



**ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN  
ELEMENTLERİN HADDELEME SONRASI  
MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİ**

**Halil Ahmet GÖREN**

**2021  
DOKTORA TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mehmet ÜNAL**

**MAGNEZYUM ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN ELEMENTLERİN  
HADDELEME SONRASI MEKANİK VE KOROZYON  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Halil Ahmet GÖREN**

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

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mehmet ÜNAL**

**KARABÜK  
Aralık 2021**

Halil Ahmet GÖREN tarafından hazırlanan “MAGNEZYUM ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN ELEMENTLERİN HADDELEME SONRASI MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ÜNAL .....  
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 09/12/2021

| <u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>    | <u>İmzası</u> |
|---------------------------------------|---------------|
| Başkan : Prof. Dr. Ercan CANDAN (NEÜ) | Online        |
| Üye : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)   | Online        |
| Üye : Doç. Dr. Mehmet ÜNAL (KBÜ)      | .....         |
| Üye : Doç. Dr. Erkan KOÇ (KBÜ)        | .....         |
| Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)       | .....         |

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Halil Ahmet GÖREN

## ÖZET

Doktora Tezi

### MAGNEZYUM ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN ELEMENTLERİN HADDELEME SONRASI MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Halil Ahmet GÖREN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet ÜNAL

Aralık 2021, 120 sayfa

Bu çalışmada, (Mg-2Zn) ZM20 ve (Mg-2Zn-1Mn) ZM21 alaşımları üretildi ve sonrasında ZM21 alaşımına La, Ca, Nd, Sn elementleri %0,5 oranında ilave edilerek, 4 tekli 5 ikili ve 1 üçlü alaşım elde edilmiştir. Bu alaşımlar 400 °C'de 16 saat homojenleştirildikten sonra 4,7 haddeleme hızı,  $\phi = 0,2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi ile %80 haddeleme oranı uygulanmıştır. Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri detaylı bir şekilde OM, SEM, XRD, XRF, sertlik ve tek eksenli çekme testi kullanılarak araştırıldı. Ayrıca, bu alaşımların korozyon özellikleri potansiyodinamik korozyon testi, daldırma korozyon testi ve korozif aşınma özellikleri ile test edilmiştir. XRF sonuçları incelendiğinde element içeriği istenilen değerler arasında olduğu tespit edildi. XRD sonuçları incelendiğinde alaşımlarda görülen MgZn, Mg<sub>2</sub>Zn, fazların yanısıra mangan ilavesinin etkisiyle ZM21 alaşımında MnZn<sub>3</sub> fazının oluştuğu saptanmıştır.

ZM21 alaşımına element ilavesiyle  $Ca_5Zn_3$ ,  $Ca_2Mg_6Zn_3$ ,  $LaZn_2$ ,  $LaMg_3$ ,  $Mg_{41}Nd_5$ ,  $Mg_{12}Nd$ ,  $Mg_2Sn$ ,  $La_5Sn_3$  fazları tespit edilmiştir. OM sonuçları incelendiğinde döküm olarak element ilavesi ile taneler arasında fazların oluştuğu ve tane boyutunun element ilavesine bağlı olarak değiştiği görölmüştür. Haddelenmiş alaşımlar incelendiğinde tane boyutunun belirgin şekilde incelendiği ve hadde yönünde uzadığı görölmüştür. SEM EDX sonuçları incelendiğinde tane sınırı ve matriste oluşan fazların haddelenmiş alaşımlarda ezilerek uzadığı fakat Ca içeren alaşımlarda bu fazların kırıldığı görölmüştür. Çekme testi sonuçları incelendiğinde haddelenmiş alaşımların dökümlerden daha üstün olduğu göröldü. En üstün haddelenmiş çekme test sonuçları %0,5(Nd), %0,5(Sn)+%0,5(Nd) içeren alaşımlarda tespit edilmiştir. Sertlik sonuçlarında döküm alaşımlarında %0,5(Ca) içeren alaşımlar daha sert iken haddelenmiş alaşımlarda %0,5(Ca), %0,5(Nd), %0,5(La+Ca) içeren alaşımlar daha sert davranış sergilemiştir. Potansiyodinamik ve daldırma korozyon testinde döküm alaşımlar daha iyi performans göstermiştir. Döküm olarak en iyi sonucu Ca içeren alaşımlardır, fakat haddelenmiş olarak ise en kötü sonucu Ca ilaveli alaşımlar sergilemiştir. Korozif aşınma sonuçları incelendiğinde haddelenmiş alaşımlar daha az kayıp yaşamıştır.

**Anahtar Sözcükler** : ZM21, La, Nd, Ca, Sn, korozyon, mekanik özellikler, sıcak haddeleme.

**Bilim Kodu** : 91514

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **THE EFFECT OF THE ELEMENTS ADDED TO MAGNESIUM ALLOY ON THE MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES AFTER ROLLING**

**Halil Ahmet GÖREN**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgy and Material Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÜNAL**

**December 2021, 120 pages**

In this study, (Mg-2Zn) ZM20 and (Mg-2Zn-1Mn) ZM21 alloys were produced and then, by adding 0,5% La, Ca, Nd, Sn elements to ZM21 alloy, 4 single, 5 double and 1 triple alloys were obtained. After these alloys were homogenized at 400 °C for 16 hours, a rolling rate of 4,7 a rolling rate of 80% with a constant degree of deformation of  $\varphi= 0,2$  was applied. Microstructural, mechanical and corrosion properties of cast and rolled alloys were investigated in detail using OM, SEM, XRD, XRF, hardness and uniaxial tensile tests. In addition, the corrosion properties of these alloys were tested by potentiodynamic corrosion test, dip corrosion test and corrosive wear properties. When the XRF results were examined, it was determined that the element content was between the desired values. When the XRD results were examined, it was determined that  $MnZn_3$  phase was formed in the ZM21 alloy with the effect of manganese addition as well as the MgZn  $Mg_2Zn$  phases seen in the alloys.

With the addition of elements to the ZM21 alloy,  $\text{Ca}_5\text{Zn}_3$ ,  $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ ,  $\text{LaZn}_2$ ,  $\text{LaMg}_3$ ,  $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ ,  $\text{Mg}_{12}\text{Nd}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ ,  $\text{La}_5\text{Sn}_3$  phases were determined. When the OM results were examined, it was seen that the phases were formed between the grains with the addition of elements as casting and the grain size changed depending on the addition of the element. When the rolled alloys were examined, it was observed that the grain size was significantly thinner and elongated in the rolling direction. When the SEM EDX results were examined, it was observed that the phases formed in the grain boundary and matrix were elongated by crushing in rolled alloys, but these phases were broken in alloys containing Ca. When the tensile test results were examined, it was seen that the rolled alloys were superior to the castings. The best rolled tensile test results were found in alloys containing 0,5%(Nd), 0,5%(Sn)+0,5%(Nd). In the hardness results, alloys containing 0,5%(Ca) in cast alloys were harder, while alloys containing 0,5%(Ca), 0,5%(Nd), 0,5%(La+Ca) showed harder behavior in rolled alloys. Cast alloys performed better in the potentiodynamic and immersion corrosion test. As casting, the best result is Ca-containing alloys, but as rolled, Ca-added alloys exhibited the worst result. When the corrosive wear results are examined, the rolled alloys experienced less loss.

**Keywords** : ZM21, La, Nd, Ca, Sn, corrosion, mechanical properties, hot rolling.

**Science Code** : 91514



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet ÜNAL'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Prof. Dr. Hayrettin AHLATI'ya, Prof. Dr. Yavuz SUN'a, Doç. Dr. Yunus TÜREN'e, Doç. Dr. Erkan KOÇ'a, Doç. Dr. Yakup KAYA'ya teŐekkürlerimi sunarım.

Bu alıŐma Karabük Üniversitesi Bilimsel AraŐtırmalar Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FDK-2019-2103 proje numarası ile desteklendiği için KBÜ-BAP birimine teŐekkürlerimi sunarım.

Deneylerimin yapılması esnasında bana yardım eden, Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğrencilerine, beni çalıŐmalarım süresince yalnız bırakmayan afacan oğlum Ayaz GÖREN'e çok çok teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren annem AyŐe GÖREN ve babam Bilger GÖREN'e ayrıca sevgili eŐim GülŐen UZUN GÖREN'e yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL.....   | ii           |
| ÖZET.....  | iv           |
| ABSTRACT.....  | vi           |
| TEŞEKKÜR.....  | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                    | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                 | xiii         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                              | xvii         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                 | xviii        |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 1 .....  | 1            |
| GİRİŞ .....  | 1            |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 2 .....  | 3            |
| MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....                            | 3            |
| 2.1. GENEL ÖZELLİKLER .....                          | 3            |
| 2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLAR .....       | 5            |
| 2.3. PLASTİK ŞEKİL VERMEYE UYGUN MG ALAŞIMLARI ..... | 6            |
| 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ .....              | 6            |
| 2.4.1. Alüminyum.....                                | 7            |
| 2.4.2. Berilyum .....                                | 7            |
| 2.4.3. Kalsiyum.....                                 | 7            |
| 2.4.4. Bakır .....                                   | 7            |
| 2.4.5. Lityum.....                                   | 7            |
| 2.4.6. Mangan .....                                  | 8            |
| 2.4.7. Silisyum .....                                | 8            |
| 2.4.8. Gümüş.....                                    | 8            |
| 2.4.9. Çinko .....                                   | 8            |
| 2.4.10. Zirkonyum .....                              | 8            |

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 2.5. İKİLİ DİYAGRAMLAR.....                                   | 9                   |
| 2.5.1. Alüminyum.....   | 9                   |
| 2.5.2. Mangan.....  | 9                   |
| 2.5.3. Çinko.....   | 10                  |
| 2.5.4. Lantanyum.....   | 11                  |
| 2.5.5. Neodimyum.....   | 11                  |
| 2.5.6. Gadolinyum.....  | 12                  |
| 2.5.7. Kalsiyum.....  | 12                  |
| 2.5.8. Kalay.....   | 13                  |
| 2.6. Mg ALAŞIMLARINDA UYGULANAN DÖKÜM YÖNTEMLERİ.....         | 14                  |
| 2.6.1. Kokil Kalıba Döküm.....                                | 16                  |
| 2.6.2. Kum Kalıba Döküm.....                                  | 16                  |
| 2.6.3. Basınçlı Döküm.....                                    | 17                  |
| 2.6.4. Yarı Katı Döküm Yöntemi.....                           | 17                  |
| 2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....           | 17                  |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 3.....  | 20                  |
| MAGNEZYUMDA OLUŞAN DEFORMASYON SİSTEMLERİ.....                | 20                  |
| 3.1. DÜZLEMLER.....   | 20                  |
| 3.2. KAYMA MEKANİZMASI.....                                   | 21                  |
| 3.3. İKİZLENME MEKANİZMASI.....                               | 22                  |
| 3.4. DİĞER DEFORMASYON MEKANİZMALARI.....                     | 23                  |
| 3.5. DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME.....                        | 24                  |
| 3.6. MAKROTEKSTÜR.....  | 25                  |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 4.....  | 27                  |
| HADDELEME.....  | 27                  |
| 4.1. GELENEKSEL HADDE YÖNTEMİ ile Mg SAÇ ÜRETİMİ.....         | 27                  |
| 4.2. HADDE PARAMETRELERİ.....                                 | 27                  |
| 4.3. HADDELEME KABİLİYETİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ..... | 28                  |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 5.....  | 30                  |

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Mg ALAŞIMLARININDA KOROZYON, AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ.....                  | 30                  |
| 5.1. KOROZYON.....   | 30                  |
| 5.1.1. Korozyon Türleri .....  | 31                  |
| 5.1.2. Alaşım Elementlerinin Mg'un Korozyon Davranışına Etkileri ..... | 32                  |
| 5.2. AŞINMA .....  | 33                  |
| 5.2.1. Adhesiv Aşınma.....   | 33                  |
| 5.2.2. Abrasiv Aşınma .....  | 34                  |
| 5.2.3. Oksidasyon .....  | 34                  |
| 5.2.4. Termal Yumuşama ve Ergitme .....                                | 35                  |
| 5.2.5. Yapraklanma Aşınması.....                                       | 35                  |
| <br>   |                     |
| BÖLÜM 6 .....  | 36                  |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....  | 36                  |
| 6.1. ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ.....  | 36                  |
| 6.1.1. Ergitme ve Alaşımlama Pratiği.....                              | 37                  |
| 6.1.2. Homojenizasyon İşlemi .....                                     | 40                  |
| 6.1.3. Haddeleme İşlemi .....  | 40                  |
| 6.2. ALAŞIM KARAKTERİZASYONU .....                                     | 42                  |
| 6.2.1. XRF Analizi.....  | 42                  |
| 6.2.2. Mikroyapı ve Faz Analizi .....                                  | 43                  |
| 6.2.3. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu.....                      | 43                  |
| 6.2.4. Korozyon Karakterizasyonu .....                                 | 45                  |
| <br>   |                     |
| BÖLÜM 7 .....  | 47                  |
| DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME .....                                    | 47                  |
| 7.1. ALAŞIMLARIN KİMYASAL ANALİZİ .....                                | 47                  |
| 7.2. XRD ANALİZLERİ.....   | 48                  |
| 7.3. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI .....                                       | 50                  |
| 7.3.1. Optik Mikroskop Görüntüleri .....                               | 50                  |
| 7.3.2. SEM Görüntüleri ve EDX Analizleri .....                         | 62                  |
| 7.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI.....                                       | 71                  |
| 7.4.1. Sertlik Testi.....  | 71                  |

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| 7.4.2. Çekme Testi .....   | 73                  |
| 7.4.3. Kırık Yüzey SEM Görüntüleri .....                               | 76                  |
| 7.5. KOROZYON TEST SONUÇLARI .....                                     | 80                  |
| 7.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Testleri .....                    | 80                  |
| 7.5.2. Daldırma Korozyon Testleri .....                                | 86                  |
| 7.5.3. Daldırma Korozyon Testi Sonrası Yüzeylerin SEM Görüntüleri..... | 91                  |
| 7.6. AŞINMA .....  | 94                  |
| 7.6.1. Korozif Aşınma Testi .....                                      | 94                  |
| 7.6.2. Korozif Aşınma Testi Sonrası Yüzeylerin SEM Görüntüleri.....    | 101                 |
| <br>   |                     |
| BÖLÜM 8 .....  | 105                 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....   | 105                 |
| <br>   |                     |
| KAYNAKLAR .....  | 110                 |
| <br>   |                     |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 120                 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.1.  | 2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretim oranları.....   | 5  |
| Şekil 2.2.  | Mg'deki elementlerin maksimum katı çözünürlüğü.....  | 6  |
| Şekil 2.3.  | Mg-Al faz diyagramı .....  | 9  |
| Şekil 2.4.  | Mg-Mn faz diyagramı .....  | 10 |
| Şekil 2.5.  | Mg-Zn faz diyagramı .....  | 10 |
| Şekil 2.6.  | Mg-La faz diyagramı .....  | 11 |
| Şekil 2.7.  | Mg-Nd faz diyagramı .....  | 11 |
| Şekil 2.8.  | Mg-Gd faz diyagramı.....   | 12 |
| Şekil 2.9.  | Mg-Ca denge diyagramı .....  | 13 |
| Şekil 2.10. | Mg-Sn denge diyagramı.....   | 13 |
| Şekil 2.11. | Mg alaşımı dökümlerinde gaz kullanımı a) Atmosfer ortamı b) SF <sub>6</sub> ..   | 14 |
| Şekil 2.12. | Mg alaşımı dökümlerinde ocak içinde ve kalıp içinde gaz kullanımı<br>a) Ocak ve Kalıp atmosferi: CO <sub>2</sub> + %0,8 SF <sub>6</sub> b) Ocak: Argon, Kalıp:<br>Atmosferik Ortam c) Ocak: Argon, Kalıp: Argon d) Ocak: Argon,<br>Kalıp atmosferi: CO <sub>2</sub> + %0,8 SF <sub>6</sub> ..... | 15 |
| Şekil 2.13. | Yarı-katı sıcaklık hali (1) katı, (2) sıvı .....   | 17 |
| Şekil 2.14. | Mg alaşımı döküm parçalar a) Hava yastığı kutusu b) Direksiyon<br>kilit kutusu c) Yolcu hava yastığı kilidi d) Direksiyon simidi.....  | 18 |
| Şekil 2.15. | Li katkılı mg alaşımı kamera kutusu görülmektedir .....  | 18 |
| Şekil 2.16. | Magnezyum döküm ile üretilmiş parçalar. ....   | 19 |
| Şekil 3.1.  | a) Mg birim hücre, b) bazal düzlem, c) prizmatik düzlem, d)<br>piramidal düzlem ve e) ikinci düzen piramidal düzlem.....   | 20 |
| Şekil 3.2.  | Saf Mg'da ikizlenme ve kayma sistemlerinin CRSS değerlerine<br>formasyon sıcaklığının etkisi. ....   | 22 |
| Şekil 3.3.  | Dinamik yeniden kristallendirme ve gerilme-uzama eğrisi .....  | 24 |
| Şekil 3.4.  | a ve b pole figür ölçümü ve RD, TD ve ND'nin tanımlanması .....  | 26 |
| Şekil 4.1.  | Sıcak haddelenmiş ZEW200 alaşımı için Pole figure testi (0 0 0 1)<br>ve (1 0-1 0) açısından kristalografik dokuları.....   | 29 |
| Şekil 5.1.  | Adhesiv aşınma SEM görüntüleri.....  | 34 |
| Şekil 5.2.  | Abrasiv aşınma SEM görüntüsü .....   | 34 |
| Şekil 5.3.  | Oksidasyon aşınma SEM görüntüsü .....  | 35 |
| Şekil 5.4.  | Yapraklanma aşınması SEM görüntüsü.....  | 35 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 6.1.  | Üretilen alaşımların şematik olarak gösterilişi. ....                                    | 37 |
| Şekil 6.2.  | İndüksiyon ergitme ocağı.....  | 38 |
| Şekil 6.3.  | (a) Döküm kalıbı resmi , (b) Isıtma plakaları resmi , (c) Kalıp Montajı.....             | 38 |
| Şekil 6.4.  | Döküm parçaların kalıptan çıktıktan sonraki numune bölgelerini gösteren katı modeli..... | 39 |
| Şekil 6.5.  | Döküm ZM21 alaşımının kalıptan çıktıktan sonraki görüntüsü. ....                         | 39 |
| Şekil 6.6.  | (a) Hadde numunesi, (b) Haddelenmiş numune .....   | 41 |
| Şekil 6.7.  | 250°C, 300°C, 350°C’de Hadde işlemi görmüş ZM21 alaşımı.....                             | 41 |
| Şekil 6.8.  | Vida başlı çekme numunesi. (a) şematik resmi, (b) işlenmiş hali. ....                    | 44 |
| Şekil 6.9.  | Hadde çekme testi numunesi ve ölçüleri. ....   | 44 |
| Şekil 7.1.  | Alaşımların faz analizleri.....  | 49 |
| Şekil 7.2.  | Alaşımların faz analizleri.....  | 49 |
| Şekil 7.3.  | Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                                       | 51 |
| Şekil 7.4.  | Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                                       | 52 |
| Şekil 7.5.  | Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                                       | 53 |
| Şekil 7.6.  | Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                   | 55 |
| Şekil 7.7.  | Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                   | 56 |
| Şekil 7.8.  | Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.....                   | 57 |
| Şekil 7.9.  | Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri. ....                                | 59 |
| Şekil 7.10. | Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.. ....                               | 60 |
| Şekil 7.11. | Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri. ....                                | 61 |
| Şekil 7.12. | Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                               | 63 |
| Şekil 7.13. | Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                               | 64 |
| Şekil 7.14. | Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                               | 65 |
| Şekil 7.15. | Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                               | 66 |
| Şekil 7.16. | Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                           | 68 |
| Şekil 7.17. | Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                           | 69 |
| Şekil 7.18. | Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                           | 70 |
| Şekil 7.19. | Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.....                           | 71 |
| Şekil 7.20. | Alaşımlarının sertlik değerleri. ....  | 72 |
| Şekil 7.21. | Döküm alaşımlarının çekme testi sonuçları.....   | 74 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 7.22. | Haddelenmiş alaşımlarının çekme testi sonuçları.....  | 75 |
| Şekil 7.23. | Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri..                                    | 77 |
| Şekil 7.24. | Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri. ..                                  | 78 |
| Şekil 7.25. | Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri. ..                                  | 79 |
| Şekil 7.26. | Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri .....               | 81 |
| Şekil 7.27. | Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri .....                      | 82 |
| Şekil 7.28. | Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri .....               | 83 |
| Şekil 7.29. | Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri .....                      | 84 |
| Şekil 7.30. | Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri .....               | 85 |
| Şekil 7.31. | Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri. ....                      | 86 |
| Şekil 7.32. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 87 |
| Şekil 7.33. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 88 |
| Şekil 7.34. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 88 |
| Şekil 7.35. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 89 |
| Şekil 7.36. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 90 |
| Şekil 7.37. | Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.....                         | 91 |
| Şekil 7.38. | Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri..... | 92 |
| Şekil 7.39. | Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri..... | 93 |
| Şekil 7.40. | Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri..... | 94 |
| Şekil 7.41. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. ....  | 95 |
| Şekil 7.42. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. ....  | 96 |



## **Sayfa**

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Şekil 7.43. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 96  |
| Şekil 7.44. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 97  |
| Şekil 7.45. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 97  |
| Şekil 7.46. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 98  |
| Şekil 7.47. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 98  |
| Şekil 7.48. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 99  |
| Şekil 7.49. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 99  |
| Şekil 7.50. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 100 |
| Şekil 7.51. | Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı. .... | 100 |
| Şekil 7.52. | Döküm ve hadde alaşımlarının korozyon aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri. .... | 102 |
| Şekil 7.53. | Döküm ve hadde alaşımlarının korozyon aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri. .... | 103 |
| Şekil 7.54. | Döküm ve hadde alaşımlarının korozyon aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri. .... | 104 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Çizelge 2.1. Magnezyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....  | 4                   |
| Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları .....                      | 5                   |
| Çizelge 2.3. Şekil vermeye uygun Mg alaşımları .....                       | 6                   |
| Çizelge 6.1. Haddeleme parametreleri .....                                 | 42                  |
| Çizelge 6.2. Haddeleme pasolarındaki kalınlık ölçülerinin açıklaması ..... | 42                  |
| Çizelge 7.1. Alaşımların kimyasal analiz sonuçları .....                   | 47                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|    |             |
|----|-------------|
| La | : Lantan    |
| Ca | : Kalsiyum  |
| Al | : Alüminyum |
| Nd | : Neodimyum |
| Al | : alüminyum |
| Mn | : Mangan    |
| Zn | : Çinko     |
| Sn | : Kalay     |
| Mg | : Magnezyum |

### KISALTMALAR

|      |  |
|------|--|
| AISI | :Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü, (American Iron and Steel Institute)           |
| ASTM | :Amerika Test ve Malzeme Topluluğu, (American Society for Testing and Materials) |
| DRX  | : Dinamik Yeniden kristalleşme (Dynamic Recrystallization)                       |
| ECAP | : Eşit Kenar Açısız Presleme (Equal Edge Angular Pressing)                       |
| EDX  | : Enerji Dağıtım X-Ray (Energy Distribution X-Ray)                               |
| MPa  | : Megapaskal (Megapascal)  |
| SEM  | : Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)                    |
| CRSS | : Kritik kararlı kayma gerilmesi (Critical resolved shear stress)                |
| HSP  | : Hegzagonal Sıkı Paket Yapı   |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Özellikle uçakların yapı malzemesi olarak kullanılan I. Dünya savaşında ve II. Dünya savaşında cazibesini sürdüren Mg alaşımları cevher miktarı ve üretim maliyeti gibi sıkıntılar sebebiyle ileriki yıllarda yerini alüminyum alaşımlarına bırakmıştır. Bununla beraber son zamanlarda artan CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma isteği ve enerjiyi verimli kullanma düşüncesi, hafifliği ve özel mukavemeti nedeniyle Mg alaşımlarının kullanılmasını tekrardan gündeme getirmiştir. İlk yıllarda çoğunlukla otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanıldığımız Mg alaşımları hayatımızın her anında kullandığımız bir vazgeçilmez malzeme haline dönüşmüştür. Uçak yapı malzemelerinin otomobillere, cep telefonundan dizüstü bilgisayara kadar geniş alanda kendine kullanım alanı bulmuştur. Mg alaşımlarının kullanımının yaygın olduğu saç malzeme olarak kullanımı yaygındır. Fakat Hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıdaki magnezyum kristali nedeniyle magnezyumun soğuk şekillendirmede zayıf özelliğe sahip Mg alaşımlarının geliştirilmesi ve üretim maliyetlerinin azaltılması konusu önemlidir. Bu nedenle Mg alaşımının düşük sıcaklıklarda şekillenebilirliğini, mekanik özelliklerini alaşımlama ile geliştirmek için çalışma alanı çok geniştir.

Nadir toprak elementleri olarak bilinen Neodimyum gibi elementlerin saf Mg'da tekstür zayıflatıcı etkisi belirlenmiş ve daha kolay şekil alması sağlanmıştır. ZM serisi içinde en yaygın kullanılan ZM21 Mg alaşımının hadde kabiliyetini geliştirmek için çok az sayıda çalışma bulunmaktadır [1,2].

Bu çalışmanın amacı öncelikle 0,5 oranında La, Ca, Nd ve Sn ve bu elementlerin aynı oranda iki ya da üçlü kombinasyonunu içeren ZM21 Mg alaşımlarının döküm yöntemiyle üretilmesidir. Sonrasında 400°C, 16 saat homojenleştirildikten sonra 350°C %80 oranı ile 4,7 haddeleme hızında ve 0,2 hadde oranı ile haddeleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemler vasıtasıyla saç ZM21 Mg alaşımının tekstür özelliğini daha

zayıf hale getirerek kolay şekil alabilen, daha yüksek mukavemetli ve daha iyi korozyon dirençli, daha iyi aşınma davranışı gösteren malzemelerin geliştirilmesidir.

Bu tez içeriğinde çalışmanın özeti verilmiş, literatür incelenmiş ve önceki çalışmalar değerlendirilmiştir. Ardından deneysel çalışmaların yapılması sırasında hangi parametreler kullanıldığı verilmiş ve yapılan deneylerin sonuçları tablo ve grafik şeklinde sunulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir, deneysel çalışma sonuçları ve literatür karşılaştırılması yapılmış ve tartışma şeklinde sunulmuştur. Son bölümde elde edilen çalışma sonucu ve genel sonuçlar verilmiştir.

## BÖLÜM 2

### MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

#### 2.1. GENEL ÖZELLİKLER

İskoçyalı bilim adamı Joseph Black 1755 yılında içinde magnezyum bulunan manyezi madenini ilk defa bulan kişi olmuştur. Magnezyumun (Mg) keşfi 1775 yılında Joseph Black ile başlamıştır. Bununla birlikte magnezyumun izolasyonunu ilk kez 1808 yılında bir voltaik hücre ve bir civa katot kullanarak elektroliz yoluyla ıslak magnezyum sülfatı ayırıştırarak metali izole eden kişi İngiliz bilim adamı Sir Humphrey Davy magnezyumun mucidi olarak bilinmektedir.

Tam 20 yıl sonra Fransız Antoine Alexandre Brutun Bussy, kurutulmuş magnezyum klorürü yüksek sıcaklıklarda potasyumla kaynaştırarak metali izole etti. Daha sonra ünlü İngiliz bilim adamı ve Sir Humphrey Davy'in eski bir asistanı olan Michael Faraday, 1833'te susuz magnezyum klorürü elektroliz yoluyla indirgedi ve saf metalik magnezyum elde etti. Bir Alman olan Robert-Wilhelm Bunsen, 1841'de karbon-çinko elektrik hücresini geliştirdikten sonra, 1852'de yine kaynaşmış ve suyu alınmış magnezyum klorürden başlayarak metalik magnezyum üretti.

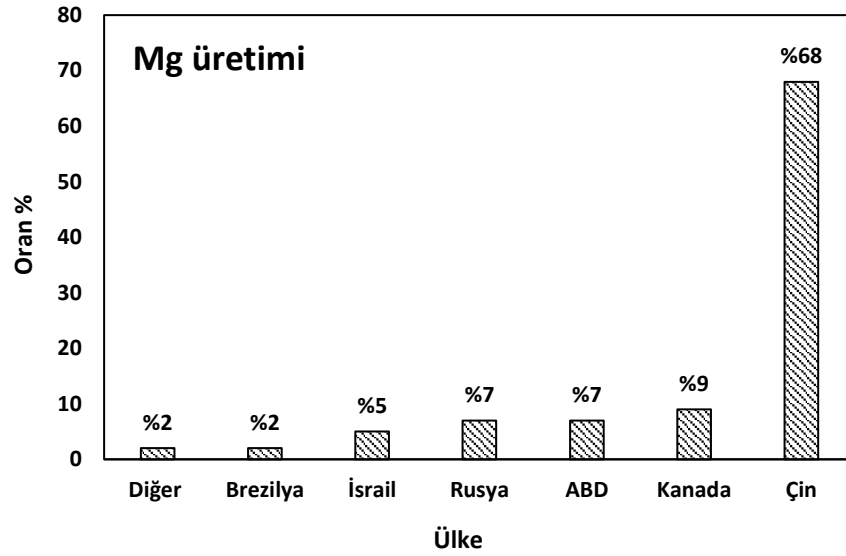
Bazı Avrupa ülkelerindeki daha küçük girişimlerin yanı sıra magnezyum yalnızca, 1868'de dünyadaki tek üretici olan ve metali çoğunlukla el feneri için toz veya şerit olarak ve diğer piroteknik amaçlar için bir indirgeme maddesi olarak kullanan Almanya'da sürekli ilgi gördü. Mg ürünlerin üretimi yapan devlet Almanya olmuştur. Diğer gelişmiş ülkeler magnezyum üretimini I. Dünya savaşı esnasında başlatmışlardır. 1945'li yıllara kadar üretimi artan magnezyum alaşımı kullanımı II. Dünya savaşı sonrası azalmıştır

Mg alaşımları ekstrüzyon ürünü el arabaları, iskele, gibi günlük yaşamda kullanılan ekipmanlarda kullanılmıştır. 1950’li yıllarda hava araçlarında kullanılmak için haddelenmiş Mg alaşımları ürünleri üretilmiştir. Bugün Mg alaşımları otomobil, ev gereçleri ve sportif uygulamalarda yağındır. (1,74 g/cm<sup>3</sup>)’lik yoğunluğu ile Mg kullanımı talep görmektedir. Buna rağımen üretim maliyeti yüksek, şekil alma kabiliyeti düşük ve korozyon direnci sorunludur [3-5]. Saf Mg’ un mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıda Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Magnezyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [4,5].

|                      |                                       |
|----------------------|---------------------------------------|
| Simgesi              | Mg                                    |
| Atom numarası        | 12                                    |
| Atom ağırlığı        | 24,312 g/mol                          |
| Kaynama noktası      | 1090°C                                |
| Ergime noktası       | 650°C                                 |
| Yoğunluğu            | 1,74gr/cm <sup>3</sup>                |
| Elektron düzeni      | 3s <sup>2</sup>                       |
| Kristal yapısı       | Hegzagonal sıkı paket                 |
| Çekme dayanımı       | 80–180 MPa                            |
| Young modülü         | 45 MPA                                |
| Çekme (katı-sıvı)    | % 4,2                                 |
| Atom hacmi           | 14,0 (atom ağırlığı/yoğunluk)         |
| Özgül ısısı          | 0,25 C/gr °C                          |
| Isı iletkenliğı      | 156 W/m°K, s.cm.°C (oda sıcaklığında) |
| Elektrik iletkenliğı | 22,4 m/(Ω mm <sup>2</sup> )           |
| Kaynama ısısı        | 32,517 kcal/atom gram                 |

Mg üretiminin büyük bir kısmı, I. Dünya savaşından önce fişekçilik sektöründe kullanılmakta idi. I. Dünya savaşı sırasında güçlü askeri talep nedeniyle fabrikalar Britanya, Kanada ve A.B.D’ ye yayılmıştır [6]. şekil 2.1’ de 2004 yılında Mg üretimi yapan ülkeler ve oranları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretim oranları [7].

## 2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLAR

Magnezyum alaşımı tanımlaması için uluslararası bir sistem olmamasına rağmen, Amerikan Test ve Malzemeler Derneği tarafından bir adlandırma yöntemi oluşturulmuş ve benimsenmiştir [8]. Mg alaşımlarının düzenlendiği sınıflandırma sistemi olarak ASTM(A275) standart sistemi kullanılmaktadır. Alaşımların ana elementleri için harfleri, bileşimleri için ise bileşimlerine yakın rakamları kullanır. İki harf en büyük iki elemana verilmiş harf kısaltması, rakamlar ise bu alaşımların yakın olan tamsayıya yuvarlanmış yüzdeler dilimleri olarak gösterilir [5]. Örneğin ZM21 %2 çinko, %1 mangan içermektedir [9,10].

Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları [5,9].

| Harf    | A  | C  | E  | H  | J  | K  | L  | M  | Q  | S  | W  | X  | Z  |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Element | Al | Cu | Re | Tr | Sr | Zr | Li | Mn | Ag | Si | Yi | Ca | Zn |



### 2.3. PLASTİK ŞEKİL VERMEYE UYGUN MG ALAŞIMLARI

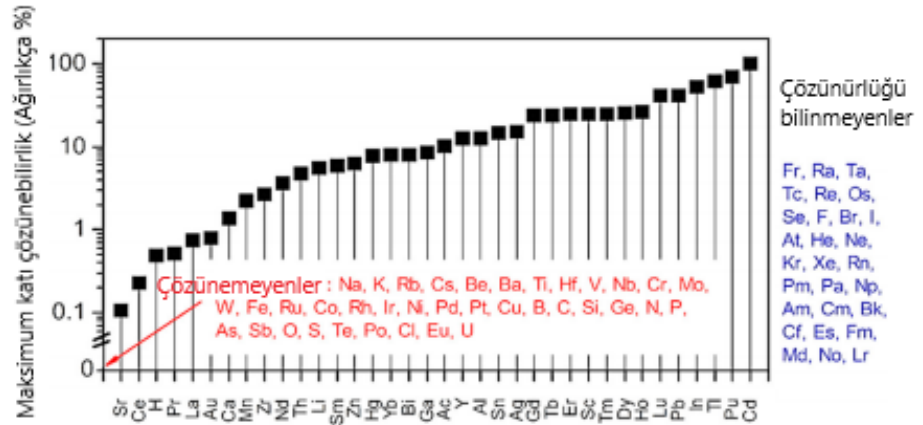
Mg alaşımlarının şekil alma kabiliyeti HSP (hekzagonal sıkı paket) yapı ve oluşan ikizlenmeler sonucunda oldukça zayıflar. Bundan dolayı şekil vermeye uygun Mg alaşımları az sayıdadır [10].

Çizelge 2.3. Şekil vermeye uygun Mg alaşımları [10].

| Alaşım  | Al       | Ca         | Zn      | Mn         | Cu   | Zr       | Y    | Nd  | Th  |
|---------|----------|------------|---------|------------|------|----------|------|-----|-----|
| AZ21X1  | 1, 6-2,5 | 0,1-0,25   | 0,8-1,6 | 0,15 maks. | 0,05 | -        | -    | -   | -   |
| AZ31    | 3        | -          | 1       | 0,3        | -    | -        | -    | -   | -   |
| AZ31B   | 2,5-3,5  | 0,04 maks. | 0,7-1,3 | 0,2-1,0    | 0,05 | -        | -    | -   | -   |
| AZ61A   | 5,8-7,2  | -          | 0,4-1,5 | 0,15-0,5   | 0,05 | -        | -    | -   | -   |
| AZ80    | 8,5      | -          | 0,5     | 0,12       | -    | -        | -    | -   | -   |
| AZCOM L | 2,0-3,6  | 0,04 maks. | 0,3-1,5 | 0,15 min.  | 0,10 | -        | -    | -   | -   |
| AZM     | 6,0      | -          | 1,0     | 0,3        | -    | -        | -    | -   | -   |
| ZC71    | -        | -          | 6,5     | 0,7        | 1,2  | -        | -    | -   | -   |
| ZK40    | -        | -          | 3,5-4,5 | -          | -    | 0,45 min | -    | -   | -   |
| ZK60A   | -        | -          | 4,8-6,2 | -          | -    | 0,45 min | -    | -   | -   |
| ZM21    | -        | -          | 2,0     | 1,0        | -    | -        | -    | -   | -   |
| ZW3     | -        | -          | 3,0     | -          | -    | 0,6      | -    | -   | -   |
| HM21    | -        | -          | -       | 0,8        | -    | -        | -    | -   | 2,0 |
| HM31    | -        | -          | -       | -          | -    | 0,7      | -    | -   | 2,0 |
| WE43    | -        | -          | -       | -          | -    | 0,5      | 4,0  | 4,0 | -   |
| WE54    | -        | -          | -       | -          | -    | 0,5      | 5,25 | 3,5 | -   |

### 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi gibi mekanizmalar magnezyumun mekanik özelliklerini, döküm kabiliyetini, korozyon direncini ve mikroyapısını geliştirmede önemli rol oynar [4].



Şekil 2.2. Mg'deki elementlerin maksimum katı çözünürlüğü [11-15].

Elementlerin büyük bir kısmının Mg'de çözünürlüğünün olmadığını veya keşfedilmemiş olduğunu gösterir [11-15]. Alaşım elementlerinin miktarı ergiyik halde her bir elementin çözünürlüğü göz önünde bulundurularak kontrol edilmektedir. Aşağıda alaşım elementlerinin etkileri sıralanmıştır [4].

#### **2.4.1. Alüminyum**

Döküm kabiliyetini arttırmanın yanında ve mekanik özellikleride geliştirir. Mg içerisindeki çözünürlüğü oda sıcaklığında ağırlıkça %2,6 ve 436 °C'de maksimum ağırlıkça %12,1'dir. Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltisi ve katı ergiyik haldeki Al mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Fakat dezavantajı mikroporoziteyi çoğaltmasıdır. Mg-Al alaşımlarında Al içeriği %2-9 aralığında bulunur ve optimum %6 olması tavsiye edilmektedir [16].

#### **2.4.2. Berilyum**

Az miktarda (10 ppm=10mg/lt dolaylarında) kullanılmakta ve oksidasyonu engellemektedir. Aynı zamanda demir giderici olarak kullanılır. Fakat tane irileşmesi yapmaktadır [17].

#### **2.4.3. Kalsiyum**

Literatür incelendiğinde Ellingham diyagramında 726.85°C'ye kadar oksijene olan afinitelerinin Ca > Be > Mg > Sr > Al > Ti olarak sırasıyla azaldığı görülmektedir [18].

#### **2.4.4. Bakır**

Mg-Al-Zn alaşımlarında korozyon direnci üzerinde kötü etkileri vardır. Fakat Mg-Zn alaşımlarında sünekliği geliştirdiği ayrıca yaşlanma kabiliyetini iyileştirdiği bilinmektedir. yüksek sıcaklık dayanımına olumlu etki yapar [19].

#### **2.4.5. Lityum**

Şekillenebilirlik özelliğini geliştirilmesine katkı sunan bu element öte yandan mekanik özellikleri zayıflatmakta ve bununla beraber korozyon direncini düşürmektedir [20].

#### **2.4.6. Mangan**

Literatürde demir ile reaksiyona girdiği ve yapıda bulunan serbest haldeki demir atomlarını azalttığı ve bu nedenle korozyon direncine önemli oranda katkı sağladığı bildirilmiştir [21].

#### **2.4.7. Silisyum**

Literatürde ergiyik metalin akışkanlık özelliğini geliştirdiği. Bununla beraber içeriğinde bulunan eser miktarda demir elementinin varlığı korozyon direncini azalttığı bildirilmiştir [4]. Fakat bununla beraber bir çalışmada AZ61 Mg alaşımın mekanik özellikleri ve bio korozyon özelliğini geliştirmeye katkı sunduğu belirtilmiştir [22].

#### **2.4.8. Gümüş**

Literatürde nadir toprak elementleri ile beraber kullanıldığında yüksek sıcaklık dayanımını geliştirdiği, sürünme direncini arttırdığı bildirilmiştir. Bununla beraber, yaşlanma kabiliyetini iyileştirdiği için mekanik özellikleride iyileştirdiği rapor edilmiştir [23].

#### **2.4.9. Çinko**

Literatürde ikinci en iyi alaşım elementi olduğu ve alüminyum ile birlikte kullanıldığında oda sıcaklığı mukavemetini iyileştirdiği bildirilmiştir. Bununla beraber demir ve nikel elementlerinin korozif özelliklerini azaltılmasında çinko ilavesinin etkisi rapor edilmiştir [16]. Ayrıca yaşlanma kabiliyetini arttırdığı açıklanmıştır [24].

#### **2.4.10. Zirkonyum**

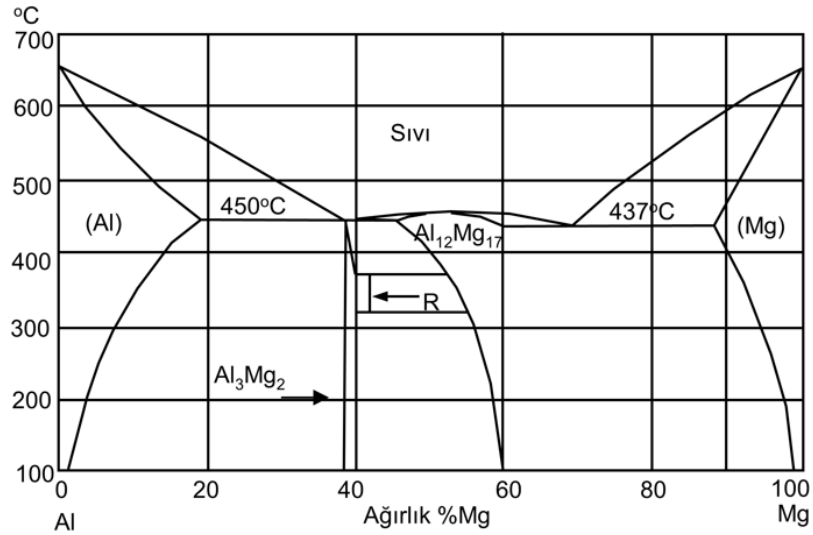
Yapılan çalışmalarda tane inceltici etkisi olduğu rapor edilmiştir. Sünekliği azaltmadan mukavemeti arttırdığı bildirilmiştir [25]. Fakat, katı ergiyik haldeki Al ve

Mn'ı çökelti oluşturarak yapıdan uzaklaştırdığı için Al veya Mn içeren alaşımlarda kullanılmadığı açıklanmıştır [26].

## 2.5. İKİLİ DİYAGRAMLAR

### 2.5.1. Alüminyum

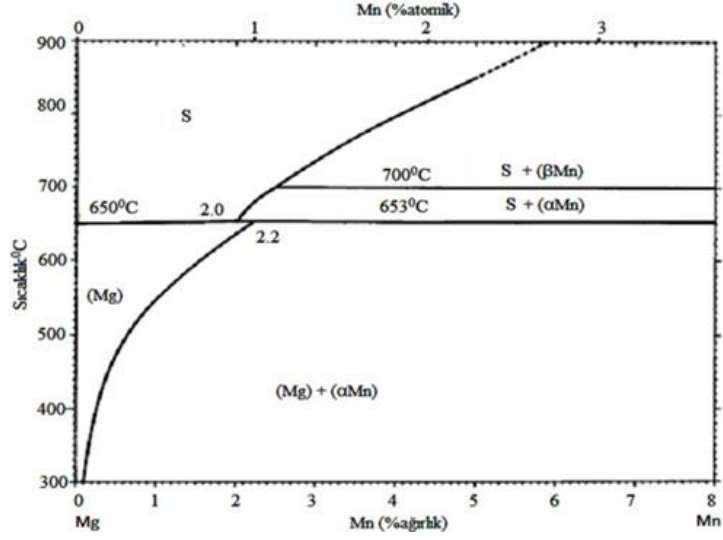
Literatürde Mg-Al faz diyagramı sıvı fazı, HSP yapıları katı fazı ve R fazını içermektedir. Al 450 °C'de en çok atomik olarak %18,9 çözüldüğü bildirilmiştir [27]. Mg esaslı alaşımlarda Al, en çok kullanılan alaşım elementidir. Al katkısı alaşımların çekme dayanımını, sertliğini ve katılma zamanını artırır, bununla beraber sünekliğini ve darbe dayanımını düşürmektedir. Ergiyik metalin dökülebilirliğini iyileştirmesinin yanında Mg' un katı çökelti dayanımını ve döküm alaşımlarda mikro gözenek oluşumunu düşürür. %6'yı aşan Al miktarı alaşımın ısıl işlem yeteneğini artırır. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik düşük sıcaklıklarda ( $\leq 120$  °C) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir [8,28].



### 2.5.2. Mangan

Literatürde 653 °C'de en çok atomik olarak %2 oranında çözüldüğü ve Mg-Mn ikili faz diyagramında orta bileşim bulunmadığı bildirilmiştir [27]. Alaşımlara ilave edilen

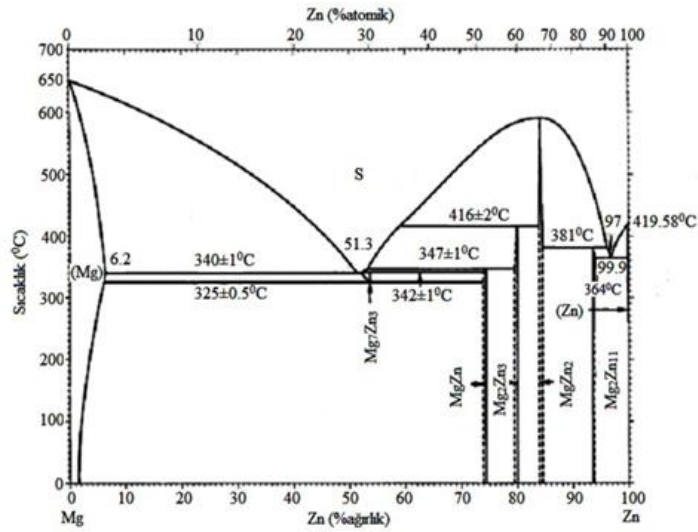
Mn daha çok korozyon direncini geliştirmek için %0,1-0,5 oranları arasında kullanıldığı bildirilmiştir. Mg alaşımlarında Mn kullanımının sũrũnme direncini geliştirdiği ve Fe'in etkisini azaltarak korozyonu engellediği rapor edilmiştir [28].



şekil 2.4. Mg-Mn faz diyagramı [30].

### 2.5.3. Çinko

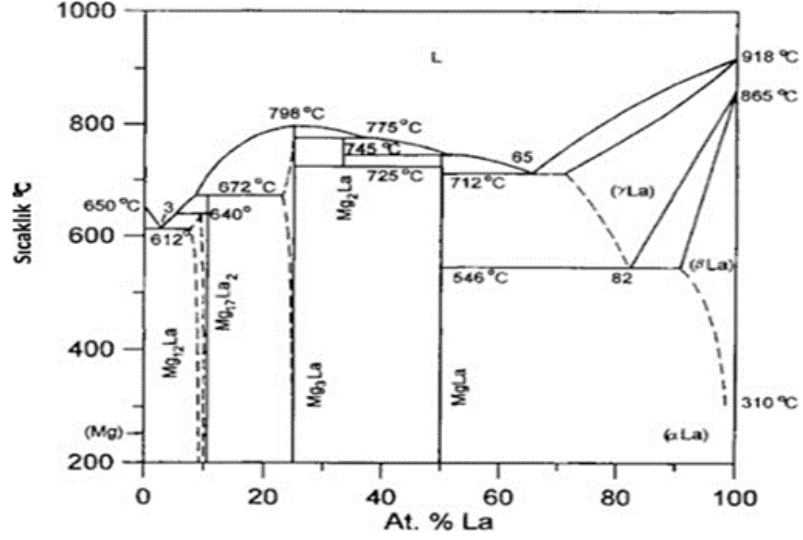
Literatũre bakıldığında MgZn<sub>2</sub> fazı 595 °C'de ozũndũđũ ve 368 °C'de atomik olarak %97 Zn içeriğinde bu faz ۆtektik halde olduğu bildirilmiştir [27].



şekil 2.5. Mg-Zn faz diyagramı [30].

## 2.5.4. Lantanyum

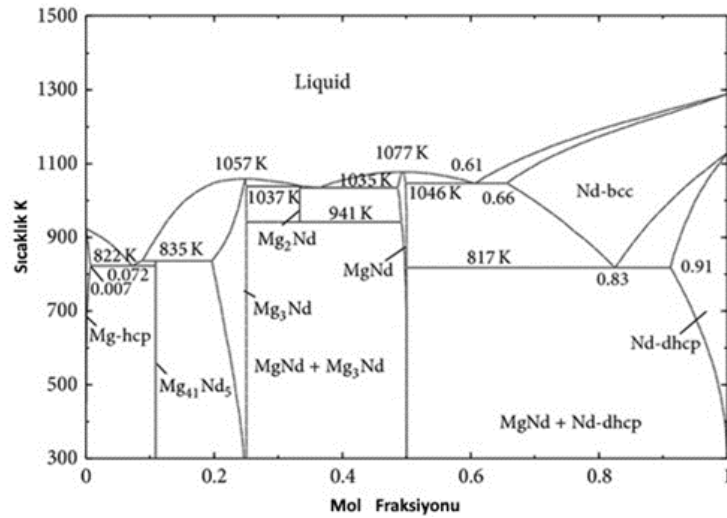
Literatürde lantanyumun Mg'da çözünürlüğü çok az olduğu ve çok yüksek ötektik sıcaklığa (612 °C) sahip olduğu belirtilmiştir [31].



Şekil 2.6. Mg-La faz diyagramı [31].

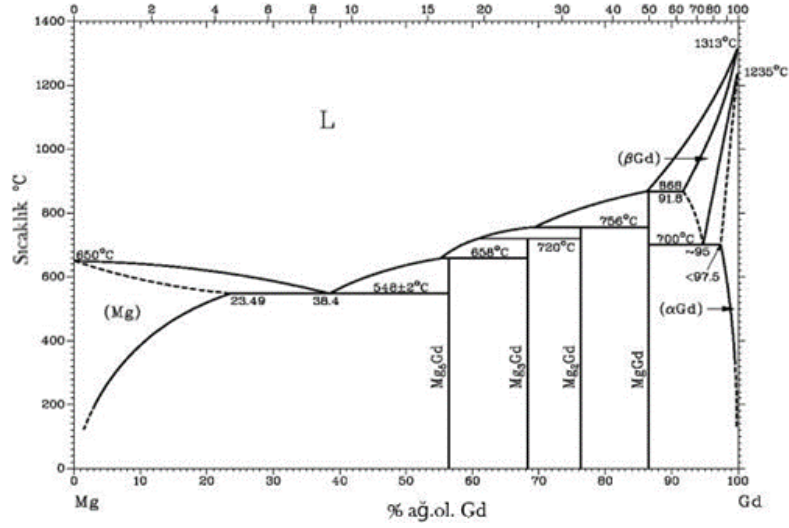
## 2.5.5. Neodimyum

Literatürde neodimyumun Mg'da çözünürlüğü yüksektir ve en düşük ötektik sıcaklığa (552 °C) sahip olduğu için yaşlanma kabiliyetini iyileştirdiği kaydedilmiştir. [31].



Şekil 2.7. Mg-Nd faz diyagramı [27].

## 2.5.6. Gadolinyum

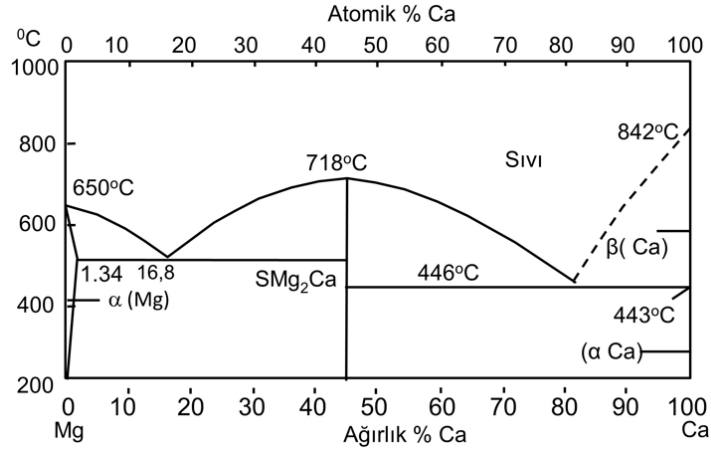


Şekil 2.8. Mg-Gd faz diyagramı [6].

Literatürde gadolinyum'n Mg'da ötektik sıcaklıkta en fazla ağırlık olarak %23,49 çözünmekte olduğu ve bununla beraber katı ergiyik sertleşmesi sağladığı rapor edilmiştir [31].

## 2.5.7. Kalsiyum

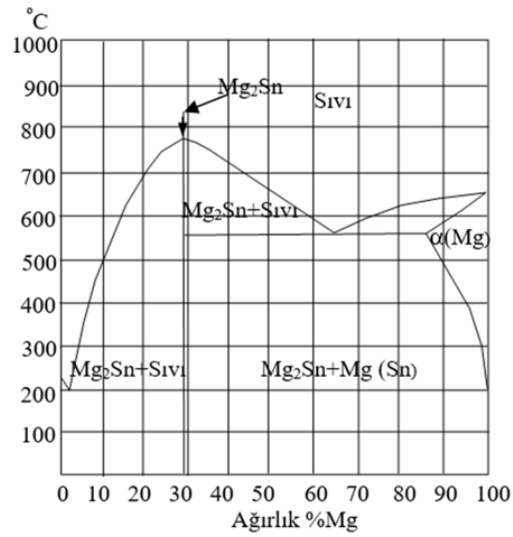
Literatürde Ca elementinin Mg içerisinde maksimum çözünebildiği sıcaklık 565 °C'de %1.34, 200 °C'de ise yaklaşık %0 oranında olduğu bildirilmiştir. Bununla beraber intermetalik bileşim olan Mg<sub>2</sub>Ca fazının ergime noktasının 715 °C'ye ulaştığı deklare edilmiştir. Mg içerisinde Ca elementinin sınırlı çözünebilirliği sebebiyle katı eriyik sertleşmesine etkisi az olduğu belirtilmiştir. Mg alaşımlarına %1 oranında ilave edilen Ca alaşımın sürünme direncini geliştirdiği fakat sıcak yırtılmalara karşı yatkınlığı artırdığı rapor edilmiştir. Bununla beraber az miktarda da olsa ergiyik metalin oksidasyonunu azalttığı bildirilmiştir [30,32]. Şekil 2.9'da Mg-Ca denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.9. Mg-Ca denge diyagramı [30,32].

### 2.5.8. Kalay

Literatür incelendiğinde Sn elementinin Mg'dan daha düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu ve Mg'dan daha az akıcılığı olan bir element olduğu belirtilmiştir [33]. Mg'a ilave edilen Sn, alaşımın sünekliğini artırdığı ve sıcak işlemde alaşımın çatlama yatkınlığını azaltmasıyla beraber alaşımın işlenebilirliğini de geliştirdiği rapor edilmiştir [34]. Bir başka çalışmada ise Sn içeren alaşımda  $Mg_2Sn$  intermetalik faz oluşumunun soğuma hızına bağlı olduğu ve yüksek soğuma hızlarında çubuk tipi  $Mg_2Sn$  partiküllerin oluşmasının Mg matrisi ile beraber olduğu bildirilmiştir [35]. Şekil 2.10'de Mg-Sn denge diyagramı görülmektedir.



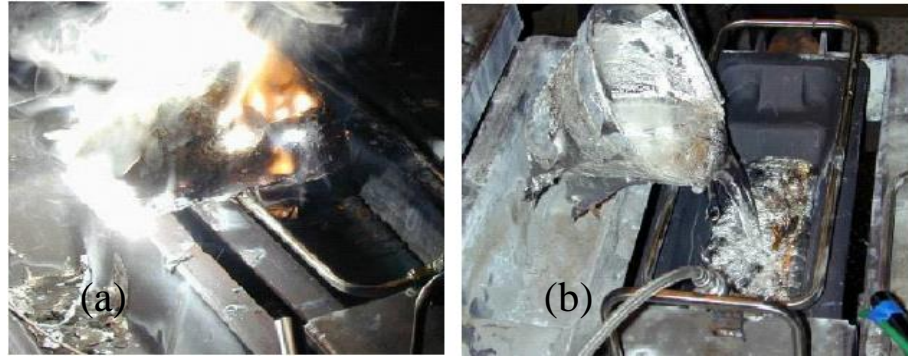
Şekil 2.10. Mg-Sn denge diyagramı [30,33].



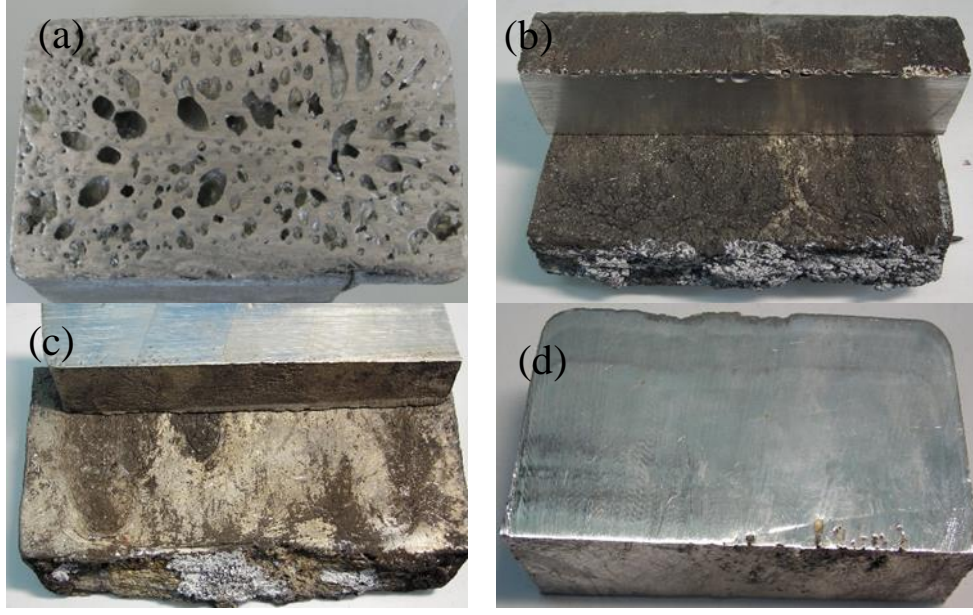
## 2.6. Mg ALAŞIMLARINDA UYGULANAN DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Literature baktığımızda Alüminyum alaşımları 2-2,5 mm kesit kalınlığına kadar, Magnezyum alaşımları ise 1-1,5 mm kesit kalınlığına kadar dökülebilirliği olan metallerdir [36]. Mg alaşımlarının en önemli problemleri döküm esnasında oksitlenme ve yanma olaylarıdır. Havacılıkta yoğun olarak kullanılan Mg esaslı döküm parçaların problemlerinin çözümü öncelikli konudur [6,8,37,38].

Yapılan çalışmalarda Mg alaşımlarının kolayca oksitlenebildiği bildirilmiştir. Erimiş Mg alaşımları erimiş Al'den farklı davranış sergiler. Mg alaşımlarında ergiyik üzerinde oksijen geçirgen tabaka oluşur ve oksitlenme artar. Oluşan bu tabaka oksijenin içeriye yanmanın oluşmasına sebep olur. Oksitlenmenin ve yanmanın önlenmesi için ergimiş metalin dökümünde koruyucu gazlar kullanılmak zorundadır [37]. Magnezyum alaşımlarının ergitilmesinde ve döküm esnasında kullanılan koruyucu gazların (Ar, SF<sub>6</sub>, N ve HFC-134a) etkileri ilgi çeken bir konu olmuştur [37-39]. Döküm malzemesi içindeki curuf kalıntıları korozyon dayanımını düşürmektedir. Günümüzde SF<sub>6</sub> içeren gaz karışımları sıvı Mg'yi korumak için daha sık kullanılmaktadır [40]. Şekil 2.11'de Mg alaşımlarının dökümü esnasında açık atmosfer altında ve SF<sub>6</sub> gazı yardımıyla yapılan uygulamalar görülmektedir.



Şekil 2.11. Mg alaşımı dökümlerinde gaz kullanımı a) Atmosfer ortamı b) SF<sub>6</sub> [40].



Şekil 2.12. Mg alaşımı dökümlerinde ocak içinde ve kalıp içinde gaz kullanımını a) Ocak ve Kalıp atmosferi:  $\text{CO}_2 + \%0,8 \text{SF}_6$  b) Ocak: Argon, Kalıp: Atmosferik Ortam c) Ocak: Argon, Kalıp: Argon d) Ocak: Argon, Kalıp atmosferi:  $\text{CO}_2 + \%0,8 \text{SF}_6$  [37].

$\text{SF}_6$  %5'in üstündeki konsantrasyonlarda kullanıldığı zaman Mg için çok iyi bir koruyucu olduğu fakat çelik kalıplarla ve pota ile reaksiyona girdiği rapor edilmiştir [41]. Mg alaşımlarına az miktarda Be ilavesi yanma engelleyici etkiye sahiptir [42]. Alaşımların ergitilmesinde özel tasarlanmış ergitme ocakları kullanıldığı ve bu ocaklarda atmosfer gazlarından arındırılmış koruyucu gaz ortamında ergitme yapıldığı bildirilmiştir [39]. Şekil 2.12'da Mg alaşımlarının dökümünde ocakta ve kalıpta gaz seçimi için yapılan çalışmalar sunulmuştur [37].

Şekil 2.12. a' ya bakıldığında ocak ve kalıp içerisine  $\text{CO}_2 + \%0,8 \text{SF}_6$  uygulaması sonucunda döküm parçada gözenekli yapı gelişmiştir. Şekil 2.12 b'de Ocak atmosferinde argon gazı kullanılarak Şekil 2.12. a'daki gözenekli yapı giderilmiş fakat sıvı metalin dökümü sırasında hava ile teması sonucu oksitli bir döküm parça elde edilmiştir.

Şekil 2.12. c'de görüldüğü üzere, ocak ve kalıp atmosferinde Ar gazı kullanılarak sıvı metalin döküm sırasında hava ile teması kesilmiş ve oksitlenme azaltılmıştır. Şekil 2.12. d' Ocak atmosferi olarak Ar gazı, kalıp atmosferinde ise  $\text{CO}_2 + \%0,8 \text{SF}_6$  gaz

karışımı kullanılarak yapılan döküm parça yüzeyinin gözeneksiz ve daha temiz, dış yüzeyde oksitlenmenin en az olduğu döküm parça elde edilmiştir [37].

Mg döküm teknikleri 4 grupta toplanır [6,8,43]. Kokil kalıba döküm, Kum kalıba döküm, Basınçlı döküm, Yarı-katı döküm olarak sıralanabilir.

Döküm süreçlerinden birinin seçimi bir şekilde büyüklük, gerekli tolerans ve üretim miktarı gibi bilgilere dayanarak tespit edilir. Basınçlı döküm alaşımlarının kullanımının hızla arttığı rapor edilmiştir [44].

### **2.6.1. Kokil Kalıba Döküm**

Kokil kalıba döküm, iki veya daha fazla parçadan oluşan metal kalıba döküm teknolojisidir. Aynı şekle sahip birçok parçanın dökümü hızla yapılabilir. Sıvı metal yer çekimi ile kalıba girer. Kokil kalıba döküm ile yüksek yoğunluklu parça üretilebilir. Kum döküm ile karşılaştırıldığında kokil kalıp ile daha uniform döküm parçaların üretiminin sağlandığı bildirilmiştir [6].

Bu yöntemde magnezyum alaşımları alüminyum alaşımlarından çok daha hızlı dökülür. Ergimiş Mg, ergimiş Al'da olduğu gibi Fe ile reaksiyona girmediği için Mg ve alaşımları Fe ve çelik potalarda ergitilebilir ve tutulabilir [44].

### **2.6.2. Kum Kalıba Döküm**

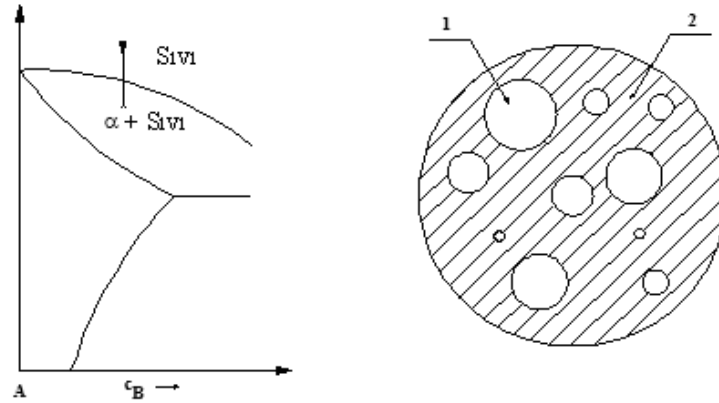
En bilinen geleneksel döküm yöntemi kum kalıp dökümüdür. Bu yöntem ile kum aralarından hava alımı olacağı için Mg'un yanmasına karşı tedbirler alınmalıdır. Kalıp boşlukları koruyucu gaz ile korunmalıdır. Mg alaşımlarında uygulanan en iyi kum döküm tipi kabuk kalıplığıdır. Çünkü bu kalıpta kumlar arasında reçine olduğundan Mg'un kalıp içinde yanma tehlikesi daha az olduğu belirtilmiştir. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının kolay dökülürler fakat belli durumlarda sınırlılıkları vardır [45].

### 2.6.3. Basınçlı Döküm

Magnezyum alaşımları çoğunlukla yerçekimi veya basınçlı döküm ile üretilirler. Basınçlı döküm, yüksek üretilebilirlik, hassasiyet, döküm yüzeyi temizliği, ince kesit ve kompleks şekilli parçaların üretimi gibi artılar sunmaktadır. Bu döküm yönteminde düşük ergime sıcaklığı ve demirle reaksiyon göstermemesi ve kalıba yapışmamasından dolayı kısa döküm döngüleri ve daha uzun kalıp ömürleri sağlanmaktadır [46].

### 2.6.4. Yarı Katı Döküm Yöntemi

Magnezyum alaşımlarının kullanımı, döküm teknolojisine ve yarı-katı şekillendirme ile ilişkilidir. Otomobil üreticileri, otomotivde kullanılan saçları üretiminde çelik ve Al yerine yarı-katı üretilmiş Mg alaşımları üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Alaşım sıvı halden soğutulur ve sıvı-katı hal sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta tutularak bir karıştırma hareketi uygulandığında normal dendritik büyüme durdurulur ve burada kaba küresel olarak farklı bir dendrit parçacıkları oluşur. Şekil 2.13’de yarı-katı durum şematik olarak verilmiştir [47].



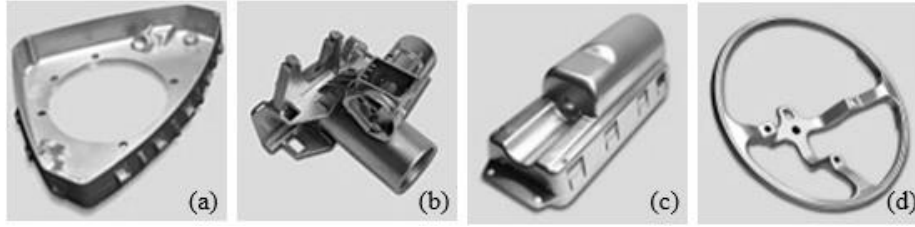
Şekil 2.13. Yarı-katı sıcaklık hali (1) katı, (2) sıvı [47].

## 2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Literatüre bakıldığında magnezyum alaşımının yapısal uygulamalar için kullanılabilecek en hafif metaldir. Diğer birçok metal gibi, magnezyum da saf haliyle nadiren kullanılır. Alaşımlama, hem dövme hem de döküm ürünler için

magnezyumun hemen hemen tüm özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Magnezyum altıgen bir kafes yapısına sahiptir ve çok çeşitli elementlerle katı çözünürlüğe izin veren bir atom çapına sahiptir. Kadmiyum dışında, magnezyum dahil çoğu ikili alaşım ötektik veya peritektik sistemler oluşturur [48].

Şekil 2.14' da otomobillerde kullanılan Mg parçalar görölmektedir. Resimlerde görüldüğü gibi Mg alaşımları otomobillerin neredeyse her bölümünde kullanılabilir. Şekil 2.15'da Li esaslı Mg alaşımından dökülmüş kamera kutusu görölmektedir. Şekil 2.16'de ise Magnezyum döküm parçalar görölmektedir.



Şekil 2.14. Mg alaşımı döküm parçalar a) Hava yastığı kutusu b) Direksiyon kilit kutusu c) Yolcu hava yastığı kilidi d) Direksiyon simidi [49].



Şekil 2.15. Li katkılı mg alaşımı kamera kutusu görölmektedir [50].



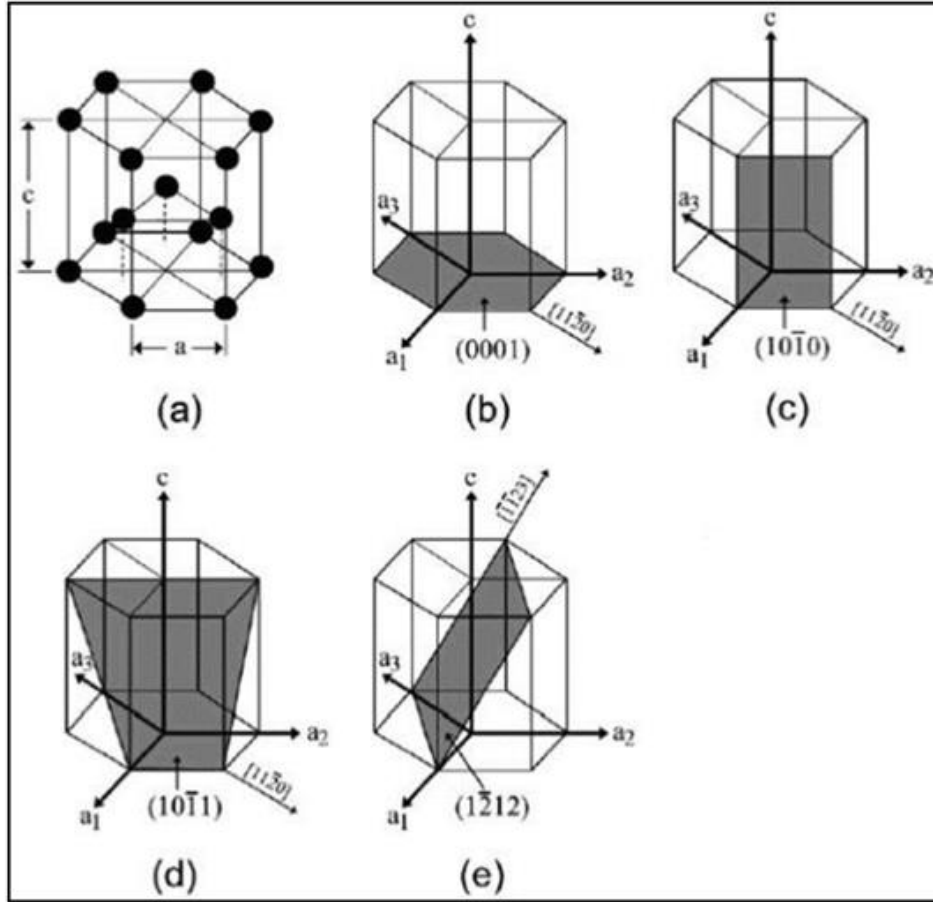
Şekil 2.16. Magnezyum döküm ile üretilmiş parçalar [51].

## BÖLÜM 3

### MAGNEZYUMDA OLUŞAN DEFORMASYON SİSTEMLERİ

#### 3.1. DÜZLEMLER

Hekzagonal sıkı paket (HSP) yapılı Mg alaşımlarının  $c/a$  oranı 1,624 olarak hesaplanmıştır. Magnezyumun deformasyonunda rol alan en önemli kristalografik düzlemler Şekil de 3.1’de gösterilmiştir [52].



Şekil 3.1. a) Mg birim hücre, b) bazal düzlem, c) prizmatik düzlem, d) piramidal düzlem ve e) ikinci düzen piramidal düzlem [52].

### 3.2. KAYMA MEKANİZMASI

Kayma, belirli kristalografik düzlemlerde ve yönler boyunca dislokasyonların kaymasıdır. Bu olay atomik yer değiştirme ile sonuçlanır. Farklı kayma düzlemi ve doğrultusunda birleşik dislokasyonların kayması, sabit bir şekil değişikliği ile sonuçlanmakta ve emilmiş gerinimleri barındırmaktadır. Taylor ve arkadaşları rastgele yönlendirilmiş bir polikristalin metalde, tek tip deformasyona ulaşmak için beşten fazla bağımsız kayma sistemine ihtiyaç duyduğunu belirtmiştir.

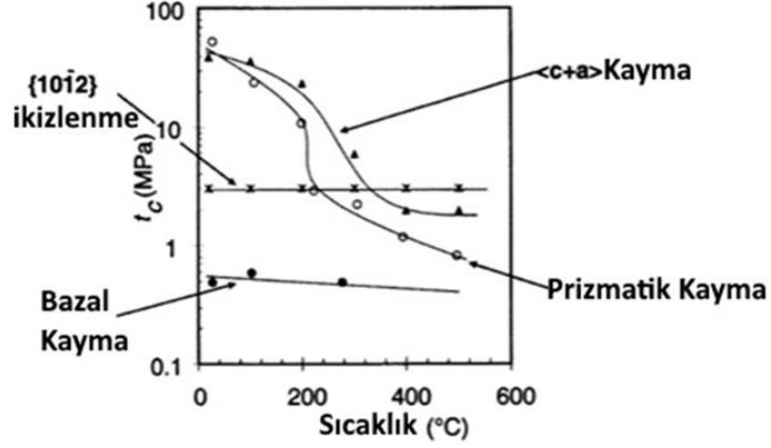
Kayma sisteminin bir kristalden diğerine yönlenebilmesindeki değişimden dolayı bir taneden diğerine kayma yapamamaktadır. Bu nedenle, malzemenin kopmasını önlemek için kayma aktivitesinin devam etmesi ve kayma sistemlerinin bulunması gerekir [53,54].

Kristal yapılardan Hacim merkezli kübik (HMK) ve Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıların aksine, HSP kristallerine baktığımızda Taylor kriterlerini yerine getirmek için yeterli bağımsız kayma sistemi sağlayamazlar. Bu durumda kayma sistemlerinin çok farklı kritik gerinim (CRSS) değerleri bu gelişmeye neden olmaktadır [55].

Şekil 3.1'deki şekilde magnezyumdaki önemli kayma sistemlerinin düzlemleri ve yönleri ile şematik olarak göstermektedir. Dört baskın kayma sistemi içerisinde, üçü (bazal, prizmatik ve birinci dereceden piramit), birbirine yakın kayma yönünü  $\langle 1120 \rangle$  paylaşmaktadır. Kayma yönlerini içeren üç ana düzlem kümesi (i) bazal, (ii) prizmatik ve (iii) piramidaldir. Bu kayma sistemlerinin aktivasyonu sadece dört bağımsız kayma sistemi sağlayabilir, herhangi bir rastgele gerinme yolunu barındırmak için gerekli olan beş tanesi için hala yetersiz olduğu bildirilmiştir [52]. Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde en önemli etken sıcaklıktır. Burada az sayıdaki kayma sistemi 225 °C üstünde prizmatik ve piramidal sistemler aktif olmaktadır [56]. Herrera Solaz ve ark. %0,5Nd ve %1Nd (ağ.ol.) miktarında nadir toprak elementinin CRSS üzerindeki etkisini araştırmışlardır. %0,5Nd alaşımında CRSS bazal/CRSS ikizlenme oranının sabit kaldığı rapor edilmiştir. Diğer taraftan %1Nd alaşımında arttığı bildirilmiştir. CRSS pirazma/CRSS ikizlenme ve CRSS



piramid/CRSS ikizlenme oranının ise %0,5Nd ve %1Nd alaşımından sonra azaldığı açıklanmıştır [57].



Şekil 3.2. Saf Mg'da ikizlenme ve kayma sistemlerinin CRSS değerlerine formasyon sıcaklığının etkisi [55].

Literatürdeki çalışmada Mg alaşımında prizmatik kaymaya tane boyutunun etkisini incelemişlerdir. Yüksek mukavemet ve süneklığe sahip AZ31 Mg alaşımları ECAP (Eşit kanal açısız presleme) yöntemiyle başarılı olmuştur. Bu çalışmada 350 nm ile 33  $\mu$ m arasında tane boyutuna sahip mikroyapı elde edilmiş ve bu esnada tekstür mümkün mertebe sabit tutulmuştur. Akma, çekme ve %uzama sırasıyla 385 MPa, 455 MPa ve %13 elde edilmiştir [58]. Bunun yanında azalan tane boyutu kayma aktivitesindeki değişikliğin tekstür etkilerinden bağımsız olduğu literatürde diğer bir çalışmada rapor edilmiştir [59].

### 3.3. İKİZLENME MEKANİZMASI

İkizlenme mekanizması, metalik malzemenin deformasyon sırasında ortaya koyduğu ikinci bir mekanizma olarak karşılaştığımız bir mekanizmadır. Özellikle kaymanın zor olduğu durumlarda malzemelerde ikizlenme mekanizması görülür.

İkizlenme mekanizması sonucunda kristal yapıda bir değişim olmaz ancak kristal latis yönünde değişim olduğu bildirilmektedir. Kayma da görülen sistemin tersine atomlar birbirlerine göre atomlararası mesafede yer değiştirdikleri bildirilmiştir. Tek

bir kristal ikizlenme tarafından paylaşıldığında kısım yapısını ve orijinal kristalini koruduğu belirtilmektedir. İkizlenme latisleri asıl latisin aynadaki yansıması gibidir ve iki kısmın arasındaki simetri düzlemi ikiz düzlemi olarak tanımlanmaktadır [53]. Literatüre bakıldığında ikizlenmeler çekme ve basma ikizlenmesi olarak ayrıldığı belirtilmiştir. Meng Y. ve ark. kopmaların genellikle basma ikizlenmeleri veya kayma bantları tarafından oluşturduğu aktarılmıştır [60]. Burada ikiz oluşumu ve en fazla lokal gerinim kopmaya neden olmaktadır [61].

Öte yandan, kasılma ikizleri Magnezyumda önemli ölçüde kalınlaşamaz. Yani aynı oranda makaslama için, kasılma ikizlerine kıyasla genişleme ikizleri daha büyük hacimde olması elzemdir. İkiz aktivasyonu üzerinde etkili parametreler arasında tane büyüklüğü, gerilme oranı, sıcaklık, yığılma hatası enerjisi ve doku parametreleri olduğu bildirilmiştir.

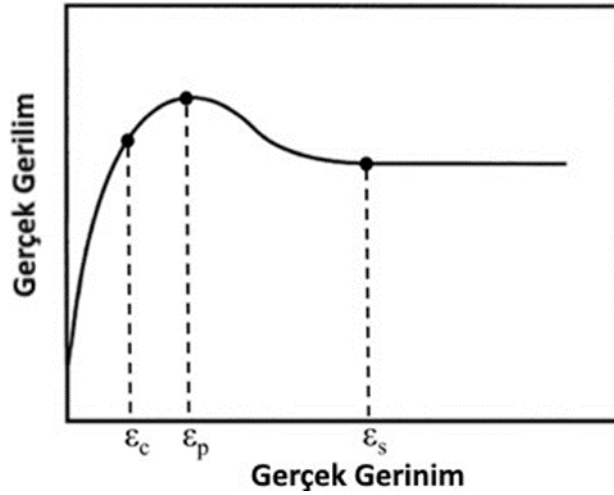
İkizlenme arayüz enerjisinin yüksek olması nedeniyle, özellikle Mg'de, ince tanelerde ikiz oluşturmak kolay değildir. Deformasyon olayı ikiz aktivitesi üzerinde önemli etkisi olduğu bildirilmiştir. ikiz aktivasyonu genellikle düşük sıcaklıklarda ve yüksek gerilme oranlarında önem arz eder. Sıcaklığın artırılmasıyla, CRSS'nin azalmasından dolayı, daha çok bazal kayma aktive edilir. Bu aktivasyonlar homojen deformasyon için gerekli kalan bağımsız kayma sistemlerini oluşturur [62,63].

### **3.4. DİĞER DEFORMASYON MEKANİZMALARI**

Magnezyum alaşımlarında oluşan diğer deformasyon mekanizmaları kink bantları, deformasyon bantları, geçiş bandı ve kesme bantlarıdır. Kesme bantları yüksek gerilme seviyelerinde oluşur. Deformasyon geometrisi ile ilişkili bir morfoloji ile oluşurlar. Bu bantlar tane yapısından bağımsızdır. Gerilim bandı miktarı, iri tanecikli malzeme ile artar fakat deformasyon sıcaklığı ile azaldığı bildirilmiştir. Böylece yüksek miktarda gerinim bandı, sonuç olarak oluşan tekstür üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kesme bantları da yeniden kristallenmiş tanelerin çekirdeklenmesi için tercih edilen yerler olabileceği bildirilmiştir [64].

### 3.5. DİNAMİK YENİDEN KRİSTALLEŞME

Yumuşama hızının yavaş olduğu metallerde kritik bir deformasyon durumuna ulaşıldığında dinamik yeniden kristalizasyon (DRX) meydana gelebilir. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, DRX uygulanan malzemenin akış eğrisi genellikle geniş bir tepe gösterir [65].



Şekil 3.3. Dinamik yeniden kristallendirme ve gerilme-uzama eğrisi [65].

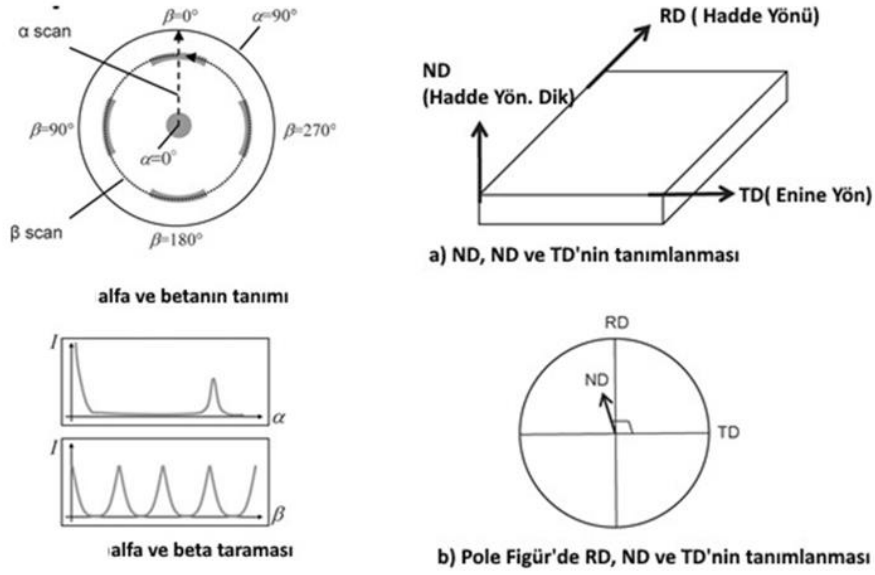
Şekil 3.3'deki eğriyi açıklamasına baktığımızda ( $\epsilon_c$ ) kritik bir gerilimin başladığı noktadır. ( $\epsilon_p$ ) akış eğrisinin tepe noktasıdır. ( $\epsilon_s$ ) Gerilim sertleşmesi ve yumuşama mekanizmaları arasındaki dinamik denge dolayısıyla sabit akış davranışı olarak açıklanabilir [65].

Magnezyum alaşımlarında sürekli ve süreksiz DRX mekanizmaları oluşmaktadır. Sürekli DRX bir toparlanma işlemidir ve alt tane sınırlarında bulunan dislokasyonların sönmelenmesi halinde sürekli devam eder. Süreksiz DRX mekanizması ise çekirdeklenme ve yüksek açılı sınırı göçleri ile bu çekirdeklerin büyümesi şeklinde oluşur [66]. Haddelme sırasında (0002) bazal tekstürün zayıflatılması istenmektedir. Fakat DRX'in (0002) bazal tekstürün zayıflatılmasında çok az etkisi olduğu bildirilmiştir [67].

### 3.6. MAKROTEKSTÜR

Malzeme bilim dalında tekstür, malzemenin kristalografik olarak sergilediği yönelimler olarak açıklanmaktadır. Rastgele olan yönelimli malzemelerin hiçbir dokuya sahip olmadığı söylenir. Eğer yönelimler tercih edilen bir yönelime sahipse, o zaman zayıf, güçlü veya ılımlı doku olarak, dokunun derecesi ise tercih edilen oryantasyona sahip kristallerin yüzdesine bağlı olduğu bildirilmiştir. Tekstürün malzemeler için önemi, malzemenin birçok özellikliğinin tekstüre özel olması gerçeğinde saklıdır. Bir tekstür malzemesi, plastiklik, süneklik, mukavemet ve korozyon direnci gibi fiziksel ve kimyasal özellikler ile ilgilidir. Haddelenmiş magnezyum alaşımı, sağlamlığını ve sünekliğini etkileyen güçlü bir tekstür ve anizotropik özelliğe sahiptir. Yani bu alaşımın mekanik özellikleri yönelim ile önemli oranda değişebilir [68,69].

Literatürde yönlerin incelenmesi Pole figür yöntemiyle yapılır. X, Y ve Z eksenlerine ortogonal koordinatlar, metalürjik terimlere dayanarak RD, TD ve ND kodları tanımlanmış ve burada tekstür yapıları kullanılarak pole figür analizi yapılmıştır. Şekil 3.4'te numune yüzeyine normal yön, ND, Normal Yön olarak tanımlanır, numunenin yuvarlanma yönü RD, Yuvarlanma Yönü olarak tanımlanır. Yüzey düzlemi içinde RD'ye dik bir yön TD, Enine Yön olarak tanımlanmıştır [70].



Şekil 3.4. a ve b pole figür ölçümü ve RD, TD ve ND'nin tanımlanması [70].

Literatürdeki çalışmalarında Gd, Nd, Ce, La ve karışım halinde nadir toprak elementlerinin ZEK100 Mg alaşımı tekstürüne etkisini incelemiştir. Ilık haddelenen alaşımlarda tekstür zayıflaması ve sonuç olarak iyi süneklik ve düşük anizotropi elde edilmiştir. Bununla beraber Gd istenilen tekstür sonucunu sağlamış fakat iri taneler nedeniyle en düşük çekme mukavemetini sunmuştur [71].

Diğer bir çalışmada (%Ağırlıkça) Mg-1Zn-1Ce-0,6Zr ve Mg-1Zn-1Gd-0,6Zr alaşımları yüksek gerinimli sıcak haddeden geçirilmiş ve sonrasında tavlanmıştır. Yeniden kristalleşmenin başlangıcının kayma bantları içlerinde ve partiküllerin etrafında başladığı bildirilmiştir. Yeniden kristalleşmenin yeni ve daha yumuşak yönlenmelere ve sonrasında daha zayıf tekstüre yol açtığı belirtilmiştir [72].

## BÖLÜM 4

### HADDELEME

#### 4.1. GELENEKSEL HADDE YÖNTEMİ ile Mg SAÇ ÜRETİMİ

Mg saç üretmek işlemine baktığımızda belli ölçülerde döküm kalıplarına dökülür. Elde edilen levha birkaç saat ( $\sim 450^\circ \text{C}$ 'de) homojenleştirilir. Ters yönde sıcak değirmende birkaç geçiş ile 5-6 mm'ye kadar haddelenir. Ve herbir geçişten önce ( $\sim 350^\circ \text{C}$ 'de) tavlama yapıldıktan sonra yaklaşık %5-20 oranında bir indirge ile birkaç geçişde haddelenir. Sıcak haddelemenin son kısmı zaman alıcıdır [73].

#### 4.2. HADDE PARAMETRELERİ

Sıcaklık ve paso başına deformasyon miktarı çok önemlidir. Bunun yanında gerinim oranı ve hadde hızı sonuç mikroyapısını etkileyen diğer parametrelerdir [74]. ZM21'in mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde haddeleme sıcaklığının ve kalınlıktaki azalmanın etkisi araştırmıştır. Alaşım  $250^\circ \text{C}$ ,  $300^\circ \text{C}$ ,  $350^\circ \text{C}$  ve  $400^\circ \text{C}$  olmak üzere dört farklı sıcaklıkta %25, %50 ve %75 azalmalarla haddelenmiştir. İzotermal olmayan haddeleme, matris alaşımında tane inceltme, kesme bantları ve ikizlerin eklenmesiyle sonuçlandığını rapor etmiştir. Literatürde ZM21 Mg alaşımı ile ilgili çalışma azdır [1].

Yeni bir ZME200 (Mg-2.3Zn-0.4Mn-0.2Ce) magnezyum alaşımli levha, geleneksel sıcak haddeleme ve ardından tavlama işlemi kullanılarak geliştirilmiştir. AZ31 Mg levha ile karşılaştırıldığında, ZME200 levha olağanüstü derecede daha yüksek süneklik (çekme uzamasında %36) ve üstün esneyerek şekillendirilebilirlikte (Erichsen değeri) 9.5 olarak gerçekleşmiştir. Yuvarlanma sıcaklığı ve geçiş başına azalma büyük deformasyon mekanizmasının ZME200 alaşımının mikro yapısı üzerindeki etkilerine bakıldığında deformasyon ikizlenmesinin daha düşük

sıcaklıklarda ve daha yüksek kalınlıkta daha aktif azalmalar ve daha ince mikroyapıya yol açtığı rapor edilmiştir. Ayrıca haddelenmiş ZME200 alaşımında oluşturulan tipik bazal enine yöne (TD) geniş yayımlı doku ve yoğunluk AZ31'den daha düşüktür [75].

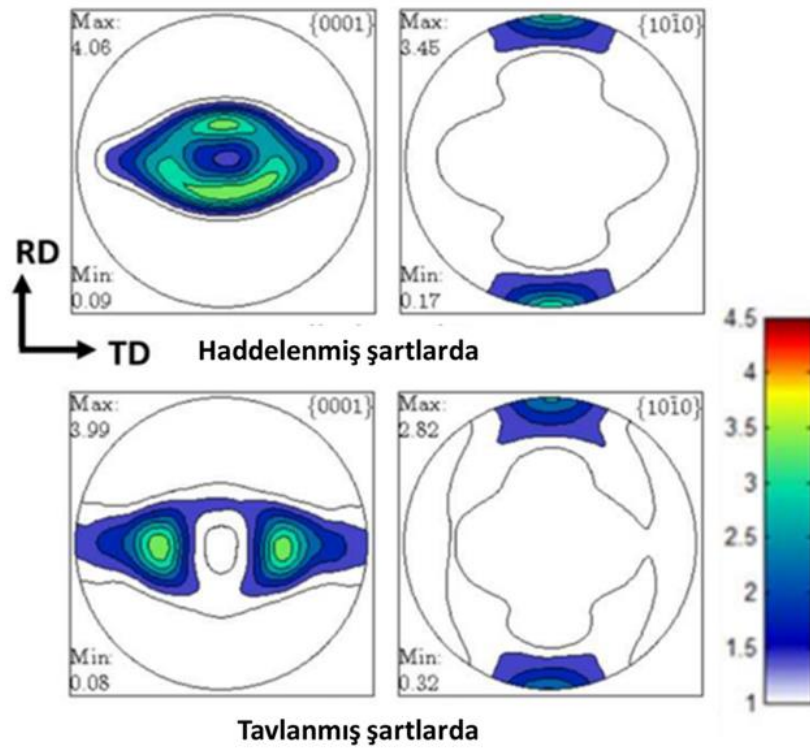
Diğer bir çalışmada magnezyum alaşımını 3 m/dk ile 2,1 m/dk arasındaki hadde hızları üç farklı hadde hızı kullanarak tek pasoda %20, %40 ve %70 deformasyon oranlarında haddeleme yapılmıştır. İlk etapta küçük deformasyon olayı ikizlenmeye neden olmuştur. Lakin artan deformasyon ile birlikte yeniden kristalleşmenin daha çok yoğunlaştığı bildirilmiştir. Yeniden kristalleşme olayı sünekliği arttırmıştır. Fakat düşük hadde hızında artan ikizlenme fraksiyonunun sünekliği azaltmıştır ama akma mukavemetine katkı sağladığı bildirilmiştir [76].

Farklı çalışmada yüksek hadde hızları ile yeniden kristalleşmenin genişlediği ve homojen şekilde dağıldığını buna rağmen düşük hadde hızlarında yeniden kristalleşmenin kayma bantlarında sınırlandığını bildirmiştir. Buna ilaveten aynı yazar tarafından dinamik yeniden kristalleşmenin hadde esnasında oluşan kenar çatlaklarını engellediği aktarılmıştır [77].

#### **4.3. HADDELEME KABİLİYETİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ**

Magnezyum alaşımlarında yaygın kullanılan alaşım stratejisi nadir toprak elementleri (NTE) ve kombinasyonlarının eklenmesi, tekstür yoğunluklarını azaltmak için ve sünekliği iyileştirmek için en etkili yöntem olmuştur. İkizlenme fraksiyonunun azaltılması ile anizotropi ve asimetride azalış gözlemlendiği bildirilmiştir. Bunun yanında oda sıcaklığında Mg-nadir toprak elementleri alaşımların sünekliğini arttırmada bazal olmayan kayma sistemlerinin aktivasyonuna katkı sunmaktadır. Bu sayede deformasyon ikizlenmesine olan eğilim azaltılmaktadır. Ayrıca NTE ile tekstür modifikasyonu yeniden kristalleşmeyi fazlasıyla etkiler. Termo-mekanik işlem sırasında yeniden kristalleşmenin önlenmesi ve fazla sayıda kayma bandının oluşması NTE tarafından oluşabilir ve burada geniş yayımlar olabilir. [78].

Victoria-Hernández J. ve arkadaşları yaptıkları çalışmadaki sıcak haddelenmiş ZEW200 alaşımının dokusunu gösterir. Haddelenmiş durumdaki levha, 4.1 kat rastgele dağılım yoğunluğu ile nispeten zayıf bir deformasyon dokusu gösterir. TD'ye doğru eğimli geniş bir bazal kutup dağılımı da belirgindir. Tavlanmış saç, haddelenmiş olana kıyasla daha zayıf bir doku gösterir. Ayrıca, bazal kutbun RD splitinden TD split dokusuna geçiş gözlemlenir. Bu durumda, bazal kutuplar esas olarak TD35° TD'ye doğru eğildiğini rapor etmişlerdir [79].



Şekil 4.1. Sıcak haddelenmiş ZEW200 alaşımı için Pole figure testi (0 0 0 1) ve (1 0 -1 0) açısından kristalografik dokuları [79].

Potansiyel biyolojik olarak parçalanabilen kemik vidası implantı, haddelenmiş ZM21 Mg'nin mekanik bütünlüğü, eşit kanallı açısız presleme (ECAP) ile geliştirilmiştir. Elektron geri saçılımlı kırınım (EBSD), haddelenmiş ZM21 Mg'de gözlemlenen 45 µm'lik deforme olmuş taneler ortaya çıkardı. ECAP işleminin, ZM21 Mg'nin hem tane boyutu hem de kristalografik oryantasyonu üzerinde önemli etkileri vardır. Geçiş sayısı arttıkça, akma ve nihai çekme mukavemeti nispeten azalmıştır. 4. geçiş ECAP'de haddelenmiş ZM21 Mg'nin % uzama oranı %20'den %27'ye yükseldi, yaklaşık %26 artış fark edildi [80].



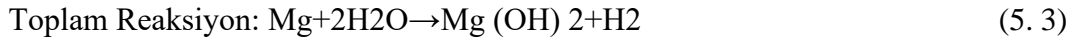
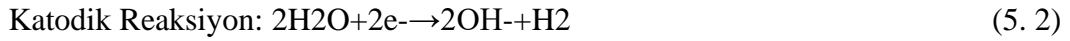
## BÖLÜM 5

### Mg ALAŞIMLARININDA KOROZYON, AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ

#### 5.1. KOROZYON

Mükemmel yüksek mukavemet ve ağırlık oranına sahip magnezyum alaşımlarının kullanım alanlarını sınırlayan en önemli problemlerden biri korozyon dirençlerinin düşük olmasıdır. Bu problemin çözümü için son günlerde yapılan çalışmalar sırasıyla alaşım elementi ilavesi, kaplama teknolojileri ve yüzey işlemlerini kapsamaktadır [81].

Mg alaşımlarındaki korozyon mekanizması oluşturan reaksiyonlar şöyledir:



Mg ve oksit film sulu NaCl ortamında H<sub>2</sub>O ile reaksiyona girdiğinde Mg(OH)<sub>2</sub> filmi biriktirmektedir. Bu Mg (OH)<sub>2</sub> filmi Cl<sup>-</sup> varlığında çabuk çözünmektedir. Bu nedenle Mg'ü çok etkili koruyamadığı açıktır [82]. Bu tür korozyon davranışının nedenini daha da aydınlatmak için ZM21 Mg'nin kristalografik yönelimi de analiz edildi.

Literatürde bakıldığında ZM21 üzerine yapılan çalışmalar azdır. 28 gün boyunca Hank çözeltisine daldırıldıktan sonra haddelenmiş ve 4. geçişte % uzama ZM21 Mg

%12.82 ve %16.6 olarak rapor edilmiştir. Bu, ZM21 Mg alaşımlarının yüksek mekanik dayanım gerektiren cerrahi alanlar için uygun olduğunu gösterir. Böylece ECAP, magnezyum implantların mekanik bütünlüğünü başarıyla geliştirdi. %99'luk hücre canlılık oranı, 4. geçiş ECAP ZM21 Mg'nin doğada biyouyumlu olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, 4. geçiş ECAPed ZM21, gelecekteki in vivo çalışmalar için umut verici adaylar olduğunu rapor etmiştir [80].

### **5.1.1. Korozyon Türleri**

Galvanik korozyon en fazla görülen ve zarar veren korozyon türü olarak kayıtlara geçmiştir. Magnezyum alaşımları diğer mühendislik metalleri ile beraber olduğunda negatif korozyon potansiyellerinden dolayı anot olarak davranır. Galvanik korozyona etki eden en önemli faktör anot ve katot arasındaki potansiyel farkıdır. Bununla beraber anodik ve katodik polarizasyon direnci bir diğer etken olduğu bilinmektedir. Bilindiği üzere Fe, Ni, Co, Cu, W, Ag ve Au sulu çözelti içerisinde Mg alaşıma göre daha soylu davranır. Bunun yanında Mg alaşımları kendi içinde galvanik korozyona uğrayabilir. Galvanik çiftlerin meydana gelmesinde mikro ölçekte bileşimler mikroyapı ve kristal yönelimlerine bağlı olarak elektrokimyasal aktivitelerin etkili olabileceği belirtilmiştir. Genellikle ikincil fazlar, intermetalikler ve emprüte içeren partiküller katod olarak, az miktardaki Mg alaşımındaki elementler mikro anot olarak davranmaktadır [83].

Çukur korozyonu Mg alaşımlarında homojen olmayan kristal yapılar mesela  $Mg_{17}Al_{12}$  ikincil fazını içeren Mg alaşımı çukur korozyonun oluşumuna sebep olabilmektedir. Böyle ikincil fazların daha fazla standart voltaj gösterdiği ve etrafındaki Mg matriks ile elektron alışverişine girmekte olduğu bildirilmiştir. Bu sistemde korozyon morfolojisi delik şeklinde ortaya çıkmaktadır [74]. Bir diğer çalışmada Mg alaşımlarının korozyon direncine üzerinde ikincil fazların etkisini araştırmışlar. Çalışmada ikincil fazların tane içlerinde ve tane sınırlarında oluştuğu ve sanki mikro-katod olarak işlev yaptığı aktarılmıştır. [84].

Taneler arası korozyon tane sınırlarında ikincil fazların etkisiyle oluşan bir korozyon tipidir. Tane sınırlarında ikincil fazların veya segregasyonların oluşumu olağandır. Bu korozyon tipinde çoğunlukla tane sınırı yok olur [85].

Filiform korozyon metal yüzeyinde oluşmaktadır. Boya yada koruyucu kullanılan metallerin yüzeylerinde aktif olarak galvanik hücreler filiform korozyonunu meydana getirir. İlk etapta delik şeklinde olan korozyon sonrasında yüzeydeki oksijen yoğunluğuna bağlı olarak foliform halde yayılmaktadır [86].

Yarık korozyonu magnezyum alaşımlarında çok az rastlanan bir korozyon türüdür. Dar alanda çatlak halinde ilerleyen hidroliz reaksiyonu bu korozyon tipini tetiklemektedir. Yani Mg hidroksit magnezyum ve çatlak arasında etkiyi hızlandırır. Stres korozyonu haddelenmiş ve ekstrüzyonlu magnezyum alaşımlarında görülebilir ve hızlı soğuma işlemi görmüş döküm alaşımlarında da görülebilir. Morfolojik olarak ise tanelerarası ve tane içi olarak gruplandırılabilir [87].

### **5.1.2. Alaşım Elementlerinin Mg'un Korozyon Davranışına Etkileri**

Alüminyum (Al) miktarının artması ile birlikte  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının oluşumu artmaktadır. Artan  $Mg_{17}Al_{12}$  ikincil fazın metal kaybını arttırdığı ve ayrıca stres korozyon çatlaklarının daha fazla ortaya çıktığı bilinmektedir [88].

Mangan (Mn) elementinin korozyon direnci Saf Mg için Mn'nın korozyon direnci üzerine etkisi pek yoktur. [88].

Çinko (Zn) elementine bakıldığında  $Mg_xZn_y$  türündeki ikincil fazların lokal olarak katodik davranışları nedeniyle Mg'un korozyon direncini zayıflattığı bilinmektedir [88].

Neodimyum (Nd) İkili Mg-Nd alaşımlarında  $Mg_3Nd$  oluşmakta ve saf Mg'a göre daha etkili bir katodik davranış sergilemektedir. Artan Nd miktarıyla birlikte sürekli artan katodik etkisi bırakmaktadır. Fakat La ve Ce'a göre metal kaybında daha az

artış yapmaktadır Bir diğer katkısı yüzey filmi oluşturmastır fakat bu konu hakkında çalışma çok azdır [88].

Gadolinium (Gd) Mg alaşımlarının korozyon direncine etkisi üzerinde bilgiler halen eksiktir. Mg-Al alaşımlarında  $Al_2Gd$  ve Al-Mn-Gd ikincil fazlar oluşmaktadır. Bu sırada Al tüketilirken  $Mg_{17}Al_{12}$  ikincil fazın hacim fraksiyonu azalır ve bir miktar katodik reaksiyonlar azalır. Fakat söz konusu durumun netleşmesi için uzun süreli testlerin yapılması yarar sağlayabilir [88].

Kalsiyum(Ca) miktarının % olarak artmasıyla birlikte tanelerde incelme olduğu fakat ilk etapta azalan korozyon direncinin sonrasında arttığı rapor edilmiştir. Burada bu ikincil fazlar Mg korozyonunu geciktirmektedir [89].

Kalay (Sn) Magnezyum alaşımlarındaki  $Mg_2Sn$  intermetalik bileşiklerinin, şiddetli mikrogalvanik korozyondan sorumlu katot fazı olduğu varsayılmıştır. Bununla birlikte,  $Mg_2Sn$  fazlarının Mg-Al alaşımlarının mikrogalvanik korozyonunu nasıl etkilediğine dair eksik bir anlayış bulunmaktadır [90].

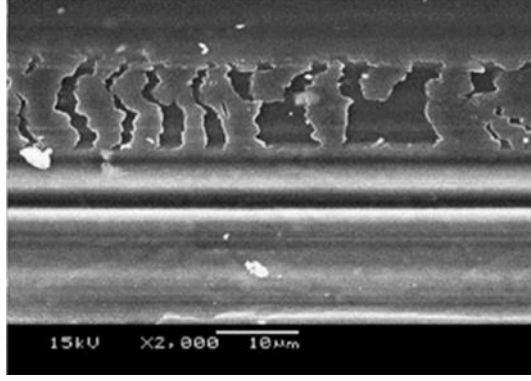
Lantan (La) korozyon davranışını geliştirmektedir. Yapılan araştırmalarda mikroyapı ve daha fazla korozyon önleyici film tabakası oluşturduğu bildirilmiştir [88].

## **5.2. AŞINMA**

Aşınma katı halde bulunan iki yüzeyin birbiri üzerinde kayma, darbe, yuvarlanma gibi olaylardan sonra gelişen malzeme kaybı olarak ifade edilebilir [91].

### **5.2.1. Adhesiv Aşınma**

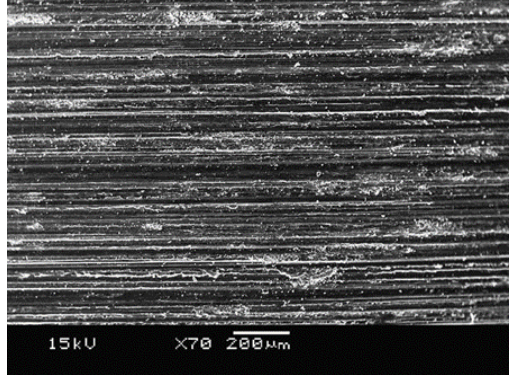
Adhesiv aşınma adhesif kuvvetler sonucu iki katı malzeme arasında yani birbirine yapışmaya benzer tarzda malzeme transferine neden olan aşınma türüdür [15,92]. Şekil 5.1.'de adhesiv aşınma SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 5.1. Adhesiv aşınma SEM görüntüleri [15,92].

### 5.2.2. Abrasiv Aşınma

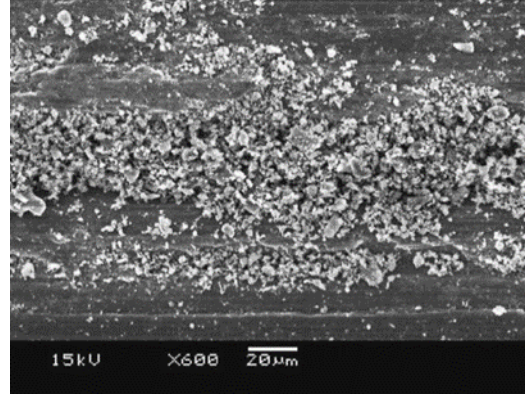
Abrasiv aşınma katı bir malzemenin kendisinden daha sert ya da aynı sertlikte olan bir materyale karşı sürtünmesi ile meydana gelir [93]. Aşınma yönünde oluk ve çizik şeklinde oluşur. Partiküller ayrılmaktadır [94]. Şekil 5.2.'de abrasiv aşınma SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Abrasiv aşınma SEM görüntüsü [92].

### 5.2.3. Oksidasyon

Oksidasyon aşınma esnasında ısınma ile oluşan eriyik haldeki partiküllerin varlığı oksidasyon aşınmasına oluşturur. Oksit partiküller aşınmış boşluklara yapışmaktadır. malzemenin teması azalmakta ve sonuç olarak aşınma hızı azalmaktadır [94]. Şekil 5.3 Oksidasyon aşınması örnek sem görüntüsü.



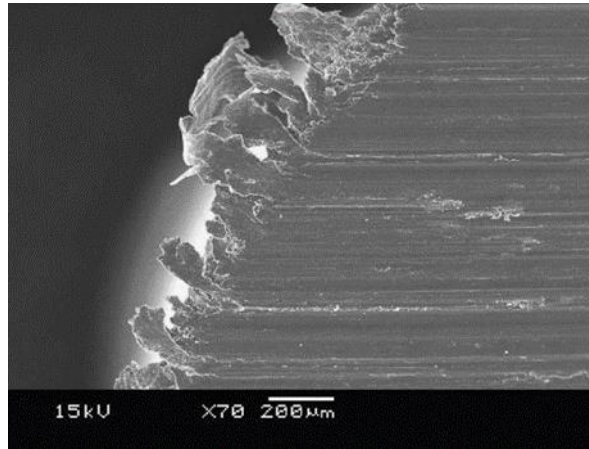
Şekil 5.3. Oksidasyon aşınma SEM görüntüsü [92].

#### 5.2.4. Termal Yumuşama ve Ergitme

Termal yumuşama ve Ergitme, aşınma esnasında yüksek aşınma hızı ve ısı malzemenin yığın halinde aşınmasına sebep olur. Aşınma hız değerinde kayda değer artış olmaktadır. Mg alaşımlarında bu durum çok meydana gelir [95].

#### 5.2.5. Yapraklanma Aşınması

Yapraklanma aşınması aşınma yönüne dik yönde kısa boylu çatlaklar şeklinde olmaktadır. Yaprak şekline benzeyen partiküller zamanla yarıklar oluşmasına neden olmaktadır [95]. Şekil 5.4'te yapraklanma aşınması SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5.4. Yapraklanma aşınması SEM görüntüsü [92].

## BÖLÜM 6

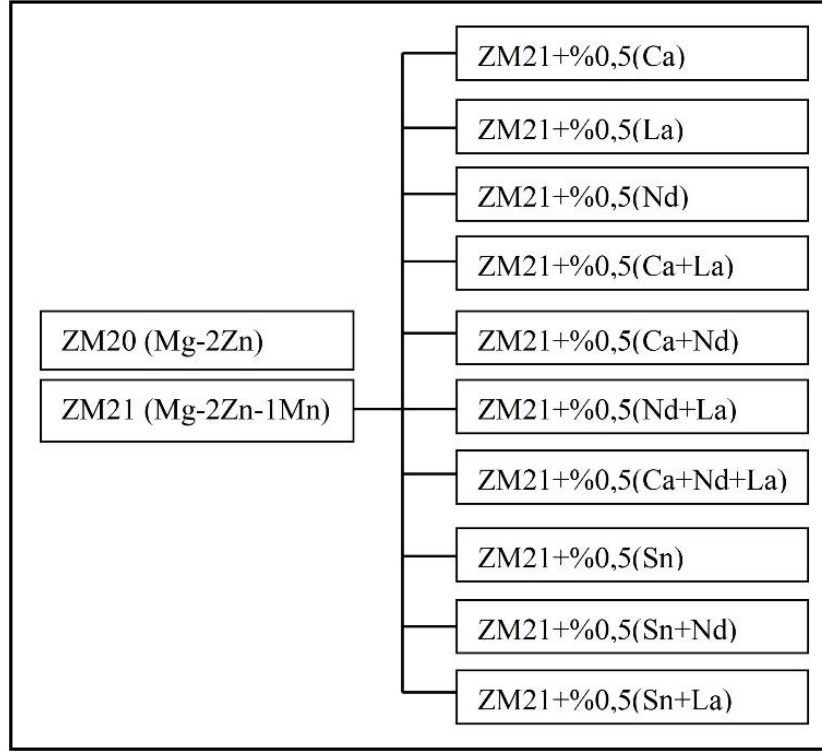
### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, (Mg-2Zn) ZM20 ve (Mg-2Zn-1Mn) ZM21 alaşımları sonrasında ZM21 alaşımına %0,5(Ca), ZM21+%0,5(La), ZM21+%0,5(Nd), ZM21+%0,5(Ca+La), ZM21+%0,5(Ca+Nd), ZM21+%0,5(Nd+La), ZM21+%0,5(Ca+Nd+La), ZM21+%0,5(Sn), ZM21+%0,5(Sn+Nd), ZM21+%0,5(Sn+La) ilavesiyle 10 ayrı alaşım elde edilmiştir.

Elde edilen döküm alaşımların bir bölümüne 400 °C'de 16 saat homojenleştirildikten sonra %80 haddeme oranı ile 4.7 haddeme hızında,  $\phi = 0,2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanmıştır. Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

#### 6.1. ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ

Çalışma kapsamında öncelikle alaşımların üretimi için gerekli ön çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda belirtilen alaşımların üretim sırasını gösteren üretim şeması Şekil 6.1'de verilmiştir. Çalışmada önce, ZM20 ve ZM21 alaşımları üretilmiş ve sonrasında elde edilen sonuçlar neticesinde ZM21 alaşımından devam edilmesi uygun görülmüştür.

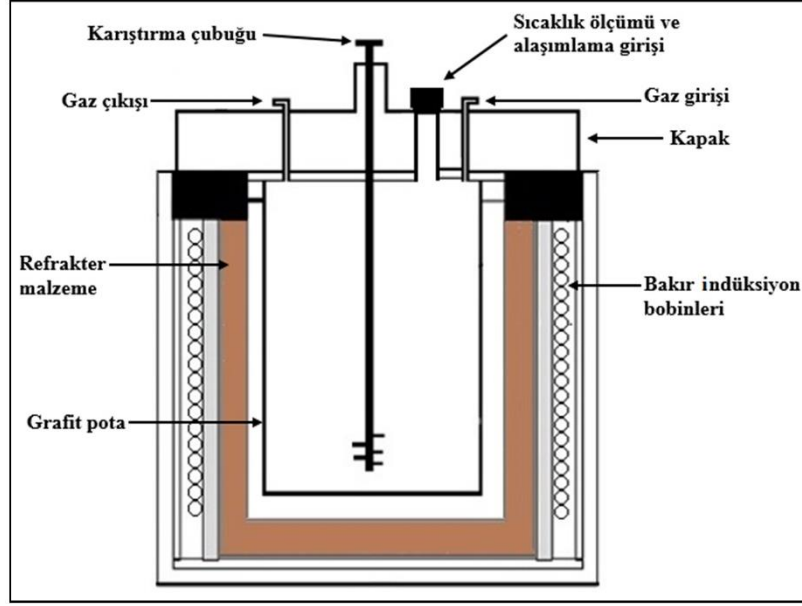


Şekil 6.1. Üretilen alaşımların şematik olarak gösterilişi.

### 6.1.1. Ergitme ve Alaşımlama Pratiği

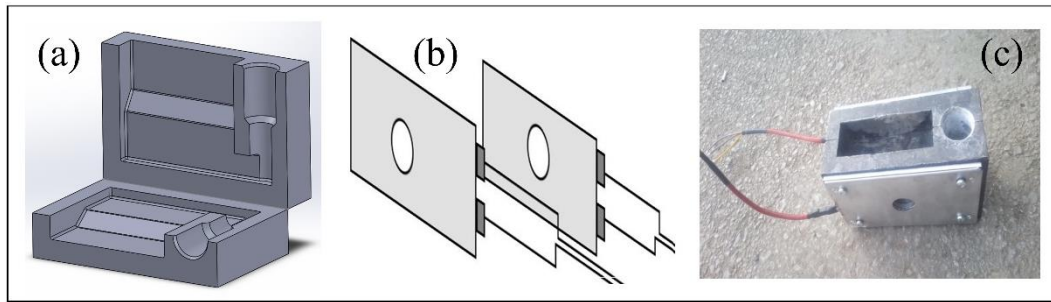
Alaşımların üretiminde kullanılan indüksiyon döküm sistemi, Şekil 6.2’de şematik olarak gösterilmektedir. Ergitme ocağının dış gövdesi çelik malzeme ile iç kısmı ise refrakter tuğla ile kaplıdır. Ocak içi sıcaklığının kontrolü termokupul ile sağlanmıştır. Magnezyum alaşımlarının ergitimi, ocak içine yerleştirilen grafit pota içerisinde yapılmıştır. Malzemeler indüksiyon ocağına yüklenerek 750 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Pota içerisindeki eriyiğin karıştırılmasında, grafitten yapılmış pervaneli bir mil kullanılmıştır. Ergitme ve döküm işlemi esnasında ortamın atmosferle temasını kesmek için koruyucu gaz olarak ocak içine Argon ve kalıp içerisinde sürekli CO<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub> gazı akışı sağlanmıştır.



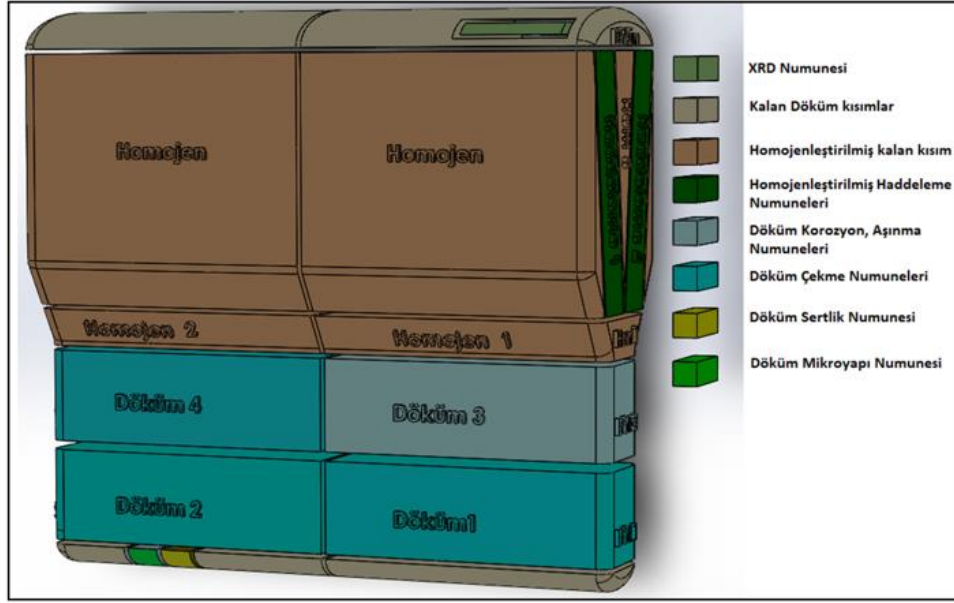


Şekil 6.2. İndüksiyon ergitme ocağı.

Ergitme ve karıştırma tamamlandıktan sonra, Şekil 6.3’de görülen ısıtma plakaları ile kalıp 250 °C ye ısıtılmış ve iç kısmı  $\text{CO}_2+\text{SF}_6$  gazı ile doldurulan metal Y kalıba alaşımların döküm işlemleri Argon ve  $\text{CO}_2+\text{SF}_6$  gazları yardımıyla yapıldı. Döküm yöntemi olarak Gravity yöntemi kullanıldı. Şekil 6.4 de ise döküm parçanın kalıptan çıktıktan sonraki katı model resmi görülmektedir. Şekil 6.5 de Döküm parçaların kalıptan çıktıktan sonraki görüntüsü görülmektedir. Isıtıcı plaka yardımıyla daha sorunsuz bir döküm gerçekleşmiştir.



Şekil 6.3. (a) Döküm kalıbı resmi, (b) Isıtma plakaları resmi, (c) Kalıp montajı.



Şekil 6.4. Döküm parçaların kalıptan çıktıktan sonraki numune bölgelerini gösteren katı modeli.



Şekil 6.5. Döküm alaşımının kalıptan çıktıktan sonraki görüntüsü.

Yapılan deneysel çalışmalarda, alaşımların hazırlanması için, %99,9 saflıkta Mg, %99,9 saflıkta Zn, %99,9 saflıkta Sn metalleri ile master alaşım halinde Mg-%10Mn, Mg-%20Ca ve Mg-%30Nd, Mg-%25La elementleri sırasıyla Bilginoğlu Endüstri, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmalarından temin elde edilmiştir. ZM20, ZM21 alaşımların üretiminde ilk olarak saf haldeki küçük magnezyum külçeleri grafit pota içine yerleştirilmiştir. Ardından sıcaklık ~750 °C' ye çıkarılmıştır. Bir diğer aşamada ergiyiğin içerisine saf Zn alaşım elementi ve Mg-%10 Mn master alaşımı parçaları yükleme haznesinden katılmıştır. Element ilavelerinin ardından sıvı metal (grafit)

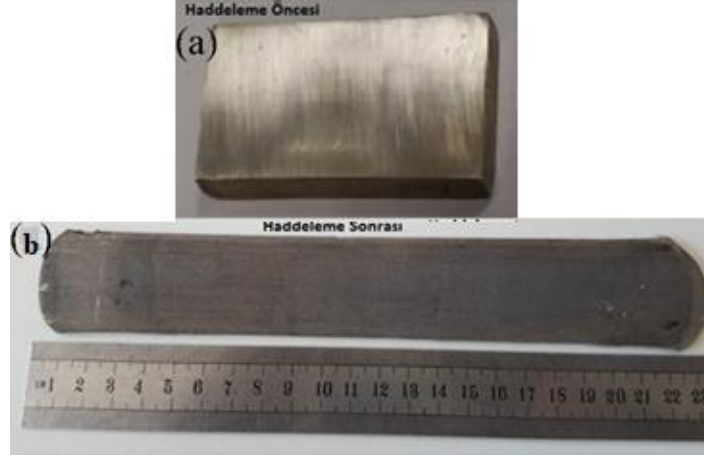
karıştırma çubuğu ile karıştırılarak homojen bir yapı oluşturmak için sabit bir hızla bir süre karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin sonrası bir süre beklendikten sonra eriyik metal alaşımı döküm için hazırdır. Döküm sonrasında Şekil 6.5'te gösterilen döküm parçalar elde edilmiştir.

### **6.1.2. Homojenizasyon İşlemi**

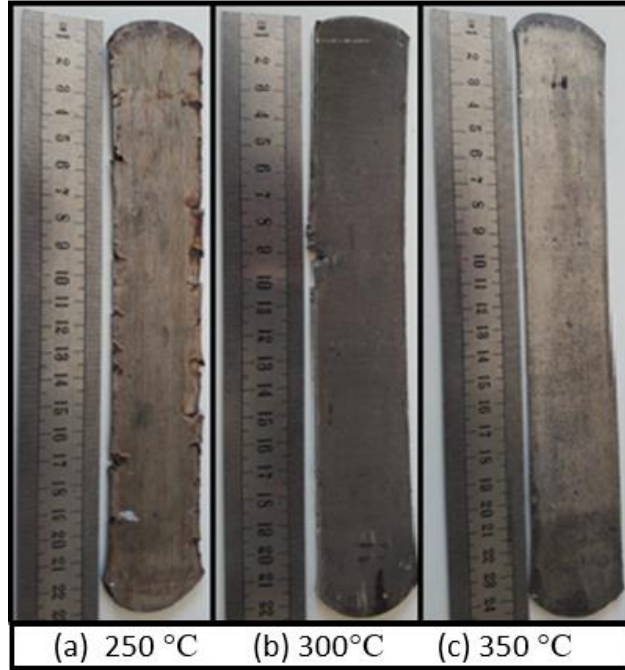
Döküm yapımı sonrası döküm parçaların yapısında olması muhtemel olan küçük ölçekteki segregasyon, uniform olmayan tane boyutu, düzensiz tane dağılımı gibi kusurları önlemek amacıyla homojenleştirme ısıl işlemi yapılmıştır. Döküm ingotlar homojenleştirme işlemi için parçalar alüminyum folyo ile sıkıca sarılmıştır. Ardından  $\text{SiO}_2$ +Grafite kumlarının birleşiminden oluşan karışımın içine gömülerek ve  $400\text{ }^\circ\text{C}$  civarında 16 saat boyunca homojenleştirme işlemi için fırında bekletilmiştir. Ardından fırından çıkarılan numuneler uniform hale gelen yapıyı korunmak amacıyla, aniden suya daldırılarak soğutulmuş ve böylece daha uniform bir yapı oluşması sağlanmıştır. Bu homojen yapı malzemenin tüm bölgelerinde benzer mekanik özelliklerin oluşmasını temin eder.

### **6.1.3. Haddeme İşlemi**

Şekil 6.6'da haddeme numunelerinin aşamaları görülmektedir. Şekil 6.7'de haddeme sıcaklığını belirlemek için  $250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $350\text{ }^\circ\text{C}$  olarak 3 farklı sıcaklıkta haddelenmiş ZM21 alaşımlarının yüzey kalitesi gözlemlendiğinde  $250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $300\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklarında haddelenmiş numunelerin yanıl yüzeylerden çatladığı, bu yüzden en pürüzsüz yüzeyin elde edildiği en uygun haddeme sıcaklığı  $350\text{ }^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Sıcaklık  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıktığında HSP kafes sistemi kayma ile şekil değiştirebileceği, literatürde magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde en önemli etken sıcaklık olduğu, az sayıdaki kayma sistemi ile  $225\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde prizmatik ve piramidal sistemlerin aktif olduğu rapor edilmiştir [56].



Şekil 6.6. (a) Hadde numunesi, (b) Haddelenmiş numune



Şekil 6.7. 250 °C, 300 °C, 350 °C'de Hadde işlemi görmüş ZM21 alaşımı

Çizelge 6.1'de haddeleme parametreleri, Çizelge 6.2'de pasolardaki kalınlık ölçüleri gösterilmiştir. Bu çalışmada haddeleme sıcaklığı 350 °C olarak seçilmiş ve %80 haddeleme oranı, 4,7 haddeleme hızı, Numunelere geçiş başına yaklaşık olarak  $\varphi = 0.2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanacaktır. 350 °C sıcaklıkta 60 dakika bekleyen numuneler her pasodan ardından, bir sonraki paso başlamadan önce sıcaklık kaybını önlemek için 350 °C'de 15 dakika bekletilmiştir [1,2].

Çizelge 6.1. Haddeme parametreleri

| Numunelere geçiş başına yaklaşık olarak $\varphi = 0,2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanacaktır.<br>$\varphi = -\ln(h_{n+1}/h_n)$ burada n hadde geçişinin sayısıdır ve $h_n$ geçişten sonra numune kalınlığıdır. |  |   |
|--|--|---|
| Paso sayısı  | 10 mm'den 2 mm'ye % 80 hadde oranı ile inerken uygulanan kalınlık (mm) | Hadde hızı 4.7 m/dak. 'dır. Her pasodan sonra numuneler ilgili hadde sıcaklıklarında 10 dakika bekletilecektir. |
| 1  | 8.187  |   |
| 2  | 6.702  |   |
| 3  | 5.487  |   |
| 4  | 4.492  |   |
| 5  | 3.677  |   |
| 6  | 3.010  |   |
| 7  | 2.464  |   |
| 8  | 2  |   |

Çizelge 6.2. Haddeme pasolarındaki kalınlık ölçülerinin açıklaması

| Paso sayısı | İlk kalınlık ölçüsü | Son kalınlık ölçüsü | İncelme kalınlığı ölçüsü |
|-------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 paso      | 10                  | 8.187               | 1,813                    |
| 2 paso      | 8.187               | 6,702               | 1.485                    |
| 3 paso      | 6,702               | 5.487               | 1.215                    |
| 4 paso      | 5.487               | 4.492               | 0.995                    |
| 5 paso      | 4.492               | 3.677               | 0,815                    |
| 6 paso      | 3.677               | 3.010               | 0,667                    |
| 7 paso      | 3.010               | 2.464               | 0.546                    |
| 8 paso      | 2.464               | 2                   | 0.464                    |

## 6.2. ALAŞIM KARAKTERİZASYONU

Alaşımın üretiminin tamamlanmasının ardından döküm, homojenleştirme ve haddeleme sonrası mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Sertlik, çekme, korozif aşınma ve daldırma korozyon, potansiyodinamik korozyon deneyleri ise hem döküm hem de haddeleme numunelerine uygulanmıştır.

### 6.2.1. XRF Analizi

Döküm alaşımların üretiminden sonra kimyasal analizleri XRF (X-Işımları Floresans) yöntemi kullanılarak Rigaku ZSX Primus II marka cihaz ile yapılmıştır. XRF yönteminde her bir elemente özgü farklı dalga boylarına sahip floresans adı verilen ikincil ışımalarından faydalanarak alaşım elementlerinin % ağırlık oranları ölçülmüştür.

### 6.2.2. Mikroyapı ve Faz Analizi

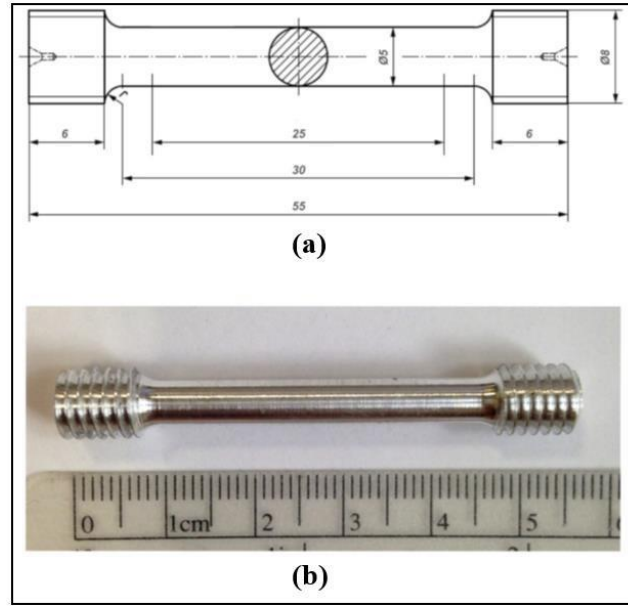
Mikroyapı analizlerinde optik mikroskop ile metalografik inceleme yapılması için numunelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1200 ve 2000 mesh zımparalar ile saf su yardımıyla zımparalanmıştır. Ardından 1 µm alümina kullanılarak numunelerin yüzeyleri parlatıldı, saf su ve alkolle numunelerin yüzeyi durularak kurutulmuştur. Daha sonra yüzeyi kurutulmuş numuneler pikrik asit ile dağlama işlemi yapılarak numuneler tekrar sırasıyla saf su, alkol ile temizlenip kurutuldu ve Nikon marka optik mikroskopta inceleme yapılmıştır. Ardından Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı ile SEM görüntüleri ve EDX analizleri alınmıştır. Döküm sonrası tüm numunelerin XRD profilleri Rigaku Ultima IV marka cihaz ile 10°-90° tarama açısı aralığında ve 3°/dakika tarama hızında yapılmıştır.

### 6.2.3. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

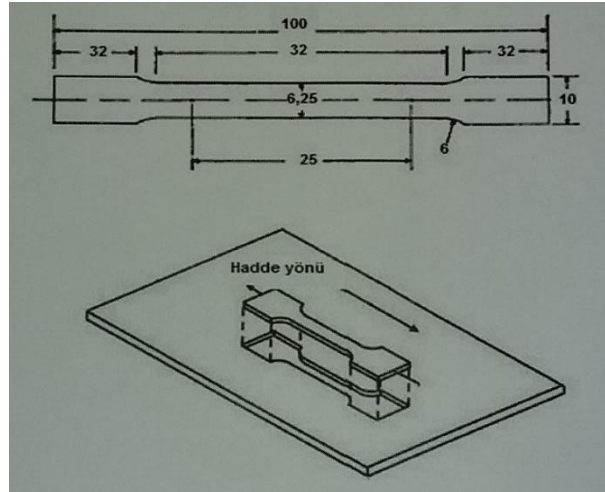
Döküm ve haddelenmiş alaşımların oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri, sertlik ve çekme testleri ile belirlenmiştir.

**Sertlik Testi:** Döküm, homojen ve haddeme numunelerinin sertlikleri Vickers sertlik testi ile ölçülmüştür. Vickers sertlik testinde 0,3 kg yük altında piramit şekilli batıcı uç ile 15 saniye bekletilmiş ve iz çapları ölçülerek sertlik değerleri belirlenmiştir.

**Çekme Testi:** Döküm ürünlerin çekme numuneleri ISO 6892-1 standardına göre Şekil 6.8' de gösterildiği gibi yapılmıştır. Döküm alaşımların bir kısmı 4 parça kesilerek sonra her bir parçadan çekme numuneleri çıkarılmıştır. Eşit ve minimum hata içeren çekme numuneleri elde edilmiştir. Haddelenmiş alaşımlarından ise, Şekil 6.9' da görüldüğü gibi hadde yönünde ASTM A370-12a standartlarına göre çekme numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 6.8. Vida başlı çekme numunesi. (a) Şematik resmi, (b) İşlenmiş hali.



Şekil 6.9. Hadde çekme testi numunesi ve ölçüleri.

Numunelere yapılan Çekme testleri Zwick/Roell Z600 çekme cihazında,  $1,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  çekme hızında ve oda sıcaklığında uygulanmıştır. Tüm alaşımlardan çekme testi için en az 3 adet numune hazırlanmıştır. Her alaşım için çekme testi uygulanan 3 numuneden uygun görülen bir numuneye çekme testi sonrası kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve kırılma mekanizmaları gözlemlenmiştir.

#### 6.2.4. Korozyon Karakterizasyonu

Alaşımların döküm ve hadde haldeki numunelerin korozyon özelliklerinin karakterizasyonu %3,5 NaCl içinde sabit daldırma ve potansiyodinamik polarizasyon testleri ile yapılmıştır. Daldırma ve potansiyodinamik polarizasyon korozyon testleri için, numunelerin yüzeyleri 1200'lük zımparaya kadar zımparalanarak, yüzeylerde kalıntı ve boşluk gibi korozyon hızını etkileme potansiyeli olan kusurlar giderilmiştir.

**Daldırma Korozyon Testi:** Alaşımların daldırma korozyon testi için döküm ve haddelenmiş alaşımlardan, 2x10x10 mm ebatlarındaki dikdörtgen prizma şeklinde numuneler hazırlanarak ve yüzeyleri zımparalama sonrası ultrasonik cihaz içinde saf su ile temiz hale getirilmiştir. Numunelerin yüzey alanları hesaplanmış ve daldırma öncesi ilk ağırlıkları 0,0001 gr hassasiyeteki terazi ile ölçülmüştür. Bu numuneler cam kavanozların içine eşit miktarda konulan %3,5 NaCl içerisine file yardımı ile asılı halde konulmuştur. Daldırılan bu numuneler 3, 6, 9, 12, 24, 48 ve 72 saat ara ile çözüldükten çıkarılarak, yüzeyleri temizlenmiş ardından ağırlıkları ölçülüp kaydedilmiştir. Numuneler yukarıdaki saat aralıklarında çözüldükten çıkarılarak, 180 gr/L oranında saf su içerisinde hazırlanan kromik asit çözeltisi içerisinde ultrasonik olarak numunelerin 10 dakika bekletilmesi ile yüzeyde oluşan korozyon ürünleri temizlenmesi sağlandı. Sonrasında 5 dakika saf su içerisinde ultrasonik olarak ve ardından alkol ile temizlenip tekrar %3,5 NaCl içerisine daldırılmıştır. Her bir saat için kaybolan ağırlıklar hesaplanarak toplamdaki ortalama korozyon hızları belirlenmiştir. Daldırma korozyon testi için her numunedan 3 adet yapılarak, bulunan sonuçların ortalaması alınmıştır. 72 saat daldırma testi uygulandı ve sonrasında her bir numune için korozyona uğramış yüzeylerden SEM ve EDX analizleri yapılması ile korozyon mekanizmaları üzerinde inceleme yapılmıştır.

**Potansiyodinamik Polarizasyon Testi:** Test numuneleri; döküm için döküm sonrası malzemelerden alınarak hazırlanırken, haddeleme ile üretilmiş malzemedan haddeleme yönünde alınmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon testi için numuneler hazırlanırken, numunelerin yan kısımları aşındırılmış ve aşınan bu bölgeden bakır tel ile sarılarak epoksi reçine ile bakır telin diğer 10 cm dışarıda kalacak şekilde kaplanmıştır. Test edilecek yüzeyler (SİC) zımparalar ile zımparalanıp hazırlanmıştır.



Ardından 1200'e kadar zımparalanmış numunelerin yüzeyine orta noktasında  $0,25 \text{ cm}^2$  daire şeklinde boş bir alana sahip yapışkan bir bant, numune orta yüzeyine yapıştırılmış ve böylece bütün numunelerin korozyon testleri eşit alanda yapılmasına olanak tanınmıştır. Ayrıca yapışkan bant ile epoksi ile numunenin temas yüzeyinde herhangi bir olumsuzluk olmasının önüne geçilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon testleri %3,5 NaCl içerisinde, bilgisayar kontrollü DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat ile yapılmıştır. Deneyin yapılışında Karşıt elektrot için grafit çubuk, referans elektrot için doymuş kalomel elektrot (SCE) kullanılmış ve çalışma elektrodu olarak numune yüzeyinin kullanılarak klasik üç elektrotlu hücre kullanılarak yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri,  $1 \text{ mV.s}^{-1}$  tarama hızında,  $-0,25 \text{ V}$  (vs. açık devre potansiyeli,  $E_{oc}$ )  $+0,25 \text{ V}$  (vs.  $E_{oc}$ ) aralığında tarama ile oluşturulmuştur. Her parametre için 3 tane potansiyodinamik polarizasyon testi yapıldı ve bulunan sonuçların ortalaması alındı.

**Korozif Aşınma Testi:** Döküm ve haddelenmiş numunelerin aşınma testleri, (ileri-geri) aşınma test cihazı ile sabit yük altında, sabit hızda ve sabit mesafede ölçülerek yapılmıştır. Aşınma testinin başlaması için numuneler cihazdaki numune koyma bölgesine uyacak şekilde hazırlanıp yüzeyleri 1200 numaralık zımparaya kadar zımparalanarak, saf su ve alkol ile temizlenmiştir. Aşınma testleri 20N yük altında,  $0,1 \text{ m/s}$  kayma hızında ve toplamda 400 m kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma deneyi sırasında sürtünme kuvveti, tribometre koluna bağlanmış bir yük hücresi ile ölçülüp anlık veriler doğrudan bilgisayara kaydedilmiştir. Batıcı uç malzemesi için AISI 52100 kalite yüksek sertliğe sahip çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma miktarı mg cinsinden hassas terazide tartılarak hesaplanmıştır. Spesifik aşınma oranı katsayısı her yüz metrede bulunan kayıp değerinin  $(\text{g}/(\text{m.N})) \cdot (10^{-5})$  eşitliğinde kullanılması ile hesaplanmıştır. Aşınma hızı ise tüm alaşımların sadece 400 m'de bulunan kayıp değerinin  $(\text{g}/(\text{m.N})) \cdot (10^{-5})$  eşitliğinde kullanılması ile elde edilmiştir. Burada g:gram, m:metre, N:Newton'dur.

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

#### 7.1. ALAŞIMLARIN KİMYASAL ANALİZİ

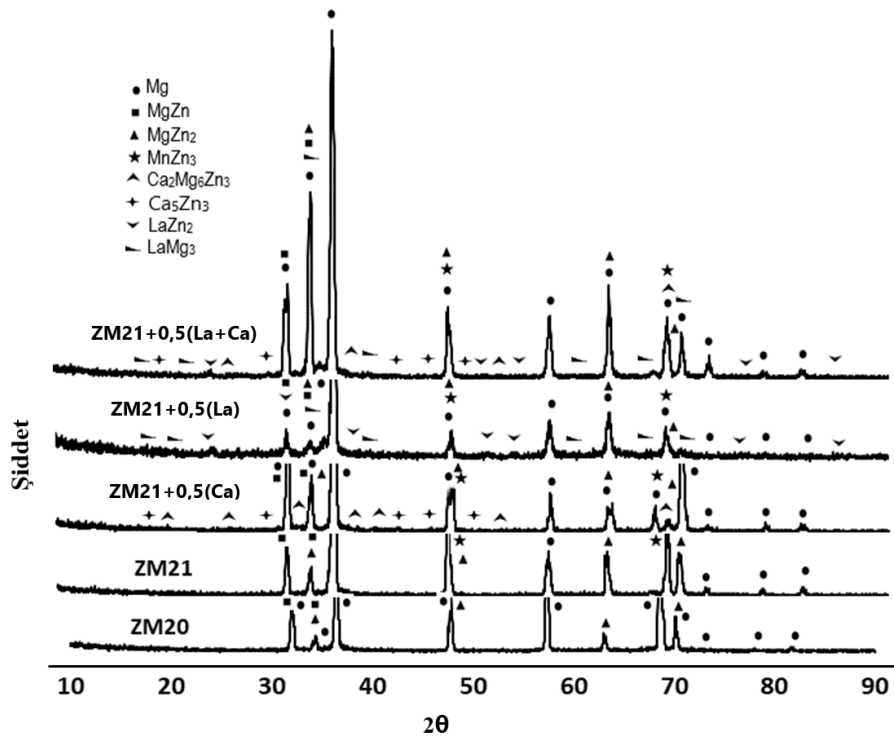
Üretilen alaşımların tümüne döküm sonrası XRF analizleri yapılmıştır. Elde edilen kimyasal bileşimler Çizelge 7.1’ de verilmiştir. Ana alaşım elementleri olan Mg, Zn ve Mn alaşımlarının bileşiminde küçük farklılıklar olsa da alaşımlardaki bileşimler istenen aralıklara uygundur. Ayrıca her alaşım ASTM (A275) standardına göre isimlendirilmiştir.

Çizelge 7.1. Alaşımların kimyasal analiz sonuçları.

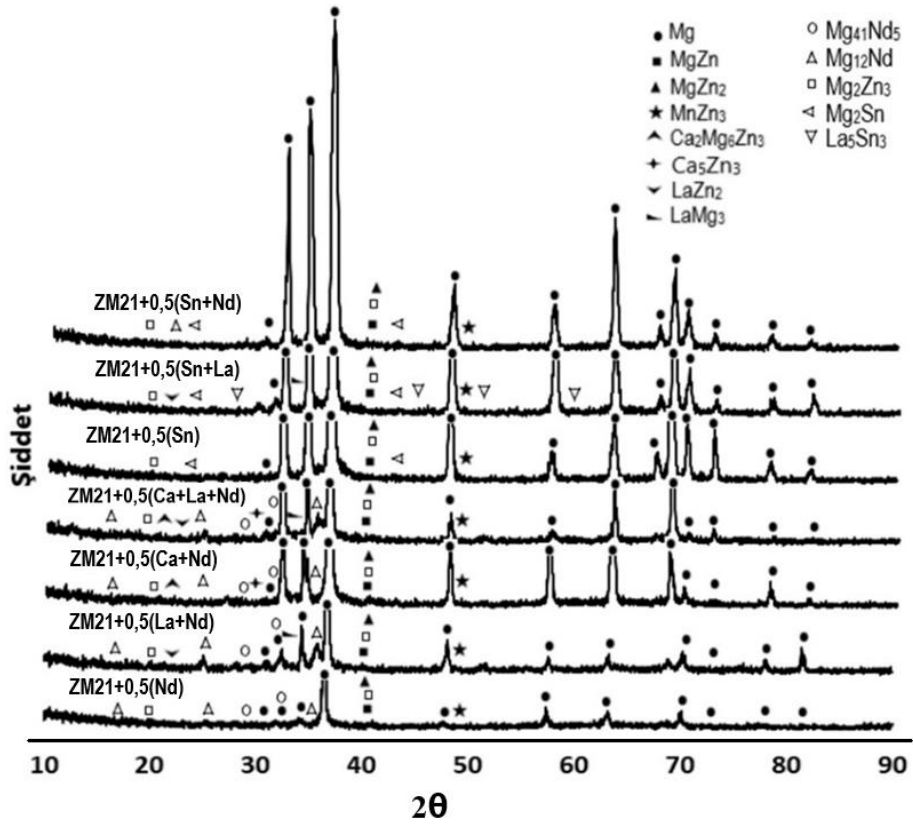
| Alaşımlar          | Kimyasal Bileşim (Ağırlıkça %) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | Zn                             | Mn    | La    | Ca    | Nd    | Sn    | Al    | Si    | Sr    | Mg    |
| ZM20               | 1,994                          | 0,010 | -     | 0,011 | -     | -     | 0,024 | 0,021 | 0,002 | Kalan |
| ZM21               | 2,053                          | 0,512 | -     | 0,031 | -     | -     | 0,021 | 0,011 | 0,002 | Kalan |
| ZM21+0,5(Ca)       | 2,192                          | 1,296 | -     | 0,716 | -     | -     | 0,012 | 0,011 | 0,003 | Kalan |
| ZM21+0,5(La)       | 2,027                          | 1,146 | 0,679 | 0,063 | -     | -     | 0,011 | 0,019 | 0,001 | Kalan |
| ZM21+0,5(Nd)       | 2,074                          | 1,010 | -     | 0,065 | 0,599 | -     | 0,043 | 0,011 | 0,003 | Kalan |
| ZM21+0,5(Ca+Nd)    | 2,073                          | 1,099 | -     | 0,575 | 0,530 | -     | 0,012 | 0,012 | 0,005 | Kalan |
| ZM21+0,5(La+Ca)    | 2,048                          | 1,211 | 0,522 | 0,655 | -     | -     | 0,013 | 0,013 | 0,006 | Kalan |
| ZM21+0,5(La+Nd)    | 2,094                          | 1,087 | 0,590 | 0,048 | 0,572 | -     | 0,047 | 0,015 | 0,004 | Kalan |
| ZM21+0,5(La+Nd+Ca) | 2,060                          | 1,009 | 0,527 | 0,512 | 0,564 | -     | 0,041 | 0,014 | 0,003 | Kalan |
| ZM21+0,5(Sn)       | 2,018                          | 1,082 | -     | -     | -     | 0,515 | 0,032 | 0,002 | 0,001 | Kalan |
| ZM21+0,5(Sn+La)    | 2,089                          | 1,010 | 0,381 | -     | -     | 0,539 | 0,022 | 0,002 | 0,002 | Kalan |
| ZM21+0,5(Sn+Nd)    | 2,032                          | 1,039 | -     | -     | 0,540 | 0,501 | 0,074 | 0,002 | 0,001 | Kalan |

## 7.2. XRD ANALİZLERİ

Alaşımların XRD faz analiz sonuçları Şekil 7.1 ve 7.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre alaşımları sırasıyla incelediğimizde ZM20(Mg-2Zn) alaşımında yapı içerisinde  $\alpha$ -Mg ana matrisin yanı sıra MgZn, MgZn<sub>2</sub>, MgZn<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub> fazları görülmüştür. Bu durum [96,97]’de de bu fazların varlığı ifade edilmiştir. ZM21 alaşımında ise bu fazların yanı sıra yaklaşık % 1 ( $\pm 0,5$ ) Mn ilavesi ile MnZn<sub>3</sub> fazı olduğu tespit edilmiş ve bu fazlarla ilgili çalışmalar literatürde vardır [98,99]. Diğer ZM21 alaşımına element ilavesi ile bu fazlara ek olarak oluşan fazları incelediğimizde, bulunan fazlar üzerine çalışmalar ZM21’e benzer içeriğe sahip alaşımlarda yaygındır. Fakat ZM21 özelinde bu fazlarla ilgili çalışmalar çok sınırlıdır. Üretilen alaşımların fazları incelendiğinde yukarıda bahsedilen fazlara ilave olarak eklenen alaşım elementinin etkisi ile başka fazlarında oluştuğunu görmekteyiz. Bu bağlamda; ZM21alaşımına %0,5 La elementi ilavesi ile LaZn<sub>2</sub>, LaMg<sub>3</sub> fazlarının oluştuğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalarda da bu fazların varlığı teyit edilmiştir [100-102]. ZM21alaşımına %0,5 Nd element ilavesi ile Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub> Mg<sub>12</sub>Nd fazlarının varlığı görülmüştür. Literatürde bu fazlarla ilgili yapılan çalışmalar vardır [103-106]. ZM21 alaşımına %0,5 Ca element ilavesi ile Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub> fazlarının oluştuğu görülmüş ve bu fazların varlığı literatürde teyit edilmiştir. Bir diğer alaşım elementi ZM21 alaşımına %0,5(La+Ca) element ilavesi incelediğimizde Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>, LaZn<sub>2</sub>, LaMg<sub>3</sub> fazlarının varlığı tespit edilmiş ve bu fazların varlığı literatürde yapılan çalışmalar tarafından doğrulanmaktadır [98,101,102]. ZM21 alaşımına %0,5(La+Nd) element ilavesi ile LaMg<sub>3</sub>, LaZn<sub>2</sub>, Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub>, Mg<sub>12</sub>Nd fazlarının varlığı yapılan bir çok çalışmada görülmektedir [100-106]. ZM21 alaşımına %0,5 (Ca+Nd) element ilavesi ile Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>, Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub>, Mg<sub>12</sub>Nd fazlarının oluştuğu ve bu fazların ile benzer alaşımlar içerisinde araştırıldığı literatürde belirtilmiştir [98,99]. ZM21 alaşımına %0,5 (La+Ca+Nd) element ilavesi ile daha önceki alaşımlarda oluşan Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>, LaZn<sub>2</sub>, LaMg<sub>3</sub>, Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub>, Mg<sub>12</sub>Nd fazları bu alaşımda görülmüştür. Literatürde de bu fazlarla ilgili çalışmalar benzer alaşımlar üzerinde bulunmaktadır [98-109].



Şekil 7.1. Alaşımların faz analizleri



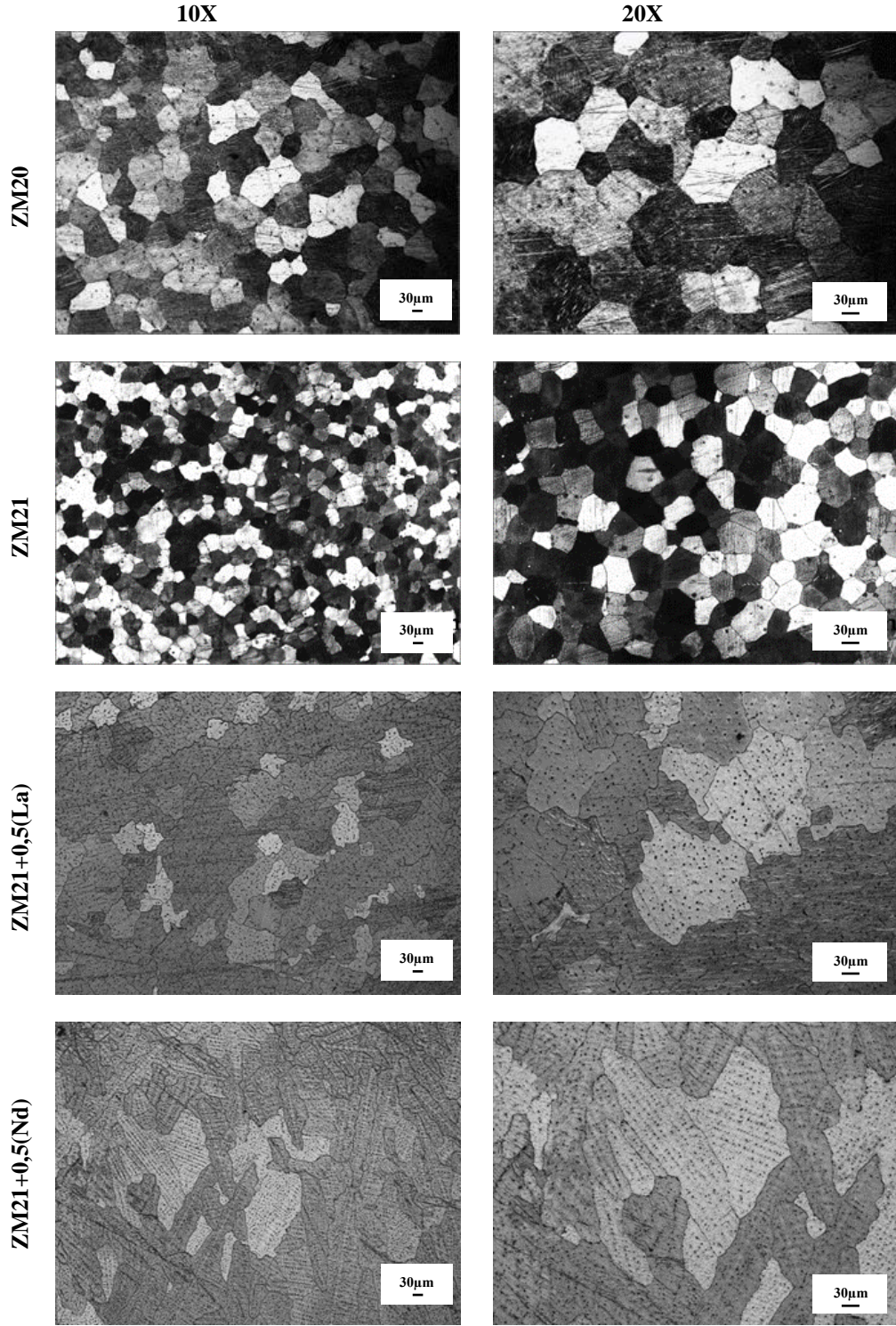
Şekil 7.2. Alaşımların faz analizleri.

ZM21 alaşımına %0,5 (Sn) element ilavesi ile Mg<sub>2</sub>Sn fazının oluştuğu grlmştir. Bu faz ile ilgili çalışmalar literatürde benzer alaşımlar üzerinde mevcuttur [110-112]. ZM21 alaşımına %0,5 (Sn+La) element ilavesiyle Mg<sub>2</sub>Sn, La<sub>5</sub>Sn<sub>3</sub>, LaMg<sub>3</sub>, LaZn<sub>2</sub> Fazları oluşmuştur[100,102], ve bu fazlarla ilgili çalışma literatürde benzer alaşımlar üzerinde mevcuttur [110-113]. ZM21 alaşımına %0,5 (Sn+Nd) element ilavesiyle Mg<sub>2</sub>Sn, Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub>, Mg<sub>12</sub>Nd fazlarının oluştuğu grlmştir. literatürde bu fazlar ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [103,113]. Fakat doğrudan ZM21 alaşımları üzerinden bu fazlarla ilgili çalışma sayısı azdır.

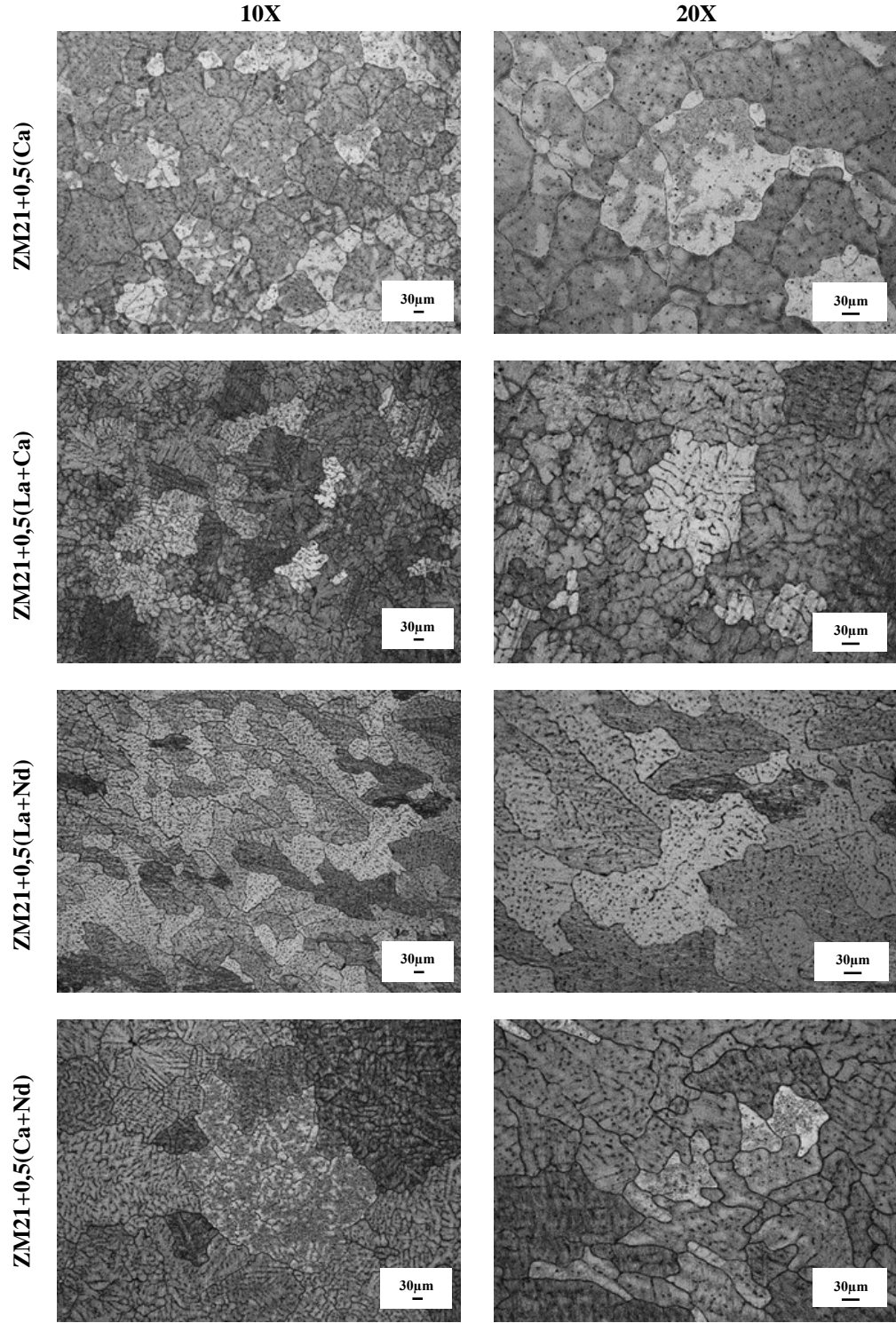
### 7.3. MİKROYAPI ALIşMALARI

#### 7.3.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

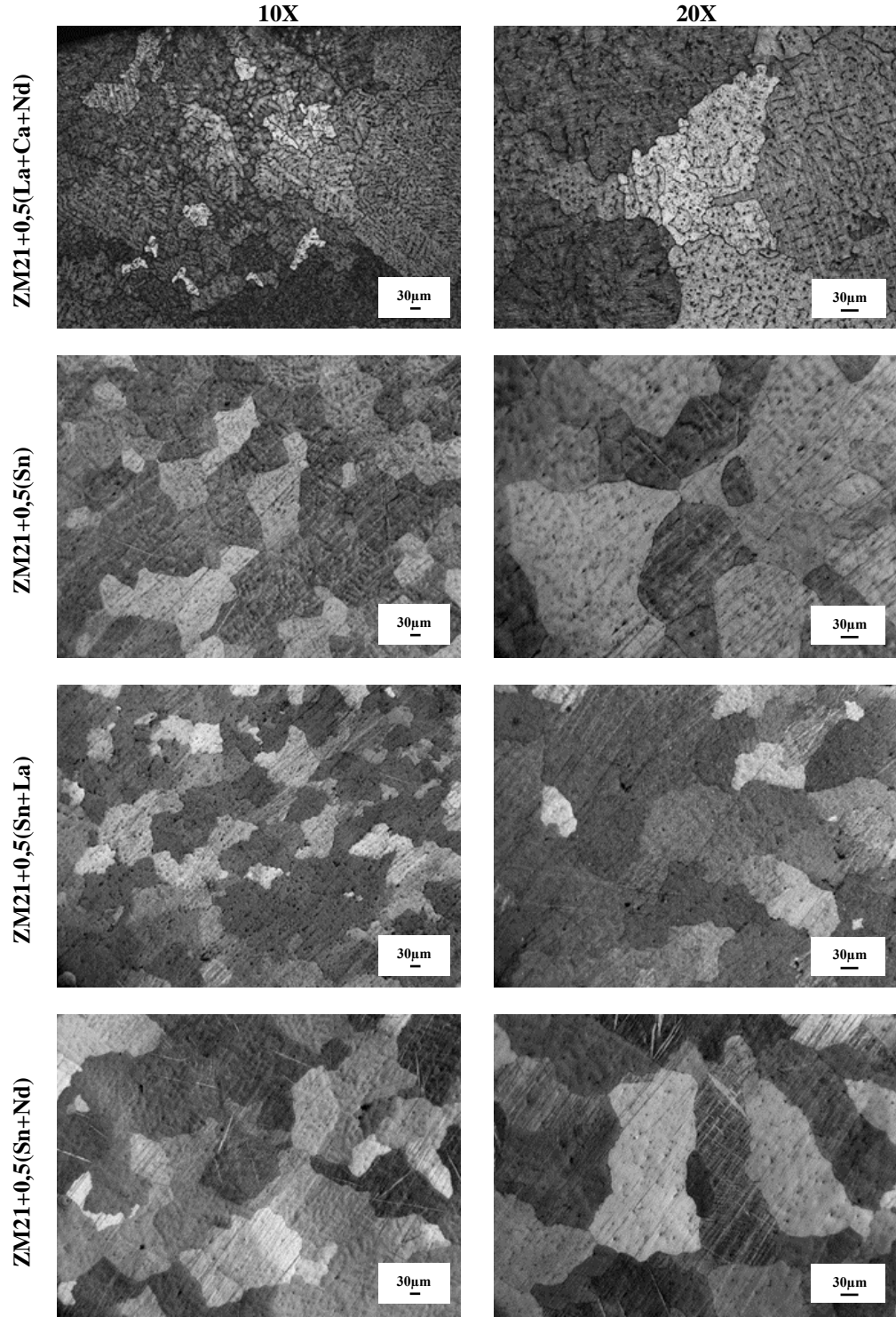
**Döküm Sonrası:** Döküm sonrası alaşımların optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.3-7.5'te verilmiştir. Mikroyapılar, ortaya çıkan alaşım kombinasyon sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Mg-Zn-Mn alaşımlarının mikroyapısı incelenmiştir, benzer alışma J. Fu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; Farklı Zn içeriğine sahip Mg-Zn-Mn-Ca alaşımlarının optik mikrografları gösterilmiştir. Döküm halindeki Mg-Zn-Mn-Ca alaşımlarının Zn içeriği arttıķa tane boyutunun azaldığını göstermiştir. İkincil faz, tane sınırında esas olarak şerit benzeri dağılırken, bazı tanecikli fazlar da i tanede bulundu. Zn içeriğinin artmasıyla ikincil fazların miktarının arttığı gözlendi. EDX analizleri incelenen çalışmada, tane sınırındaki ve i tanedeki ikincil fazların her ikisinin de Mg, Zn ve Ca elementlerinden oluştuğu belirtilmiştir [114]. Ayrıca Şekil 7.3'te ZM20 alaşımına göre ZM21 alaşımının daha ince tane yapısına sahip olmasının ardında %1 Mangan ilavesi ile Mn taneciklerinin çekirdekleşme oranını arttırması ve daha ince tane yapısı oluşturması vardır.



Şekil 7.3. Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



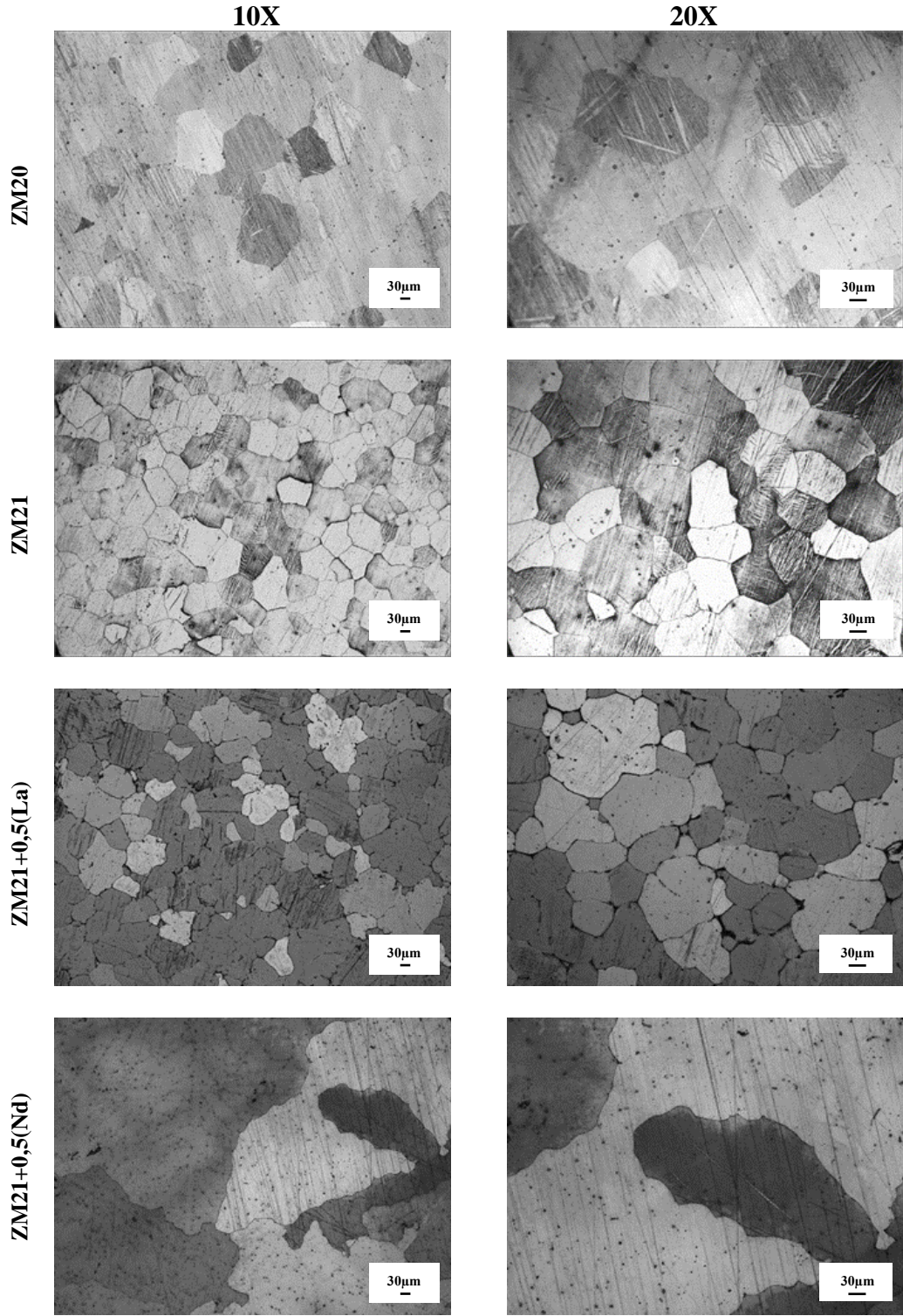
Şekil 7.4. Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



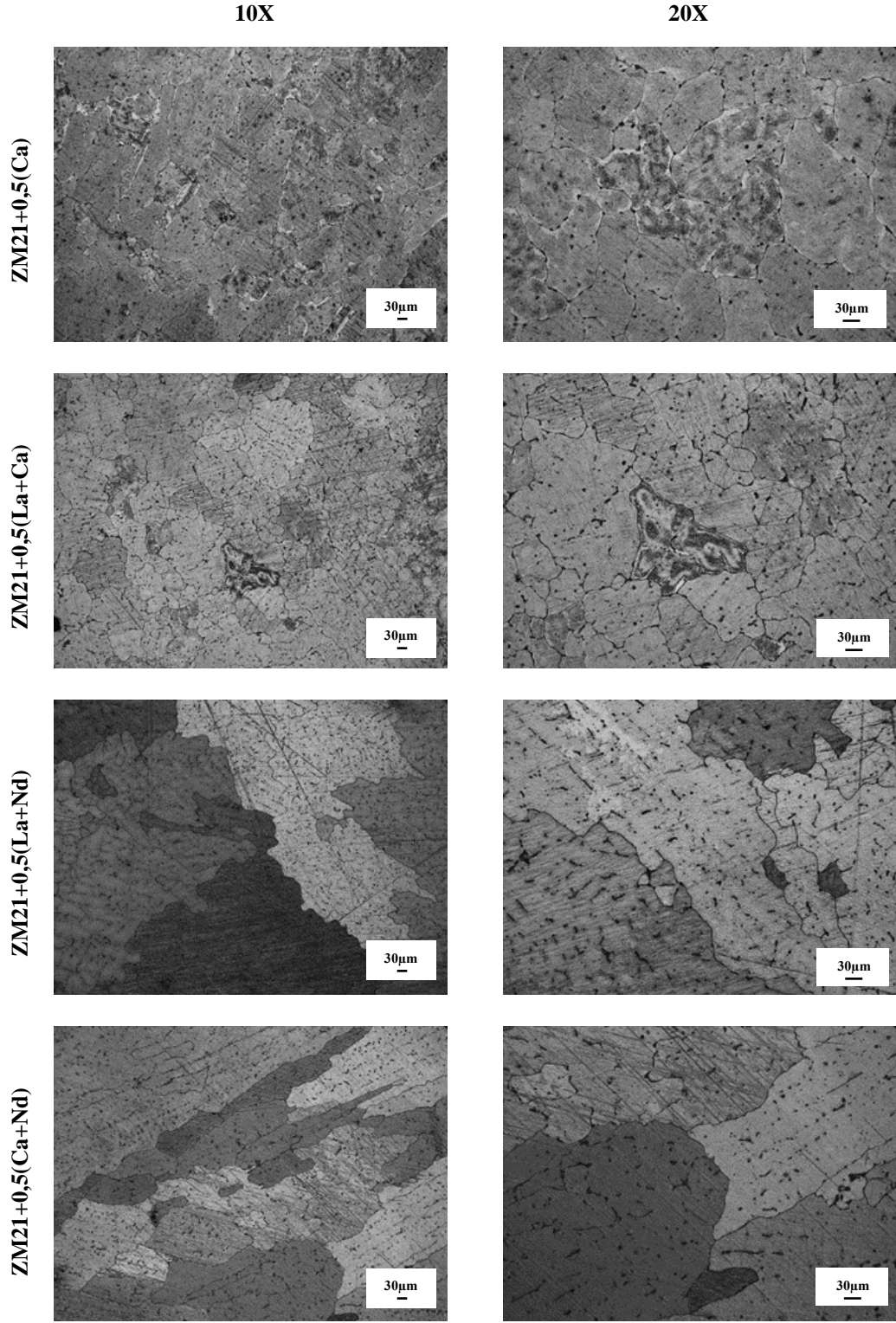
Şekil 7.5. Döküm alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



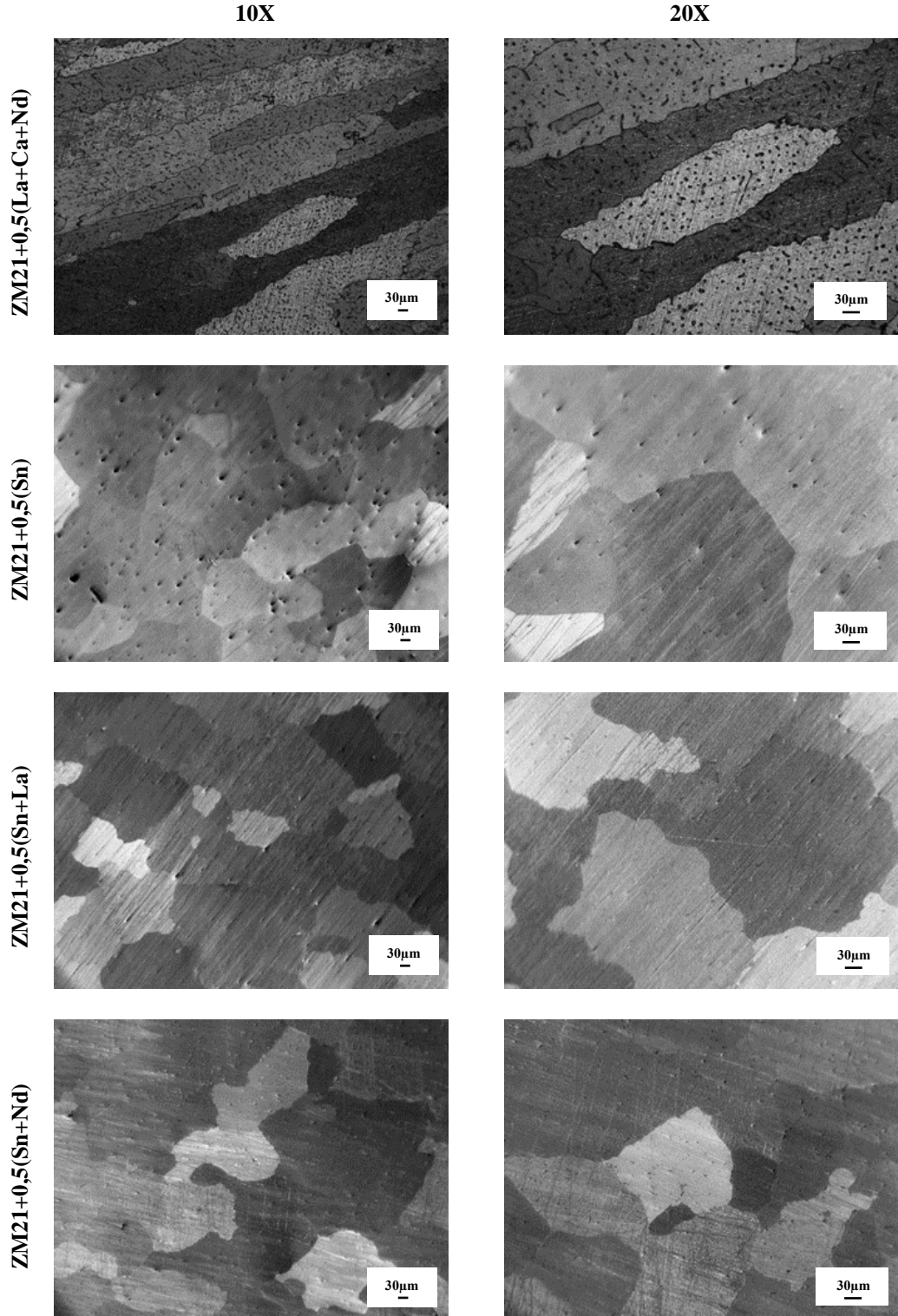
**Homojenleştirme Sonrası Mikroyapı:** Şekil 7.6-7.8'de 400 °C sıcaklıkta 16 saat bekletilerek yapılan homojenizasyon sonrası optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bütün alaşımlarda homojenleştirme ile alaşımların i gerilmelerinin giderilmiş ve haddeleme öncesi daha üniform bir iç yapı elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.

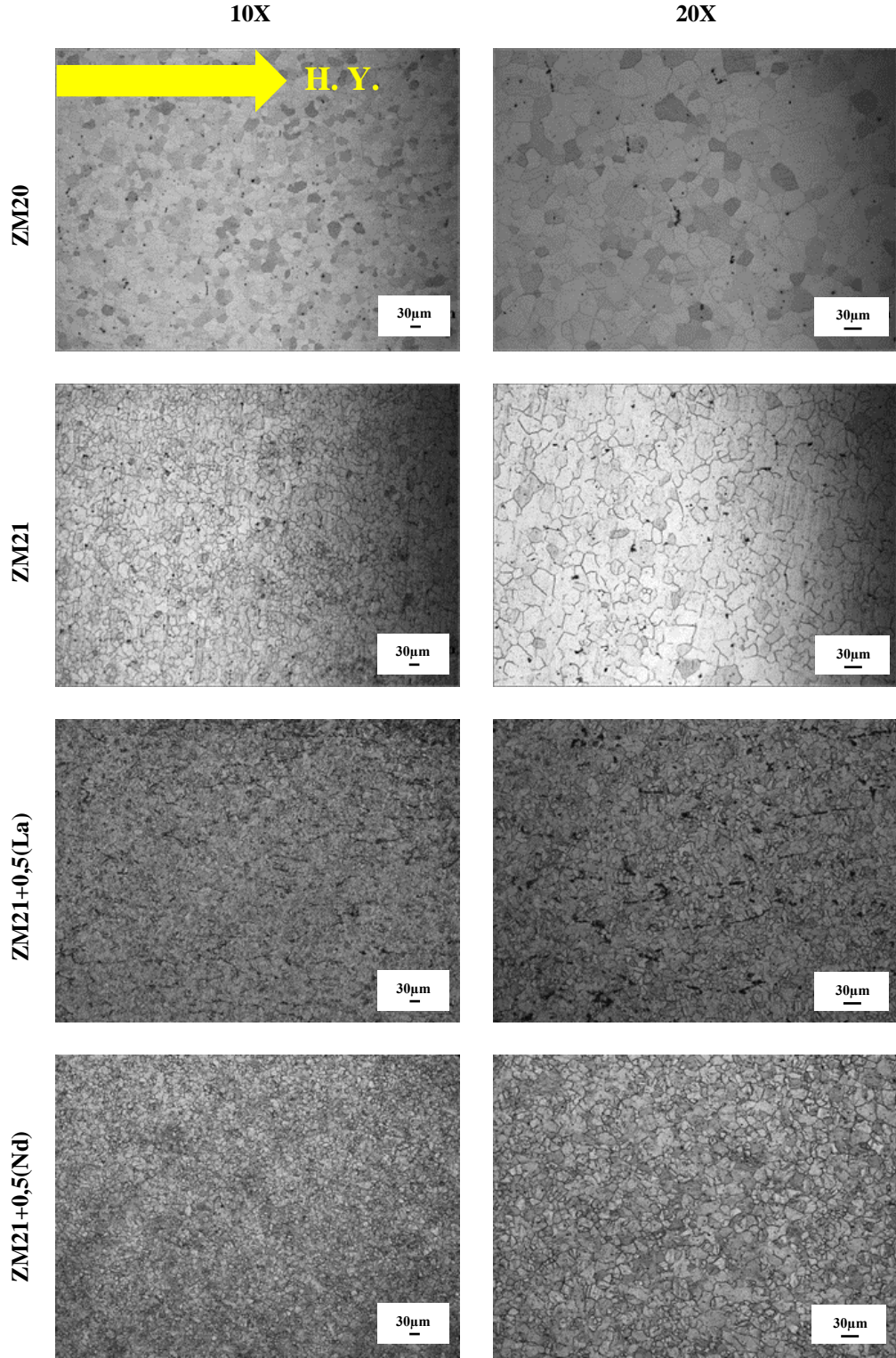


Şekil 7.7. Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.

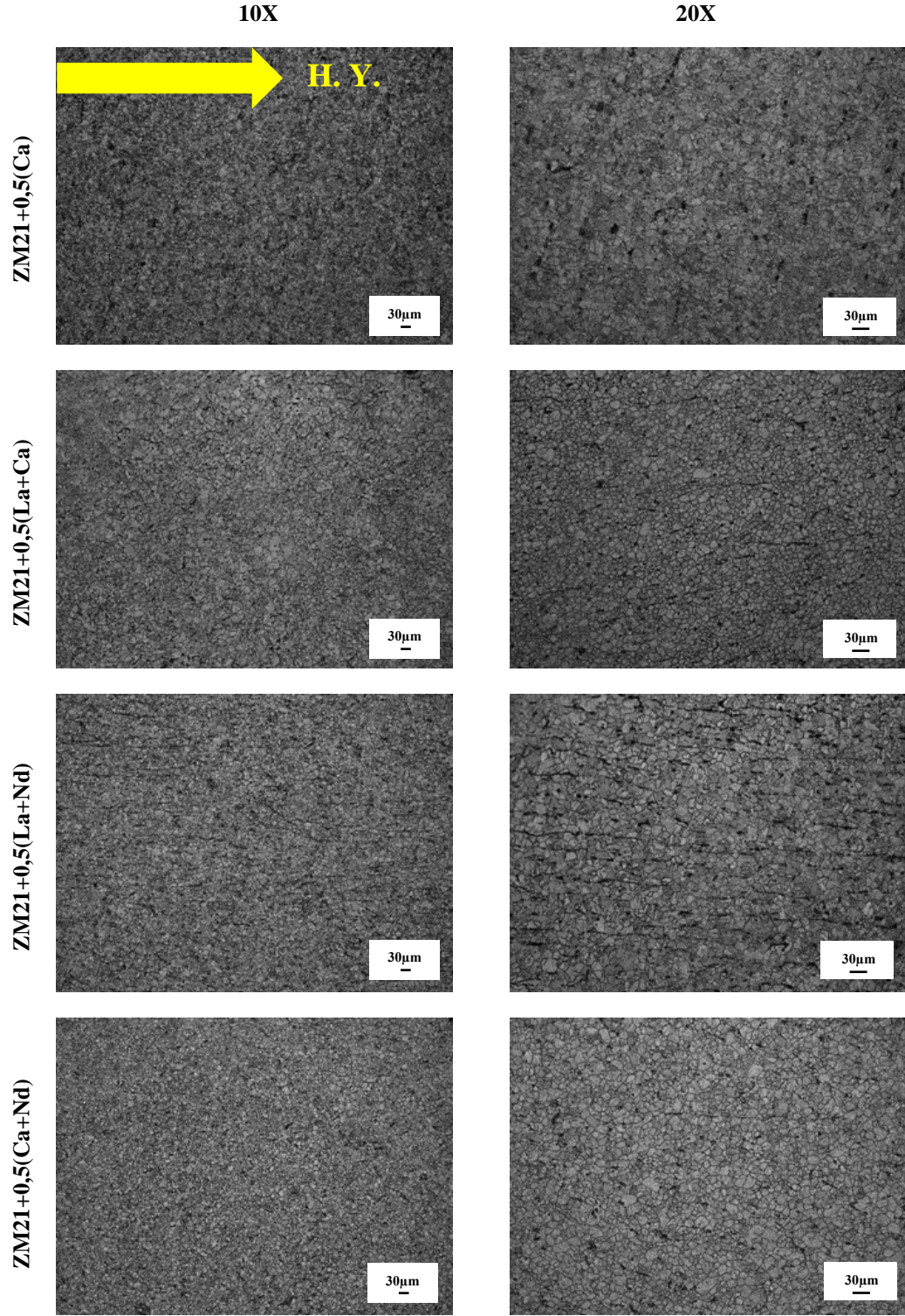


Şekil 7.8. Homojenleme işlemi görmüş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.

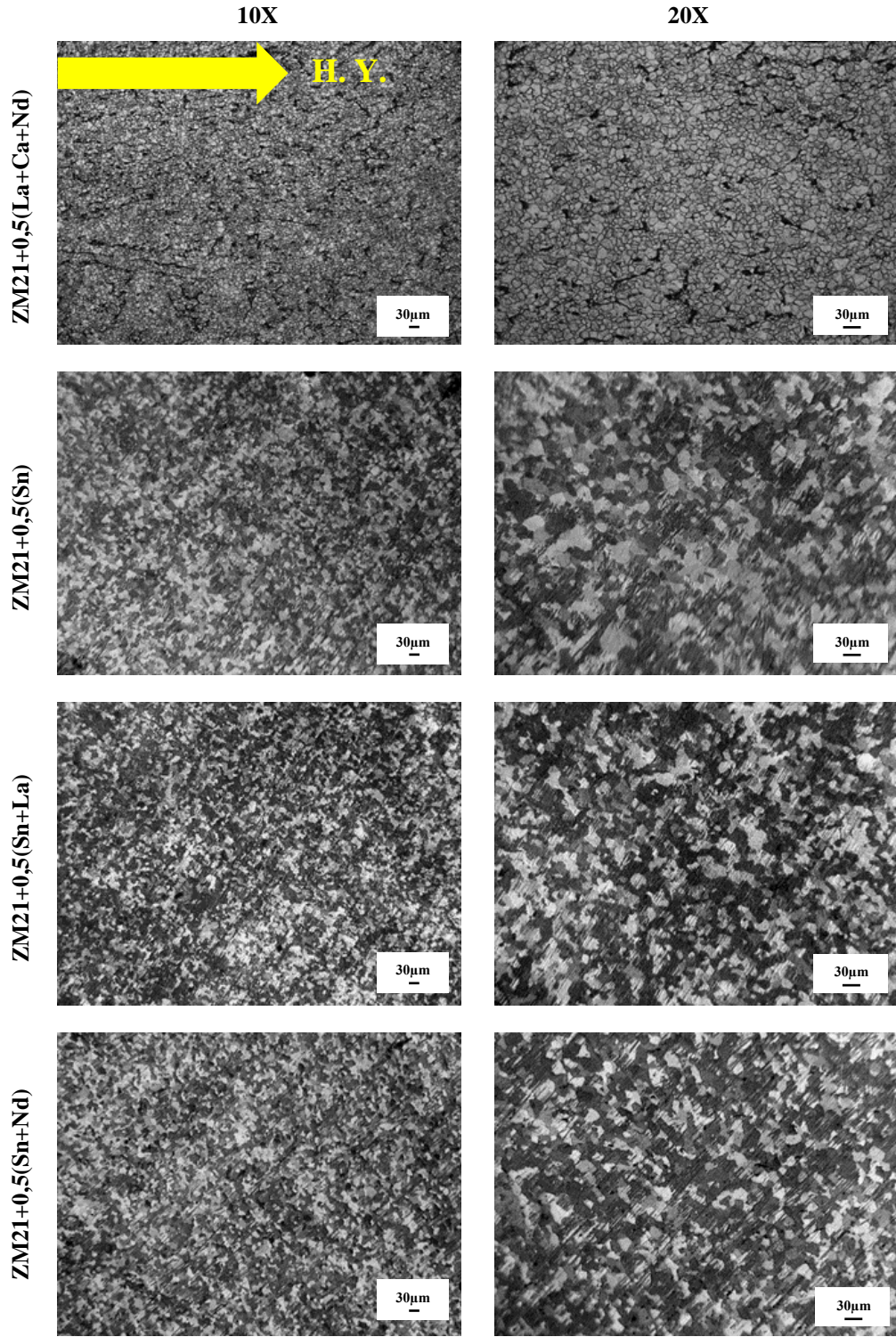
**Haddeleme Sonrası :** Şekil 7.9-7.11’de 350 °C sıcaklıkta %80 haddeleme oranı ile 4.7 haddeleme hızı ile yapılan haddeleme sonrası optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Hadde yönü (H.Y.) olarak sarı ok ile şekil üzerinde belirtilmiştir. Bütün alaşımlarda sıcak haddeleme sırasında gerçekleşen dinamik yeniden kristalleşme (DYK) sebebiyle tane boyutlarında önemli derecede küçülme meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra yapı içerisinde kalan kaba tanelerde haddeleme yönü doğrultusunda yönlenmiş halde olduğu gözlenmiştir. L. Gao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada haddeleme sıcaklığı ve geçiş başına azalma, ZME200 alaşımının deformasyon mekanizması ve nihai mikro yapısı üzerinde büyük etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Deformasyon ikizlenmesi, daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek kalınlık azalmalarında daha aktiftir ve daha ince mikro yapıya yol açar. Haddelenmiş ZME200 alaşımında oluşturulan doku, enine yönelmiş geniş yayılıma sahip tipik bir bazal dokudur. Tavlama sırasında statik yeniden kristalleşme nedeniyle ZME200 alaşımında çift pik yayılan bazal olmayan bir doku oluştu [75]. Haddeleme Sıcaklığı 350°C’ye ulaştığında HSP kafes sisteminin kayma ile şekil değiştirmesi, literatürde magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde en önemli etkenin sıcaklık olduğu, az sayıdaki kayma sistemi ile 225 °C’nin üzerinde prizmatik ve piramidal sistemlerin aktif olduğu rapor edilmiştir [56].



Şekil 7.9. Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 7.10. Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 7.11. Haddelenmiş alaşımların optik mikroskop görüntüleri.



### 7.3.2. SEM Görüntüleri ve EDX Analizleri

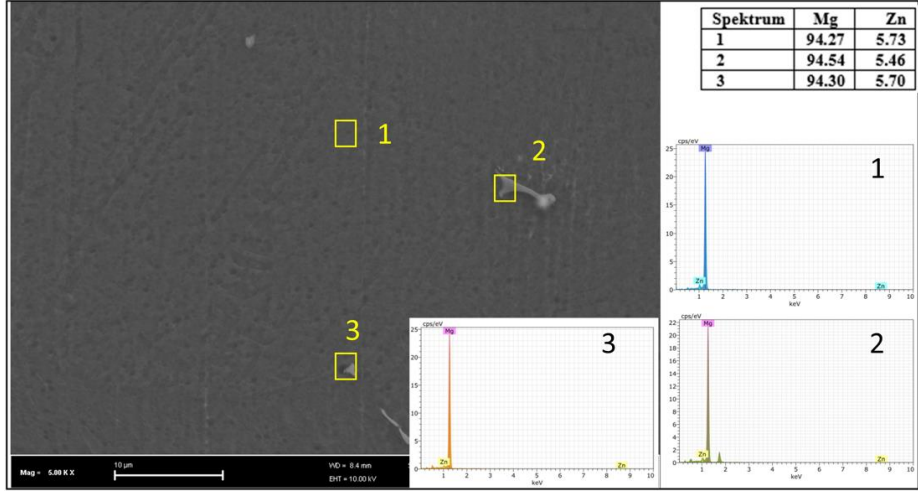
**Döküm Sonrası:** Şekil 7.12.'de görülen ZM20, ZM21 ve ZM21+0,5(La) döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri incelendiğinde fazlarının varlığı dikkat çekmektedir. ZM20 alaşımına yaklaşık %1 ( $\pm 0,5$ ) Mn ilavesi ile elde edilen ZM21 alaşımında Mn ilavesi ile katılma sistemindeki çekirdekleşme oranının arttığı ve daha ince tane yapısının oluştuğu tespit edilmiştir.

Şekil 7.13'de ZM21+0,5(Ca), ZM21+0,5(Nd) ve ZM21+0,5(La+Ca) döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.

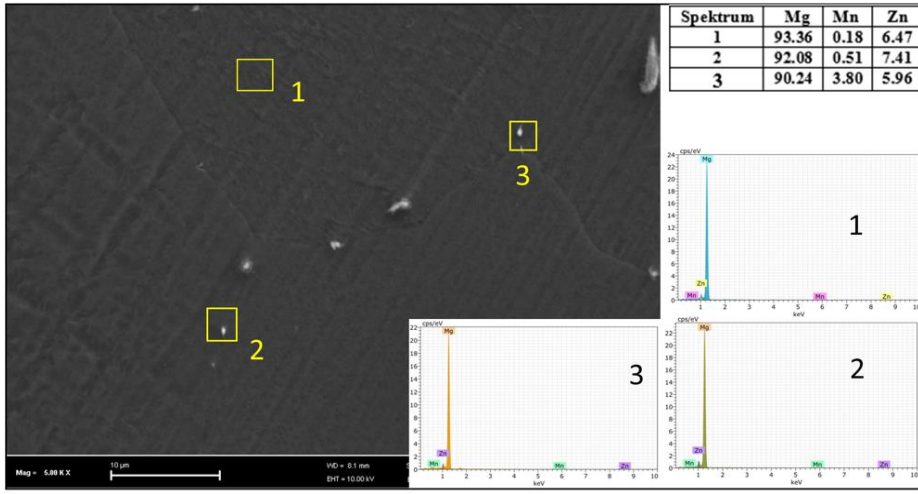
Şekil 7.14'de ZM21+0,5(La+Nd), ZM21+0,5(Ca+Nd) ve ZM21+0,5(La+Ca+Nd) döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir. Ca ilavesi ile Ca elementinin oksijen ile oluşturduğu oksitler ve yapıdaki gelişmeler mekanik test sonuçlarına göre değerlendirilecektir [18].

Şekil 7.15'de ZM21+0,5(Sn), ZM21+0,5(Sn+La) ve ZM21+0,5(Sn+Nd) döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde yapıda ikili ve üçlü faz partiküllerinden ve  $\alpha$ -Mg matrisinden oluşmaktadır. Literatürde konu ile ilgili çalışmalar vardır, fakat doğrudan ZM21 alaşımları üzerinden bu fazlarla ilgili çalışma sayısı oldukça azdır.

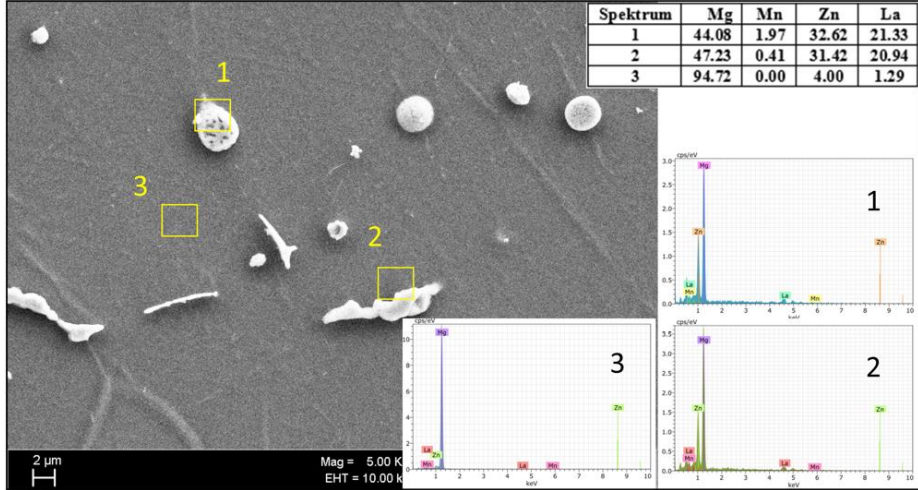
ZM20 DÖKÜM



ZM21 DÖKÜM

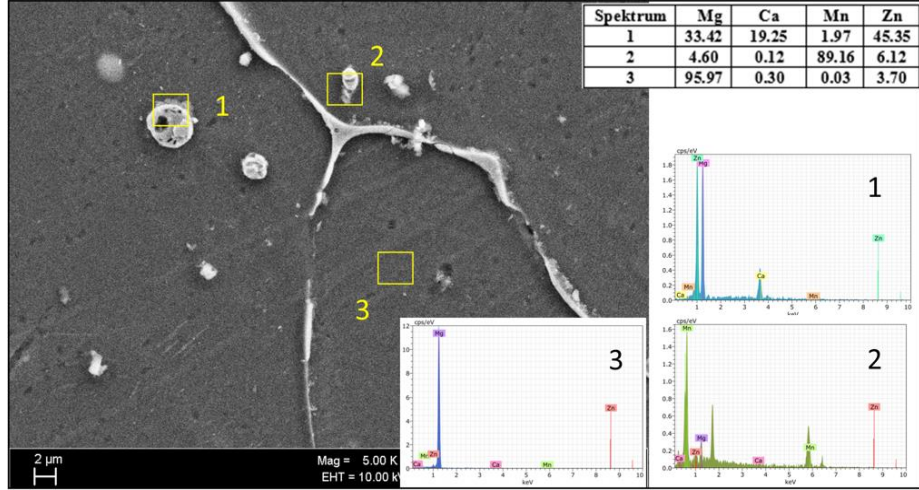


ZM21+0,5(La) DÖKÜM

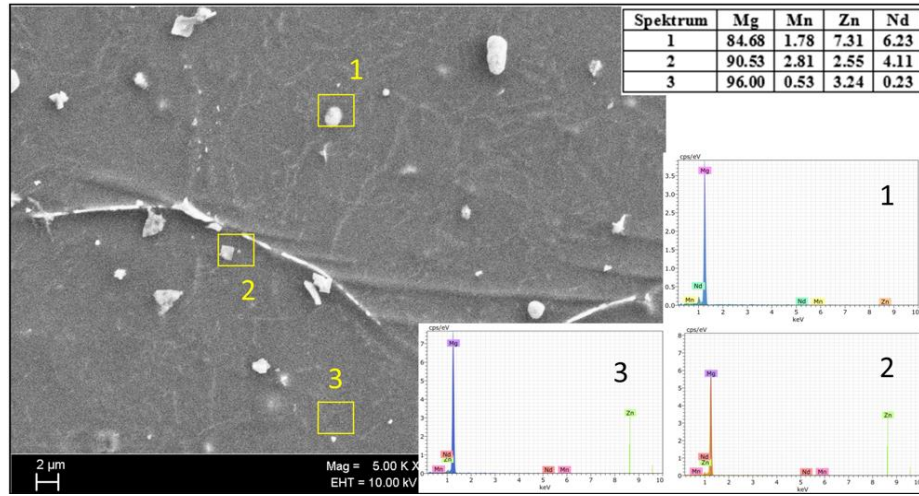


Şekil 7.12. Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

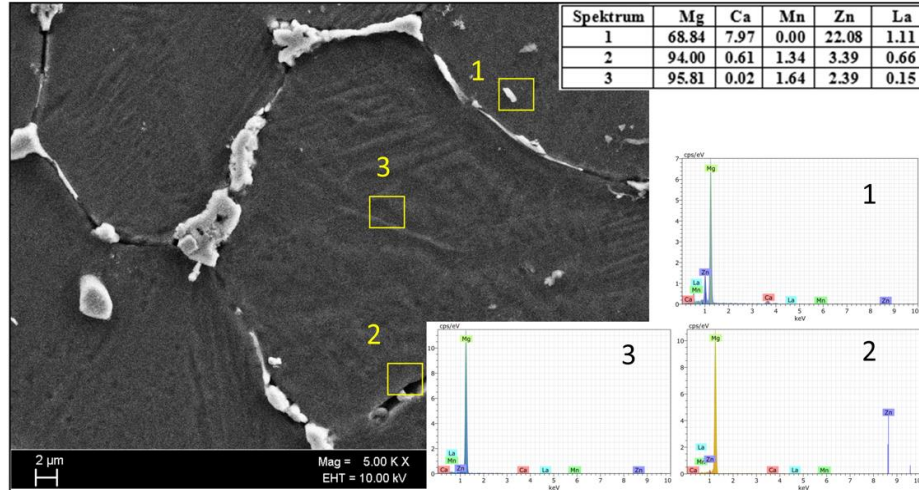
ZM21+0,5(Ca) DÖKÜM



ZM21+0,5(Nd) DÖKÜM

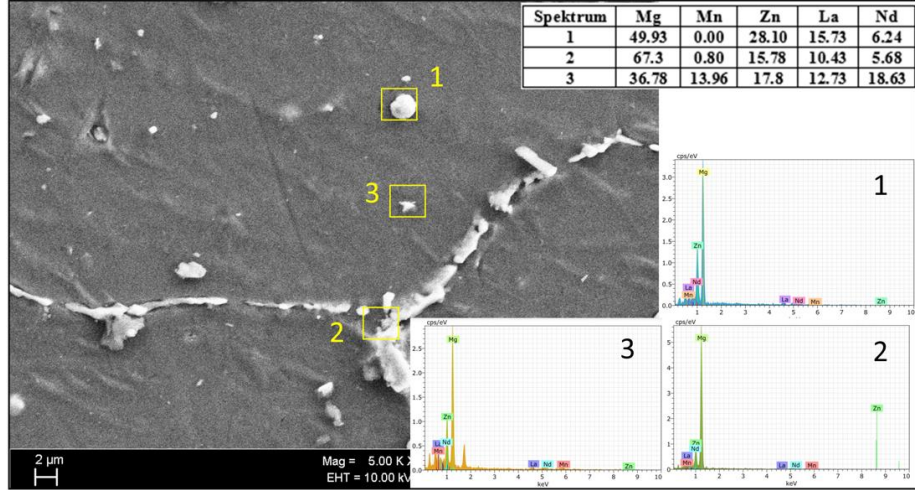


ZM21+0,5(La+Ca)

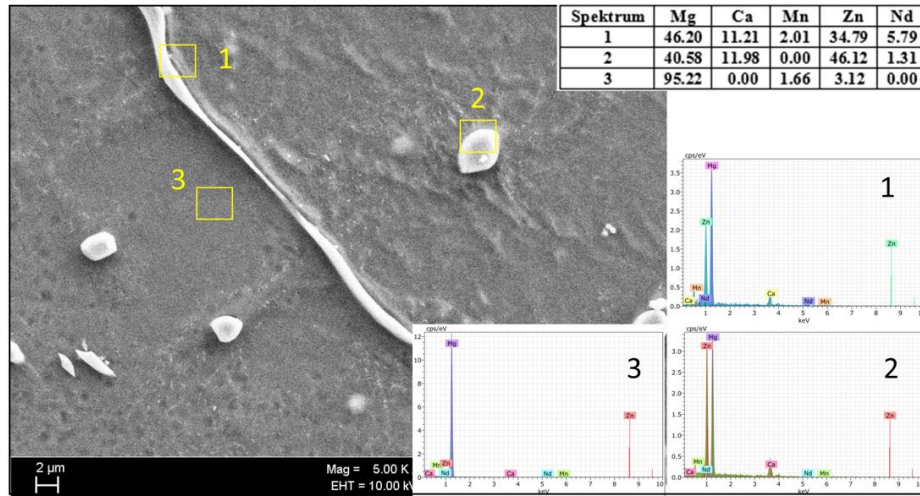


Şekil 7.13. Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

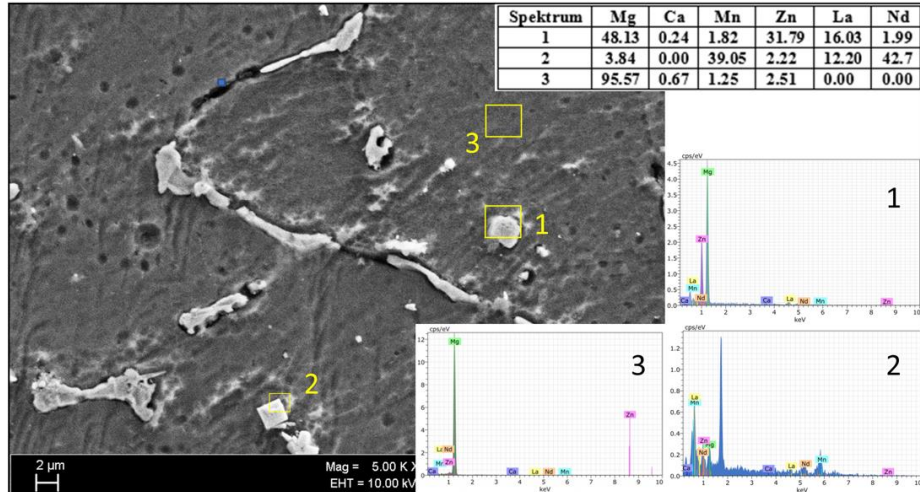
ZM21+0,5(La+Nd)  
DÖKÜM



ZM21+0,5(Ca+Nd)  
DÖKÜM

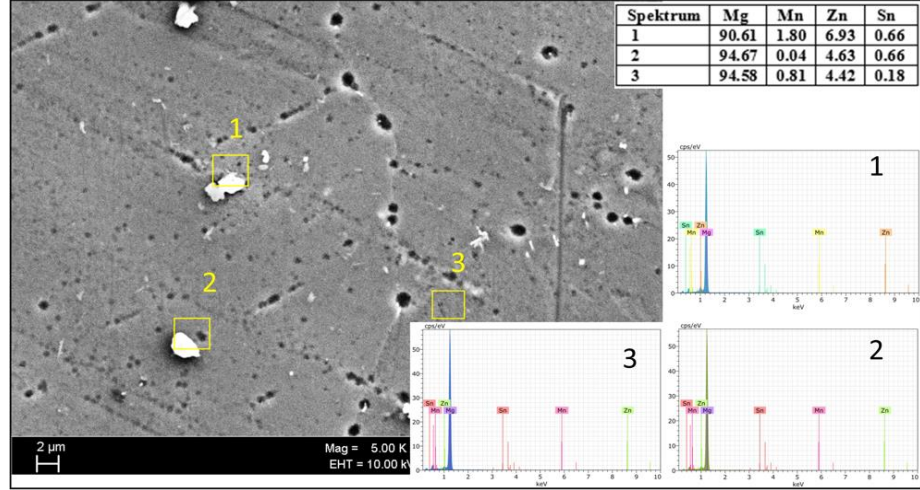


ZM21+0,5(La+Ca+Nd)  
DÖKÜM

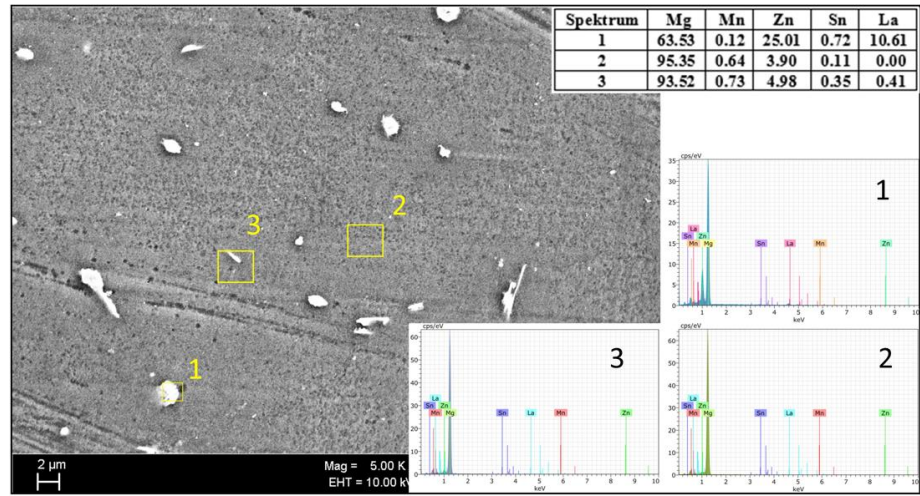


Şekil 7.14. Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

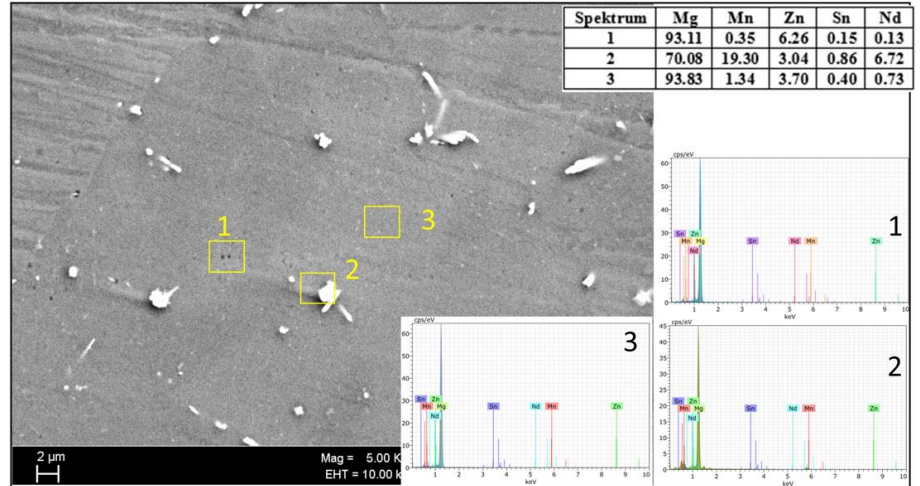
ZM21+0,5(Sn)  
DÖKÜM



ZM21+0,5(Sn+La)  
DÖKÜM



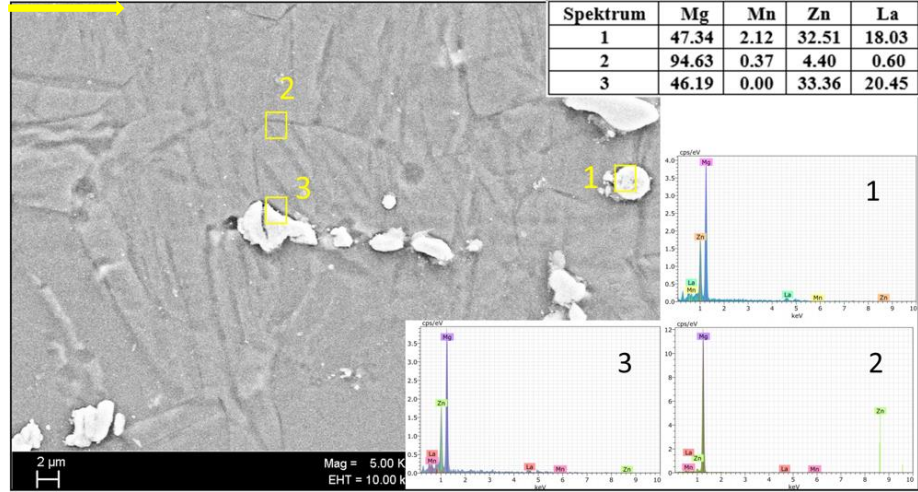
ZM21+0,5(Sn+Nd)  
DÖKÜM



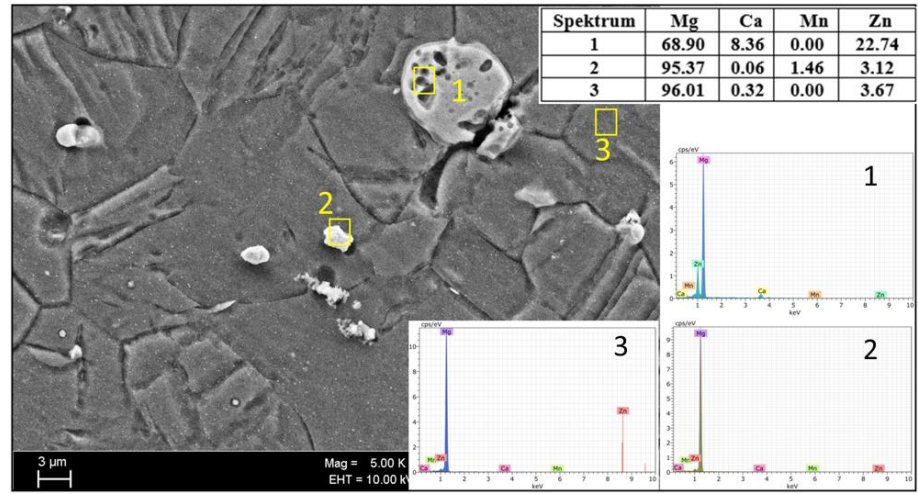
Şekil 7.15. Döküm alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

**Haddeleme Sonrası:** Haddeleme sonrası alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 7.16-7.19'da verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, döküm halindeki SEM görüntülerinde (Şekil 7.12-7.15) ilave edilen alaşım elementler bakımından zengin parçacıkların özellikle Ca içerenlerin kırıldığı ve dağıldığı görülmüştür. Bu durumun Ca ile oksijenin birleşmesiyle yapıda oluşan gözenekli sert yapılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde Ellingham diyagramında 726,85°C'ye kadar oksijene olan afinitelerinin  $Ca > Be > Mg > Sr > Al > Ti$  olarak sırasıyla azaldığı görülmektedir. En yüksek afiniteye Ca elementi sahiptir [18]. Diğer elementlerin ilavesi ile elde edilen alaşımlarda haddeleme öncesi yapılan 400°C 16 saat homojenizasyon ısıl işleminin ve 350 °C'de 1 saat yapılan ısıtmanın ardından haddelemenin etkisi ile bu yapıların bazılarının çözüldüğü bir kısmının parçalanarak tane sınırları boyunca dağılmış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bir kısmının ezilerek kırıldığı bir bölümününse yapısının deforme olduğu fakat şeklini koruduğu görülmektedir.

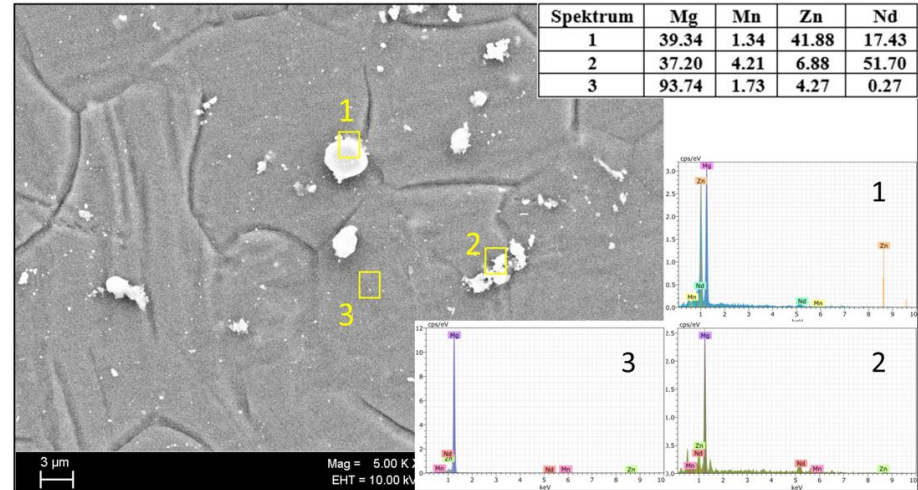
ZM21+0,5(La)  
HADDE



ZM21+0,5(Ca)  
HADDE

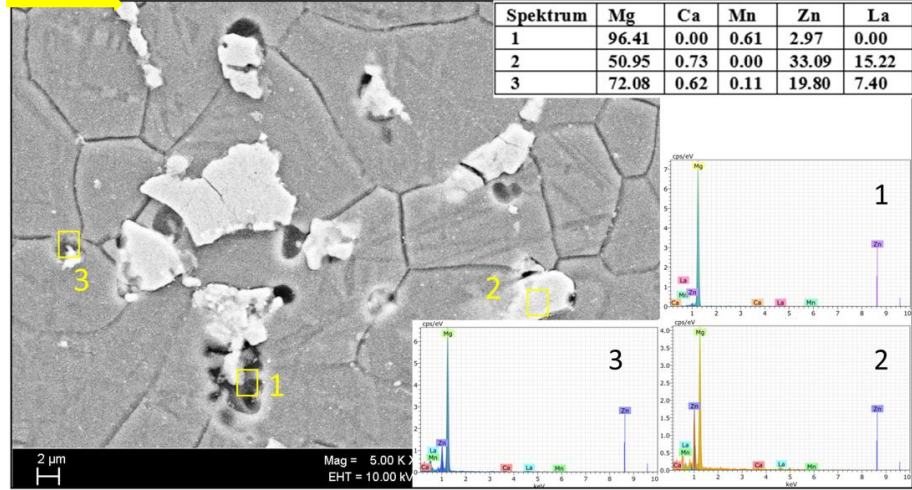


ZM21+0,5(Nd)  
HADDE

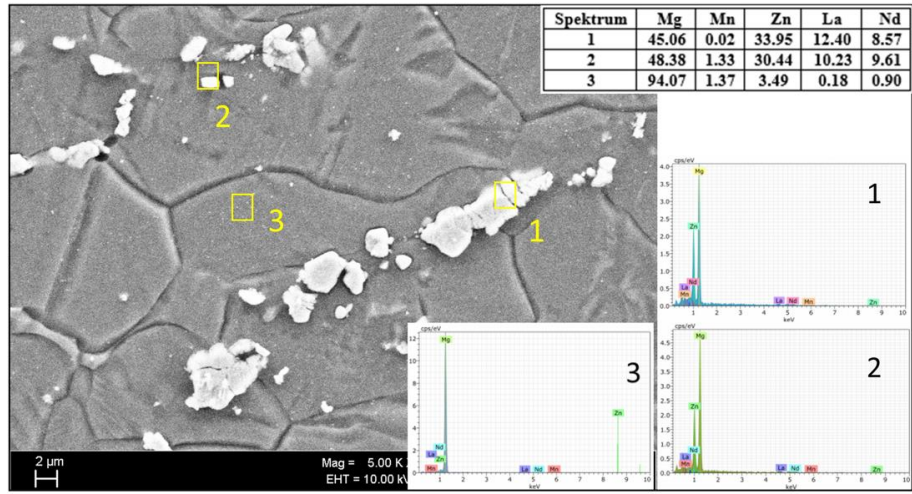


Şekil 7.16. Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

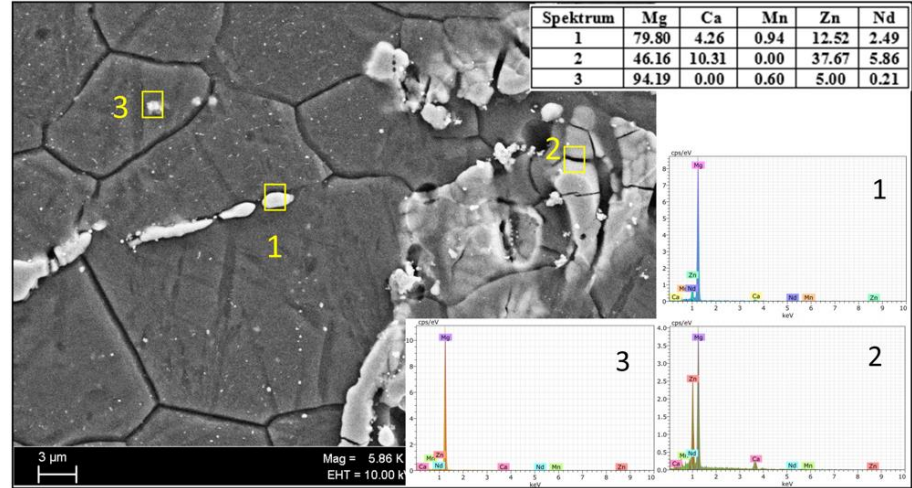
ZM21+0,5(La+Ca)  
HADDE



ZM21+0,5(La+Nd)  
HADDE



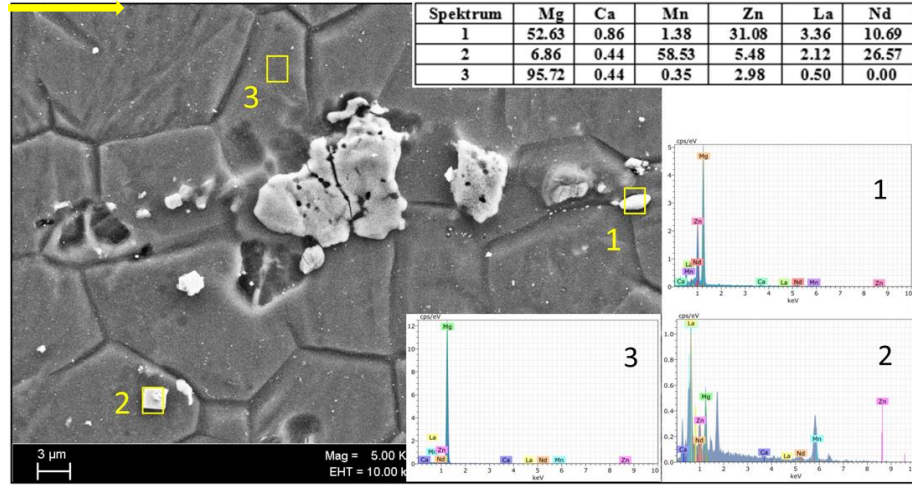
ZM21+0,5(Ca+Nd)  
HADDE



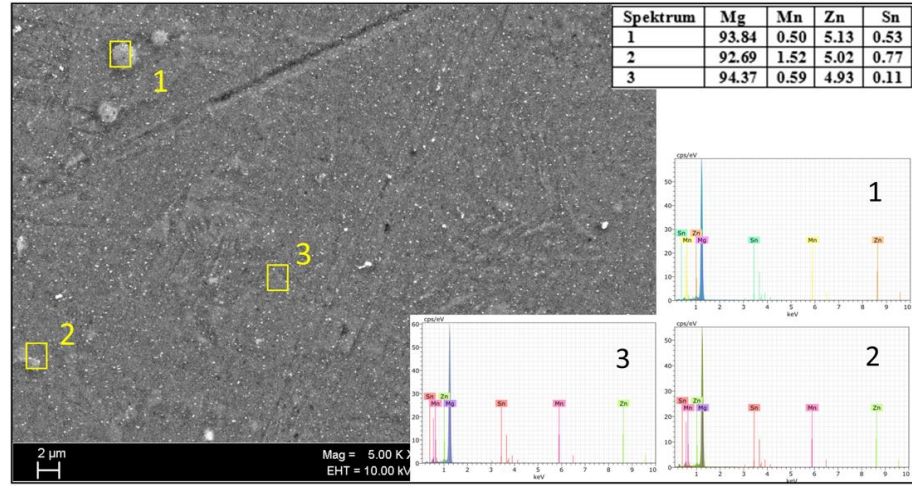
Şekil 7.17. Haddelenmiş alaşımlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri



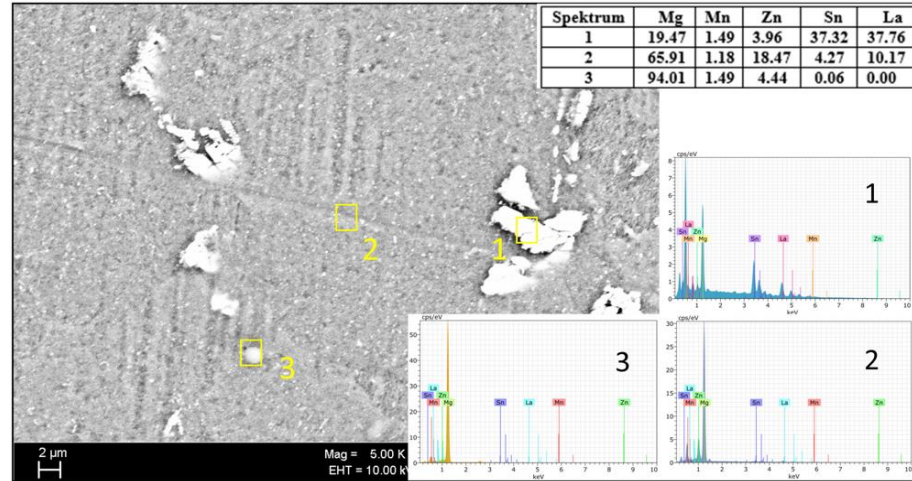
ZM21+0,5(La+Ca+Nd) HADDE



ZM21+0,5(Sn) HADDE

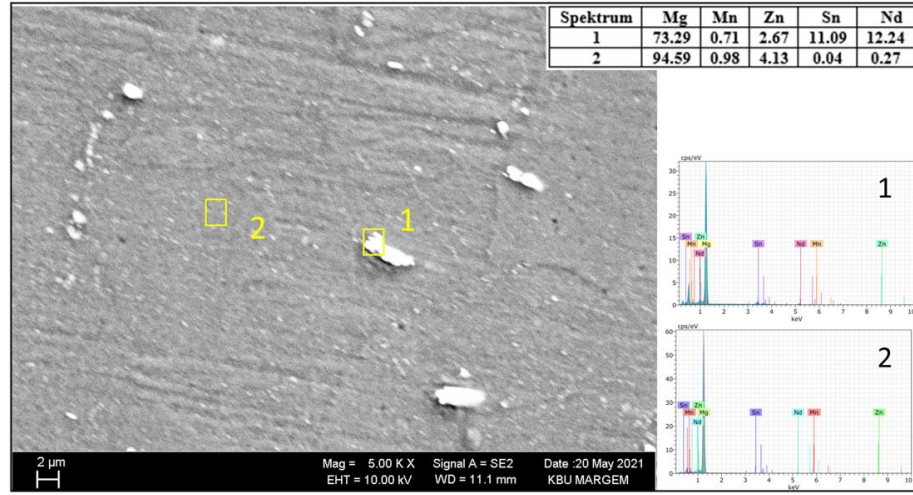


ZM21+0,5(Sn+La) HADDE



Şekil 7.18. Haddelenmiş alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

ZM21+0,5(Sn+Nd) HADDE

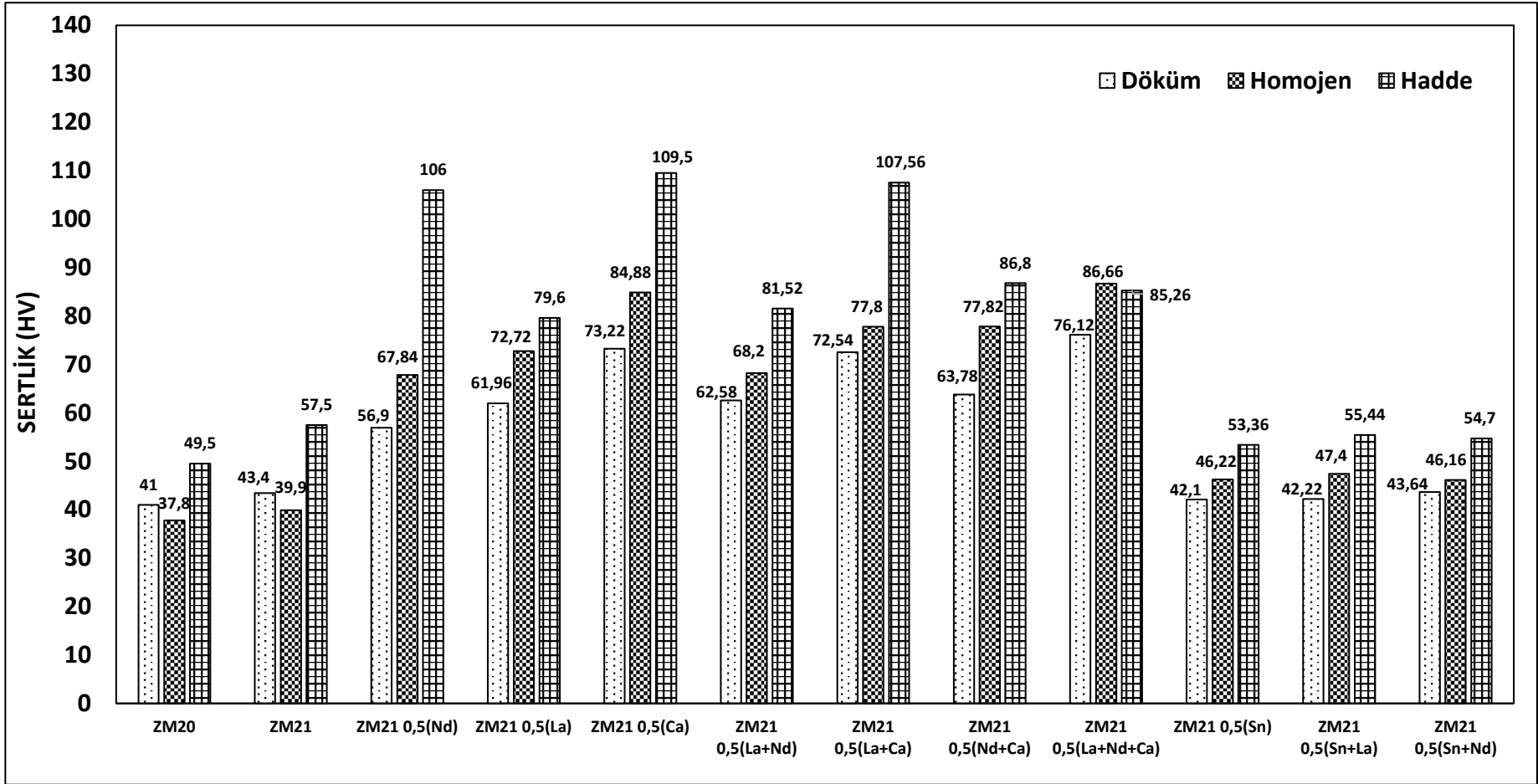


Şekil 7.19. Haddelenmiş alaşımının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

## 7.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI

### 7.4.1. Sertlik Testi

Şekil 7.20’de Mg alaşımlarının sertlik değerleri, döküm, homojen ve haddelenmiş olarak gösterilmektedir. ZM21 alaşımına (La, Nd ve Ca) elementinin ilave edilmesi ile sertlik değerleri artmıştır. Bu durum La ilavesinde ( $\text{LaZn}_2$ ,  $\text{LaMg}_3$ ) fazlarının oluşması ile ve Nd ilavesinde ( $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ ,  $\text{Mg}_{12}\text{Nd}$ ) fazlarının varlığının etkisi ile olduğu varsaymaktayız. Kalsiyum (Ca) içeriğinin artmasıyla sertlik değerinin artması ( $\text{Ca}_5\text{Zn}_3$ ,  $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ ) ikili ve üçlü fazların tane sınırlarında ve matriste görülmesi olarak düşünülebilir. Z. H. Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıda oluşan bu gibi fazların katı çözeltili sertleşmesi ve dayanım dağılımını güçlendirdiği bildirilmiştir [109]. Ancak literatür incelenmiştir. Ellingham diyagramında  $726,85^\circ\text{C}$  ye kadar oksijene olan afinitelerinin  $\text{Ca} > \text{Be} > \text{Mg} > \text{Sr} > \text{Al} > \text{Ti}$  olarak sırasıyla azaldığı görülmektedir. En yüksek afiniteye Ca elementi sahiptir. Ellingham diyagramında görüldüğü gibi oksijen ile bileşik oluşturan Ca elementi  $2\text{CaO}$  bileşiğine dönüşmüştür. Buda yapıda küçük küçük sert gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Buda sertliğe neden olan bir durumdur [18]. Sn ilaveli alaşımların sertliklerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.

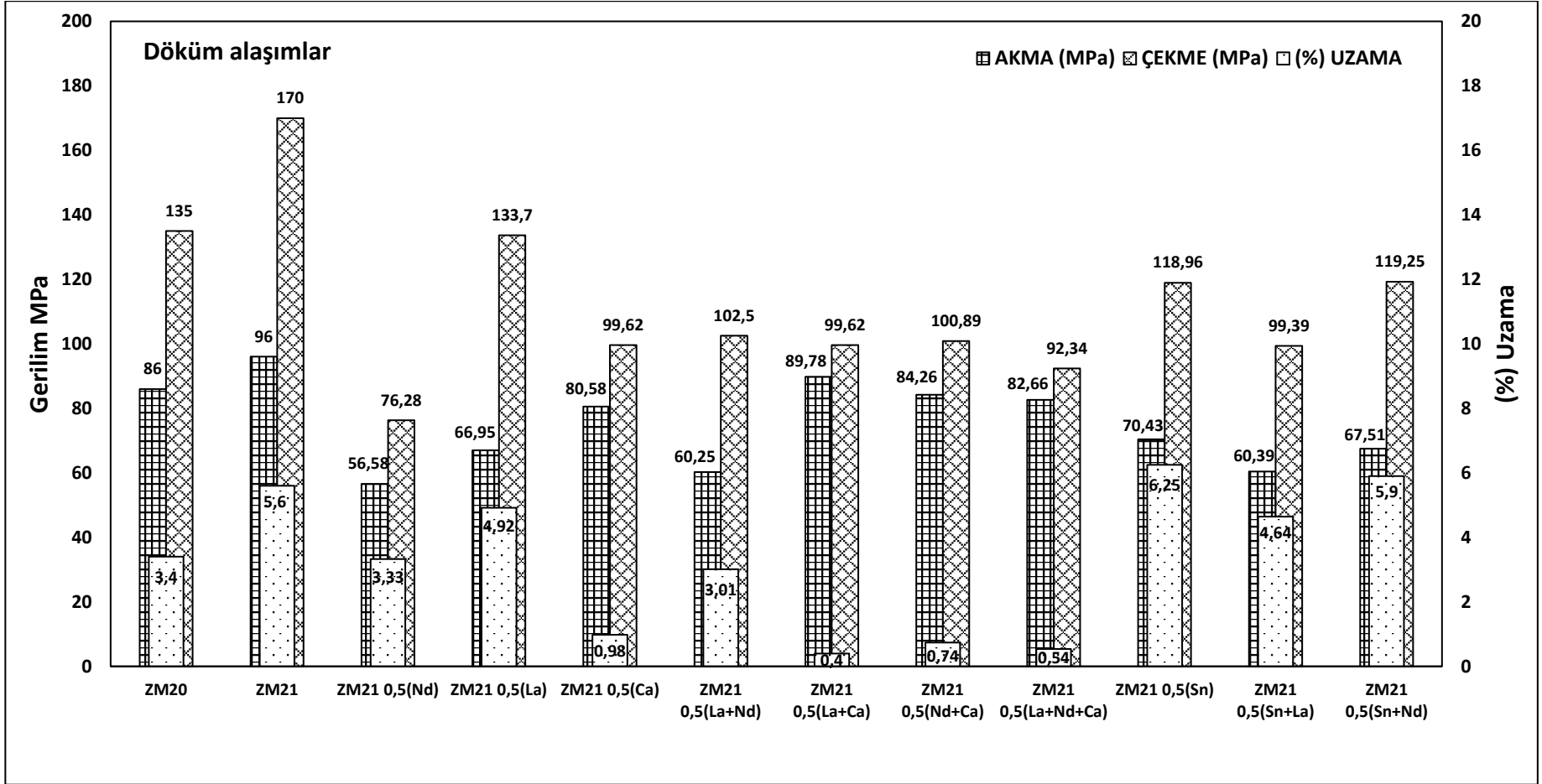


Şekil 7.20. Alaşımların sertlik değerleri.

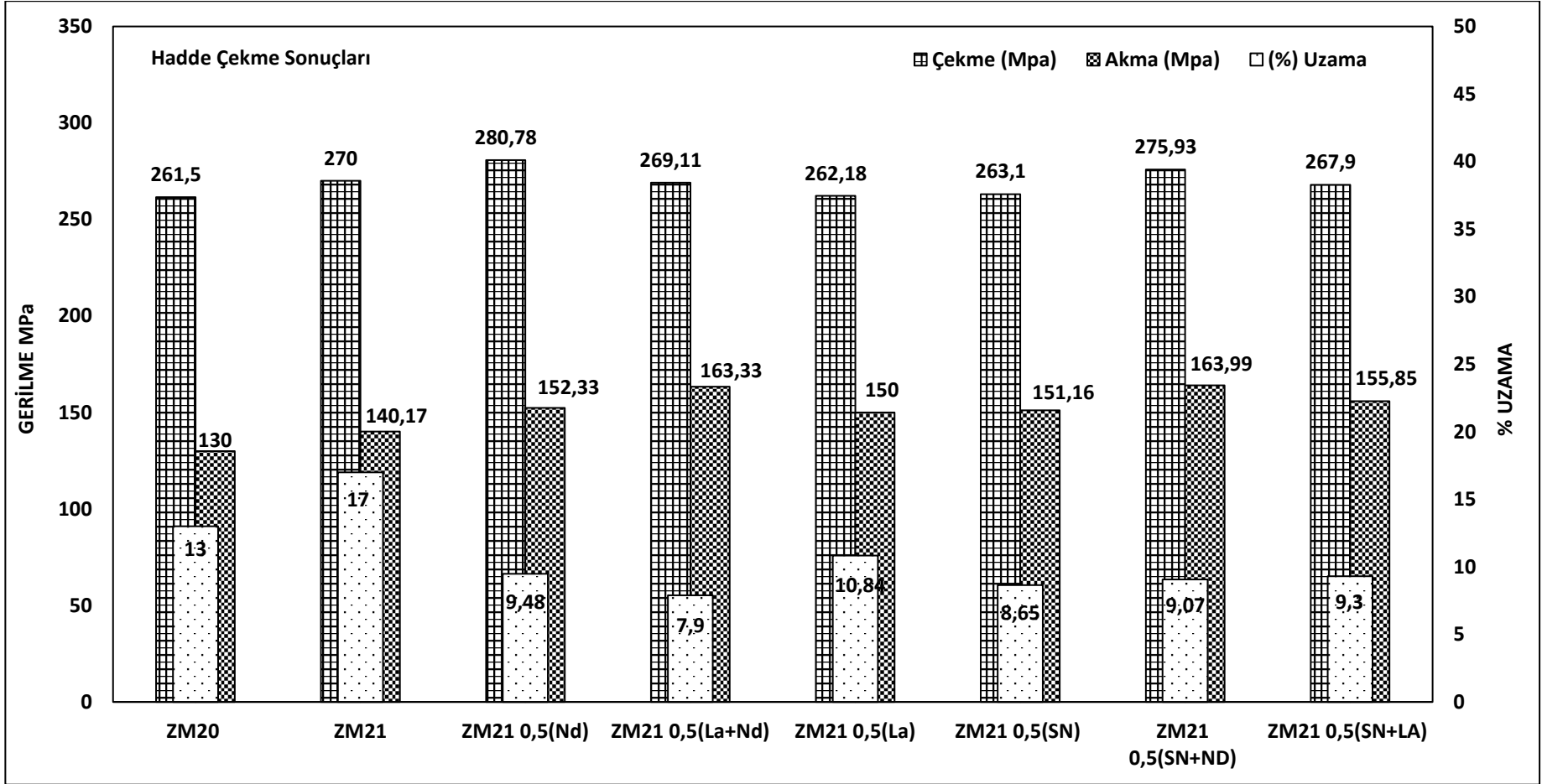
#### 7.4.2. Çekme Testi

Şekil 7.21’de Mg döküm alaşımlarının çekme testi sonuçları verilmiştir. Döküm ZM21 Mg alaşımına La, Sn, Sn+Nd element ilavesi ile çekme dayanımında bir miktarda düşmesi ile birlikte Nd ve Ca element içeren alaşımlarda dikkate değer miktarda düşüş sergilemiştir. Ayrıca Ca içeren alaşımların (%) Uzama özelliği göze çarpar şekilde düşmüştür. Bunun sebebi olarak Ca ve Nd içeren alaşımların sertlik değerlerinin çok yüksek olması gösterilebilir. Ellingham diyagramında Oksijen ile bileşik oluşturan Ca elementi 2CaO bileşiği oluşturur. Buda yapıda küçük küçük sert gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Buda sertliğe neden olan bir durumdur [18]. Haddelenmiş alaşımlar incelendiğinde Ca içeren 4 alaşım haddeleme esnasında kırıldığı için çekme numunesi çıkarılamamıştır. Bunun nedeni olarak 2CaO bileşiğinin kırılmaların başlama noktası olduğu düşünülmektedir [18]. Bundan dolayı sadece iyi haddeleme performansı gösteren 8 alaşımdan çekme numunesi çıkarılmıştır. Şekil 7.22’de haddelenmiş ZM20, ZM21, ZM21+0,5(Nd), ZM21+0,5(La+Nd), ZM21+0,5(La), ZM21+0,5(Sn), ZM21+0,5(Sn+Nd), ZM21+0,5(Sn+La) Mg alaşımların çekme testi sonuçları gösterilmiştir. Haddelenmiş alaşımların tümünde çekme dayanımı, akma dayanımı ve (%) uzama değerleri yükselmiştir. En yüksek çekme dayanımı ZM21+0,5(Nd) alaşımında olduğu tespit edilmiştir. ZM21+0,5(Nd), ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımları ZM21’e kıyasla çekme ve akma dayanımları artarken (%) uzama değerinde düşüş görülmüştür.

Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının çekme testi sonuçları kıyaslandığında haddelenmiş alaşımların çekme dayanım değerlerinin daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Akma dayanım sonuçlarına göre. haddelenmiş alaşımlar döküm alaşımlarına göre daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Haddelenmiş alaşımların (%) uzama sonuçları döküm alaşımlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Literatürdeki bir çalışmada element ilavesi ile oluşan fazların katı çözelti sertleşmesi ve dağılımlı dayanımı güçlendirdiği bildirilmiştir [109].



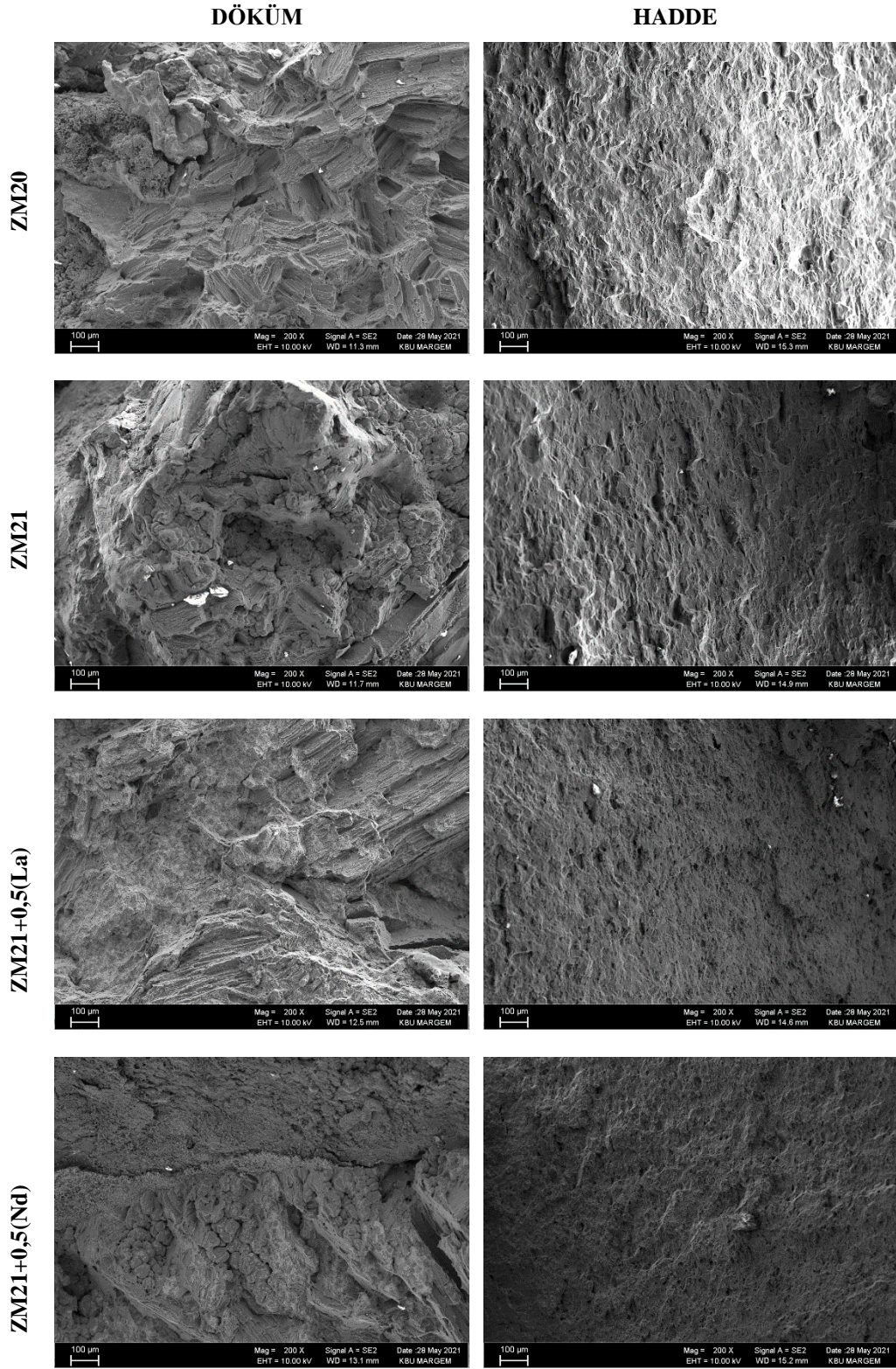
Şekil 7.21. Döküm alaşımlarının çekme testi sonuçları.



Şekil 7.22. Haddelenmiş alaşımların çekme testi sonuçları.

### 7.4.3. Kırık Yüzey SEM Görüntüleri

Çekme testlerinden sonra yapılan hasar analizinde (Şekil 7.23-Şekil 7.25) incelenen çekme numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde döküm sonrasında yüzey çukur derinlikleri artmış ve çukur genişlikleri büyümüştür. Ayrıca Ca içeren döküm alaşımlarında boydan boya çatlak meydana gelmiştir. Bu durum Ellingham diyagramında en yüksek afiniteye sahip olan Ca elementinin oluşturduğu  $2CaO$  bileşiğinin etkisinden olduğu düşünülmektedir [18].  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki haddeleme sonrası tanelerin incilmesi ile beraber kırık yüzeyler daha ince kırılma yüzey dağılımı halinde oluşmuştur. Ca içeren alaşımlardan çekme numunesi çıkarılamadığından dolayı kırık yüzey resmi alınamamıştır.

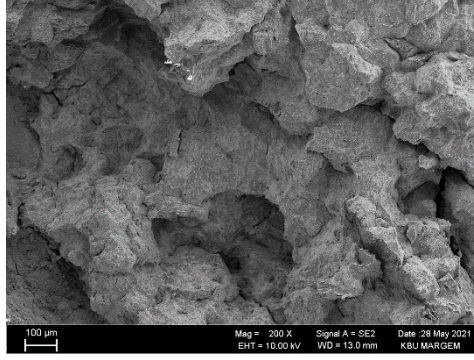


Şekil 7.23. Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.

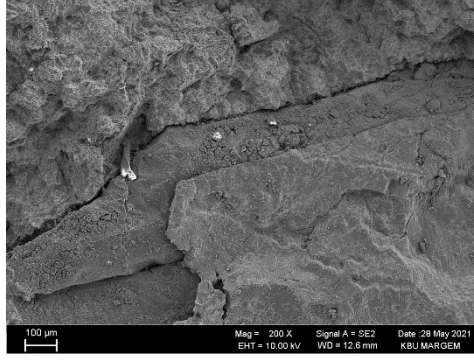


## DÖKÜM

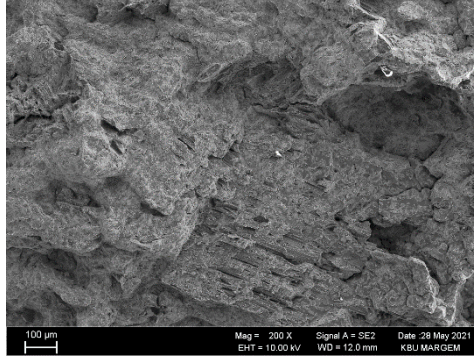
ZM21+0,5(Ca)



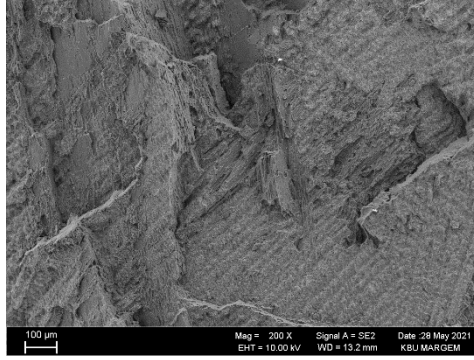
ZM21+0,5(Ca+La)



ZM21+0,5(Ca+Nd)



ZM21+0,5(La+Nd)

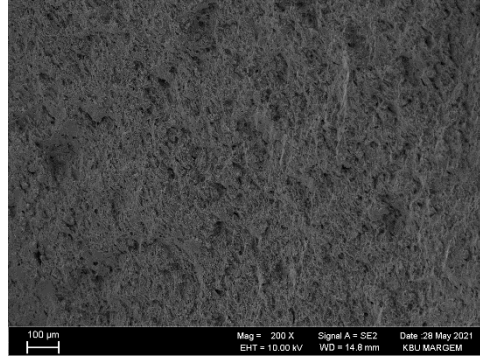


## HADDE

ÇATLAKLARDAN  
DOLAYI ÇEKME  
NUMUNESİ  
ÇIKARILAMAMIŞTIR.

ÇATLAKLARDAN  
DOLAYI ÇEKME  
NUMUNESİ  
ÇIKARILAMAMIŞTIR.

ÇATLAKLARDAN  
DOLAYI ÇEKME  
NUMUNESİ  
ÇIKARILAMAMIŞTIR.

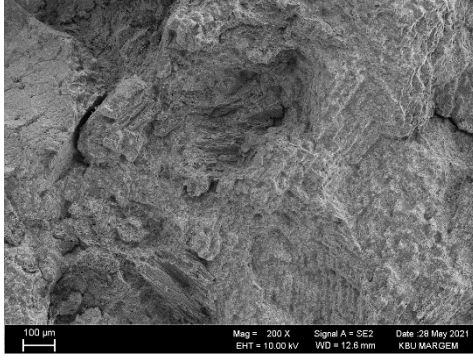


Şekil 7.24. Döküm ve haddelenmiş alaşımların kırık yüzey SEM görüntüleri.

## DÖKÜM

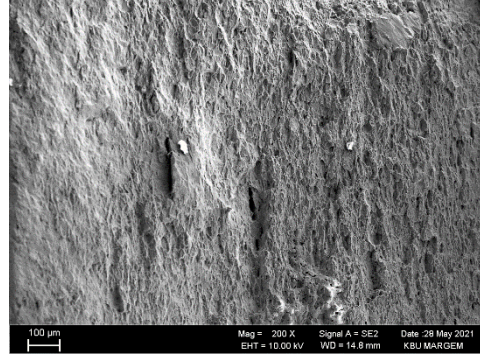
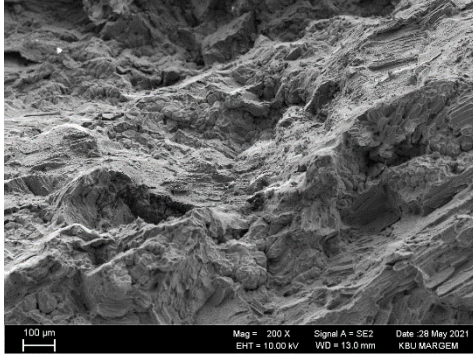
## HADDE

ZM21+0,5(La+Ca+Nd)

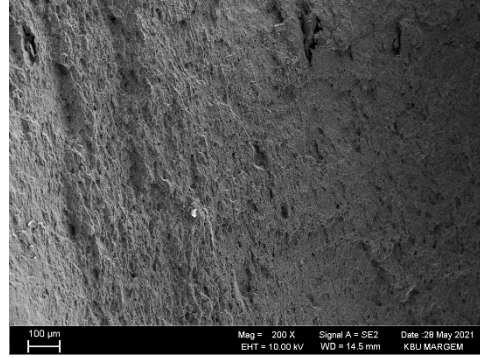
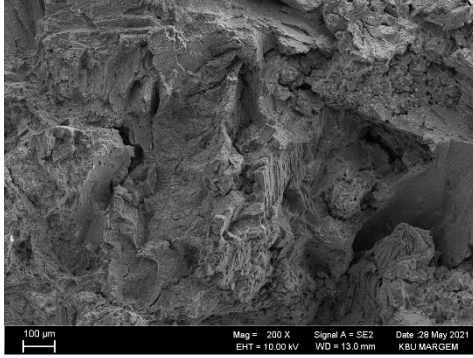


ÇATLAKLARDAN  
DOLAYI ÇEKME  
NUMUNESİ  
ÇIKARILAMAMIŞTIR.

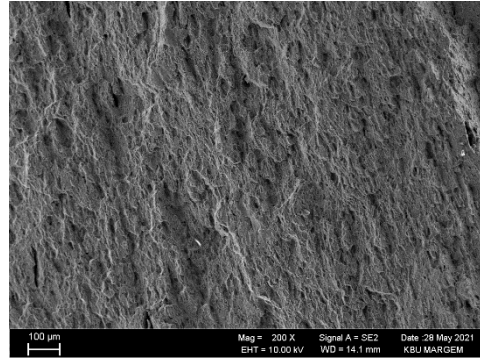
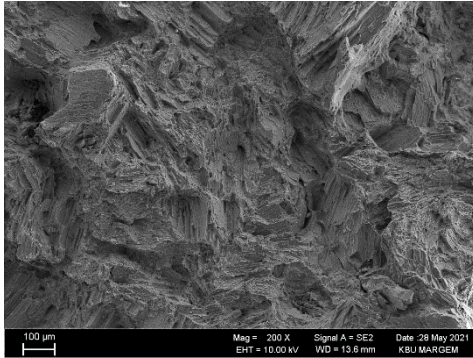
ZM21+0,5(Sn)



ZM21+0,5(Sn+La)



ZM21+0,5(Sn+Nd)



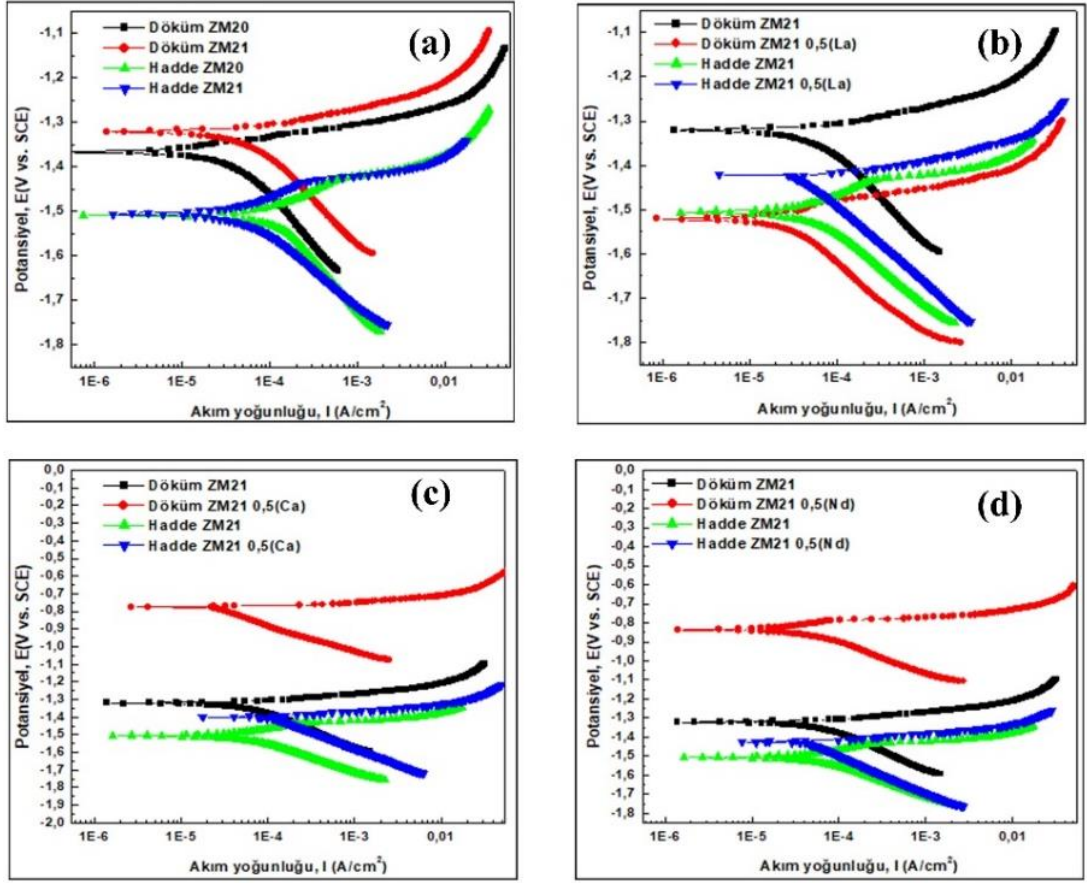
Şekil 7.25. Döküm ve haddelenmiş alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.

## 7.5. KOROZYON TEST SONUÇLARI

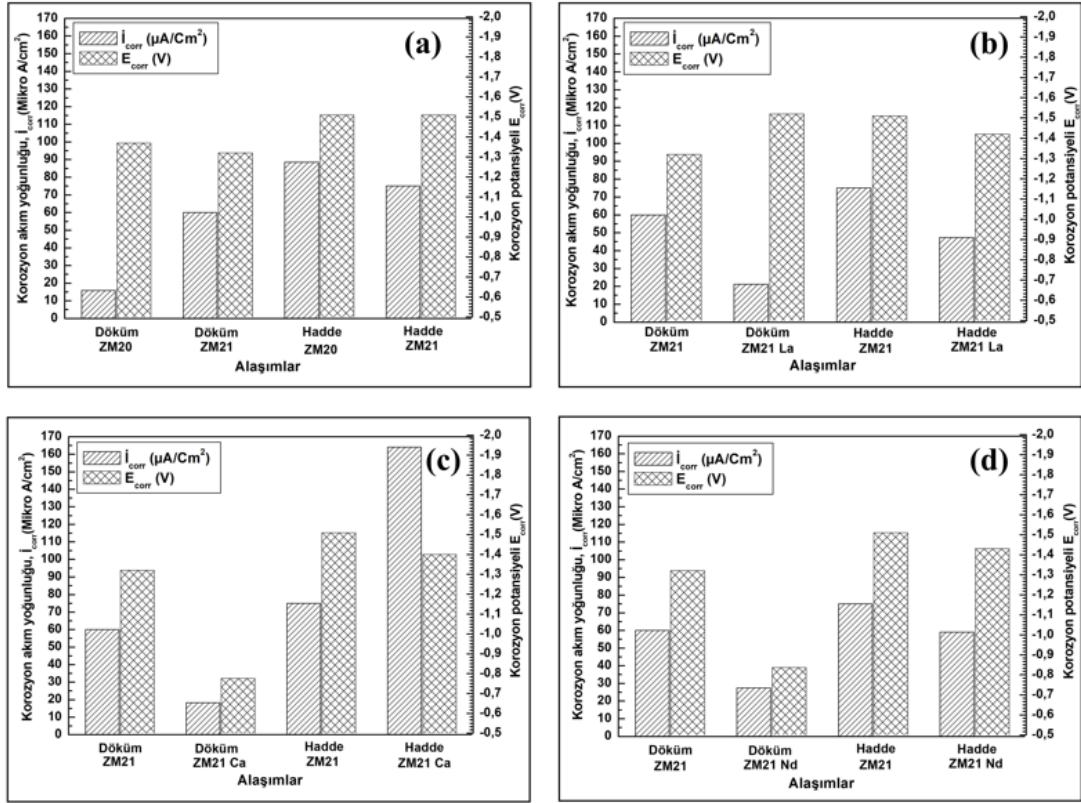
### 7.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Testleri

Test sonuçlarına göre; ZM20-ZM21 alaşımı ve ZM21'e ilave elementle oluşturulan alaşımların Potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri ve korozyon akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri Şekil 7.26-7.31 arasında verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde ZM21 döküm alaşımlarının korozyon potansiyeli haddelenmiş alaşımların korozyon potansiyeline göre daha pozitif değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.26 (a) incelendiğinde elde edilen polarizasyon eğrilerinde haddelenmiş alaşımların döküme göre daha negatif değerde kaldığı tespit edilmiştir. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.27 (a)'da gösterilmektedir ve korozyon potansiyellerine göre haddelenmiş alaşımların akım yoğunluğu artmış ve korozyon dirençleri azalmıştır. Şekil 7.26 (b) elde edilen polarizasyon eğrilerinde ZM21+0,5(La) döküm alaşımı ZM21'e göre daha negatif değerde kalırken hadde alaşımı pozitif değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.27 (b)'da gösterilmektedir ve ZM21+0,5(La) alaşımının ZM21'e göre korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Şekil 7.26 (c)'de görüldüğü gibi elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımı döküm ZM21'e ve Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerlerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.27 (c)'da görüldüğü gibi döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu artmış ve korozyon direnci düşmüştür. Şekil 7.26 (d)'de elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Nd) alaşımı döküm ZM21'e göre ve Hadde ZM21+0,5(Nd) alaşımı, hadde ZM21'e daha pozitif değerlerde kalmışlardır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.27 (d)'de gösterildiği gibi döküm ZM21+0,5(Nd) alaşımının döküm ZM21'e göre ve hadde ZM21+0,5(Nd) alaşımının hadde ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon dirençleri artmıştır.



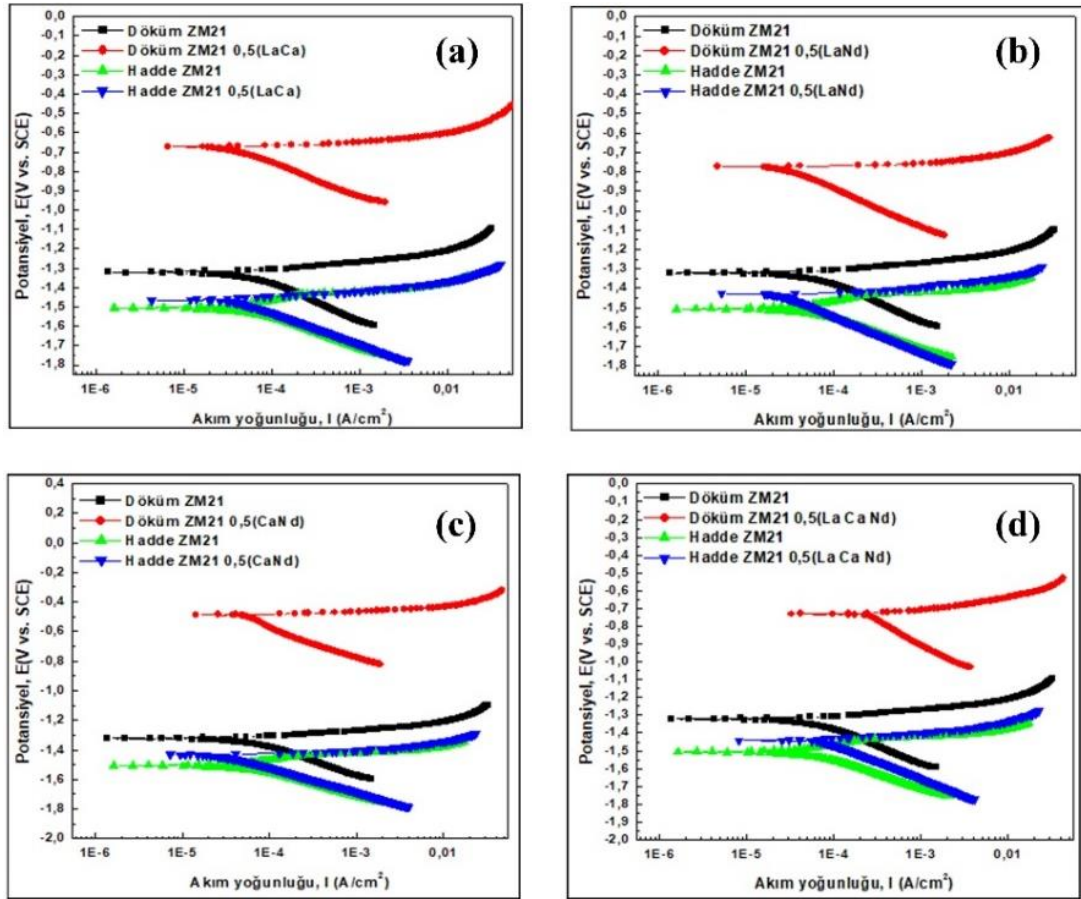
Şekil 7.26. Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri.



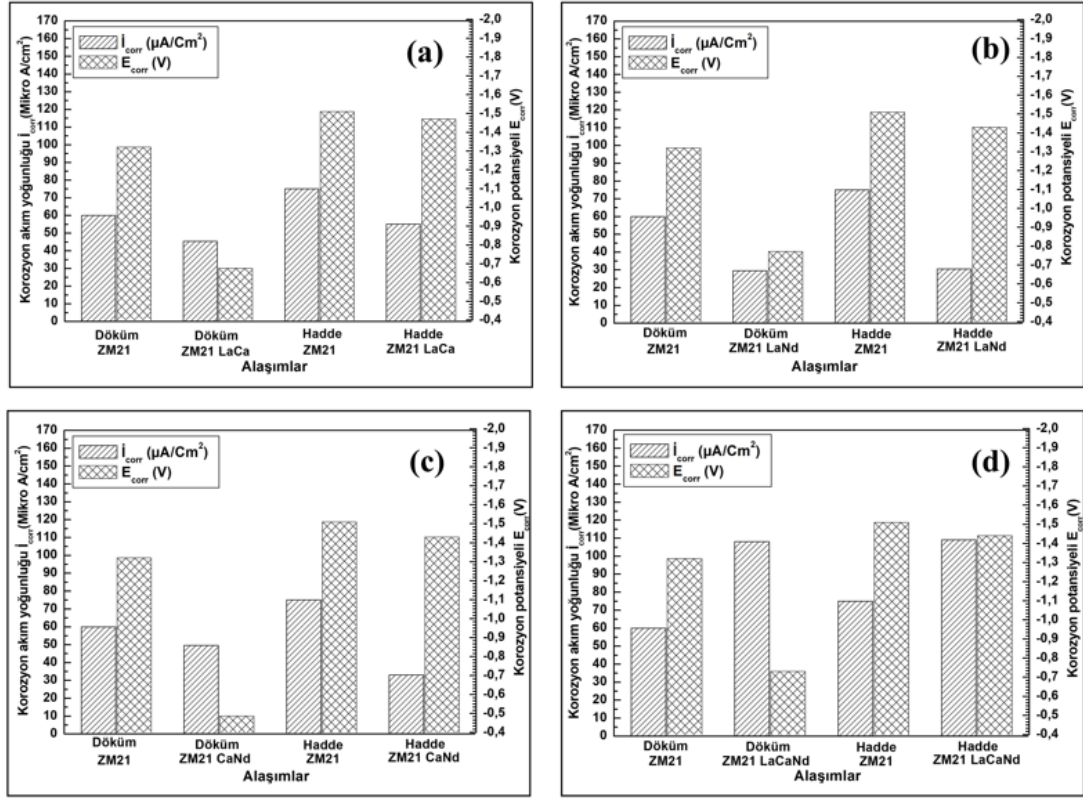
Şekil 7.27. Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri

Şekil 7.28 (a) elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(La+Ca) alaşımı döküm ZM21'e ve hadde ZM21+0,5(La+Ca) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kaldıkları tespit edilmiştir. Şekil 7.29 (a)'da bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri incelendiğinde döküm ZM21+0,5(La+Ca) alaşımının döküm ZM21'e göre ve Hadde ZM21+0,5(La+Ca) alaşımının ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon dirençleri artmıştır. Şekil 7.28 (b)'de elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(La+Nd) alaşımı döküm ZM21'e ve Hadde ZM21+0,5(La+Nd) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmışlardır. Şekil 7.29 (b)'de hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri ve korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(La+Nd) alaşımının döküm ZM21'e göre, Hadde ZM21+0,5(La+Nd) alaşımının ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon dirençleri artmıştır. Şekil 7.28 (c) incelendiğinde elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımı döküm ZM21'e göre, Hadde ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Şekil

7.29 (c) incelendiğinde döküm ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımının döküm ZM21'e ve Hadde ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımının hadde ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon dirençleri artmıştır. Şekil 7.28 (d)'de elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımı döküm ZM21'e göre ve hadde ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımı, hadde ZM21'e daha pozitif değerlerde kalmıştır. Şekil 7.29 (d)'deki korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımının döküm ZM21'e ve hadde ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımının hadde ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları artmış ve korozyon direnci azalmıştır.



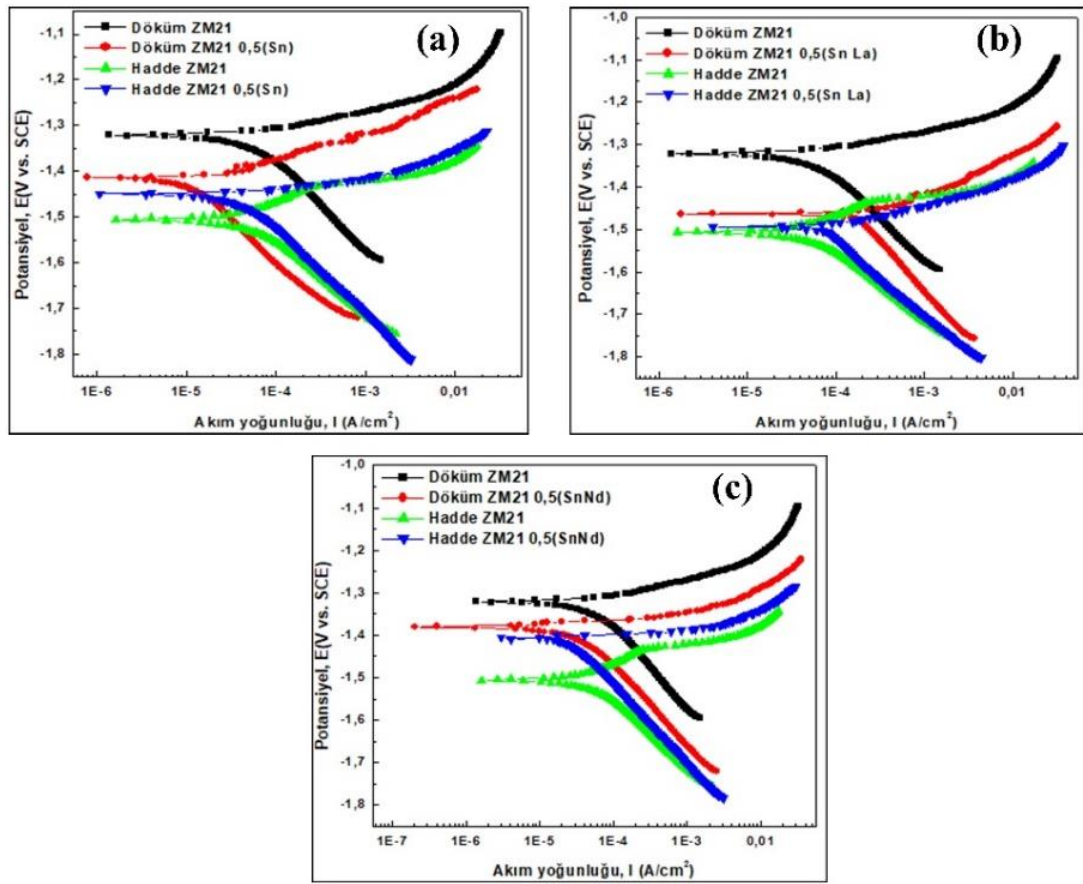
Şekil 7.28. Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri



Şekil 7.29. Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri.

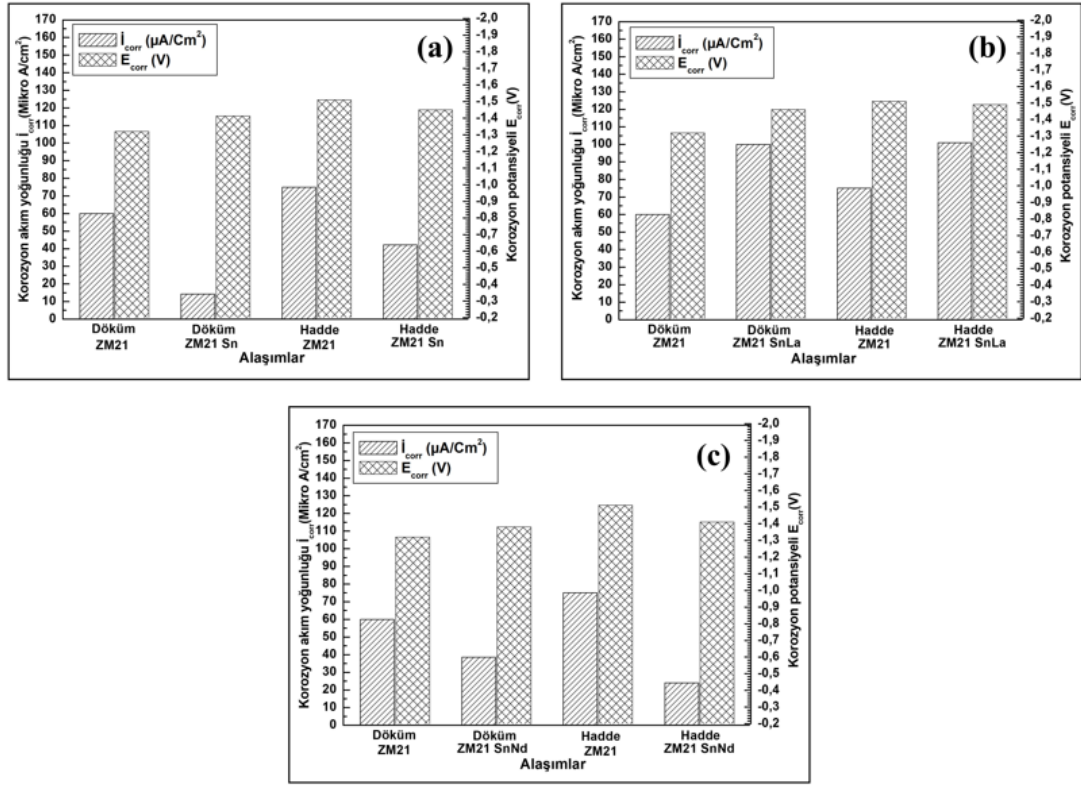
Şekil 7.30 (a)'de elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Sn) alaşımı döküm ZM21'e göre daha negatif değerde kalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.31 (a)'de gösterilmektedir ve korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(Sn) alaşımının döküm ZM21'e göre ve Hadde ZM21+0,5(Sn) alaşımının hadde ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Şekil 7.30 (b) bakıldığında elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Sn+La) alaşımı döküm ZM21'e göre daha negatif değerde kalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn+La) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif fakat çok yakın değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.31 (b)'de gösterilmektedir ve korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(Sn+La) alaşımının döküm ZM21'e göre korozyon akım yoğunluğu artmış ve korozyon direnci azalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn+La) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre artmış ve korozyon direnci azalmıştır. Şekil 7.30 (c)'de elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımı döküm ZM21'e göre daha negatif değerde

kalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 7.31 (c)'de görüldüğü gibi korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımının döküm ZM21'e ve Hadde ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımının hadde ZM21'e göre korozyon akım yoğunlukları azalmış ve korozyon dirençleri artmıştır. Bu sonuçlar üzerinde daha net bilgi elde edebilmek için aynı alaşımların daldırma test sonuçları irdelenecektir. Benzer çalışmalar literatürde mevcuttur [115].



Şekil 7.30. Alaşımların döküm ve hadde olarak potansiyodinamik polarizasyon test grafikleri.





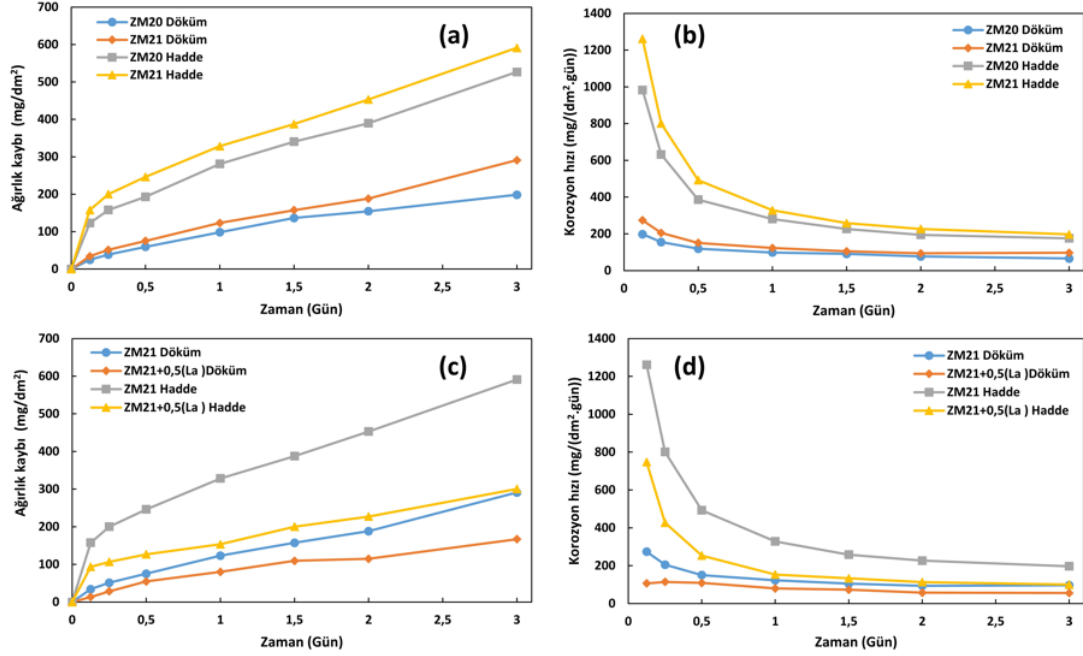
Şekil 7.31. Alaşımların döküm ve hadde olarak akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri.

Ca içeren döküm alaşımların korozyon potansiyelleri daha pozitif bir değer alırken, haddelenmiş Ca içeren alaşımlar daha negatif bir değer almıştır. Bu durum Nd, LaCa, LaNd, CaNd, LaCaNd içeren alaşımlarda da görölmektedir. Fakat Sn, SnLa, SnNd içeren alaşımlarda korozyon potansiyeli döküm alaşımlara kıyasla haddelerde çok az daha fazla negatif değer aldığı tespit edilmiştir.

### 7.5.2. Daldırma Korozyon Testleri

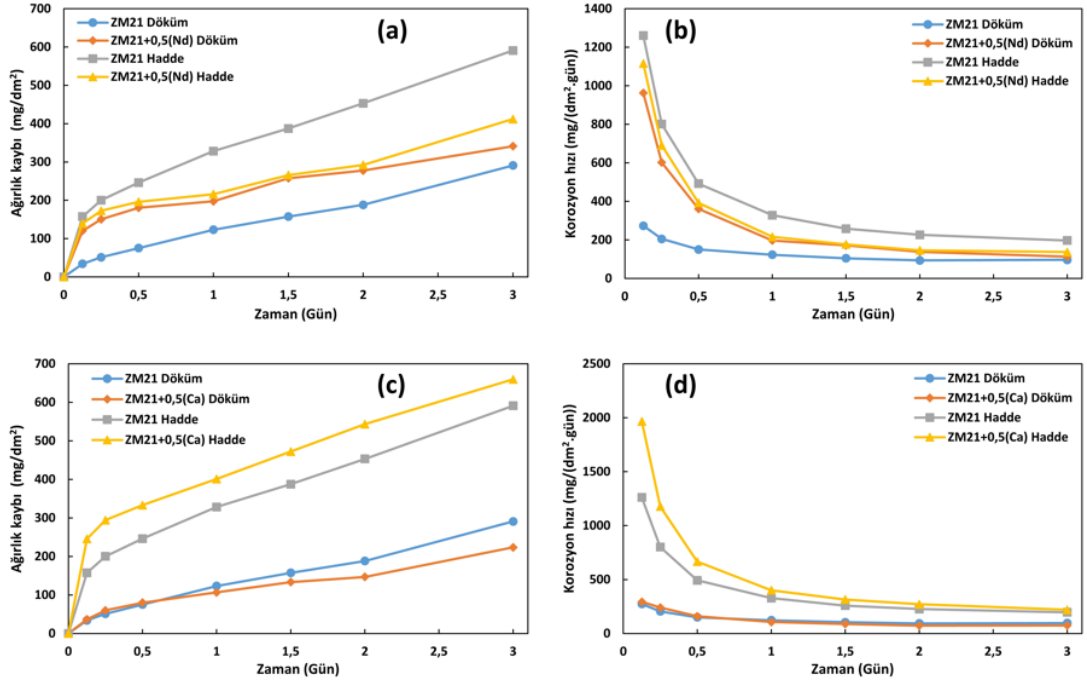
Şekil 7.32-7.37 daldırma korozyon testi sonrası döküm ve haddelenmiş ürünlerinin korozyon hızı ve saatlere göre ağırlık kaybı grafikleri sırasıyla verilmiştir. Döküm ve hadde olarak ZM21 magnezyum alaşımı ile ZM21 alaşımına element ilavesiyle elde edilen diğer alaşımların kıyaslanması için alaşımlarının daldırma testi sonuçları irdelenmiştir. Tüm alaşımlar için haddelenmiş alaşımların korozyon kaybı grafiklerde göröldüğü gibi döküm ile kıyaslandığında artmıştır. Şekil 7.32’de grafik incelendiğinde ZM21 alaşımının ZM20 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak % 46,6 artmış, hadde olarak % 12,3 artmıştır. ZM21+0,5(La) alaşımının ZM21 alaşımına

göre döküm olarak %43,2 azalmış, hadde olarak %49,3 azalmıştır ve böylece korozyon hızlarının daha düşük olduğu görülmüştür.

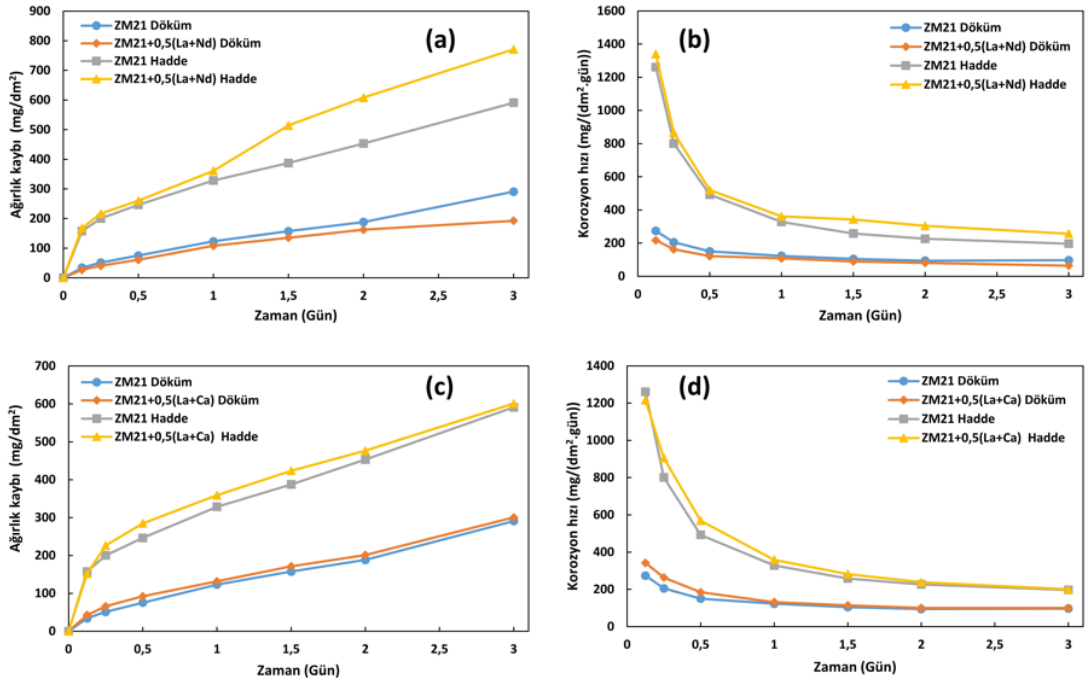


Şekil 7.32. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

Şekil 7.33'de ZM21+0,5(Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %17,1 artmış, hadde olarak %30,2 azalmıştır. ZM21+0,5(Ca) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %2,3 azalmış, hadde olarak %11,2 artmıştır. Burada Ca elementinin oksijen ile oluşturduğu sert oksitlerin haddeleme sonrası yapı içerisinde meydana getirdiği gerilmelerin, çatlakların korozyon üzerindeki etkisini görebiliriz [18].



Şekil 7.33. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

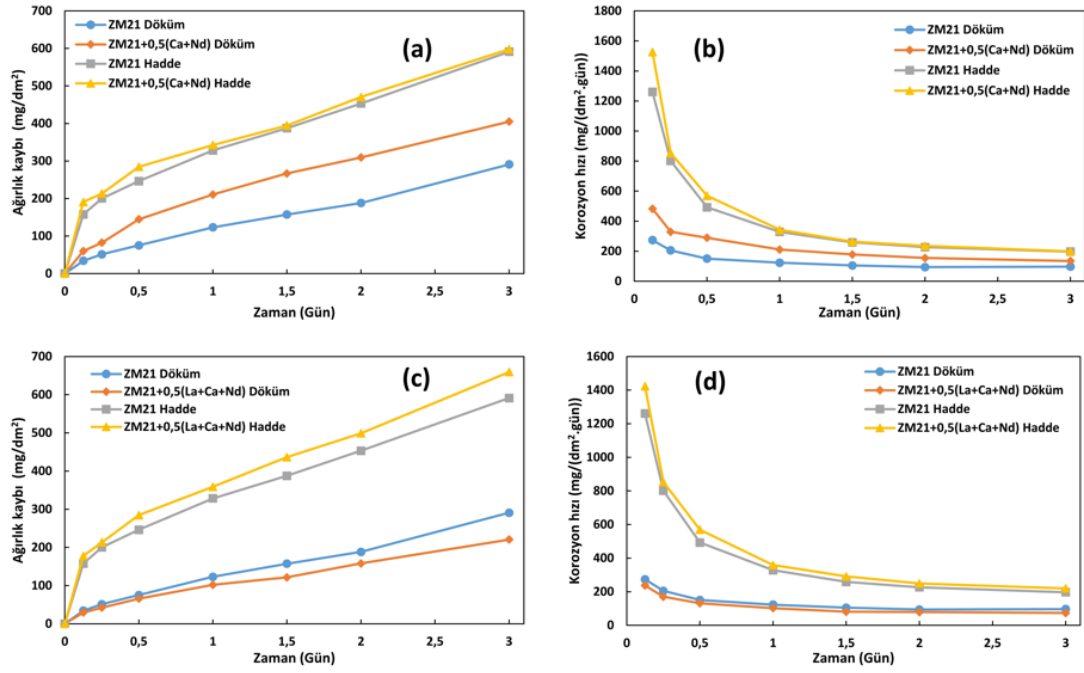


Şekil 7.34. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

Şekil 7.34'de ZM21+0,5(La+Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %33,7 azalmış, hadde olarak %30,2 artmıştır. ZM21+0,5(La+Ca)

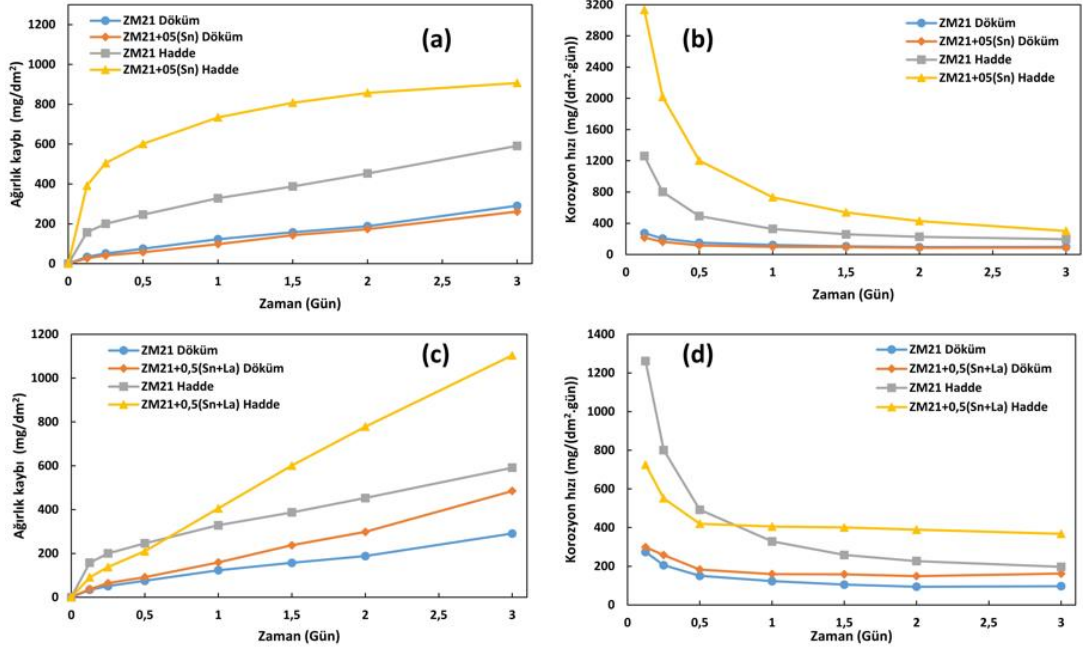
alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %3,4 artmış, hadde olarak %1,52 artmıştır.

Şekil 7.35'de ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %39,6 artmış, hadde olarak %1,18 artmıştır. ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %24,1 azalmış, hadde olarak %11,5 artmıştır.



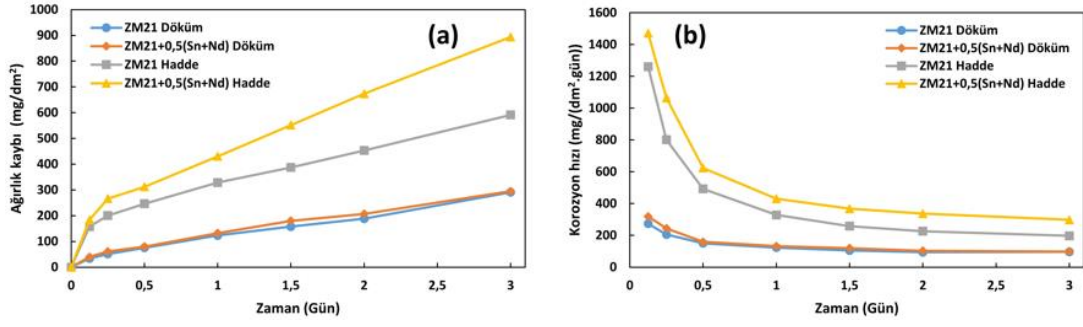
Şekil 7.35. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

Şekil 7.36'de ZM21+0,5(Sn) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %10 azalmış, hadde olarak %53,4 artmıştır. ZM21+0,5(Sn+La) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %67,2 artmış, hadde olarak %86,6 artmıştır.



Şekil 7.36. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

Şekil 7.37’de ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %1,72 artmıştır, hadde olarak %51,09 artmıştır. Ağırlık kaybı grafiklerinin yanında korozyon hızlarını gösteren açıklayıcı grafikler bulunmaktadır. Bozunma hızı, artan miktarda çökelti ile doğrusal olarak artma eğiliminde olması ve çökeltilerin lokal bozunmaya neden olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda ZM21 alaşımları ile ilgili korozyon üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Sadece korozyon test yöntemleri ile ilgili benzer çalışmalar bulunmaktadır. Candan ve arkadaşları farklı bir Mg alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada daldırma testleri ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlarda, alaşımının korozyon direncinin, alaşımdaki farklı bir element içeriğinin artmasıyla kademeli olarak arttığını göstermiştir. Alaşımın korozyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır [115,116].

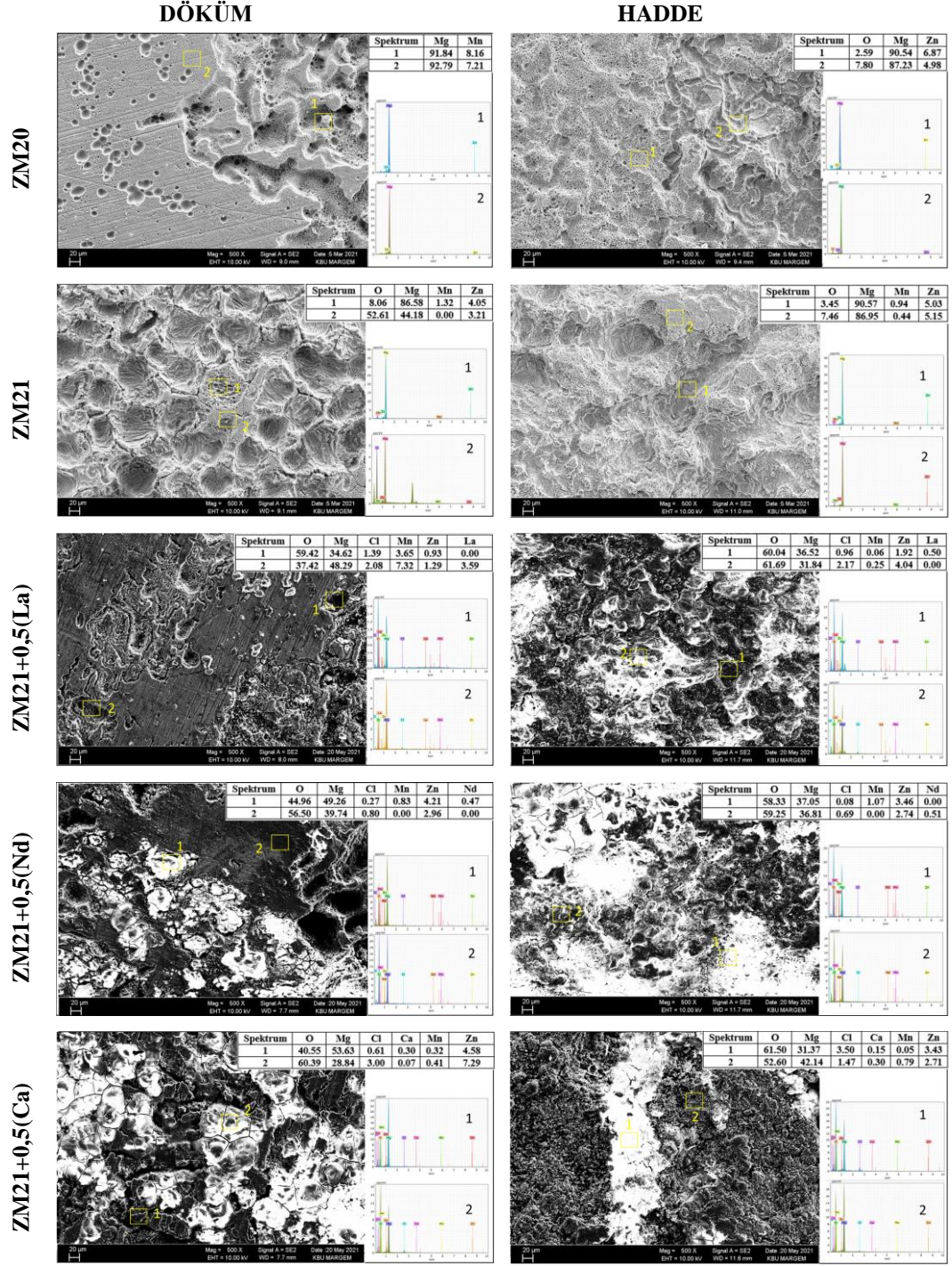


Şekil 7.37. Döküm ve hadde alaşımlarının ağırlık kaybı ve korozyon hızı grafikleri.

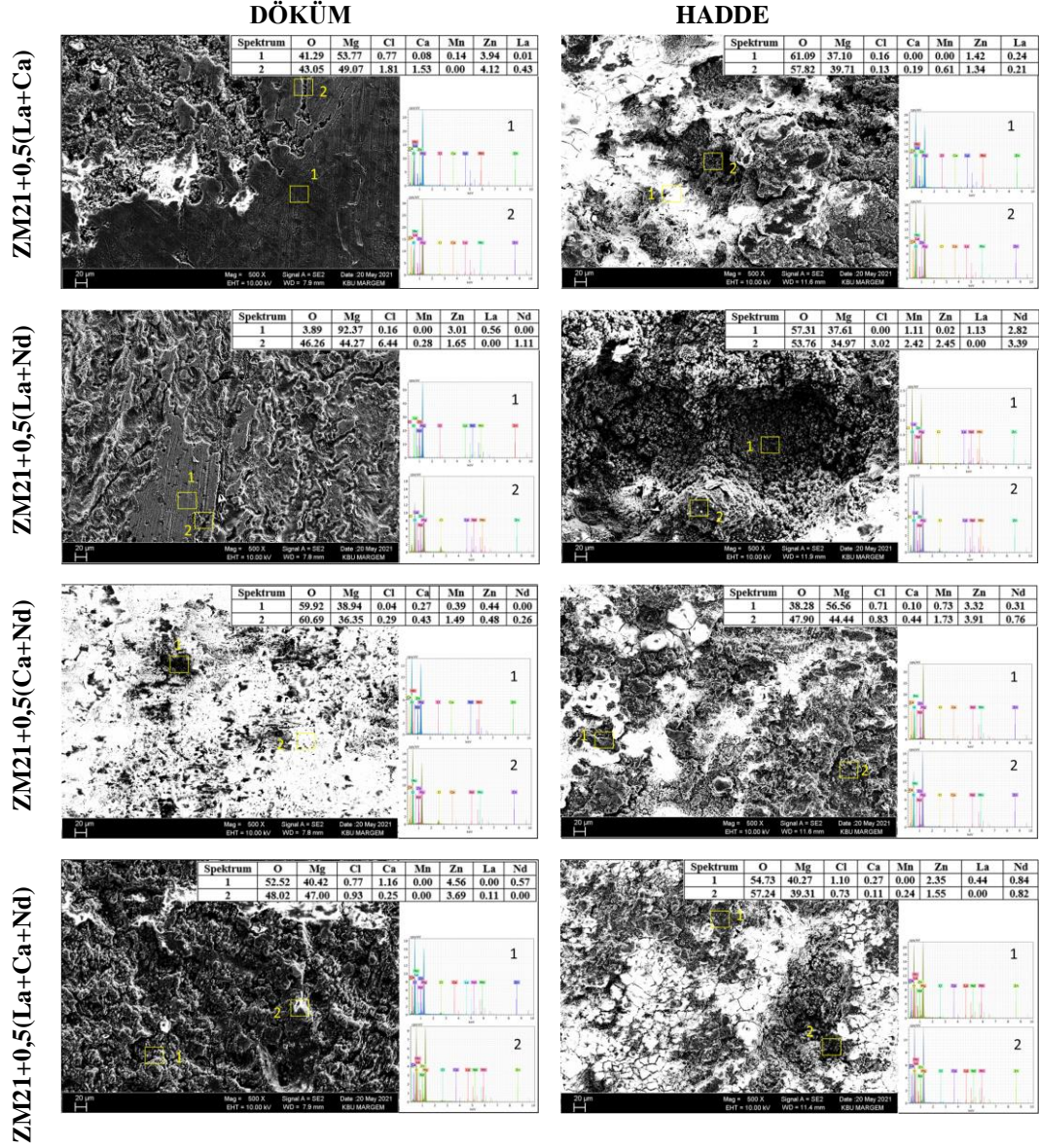
### 7.5.3. Daldırma Korozyon Testi Sonrası Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Şekil 7.38-7.40' de döküm ve hadde alaşımlara 72 saat (3 gün) süresince daldırma korozyon testi yapılmış ve sonrasında korozyona uğramış yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri ve EDX analizleri, korozyona uğramış numunelerin öncelikle kromik asit çözeltisine ardından alkol ve saf su içerisine daldırılıp korozyon parçalarından temizlendikten sonra alınmıştır.

Mg-Zn-Mn alaşımlarına ilave element içeriği daha yüksek olduğunda ZM21 alaşımlarında daha fazla ikincil faz veya çökelti vardır. Dolayısıyla çökeltilerin hem miktarı hem de dağılımı, Çukurcuk (Pitting) ve mikrogalvanik korozyon prensibine bağlı olarak bozunma davranışını etkileyebilir. SEM resimleri incelendiğinde haddeleme öncesi uygulanan homojenizasyon işlemi ile bu fazların ve çökeltilerin daha homojen dağılım gösterdiği düşünülmektedir. Böylece bütün haddelenmiş alaşımlarda bozunma hızı yükselmiş ve bozunma yüzeyleri döküm alaşımlar ile kıyaslandığında daha düz (çukursuz) yüzeyler meydana gelmiştir. Alaşım elementlerinin türüne ve miktarına bağlı olarak döküm alaşımlarda çukur boyutları değişim göstermiştir. Bu durum haddelenmiş alaşımlarda alaşım elementine bağlı olarak bazı alaşımlarda daha ince etki ile geniş ve derin olarak görülmektedir.



Şekil 7.38. Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

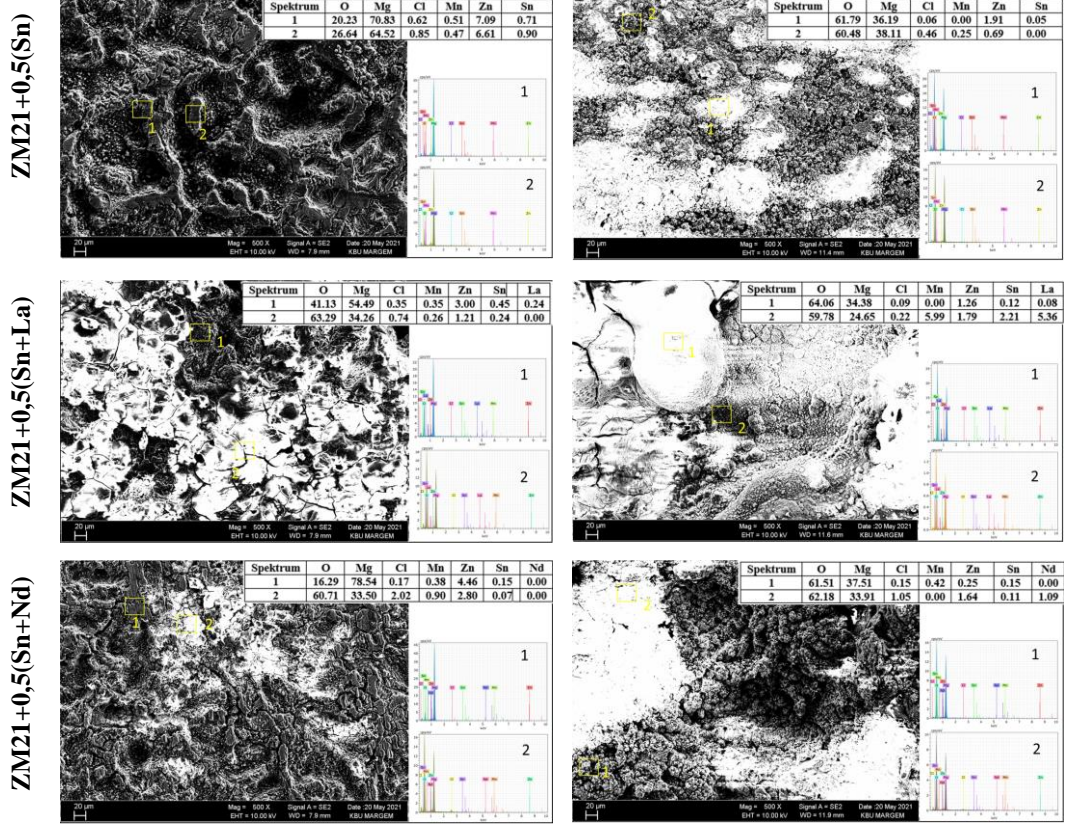


Şekil 7.39. Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.



## DÖKÜM

## HADDE



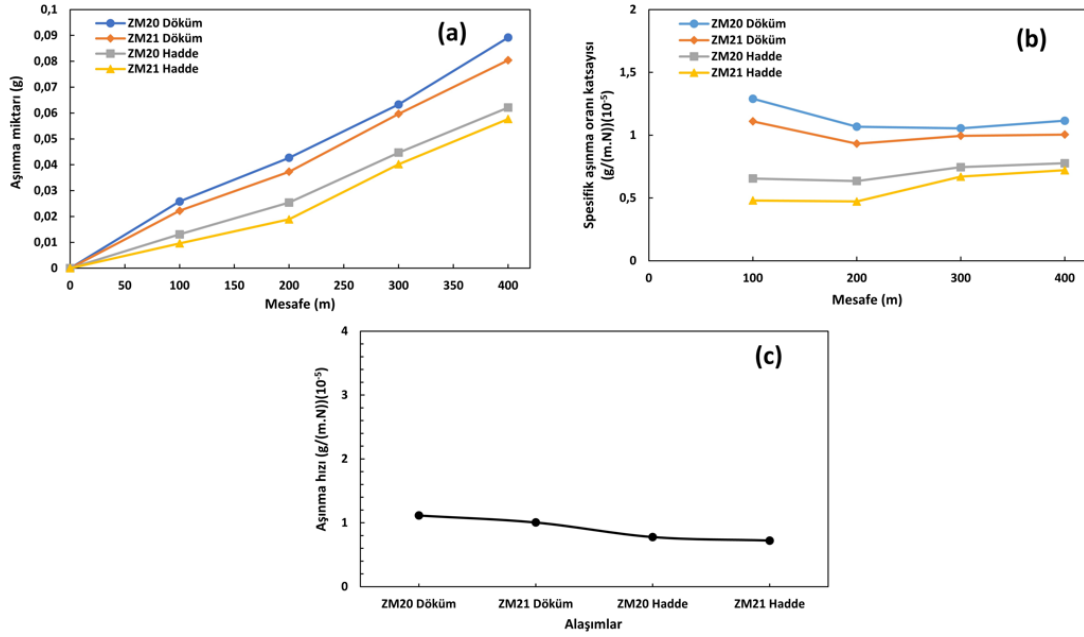
Şekil 7.40. Döküm ve hadde alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

## 7.6. AŞINMA

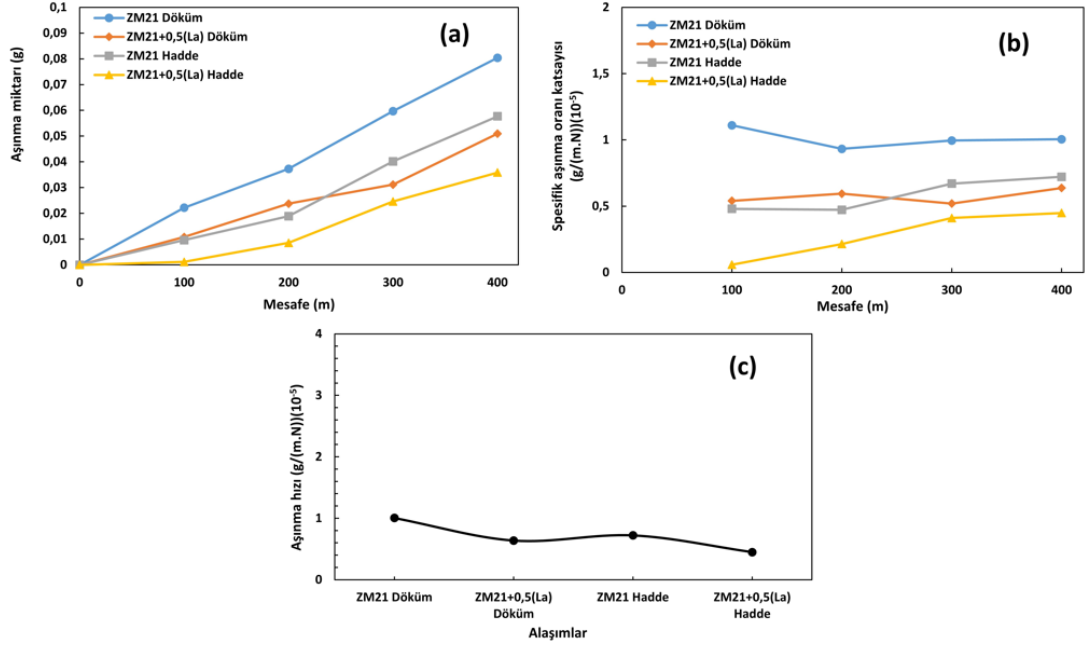
### 7.6.1. Korozif Aşınma Testi

Şekil 7.41-7.51 arasında döküm ve haddelenmiş alaşımların aşınma test sonuçlarından Aşınma miktarı Miligram (mg) cinsinden hassas terazide tartılarak hesaplanmıştır. Spesifik aşınma oranı katsayısı her yüz metrede bulunan kayıp değerinin  $(g/(m.N)).(10^{-5})$  eşitliğinde kullanılması ile hesaplanmıştır. Aşınma hızı ise tüm alaşımların sadece 400 m'de bulunan kayıp değerinin  $(g/(m.N)).(10^{-5})$  eşitliğinde kullanılması ile elde edilmiştir. Burada g:gram, m:metre, N:Newton'dur. Korozif aşınma sonrasında numunelerin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 7.52-7.54 arasında verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, döküm olarak ZM21 alaşımı ZM20'ye göre %10,31 daha az aşınma kaybı vermiştir. Döküm olarak ZM21+0,5(Nd) alaşımı ZM21'e göre %64,55 daha az aşınma kaybı yaşayan alaşım

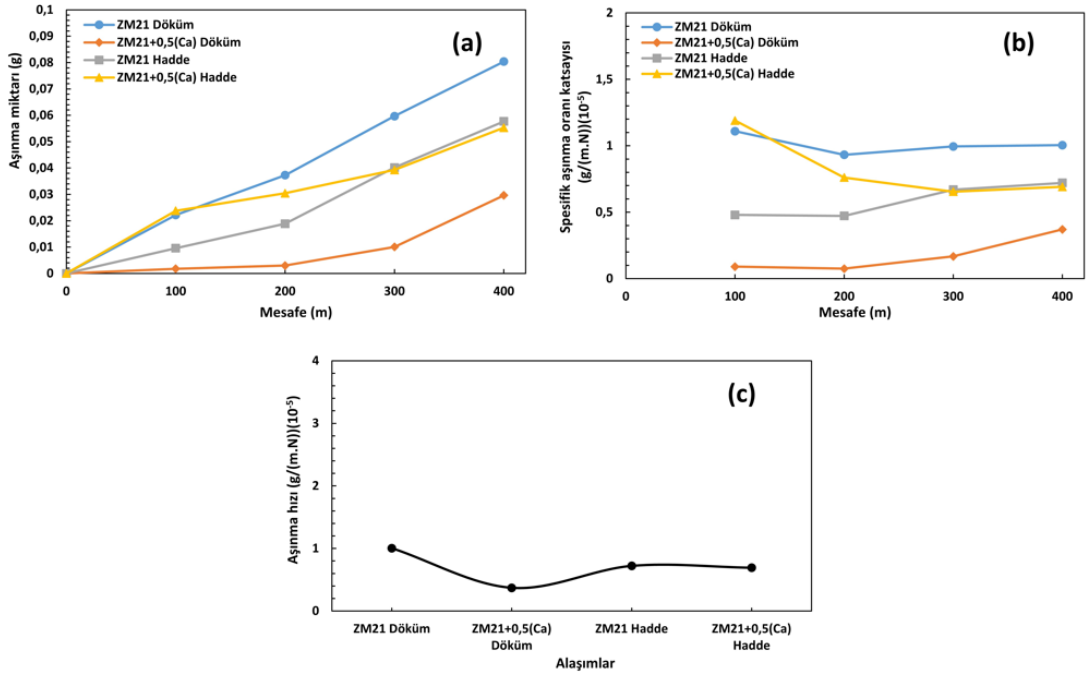
olarak en az kayıp veren alaşım olmuştur. Döküm olarak ZM2+0,5(La+Nd+Ca) alaşımı ZM21'e göre %3,48 daha az aşınma kaybı veren alaşım olarak ZM21'den sonra en çok kayıp yaşayan döküm alaşımı olmuştur. Haddelenmiş olarak ZM21+0,5(Sn+La) alaşımı ZM21'e göre %75,10 daha az aşınma kaybı vermiş, ZM21+0,5(Nd) alaşımı ZM21'e göre %68,12 daha az aşınma kaybı vermiş ve bu iki alaşım en az aşınma oranına sahip iki alaşım olmuştur. Hadde olarak ZM2+0,5(La+Nd+Ca) alaşımı ZM21'e göre %0,015 daha az aşınma kaybı veren alaşım olarak ZM21'den sonra en çok kayıp yaşayan hadde alaşımı olmuştur. Benzer alaşım üzerinde Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; Mg-Zn-Y-Zr alaşımının kolay bir ısıl işlemde önce ve sonra aşınma davranışı, ağırlıkça %0.5 NaCl çözeltisi altında incelenmiştir. Sonuçlar, test koşullarından bağımsız olarak, ısıl işlemde sonra alaşımın aşınma direncinin önemli ölçüde arttığını ortaya koymuş. Aşınma mekanizması, kuru kayma durumunda abrasif aşınma baskın iken, NaCl çözeltisinde kayma altında korozif aşınma baskın olduğu rapor edilmiştir [117].



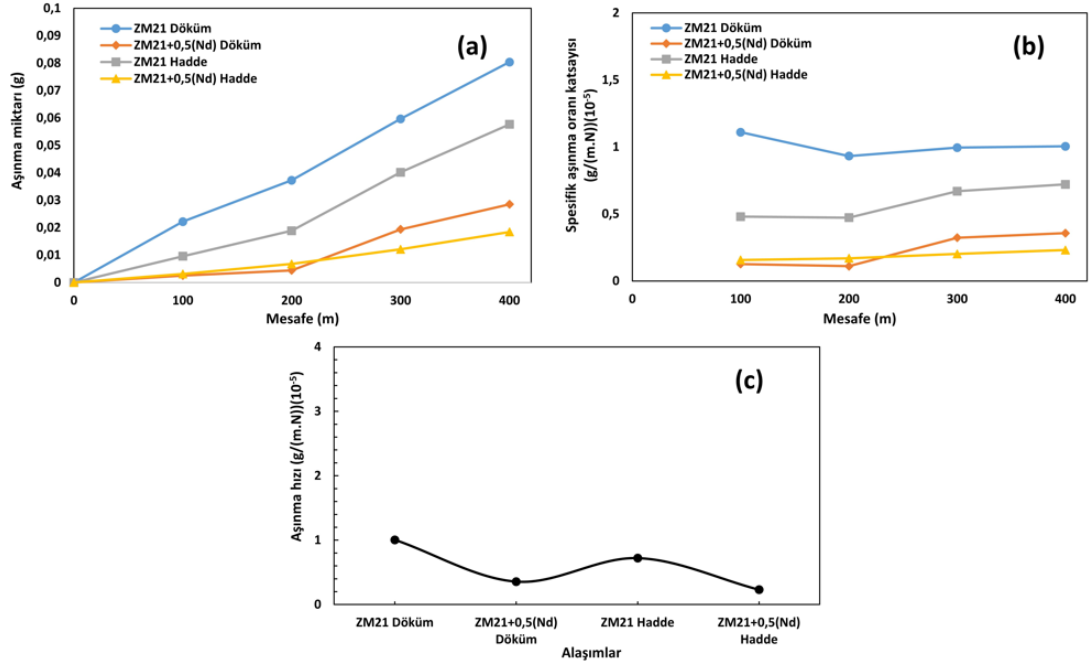
Şekil 7.41. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



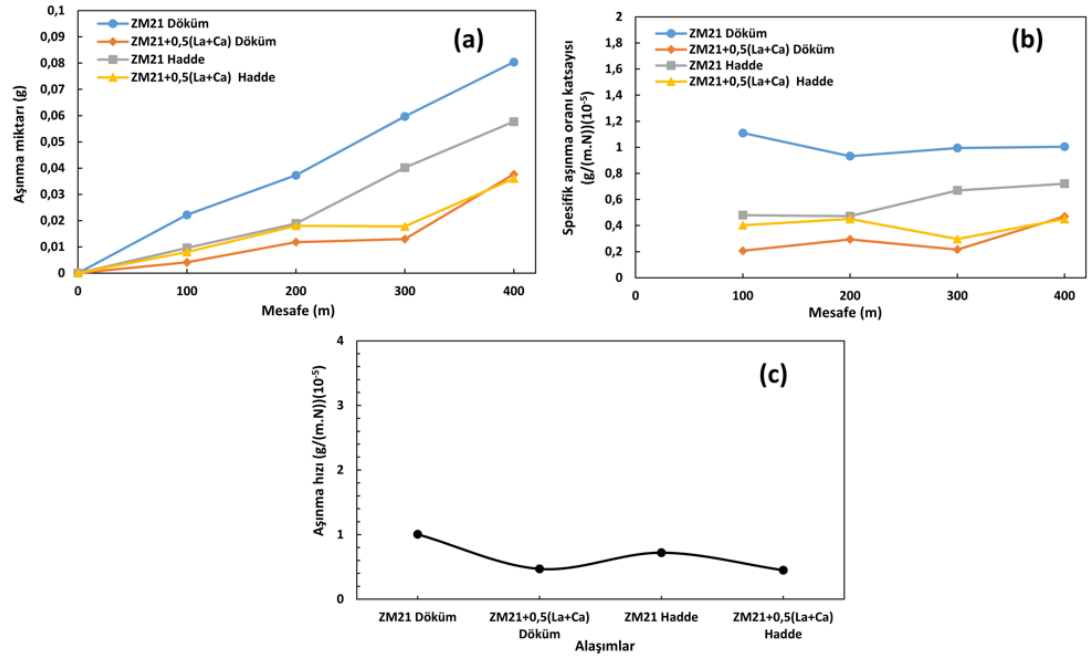
Şekil 7.42. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



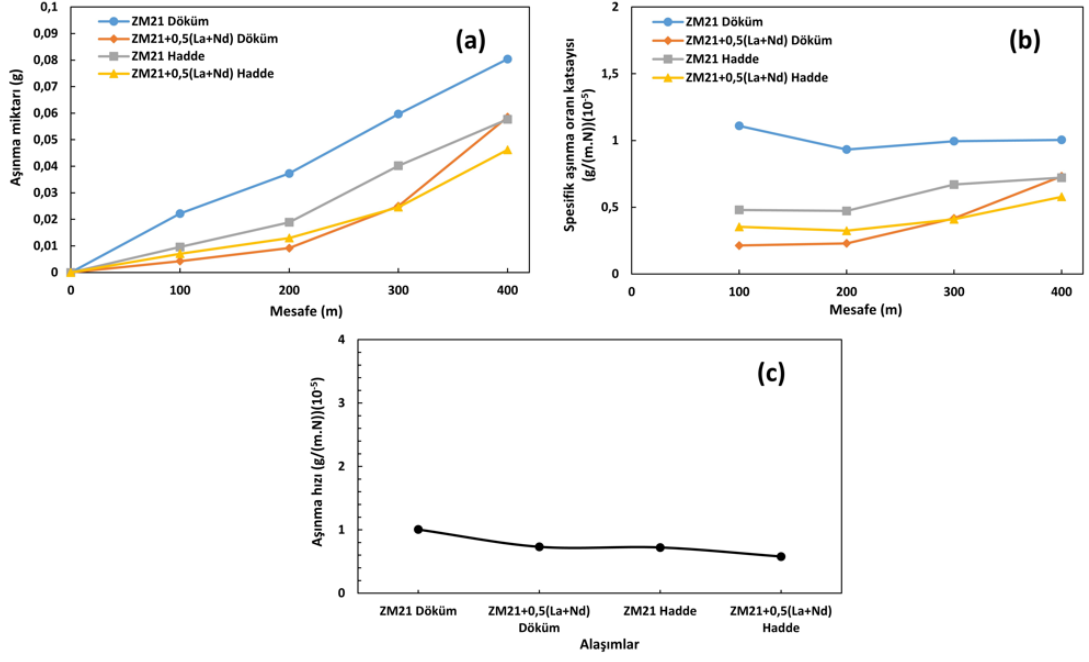
Şekil 7.43. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



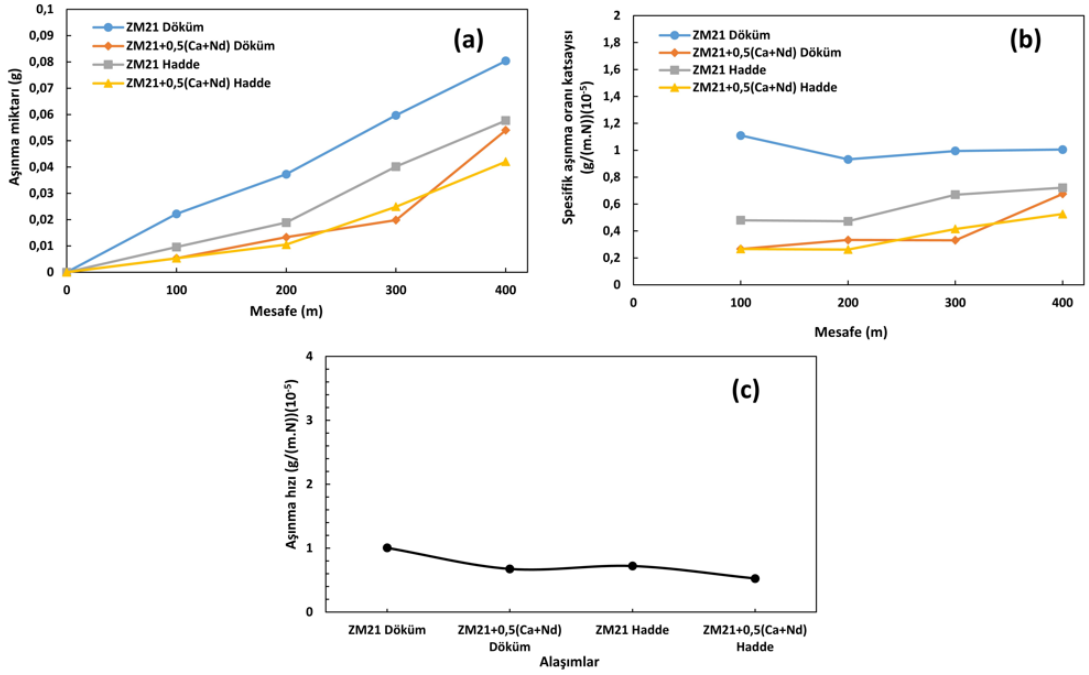
Şekil 7.44. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



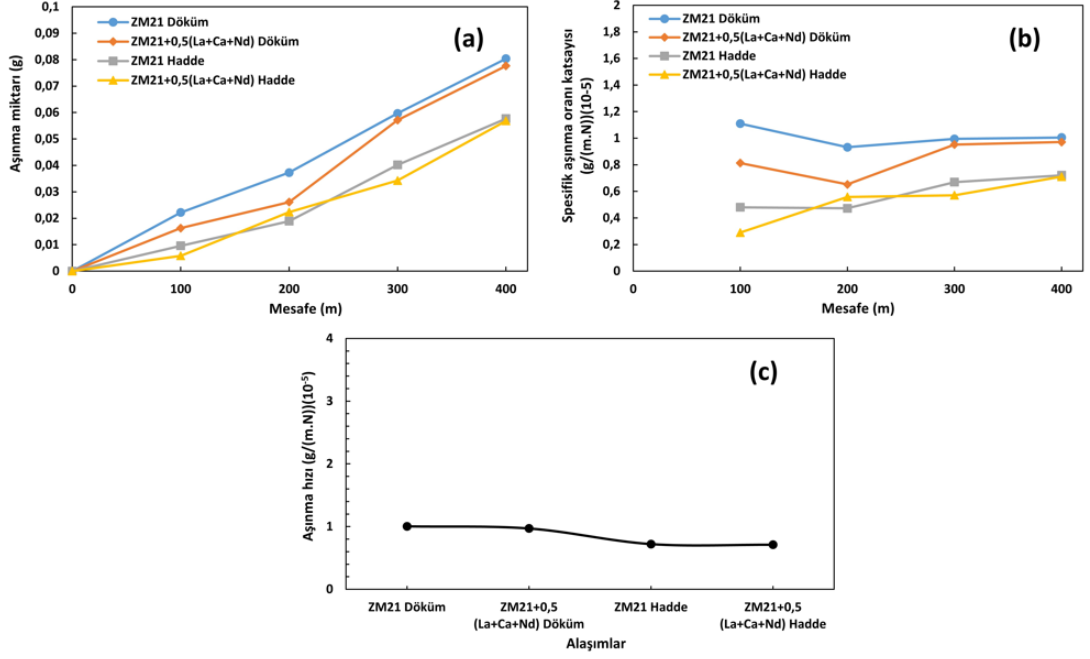
Şekil 7.45. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



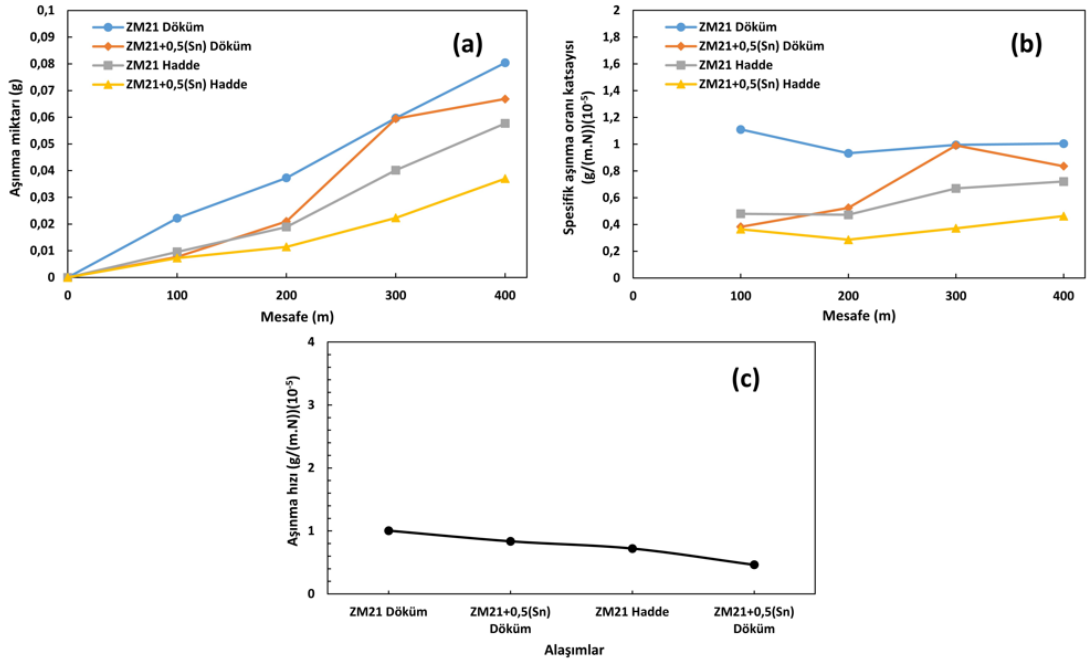
Şekil 7.46. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



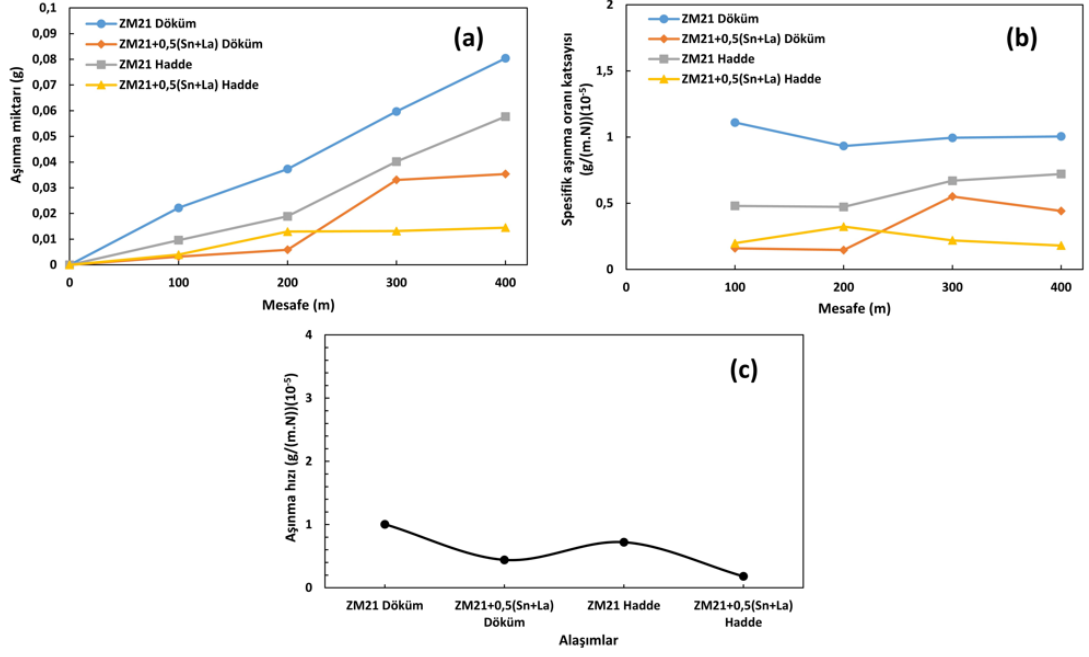
Şekil 7.47. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



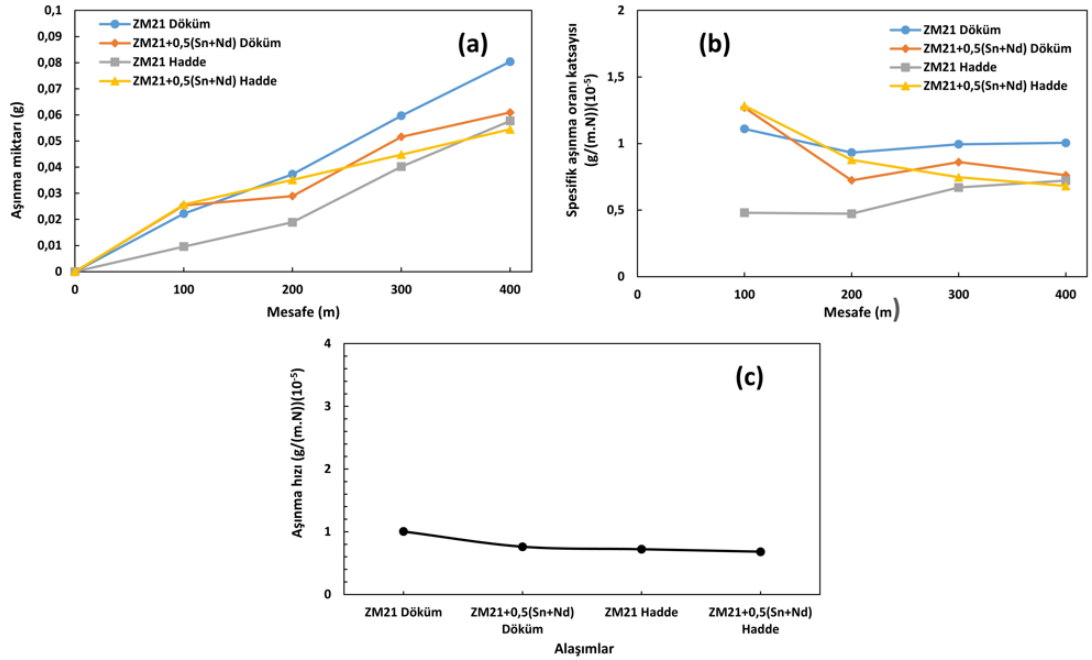
Şekil 7.48. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



Şekil 7.49. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



Şekil 7.50. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.



Şekil 7.51. Döküm ve hadde alaşımlarının; Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı ve Aşınma hızı.

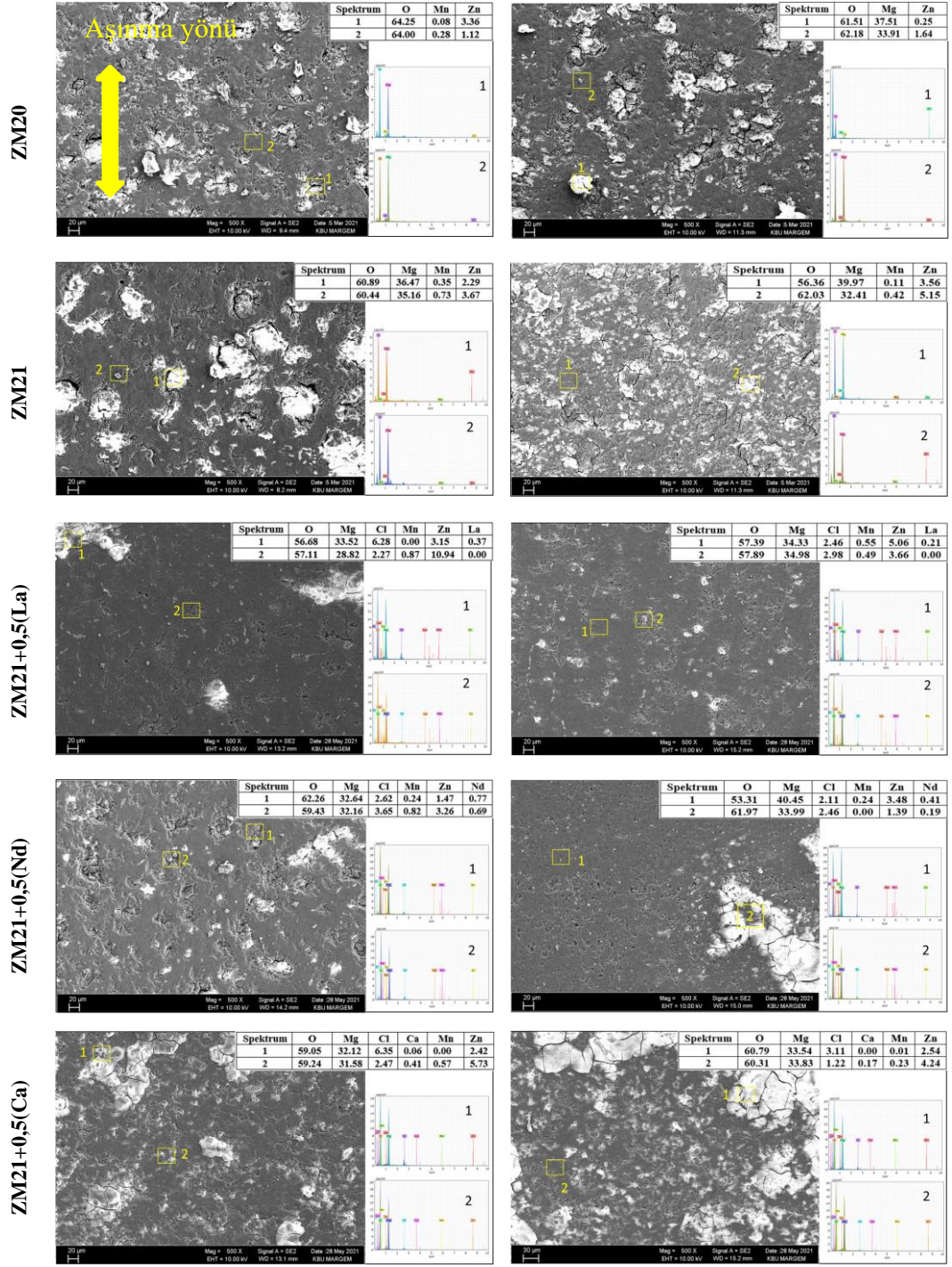
### **7.6.2. Korozi Aşınma Testi Sonrası Yüzeylerin SEM Görüntüleri**

Döküm ve hadde alaşımlarının korozi aşınma test sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri 7.52-7.54 arasında verilmiştir. Hem döküm hem de hadde alaşımlarının aşınma yüzeyleri incelendiğinde orta bölgelerde yukarı aşağı doğru daha ince bir iz ve bu izin kayma yönüne paralel olarak kenarlara doğru biraz daha kabalaştığı görülmektedir. Aşınma bölgesinin kenar kısımlarının oksit parçacıkları ve kaba partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Bu bölgelerin, EDX sonuçlarına bakarak çok miktarda O ve az miktarda Cl içeren farklı reaksiyonlar geçiren partiküllerden oluştuğu ve bu partiküllerin biriktiği düşünülmektedir. Bununla beraber döküm alaşımlarda haddelenmiş alaşımlara göre daha çok pullanmanın, topaklanmanın görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum döküm alaşımların sahip olduğu düzensiz tane yapısı ve zayıf aşınma direnci ile ilişkilendirilebilir.

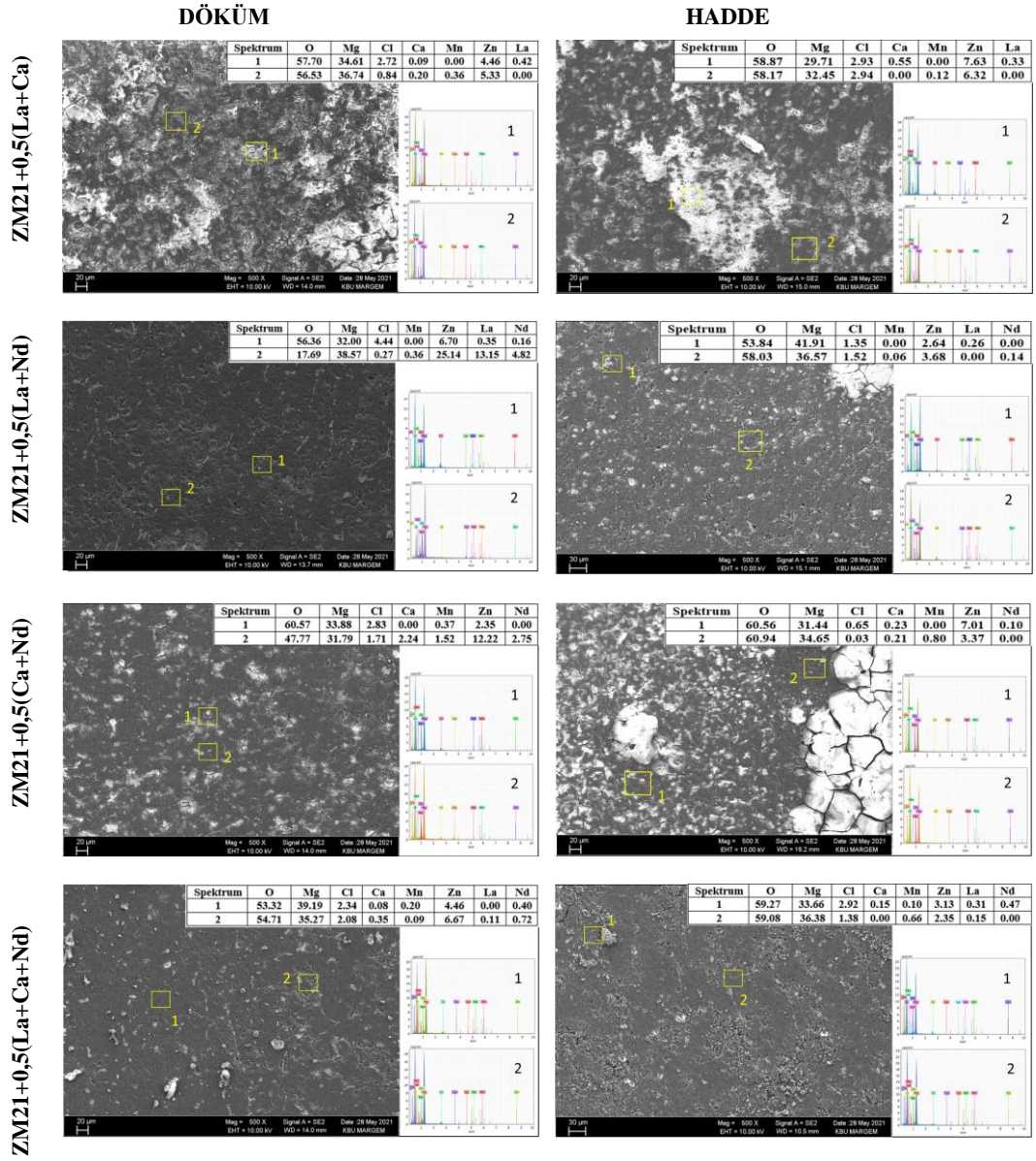


## DÖKÜM

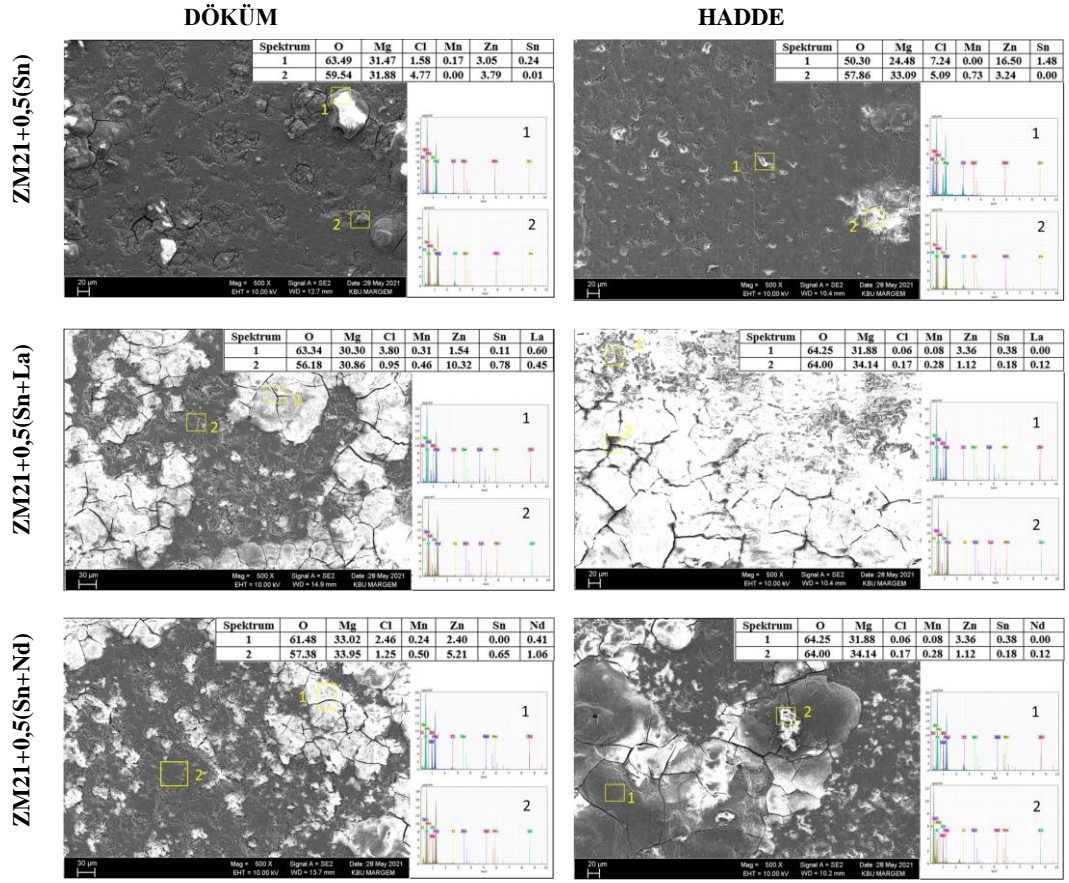
## HADDE



Şekil 7.52. Döküm ve hadde alaşımlarının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.



Şekil 7.53. Döküm ve hadde alaşımlarının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.



Şekil 7.54. Döküm ve hadde alaşımlarının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ZM20 (Mg-2Zn) alaşımı ve ZM21 (Mg-2Zn-1Mn) alaşımı üretimi yapıldı ve ZM21 alaşımına (ağırlıkça %0,5) oranında alaşım elementleri ilave edilerek ZM21+0,5(Nd), ZM21+0,5(La), ZM21+0,5(Ca), ZM21+0,5(La+Nd), ZM21+0,5(La+Ca), ZM21+0,5(Ca+Nd), ZM21+0,5(La+Nd+Ca), ZM21+0,5(Sn), ZM21+0,5(Sn+La), ZM21+0,5(Sn+Nd) içeren Mg-2Zn-1Mn-0,5X döküm alaşımları elde edilmiştir. ZM21 ve (Ağırlıkça %0,5) alaşım elementleri ilave edilerek üretilen döküm alaşımlarının bir bölümüne 400 °C'de 16 saat homojenleştirildikten sonra %80 haddeme oranı ile 4,7 haddeme hızında,  $\phi = 0,2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanmıştır. Elde edilen döküm ve haddelenmiş alaşımlar üzerinde mikroyapı, mekanik özellikler, korozyon ve korozif aşınma testleri uygulanmıştır. Yapılan test ve analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1- ZM20 yapısında MgZn, MgZn<sub>2</sub>, MgZn<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub> fazlarına ek Mn ilavesi ile elde edilen ZM21 alaşımında MnZn<sub>3</sub> fazının varlığı tespit edilmiştir. ZM21'e %0,5 La alaşımının ilavesi ile ZM21'de bulunan fazlara ek olarak LaZn<sub>2</sub>, LaMg<sub>3</sub> fazlarının oluştuğu görülmüştür.
- 2- ZM21'e %0,5 Nd ilavesinin etkisine bakıldığında ZM21'e ek olarak Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub> Mg<sub>12</sub>Nd fazlarının varlığı görülmüştür.
- 3- ZM21'e %0,5 Ca ilavesi ile ZM21'e ek olarak Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub> fazlarının oluştuğu görülmüştür.

- 4- ZM21'e %0,5 Sn ilavesi ile ZM21'e ek olarak Mg<sub>2</sub>Sn fazlarının oluştuğu görülmüştür.
- 5- ZM21'e %0,5(Sn+La) ilavesi ile ZM21'e ek olarak Mg<sub>2</sub>Sn fazlarının oluştuğu görülmüştür.
- 6- ZM20 ile kıyaslandığında ZM21 alaşımının daha Mn elementinin çekirdekleşme oranını arttırması sayesinde daha ince tane yapısına sahip ve bu sayede daha iyi mekanik özellikler ortaya çıktığı tespit edilmiştir.
- 7- ZM21 alaşımına (La, Nd ve Ca) elementinin ilave edilmesi ile sertlik değerleri artmıştır. Bu durum La ilavesinde (LaZn<sub>2</sub>, LaMg<sub>3</sub>) fazlarının oluşması ile ve Nd ilavesinde (Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub>, Mg<sub>12</sub>Nd) fazların oluşması ile açıklanabilir. Kalsiyum (Ca) içeriğinin artmasıyla sertlik değerinin artması Ca<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub> ikili ve üçlü fazların tane sınırlarında, matriste görülmesi ile ayrıca Ca elementinin oksijene karşı yüksek afinitesinden dolayı oksijen ile oluşturduğu sert küçük gözenekli 2CaO bileşiğinin etkisi ile açıklanabilir.
- 8- Genel olarak haddelenmiş tüm alaşımların tane yapıları incelmış ve mekanik özellikleri iyileşmiştir. Fakat Ca ilavesi ile oluşan fazların α-Mg tane yapısını değiştirdiği ve tane içerisinde homojen dağılımlı iğne ucu benzeri yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla beraber döküm çekme sonuçlarında % uzama değerleri çok düşük çıkan Ca elementinin oksijene karşı yüksek afinitesinden dolayı oksijen ile oluşturduğu sert küçük gözenekli 2CaO bileşiğinin etkisi aşırı sertlik gösterdi. Böylece Ca ilaveli alaşımların hadde sırasında kırıldığı, SEM resimlerinde görülmüş ve alaşımlarından çekme yapılmamıştır.
- 9- Döküm ZM21 Mg alaşımına element ilavesi ile La, Sn, Sn+Nd çekme testi sonuçları az miktarda azalmasıyla birlikte Nd ve Ca içeren alaşımlar dikkate değer miktarda düşüş sergilemiştir. Bunun sebebi olarak Ca ve Nd içeren alaşımların sertlik değerlerinin çok yüksek olması gösterilebilir.
- 10- Haddelenmiş alaşımların tümünde çekme dayanımı, akma dayanımı, (%) uzama özellikleri yükselmiştir. En yüksek çekme dayanımı ZM21+0,5(Nd)

alaşımında olduğu tespit edilmiştir. ZM21+0,5(Nd), ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımları ZM21'e kıyasla çekme ve akma dayanımları artarken (%) uzama değeri düşmüştür.

11- Potansiyodinamik polarizasyon testlerine bakıldığında haddelenmiş alaşımların akım yoğunluğu artmış ve korozyon dirençleri azalmıştır. ZM21+0,5(La) alaşımı ZM21'e göre korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu artmış ve korozyon direnci düşmüştür. Hadde ZM21+0,5(Nd) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(La+Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(La+Nd) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Döküm ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımının döküm ZM21'e göre korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn+La) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre artmış ve korozyon direnci azalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımının korozyon akım yoğunluğu hadde ZM21'e göre azalmış ve korozyon direnci artmıştır.

12- Daldırma korozyon test sonuçlarında, ZM21 alaşımının ZM20'ye göre ağırlık kaybı döküm olarak % 46,6 artmış, hadde olarak %12,3 artmıştır. ZM21+0,5(La) alaşımının ZM21'e göre döküm olarak %43,2 azalmış, hadde olarak %49,3 azalmış, korozyon hızı daha düşük olmuştur. ZM21+0,5(Nd) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %17,1 artmış, hadde olarak %30,2 azalmıştır. ZM21+0,5(Ca) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %2,3 azalmış, hadde olarak %11,2 artmıştır. ZM21+0,5(La+Nd) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %33,7 azalmış, hadde olarak %30,2 artmıştır. ZM21+0,5(La+Ca) alaşımının

ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %3,4 artmış, hadde olarak %1,52 artmıştır. ZM21+0,5(Ca+Nd) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %39,6 artmış, hadde olarak %1,18 artmıştır. ZM21+0,5(La+Ca+Nd) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %24,1 azalmış, hadde olarak %11,5 artmıştır. ZM21+0,5(Sn) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %10 azalmış, hadde olarak %53,4 artmıştır. ZM21+0,5(Sn+La) alaşımının ZM21 alaşımına göre ağırlık kaybı döküm olarak %67,2 artmış, hadde olarak %86,6 artmıştır. ZM21+0,5(Sn+Nd) alaşımının ZM21'e göre ağırlık kaybı döküm olarak %1,72 artmıştır, hadde olarak %51,09 artmıştır.

- 13- Korozif aşınma sonuçlarından elde edilen Aşınma miktarı, Spesifik aşınma oranı katsayısı, Aşınma hızı analizlerinde, döküm olarak ZM21 alaşımı ZM20'ye göre %10,31 daha az aşınma olmuştur. Döküm olarak ZM21+0,5(Nd) alaşımı ZM21'e göre %64,55 daha az aşınma yaşayan alaşım olarak en az aşınan alaşım olmuştur. Döküm olarak ZM2+0,5(La+Nd+Ca) alaşımı ZM21'e göre %3,48 daha az aşınma kaybı veren alaşım olarak ZM21'den sonra en çok kayıp yaşayan döküm alaşımı olmuştur. Haddelenmiş olarak ZM21+0,5(Sn+La) alaşımı ZM21'e göre %75,10 daha az aşınma kaybı olmuş, ZM21+0,5(Nd) alaşımı ZM21'e göre %68,12 daha az aşınma kaybı vermiş ve bu iki alaşım en az aşınma oranına sahip iki alaşım olmuştur. Hadde olarak ZM2+0,5(La+Nd+Ca) alaşımı ZM21'e göre %0,015 daha az aşınma kaybı veren alaşım olarak ZM21'den sonra en çok kayıp veren hadde alaşımı olmuştur.

- 14- Aşınma bölgesinin kenar kısımlarının oksit parçacıkları ve kaba partiküllerden oluştuğu grlmektedir. Bu bölgelerin, EDX sonuçlarına bakarak çok miktarda O ve az miktarda Cl içeren farklı reaksiyonlar geçiren partiküllerden oluştuğu ve bu partiküllerin kenar bölgelerde biriktiği düşünülmektedir. Bununla beraber döküm alaşımlarda haddelenmiş alaşımlara göre daha çok pulcuk ve topaklanmanın grldği tespit edilmiştir.

15- ZM21 (Mg-2Zn-1Mn) alaşımları teknolojik gelişmeler ışığında hızla gelişim gösteren önemli materyallerdir. Aynı zamanda elde edilen (Mg-2Zn-1Mn) alaşımlarının sahip olduğu kabul edilebilir mekanik ve mikroyapı özellikleri sayesinde mühendislik alanında gelecek vadetmektedir. Bu nedenle farklı alanlarda da kullanılmak üzere daha fazla miktar ve türde alaşım elementleri ilavesi ile daha üstün özelliklere sahip malzemeler üretilir. Korozyon zelliklerinin geliştirilmesi sonucu daha iyi korozyon direncine sahip alaşımlar elde edilebilir.

İlerideki alışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur.

- 1- ZM20 alaşımı içinde aynı çalışmalar yapılarak kıyaslanabilir.
- 2- ZM21'deki alaşım elementlerinin miktarı değiştirilerek sonuçlar incelenebilir.
- 3- ZM21 alaşımına farklı elementler ilave edilerek çalışma genişletilebilir.
- 4- Standartlarda belirtilen diğer Mg alaşımları içinde aynı çalışma yapılabilir.
- 5- Aynı alaşımlar ile farklı haddeleme parametreleri ile çalışma yapılabilir.
- 6- Aynı alaşımlar ile farklı sreler ve korozyon sıvıları ile deneyler yapılabilir.
- 7- Aynı alaşımlar ile ekstrzyon yapılarak kıyaslanabilir.



## KAYNAKLAR

1. Thirumurugan, M., Kumaran, S., Suwas, S., and Rao, T. S., “Effect of rolling temperature and reduction in thickness on microstructure and mechanical properties of ZM21 magnesium alloy and its subsequent annealing treatment”, *Mater. Sci. Eng. A*, 528, 29-30: 8460-8468 (2011).
2. Thirumurugan, M., Rao, S. A., Kumaran, S., and Rao, T. S., “Improved ductility in ZM21 magnesium–aluminium macrocomposite produced by co-extrusion”, *J. Mater. Process. Technol.*, 211, 10: 1637-1642 (2011).
3. Luo, A. A., “Magnesium casting technology for structural applications”, *J. Magnes. Alloys*, 1 (1): 2-22 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.002>
4. Housh, S., Mikucki, B. and Stevenson, A., “Selection and application of magnesium and magnesium alloys”, *ASM Handbook*, 10th Edition, 2: 455-479 (1998).
5. Kainer, K. U., Vuch, F. B., “The current state of technology and potential for further development of magnesium applications” *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Germany, 3-20 (2006).
6. Zhang, Z., “Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications”, Ph.D. Thesis, *Faculte Des Sciences Et De Genie Universite*, Quebec-Canada, 2-75 (2000).
7. Brown, R., “ Magnesium”, *Mining Journal Annual Review for 2004*, 1-14 (2004).
8. Barber, L. P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys”, M.Sc. Thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, USA, 10-32 (2004).
9. Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. and Wu, S. “Potential automotive uses of wrought magnesium alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).
10. Kainer, K., “Magnesium Alloys and Technology”, Germany: *Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGA*, Weinheim, 4-13, (2003).
11. Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Birbilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Arrabal, R., Thomas, S., Johansson, L. G., “Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion”, *Progress in Materials Science*, 89: 92-193, (2017).

12. Nordlien, J. H., Nişancıoğlu, K., Ono, S. and Masuko, N., “Morphology and structure of oxide films formed on MgAl alloys by exposure to air and water”, *Journal of The Electrochemical Society*, 143, 8: 461-466 (1996).
13. Liu, J. C., Hu, J., Nie, X. Y., Li, H. X., Du, Q., Zhang, J. S., Zhuang, L. Z., “The interface bonding mechanism and related mechanical properties of Mg/Al compound materials fabricated by insert molding”, *Materials Science and Engineering: A* 635: 70-76 (2015).
14. Okamoto, H., “Phase Diagrams for Binary Alloys”, Second Edition, *Materials Park (OH): ASM International*, 538-574 (2000).
15. Kara, İ. H., “Nadir toprak elementi ilaveli sıcak haddelenmiş AZ31 magnezyum alaşımlarının mekanik, korozyon ve aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Doktora tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 6-11 (2019).
16. Correa, A. M., “Effect of solute elements on the lattice parameters of magnesium”, *Department of Mining, Metals, and Materials Engineering*, Montréal, Canada, 1-24 (2006).
17. Cao, P., Qian, M., and Stjohn, D., “Grain coarsening of magnesium alloys by beryllium”, *Scripta Materialia*, 51 (7): 647-651 (2004).
18. Balart, M. J., Jayesh B. P., Fan, Z., "Melt Protection of Mg-Al Based Alloys", *Metals*, 6(6):131 (2016).
19. Luo, A., Pekguleryuz, M., “Cast magnesium alloys for elevated temperature applications”, *Journal of Materials Science*, 29 (20): 5259–5271 (1994).
20. Jackson, J., Frost, P., Loonam, A., Eastwood, L., and Lorig, C., “Magnesium-lithium base alloys preparation, fabrication, and general characteristics”, *Metals Transactions*, 1 (2): 149-168 (1949).
21. Lunder, O., Aune, T., and Nisancıoğlu, K., “Effect of Mn additions on the corrosion behavior of mould-cast magnesium ASTM AZ91”, *Corrosion*, 43 (5): 291-295 (1987).
22. Amirnejad, M., Rajabi, M., and Motavalli, A., “Effect of addition of Si on microstructure, mechanical properties, bio-corrosion and cytotoxicity of Mg–6Al–1Zn alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28 (9): 1755-1762 (2018).
23. Ben-Hamu, G., Eliezer, D., Kaya, A., Na, Y., and Shin, K., “Microstructure and corrosion behavior of Mg–Zn–Ag alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 435-436: 579-587 (2006).
24. Hono, K., Mendis, C., Sasaki, T., and Oh-Ishi, K., “Towards the development of heat-treatable high-strength wrought Mg alloys”, *Scripta Materialia*, 63 (7): 710-715 (2010).

25. Li, J., Chen, R., Ma, Y., and Ke, W., “Effect of Zr modification on solidification behavior and mechanical properties of Mg–Y–RE (WE54) alloy”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 1 (4): 346-351 (2013).
26. Kirkland, N., and Birbilis, N., “Magnesium Biomaterials: Design, Testing, and Best Practice”, Switzerland, *Springer* 1-12 (2014).
27. Mezbahul-Islam, M., Mostafa, M., and Medraj, M., “Essential magnesium alloys binary phase diagrams and their thermochemical data”, *Journal of Materials*, 2-26 (2014).
28. Schwam, D., Wallace, J. F., Zhu, Y., Viswanathan, S. and Iskander, S., “Enhancements in magnesium die casting impact properties,” Final Report, *Case Western Reserve University*, Ohio, 5-22 (2000).
29. Guthrie, S. E., Thomas, G. J., Bauer, W. and Yang, N. Y.C., “The development of lightweight hydride alloys based on magnesium”, *Sandia National Laboratories Department of Energy*, California, U.S.A., 1-35 (1996).
30. Baker, H., “Alloy phase diagrams”. *ASM Handbook*, 3: 280-285 (1998).
31. Tekumalla, S., Seetharaman, S., Almajid, A., and Gupta, M., “Mechanical properties of magnesium-rare earth alloy systems: A Review”, *Metals*, 5: 1-39 (2014).
32. Hort, N., Huang, Y., Fechner, D., Störmer, M., Blawert, C., Wittle, F., Feyerabend, F., “Magnesium alloys as implant materials – Principles of property design for Mg– RE alloys”, *Acta Biomaterialia*, 6 (5): 1714-1725 (2010).
33. Aizawa, T. and Song, R., “Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg<sub>2</sub>Si and Mg<sub>2</sub>Sn”, *Intermetallics*, (14): 382-391 (2006).
34. Chung, Y. J., Park, J. L., Kim, N. J. and Shin, K. S., “Effects of alloying elements on mechanical properties of Mg-Al alloys”, *Materials Science*, (488-489): 845-848 (2005).
35. Kang, D. H., Park, S. S., Oh, S. and Kim, N. J., “Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 449 (451): 318-321 (2007).
36. Li, N., “Magnesium advances and applications in north america industry.”, *Materials Science*, (488): 931-936 (2005).
37. Ünal, M., “Magnezyum alaşımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 67-69 (2008).
38. Gören, H. A., “Magnezyum alaşımlarında soğuma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek lisans tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 30-31 (2010).

39. Ha, W. and Kim Y. "Effects of cover gases on melt protection of Mg alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, (422): 208-213 (2006).
40. Hillis, J.E., "The international program to identify alternatives to SF6 for magnesium melt protection", *The International Magnesium Association, Noranda Magnesium Inc.* San Diego, U.S.A., 1-8 (2002).
41. Cashion, S.P., Ricketts, N.J., Frost, M.T. and Korn, C., "The protection of molten magnesium and its alloys during die-casting, csiro", *Manufacturing Science and Technology*, 3-9 (2000).
42. Xiaoqin, Z., Qudong, W., Yizhen, L., Yanping, Z., Wenjiang, D. and Yunhu, Z., "Influence of beryllium and rare earth additions on ignition-proof magnesium alloys", *Journal of Materials Science*, (112): 17-23 (2001).
43. Zeytin, K.H., "Magnezyum alaşımları : otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği", *Tübitak, Marmara Araştırma Merkezi*, Kocaeli, 3-39 (1999).
44. Looze, G., Carrig, J. and Nguyen, V., "High-yield, high-integrity, permanent mould magnesium casting", *Foundry Trade Journal*, (3629): 280-282 (2005).
45. King, J.F., "Technology of Magnesium and Magnesium Alloys", *Magnesium Technology*, 219-225 (2006).
46. Blawert, C., Hort, N. and Kainer, K. U., "Automotive applications of magnesium and Its alloys", *Trans. Indian Inst. Met*, (57): 397-408 (2004).
47. Watari, H., Davey, K., Rasgado, M.T., Haga, T. and Izawa. S., "Semi-solid manufacturing process of magnesium alloys by twin-roll casting", *Journal of Materials Processing Technology*, 155 (156): 1662-1667 (2004).
48. Avedesian, M. M., Baker, H., E., "Magnesium and Magnesium Alloy", *ASM International*, 63-64 (1999).
49. Landkof, B., "Magnesium alloys applications", *Ben-Guron Üniversty, Magnesium Alloys Science, Tecnology and Application*, (8): 293-316 (2005).
50. Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Cizek, L. and Brytan, Z., "Structure and properties of magnesium cast alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, (192-193): 567-574 (2007).
51. Bolstad, J., "Magnesium alloy development for intelligent magnesium designs", *SinoMaG seminar, Beijing-China*, 8-4 (2000).
52. Mart'in, É., "A microtexture characterization of recrystallization and twinning in magnesium", degree of doctor of philosophy, *Montreal, Department of Mining and Materials Engineering McGill University*, Canada, 30-35 (2010).
53. Czerwinski, F., "Magnesium Injection Molding". *Springer*, Bolton, Ontario, 3-70 (2008).

54. Taylor, G., and Quinney, H., “The plastic distortion of metals”, *Philosophical Transactions A*, 230: 323-362 (1932).
55. Styczynski, A., Hartig, C., Bohlen, J., & Letzig, D., “Cold rolling textures in AZ31 wrought magnesium alloy”, *Scripta Materialia*, 50(7): 943-947 (2004).
56. Chia Ching Hsu, E., “Effect of deformation conditions on texture and microstructure of magnesium sheet AZ31.”, *McGill*, Canada, Montreal, 1-14 (2006).
57. Herrera-Solaz, V., Hidalgo-Manrique, P., Pérez-Prado, M., Letzig, D., Llorca, J., and Segurado, J., “Effect of rare earth additions on the critical resolved shear stresses of magnesium alloys”, *Materials Letters*, 128: 199-203 (2014).
58. Razavi, S., Foley, D., Karaman, I., Hartwig, K., Duygulu, O., Kecskes, L., Hammond, V., “Effect of grain size on prismatic slip in Mg–3Al–1Zn alloy”, *Scripta Materialia*, 67(5): 439-442 (2012).
59. Cepeda-Jiménez, C., Molina-Aldareguia, J., and Pérez-Prado, M., “Effect of grain size on slip activity in pure magnesium polycrystals”, *Acta Materialia*, 84, 443-456 (2015).
60. Meng, L., Yang, P., Xie, Q., and Mao, W., “Analyses on compression twins in magnesium”, *Materials Transactions*, 49: 710-714 (2008).
61. Liu, X., Zhu, B., Xie, C., Zhang, J., Tang, C., and Chen, Y., “Twinning, dynamic recrystallization, and crack in AZ31 magnesium alloy during high strain rate plane strain compression across a wide temperature”, *Materials Science and Engineering: A*, 733: 98-107 (2018).
62. Robson, J., “Critical assessment 9: Wrought magnesium alloys”, *Materials Science and Technology*, 31, 257-264 (2014).
63. Bian, M., Tripathi, A., Yu, H., Nam, N., & Yan, L., “Effect of aluminum content on the texture and mechanical behavior of Mg–1 wt% Mn wrought magnesium alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 639: 320-326 (2015).
64. Sanjari, M., “High strain rate deformation of Magnesium alloys”, ph.D. thesis. *McGill University*, Montreal 1-8 (2013).
65. Farzadfar, S., “Effect of Yttrium on the Microstructure and Texture of Deformed Magnesium”, *McGill University*, Montreal, Canada, 1-20 (2012).
66. Al-Samman, T., and Gottstein, G., “Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium”, *Materials Science and Engineering: A*, 490 (1-2): 411-420 (2008).
67. Guo, L.-l., and Fujita, F., “Effect of deformation mode, dynamic recrystallization and twinning on rolling texture evolution of AZ31 magnesium alloys”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28 (6): 1094-1102 (2018).

68. Peng, J., Zhang, Z., Liu, Z., Li, Y., Gou, P., Zhou, W., and Wu, Y., “The effect of texture and grain size on improving the mechanical properties of Mg-Al-Zn alloys by friction stir processing”, *Scientific reports*, 8 (1): 4196 (2018).
69. Griffiths, D., “Understanding texture weakening in magnesium rare earth alloys”, ph.D. Thesis, *The University of Manchester*, 2-20 (2014).
70. Nagao, K., and Kagami, E., “X-ray thin film measurement techniques VII. Pole figure measurement”, *The Rigaku Journal*, 27 (1): 6-14 (2011).
71. Al-Samman, T., and Li, X., “Sheet texture modification in magnesium-based alloys by selective rare earth alloying”, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (10- 11): 3809-3822 (2011).
72. Basu, I., and Al-Samman, T., “Triggering rare earth texture modification in magnesium alloys by addition of zinc and zirconium”, *Acta Materialia*, 67, 116-133 (2014).
73. Shang, L., “Effect of micro alloying on microstructure and hot working behavior for AZ31 based magnesium alloy”, Montreal, Quebec, Canada, *McGill University*, 2-15 (2008).
74. Kainer, K. U., “Magnesium: proceedings of the 7th international conference on magnesium alloys and their applications”, *Wiley*, 413-418 (2006).
75. Gao, L., Yan, H., Luo, J., Luo, A. A., Chen R., “Microstructure and mechanical properties of a high ductility Mg–Zn–Mn–Ce magnesium alloy”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 1, 4: 283-291, (2013).
76. Yunpeng, D., Qichi, L., Zhigiang, Z., and Jianzhong, C., “Effect of rolling speed on microstructure and mechanical properties of as-cast AZ31B alloy under different reduction schedules”, *Journal of Materials Processing Technology*, 233: 161-173 (2016).
77. Fei, G., Dingfei, Z., Xusheng, Y., Luyao, J., Sensen, C., and Fusheng, P., “Influence of rolling speed on microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy rolled by large strain hot rolling”, *Materials Science and Engineering: A*, 607, 383-389 (2014).
78. Imandoust, A., Barrett, C., Al-Samman, T., Inal, K., and El Kadiri, H., “A review on the effect of rare-earth elements on texture evolution during processing of magnesium alloys”, *Journal of Material Science*, 52 (1): 1-29 (2017).
79. Victoria-Hernández J., Yi S., Klaumünzer D. and Letzig D., “Comparison of the Mechanical Properties and Forming Behavior of Two Texture-Weakened Mg-Sheet Alloys Produced by Twin Roll Casting”, *Front. Mater.* 6:288 (2019).

80. Prithivirajan, S., Nyahale, M. B., Naik, G. M., Narendranath, S., Prabhu, A., Rekha, P. D., “Bio-corrosion impacts on mechanical integrity of ZM21 Mg for orthopaedic implant application processed by equal channel angular pressing”, *J Mater Sci. Mater Med.*, 32, 65 (2021).
81. Cao, F., Song, G., and Atrens, A., “Corrosion and passivation of magnesium alloys”, *Corrosion Science*, 111: 835-845 (2016).
82. Tong, L., Zhang, Q., Jiang, Z., Zhang, J., Meng, J., Cheng, L., and Zhang, H., “Microstructures, mechanical properties and corrosion resistances of extruded Mg-Zn-Ca-xCe/La alloys”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 62: 57-70 (2016).
83. Song, G.-L., “Corrosion of magnesium alloys”. *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, 10-50 (2011).
84. Feng, H., Liu, S., Du, Y., Lei, T., Zeng, R., and Yuan, T., “Effect of the second phases on corrosion behavior of the Mg-Al-Zn alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 695: 2330-2338 (2017).
85. Man, C., Dong, C., Fang, Y., Xiao, K., Guo, C., He, G., and Li, X., “The corrosion behavior of magnesium alloy AZ31 in hot and dry atmospheric environment in Turpan, China”, *International Journal of electrochemical science*, 10: 8691 – 8705 (2015).
86. Slabaugh, W., and Grotheer, M., “Mechanism of filiform corrosion”, *Industrial and Engineering Chemistry*, 1014-1016 (1954).
87. Rong-chang, Z., Jin, Z., Wei-jiu, H., Dietzel, W., Kainer, K., Blawert, C., and Wei, K., “Review of studies on corrosion of magnesium alloys”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 763-771 (2006).
88. Gusieva, K., Davies, C., Scully, J., and Birbilis, N., “Corrosion of magnesium alloys: the role of alloying”, *International Materials Reviews*, 60(3): 169-194 (2015).
89. Yang, J., Peng, J., Nyberg, E., and Pan, F., “Effect of Ca addition on the corrosion behavior of Mg-Al-Mn alloy”, *Applied Surface Science*, 369: 92-100 (2016).
90. Yu, Z., Huang, Q., Zhang, W., Luo, C., Guan, H., Chen, Y., Song, H., Hu, Z., Chassagne, L., “Effect of Sn content on the mechanical properties and corrosion behavior of Mg-3Al-xSn alloys” *Materials Research Express, IOP Publishing Ltd*, 7 (7), 076505 (2020).
91. Sahoo, P., “Engineering Tribology”, *PHI Learning Pvt. Ltd.*, New Delhi, 72-98 (2011).
92. Peterson, R., STP446-EB Evaluation of Wear Testing. *West Conshohocken, PA: ASTM International*, 10-20 (1969).

93. Stachowiak, G., and Batchelor, A., “Engineering Tribology”, *Waltham*, 1-10 (1993).
94. Nguyen, Q., Sim, Y., Gupta, M., and Lim, C., “Tribology characteristics of magnesium alloy AZ31B and its composites”, *Tribology International*, 82: 464-471 (2015).
95. Ilanaganar, E., and Anbuselvan, S., “Wear mechanisms of AZ31B magnesium alloy during dry sliding condition”, *Materials Today: Proceedings*, 5: 628-635 (2018).
96. Xie, Y.-P., Wang, Z.-Y., and Hou Z. F., “The phase stability and elastic properties of  $MgZn_2$  and  $Mg_4Zn_7$  in Mg–Zn alloys”, *Scripta Materialia*, 68: 495-498 (2013).
97. Alidoust, M., Kleiven, D., and Akola, J., “Density functional simulations of pressurized Mg–Zn and Al–Zn alloys”, *Phys. Rev. Materials*, 4, 4: 045002 (2020).
98. Ghosh, P. and Medraj, M., “Thermodynamic calculation of the Mg–Mn–Zn and Mg–Mn–Ce systems and re-optimization of their constitutive binaries”, *Calphad*, 41: 89-107 (2013).
99. Antoniac, I., Miculescu, F., Cotrut, C., Ficai, A., Rau, J. V., Grosu, E., Antoniac, A., Tecu, C., Cristescu, I., “Controlling the degradation rate of biodegradable Mg–Zn–Mn alloys for orthopedic applications by electrophoretic deposition of hydroxyapatite coating”, *Materials*, 13, 263: 2 (2020).
100. Alessia, P., Arjun, P., Vitalij, P., Marina, P., Carlo, F., Volodymyr, S., Anja, M., Pietro, M., “Effect of chemical and physical pressure on the superconducting properties of  $LaZn_{2-x}Sn_2$ ”, *APS March Meeting* 1-2 (2018).
101. Wang, M.-h., Pan, R.-k., Li, P. -b., Bian, N., Tang, B.-y., Peng, L.-m., Ding, W.-j., “First-principles study on mechanical properties of  $LaMg_3$  and  $LaCuMg_2$ ”, *J. Cent. South Univ.*, 21(6): 2136-2142 (2014).
102. Sreejith, S. S., Mohan, N., and Kurup, M. R. P., “Experimental and theoretical analysis of a rare nitrate bridged 3d-4f complex containing  $LaZn_2$  core synthesized from a Zn(II) metalloligand”, *Journal of Molecular Structure*, c. 1153, ss. 85-95, Şub. (2018).
103. Kielbus, A., Rzychoń, T., Lityńska, L., Dercz, G. “Characterization of  $\beta$  and  $mg_{41}nd_5$  equilibrium phases in elektron 21 magnesium alloy after long-term annealing”, *Solid State Phenomena*, 163, 106 (2010).
104. Gao, G.-J., Zeng, M.-Q., Zhang, E.-L., Zeng, R.-C., Cui L.-Y., Xu, D.-k., Wang, F.-Q., Kannan, M. B., “Dealloying corrosion of anodic and nanometric  $Mg_{41}Nd_5$  in solid solution-treated  $Mg_{-3}Nd_{-1}Li_{-0.2}Zn$  alloy”, *Journal of Materials Science & Technology*, 83, 161-178 (2021).



105. Zhai, C., Luo, Q., Cai, Q., Guan, R., and Li, Q. “Thermodynamically analyzing the formation of  $Mg_{12}Nd$  and  $Mg_{41}Nd_5$  in Mg-Nd system under a static magnetic field”, *Journal of Alloys and Compounds*, 773: 202-209 (2019).
106. Huang, M. L., Shen, X., and Li, H. X., “Phase equilibrium of Mg-Nd-Zn system near Mg-Nd side at 400°C”, *Materials Science Forum*, 873: 18-22 (2016).
107. Yang, Z., Shi, D., Wen, B. and Melnik, R., “Structural, elastic, electronic properties and heats of formation of Ca–Zn intermetallics from first principles calculations”, *Journal of Alloys and Compounds*, 524: 53-58 (2012).
108. Kubok, K., Lityńska, L., Wojewoda-Budka, J., Góral, A., and Dębski, A., “Investigation of Structures in As-Cast Alloys from the Mg-Zn-Ca System”, *Archives of Metallurgy and Materials*, 58: 299-333 (2013).
109. Chen, Z. H., Zhou, T., Chen, D., Yan, H. G., and Chen, J. H., “Microstructure characterisation and mechanical properties of rapidly solidified Mg–Zn–Ca alloys with Ce addition”, *Materials Science and Technology*, 24, 7: 848-855, (2008).
110. Saito, W., Hayashi, K., Dong, J., Li, J.-F., and Miyazaki, Y., “Control of the thermoelectric properties of  $Mg_2Sn$  single crystals via point-defect engineering”, *Sci Rep*, 10, 1: 2020 (2020).
111. Fedorov, M. I. Zaitsev, V. K. and Isachenko, G. N. “High effective thermoelectrics based on the  $Mg_2Si$ - $Mg_2Sn$  solid solution”, *Solid State Phenomena*, 170: 286-292 (2011).
112. Kevorkijan V. ve Škapin, S. “synthesis and characterisation of various  $Mg_2Sn$ -based composites made from laboratory prepared  $Mg_2Sn$  powder”, *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 4: 623-631 (2011).
113. Zhao, Z., Bai, P., Guan, R., Murugadoss, V., Liu, H., Wang, X., Guo, Z., “Microstructural evolution and mechanical strengthening mechanism of  $Mg_{-3}Sn_{-1}Mn_{-1}La$  alloy after heat treatments”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 734: 200-209 (2018).
114. Fu, J., Liu, K., Du, W., Wang, Z., Li, S., and Du, X., “Microstructure and mechanical properties of the as-cast Mg-Zn-Mn-Ca alloys”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 182, 012053 (2017).
115. Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y., Candan, E., “Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (5): 1958-1963 (2011).
116. Yang, J., Peng, J., Li, M., Nyberg, E. A., Pan, F.-S., “Effects of Ca Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of ZM21 Wrought Alloys”, *Acta Metallurgica Sinica*, 30(1): 53-65 (2017).

117. Wang, S.D., Wu, M.Y., Xu, D.K., Han, E.-h., “Improving corrosive wear resistance of Mg-Zn-Y-Zr alloys through heat treatment”, *Journal of Magnesium and Alloys*, (2021).

## ÖZGEÇMİŞ

Halil Ahmet GÖREN, ilk ve orta öğrenimini Kemalpaşa'da tamamladı. Lise öğrenimi Turgutlu Teknik Lisesi, Makine Bölümünde tamamladıktan sonra, 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksek Okulu Makine Teknikerliği Programını kazandı. 2003 yılında iyi derece ile mezun olduktan sonra 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği Programını kazandı. 2007 yılında iyi derece ile mezun olduktan sonra aynı yıl Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi ABD' da Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 2010'da Yüksek Lisans eğitimini tamamladı, 2012 Yılında Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Mekatronik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2017 Yılında Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde Doktora eğitimine başladı. Halen Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Mekatronik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya ve Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde Doktora eğitimine devam etmektedir.