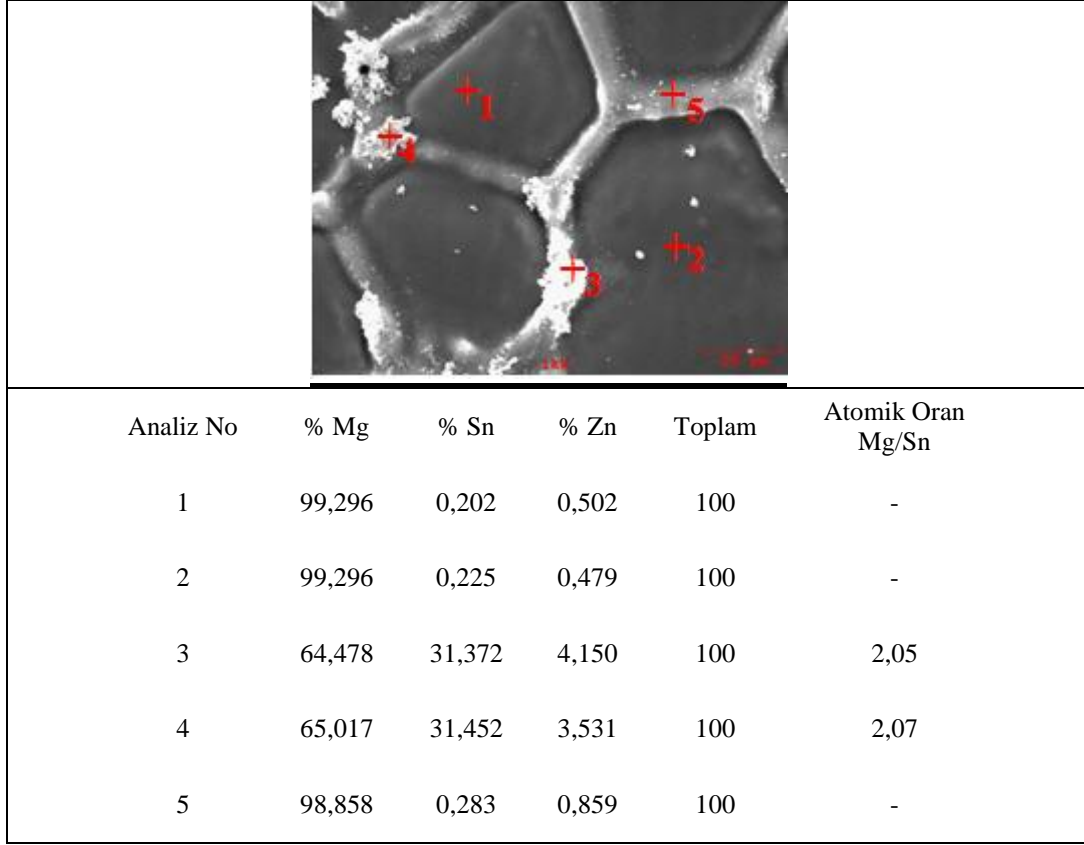
Şekil 5.10'da Alaşım 5 yani saf magnezyuma ağırlıkça %1 kalay (Sn) ilavesine ek olarak ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilaveli alaşımın EDS analizleri görülmektedir.

Şekil 5.10'daki EDS analizleri sonuçlarına bakıldığında, ilave edilen ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementinin bir miktarının  $\alpha$ -Mg içerisinde (Şekil 5.10 analiz no 3,5), bir kısmının da  $Mg_2Sn$  intermetalği içerisinde çözündüğü net bir şekilde görülmektedir(Şekil 5.10 analiz no 1,2,4,6).

Ayrıca  $\alpha$ -Mg'un içinde hem kalay (Sn) hem de çinko (Zn) alaşım elementlerinin çözülmüş olarak görülmesi (Şekil 5.10 analiz no 3,5), muhtemelen  $\alpha$ -Mg'u



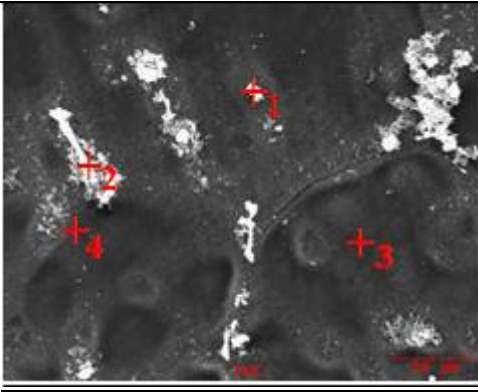
güçlendirerek mukavemetin artmasına sebep olmuştur. Ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi ilavesi yapıda çözünürlüğü arttırmıştır.



Şekil 5.11. Alaşım 6'nın EDS analizleri

Şekil 5.11'de Alaşım 6 yani saf magnezyuma ağırlıkça %3 kalay (Sn) ve ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilaveli alaşımın ayrıntılı EDS analizleri görülmektedir. Alaşım 3'e ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi hücrel bir yapı meydana getirmiştir. Beyaz bölgeler yani  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinin mevcudiyeti daha da artmıştır. Yapılan X-ışınları analizinde (Şekil 5.3) ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi ilavesi ile yeni bir faz oluşmamaktadır. Şekil 5.11'deki ölçülen bu atomik değerlere bakıldığında, yapıda  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinin oluştuğu analiz no 3 ve 4'ten net bir şekilde anlaşılmaktadır.

EDS analizleri sonucunda çinko (Zn) alaşım elementinin hem  $\alpha$ -Mg içerisinde (Şekil 5.11 analiz no 1,2,5) hem de oluşan  $Mg_2Sn$  intermetalik içerisinde (Şekil 5.11 analiz no 3,4) çözüldüğü görülmüştür.



| Analiz No | % Mg   | % Sn   | % Zn  | % Si  | Toplam | Atomik Oran Mg/Sn |
|-----------|--------|--------|-------|-------|--------|-------------------|
| 1         | 68,639 | 24,211 | 0,884 | 6,266 | 100    | 2,83              |
| 2         | 68,596 | 29,544 | 1,860 | ---   | 100    | 2,32              |
| 3         | 99,399 | 0,190  | 0,411 | ---   | 100    | -                 |
| 4         | 66,753 | 30,522 | 0,315 | 2,380 | 100    | 2,18              |

Şekil 5.12. Alaşım 7'nin EDS analizleri

Şekil 5.12'de Alaşım 7 yani saf magnezyuma ağırlıkça %5 kalay (Sn) ve ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilave edilen alaşımın EDS analizleri görülmektedir. Alaşım 4'e ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi ile mikroyapı daha da değişime uğramıştır. Beyaz bölgelere yapılan EDS analizi no 1, 2 ve 4'te Mg/Sn atomik oran değerlerine bakıldığında,  $Mg_2Sn$  intermetalığının mevcudiyeti yapıda daha da artmış olduğu görülmektedir. Ayrıca bu analizlerde,  $Mg_2Sn$  intermetalığının içerisinde çözünmüş olarak çinko (Zn) alaşım elementinin bulunmuştur. Analiz no 3 sonucunda, çinko (Zn) alaşım elementinin  $\alpha$ -Mg içerisinde de çözüldüğü görülmüştür.

## 5.2. Mekanik Testler

Üretilen alaşımlara uygulanan mekanik testler sonucunda elde edilen sonuçlar tablo 5.2 'de özetlenmiştir.

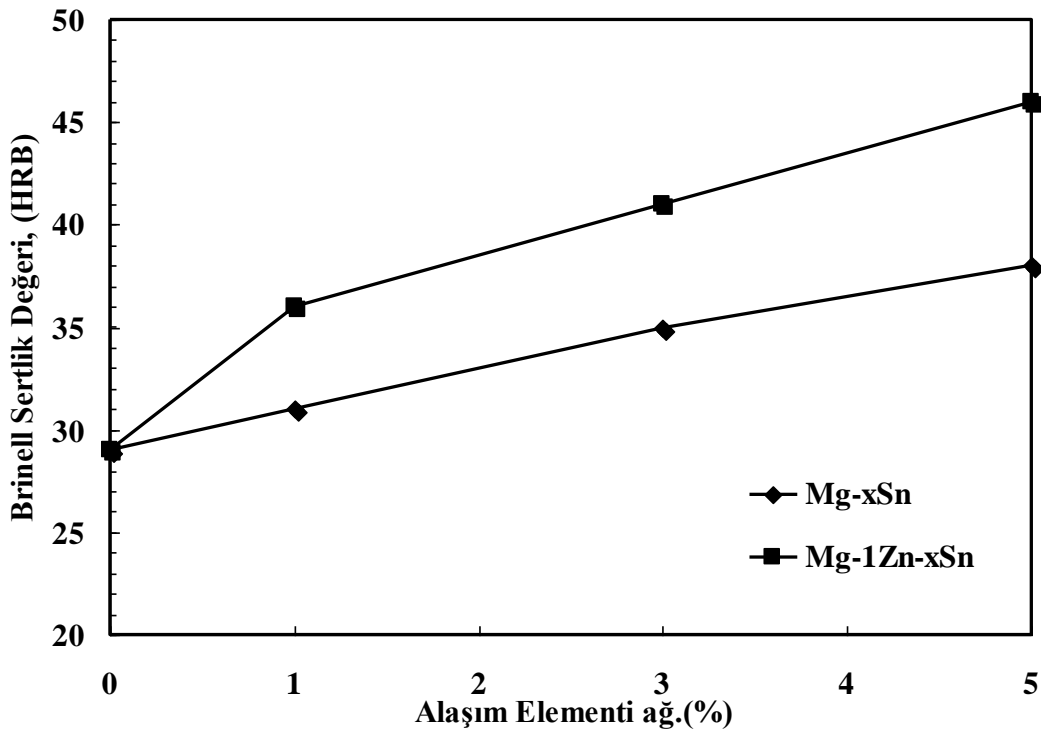
Tablo 5.2. Uygulanan mekanik testlerin sonuçları

| Kod Adı  | Brinell Sertlik (HRB) | Akma Mukavemeti (MPa) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Basma Mukavemeti (MPa) | $\epsilon$ (%) |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Alaşım 1 | 29                    | 20                    | 80                     | 175                    | 6              |
| Alaşım 2 | 31                    | 50                    | 118                    | 196                    | 7,2            |
| Alaşım 3 | 35                    | 53                    | 122                    | 243                    | 8              |
| Alaşım 4 | 38                    | 57                    | 115                    | 256                    | 4,6            |
| Alaşım 5 | 36                    | 60                    | 146                    | 235                    | 9,4            |
| Alaşım 6 | 41                    | 70                    | 164                    | 258                    | 10,2           |
| Alaşım 7 | 46                    | 72                    | 123                    | 264                    | 5,6            |

### 5.2.1. Üretilen alaşımlarda sertlik deneyi ve sonuçları

Hongmei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, saf magnezyuma ağırlıkça %1-10 kalay (Sn) ilave ederek alaşımların mekanik özelliklerini incelemiştir. Mg-Sn alaşımlarında meydana gelen sert ve kırılğan bir faz olan  $Mg_2Sn$  (yaklaşık 119HV) intermetalik tane sınırları boyunca yayılıp kalay ilavesinin artmasıyla mevcudiyetinin artması sonucu matriksi güçlendirmesiyle alaşımlardaki mikrosertliğin artmasına, bu intermetalik tane sınırlarının sebebi olduğu sonucuna varmışlardır[35].

Ağırlıkça % kalay (Sn) elementinin ilavesi arttıkça artan  $Mg_2Sn$  intermetalik tane sınırları boyunca yayılarak tane boyutunu küçültmesi, mikrosertliğin artmasının sebebi olarak görülebilmektedir. Ayrıca yapılan literatür çalışmalarında kalay ilavesi ile  $Mg_2Sn$  intermetalik tane sınırlarının (ergime sıcaklığı  $770^\circ C$ ) oluştuğu ve kalay ilavesinin artması ile  $Mg_2Sn$  intermetalik tane miktarının arttığından bahsedilmektedir.  $Mg_2Sn$  intermetalik tane sert ve kırılğan bir fazdır[35,36,46,65-67]. Dolayısıyla kalay ilavesi arttıkça alaşımların sertliği de artmaktadır.



Şekil 5.13. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi

Şekil 5.13'te ve Tablo 5.2'de görüldüğü gibi, magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi arttıkça sertlik değerleri de artmıştır. Alaşım 1'in yani saf magnezyumun sertliği 29 Brinell ölçülürken Alaşım 2, Alaşım 3, Alaşım 4'ün sertlik değerleri sırasıyla 31, 35, 38 Brinell olarak ölçülmüştür. Optik mikroskop (Şekil 5.1) ve SEM görüntülerinde (Şekil 5.5) görüldüğü gibi, kalay ilavesi saf magnezyumun mikroyapısını modifiye etmektedir. Kalay ilavesi arttıkça oluşan  $Mg_2Sn$  intermetalığı artarak tane sınırları boyunca yayılır. Böylece tane boyutu küçülerek sertlik değerleri artmaktadır.

Alaşım 1'e ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi sonucunda alaşım elementinin bir miktarının  $\alpha$ -Mg içerisinde çözünmesi neticesinde meydana gelen katı eriyik sertleşmesi ve oluşan  $Mg_2Sn$  intermetalığı ile sert ikincil fazın bünyede bulunması sertlik artışının temel unsurlarıdır. Sonuçlardan da anlaşılma üzere saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile matriks alaşımının sertliği yaklaşık %30 artmıştır.

Şekil 5.13'te ve Tablo 5.2'de görüldüğü gibi, alaşımlara ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesine ek olarak ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilave edildiğinde üretilen Alaşım5, Alaşım6 ve Alaşım 7'nin sertlikleri sırası ile 36, 41 ve 46 Brinell ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında, ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi ile sertlik değerleri daha da artmıştır. Optik mikroskop (Şekil 5.1) ve SEM görüntülerinden (Şekil 5.5) görüldüğü gibi kalay ilavelerine ek olarak sabit tutularak ilave edilen ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi mikroyapıyı daha da farklı bir şekilde değiştirmekte ve tane boyutunu daha da küçültmektedir.

Kalay (Sn) alaşım elementinin ilavesinin tane boyutunu düşürmesinin yanı sıra, çinko (Zn) elementinin ilavesi yapıyı daha da ince taneli ve karmaşık bir hale getirmektedir. Ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilavesi magnezyum ile birlikte herhangi bir yeni faz oluşturmamaktadır(Şekil 5.3). İlave edilen ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_2Sn$  intermetalığı içerisinde çözüldüğü görülmüştür(Şekil 5.9, 5.10, 5.11 EDS analizleri).

Ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilavesi ile tane boyutunun daha fazla küçülmesinin temel nedeni bahsedilen heterojen çekirdeklenmeye çinko (Zn) elementinin katkıda bulunması olarak düşünülmektedir. Ayrıca çinko (Zn) elementinin  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_2Sn$  intermetalığı içerisinde çözünmemesinin yanı sıra  $\alpha$ -Mg içerisinde çinko (Zn) elementi ilavesi yapıldığında kalay (Sn) elementinin de çözüldüğü görülmüştür. Dolayısıyla  $\alpha$ -Mg, kalay (Sn) ve çinko (Zn) elementleri ile güçlenerek mukavemet kazanmış ve sertlik değerlerinde daha fazla artış meydana gelmiştir.

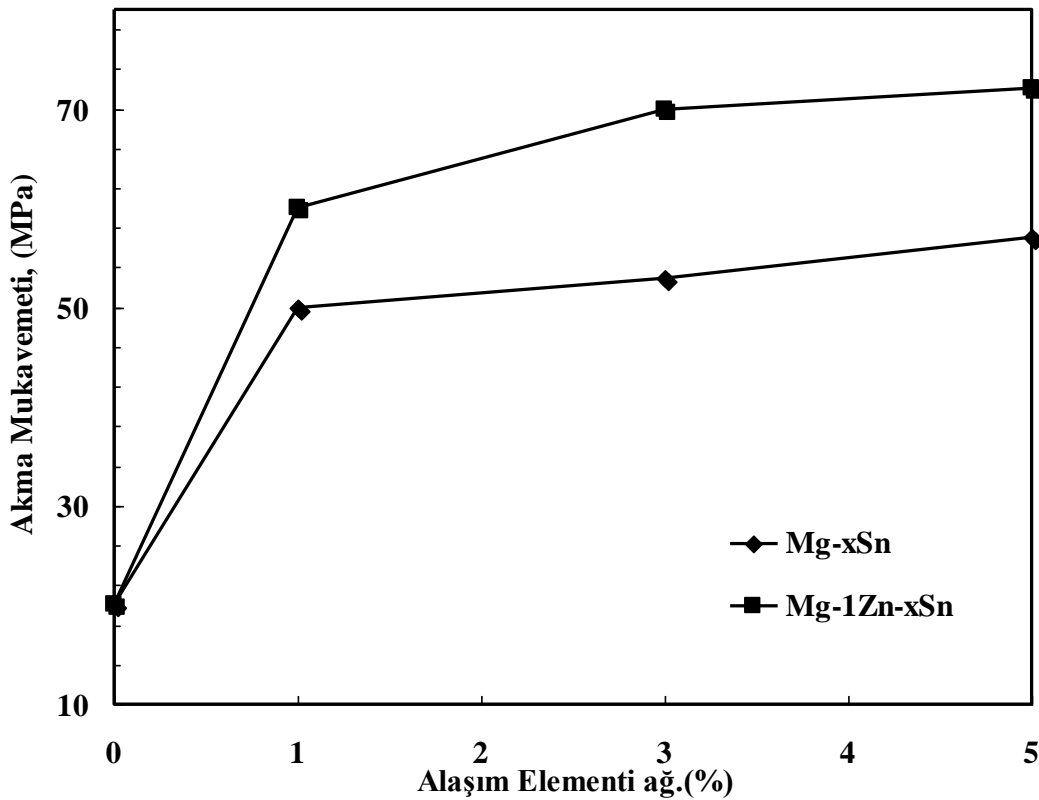
Tüm alaşımların sertlik değerlerine bakıldığında, Alaşım 3'ün sertlik değeri ile Alaşım 5'in sertliği hemen hemen eşit seviyeye ulaşmıştır. Aynı durum, Alaşım 5 ile Alaşım 6'nın sertlik değerlerinde de görülmektedir. Bunların ana sebebi kalay ve çinko ilavesi, magnezyumun mikroyapısında tane inceltici rol oynamış olmasıdır.

Kalay ve çinko ilavesi, magnezyumun mekanik özellikleri iyileştirici etkiye sahip ve yapıda farklı intermetalikler oluşturarak mukavemet artırıcı etkiye sebep olmuştur. Alaşım elementlerinin ilavesi ile matriks alaşımının sertlik değeri yaklaşık %60 artmıştır.

### 5.2.2. Üretilen alaşımlarda çekme deneyi ve sonuçları

Üretilen alaşımların çekme deneyi sonrası elde edilen akma, çekme mukavemeti ve yüzde (%) uzama değerleri sırası ile Tablo 5.2’te verilmiştir.

Son dönemlerde yapılan bu konu ile ilgili çalışmalarda da aynı sonuçlar elde edilmiştir. Kalay ilavesi arttıkça  $Mg_2Sn$  intermetalığının mevcudiyeti artmış fakat belirli bir orandan sonra sert ve kırılğan bir faz olan  $Mg_2Sn$  intermetalığı kabalaşarak alaşımların mukavemetini düşürmüştür[35,36,46,65].

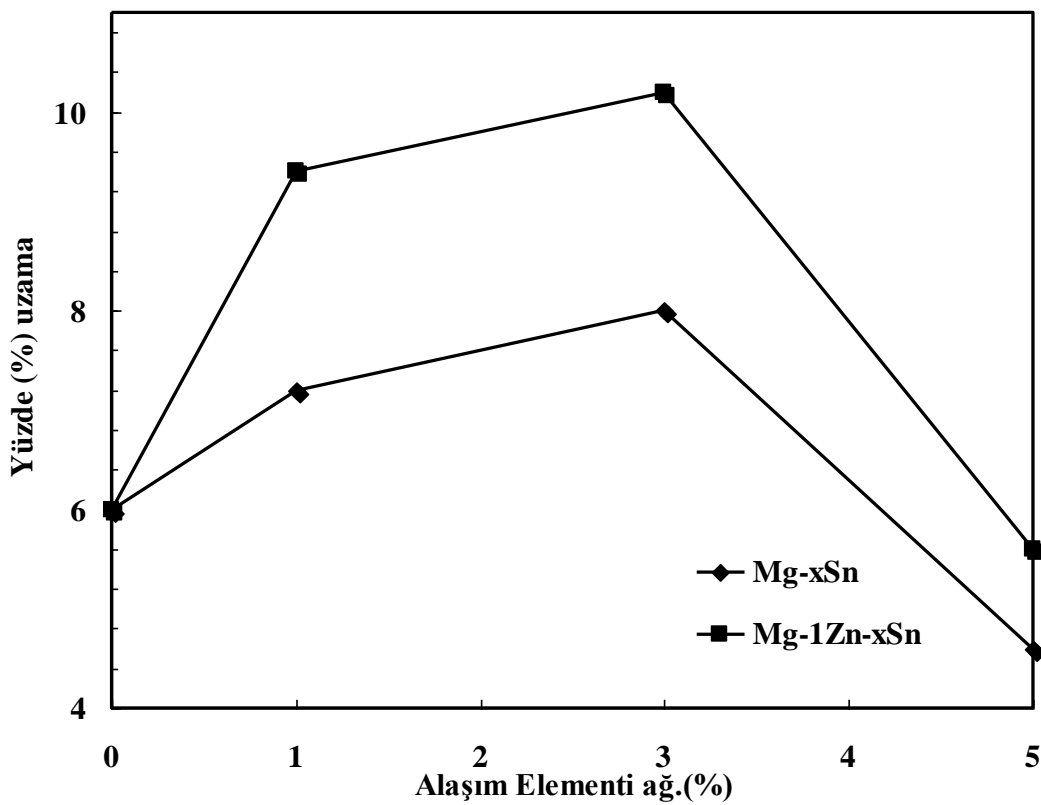


Şekil 5.14. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama akma mukavemet değerlerinin gösterimi

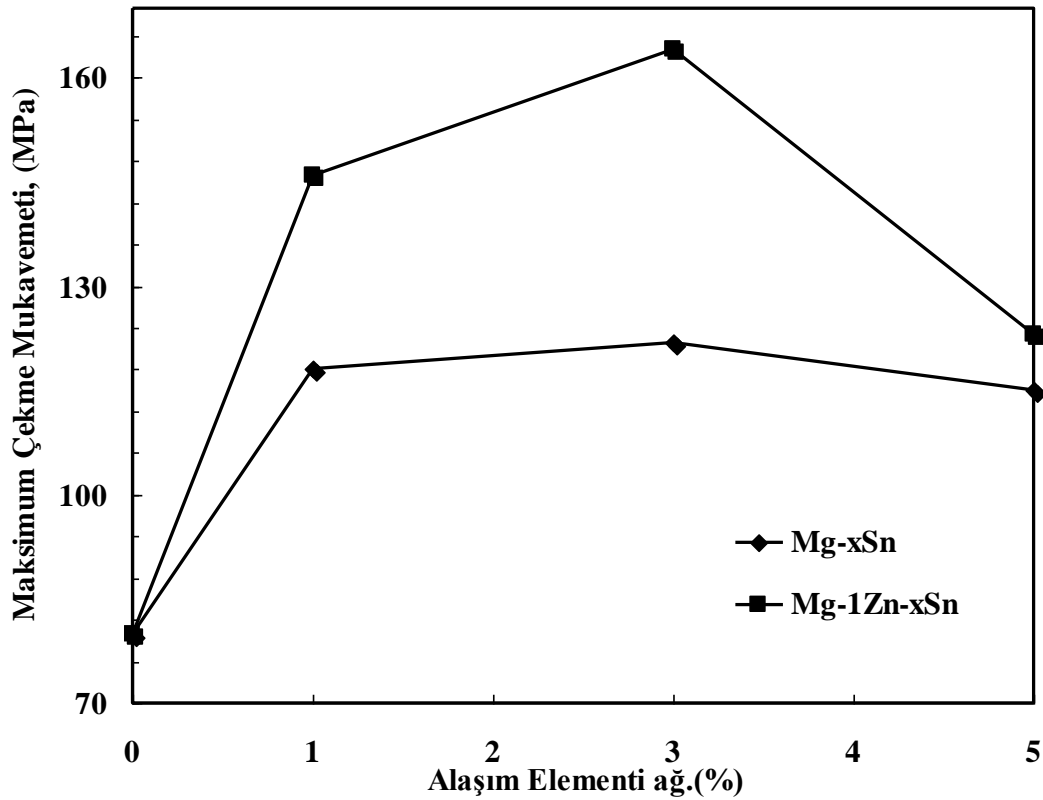
Şekil 5.14’te ve Tablo 5.2’de görüldüğü gibi, ağırlıkça % kalay ilavesi (Sn) arttıkça elde edilen akma mukavemeti değerleri de artmıştır. Saf magnezyumun akma mukavemeti değeri 20 MPa olarak ölçülürken, ağırlıkça % Sn ilavesinin artmasıyla Alaşım 2, 3 ve 4’ün akma mukavemeti değerleri sırasıyla 50, 53 ve 57 MPa olarak ölçülmüştür.

Aynı şekilde, bu alaşımlara ağırlıkça % 1 çinko (Zn) alaşım elementi ilavesiyle elde edilen Alaşım 5, 6 ve 7'de ölçülen bu akma mukavemeti değerleri sırasıyla 60, 70 ve 72 MPa'dır. Çinko alaşım elementi ilavesiyle, akma mukavemeti değerleri daha da artmıştır.

Kalay ve çinko elementi ilavesi, saf magnezyumun akma mukavemetini 20 MPa'dan maksimum 72 MPa'a kadar çıkararak yaklaşık % 260 oranlarında arttırmıştır. Akma mukavemetinin artışı temel olarak alaşım elementi ilavesi ile meydana gelen tane boyutu azalması olarak düşünülmektedir.



Şekil 5.15. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama yüzde (%) uzama değerlerinin gösterimi



Şekil 5.16. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) ilaveli tüm alaşımların ortalama çekme mukavemet değerlerinin gösterimi

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da görüldüğü gibi, Alaşım 1'e yani saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile yüzde uzama değerleri belli bir orana kadar artıp daha sonra azalırken aynı durum çekme mukavemeti değerlerinde de gözlenmiştir. Tablo 5.2'de elde edilen verilerde, Alaşım 1'in yüzde uzama değeri 6 olarak ölçülürken Alaşım 2, 3 ve 4'ün yüzde uzama değerleri 7.2, 8 ve 4.6 olarak ölçülmüştür. Tablo 5.2'de maksimum çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında, Alaşım 1'in maksimum çekme mukavemeti 80 MPa olarak ölçülürken Alaşım 2, 3 ve 4'ün maksimum çekme mukavemetleri sırasıyla 118, 122, 115 MPa olarak ölçülmüştür.

En iyi yüzde uzama ve çekme mukavemeti değerleri, saf magnezyuma ağırlıkça %3 kalay (Sn) ilavesinde yani Alaşım 3'te elde edilmiştir.



Alınan optik(Şekil 5.1), SEM (Şekil 5.5) mikroyapı görüntülerinden ve EDS analizlerinden de (Şekil 5.6-5.9) görüldüğü gibi  $Mg_2Sn$  intermetalığı kalay (Sn) alaşım elementi arttıkça artmış, tane sınırları boyunca yayılmış ve böylece tane boyutunu incelterek malzemenin dayanımını arttırmıştır. Fakat  $Mg_2Sn$  sert ve kırılğan bir fazdır. Alaşım 4 yani ağırlıkça maksimum %5 kalay (Sn) içeren alaşımda  $Mg_2Sn$  intermetalığı mevcudiyeti daha da artmıştır. Kalay ilavesi arttıkça sert ve kırılğan bir faz olan  $Mg_2Sn$  intermetalığının mevcudiyeti artmıştır(Şekil 5.2). Fakat çözünen içeriğinin artmasıyla birlikte kabalaşma hızı da artmaktadır. Ağırlıkça % 3 kalay ilavesine kadar çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerindeki artış, mekanik özellikleri üzerinde önemli bir role sahip olan dentrit kol aralığının ve tane boyutunun azalmasında, ayrıca, ayrılmış  $Mg_2Sn$  fazının çoğunlukla tane sınırlarında çökmesiyle dislokasyon hareketini engelleyerek kuvvetlendirme etkisinden ileri gelmektedir. Ağırlıkça % 3 kalay ilavesinden sonra  $Mg_2Sn$  intermetalığının boyut ve kırılma yoğunluğu artarak tane sınırlarında yarı kesiksiz ağ formu oluşturmaya yönelir. Bu büyük intermetalik fazların varlığı ve yarı kesiksiz ağ morfolojisi, çatlakların başlamasını ve çoğalmasını kolaylaştırarak mukavemet ve süneklik üzerinde ters etkiye sebep olur.

Şekil 5.15 ve 5.16'da ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesine ek olarak ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilavesi ile yüzde uzama ve çekme mukavemeti değerlerinin daha da arttığı görülmektedir. Tablo 5.2'de görüldüğü gibi, Alaşım 1'in yüzde uzama değeri % 6 olarak ölçülürken Alaşım 5, 6 ve 7'nin yüzde uzama değerleri sırasıyla 9.4, 10.2 ve 5.6 olarak ölçülmüştür. Yüzde uzama değerleri, ağırlıkça %3 kalay ve %1 çinko içeren alaşımda (Alaşım 6) maksimum seviyeye ulaşmış daha sonra azalmıştır.

Tablo 5.2'deki çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında, Alaşım 1 yani saf magnezyumun maksimum çekme dayanımı 80 MPa olarak ölçülürken ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımlara ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilave edilerek elde edilen Alaşım 5, 6 ve 7'nin maksimum çekme mukavemetleri sırasıyla 146, 164 ve 123 MPa olarak ölçülmüştür. Yüzde uzama değerlerinde olduğu gibi, çekme mukavemeti değerlerinde de ağırlıkça %3 Sn ve %1 Zn içeren alaşımda (Alaşım 6) en yüksek çekme mukavemeti değerine ulaşılmış daha sonra azalmıştır.

En yüksek çekme mukavemeti Alaşım 6'da yani saf magnezyuma ağırlıkça %1 Zn+%3 Sn ilave edilen alaşımda elde edilmiştir.

Yapılan optik ve SEM mikroyapı görüntülerinden (Şekil 5.1 ve 5.5) görüldüğü gibi, kalay (Sn) ilavesine ek olarak ağırlıkça %1 çinko (Zn) alaşım elementi ilavesi saf magnezyumun tane boyutunu düşürmekte, yeni bir faz oluşturmamakta (Şekil 5.3) ve EDS analizlerinde de  $\alpha$ -Mg içerisinde çinko (Zn) ve kalay (Sn) elementleri çözünmektedir(Şekil 5.10-5.12).  $\alpha$ -Mg içinde bir miktar kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin çözünmüş olması katı eriyik sertleşmesi sağlamış ve mukavemeti arttırmış olduğu düşünülmektedir.

Ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımlarda (Alaşım 2,3 ve 4) olduğu gibi ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilave edilen alaşımlarda da (Alaşım 5, 6 ve 7) ağırlıkça % 5 kalay (Sn) içeren alaşımda yani Alaşım 7'de çekme mukavemeti değeri düşmektedir. Bunun sebebi de aynı şekilde ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi arttıkça  $Mg_2Sn$  intermetalini varlığı artmıştır(Şekil 5.10-12). Aynı zamanda mevcut  $Mg_2Sn$  intermetalinin içerisinde çinko çözünüp daha fazla kabalaşmaya sebep olarak çatlak oluşumu gibi durumları daha kolay hale getirmiştir ve çekme dayanımı düşmüştür.

Sonuç olarak, saf Mg'a Sn ve Zn alaşım elementi ilavesi ile yüzde uzama ve çekme mukavemetinin belli bir seviyeye kadar artmasının sebebi katı eriyik sertleşmesi, bünyede  $Mg_2Sn$  intermetalinin varlığı ve tane boyutunun azalması olarak özetlenebilir.

Şekil 5.17'de alaşımların oda sıcaklığındaki çekme testi sonucunda meydana gelen kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri gösterilmektedir.

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kalay ilavesinin Mg-Zn-Al alaşımlarının mikroyapı ve mekaniksel özellikleri üzerinde etkisi incelenmiş ve kalay ilavesi ile kırık yüzeylerde klivaj ve yarı klivaj kırılmanın öncelikli olduğu gözlenmiştir. Fakat çok yüksek değerlerde kalay ilavesinin  $Mg_2Sn$  partiküllerinin kabalaşması sonucunda mukavemetin ve plastisitenin azaldığı rapor edilmiştir[69].

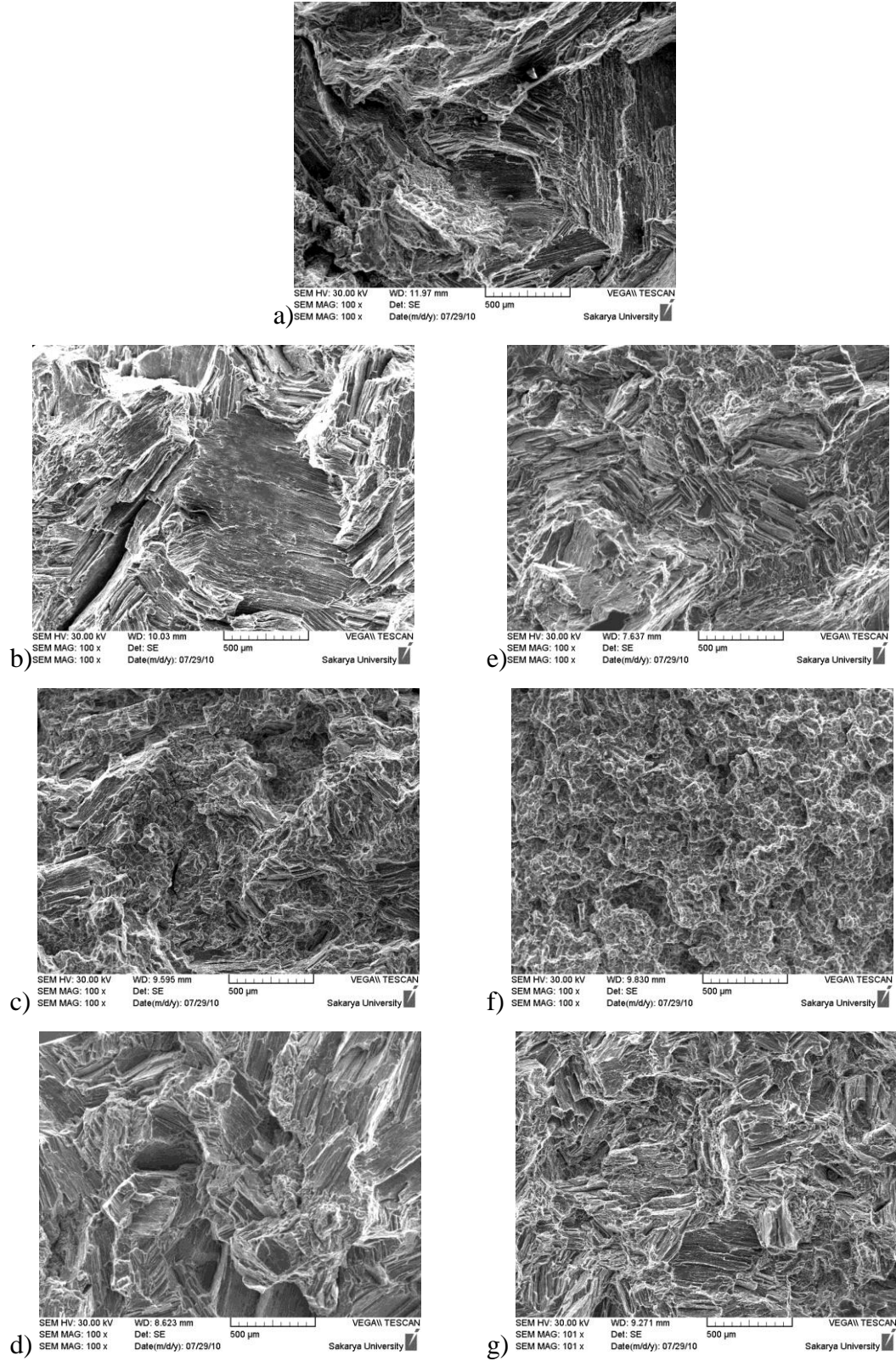
Magnezyum alaşımlarının başlıca kırılma modları; klivaj kırılma, yarı klivaj kırılma ve tanelerarası kırılmadır. Birçok Mg alaşımı, hegzagonal kristal yapıya ve birkaç kayma sistemine sahiptir. İki veya daha fazla kayma sistemi aynı zamanlarda aktif olur. Buna rağmen, sünek kırılma çukurlaşma karakteristiği, Mg alaşımlarının başlıca kırılma modunda değildir. Benzer çalışmalarda, magnezyuma (Mg) ilave edilen kalay (Sn), alaşımın sünekliliğini artırır, sıcak işlem sırasında da alaşımın çatlama eğilimini azalttığı için alaşımın işlenebilirliğini de artırmaktadır. Ağırlıkça % kalay (Sn) elementinin ilavesi arttıkça tane boyutunun küçülmesi, alaşımlardaki mukavemetin artmasının sebebi olarak görülmüştür[69-71].

Şekil 5.17 (a)'da Saf Magnezyumun oda sıcaklığında çekme kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü verilmiştir. Çok büyük paralel düzlemlerin mevcudiyeti görülmektedir. Buda, yüzeyde daha çok gevrek kırılma yani klivaj kırılmanın hakim olduğunu göstermektedir. Klivaj kırılmada kırılan yüzeyin görüntüsü sünek kırılmaya kıyasla daha düz ve daha parlaktır.

Şekil 5.17 (b)'de Alaşım 2'nin kırık yüzeyinin SEM mikroyapı görüntüsü görülmektedir. Saf magnezyuma (Alaşım 1) göre ağırlıkça %1 kalay (Sn) ilaveli alaşımın (Alaşım 2) kırık yüzeyinde çukurlaşmalar (dimples) meydana gelmiştir. Kırık yüzeylerin SEM görüntüsünden, kalay (Sn) alaşım elementinin ağırlıkça %1 ilavesi ile süneklik artmıştır. Fakat yine de bazı kısımlarda düz paralel parlak yüzeyler mevcuttur. Bu kırılma görüntüsü tamamen sünek kırılmaya sahip değildir.

Şekil 5.17 (c)'de Alaşım 3'ün çekme deneyi sonrası oluşan kırık yüzeyinin SEM görüntüsünden, Alaşım 1 ve Alaşım 2'ye göre ağırlıkça %3 kalay (Sn) ilavesi ile çukurlaşmaların daha da arttığı görülmektedir. Dolayısıyla gevrek kırılmaya ait düz parlak yüzeyler azalarak alaşımın sünekliliği daha da arttırmıştır.

Şekil 5.17 (d)'de Alaşım 4'ün çekme deneyi sonrası kırık yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu SEM görüntüsünden Alaşım 4'ün ağırlıkça %5 kalay (Sn) ilavesi ile meydana gelen çukurçukların (dimples) Alaşım 3'e göre azaldığı, gevrek kırılmaya ait parlak düzlemsel yapılarında arttığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.17. Çekme deneyi sonrası kalay ve çinko ilaveli alaşımların kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri; a) Alaşım 1, b) Alaşım 2, c) Alaşım 3, d) Alaşım 4, e) Alaşım 5, f) Alaşım 6, g) Alaşım 7

Şekil 5.17 (e)'de Alaşım 5'in kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüsünden, saf magnezyuma (Alaşım 1) göre ağırlıkça %1 çinko (Zn) ve %1 kalay (Sn) ilavesi çukurlaşmaların (dimples) meydana geldiği net bir şekilde görülmektedir. Dolayısıyla çinko alaşım elementi ilavesi ile birlikte süneklik daha da artmıştır. Alaşım 5, Alaşım 1 ve Alaşım 2'ye göre daha sünek bir yapıya sahiptir. Fakat yinede yüzeyde gevrek kırılmaya ait düz paralel ve parlak yüzeyler mevcuttur.

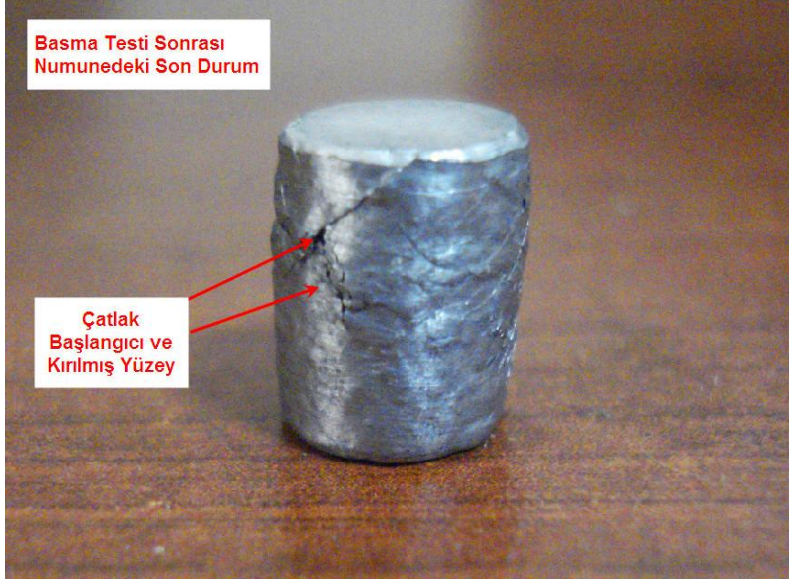
Şekil 5.17 (f)'de Alaşım 6'nın çekme deneyi sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüsünden, ağırlıkça %1 çinko(Zn) ilavesinin yanında ağırlıkça %3 kalay ilavesi oluşan çukurçukların (dimples) daha da artmasıyla sünek kırılma daha fazla hakim olmuştur. Dolayısıyla Alaşım 6, Alaşım 1, Alaşım 2, Alaşım 3, Alaşım 4 ve Alaşım 5'ten daha sünek bir yapıya sahiptir.

Şekil 5.17 (g)'de Alaşım 7'nin kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüsünde, %1 çinko (Zn) ilavesinin yanında kalay içeriğinin ağırlıkça % 5'e kadar artmasıyla sünek kırılmaya ait çukurçukların (dimples) azaldığı ve gevrek kırılmaya ait parlak düzlemlerin arttığı görülmektedir. Dolayısıyla Alaşım 7; Alaşım 6'ya göre daha gevrek bir yapıya sahiptir.

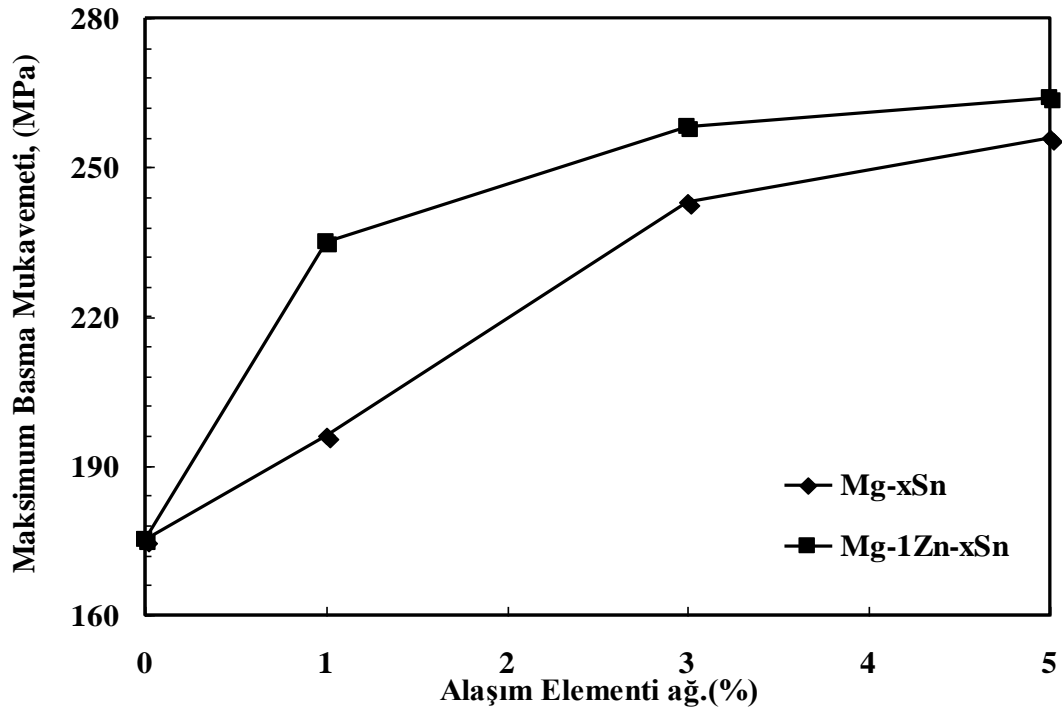
Sonuç olarak kalay ilaveli alaşımlarda maksimum sünekliğe Alaşım 3 sahip iken, çinko ilaveli alaşımlarda Alaşım 6'dır. Saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ve % çinko (zn) ilavesi ile süneklik belli bir orana kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Bu azalmanın sebebi, muhtemelen magnezyum (Mg) ile kalayın (Sn) oluşturduğu sert ve kırılğan özelliğe sahip  $Mg_2Sn$  intermetalığının kalay (Sn) ilavesi ile artarak belli bir orandan sonra  $Mg_2Sn$  intermetalığının kabalaşmaya başlayıp çatlak oluşumunu kolaylaştırmasıdır. Alaşım 6, Alaşım 3'e göre daha fazla sünektir. Bunun sebebi yapılan EDS analizlerinde çinkonun hem  $\alpha$ -Mg hem de  $Mg_2Sn$  intermetalığı içerisinde çözünmüş olarak bulunmasıdır.

### 5.2.3. Üretilen alaşımlarda basma deneyi ve sonuçları

Üretilen alaşımların basma deneyi sonrası görüntüsü, Şekil 5.18'de görülmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, Tablo 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.18. Basma deneyi sonrası numunenin görüntüsü



Şekil 5.19. Alaşımların ortalama basma mukavemet değerlerinin gösterimi

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi, saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile maksimum basma mukavemet değerleri artmıştır. Tablo 5.2’ye bakıldığında, Alaşım 1’in yani saf magnezyumun maksimum basma mukavemeti 180 MPa olarak ölçülürken ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların yani Alaşım 2, 3 ve 4’ün maksimum basma mukavemetleri 196, 243 ve 256 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile matriks alaşımının

maksimum basma değeri yaklaşık olarak % 40 artmıştır. Basma mukavemetindeki bu artışın sebebi yapıda meydana gelen iç gerilimdir. Kalay ilavesi arttıkça oluşan  $Mg_2Sn$  intermetalığı artmaktadır. Dolayısıyla  $Mg_2Sn$  intermetalığı sert ve kırılğan bir faz olduğundan yapıdaki bu faz artıkça iç gerilimler artmakta ve basma kuvvetiyle birlikte basma mukavemeti değerini arttırmaktadır.

Şekil 5.19'da saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesinin yanına ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilave edilmesiyle üretilen alaşımların ortalama basma mukavemet değerlerinin grafiksel şekli de görülmektedir. Tablo 5.2'ye bakıldığında, Alaşım 1'in maksimum basma mukavemet değeri 180 MPa olarak ölçülürken Alaşım 5, 6 ve 7'nin maksimum basma mukavemet değerleri sırasıyla 235, 258 ve 264 MPa olarak ölçülmüştür.

Ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesine ek olarak %1 çinko (Zn) ilave edilmesiyle maksimum basma mukavemet değerler daha da (yaklaşık % 50 ) artmıştır. Bunun sebebi heterojen çekirdeklenme görevi yapan  $Mg_2Sn$  intermetalığının içinde çinko (Zn) elementinin çözünerek tane inceltici mekanizma teorilerinden biri olan heterojen çekirdeklenmeye katkı da bulunması ve iç gerilimlerin artmasıyla mukavemet değerleri artmaktadır.

#### **5.2.4. Üretilen alaşımlarda korozyon deneyi ve sonuçları**

Üretilen alaşımların korozyon testleri, ağırlıkça % 3,5 NaCl içerecek 2000 ml'lik (pH 5,6) çözeltiler hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon testi gerçekleştirilmeden önce her bir numune 1200 mesh'lik zımparadan geçirilmiştir. Zımparalama işleminden sonra saf alkol ile her bir numunenin yüzeyi temizlenmiştir. Deney sonrasında bazı korozyon çözeltilerine kimyasal analiz yapılarak çözeltiliye geçen % element miktarlarına bakılmıştır. Tablo 5.3'te korozyon testi sonrasında elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Tablo 5.3. Elde edilen korozyon değerlerinin ortalaması

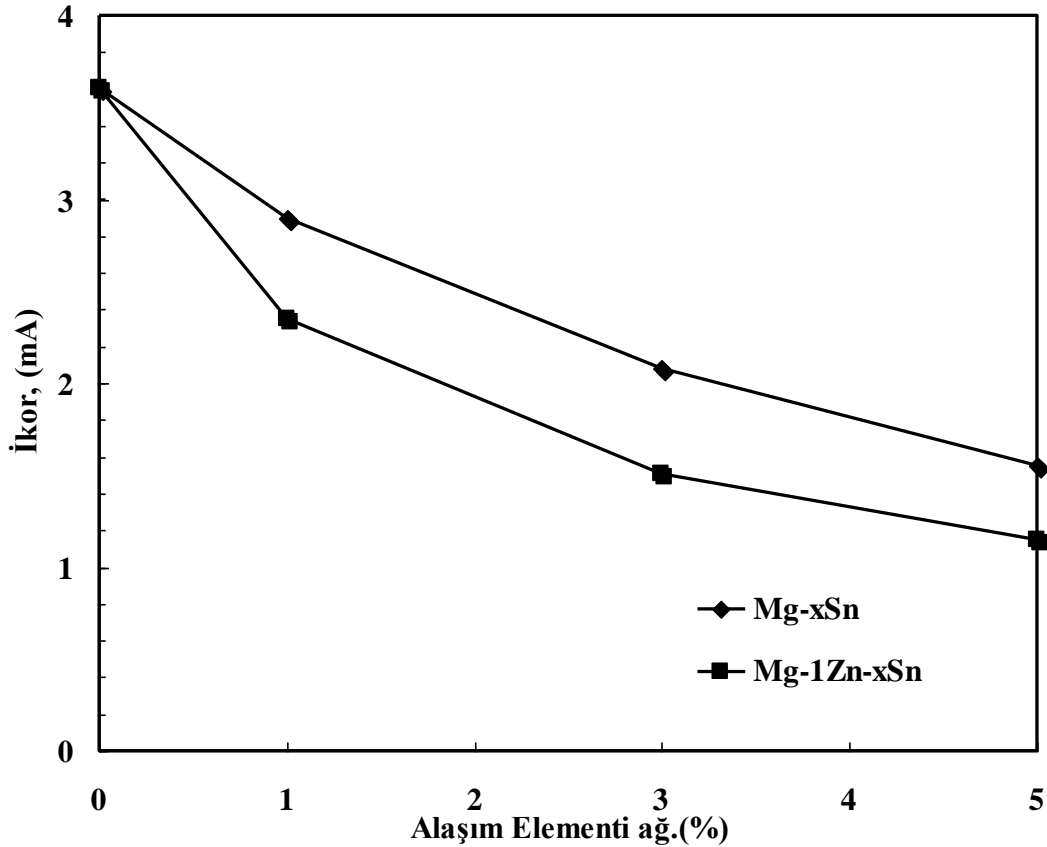
| Numune          | d (gr/cm <sup>3</sup> ) | E <sub>kor</sub> (V) | i <sub>kor</sub> (mA) | Korozyon Hızı (mpy) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Alaşım 1</b> | 1,6821                  | -1,472               | 3,605                 | 785,7               |
| <b>Alaşım 2</b> | 1,7006                  | -1,489               | 2,896                 | 600,8               |
| <b>Alaşım 3</b> | 1,7152                  | -1,518               | 2,082                 | 500,3               |
| <b>Alaşım 4</b> | 1,7681                  | -1,500               | 1,551                 | 329,5               |
| <b>Alaşım 5</b> | 1,7406                  | -1,520               | 2,348                 | 494,5               |
| <b>Alaşım 6</b> | 1,7493                  | -1,562               | 1,506                 | 315,6               |
| <b>Alaşım 7</b> | 1,9149                  | -1,561               | 1,152                 | 239,7               |

Son yıllarda Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, saf magnezyumun 1 Normalite NaCl çözeltisi içinde farklı pH değerlerinde gösterdikleri elektrokimyasal polarizasyon davranışlarını, hidrojen gelişim oranlarını ve ICPAES yardımıyla çözünen magnezyumun miktarını ölçmüşlerdir. Magnezyum üzerinde oluşan filmin korozyon kontrolünde önemli bir etken olduğunu ve uygulanan elektrot potansiyeli artırıldığında bu filmin kalınlığının azaldığını göstermişlerdir[54]. Song ve arkadaşları, başka bir çalışmada AZ21, AZ91 ve AZ501 'in korozyon davranışını anlayabilmek için 1N NaCl içinde pH:11'de elektrokimyasal polarizasyon akımlarını, elektrokimyasal AC impedans spektroskopilerini, hidrojen gelişim oranı ve magnezyum çözünme hızı ölçme çalışmaları yapmışlardır[55].

Sonuç olarak korozyon hızının AZ501, AZ21, AZ91 seklindeki sırayla değiştiğini göstermiş ve bunun, alaşım mikroyapılarındaki farklılıktan kaynaklandığını belirlemişlerdir. Bu nedenle elektron mikroskobu ve optik mikroskop yardımıyla alaşım mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda  $\beta$  ötektik faz karışımının çözelti içinde kararlı ve etkili bir katot olduğunu ve yapıda bulunuşuna göre iki farklı davranışta hareket ettiğini saptamışlardır. Song ve arkadaşlarına göre, eğer  $\beta$  ötektik faz karışımı  $\alpha$  matriks içinde küçük miktarlarda bulunuyorsa, galvanik katot gibi hareket eder ve  $\alpha$  matriksin korozyon hızını artırmaktadır.



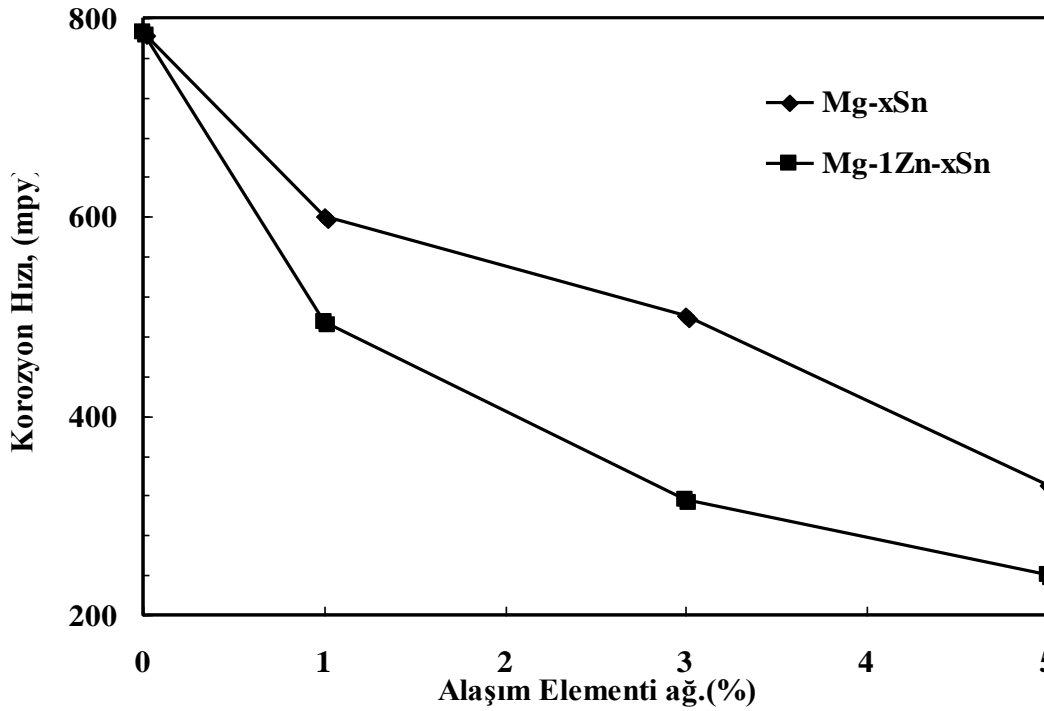
Diğer yandan eğer  $\beta$  ötektik faz karışımı miktarı yüksekse anodik bariyer gibi hareket eder ve alaşım tümüyle korozyona uğramaktadır. Song ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalarda  $\alpha$  matriks içindeki Al miktarı artışının, anodik çözünme hızını ve katodik hidrojen gelişim oranını arttırdığını görmüşlerdir.  $\alpha$  matriks içinde bulunan Zn'nin ise tam tersi bir etki yaratacağını öne sürmüşlerdir [54,55].



Şekil 5.20. Tüm alaşımların  $I_{kor}$  (mA) değerlerinin gösterimi

Tablo 5.3'te elde edilen sonuçlara ve Şekil 5.20'ye bakıldığında, Alaşım 1'e yani saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile ölçülen korozyon akımı  $I_{kor}$  (mA) değerleri azalmaktadır. Alaşım 1'in  $I_{kor}$  (mA) değeri 3.605 mA olarak ölçülürken ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların Alaşım 2, 3 ve 4'ün  $I_{kor}$  (mA) değerleri 2.896, 2.082, 1.551 mA olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi matriks alaşımın  $I_{kor}$  (mA) değerleri azaltarak korozyona karşı direnci arttırmıştır.

Alaşımlara ağırlıkça % 1 çinko (Zn) ilavesi ile bu değerler daha da düşmüştür (Tablo 5.3). Alaşım 5, 6 ve 7'nin  $I_{kor}$  (mA) değerleri 2.348, 1.506, 1.152 mA olarak ölçülmüştür. Kalay ilaveli alaşımlara ağırlıkça %1 çinko elementi ilavesi  $I_{kor}$  (mA) değerlerini düşürerek korozyon hızını azaltmasıyla korozyona karşı direnç sağlamıştır.



Şekil 5.21. Tüm alaşımların korozyon hızı değerlerinin gösterimi

Tablo 5.3'te elde edilen sonuçlara ve Şekil 5.21'e bakıldığında, Alaşım 1'e yani saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi ile korozyon hızı azalmaktadır. Alaşım 1'in korozyon hızı değeri 786.7 mpy olarak ölçülürken ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların Alaşım 2, 3 ve 4'ün korozyon hızı değerleri 600.8, 500.3, 329.5 mpy olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesi magnezyumun korozyona olan direncini artmıştır. Kalay (Sn) alaşım elementi ilavesi, magnezyumda korozyona karşı direnç etkisi yaratmıştır

Yapılan literatür çalışmalarda da, kalay ilavesi ile  $Mg_2Sn$  intermetalik oluşmaktadır [35,36]. Bu intermetalik fazın, saf magnezyumun korozyon direncini artırarak korozyon önleyici görev yapmış olduğu düşünülebilir.

Saf magnezyuma (Alaşım 1) ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesine ek olarak ağırlıkça %1 ınko (Zn) ilave edilmesiyle üretilen alaşımların korozyon hızları sırasıyla 494.5, 315.6, 239.7 mpy olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %1 ınko (Zn) ilavesi ile alaşımların korozyon hızları daha da düşmüştür. Bunun sebebi, ınko alaşım elementi ilavesinin korozyon özelliklerini iyileştirici etkiye sahip olmasıdır[72].

ınko, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında sertliği, dayanımı ve aynı zamanda eriyiğin akıcılığını artırmakla birlikte, tane sınırlarına çökelmesi ile sıcak yırtılma oluşturduğu için %2 ile sınırlıdır[9]. Mg-Zn ikili denge diyagramında, magnezyum ve ınko arasında MgZn, MgZn<sub>3</sub> gibi intermetalikler oluştuğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda da bu fazların oluşumu rapor edilmiştir[69]. Fakat yapılan bu çalışmada, ilave edilen ağırlıkça %1 ınko (Zn) elementinin oranının düşük olması ve kalay (Sn) elementinin magnezyuma karşı elektronegativitesi, ınko (Zn) elementinden daha fazla olması sebebiyle, sadece Mg<sub>2</sub>Sn intermetalici oluşmuştur(şekil 5.3). EDS analizleri sonucunda da, alaşımlara ilave edilen ağırlıkça %1 ınko (Zn) alaşım elementinin  $\alpha$ -Mg ve Mg<sub>2</sub>Sn intermetalici içerisinde zndğu görülmüştür(şekil 5.10-12). Ağırlıkça % 1 ınko (Zn) ilavesi ile korozyon hızınının düşmesinin temel nedeni, muhtemelen korozyona karşı direnç sağlayan Mg<sub>2</sub>Sn intermetalici içerisinde, ınko (Zn) alaşım elementinin çözünmüş olarak bulunmasıdır.

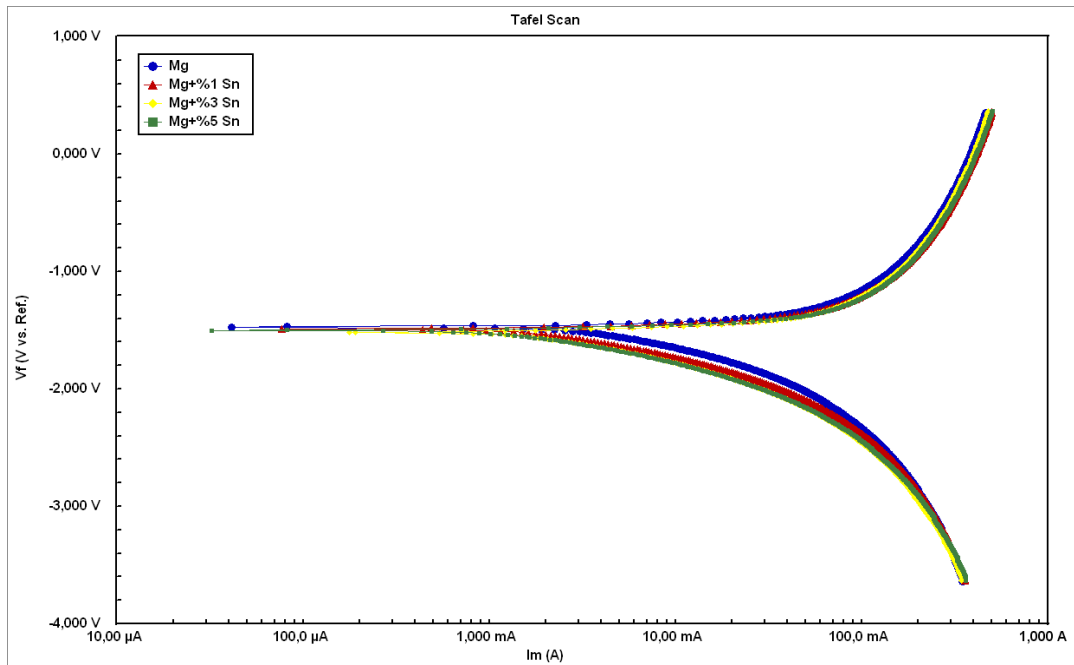
Korozyon numune çözeltilerinin kimyasal analizi, kimya laboratuvarında alevli atomik absorpsiyon spektrometrik tekniği ile tayin edilmiştir. Korozyon deneyi sonucunda çıkan çözeltilerin içindeki magnezyum (Mg) , kalay (Sn) ve ınko (Zn) oranları ölçülmüş ve aşağıdaki tabloda değerleri belirtilmiştir. Belirtilemeyen değerler tayin sınırının altındadır.

Tablo 5.4. Bazı korozyon çözeltilerinden alınan kimyasal analiz sonuçları

| Numune          | %Mg   | %Sn  | %Zn  | %Na  | %Ca  | %Pb | %Cr | %Rb | %Cs |
|-----------------|-------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| <b>Alaşım 1</b> | 73,15 | ---  | ---  | 3,57 | 0,9  | 0,8 | 0,5 | --- | --- |
| <b>Alaşım 4</b> | 2,70  | 0,01 | ---  | 3,60 | 0,04 | 0,1 | --- | --- | --- |
| <b>Alaşım 7</b> | 2,00  | ---  | 0,02 | 3,57 | ---  | 0,9 | --- | 0,7 | 0,9 |

Tablo 5.4'te görüldüğü gibi, Alaşım 1 yani saf magnezyum ağırlıkça %3.5'lük NaCl çözeltisi içinde en fazla korozyona uğramış numunedir. Deney sonunda elde edilen çözeltilerden alınan kimyasal analiz sonuçlarında, Alaşım 1, %73.15 magnezyum (Mg) kaybederken, Alaşım 4 ve 7 sırasıyla %2.7 ve %2 magnezyum (Mg) kaybetmiştir. Dolayısıyla korozyona en dayanıklı alaşımın Alaşım 7 olduğu söylenebilir. Ağırlıkça % kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin ilavesi magnezyumda (Mg) korozyona karşı direnç etkisi yaratmıştır.

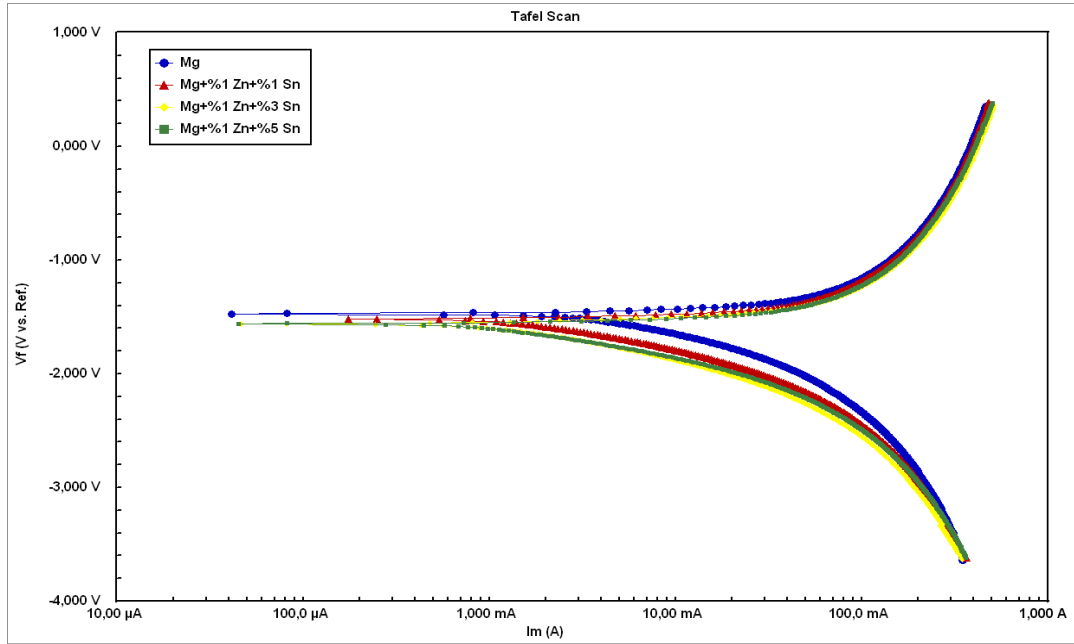
Şekil 5.22 ve 5.23'te alaşımların korozyon deneyi sonrasında elde edilen Tafel Eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 5.22. Ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların tafel eğrileri (%3,5 NaCl)

Şekil 5.22' de saf magnezyum ve ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli alaşımların yani Alaşım 1, 2, 3 ve 4'ün korozyon testi sonucunda elde edilen Tafel Eğrileri görülmektedir. Saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesiyle saf magnezyumda elde edilen tafel eğrisi değişime uğramaktadır. Kalay ilavesi arttıkça İkor (mA) değerleri daha da azalmaktadır. Dolayısıyla korozyon hızı da azalarak korozyona karşı direnç sağlanmaktadır.

Kalay (Sn) ilavesinin saf magnezyumun korozyon direncini arttırmasının sebebi, XRD sonuçlarından elde edilen ve kalay ilavesi arttıkça artan magnezyum ile kalay elementinin oluşturduğu  $Mg_2Sn$  intermetalidir(Şekil 5.2). Oluşan bu sert ve kırılğan  $Mg_2Sn$  intermetaligi,  $\alpha$ -Mg'a koruyuculuk görevi yaparak korozyon hızını azaltır ve korozyona karşı direnç sağlar.



Şekil 5.23. Ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilaveli alaşımların tafel eğrileri (%3,5 NaCl)

Saf magnezyum ve saf magnezyuma ağırlıkça % kalay (Sn) ilaveli ve ağırlıkça %1 çinko (Zn) ilaveli alaşımlardan elde edilen Tafel Eğrilerinin birleşimi Şekil 5.23'te gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, saf magnezyuma ağırlıkça % Sn ilavesi arttıkça ve ağırlıkça %1 Zn alaşım elementi ilave edilince İkor (mA) değerleri daha da azalmaktadır. Dolayısıyla korozyon hızı daha da azalmaktadır. Ağırlıkça %1 Zn alaşım elementi ilavesi, yapılan XRD analizleri sonuçlarında yeni bir faz oluşturmamıştır(Şekil 5.3) Fakat yapılan EDS analizleri sonucunda Zn elementinin  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_2Sn$  intermetaligi içerisinde çözündüğü görülmüştür(Şekil 5.10-12).  $Mg_2Sn$  intermetaliginin içerisinde Zn elementinin bulunması korozyon hızını daha da düşürmüştür. Çünkü  $Mg_2Sn$  intermetaligi,  $\alpha$ -Mg'da korozyona karşı koruyuculuk görevi yaparak korozyon hızını azaltır ve korozyona karşı direnç sağladığı düşünülmektedir. Saf magnezyuma kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementlerinin ilavesi, korozyon hızını düşürerek korozyona karşı direnç sağlamaktadır.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

### 6.1. Sonuçlar

Magnezyum ve alaşımlarının üretimleri, çok çeşitli prosesler ile yapılmaktadır. Bu prosesler, üretilecek alaşımların mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını direk etkilediğinden proses seçimi oldukça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, kokil kalıba döküm yöntemiyle alaşımların üretilmesi ve ilave edilen alaşım elementlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Üretilen numunelerde mikro yapı ve mekanik test (sertlik, çekme, basma, korozyon) çalışmaları yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Saf magnezyumun mikroyapısı  $\alpha$ -Mg olarak bilinen irili ufaklı ve uzunlamasına tanelerden oluşmaktadır. Kalay (Sn) ve çinko (Zn) alaşım elementi ilavesi, saf magnezyumun mikroyapısını modifiye etmektedir. Dentirik yapılar artarak Mg ve Sn arasında  $Mg_2Sn$  intermetalığı meydana gelmektedir. Tane inceltme mekanizmalarından heterojen çekirdeklenme görevini yapan ayrıca sert ve kırılğan özelliğe sahip bu intermetalik faz, tane sınırları boyunca yayılmış ve tane boyutunu küçülmüştür. Sn ilavesi artıkça tane boyutu küçülmüştür. Çinko, magnezyumla elektronegativitesinden ve ilave miktarının az olmasından dolayı herhangi yeni bir faz meydana getirmemiştir. Fakat yapılan EDS analizleriyle ilave edilen çinko elementinin  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_2Sn$  intermetalığı içerisinde çözüldüğü görülmüş ve çinko heterojen çekirdeklenmeye katkıda bulunmuştur. Dolayısıyla, çinko (Zn) ilave edildiğinde taneler daha da küçülmüştür. Saf magnezyumda tane boyutu 540  $\mu m$  olarak ölçülürken bu değer, kalay ilaveli alaşımlarda 55  $\mu m$ 'ye, ağırlıkça % 1 çinko ilaveli alaşımlarda 51  $\mu m$ 'ye kadar düşmüştür.

2. Kalay (Sn) alaşım elementinin ilavesi arttıkça saf magnezyumun sertliğini yaklaşık 29 Brinell değerinden 38 Brinell değerine çıkararak %30 arttırmıştır. Aynı şekilde ağırlıkça %1 inko (Zn) ilave edildiğinde sertlik değerleri maksimum 46 Brinell'e kadar artarak yaklaşık % 60 artmıştır.
3. Kalay (Sn) ilavesi, saf magnezyumun akma mukavemetini 20 MPa değerinden 57 MPa değerine çıkarmıştır. Ağırlıkça %1 inko alaşım elementi ilavesi ile bu değer 72 MPa'a kadar yükselmiştir.
4. Sn alaşım elementi ilavesi ile saf magnezyumun çekme mukavemeti 80 MPa iken kalay miktarı artıkça çekme mukavemeti değerleri Alaşım 3'te maksimum 122 MPa'a kadar artmıştır. Ağırlıkta % 5 Sn ilavesinde bu değer azalmıştır. Aynı şekilde alaşımlara ağırlıkça %1 inko (Zn) alaşım elementi ilavesi ile çekme mukameveti değerleri belli bir orana kadar artmış daha sonra azalmıştır. Maksimum ekme mukavemeti, Alaşım 6'da 164 MPa olarak elde edilmiştir. Ağırlıkça maksimum % 5 Sn içeren Alaşım 7'de bu değer azalmıştır. Bunun sebebi kalay ilavesinin artmasıyla sert ve kırılgan bir faz olan mevcut  $Mg_2Sn$  intermetaliğinin artarak kabalaşması sonucunda çatlak oluşumu gibi durumları kolaylaştırmasıdır.
5. Ağırlıkça % kalay (Sn) ilavesinin artmasıyla yüzde (%) uzama değerleri de belli bir orana kadar artmış daha sonra çekme mukavemeti değerlerinde açıklanan sebepten dolayı azalmıştır. Saf magnezyuma Sn ilavesi %3 olduğunda, saf magnezyumun yüzde uzama değerleri %6'dan maksimum %8'e kadar artmıştır. Ağırlıkça %1 inko alaşım elementi ilave edildiğinde bu değer Alaşım 6'da %10,2 civarlarına kadar yükselmiştir.
6. Sn ve Zn alaşım elementleri ilavesi, saf magnezyumun basma mukavemetlerini lineer olarak arttırmıştır. Ağırlıkça % kalay ilavesi arttıkça, saf magnezyumun 175 MPa olarak ölçülen basma mukavemet değerleri, Alaşım 4'te 256 MPa değerine çıkmıştır. Ağırlıkça % 1 inko elementi ilavesiyle bu değerler daha da artmış ve Alaşım 7'de 264 MPa maksimum basma mukavemeti değerine kadar artarak yaklaşık %50 artmıştır.

7. Saf magnezyuma ağırlıkça % kalay ilavesinin artışıyla elde edilen korozyon akım ( $i_{kor}$ ) değerleri, saf magnezyumda 3.605 mA olarak ölçülürken Alaşım 4'te 1.551 mA'e kadar azalmıştır. Ağırlıkça %1 çinko ilavesiyle korozyon akımı değeri Alaşım 7'de minimum 1.152 mA'e kadar düşmüştür.
8. Kalay alaşım elementi ilavesi, saf magnezyumun korozyon hızını 785.7 mpy'dan 329.5 mpy'a kadar düşürerek korozyona karşı direncini arttırmıştır. Buna ek olarak ağırlıkça % çinko (Zn) alaşım elementi ilavesi korozyon hızlarını daha da düşürmüştür ve minimum değer Alaşım 7'de 239.7 mpy olarak ölçülmüştür. Korozyon hızı azaldıkça korozyona karşı direnç artmıştır. Dolayısıyla saf magnezyuma Sn ve Zn alaşım elementlerinin ilavesi, korozyona karşı direnç etkisi sağlamıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] ÇELİKYÜREK, İ., GÜRLER, R., The Determination of vacuum melting conditions for some intermetallic compounds, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı:14, syf. 107-111, Aralık 2007.
- [2] AGHION, E., BROFIN, B., FRIEDRICH, H. and RUBINOVICH, Z., The Environmental impact of new magnesium alloys on the transportation industry, Magnesium Technology (The Minerals, Metals & Materials Society), Magnesium Research Institute, Dead Sea Magnesium, Beer-Sheva, Israel, syf. 167-171, 2004.
- [3] KAINER, K., Magnesium Alloys and Technology , Institute for Materials Research, Center for Magnesium Technology, GKSS Research Center Geesthacht GmbH, Geesthacht, ISBN 3-527-30256-5, syf. 1, 23, 45, 56, 72, 90, 106, 218, 226, Ocak 2003.
- [4] <http://www.roskill.com/reports/magnesium.>, Ocak 2011.
- [5] BLAWERT, C., HORT, N. and KAINER, K.U., Automotive Applications of Magnesium and its alloys, Center for Magnesium Technology, Institute for Materials Research, GKSS-Research Centre Geesthacht GmbH, Vol. 57, No:4, syf. 397-408, Ağustos 2004.
- [6] KACAR, İ., ÖZTÜRK, F., Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde son gelişmeler, Tasarım İmalat Analiz Kongresi, syf. 354-361, Nisan 2006.
- [7] MASOUMI, M., M.Sc. Thesis, Effect of Applied Pressures and Calcium Contents on microstructure and tensile properties of squeeze cast Mg-Al-Ca Alloys, University of Windsor, Ontario, syf. 5, 11, 17, 21, 25, 34, 58, 71, 2003.
- [8] GAINES, L., CUENCA, R., STODOLSKY, F., WU, S., Potential Automotive Technology Development, Automotive Technology Development Conference, Conference Paper, Kasım 1996.
- [9] ZHANG Z., Ph.D. Thesis, Development of Magnesium-Based Alloys for elevated temperature applications, University of Naval, Quebec, syf. 2, 14, 21, 25, 44, 59, 63, 70, 83,160, 180, 185, Ocak 2000.
- [10] DEBORAH, A., KRAMER, A., Magnesium, its alloys and

- compounds, U.S. Geological Survey Open-File Report 01-341, 2002.
- [11] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Magnezyum>, Ocak 2011.
- [12] <http://www.keytometals.com/Article138.htm>, Ocak 2011.
- [13] HORT, N., KAINER, K.U., *Advanced Engineering Materials*, No 4, syf. 235-240, 2006.
- [14] MORDIKE, B.L., EBERT, T., *Magnesium properties-applications-potential*, *Materials Science and Engineering A302*, syf. 37-45, 2001.
- [15] BARBER, L.P., *Master Thesis, Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys*, Worcester Polytechnic Institute, syf. 14-2254, 103, Aralık 2004.
- [16] LYON, P., *New magnesium alloys for aerospace and speciality applications*, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 311-315, 2004.
- [17] CASHION, S.P., RICKETTS, N.J., HAYES, P.C., *Characterisation of protective surface films formed on molten magnesium protected by air/ SF<sub>6</sub> atmospheres*, *Journal of light metals 2*, syf. 37-42, 2002.
- [18] BARTOS, S., MARKS, J., KANTAMANENI, R., LAUSCH, C., *Measured SF<sub>6</sub> emissions from magnesium die casting operations*, *Magnesium Technology*, syf. 23-29, 2003.
- [19] AVEDESIAN, M.M., BAKER, H., Eds., *Magnesium & Magnesium Alloys*, ASM International, ISBN 0-87170-657-1, syf. 173, 1999.
- [20] ZHANG, Z., TREMBLAY, R., DUDE, D., *Microstructure and mechanical properties of ZA104 (0.3-0.6 Ca) die-casting magnesium alloys*, Elsevier, *Materials Science and Engineering A 385*, syf. 286-291, Haziran 2004.
- [21] BARTOS, S., MARKS, J., LAUSH, C., *Measured SF<sub>6</sub> emissions from magnesium die casting operations*, *Magnesium Technology*, syf. 23-27, 2003.
- [22] COULTES, B.J., WOOD, J.T., WANG, G., BERKMORTEL, R., *Mechanical properties and microstructure of magnesium high pressure die castings*, *Magnesium Technology*, syf. 45-51, 2003.
- [23] CAO, P., QIAN, M., STJOHN, D.H., *Grain coarsening of magnesium alloys by beryllium*, *Scripta Materialia 51*, syf. 647-651, Haziran 2004.
- [24] AARSTAD, K., TRANELL, G., PETTERSEN, G., ENGH, T.A., *Various techniques to study the surface of magnesium protected by SF<sub>6</sub>*, *Magnesium Technology*, syf. 5-11, 2003.

- [25] ARGO, D., LEFEBVRE, M., Melt protection for the AJ52 magnesium strontium alloy, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 15-21, 2003.
- [26] JOHN, R.B., *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, Eleventh edition, ISBN: 0750642866, syf. 218-223, Kasım 1999.
- [27] ZHOU, M., M.Sc. Thesis, An Experimental study of die and squeeze cast magnesium alloy AM50, University of Windsor, Ontario, ISBN: 0-494-00156-9, syf. 4-33, 2004.
- [28] RIDDLE, Y.W., MAKHLOUF, M.M., Characterizing solidification by non-equilibrium thermal analysis, *Magnesium Technology*, syf. 101-106, 2003.
- [29] *ASM Handbook*, Vol.3, syf. 305., 1992.
- [30] MORDIKE, L.B., HORST, F.E., WESTENGEN, H., AUNE, T.K., *Magnesium Casting Alloys*, *Magnesium Technology - Metallurgy Data, Applications*, syf 167-204, 2006.
- [31] ZHANG, Z., COUTURE, A., An investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 39, No:1, syf. 45-53, Mart 1998.
- [32] LI, S.S., TANG, B., ZENG, D., Effects and mechanism of Ca on refinement of AZ91D alloy, Elsevier, *Journal of Alloys and Compounds* 437, syf. 317-321, Eylül 2006.
- [33] KANG, D.H., PARK, S.S., OH, Y.S., KIM, N.J., Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys, Elsevier, *Materials Science and Engineering A* 449-451, syf. 318-321, Şubat 2006.
- [34] BALASUBRAMAI, N., SRINIVASAN, A., PILLAI, U.T.S., PAI, B.C., Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy, Elsevier, *Materials Science and Engineering A* 457, syf. 275-281, Aralık 2006.
- [35] LIU, H., CHENA, Y., TANG, Y., WEI, S., NIU, G., The microstructure, tensile properties, and creep behavior of as-cast Mg-(1-10)%Sn alloys, Elsevier, *Journal of Alloys and Compounds* 440, syf 122-126, Aralık 2006.
- [36] KİM, B.H., JEON, J.J., PARK, K.C., PARK, B.G., PARK, Y.H., PARK, I.M., Microstructural characterization and mechanical properties of Mg-xSn-Al-Zn alloys, *Archives of Materials Science and Engineering* Vol. 30, Issue 2, syf. 93-96, Nisan 2008.
- [37] COHEN, S., DEHM, G., Phase formation, precipitation and strengthening mechanisms in Mg-Zn-Sn and Mg-Zn-Sn-Ca Alloys, *Magnesium Technology*, syf. 301-305, 2004.

- [38] ASM Handbook, Vol.3, syf. 1107, 1992.
- [39] PRASAD, Y.V.R.K., RAO, K.P., HORT, N., KAINER, K.U., Optimum parameters and rate-controlling mechanisms for hot working of extruded Mg–3Sn–1Ca alloy, *Materials Science and Engineering A* 502, syf. 25–31, 2009.
- [40] LEIL, T. A., HORT, N., DIETZEL, W., BLAWERT, C., HUANG, Y., KAINER, K. U., RAO, K. P., Microstructure and corrosion behavior of Mg-Sn-Ca alloys after extrusion, Elsevier, ScienceDirect, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19, syf. 40-44, 2009.
- [41] JIHUA, C., ZHENHUA, C., HONGGE, Y., FUQUAN, Z., Microstructural characterization and mechanical properties of a Mg–6Zn–3Sn–2Al alloy, Elsevier, *Journal of Alloys and Compounds* 467, syf. L1-L7, 2009.
- [42] MIN, Z., WEN-ZHENG, Z., GUO-ZHEN, Z., KUN, Y., Crystallography of Mg<sub>2</sub>Sn precipitates in Mg-Sn-Mn-Si alloy, ScienceDirect, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 17, syf 1428-1432, 2007.
- [43] PEKGÜLERYÜZ, M.O., KAYA, A.A., Creep resistant Magnesium Alloys for powertrain applications, *Advanced Engineering Materials* 5, No:12, syf. 866-878, 2003.
- [44] STJOHN, D.H., DAHLE, A.K., Solidification of cast Magnesium Alloys, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 95-100, 2003.
- [45] QIAN, M., StJOHN, D. H., FROST, M. T., Zirconium alloying and grain refinement of magnesium alloys, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 209-214, 2003.
- [46] ŞEVİK, H., AÇIKGÖZ, Ş., KURNAZ, S. C., The effect of tin addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast AM60 alloy, Elsevier, ScienceDirect, *Journal of Alloys and Compounds* 508, syf. 110–114, 2010.
- [47] STJOHN, D.H., DAHLE, A.K., ABBOTT, T., NAVE M.D., QIAN M., Solidification of cast magnesium alloys, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 95-100, 2003.
- [48] GRAY, J.E., LUAN, B., Protective coating on magnesium and its alloys-a critical review, Elsevier, *Journal of Alloys and Compounds* 336, syf. 88–113, 2002.
- [49] HUANG, W., HOU, B., PANG, Y., ZHOU, Z., Fretting wear behavior of AZ91D and AM60B magnesium alloys, Elsevier, ScienceDirect, *WEAR* 260, syf. 1173-1178, 2006.

- [50] MEHTA, D.S., MASOOD, S.H., SONG, W.Q., Investigation of wear properties of magnesium and aluminum alloys for automotive applications, Elsevier, Journal of Materials Proc. Tech. 155-156, syf. 1526-1531, 2004.
- [51] MORDIKE, B.L., Creep-resistant magnesium alloys, Elsevier, Materials Science and Engineering A324, syf. 103–112, 2002.
- [52] ATRENS, A., SONG, G., Corrosion mechanisms of magnesium alloys, Advanced Engineering Materials 1, No: 1, syf. 11-33, 1999.
- [53] KRUGER, J., Magnesium Alloys: Corrosion, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, syf. 4744-4745, 2008.
- [54] SONG, G., ATRENS, A., STJOHN, D., NAIRN, J., Li, Y., The electrochemical corrosion of pure magnesium in 1N NaCl, Elsevier, Corr. Sci.; 39, syf. 855-875, 1997.
- [55] SONG, G., ATERN, A., WU, X., ZHANG, B., Corrosion behavior of AZ21, AZ501, and AZ91 in sodium chloride, Elsevier, Corros Sci., Vol. 40, No:10, syf. 1769-91, 1998.
- [56] BLAWERT, C., DIETZEL, W., GHALI, E., SONG, G., Advanced Engineering Materials, Vol. 8, No: 6, syf. 511-533, 2006.
- [57] GHOMASHCHI, M.R., VIKHROV, A., Squeeze casting: an overview, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology 101, syf. 1-9, 2000.
- [58] FRIEDRICH, H.E., MORDIKE, B.L., Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications, Library of Congress Control Number 2005931991, Springer, syf. 162-199, 2006.
- [59] KAZDAL, H., Magnezyum Alaşımları, Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği, Tubitak, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, syf. 3-39, 1999.
- [60] AARSTAD, K., TRANELL, G., PETTERSEN, G., ENGH, T.A., Various techniques to study the surface of magnesium protected by SF<sub>6</sub>, Magnesium Technology, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 5-9, 2003.
- [61] RIDDLE, Y.W., MAKHLOUF, M.M., Characterizing solidification by non-equilibrium thermal analysis, Magnesium Technology 2003, The Minerals, Metals & Materials Society, syf. 101-106, 2003.
- [62] HILLIS, J.E., The international program to identify alternatives to SF<sub>6</sub> for magnesium melt protection, Noranda Magnesium Inc., The International Magnesium Association, syf. 1-11, Kasım 2002.
- [63] ARAN, A., Döküm Teknolojisi, İmal Usülleri Ders Notları, İstanbul

Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, syf. 73-76, 2007.

- [64] RAMACHANDRAN, T.R., SHARMA, P.K., BALASUBRAMANIAN, K., Grain refinement of light alloys, syf.. 189-193, Şubat 2008.
- [65] SASAKI, T.T., JU, J.D., HONO, K., SHIN, K.S., Heat-treatable Mg–Sn–Zn wrought alloy, Scripta Materialia 61, syf. 80–83, 2009.
- [66] AIZAWA, T., SONG, R., Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of  $Mg_2Si$  and  $Mg_2Sn$ , Elsevier, ScienceDirect, Intermetallics 14, syf. 382-391, 2006.
- [67] KANG, D.H., PARK, S.S, OH, S., KIM, N.J., Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys, Elsevier, Materials Science and Engineering A 449-451, syf. 318-321, 2007.
- [68] BARBER, L.P., Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys, A Thesis of Master, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, syf. 10-46, 2004.
- [69] JIHUA, C., ZHENHUA, C., HONGGE, Y., FUQUAN, Z, KUN, L., Effects of Sn addition on microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Al alloys, Elsevier, Journal of Alloys and Compounds 461, syf. 209–215, 2008.
- [70] LIHONG, W., LIGUO, W., PAN, W., SHAOKANG, G., Superplasticity and Deformation Mechanism of Mg-7.0Al-0.2Zn Alloys, ScienceDirect, Rare Metal Materials and Engineering, Vol.39, Issue 2, syf. 0194-0198, Şubat 2010.
- [71] JAYALAKSHMI, S., KAILAS, S.V., SESHAN, S., Tensile behaviour of squeeze cast AM100 magnesium alloy and its  $Al_2O_3$  fibre reinforced composites, Elsevier, Composites: Part A 33, syf. 1135–1140, 2002.
- [72] SCHWAM, D., WALLACE, J.F., ZHU, Y., VISWANATHAN, S., ISKANDER, S., Enhancements in Magnesium Die Casting Impact Properties, Final Report, Case Western Reserve University DOE-FC0798ID13611, Ohio, syf. 5-22, 2000.

## ÖZGEÇMİŞ

Seda KESKİN, 18.02.1985 de Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya' da tamamladı. 2003 yılında Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi, Fen Bilimleri Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü 2008 yılında bitirdi. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen yüksek lisansı devam etmektedir.