



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNİN Ti MİKRO ALAŞIMLAMA İLE
GELİŞTİRİLMESİ**

**Serdar ÇİM
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şennur CANDAN**

BİLECİK, 2018

Ref. No:10217588



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNİN Ti MİKRO ALAŞIMLAMA İLE
GELİŞTİRİLMESİ**

**Serdar ÇİM
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şennur CANDAN**

BİLECİK, 2018



**BILECIK SEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**IMPROVEMENT OF CORROSION PROPERTIES OF
AZ91 MAGNESIUM ALLOY WITH Ti MICRO
ALLOYING**

**Serdar ÇİM
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Prof. Dr. Şennur CANDAN**

BILECIK, 2018



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 18/09/2018 tarih ve 53/1 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/10/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Serdar ÇİM'in "AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Özelliklerinin Ti Mikro Alaşımlama İle Geliştirilmesi" başlıklı tez çalışması Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI): Prof. Dr. Şennur CANDAN

Şennur Candan

ÜYE: Doç. Dr. Birol AKYÜZ

Birol Akköz

ÜYE: Doç. Dr. Yunus TÜREN

Yunus Turen

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
.../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenciliğim esnasında, başından sonuna kadar tecrübe, bilgi, birikim ve yardımlarını benden esirgemeyen danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şennur CANDAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, bilgi ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ercan CANDAN'a, Sayın Doç. Dr. Birol AKYÜZ'e, Sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ferda MİNDİVAN'a ve laboratuvar imkanlarını bana sunan Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanlığına sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında, değerli zamanlarımı ayırıp bana yardımcı olan Fethi CANDAN ve Seren EMİR'e çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) 2017-01.BŞEÜ.03-02 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca, her türlü destekleri ile yanımda olan annem, babam ve abime sabır, destek ve teşvikleri için sonsuz minnetlerimi sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada, aynı şartlarda üretilmiş (benzer katılma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) AZ91 ve Ti ile mikro alaşımlandırılmış AZ91 (%ağ. 0.5 Ti) alaşımlarının farklı Fe içeriğine bağlı (%ağ. 0.02, 0.025, 0.05 ve 0.1 Fe) Korozyon Davranışları-Fe Tolerans Limit Değeri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Alaşımlar, 750 °C’de ve SF₆ gazı altında kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir.

Mg numunelerin mikroyapı analizleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) ve X Işını Difraktometre (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Korozyon davranışları %3.5 NaCl çözeltisinde, daldırma deneyi ve potansiyodinamik polarizasyon test yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

DeneySEL sonuçlar, her iki alaşımda (AZ91 ve AZ91Ti) Fe oranının artması ile taneler arası β (Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazının dağılımını, sürekliliğini ve kabalaşmasını arttırdığını göstermiştir. AZ91 alaşımda, β fazının kabalaşması Fe oranının artışı ile çok daha aktif iken AZ91Ti alaşımlarında kabalaşma çok daha az olmuştur.

Polarizasyon testleri, Fe oranı artışının her iki alaşımda da korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) değerlerini arttığını, buna karşılık ağırlıkça %0.5 Ti içeren Mg alaşımında ise I_{kor} değerlerinde çok daha az artış olduğunu göstermiştir.

Sonuçlar, AZ91 alaşımı Fe limit değerinin % 0.05 olduğunu bu değerden sonra korozyon kaybındaki artışın çok daha hızlı olduğunu göstermiştir. Ti, AZ91 alaşımlarında çok yüksek Fe empürite oranlarında (%0.1 Fe) dahi korozyon direncini kayda değer oranda arttırmaktadır.

Anahtar Kelimeler

AZ91 Mg alaşımı; AZ91-Ti alaşımı; Mikroyapı; İntermetalik; Korozyon.

ABSTRACT

In this study, relationship between Corrosion Behaviour-Tolerance Limit of Fe content (0.02, 0.025, 0.05 and 0.1 Fe wt.%) in AZ91 and Ti microalloyed AZ91 alloys (0.5 wt.% Ti), cast under similar chemical composition and cooling rate, were investigated. The alloys were produced by casting of the alloys at 750 °C under SF₆ gas into gravity mould.

The microstructures of Mg alloys were analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X Ray Diffractometry (XRD). Their corrosion behaviours were evaluated by immersion tests and electrochemical polarization measurements in 3.5 wt.% NaCl solution.

It was observed from the experimental results that dispersion, net like structure and coarsening of the intergranular β (Mg₁₇Al₁₂) intermetallic phase was increased by increasing Fe content of the both alloys (AZ91 and AZ91Ti alloys) used. The coarsening of β phase was more pronounced in AZ91 alloy than AZ91Ti alloy as the Fe content of the alloys were increased.

Polarisation tests showed that corrosion current density (I_{cor}) values of the both alloys were increased with increasing Fe content in which the increments in I_{cor} values of 0.5 %wt. Ti containing alloys were in much less extent.

Results indicated that the limit content value of Fe in AZ91 alloys was 0.05 wt.% above which the corrosion loss had increased abruptly. The corrosion resistance was increased considerably, even above 0.1 wt.% Fe content, by Ti addition to AZ91 alloy.

Keywords

AZ91 Mg alloys; AZ91-Ti alloys; Microstructure; Intermetallic; Corrosion

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa No |
|--|--------------|
| TEŞEKKÜR | |
| ÖZET | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| GİRİŞ | 1 |
| 1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI | 4 |
| 1.1. Magnezyumun Genel Özellikleri | 4 |
| 1.2. Magnezyum Alaşım Standartı | 6 |
| 1.3. Magnezyum Alaşımalarında Alaşım Elemanlarının Etkisi..... | 7 |
| 1.4. Magnezyum Alaşımalarına Katılan Elementler | 8 |
| 1.4.1. Alüminyum (Al) (AZ, AS, AM vb. seriler)..... | 8 |
| 1.4.2. Çinko (Zn) | 9 |
| 1.4.3. Mangan (Mn)..... | 10 |
| 1.4.4. Demir (Fe) | 11 |
| 1.4.5. Bakır (Cu)..... | 12 |
| 1.4.6. Nikel (Ni)..... | 12 |
| 1.4.7. Silisyum (Si) | 13 |
| 1.4.8. Gümüş (Ag) | 13 |
| 1.4.9. Kalay (Sn)..... | 14 |
| 1.4.10. Kurşun (Pb)..... | 15 |
| 1.4.11. Titanyum (Ti)..... | 15 |
| 1.4.12. Zirkonyum (Zr)..... | 16 |
| 1.4.13. Yitriyum (Y) | 17 |
| 1.4.14. Stronsiyum (Sr)..... | 18 |
| 1.4.15. Kalsiyum (Ca)..... | 19 |
| 1.4.16. Lityum (Li) | 20 |
| 1.4.17. Nadir Toprak Metalleri (RE) | 20 |
| 1.5. Mg Alaşımalarının Sınıflandırılması | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 1.5.1. Döküm magnezyum alaşımları | 21 |
| 1.5.2. Dövme magnezyum alaşımları | 22 |
| 1.6. Mg-Al-Zn (AZ91) Mg Alaşımı | 22 |
| 1.7. Mg Alaşımlarının Üretim Yöntemleri | 23 |
| 1.7.1. Basınçlı döküm yöntemi | 24 |
| 1.7.2. Kum kalıba döküm | 24 |
| 1.7.3. Kokil kalıba döküm | 25 |
| 1.8. Mg Alaşımlarının Mekanik Özellikleri | 25 |
| 1.7. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları | 27 |
| 2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KOROZYON..... | 33 |
| 2.1. Korozyon | 33 |
| 2.2. Kimyasal Açından Korozyon | 33 |
| 2.3. Korozyon Hızının Belirlenmesi | 37 |
| 2.3.1. Potansiyostatik yöntem | 38 |
| 2.3.2. Galvanostatik yöntem | 38 |
| 2.3.3. Kimyasal yöntemler | 38 |
| 2.3.3.1. Kütle kaybı | 38 |
| 2.3.4. Elektrokimyasal yöntemler | 39 |
| 2.3.4.1. Tafel ekstrapolasyon yöntemi | 39 |
| 2.3.4.2. Lineer polarizasyon yöntemi | 39 |
| 2.4. Mg Alaşımlarında Meydana Gelen Korozyon Türleri | 40 |
| 2.4.1. Galvanik korozyon | 41 |
| 2.4.2. Çukurcuk korozyon | 44 |
| 2.4.3. Taneler arası korozyon | 46 |
| 2.4.4. Gerilimli korozyon | 47 |
| 2.4.5. Korozyonlu yorulma | 49 |
| 2.5. AZ Serisi Mg Alaşımlarında β Fazının Korozyon İle Olan İlişkisi | 50 |
| 2.5.1. β fazı | 50 |
| 2.5.2. Al içeriği- β fazı ilişkisi | 51 |
| 2.5.3. Mikro alaşımlama | 53 |
| 2.6. Ti ile Mikro Alaşımlandırılmış AZ Serisi Magnezyum Alaşımlarının Mekanik ve Korozyon Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar | 54 |
| 2.7. Mg Alaşımlarında Fe Etkisi | 57 |
| 2.8. Katılma Hızı | 60 |

| | |
|---|-----------|
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 62 |
| 3.1. Döküm İşlemi ve Numune Hazırlama..... | 62 |
| 3.2. Mikroyapı Deneyi | 63 |
| 3.3. Korozyon Deneyi | 64 |
| 3.3.1. Daldırma deneyi..... | 64 |
| 3.3.2. Elektrokimyasal deney..... | 64 |
| 3.4. pH Etkisi..... | 65 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME..... | 66 |
| 4.1. Mikroyapı | 66 |
| 4.2. Korozyon | 74 |
| 4.2.1. Makroyapı incelemeleri | 74 |
| 4.2.2. Korozyon kaybı | 77 |
| 4.2.3. Elektrokimyasal test | 80 |
| 5. SONUÇLAR | 84 |
| KAYNAKLAR | 85 |
| Ek-1 | 98 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Çizelge 1.1. Magnezyum'un genel özellikleri | 5 |
| Çizelge 1.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları | 6 |
| Çizelge 1.3. Magnezyum alaşımlarının etkileri | 7 |
| Çizelge 1.4. Alaşım elementlerinin magnezyum üzerinde yaptığı etkiler | 8 |
| Çizelge 1.5. Döküm magnezyum alaşımlarının sahip olduğu değerler | 26 |
| Çizelge 1.6. Dövme magnezyum alaşımlarının sahip olduğu değerler | 27 |
| Çizelge 1.7. Çelik, Al ve Mg alaşımlarının karşılaştırılması..... | 29 |
| Çizelge 2.1. Elektrokimyasal gerilim dizisi | 36 |
| Çizelge 2.2. Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler | 38 |
| Çizelge 2.3. Mühendislik malzemelerinin E_{kor} değerleri | 42 |
| Çizelge 2.4. Mg ve ikincil Mg fazlarının korozyon potansiyeli değerleri | 43 |
| Çizelge 2.5. %3.5 NaCl çözeltisi içerisindeki AZ91 alaşımının farklı Fe miktarları ile korozyon özellikleri | 58 |
| Çizelge 3.1. Farklı Fe oranına sahip AZ91 ve AZ910.5Ti Mg numuneleri | 62 |
| Çizelge 3.2. Numunelerin kimyasal analizleri (% ağırlıkça oran) | 63 |
| Çizelge 4.1. Şekil 4.5'te gösterilen bölgelerin EDS analiz sonuçları | 74 |
| Çizelge 4.2. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen, AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyon potansiyelleri (E_{kor}), korozyon akım yoğunlukları (I_{kor}) ve korozyon hızları (CR) | 82 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Yoğunluk-malzeme tablosu | 4 |
| Şekil 1.2. Magnezyum-alüminyum faz diyagramı | 9 |
| Şekil 1.3. Magnezyum-çinko faz diyagramı | 10 |
| Şekil 1.4. Magnezyum-mangan faz diyagramı | 11 |
| Şekil 1.5. Magnezyum-demir faz diyagramı | 11 |
| Şekil 1.6. Magnezyum-bakır faz diyagramı | 12 |
| Şekil 1.7. Magnezyum-silisyum faz diyagramı | 13 |
| Şekil 1.8. Magnezyum-gümüş faz diyagramı | 14 |
| Şekil 1.9. Magnezyum-kalay faz diyagramı | 14 |
| Şekil 1.10. Magnezyum-kurşun faz diyagramı | 15 |
| Şekil 1.11. Magnezyum-titanyum faz diyagramı | 16 |
| Şekil 1.12. Magnezyum-zirkonyum faz diyagramı | 17 |
| Şekil 1.13. Magnezyum-yitriyum faz diyagramı | 18 |
| Şekil 1.14. Magnezyum-stronsiyum faz diyagramı | 19 |
| Şekil 1.15. Magnezyum-kalsiyum faz diyagramı | 20 |
| Şekil 1.16. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı | 21 |
| Şekil 1.17. AZ91 alaşımının mikroyapı resimleri | 23 |
| Şekil 1.18. Mg-Al-Si kullanılarak üretilen motor bloğu | 28 |
| Şekil 1.19. AZ serisi alaşımlar kullanılarak üretilen parçalar | 29 |
| Şekil 1.20. Silah gövdesi | 30 |
| Şekil 1.21. Northrop XP-56 | 30 |
| Şekil 1.22. Husky M-116 aracı | 31 |
| Şekil 1.23. Falcon Gar-1 | 31 |
| Şekil 1.24. İnsan sol ve sağ ayak baş parmağında kullanılan Ti ve Mg civatalar | 32 |
| Şekil 2.1. Temel korozyon mekanizması | 34 |
| Şekil 2.2. Sulu ortam içerisinde Mg çözünmesi | 34 |
| Şekil 2.3. Mg(OH) ₂ potansiyel-pH diyagramı | 37 |
| Şekil 2.4. Korozyon akım yoğunluğunun (I_{kor}) ve korozyon potansiyeli (E_{kor}) | 39 |
| Şekil 2.5. Lineer polarizasyon yöntemi ile polarizasyon direnci bulunması | 40 |
| Şekil 2.6. Galvanik korozyona uğramış makine parçası | 41 |

Sayfa No

| | |
|---|-------|
| Şekil 2.7. Mg-Ti metallерinin galvanik eşleşme durumu | 42 |
| Şekil 2.8. Mg-Al alaşımlarının bazı fazları arasında tipik galvanik korozyonun şematik gösterimi (a) makro (b) mikro galvanik korozyon | 43 |
| Şekil 2.9. AZ91 alaşımının mikro yapısı | 44 |
| Şekli 2.10. Magnezyum boruda meydana gelen çukurcuk korozyonu | 45 |
| Şekil 2.11. Mg alaşımının çukurcuk korozyon oluşum düzeni | 46 |
| Şekil 2.12. AZ80-T5’de meydana gelen taneler arası korozyon morfolojisi | 47 |
| Şekil 2.13. (a) AZ31, (b) AM30 ve (c) AZ91 malzemelerinde meydana gelen SCC çatlakları | 48 |
| Şekil 2.14. (a) AZ91 ve (b) AZ91Ti içeren Mg alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi | 51 |
| Şekil 2.15. Fe miktarının saf Mg içerisindeki miktarının korozyon oluşumuna etkisi.. | 59 |
| Şekil 3.1. Döküm parçaları | 62 |
| Şekil 3.2. Deneyde kullanılan magnezyum alaşımı | 63 |
| Şekil 3.3. Elektrokimyasal deneyi deney düzeneği | 65 |
| Şekil 4.1. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı SEM görüntüleri..... | 67 |
| Şekil 4.2. (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı SEM görüntüleri..... | 68 |
| Şekil 4.3. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı Mg alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleri | 69-70 |
| Şekil 4.4. (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı X-Ray Difraksiyon analizleri | 71-72 |
| Şekil 4.5. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.1Fe, (c) AZ91Ti Kontrol ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi | 73 |
| Şekil 4.6. AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımında Al-Ti-Fe-Mn içeren parlak fazların morfolojisi | 74 |

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Şekil 4.7. AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı korozyon öncesi ve korozyon sonrası AZ91 Kontrol, AZ91+0.025Fe, AZ91+0.05Fe ve AZ91+0.1Fe makroyapı resimleri..... | 75 |
| Şekil 4.8. AZ91Ti Mg alaşımının Fe oranına bağlı korozyon sonrası AZ91Ti Kontrol, AZ91Ti+0.025Fe, AZ91Ti+0.05Fe ve AZ91Ti+0.1Fe makroyapı resimleri | 76 |
| Şekil 4.9. AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe oranlarına bağlı korozyon kaybı..... | 77 |
| Şekil 4.10. 3 gün korozyon ortamında tutulan (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri. | 78 |
| Şekil 4.11. 3 gün korozyon ortamında tutulan (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri | 79 |
| Şekil 4.12. AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı daldırma deneyi öncesi ve sonrası %3.5 NaCl çözeltisindeki pH değişimi | 80 |
| Şekil 4.13. AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri | 81 |
| Şekil 4.14. AZ91Ti Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri | 81 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-----------|--|
| A | : Atom çapı |
| Ag | : Gümüş |
| Al | : Alüminyum |
| AM | : Magnezyum-Alüminyum-Mangan |
| AS | : Magnezyum-Alüminyum-Silisyum-Mangan |
| AZ | : Magnezyum-Alüminyum-Çinko-Mangan |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials |
| Au | : Altın |
| Bi | : Bizmut |
| β | : $Mg_{17}Al_{12}$ |
| β_a | : Anot Tafel Katsayısı |
| β_k | : Katot Tafel Katsayısı |
| C | : Karbon |
| Ca | : Kalsiyum |
| Cr | : Krom |
| CR | : Korozyon Hızı |
| cm | : Santimetre |
| Cu | : Bakır |
| dm | : Desimetre |
| E_{kor} | : Korozyon Potansiyeli |
| H | : Hidrojen |
| HB | : Brinell Sertlik Katsayısı |
| HE | : Hidrojen Gevrekleşmesi |
| Ho | : Holmiyum |
| HSP | : Sıkı Düzen Hegzagonal |
| i_{kor} | : Korozyon Akım Yoğunluğu |
| Fe | : Demir |
| K | : Potasyum |

| | |
|----------------|----------------------------------|
| kcal | : Kilokalori |
| kg | : Kilogram |
| L | : Litre |
| Li | : Lityum |
| Mg | : Magnezyum |
| mm | : Milimetre |
| Mn | : Mangan |
| MPa | : Megapaskal |
| mV | : Milivolt |
| Nd | : Neodimyum |
| ohm | : Direnç Birimi |
| Pb | : Kurşun |
| P _i | : mm/yıl Cinsinden Korozyon Hızı |
| Pt | : Platin |
| ppm | : mg çözünen/ kg veya litre |
| Sc | : Skandiyum |
| SCE | : Doygun Kalomel Elektrot |
| SCC | : Gerilmeli Korozyon |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskopu |
| Si | : Silisyum |
| Sn | : Kalay |
| Sr | : Stronsiyum |
| R _p | : Polarizasyon Direnci |
| RE | : Nadir Toprak Elementleri |
| Th | : Toryum |
| Ti | : Titanyum |
| WE | : Magnezyum-Çinko-Toryum |
| XRD | : X-Ray Difraksiyonu |
| V | : Volt |

| | |
|---------------|--------------|
| Y | : Yitrium |
| Zn | : Çinko |
| Zr | : Zirkonyum |
| μA | : Mikroamper |

GİRİŞ

Magnezyumun (Mg) sahip olduğu en önemli özelliği ağırlık olarak alüminyumdan %35 ve demirden %75 daha hafif olmasıdır. Ancak, saf Mg'un dayanımının düşük olması nedeniyle kullanım alanındaki sınırlamalar değişik alaşımların üretilmesine yol açmıştır. Mg'un önemli alaşım grupları Mg-Al, Mg-Zn ve Mg-toprak alkali metalleri (RE) olarak gruplandırılır. Diğer Mg alaşımlar ile karşılaştırıldığında, AZ serisi (Al ve Zn ile alaşımlandırılan grup) özellikle AZ91 Mg alaşımı (Mg-%9Al-%1Zn) sahip olduğu iyi döküm ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır. Özgül mukavemet değerlerinin yüksek olmasından dolayı AZ serisi Mg alaşımları otomotiv endüstrisinden elektronik ve uzay endüstrisi gibi birçok mühendislik alanında kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte düşük toksik özelliği nedeniyle biyo-uyumlu ve biyo-bozunur bir metalik biyomalzeme olarak, ortopedik implant uygulamalarında plaka ve vida yapımında potansiyel implant malzemeler olarak kullanılması da son yıllarda ilgi çekmektedir (Friedrich ve Mordike, 2006; Luo ve Sachdev, 2012; Pekgülyüz, vd., 2013; Manuel, vd., 2015; Witte, vd., 2005; Staiger, vd., 2006; Poinern, vd., 2012; Waizy, vd., 2013; Agarwal, vd., 2016; Gerengi, vd., 2017).

Çeşitli uygulamalarda kullanım ortamına ve koşullarına göre Mg alaşımının mekanik özelliklerdeki geliştirmelerin yanında, korozyon dayanımının da geliştirilmesi önemli olmaktadır. Elektrokimyasal olarak aktif bir metal olan Mg, düşük korozyon dayanımına sahip olması nedeniyle Mg ve alaşımlarının herhangi bir koruma uygulanmadan kullanılmalarını sınırlandırmaktadır (Gray ve Luan, 2002; Hornberger, vd., 2012).

AZ serisi Mg alaşımının korozyon davranışlarını anlamaya yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Hehmann, vd., 1987; Lunder, vd., 1989; Song, vd., 1998; Song, vd., 1999; Guangyin, vd., 2000; Wu, vd., 2005; Tanverdi, 2005; Zhou, vd., 2006; Anık, vd., 2006; Yu, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Candan, vd., 2009; Cheng, vd., 2009; Salman, vd., 2010; Wang, vd., 2012; Koç, 2013; Wang, vd., 2013; Candan, vd., 2011; Samainego, vd., 2013; Singh, vd., 2015; Candan, vd., 2016; Candan ve Candan, 2018; Candan, vd., 2018). Ancak, AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon davranışları konusundaki görüşler halen birbirinden farklılık göstermektedir. Bazı araştırmacılar (Hehmann, vd., 1987; Lunder, vd., 1989), AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon dayanımının malzeme içerisindeki Al miktarının % 8-9 (ağ.) değerlerine ulaştığında

önemli ölçüde iyileştiğini, bunun sebebinin de $Mg_{17}Al_{12}$ (β) intermetalik faz yapısının korozyonu engelleyici bariyer etkisi yapmasından kaynaklandığını savunmaktadırlar. Diğer araştırmacılar ise (Song, vd., 1998; Cheng, vd., 2009; Samaniego, vd., 2013; Singh, vd., 2015), β fazının koruyucu bariyer etkisi yapmadığını, bu görüşün tam tersi olarak alaşım matrisi ile mikro galvanik hücre şeklinde davranış sergilediğini ve korozyonun oluşumunun hızlandığını savunmaktadırlar.

Yukarıdaki AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon davranışları ile ilgili çalışmalar (Song, vd., 1998; Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2009; Salman, vd., 2010; Wang, vd., 2013; Samaniego, vd., 2013; Singh, vd., 2015) farklı parametrelerde gerçekleştirilmiştir. Alaşım elementinin (Song, vd., 1998; Song, vd., 1999; Guangyin, vd., 2000; Tanverdi, 2005; Wu, vd., 2005; Yu, vd., 2006; Zhou, vd., 2006; Candan, vd., 2009; Candan, vd., 2011; Koç, 2013; Candan ve Candan, 2018), soğuma hızının (Tanverdi, 2005; Wang, vd., 2013; Candan, vd., 2016) ve üretim yöntemlerinin (Song, vd., 1999) mikroyapı üzerinde önemli etkilerinin olduğu ve alaşımın korozyon davranışlarının da bunun sonucunda ciddi şekilde değiştiği bilinmektedir. Örneğin; AZ31 ve AZ61 alaşımları, AZ91 alaşımı ile karşılaştırılmış (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012) ve alaşımların üretim yöntemlerine bakılmaksızın içerdiği Al miktarı dikkate alınarak yorumlanmıştır. AZ91 alaşımı biyet formunda ve AZ31 alaşımı haddelenmiş plaka formunda üretilmiştir (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012).

Magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını olumsuz etkileyen Fe, Si, Cu ve Ni gibi empürite elementleri her zaman bulunur (Pan, vd., 2016a,b). Fe empürite elementi, küçük bir miktar bile olsa, Mg alaşımlarının korozyon direncini önemli ölçüde azaltabilir (Pan, vd., 2016a). Özellikle, endüstriyel uygulamalar için Fe'nin tolerans limit değerlerinin bilinmesi maliyet/kalite oranı açısından son derece önemlidir. Literatürde Fe'nin olumsuz etkisi ile ilgili tolerans limit değerleri saf Mg için bulunmasına rağmen (Polmear, 1995; Friedrich ve Mordike, 2006), AZ91 alaşımları için bu bilgi sınırlıdır (Song ve Atrens, 1999).

Literatür araştırmaları (Candan, vd., 2011; Ai ve Quan, 2012; Candan, vd., 2016; Choi ve Kim, 2017) AZ serisi Mg alaşımına Ti ilavesi ile alaşımın mekanik dayanım ve korozyon direncinin etkin bir biçimde arttırdığını göstermiştir. Mekanik dayanım ve korozyon direncindeki artış, mikroyapıdaki β fazının Ti ilavesi ile kısmen ayrı ötektikten tamamen ayrı ötektiğe dönüşmesine dayandırılmıştır (Candan, vd., 2016; Candan, vd.,

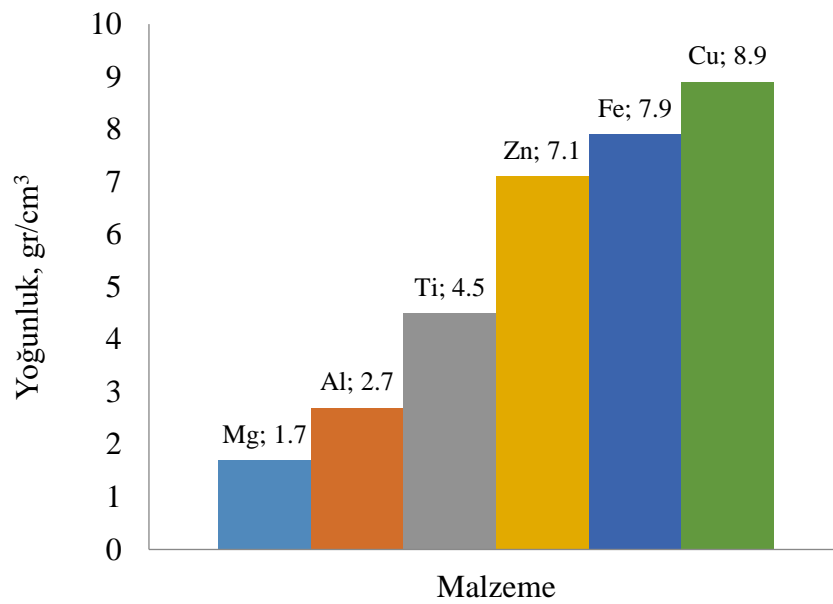
2017). Ancak, Fe'nin AZ91 Mg alaşımlarının korozyonu üzerindeki zararlı etkisini azaltmada Ti'un rolü ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Dolayısıyla bu çalışmada, aynı Şartlarda üretilmiş (benzer katılaşma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) farklı Fe içeriğine sahip AZ91 ve Ti ile mikro alaşımlandırılmış AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları-Fe tolerans limit değerı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Mikroyapı çalışmaları; SEM ve XRD ile korozyon davranışları; %3.5 NaCl çözeltilisinde, ağırlık kaybı ve potansiyodinamik polarizasyon test yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

1.1. Magnezyumun Genel Özellikleri

Magnezyum (Mg), periyodik sistemde IIA grubunda, toprak alkali elementleri içerisinde yer almaktadır. 1.74 g/cm^3 'lük yoğunluğu ile mühendislik malzemeleri içerisinde en hafif olan metaldir. Yer kabuğunun %2.7'sinde ve okyanusların %0.13'ünde bulunmaktadır. Ağırlık olarak Mg, alüminyumdan (Al) %35, titanyumdan (Ti) %60, demir (Fe) ve çelikten %75 daha hafiftir (Şekil 1.1). Çizelge 1.1.'de saf Mg'nin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Yoğunluk-malzeme tablosu.

Magnezyum, alüminyum ve demirden sonra doğada en çok bulunan element olma özelliğine sahiptir. Magnezyum, cevher olarak dolomit ve magnezit adıyla sırasıyla MgCO_3 ve CaCO_3 formunda bulunurken, deniz suyunda, yer altı sularında ve yer üstü tuz çökeltilerinde klorür bileşiği şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Şu anki kullanım miktarı baz alındığında, İsrail'deki Ölü Deniz'de yaklaşık 20.000 yıl yetecek miktarda Mg bulunmaktadır (Gaines, vd., 1996).

Magnezyum alaşımları hafif alaşım olarak rakibi olan alüminyum alaşımlarına kıyasla, hafiflikleri, yüksek özgül dayanım ve rijitlikleri, iyi sönümlenme, dökülebilme ve işlenebilme kabiliyetleri sayesinde konstrüksiyon malzemesi olarak kendilerine çeşitli alanlarda kullanım olanağı bulmaktadır (Gaines, vd., 1996; Fleming, 2012).

Mg'nin kullanım alanlarının genişlemesiyle birlikte birçok özelliği de geliştirilmeye başlanmıştır. Çeşitli alaşım elementleri kullanılarak istenilen özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir. Alaşım elementi olarak başlıca Al, çinko (Zn), gümüş (Ag), kalsiyum (Ca), silisyum (Si), zirkonyum (Zr), lityum (Li), toryum (Th), Fe, Ti ve toprak alkali metalleri kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1. Magnezyum'un genel özellikleri (Avedesian ve Baker, 1999; Smith, 2001; Kainer, 2003; Friedrich ve Mordike, 2006).

| | |
|---------------------------|-------------------------------|
| Simgesi | Mg |
| Yoğunluğu | 1.74 g/cm ³ |
| 700°C'ta özgül ağırlığı | 1.5 kg/dm ³ |
| Atom Çapı | 3.20 Å° |
| Atom Ağırlığı | 24.21 |
| Kristal Şekli | Heksagonal sıkı paket |
| Ergime Noktası | 650 °C |
| Kaynama Noktası | 1107 °C |
| 200°C'ta Isıl İletkenliği | 140 kcal/m.sa.°C |
| Ergime Isısı | 56 kcal/kg |
| Buharlaştırma Isısı | 1400 kcal/kg |
| Uzama Katsayısı | 2.73.10 ⁻⁵ mm/mm°C |
| Elektrik İletkenliği | 22.2 m/ohm.K |
| Valans Durumu | Mg ⁺² |
| Viskozite | 1.25 cp 650 °C'de |
| Sertlik | 30-47 HB |
| Elastisite Modülü | 44.5.10 ³ N/mm.mm |
| Akma Dayanımı | 69-262 MPa |
| Çekme Dayanımı | 175-318 MPa |
| Uzama (%) | 2-20 |

1.2. Magnezyum Alaşım Standartı

Mg alaşımları temel olarak üç kısma ayrılmaktadır. Bunlar eser miktarda alaşım elemanı içeren safa yakın Mg alaşımları, Al içeren alaşımlar (AZ, AS, AM vb. serileri) ve Al içermeyen alaşımlar (WE vb. serileri).

Magnezyum alaşımları ASTM (A275) standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Bu isimlendirmede ilk harf, alaşımı oluşturan fazla miktardaki (ana) elementi belirlemektedir. İçerisinde eşit miktarda ana alaşım elementi bulunan durumlarda alfabetik sıra uygulanmaktadır. İkinci harf ise alaşımda az miktarda bulunan elementi ifade etmektedir. Harflerden sonra gelen rakamlardan birincisi ana alaşım elementinin katkı yüzdesini, ikincisi de diğer alaşım elementinin bulunma yüzdesini göstermektedir. Örnek olarak AZ91 alaşımında; A alüminyumu, Z çinkoyu ve %9 Al, %1 Zn bulunduğunu ifade etmektedir. Alaşımları isimlendirme sırasında kullanılan harflerin ifade ettikleri elementler Çizelge 1.2’de gösterilmiştir (Fleming, 2012).

Çizelge 1.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları (Barber, 2004; Fleming, 2012).

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

Mg alaşımları isimlendirilirken, malzemeye uygulanan işlemlerde belirtilmektedir. Bu işlemleri belirtmek için de harfler kullanılmaktadır. F, malzemenin üretildiği gibi olduğunu, O, tavllanmış olduğunu, H, deformasyon sertleşmesi uygulanmış olduğunu, W, çözündürme ısıl işlemi uygulandığını ve T, ısıl işlem uygulandığını göstermektedir.

Çizelge 1.3’te çeşitli Mg alaşımları ve bu alaşımların sahip olduğu özellikler ifade edilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi her alaşım elementi ilave edildiği malzemeye farklı bir özellik kazandırmaktadır (Fleming, 2012).

Çizelge 1.3. Magnezyum alaşımlarının etkileri (Fleming, 2012).

| | |
|------|---|
| AZ63 | Oda sıcaklığında iyi mukavemet ve dökülebilirlik. |
| AZ91 | Kum kalıba ve metal kalıba döküm. |
| AM50 | Yüksek basınçta metal kalıba döküm. |
| AS21 | 150°C iyi sürünme özelliği. |
| AE42 | 150°C iyi sürünme özelliği. |
| ZK51 | Kum kalıba döküm, oda sıcaklığında iyi mukavemet ve dökülebilirlik. |
| ZC63 | Basınçlı döküm, iyi yüksek sıcaklık mukavemeti ve kaynaklanabilirlik. |
| WE43 | Yüksek sıcaklıkta sürünme direnci. |

1.3. Magnezyum Alaşımlarında Alaşım Elemanlarının Etkisi

Mg metalinin saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün olmamaktadır. Malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla Mg'a alaşım elementleri katılarak döküm veya dövme ürünler elde edilmektedir. Mg hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıya sahiptir ve sahip olduğu bu tane çapı da çok fazla sayıda alaşım elementiyile katı çözünebilirliğe müsaade etmektedir. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, berilyum (Be), kalsiyum (Ca), bakır (Cu), Fe, mangan (Mn), Ni, silisyum (Si), gümüş (Ag), kalay (Sn), Zn ve zirkonyum (Zr) gibi ana elementler ile sodyum (Na), potasyum (K), Li alkali ve seryum (Ce), lantan (Ln), yitriyum (Y), neodim (Nd) gibi toprak elementleri (RE) ile alaşımlandırılabilir. Bu elementler ile alaşımlandırıldığı zaman genellikle malzemenin istenilen özelliklerinde iyileşmeler elde edilmektedir (Zhang, vd.,2000; Barber, 2004; Ünal, 2008). Örneğin; Ca, Mg'ye biyomalzeme olarak kullanılacağı zaman eklenmekte, Ag ise biyomalzemenin yanında sertlik sağlaması amacıyla eklenmektedir. Ayrıca Li ilave edilmesi dökülebilirliği geliştirirken, malzemenin yoğunluğunu ve sertliğini azaltmaktadır. Çizelge 1.4.'de alaşım elementlerinin Mg üzerindeki etkileri gösterilmiştir (Fleming, 2012; Esmaily, vd., 2017).

Çizelge 1.4. Alaşım elementlerinin magnezyum üzerinde yaptığı etkiler (Barber, 2004; Fleming, 2012).

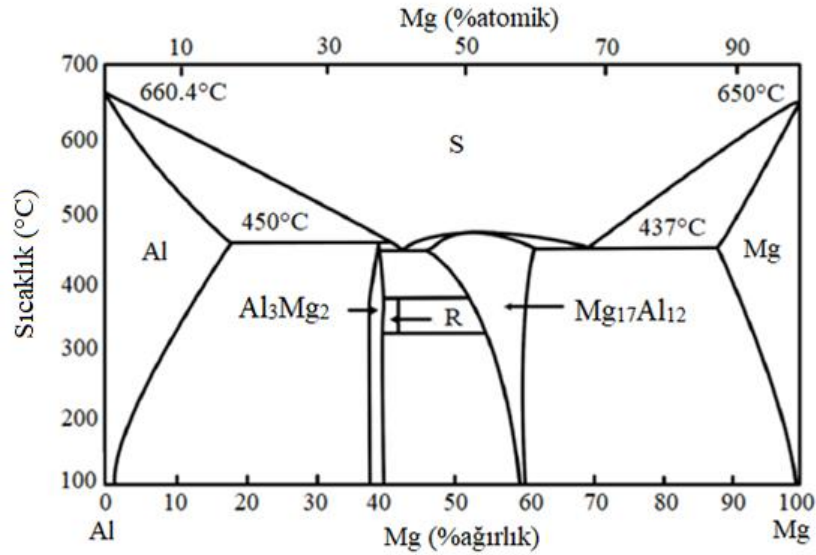
| Alaşım Elementi | Ergitme ve Döküm Özellikleri | Mekanik ve Teknolojik Özellikler | Korozyon Özelliklerine Etkisi |
|---------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Ag | | Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımlarını iyileştirir. | Zararlıdır. |
| Al | Dökülebilirliği iyileştirir. | Katı ergiyik sertleştiricidir. | Az etkilidir. |
| Ca | Etkili tane incelticidir, ergimiş metalin oksidasyonunu önler. | Sürünme özelliklerini iyileştirir. | Zararlıdır. |
| Fe | Magnezyum çelik kalıplarla çok yavaş reaksiyona girer. | | Zararlıdır. |
| Si | Dökülebilirliği artırır. | Sürünme özelliklerini iyileştirir. | Zararlıdır. |
| Th | Mikroporoziteyi bastırır. | Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımını iyileştirir. | |
| Zn | Ergimiş metalin akışkanlığını artırır. | Çökelme sertleşmesi ortam sıcaklığında dayanımını artırır. | Az etkilidir. |
| Zr | Etkili tane incelticidir. | Ortam sıcaklığında çekme dayanımını iyileştiricidir. | Az etkilidir. |
| Toprak Alkali Elementleri | Dökülebilirliği iyileştirir. | Yüksek sıcaklıklarda çökelme sertleşmesini iyileştirir. | İyileştirir. |

1.4. Magnezyum Alaşımlarına Katılan Elementler

1.4.1. Alüminyum (Al) (AZ, AS, AM vb. seriler)

Al, Mg alaşımlarında, Mg ile reaksiyona girerek $Mg_{17}Al_{12}$ fazını oluşturmaktadır. Tane boyutunu küçültücü etkisinin yanında, yüksek miktarlarda Al içeren durumlarda

tane sınırları boyunca $Mg_{17}Al_{12}$ fazının oluşmasına neden olmaktadır. Alaşımın genel olarak dökülebilirliğini ve sertliğini arttırmaktadır. Ayrıca %3'ün (ağ.) üzerindeki ve %6'nın (ağ.) altındaki konsantrasyonlarda alaşımın akma mukavemetini arttırmakta, sünekliğini geliştirmektedir. Yapıdaki $Mg_{17}Al_{12}$ fazı alaşımın korozyon dayanımını iyileştirmektedir, ancak $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ile Mg matrisi arasında meydana gelen mikro galvanik korozyon, korozyon hızını artırıcı etki yapabilmektedir. Şekil 1.2'de Mg-Al faz diyagramında elementlerin birbirleri içerisindeki çözünme miktarları görülmektedir (Song ve Atrens, 1999; Heublein, vd., 2003; Friedrich ve Mordike, 2006; Witte, vd., 2007; Nam, vd., 2011; Minarik, vd., 2013; Ding, vd., 2014).

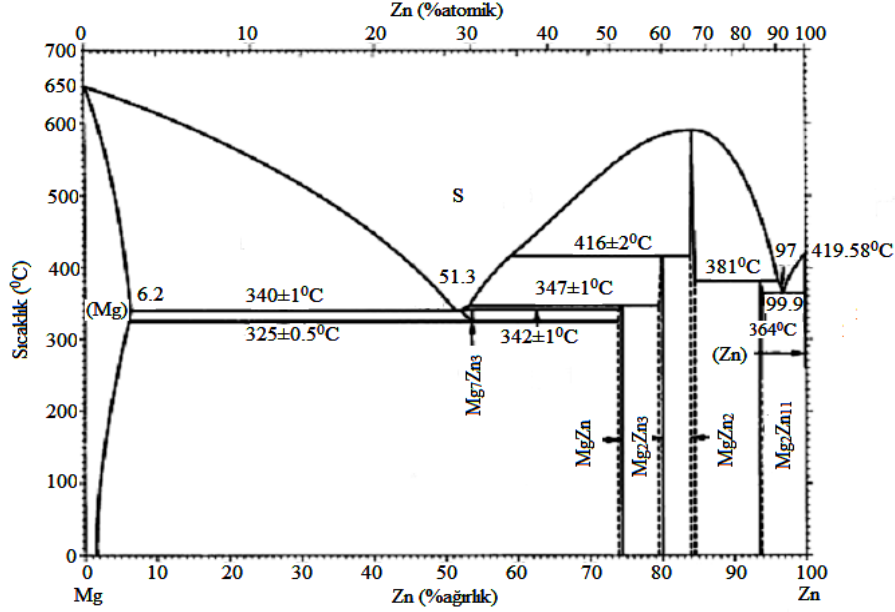


Şekil 1.2. Magnezyum-alüminyum faz diyagramı (Friedrich ve Mordike, 2006).

1.4.2. Çinko (Zn)

Çinko, Mg alaşımlarında genellikle Al ile beraber kullanılmaktadır ve Mg içerisinde kolay bir şekilde çözünebilmektedir (Şekil 1.3). %5'in altında alaşımda bulunduğu durumlarda tane inceltici etkisi üzerinde belirgin bir etki yapmamaktadır. Mg ile reaksiyona girerek ikincil fazı oluşturmakta ve tane sınırları boyunca bu faz yerleşmektedir. Mekanik özellik olarak alaşımın çekme mukavemetini arttırmaktadır. Ayrıca mükemmel katı çözünebilirlik ve yaşlandırma sertleşmesini geliştirici etkisi bulunmaktadır. Yüksek oranlarda kullanıldığında dökülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Ni ve Fe'in, Mg alaşımlarının korozyon dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerini de azaltıcı etkisi bulunmaktadır. %5'in altındaki konsantrasyonlarında Mg alaşımlarının

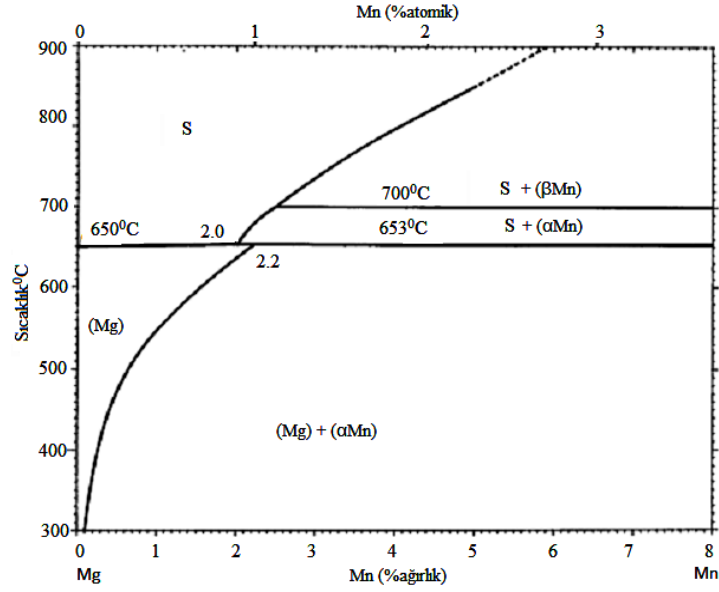
korozyon direncini arttırıcı etkisi bulunmaktadır (Friedrich ve Mordike, 2006; Xu, vd., 2007; Gu, vd., 2009; Zhang, vd., 2009; Zhang, vd., 2010; Cai, vd., 2012; Ding, vd., 2014).



Şekil 1.3. Magnezyum-çinko faz diyagramı (Friedrich ve Mordike, 2006).

1.4.3. Manganez (Mn)

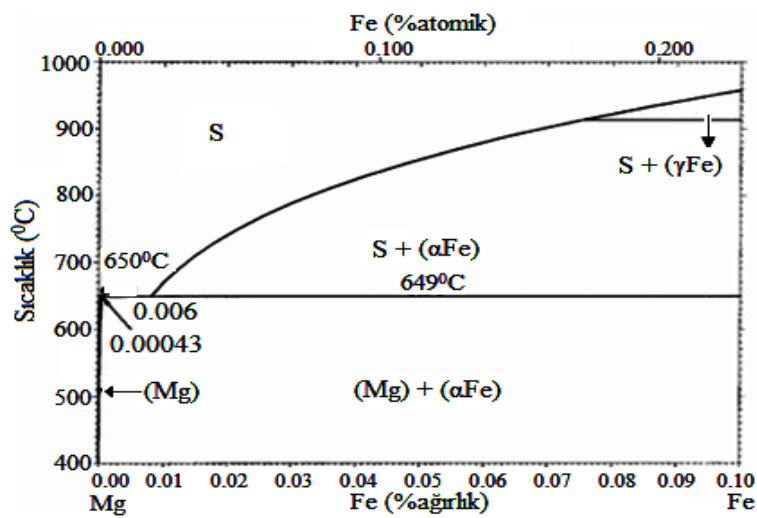
Mn, düşük konsantrasyonlarda (%1.5) kullanıldığında Mg-Al alaşımlarında önemli tane inceltici etkide bulunmaktadır. Fe ve diğer ağır metaller ile yeni yapılar oluşturarak saflığı bozmaktadır. Hafifçe alaşımın akma dayanımını ve kaynaklanabilirliği arttırmaktadır. İkili Mg-Mn alaşımlarının kopma dayanımını düşürmekte ve uzamasını azaltmaktadır. Düşük konsantrasyonlardaki ilavelerinde saflığı bozarak Mg alaşımlarının korozyon direncini arttırıcı etki yapmaktadır. Şekil 1.4'de Mg-Mn faz diyagramında Mn'nin farklı sıcaklıklardaki çözünürlüğü görülmektedir (Baker, 1998; Xu, vd., 2007; Gu, vd., 2009; Ding, vd., 2014).



Şekil 1.4. Magnezyum-mangan faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.4. Demir (Fe)

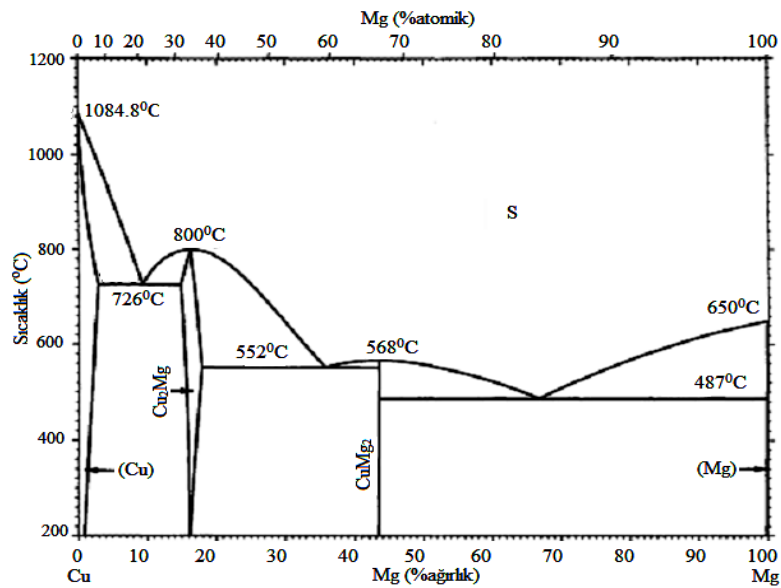
Fe, Mg'un korozyon dayanımını büyük oranda azaltmaktadır (Kainer, 2003). Bununla birlikte Mg'un çelik kalıplarla arasında meydana gelen reaksiyonları kuvvetlendirici etki yapmaktadır. Ayrıca Mg alaşımlarında Fe içeriği %0.03 (ağ.) değerini aşmamalıdır. Alaşımdaki yüksek Fe miktarı malzemenin sünekliğini ve korozyon direncini azaltmaktadır (Ji, vd., 2013). Şekil 1.5'de magnezyum-demir faz diyagramı görülmektedir (Barber, 2004; Kapinos, 2014).



Şekil 1.5. Magnezyum-demir faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.5. Bakır (Cu)

Cu, Mg alaşımlarında dökülebilirliği iyileştirici etki yapmaktadır. Cu, Mg alaşımlarına katıldığı zaman Mg_2Cu bileşiğini oluşturmaktadır. %0.05'i (ağ.) aşan konsantrasyonlarda korozyon direncine olumsuz etki yapmaktadır ancak yüksek sıcaklıktaki mukavemetini arttırmakta ve sünekliğini azaltmaktadır (Kainer, 2003). Şekil 1.6'da magnezyum-bakır faz diyagramından sıcaklık değerlerine göre malzemenin sahip olduğu fazlar görülmektedir (Barber, 2004; Friedrich ve Mordike, 2006; Kapinos, vd., 2014).



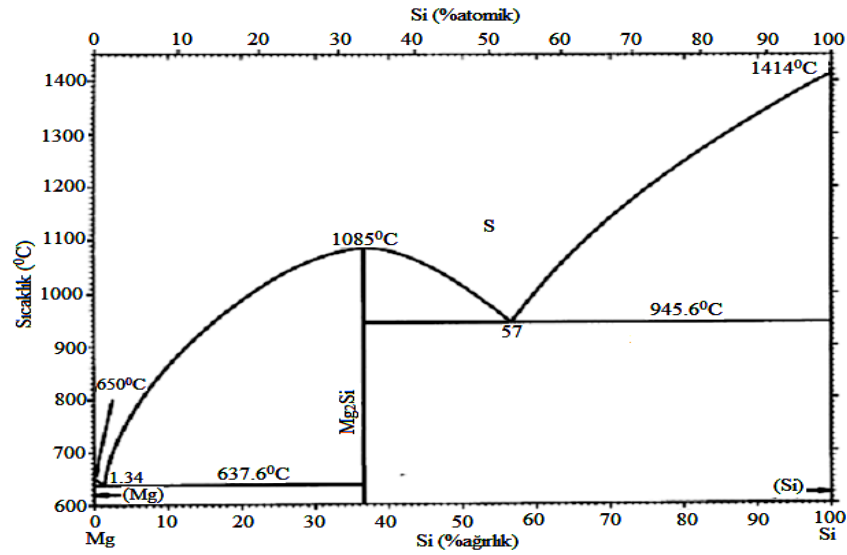
Şekil 1.6. Magnezyum-bakır faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.6. Nikel (Ni)

Nikel elementi de demir elementi gibi magnezyum alaşımları için zararlı olan bir elementtir. Korozyon direncini azaltıcı etkide bulunmaktadır. Nikel ortalama %0,01-%0,03 miktarları arasında kullanılan bir alaşım elementidir. En yüksek korozyon direncini ise %0.005'te sağlamaktadır (Barber, 2004; Kapinos, vd., 2014).

1.4.7. Silisyum (Si)

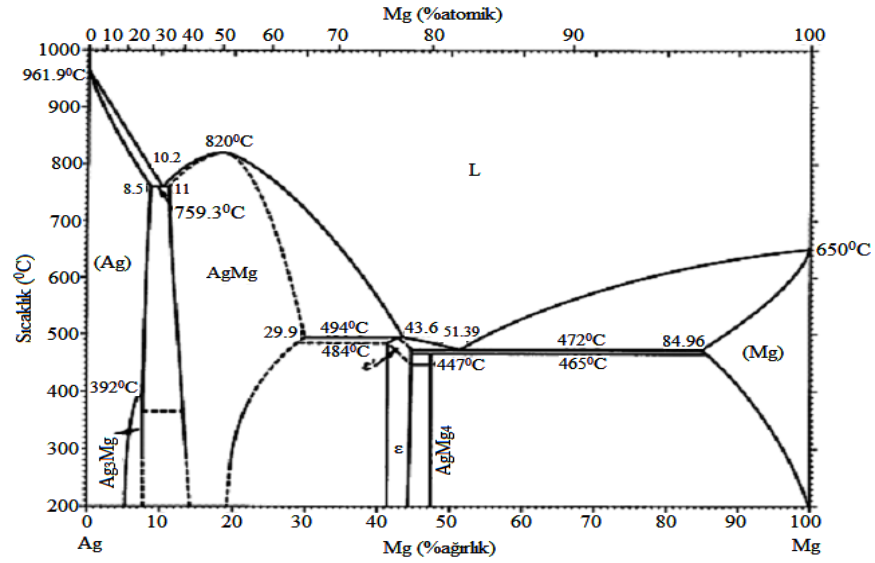
Si genellikle Al, Zn ve Mn ile beraber kullanılan bir alaşım elementidir ve yüksek sıcaklıklarda dayanımı arttırıcı etki yapan bir elementtir. Mg alaşımlarında %1.5'i geçmeyen miktarlarda Si kullanılmaktadır. Si ile Fe'in beraber kullanıldığı durumlarda malzemenin korozyon dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir (Zhang, 2000; Vogel, vd.,2002). Si, Mg içerisinde, Mg_2Si intermetalik fazını oluşmasına neden olarak malzemenin sürünme dayanımını ve dökülebilirliğini geliştirmektedir (Aizawa ve Song, 2006; Freidrich ve Mordike, 2006; Ünal, 2008; Gupta ve Sharan, 2011; Dobrzanski, 2012). Şekil 1.7'de magnezyum-silisyum faz diyagramı gösterilmektedir (Baker, 1998).



Şekil 1.7. Magnezyum-silisyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.8. Gümüş (Ag)

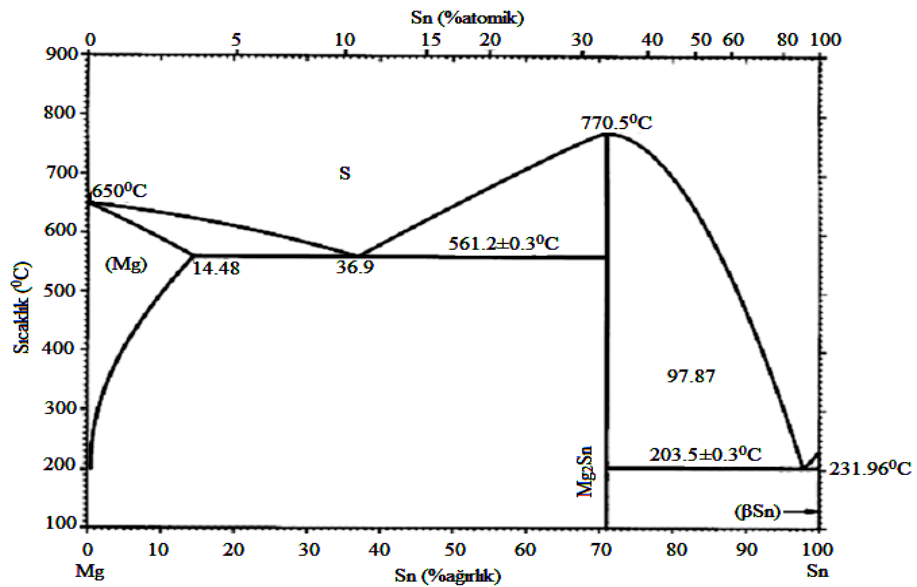
Ag, Mg alaşımlarının sertliğini arttırıcı etki yapmaktadır (Barber, 2004). Alaşımlama sırasında nadir toprak elementleri beraber kullanılabilir. Bunun sonucunda da Mg alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki mukavemetini ve sürünme direncini geliştirici etkide bulunmaktadır (Pekgülyüz, 2001). Şekil 1.8'de magnezyum-gümüş faz diyagramı gösterilmiştir (Kapinos, vd., 2014).



Şekil 1.8. Magnezyum-gümüş faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.9. Kalay (Sn)

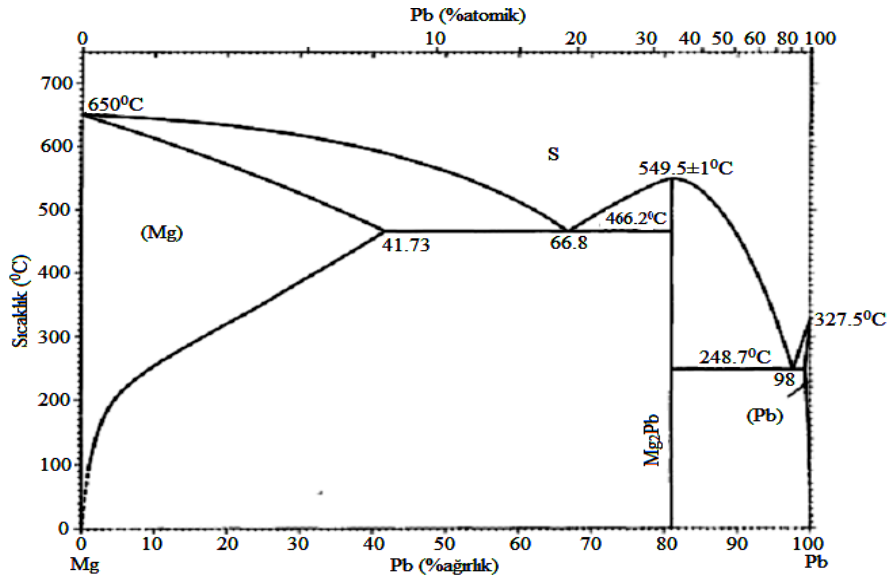
Kalay, magnezyum alaşımlarında Al ve Mn ile beraber kullanılabilen bir alaşım elementidir. Mg'ya ilave edilen Sn, alaşımın akma dayanımını artırıcı etki yapmaktadır (Koç, 2008; Keskin, 2011; Türen, 2013). Şekil 1.9'da magnezyum-kalay faz diyagramı bulunmaktadır (Barber, 2004; Kapinos, vd.,2014).



Şekil 1.9. Magnezyum-kalay faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.10. Kurşun (Pb)

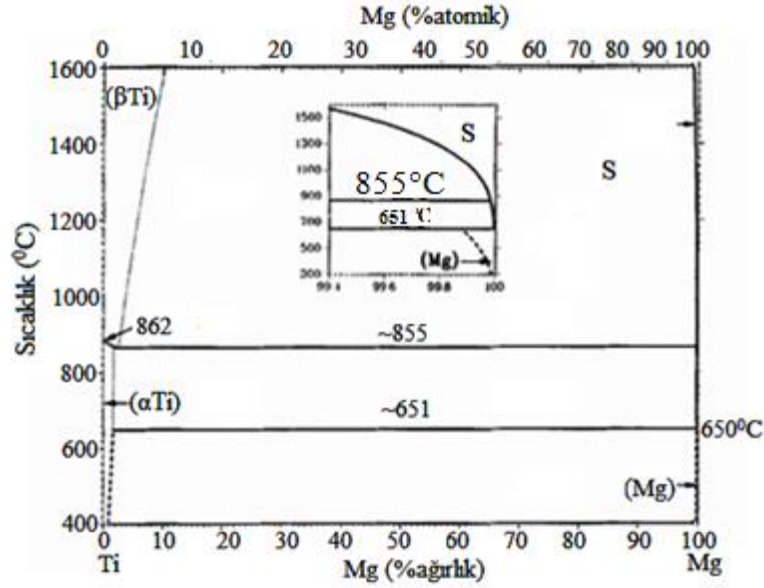
Pb sahip olduğu iyi çözünebilme özelliği sayesinde, yüksek sıcaklıklarda (~450 °C), Mg alaşımlarında yaklaşık %45'e kadar çözünebilmektedir. Ayrıca Mg-Al alaşımlarında oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ fazının inceltmesini sağlayarak mekanik özelliklerin geliştirilmesini sağlamaktadır (Balasubramani, vd., 2007, Koç, 2008, Candan, vd., 2009). Şekil 1.10'da verilen Mg-Pb faz diyagramında görüldüğü gibi alaşım sıcaklığı düştükçe yapıda $\alpha + Mg_2Pb$ fazının meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 1.10. Magnezyum-kurşun faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.11. Titanyum (Ti)

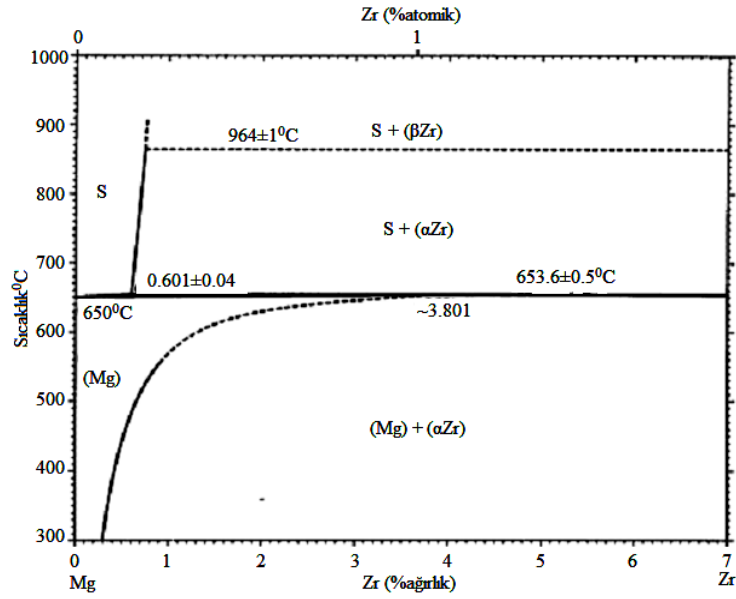
Ti, Mg içinde az miktarda çözünebilirliğe sahip bir elementtir ve alaşımda tane inceltici etki yapmaktadır. Ti'nun sahip olduğu yüksek mekanik özellikler, Mg alaşımlarında da mekanik özellikleri geliştirici etkide bulunmasını sağlamaktadır (Candan, vd., 2011, Candan, vd., 2016, Choi ve Kim, 2017). Şekil 1.11'de magnezyum-titanyum faz diyagramında birbirleri içerisinde meydana gelen faz durumları gösterilmiştir (Baker, 1998).



Şekil 1.11. Magnezyum-titanyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.12. Zirkonyum (Zr)

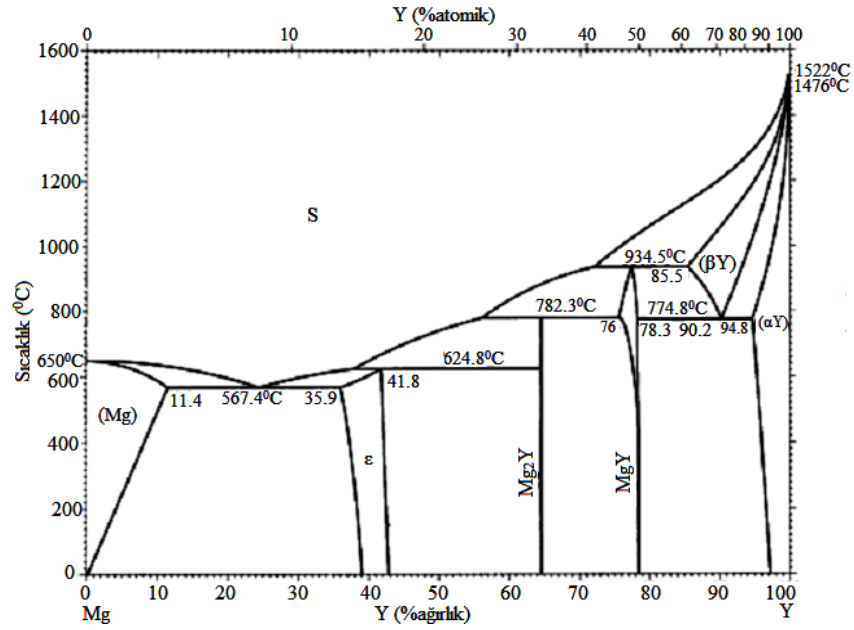
Zr, Mg alaşımlarında mükemmel tane inceltici etki yapmaktadır. Ancak, saf Mg içerisinde düşük çözünebilirliğe sahiptir (Şekil 1.12). Mg alaşımları içerisinde Al ile beraber kullanıldığında mekanik özellikler için zararlı faz yapısı oluşturabildiği için Al ile aynı anda kullanılmaktan kaçınılmaktadır. Alaşımın sünekliğini, uzamasını ve kopma dayanımını artırıcı etkisi vardır. Genellikle Zn ile beraber Mg alaşımlarında kullanımı tercih edilmektedir. Artan Zn miktarı ile beraber kullanıldığında mukavemet artırıcı etkisi bulunmaktadır. Küçük miktarlardaki Zr (%2'den daha az) Mg alaşımlarının korozyon direncini arttırmaktadır, aksi halde bu sınırı aşan kullanımlarda korozyon direnci için olumsuz etki yapmaktadır (Baker, 1998; Huan, vd., 2010; Gu, vd., 2011; Liu, vd., 2011; Ding, vd., 2014).



Şekil 1.12. Magnezyum-zirkonyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.13. Yitriyum (Y)

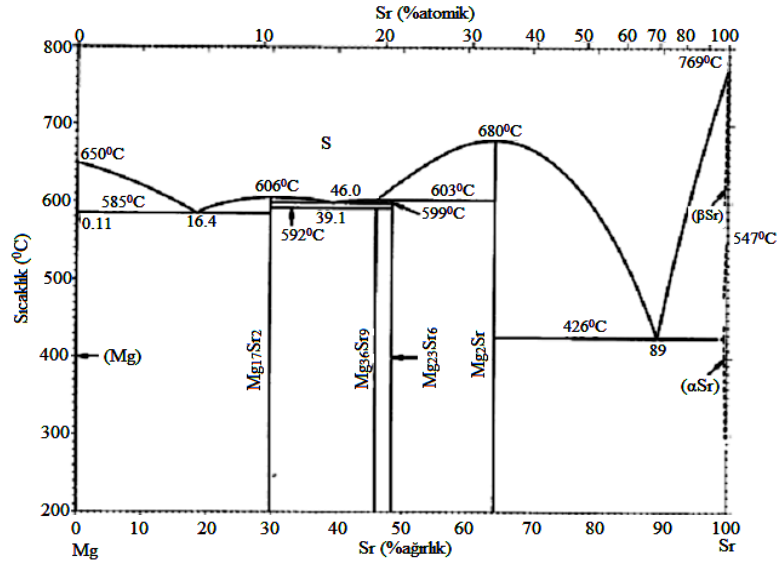
Y, çok iyi tane inceltici etki yapmaktadır. Mg alaşımlarında nispeten yüksek katı çözünebilirliğine sahiptir. Daima diğer RE elementleri ile beraber kullanılarak, Y açısından zengin fazlar oluşturularak, Mg alaşımlarının sürünme özelliğini geliştirici etkide bulunmaktadır. Saf Mg içerisinde artan Y miktarı ile alaşımın, çekme mukavemeti geliştirilmektedir. %3'ün altındaki kullanım durumlarında alaşımın uzamasını geliştirmektedir. Aşırı Y ilave edilmesi durumlarında alaşımın uzamasında zararlı etki yaratmaktadır. Mg alaşımlarında, %2'nin üzerindeki Y kullanımlarında malzemenin korozyon dayanımına olumsuz etki yapmaktadır. Şekil 1.13'de magnezyum-yitriyum faz diyagramı bulunmaktadır (Baker, 1998; Hanzi, vd., 2010; Peng, vd., 2010; Peng, vd., 2012).



Şekil 1.13. Magnezyum-yitriyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.14. Stronsiyum (Sr)

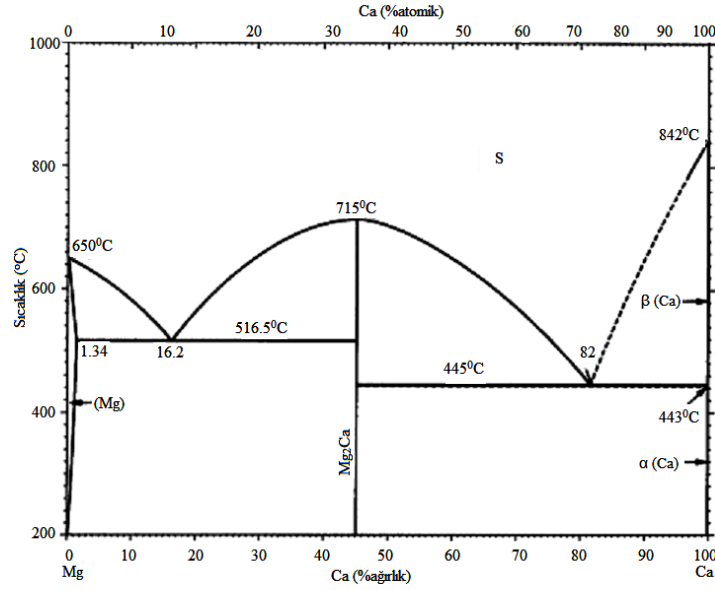
Sr, çoğu alaşım elementinin yapmış olduğu etkiye benzer şekilde tane inceltici etkide bulunmaktadır. Alaşıma aşırı miktarda ilave edilmesi tane sınırlarının kabalaşmasına neden olmaktadır. Mg ile reaksiyona girerek tane sınırları boyunca yerleşmiş Mg-Sr fazlarını oluşturmaktadır. %2'nin altındaki kullanımlarda mukavemeti geliştirmektedir. Sr'nin, Mg alaşımlarının korozyon dayanımı üzerindeki etkisine bakıldığında ($Mg_{17}Sr_2$ fazının hacimsel fraksiyonu dikkate alındığında) en uygun kullanım miktarının %2'nin altında olduğu görülmektedir. Şekil 1.14'de magnezyum-stronsiyum faz diyagramı bulunmaktadır (Baker, 1998; Nam, vd., 2011; Berglund, vd., 2012; Brar, vd., 2012; Li, vd., 2012).



Şekil 1.14. Magnezyum-stronsiyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.15. Kalsiyum (Ca)

Ca, Mg alaşımlarında %15'in altındaki kullanımlarında tane boyutunu küçültücü ve esnekliğini artırıcı etkide bulunmaktadır. %20'den az daha Ca içeriklerinde mukavemeti ve sertliği arttırmaktadır. %0.3'ün altındaki konsantrasyonlarda malzemenin sürünme özelliğini geliştirmektedir. Alaşımda %0.5'ten %15'e doğru artan kullanımlarda süneklik için zararlı etki yapmaktadır. Mg içerisine aşırı miktarda Ca ilave edilmesi korozyon dayanımı için olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Korozyon dayanımı açısından en uygun koşul %1'den daha az Ca kullanıldığında elde edilmektedir. Şekil 1.15'de magnezyum-kalsiyum faz diyagramında malzeme yapısında oluşan fazlar görülmektedir (Baker, 1998; Rosalbino, vd., 2010; Li, vd., 2012; Zhang, vd., 2012).



Şekil 1.15. Magnezyum-kalsiyum faz diyagramı (Baker, 1998).

1.4.16. Lityum (Li)

Lityum, tane boyutunu çok az miktarda düşürmektedir. Mg-Li fazları tane sınırlarında hacim merkezli kübik yapısını oluşturmaktadır. Yüksek orandaki (>%11) hacim merkezli kübik yapıları ile deforme olabilirliliği arttırmaktadır. Ayrıca mukavemeti önemli ölçüde düşürmektedir. %9'un altındaki konsantrasyonlarda korozyon direncini artırıcı etki yapmaktadır. Daha yüksek değerlerde korozyon hızını ivmelendirmektedir (Chang, vd., 2006; Witte, vd., 2006; Mueller, vd., 2010).

1.4.17. Nadir Toprak Metalleri (RE)

RE elementleri içerisinde Y, Ce Nd elementleri tane inceltici etkileri bulunan alaşım elementleridir. Ce, bu etkisinin yanında %6'nın altındaki kullanımlarında malzemenin sertliğini artırıcı, sürünme dayanımını azaltıcı etki yapmaktadır. Özellikle AZ serisi alaşımlarda %1 ilave edildiği durumlarda akma dayanımını geliştirmektedir. AZ serisi alaşımlarda Al ile oluşturduğu $Al_{11}Ce_3$ fazı ile Mg matrisini çevreleyerek galvanik etkiyi baskılamakta ve korozyon direncini arttırmaktadır. Ancak malzeme içerisindeki miktarının artmasıyla korozyonu olumsuz etkilemektedir. Nd alaşım elementi de Mg alaşımlarının akma dayanımını artırıcı etkide bulunmaktadır (<%6 ağı.). Ancak yüksek miktarlardaki kullanımı sürünme özelliklerini düşürmektedir. Ce'un etkisine benzer şekilde $Mg_{12}O_3$ fazı Mg matrisini çevreleyerek korozyon oluşumunu azaltmaktadır (Rosalbino, vd., 2006; Zhang, vd., 2008; Gu, vd., 2010).

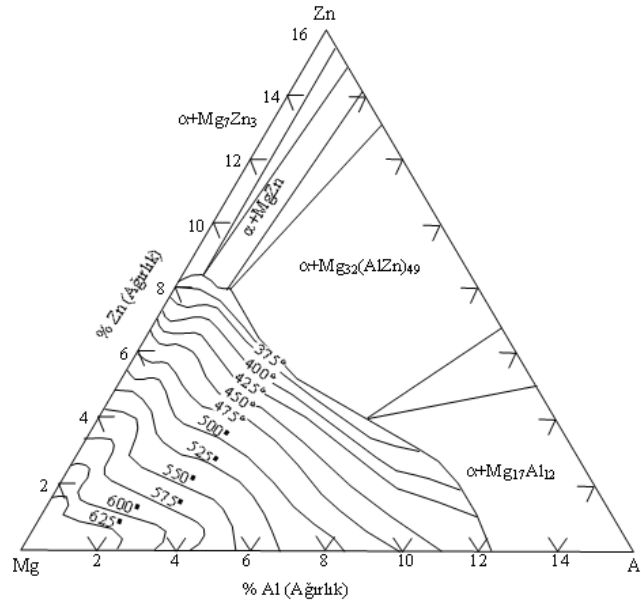
1.5. Mg Alaşımlarının Sınıflandırılması

Magnezyum iki ana türe ayrılarak kullanılmaktadır. Bunlar dövme Mg alaşımları ve döküm Mg alaşımlarıdır (Smith, 2001).

1.5.1. Döküm magnezyum alaşımları

Magnezyum akıcılık, besleyicilik, dayanım ve korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi bakımından Al, Zn, Zr, Th ve RE gibi elementler ile döküm yöntemiyle üretilmektedir (Smith, 2001).

Mg-Al-Zn alaşımları, çeşitli ısıl işlemlere maruz kaldıklarında sertlikleri yükseltilebilen alaşımlardır. Bu alaşım grubunda Zn takviyesi ile dayanım, katı ergiyik mukavemeti ve çökelme sertleşmesi özellikleri geliştirilebilmektedir. Fakat korozyon özellikleri çok iyi olmamaktadır. Döküm yoluyla üretilerek çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Smith, 2001). Ayrıca bu alaşım grubunda $MgZn$, $Mg_{32}(AlZn)_{49}$ ve $Mg_{17}Al_{12}$ temel fazları oluşmaktadır (Şekil 1.16) (Zhang, 2000).



Şekil 1.16. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı (Zhang, vd.,1996; Zhang, 2000).

Mg-Al-Mn alaşımları iyi dökülebilirliğe sahip alaşımlardır. Çökelme sertleşmesi ile dayanımları arttırılabilmektedir (Ding, vd., 2014). Mg-RE-Zr alaşımları, yüksek sıcaklıklarda (260°C) iyi mekanik güce sahiptir (Kima, 2005). Mg-Zn-Zr alaşımları, yüksek akma dayanımı göstermektedir (Huan, vd., 2010; Gu, vd., 2011). Mg-

Th-Zr alaşımları, Mg-RE-Zr alaşımları gibi yüksek sıcaklıklarda (260°C) iyi mekanik dayanıma sahiptirler ve ayrıca sürünme dirençleri yüksek olmaktadır (Leontis, 1952).

1.5.2. Dövmeye magnezyum alaşımları

Dövmeye magnezyum alaşımları, çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere haddelenmiş levha veya folyo, ekstrüzyon şeklinde üretilmektedirler. Bu magnezyum alaşımlarının döküm alaşımlarına göre avantajları üretim maliyetinin daha düşük olması, dayanımının ve sünekliğinin iyi olmasıdır. Bu nedenle döküm yoluyla üretilmiş Mg alaşımlarına göre kullanım alanları daha geniş olmaktadır. Kendi içlerinde, barındırdıkları alaşım elementine göre gruplara ayrılmaktadırlar. Mg-Mn, Mg-Al-Zn, Mg-Zn-(Mn-Cu), Mg-Zn-RE, Mg-Y-RE-Zr, Mg-Th ve Mg-Li-Al. (Dziubinska ve Gontarz, 2015; You, vd., 2017).

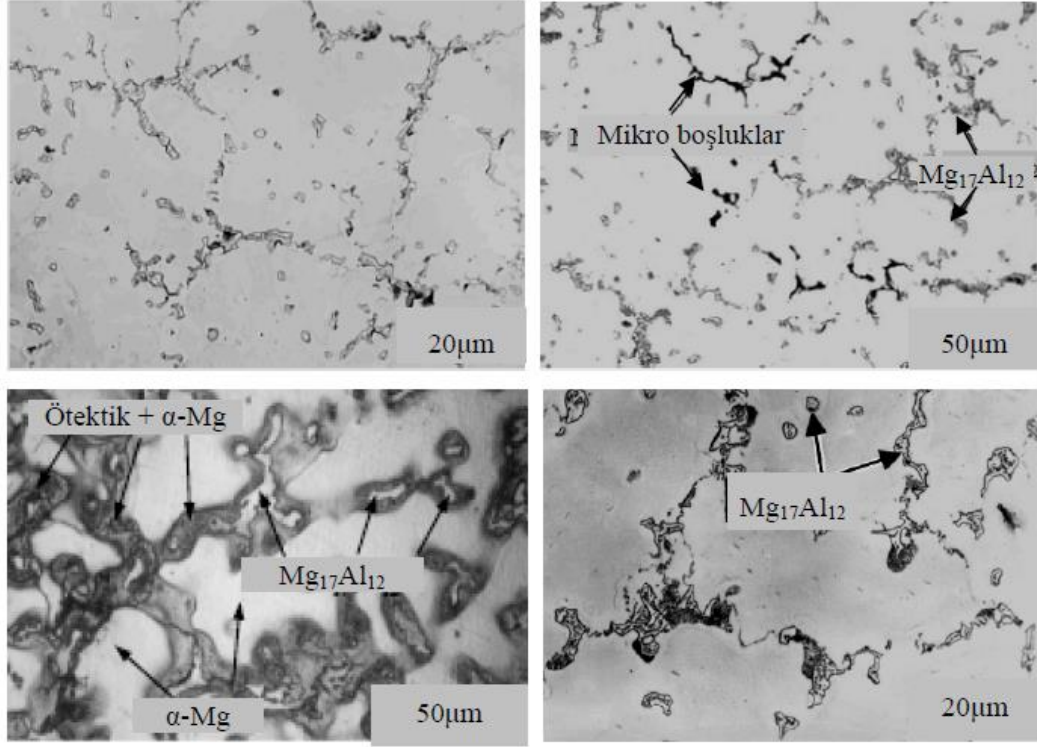
Mg-Mn alaşımları, yüksek korozyon direnci ve yüksek kaynaklanabilirliğinin yanında, düşük mekanik dayanıma sahip alaşımlardır. Mg-Al-Zn alaşımları, çökeltme sertleşmesi ile dayanımları artırılabilir. Sıcak işlenebilirlik kabiliyetleri ve kaynaklanabilirlikleri iyi, mekanik dayanımları orta seviyede olmaktadır. Mg-Zn-Zr-Th alaşımları, yüksek mukavemete sahip alaşımlar olmaktadır. Zr, alaşımda tane inceltici etki yapmaktadır. Zn ise mukavemet artırıcı etkide bulunmaktadır. Fakat bu gruptaki alaşımların düşük kaynaklanabilirlik ve yüksek sıcaklıklarda çalışamama durumu bulunmaktadır (Dziubinska ve Gontarz, 2015; You, vd., 2017).

1.6. Mg-Al-Zn (AZ91) Mg Alaşımı

AZ91 Mg alaşımını bileşiminde %9 oranında Al ve %1 oranında Zn alaşım elementlerini bulundurmaktadır. AZ91, Mg alaşımları içerisinde ticari açıdan en çok tercih edilen alaşım grubu olmaktadır. Bu alaşım grubunun sahip olduğu yüksek dökülebilirlik ve iyi mekanik özellikler tercih edilmesindeki etkenlerin başında gelmektedir. Ayrıca çeşitli elementler ile alaşımlandırılarak korozyon dayanımı da geliştirilmektedir (Trojanova, vd., 2006).

Mg alaşımlarında Al miktarının, Zn miktarının 3 katını geçtiği durumlarda mikroyapıda Mg-Al-Zn üçlü fazı oluşmaktadır. AZ91 alaşımının dengeli katılaşması sonucu yapıda iki farklı faz yapısı bulunmaktadır. Bu fazlardan ilki yaklaşık 600°C'de katı eriyik çekirdeklenmesi sonucu oluşun α (Mg) fazıdır. Yapıdaki çekirdekler katılaşma boyunca sıcaklık düştüğün büyümeye devam etmekte ve 470°C'de katılaşma bitmektedir. Bu sıcaklıkta yapıda ikincil faz olan $Mg_{17}Al_{12}$ (β) fazı oluşmaktadır. $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ayrı

ötektik faz yapısına sahiptir. Şekil 1.17’de AZ91 alaşımının değişik ölçülerdeki mikroyapısı görülmektedir (Wang, vd., 1999; Qudong, vd., 1999; Lin, vd., 2007).



Şekil 1.17. AZ91 alaşımının mikroyapı resimleri (Wang, vd., 1999; Qudong, vd., 1999; Lin, vd., 2007).

1.7. Mg Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

Magnezyum alaşımları genellikle basınçlı ve kum kalıba döküm yöntemleri ile elde edilen malzemelerdir. Bu yöntemlerin yanında dövme, ekstrüzyon, haddeme gibi plastik şekil verme yöntemleri de kullanılmaktadır (Atalay, 2006).

Magnezyum alaşımları özellikle alüminyum ile çok iyi dökülebilirlik göstermektedir. Bu, magnezyum alaşımlarının basınç altında sıcak ve soğuk odalı gibi yüksek basınçlı kalıba döküm işleminin yapılmasına olanak sağlamaktadır. AZ91 alaşımları kullanılarak bu döküm yöntemiyle 1 mm kadar et kalınlığına sahip parçalar üretilebilmektedir. Ancak WE serisi alaşımlarında bu durum söz konusu değildir. Bu seriler daha çok kum kalıba döküm ve kalıcı kalıba döküm işlemlerinde tercih edilmektedir. Magnezyum alaşımlarının üretiminde asıl etmen istenilen özelliktir. Yani sürünme direnci, korozyon direnci veya dökülebilirlik gibi özellikler alaşımın içeriğini belirleyerek üretim yöntemini belirlemektedir (Blawert, vd., 2004).

1.7.1. Basınçlı döküm yöntemi

Mg alaşımları, alaşım elementlerinin sahip oldukları özelliklere göre basınçlı döküm yöntemi ile üretilebilmektedir. Günlük kullanılan ekipmanlardan, otomobil ve uçak parçalarına kadar birçok alanda bu yöntem kullanılabilir. Basınçlı döküm yönteminin seri üretime elverişli olmasından dolayı aynı geometriye sahip parçaların üretimde oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu üretim çeşitinde ergimiş metal, yüksek basınç ile çelik kalıplara enjekte edilerek istenilen şekilde parçalar elde edilmektedir. Çelik kalıpların ergimiş metalin sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa sahip olmasından dolayı da malzemenin soğumasını sağlayarak kalıptan çıkarılırken şeklini korumasına olanak sağlamaktadır (Watarai, 2006; Mert, vd., 2010).

Mg alaşımlarının seri üretim avantajının yanında en büyük dezavantajı, ergimiş Mg'nin oksijenle hızlı bir şekilde tepkimeye girerek alev oluşturmaktır. Gerçekleşen bu ekzotermik tepkimeyi engellemek için çeşitli gazlar (SF_6 , BF_3 , SO_2) kullanılarak, oksijen teması kesilmektedir. Malzeme ergimeye başlamadan (400°C) bu gazlar uygulanmaktadır. İşçi sağlığı ve iş güvenliği açısından da gazlarla temas en düşük seviyede tutulmak zorundadır (Brungs, 1997; Mert, vd., 2010).

Basınçlı döküm, 2 farklı şekilde yapılmaktadır. Birinde sıcak kamaralı sistem kullanılırken diğesinde soğuk kamaralı sistem kullanılmaktadır. Sıcak kamaralı sistem her alaşıma uygulanmasa da soğuk kamaralı sisteme göre, küçük boyutlu parçalar için daha ekonomik bir sistem olmaktadır (Gutman, vd., 1997; Mert, vd., 2010).

1.7.2. Kum kalıba döküm

Kum kalıba döküm yöntemi geçmişten günümüze, yapılış şeklini koruyan geleneksel bir üretim yöntemi olmaktadır. Önceden hazırlanan bir kalıp içerisine ergimiş malzemenin dökülmesi sonucu parçalar elde edilmektedir. Kalıbın hazırlanışı zaman aldığı için hızlı gerçekleştirilen bir üretim yöntemi olmamaktadır. Mg alaşımlarında genellikle ağır, boyutu büyük parçaların imalatında kullanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar, 2012).

Mg içerisine, Al ve Zn katılması sonucunda döküm özelliği geliştirilmiş alaşımlar elde edilebilmektedir. Kum kalıba döküm esnasında çeşitli mikro çekmeler ile karşılaşabildiği için çok dikkatli bir şekilde işlem yapılmaktadır. Bu durumun oluşmasını engellemek için genellikle için Mg-RE-Zn alaşım grubu kullanılmaktadır (Looze, vd., 2005).

1.7.3. Kokil kalıba döküm

Özel kalitedeki çelikten veya dökme demirden imal edilen kalıplar kullanılan ve birden çok döküm işleminin yapılmasına imkan sağlayan bir üretim çeşit olmaktadır. Sistemde birbirine uyumlu iki farklı kalıp bulunmaktadır. İşlem sırasında ergimiş metale herhangi bir kuvvet uygulama işlemi yapılmamaktadır. Yerçekimi etkisi kullanılarak ergimiş metal, kalıba alınmaktadır. Kum kalıp üretim yöntemi ile karşılaştırıldığında yüzey hassasiyeti daha yüksek olmaktadır (Zhang, 2000).

1.8. Mg Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Magnezyum alaşımlarının üretim yöntemlerinde ve içerdiği alaşım elementlerinin miktarlarında farklılıkların olduğu gibi, üretilen malzemelerin sahip oldukları özelliklerde de farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 1.5 ve Çizelge 1.6'da sırasıyla bazı döküm Mg alaşımlarının ve dövük Mg alaşımlarının bileşim oranları ve sahip olduğu çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.5. Döküm magnezyum alaşımlarının sahip olduğu değerler (Smith, 2001).

| Alaşım Adı | Kimyasal Bileşim, Ağ. % | Durum | Çekme Day., MPa | Akma Day., MPa | Uzama, % |
|--|--|--|---|---|---|
| Basınçlı döküm: AM60B AS41A AZ91D | 6.0 Al, 0.13> Mn, 0.1 Si 4.2 Al, 0.35 Mn 9.0 Al, 0.15> Mn, 0.7 Zn, 0.005 Fe en çok, 0.001 Ni en çok | F F F | 220 214 234 | 131 138 158 | 8 6 3 |
| Kum ve kalıcı kalıpta döküm: AM10GA AZ63A AZ81A AZ91E ZK51A ZK61A EZ33A ZE41A ZE63A | 10.0 Al, 0.1>Mn 6.0 Al, 0.15> Mn 7.6 Al, 0.13> Mn, 0.7 Zn 8.7 Al, 0.26 Mn, 0.7 Zn, 0.001 Ni en çok, 0.005 Fe en çok 4.6 Zn, 0.7 Zr 6.0 Zn, 0.8 Zr 2.6 Zn, 0.7 Zr, 3.2 Ne 4.2 Zn, 0.7 Zr, 1.2 Ne 5.7 Zn, 0.7 Zr, 2.5 NE | T6 T6 T4 T6 T5 T6 T5 T5 T6 | 241 234 234 234 234 275 138 200 275 | 117 110 69 110 138 179 96 134 186 | 2 3 7 3 5 5 2 2-5 5 |

Tablodaki kısaltmalar ve anlamları;

F: üretildiği gibi

H24: soğuk işlenmiş ve kısmen tavlanmış, yarı sert

T5: yaşlanma sertleşmesi

T6: çözelti sertleşmesi ve yaşlandırma

T8: çözelti ısıl işlemli

>: en az bulunan miktar

Çizelge 1.6. Dövme magnezyum alaşımlarının sahip olduğu değerler (Smith, 2001).

| Alaşım adı | Kimyasal Bileşimi, Ağ. % | Durum | Çekme Day., MPa | Akma Day., MPa | Uzama, % |
|-------------------------------------|--------------------------|----------|-----------------|-------------------|------------|
| Sac ve levha: AZ31B | 3.0 Al, 0.20 Mn, 1.0 Zn | O H24 | 220 200-287 | 103-124 96-200 | 2-9 6-8 |
| <i>Çubuk ve profiller:</i> ZA31B | 3.0 Al, 0.2 Mn, 1.0 Zn | F | 213-241 | 110-152 | 4-8 |
| AZ61A | 6.5 Al, 0.2 Mn, 1.0 Zn | F | 220-276 | 110-165 | 7-9 |
| AZ91D | 8.5 Al, 0.15 Mn, 0.5 Zn | F | 280-296 | 186-193 | 4-9 |
| ZK30A | 2.8 Zn, 0.4 Zr | F | 276-303 | 193-227 | 8 |
| ZK60A | 5.5 Zn, 0.4 Zr | T5 | 296-317 | 213-262 | 4-6 |
| ZM21A | 1.0 Mn, 2.0 Zn | F | 207-241 | 152-158 | 8-20 |

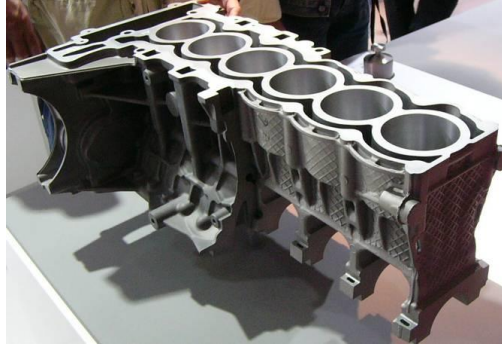
Çizelge 1.5 ve 1.6’da malzemelerin sahip olduğu genel çekme, akma ve uzama değerleri bulunmaktadır. Bu alaşım elementlerinin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmaktadır.

1.7. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha ekonomik, insan sağlığına ve çevreye daha az zararlı makine ve araçlar tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tarz ekipmanların da üretiminde ihtiyaçlara cevap veren malzemeler aranmaktadır. Magnezyum sahip olduğu avantajlar sayesinde Dünya’da bu tarz işlemlerde kullanılabilir malzemelerin başında gelmektedir. Otomotiv, havacılık, uzay ve biyomedikal alanlarında oldukça fazla tercih edilmekte ve sürekli geliştirilmektedir. Magnezyumun sahip olduğu en önemli özellik diğer metallerden daha hafif olmasıdır (Mordike ve Ebert, 2001).

Metal malzemeler içinde kullanım açısından ilk sıralarda bulunan çelik ve alüminyuma oranla magnezyum alaşımları, döküm parçaların üretilmesinde daha verimli sonuçlar vermektedir. Özellikle yoğunluğunun düşük olması, otomobil ve havacılık sektörlerinde çeşitli parçalarda kullanılarak, yakıt tasarrufu sağlayan etkenlerden biri olması sebebiyle tercih edilmektedir (Aghion, vd., 2001; Kiani, vd., 2014)

Günümüzde Al ve dökme demirden üretilen motor bloklarının yanında, BMW firması, Mg-Al-Sr kompozit motor bloğunu geliştirmiştir (Şekil 1.18). Bu projede Mg'nin sahip olduğu düşük yoğunluktan faydalanarak yakıt sarfiyatında azalma amaçlanmaktadır. Ayrıca Mg-Sr-Al alaşımının bu çeşit bir uygulamada kullanılması ile Mg alaşımlarının da yüksek sıcaklıklarda çalışma mecburiyeti bulunan parçalarda kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır (Andreas, vd., 2005).



Şekil 1.18. Mg-Al-Si kullanılarak üretilen motor bloğu (Andreas, vd., 2005).

Mg alaşımlarının, gelecekte taşıtlarda kullanılması konusunda sürekli araştırmalar yürütülmektedir. Çizelge 1.7'de Mg alaşımlarının, otomobilin farklı bölümlerinde kullanılması sonucu parçaların ağırlıklarında meydana gelen değişimler karşılaştırılmıştır. Çizelge 1.7'de de görüldüğü gibi Mg alaşımlarının kullanıldığı her birimde ağırlıktan kazanç sağlanmaktadır. Bu kayıplar sayesinde araçların hareketi için gerekli olan itme kuvvetine harcanan enerji de dolaylı olarak azalmaktadır (Aghion, vd., 2001; Kandemir ve Can, 2003).

Çizelge 1.7. Çelik, Al ve Mg alaşımlarının karşılaştırılması (Aghion, vd., 2001).

| | Motor Bloğu | | Dişli Kutusu + Debriyaj | Karter | Dört Tekerlek (jant) | | Motor Kızağı | |
|------------------------|-------------|------------|-------------------------|--------|----------------------|------------|--------------|------------|
| | Dökme Demir | Al Alaşımı | | | Çelik | Al Alaşımı | Çelik | Al Alaşımı |
| Geleneksel çözüm (kg) | 32 | 23.5 | 21.5 + 5 | 3 | 36 | 23 | 25 | 17.5 |
| Magnezyum alaşımı (kg) | 19 | 19 | 15 + 3 | 2 | 18 | 18 | 15 | 15 |
| Azalan ağırlık (kg) | 13 | 4.5 | 6.5 | 1 | 18 | 5 | 10 | 2.5 |
| Azalma (%) | 40 | 19 | 30 | 33 | 50 | 22.5 | 40 | 30 |

Mg alaşımları içerisinde AZ serisi alaşımlar sahip oldukları iyi dökülebilirlik ve iyi akma dayanımları sayesinde en çok tercih edilen alaşım grubu olmaktadır. Ayrıca canlı dokular ile biyo malzeme olarak oldukça uyumlu olması tercih edilmesinde önemli bir parametre olmaktadır. Şekil 1.19'da çeşitli uygulama örneklerinin bulunduğu AZ serisi alaşımlar her türlü uygulamada kullanılabilme potansiyeline sahip malzemeler olmaktadır (Peuster, 2006; Dobrzański, vd., 2007; Zhang, vd., 2012; Agarwal, vd., 2016).



Şekil 1.19. AZ serisi alaşımlar kullanılarak üretilen yapılar (Peuster, 2006; Dobrzański, vd., 2007).

Mg alaşımları dūřuk yoğunlukları ve dayanımları sayesinde havacılık ve savunma sanayi sektörllerinde de kullanılmaktadır. Silah gövdelerinde, uzun mesafeli balistik füzelerde ve bazı uçakların gövdelerinde karşımıza çıkmaktadır. Őekil 1.20’de Al alaşımına Mg ilave edilmesi ile üretilmiş bir silah gövdesi bulunmaktadır. Bu çalışmada Mg alaşımı kullanılarak gövdenin ağırlığı azaltılıp kullanım kolaylığı amaçlanmaktadır (Toptař, 2014). Ayrıca uçaklarda, uçağın iskelet ağırlığını azaltmak için çeşitli çalışmalarda yapılmaktadır. Bu amaçla, 1940 yılında tamamına yakını Mg alaşımlarından imal edilmiş bir uçak olan Northrop XP-56 bulunmaktadır (Őekil 1.21) (Vanlı, 2013).



Şekil 1.20. Silah gövdesi (Toptaş, 2014).



Şekil 1.21 Northrop XP-56 (Vanlı, 2013).

Kara araçlarında da magnezyum kullanımını giderek artmaktadır. Şekil 1.22’de görölen Husky M-116: Taşıyıcı, kargo, çıkarma aracında, zemin kaplama malzemesi olarak 28 kg. Mg alaşımı kullanılmıştır (Maupin, 2010).



Şekil 1.22. Husky M-116 aracı (Maupin, 2010).

Savunma sanayisinde uzak mesafelere atılmak üzere üretilen balistik füzelerde de füze ağırlığını azaltmak ve mesafeyi arttırmak amacıyla Mg alaşımları tercih edilmeye başlanmıştır. Şekil 1.23'de havadan havaya atılabilme özelliğine sahip ilk füze olan Falcon Gar-1 balistik füzesi bulunmaktadır. Bu füzenin %90'a yakını Mg alaşımları kullanılarak üretilmiştir (Maupin, 2010).



Şekil 1.23. Falcon Gar-1 (Maupin, 2010).

Mg alaşımlarının tercih edilmesindeki nedenlerden biri de biyomalzeme olarak canlı dokular ile uyumlu olmasıdır. Medikal araçlarda, implant uygulamalarında, pin ve vida görevi görececek şekilde kullanım örnekleri bulunmaktadır (Mochizuki ve Kaneda, 2015; Agarwal, vd., 2016). Mg dışında bu tarz uygulamalarda paslanmaz çelik, Ti ve Ti alaşımları, CoCr alaşımları da kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin canlı dokularla olan uyumu istenilen seviyede olmamaktadır. Daha önemlisi bu malzemeler vücut içerisinde çözünme özelliği göstermedikleri için cerrahi müdahale sonucu vücuttan alınması gerekmektedir (Li, vd., 2016). Ancak Mg alaşımları bu tarz uygulamalarda vücut sıvısı içerisinde Mg^{2+} iyonu şeklinde çözünebilmekte ve zamanla kaybolmaktadır. Ayrıca Mg^{2+} iyonları insan vücudu için gerekli bir mineral de olmaktadır. Diğer bir deyişle Mg metalinin çözünmesi insan vücudunda zehirsiz bir etki yapmaktadır (Herring,

vd., 1960; Wolf ve Cittadini, 2003). Ayrıca yetişkinler için günlük 300-400 mg. Mg^{2+} alınması önerilmektedir ve bunun fazlasının idrar yoluyla vücut dışına atıldığı bilinmektedir (Saris, vd., 2000). Şekil 1.24'de insan ayak baş parmağında meydana gelen hasar sonucu, Ti ve Mg vidaların uygulama örneği görülmektedir. 6 aylık süre sonunda, iki malzemenin de etkili sonuçlar yaptığı ancak Mg civatanın vücut içerisinde çözündüğü görülmektedir (Windhagen, vd., 2013).



Şekil 1.24. İnsan sol ve sağ ayak baş parmağında kullanılan Ti ve Mg civatalar (Windhagen, vd., 2013).

2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KOROZYON

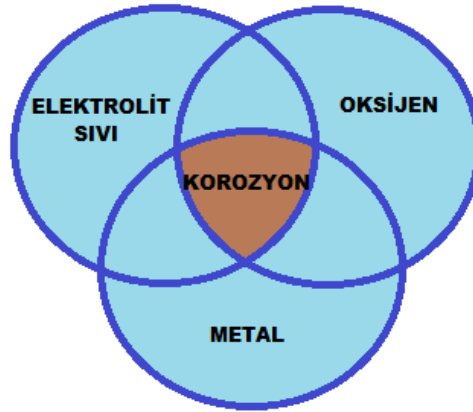
2.1. Korozyon

Korozyon, temas halindeki malzemelerin birbirleriyle veya buldukları ortam ile reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen, malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişikliklere neden olan bir olaydır. Korozyon, reaksiyonun gerçekleşme ortamına göre ikiye ayrılır. Bunlar kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyondur. Kimyasal korozyon, gaz ortamında, elektrokimyasal korozyon ise sulu ortam içerisinde gerçekleşen korozyon çeşiti olmaktadır. Sistemde bulunan stresler, ortamın pH değeri, kimyasal koşullar ve kullanılan malzemenin özellikleri korozyon oluşumunda önemli parametrelerdir (Doruk, 1982).

Korozyonun oluşum şekliyle beraber metal malzemeler üzerinde neden olduğu birçok zararı bulunmaktadır. Malzemelerde gerçekleşen bozunma sonucu, parça boyutlarında meydana gelen azalmayla kırılmalara, çeşitli depo veya iletim borularında meydana gelmesi sonucu, depo içerisinde bulunan malzemelerin dış ortamla temas etmesine, makine parçalarında meydana gelmesi sonucu işlemlerin durmasına hatta ölümcül kazalara neden olabilmektedir. Ayrıca bu tür nedenlerle ekonomik açıdan da insanları zarara sokmaktadır. Makinelere sürekli bakım yapılması, korozyona uğrayan parçalar ile yeni parçaların değiştirilmesi ekonomik zararlara neden olmaktadır. Bu gibi sorunlar ile karşılaşmamak için en uygun malzemeyi bulmak amacıyla yürütülen araştırmalarla, malzemeler farklı elementlerle alaşımlandırılmakta ve korozyon engellenmeye çalışılmaktadır (Nüumberger, vd, 1995; Zhang, 1996; Kaesche, 2003; Kreysa ve Schütze, 2004; Roberge, 2012).

2.2. Kimyasal Açıdan Korozyon

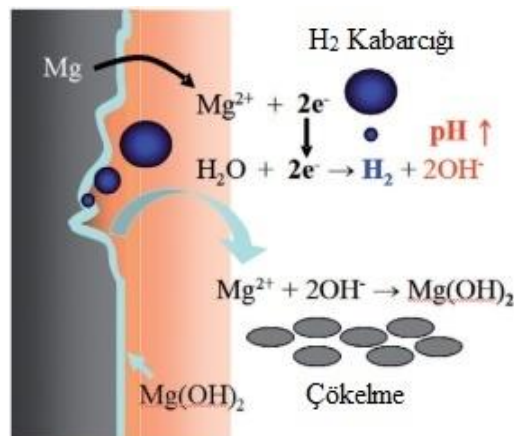
Bilinen yapı metalleri doğada bileşik halde bulunmaktadır. Bu nedenle metaller sürekli kararlı yapı oluşturma eğilimi göstermektedirler ve fazla enerjilerini boşaltarak tekrar bileşik haline dönmeye çalışmaktadırlar. Bu ortamın oluşması için de elektrolit sıvı, oksijen ve metal malzeme olması yeterli olmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Temel korozyon mekanizması.

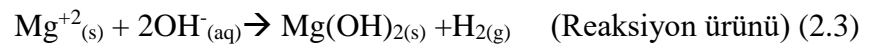
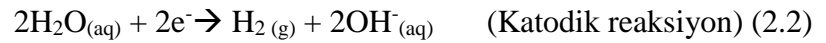
Korozyon, metal malzemelerde bozunma ve elektron kaybı ile gerçekleşmektedir. Korozyon sistemlerinde, temel olarak bu elektron hareketlerinin gerçekleştiği anot, katot ve elektrolit sıvısı bulunmaktadır. Elektron kaybının gerçekleştiği metal parça anot olarak adlandırılmaktadır. Anotta elektron kaybı olduğu için yükseltgenme reaksiyonu gerçekleşmektedir. Sistemde elektron alan parça da katot olarak adlandırılmaktadır ve burada da indirgenme reaksiyonu gerçekleştirilmektedir (Nümerger, vd, 1995; Zhang, 1996; Kaesche, 2003; Kreysa ve Schütze, 2004; Roberge, 2012).

Mg aktif metal olduğu için elektron verme eğilimi gösterip kararlı yapıya dönmeye çalışmaktadır.



Şekil 2.2. Sulu ortam içerisinde Mg çözünmesi (Yun, vd., 2009).

Şekil 2.2’de Mg’un korozyon oluşum mekanizmasının nasıl gerçekleştiği gösterilmektedir. Mg, ortamda su ile etkileşime girerek Mg^{+2} iyonu olarak çözünmektedir (2.1), (2.2). Tepkime sırasında H_2O elektron kaybederek H_2 kabarcıklarının ve OH^- iyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca OH^- iyon miktarının artması, ortamın pH değerinin yükselmesine neden olmaktadır. Ortamdaki Mg^{+2} ve OH^- iyonlarının reaksiyona girmesi sonucu $Mg(OH)_2$ çökeltileri oluşmaktadır (2.3) (Yun, vd., 2009).



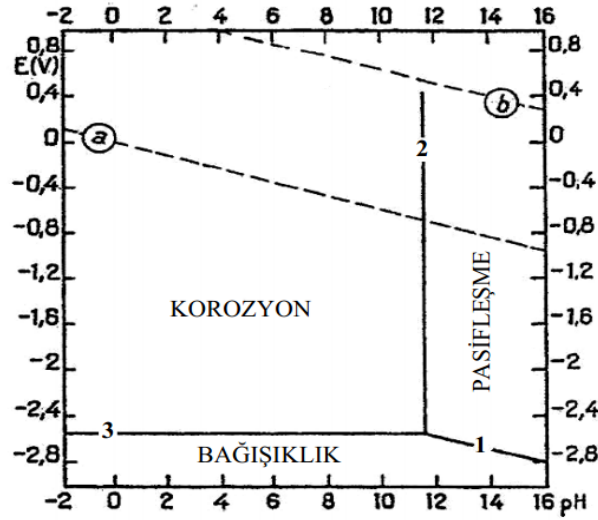
Metaller, farklı oranlarda korozyon eğilimi göstermektedirler. Bu farklılıkların belirlenmesinde (korozyon eğilimlerinin hesaplanmasında) standart elektrot potansiyeli denilen veriler kullanılmaktadır. Ancak elektron potansiyelleri mutlak değerler olmayıp, potansiyeli sıfır (ya da sıfırdan farklı belirli bir değer) kabul edilen bir referanstan yararlanılmaktadır. Uluslararası kabul edilen bu değer hidrojen reaksiyonu olmaktadır (2.4). Bu reaksiyon referans alınarak diğer elementlerin sahip oldukları standart elektrot potansiyelleri ile elektrokimyasal gerilim dizisi tablosu oluşturulmaktadır (Çizelge 2.1) (Doruk, 1982).



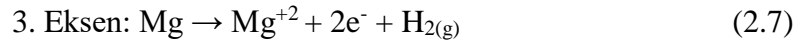
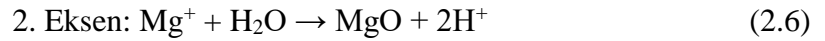
Çizelge 2.1. Elektrokimyasal gerilim dizisi (Doruk, 1982).

| Metal İyonları | Standart Elektrot Potansiyeli (Volt) |
|----------------------|--------------------------------------|
| Li ⁺ | -3.05 |
| K ⁺ | -2.93 |
| Ca ²⁺ | -2.87 |
| Na ⁺ | -2.71 |
| Mg ²⁺ | -2.37 |
| Al ³⁺ | -1.66 |
| Zn ²⁺ | -0.763 |
| Cr ³⁺ | -0.74 |
| Fe ²⁺ | -0.440 |
| Ti ⁺ | -0.336 |
| Ni ²⁺ | -0.250 |
| Sn ²⁺ | -0.136 |
| Pb ²⁺ | -0.126 |
| H⁺ | 0.000 |
| Cu ²⁺ | 0.337 |
| Ag ⁺ | 0.800 |
| Pt ²⁺ | 1.2 |
| Au ³⁺ | 1.5 |

Metal malzemelerin içerisinde buldukları ortamın sahip olduğu pH değeri de malzemede meydana gelen korozyon mekanizmalarını etkilemektedir. Bu sebeple kullanılan Potansiyel-pH diyagramları oluşturulmuştur. Bazı metal malzemeler sulu çözelti içerisinde çözünebilme özelliğini sahip olması nedeniyle korozyon olayının yavaşlaması veya durması beklenmemektedir. Ancak benzer ortamlar içerisinde çözünebilme özelliğine sahip olmayan metal malzemelerde az miktarda meydana gelen korozyon ürünleri, metal yüzeyini örterek koruyucu bir bariyer etkisi yapmaktadır. Bu duruma “pasifleşme” adı verilmektedir. Ayrıca metalik durumun korunabildiği bölgeye de “bağışıklık” ismi verilmektedir. Bağışıklık bölgesi içerisinde korozyon olayı meydana gelmemektedir. Malzemenin potansiyel değerleri bu bölgeye kaydırılarak korozyon olayından korunabilmektedir. Şekil 2.3’de Mg(OH)₂ yapısının termodinamik kararlılığa sahip olduğu bölgeler gösterilmektedir. 1, 2 ve 3 nolu eksenlerde meydana gelen reaksiyonlar sırasıyla (2.5), (2.6) ve (2.7) olmaktadır (Song ve Atrens, 1999).



Şekil 2.3. Mg(OH)₂ potansiyel-pH diyagramı (Song ve Atrens, 1999).



2.3. Korozyon Hızının Belirlenmesi

Metal malzemelerin korozyon eğilimlerinin belirlenmesinde temelde elektromotor kuvvet serisindeki yerlerine bakılmaktadır. Farklı metal malzemeler birbirleriyle beraber kullanıldıklarında ya da hidrojen ile tepkimeye girdiklerinde bu serideki bulunma yerlerine göre anodik veya katodik reaksiyonlar meydana getirmektedirler.

Metal malzemelerinin korozyon hızı, birim zamandaki çözünme miktarı olarak adlandırılmaktadır. Gerçekleştirilen ilk korozyon çalışmalarında, kütle kaybına göre korozyon hızları hesaplanmaktaydı. Ancak bu yöntemde uzun sürelerde sonuç elde edilmesi nedeniyle yeni yöntemler de geliştirilmiştir. Elektrokimyasal tekniklerin geliştirilmesi ile metallerin korozyon hızının belirlenmesinde polarizasyon eğrileri kullanılmaya başlanmıştır. Polarizasyon eğrileri ile kısa sürede etkili sonuçlar elde edilebilmektedir. Metal malzemelerin polarizasyon eğrilerinin çizilmesinde potansiyostatik ve galvanostatik yöntem olarak adlandırılan iki farklı yöntem kullanılmaktadır (Doruk, 1982).

2.3.1. Potansiyostatik yöntem

Bu yöntemde elektrot, bir potansiyotat ile beraber, sabit bir potansiyel değerinde bir süre tutulmaktadır ve bu potansiyele denk gelen akım değeri ölçülmektedir. Potansiyelde hafif değişiklikler yapılarak gerçekleştirilen ölçüm yöntemi de potansiyodinamik yöntem olarak adlandırılmaktadır.

2.3.2. Galvanostatik yöntem

Galvanostatik yöntem, elektroda hem anodik hem de katodik yönde uygulanan sabit akım altında elektrodun potansiyelinin ölçülmesi işlemidir. İşlem sırasında meydana gelen gerilimler grafiğe geçirilmektedir. Bu yöntem kullanılan elektrot sayısına göre 3'lü ve 2'li olarak iki çeşit olmaktadır. 3 elektrotlu yöntemde bir çalışma elektrotu, bir yardımcı elektrot ve bir referans elektrot bulunmaktadır. İncelenecek olan elektrota, yardımcı elektrot vasıtasıyla hem anodik yönde hem de katodik yönde sabit bir dış akım, belirli bir süre uygulanarak, referans elektrota karşılık elektrot potansiyeli ölçülmektedir. Değiştirilebilir bir reosta ile kullanılan akım yoğunluğu değiştirilerek elektrot potansiyeli tekrar ölçülmektedir. İkili elektrot kullanılan yöntemde ise referans elektrotu kullanılmaz, onun yerine eş iki çalışma elektrotu kullanılmaktadır.

Elde edilen polarizasyon eğrileri kimyasal ve elektrokimyasal yöntem olarak iki farklı şekilde korozyon hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler.

| Kimyasal Yöntemler | Elektrokimyasal Yöntemler |
|--------------------|---------------------------|
| Kütle Kaybı | Tafel Ekstrapolasyon |
| | Lineer Polarizasyon |

2.3.3. Kimyasal yöntemler

2.3.3.1. Kütle kaybı

Malzemede meydana gelen kütle kaybına bağlı olarak korozyon hızının hesaplandığı bir yöntem olmaktadır. Denklem (2.8)'deki gibi hesaplama yapılmaktadır. ΔW : Kütle kaybı (mg), A: Yüzey alanı (cm²) ve T: zaman (saat) olmaktadır.

$$\text{Korozyon Hızı: } \frac{\Delta W}{A \cdot T} \quad (2.8)$$

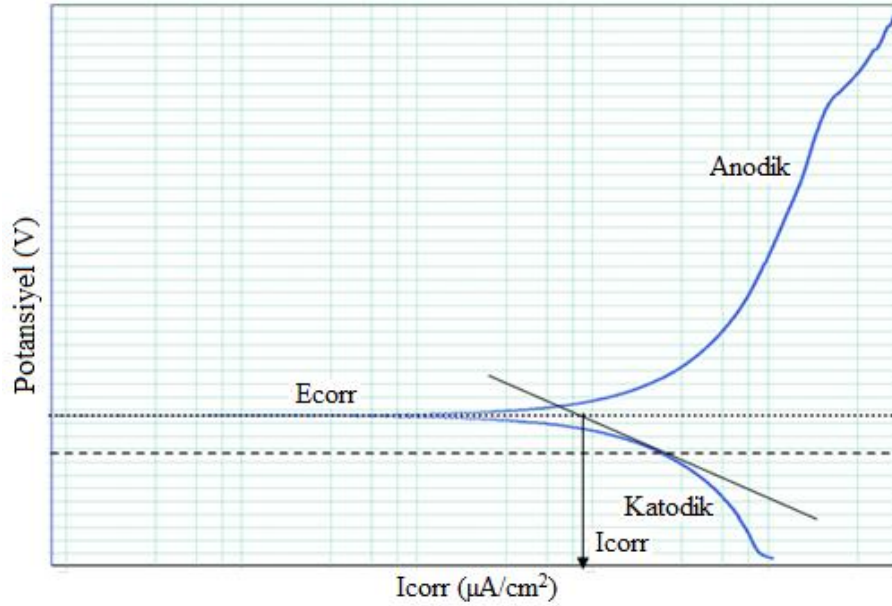
2.3.4. Elektrokimyasal yöntemler

2.3.4.1. Tafel ekstrapolasyon yöntemi

Korozyon potansiyelinin net bir akım değeri bulunmaktadır. Ancak toplam anodik akım değeri ile toplam katodik akım birbirine eşit olduğundan bu akım değeri okunamamaktadır. Bu akım değeri korozyon akımı ($I_{kor}(\mu A/cm^2)$) olarak adlandırılmaktadır. Metalin korozyon hızının belirlenmesinde ise, korozyon akımıyla elektrot yüzey alanının birbirine bölünmesi yoluyla bulunmaktadır.

Korozyon akımının, elektrot yüzey alanına bölünmesiyle de elde edilen akım yoğunluğu ($I_{kor}(\mu A/cm^2)$), metalin korozyon hızını vermektedir (Altun, 2004).

Korozyon potansiyelinden başlayarak anodik veya katodik yönde çizilen yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri tafel eğrileri olarak bilinir ve tafel eğrilerinin çizgisel kısımları geriye doğru ekstrapole edildiğinde korozyon potansiyelinde kesişirler ve kesişen noktadaki potansiyel korozyon potansiyeli (E_{kor}), buna karşılık gelen akım ise korozyon akım yoğunluğudur (I_{kor}) (Şekil 2.4) (Doruk,1982).



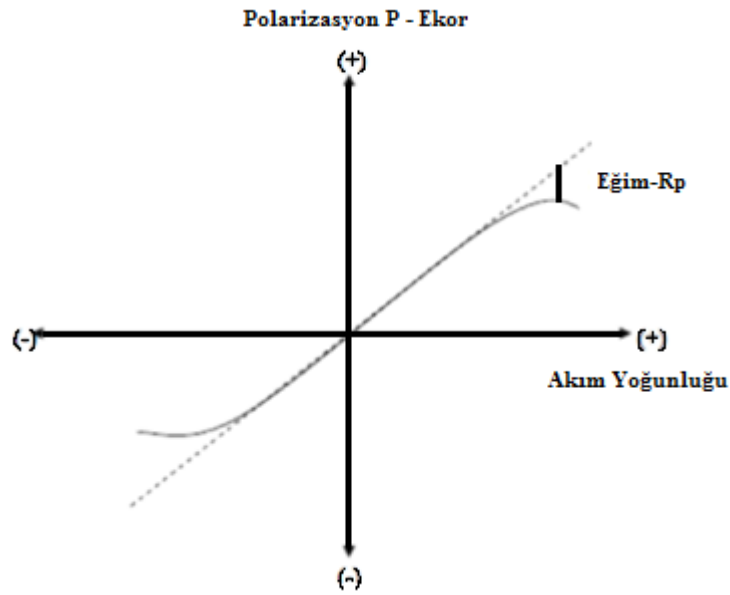
Şekil 2.4. Korozyon akım yoğunluğunun (I_{kor}) ve korozyon potansiyeli (E_{kor}) (Badea vd. 2010).

2.3.4.2. Lineer polarizasyon yöntemi

Polarizasyon eğrileri korozyon potansiyelinin ± 10 mV civarında uygulanan dış akım yoğunluğu ve aşırı gerilim arasında lineer bir değişim göstermektedir. Polarizasyon

eğrilerinin korozyon potansiyeli yakınındaki lineer bölgedeki eğimine polarizasyon direnci (R_p) denilmektedir. Deneysel olarak elde edilen bu direnç korozyon hızının hesaplanmasında kullanılabilir. Stern-Geary tarafından geliştirilen denklem (2.9) kullanılarak korozyon akımı ve korozyon hızı belirlenmektedir. β_a , anot tafel katsayısı, β_k , katot tafel katsayısı, i_{kor} , korozyon akım yoğunluğunu ifade etmektedir (Üneri, 1998).

$$i_{kor} = \frac{\beta_a \cdot \beta_k}{2,303 \cdot (\beta_a + \beta_k)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (2.9)$$



Şekil 2.5. Lineer polarizasyon yöntemi ile polarizasyon direnci bulunması (Üneri, 1998).

2.4. Mg Alaşımlarında Meydana Gelen Korozyon Türleri

Magnezyum, doğal yapısıyla pasif bir metal olmasına rağmen maruz kaldığı ortama bağlı olarak, korozyon her zaman kullanımını kısıtlayan bir etken olmaktadır. Mg alaşımlarında korozyon, çoğunlukla klorür (Cl^-) içeren %3.5 NaCl çözeltilerinde çalışılmaktadır. Tuzluluk oranının %3.5 olmasının nedeni, günlük hayatta karşılaşılan korozyon olaylarının bu ortam özelliklerine sahip deniz gibi tuzlu suların etrafında bulunmasından kaynaklanmaktadır (ASM Handbook, 1987; Song ve Atrens, 1999).

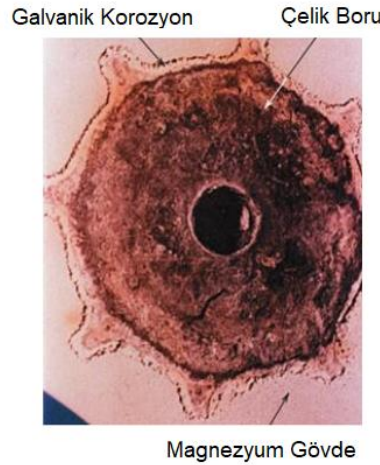
Son yıllarda Mg alaşımlarındaki korozyon ve korozyon oluşum mekanizmaları konularında çalışma yapan araştırmacılar tarafından yapılan derleme makaleleri özetlenmiştir (Maker ve Kruger, 1993; Song ve Atrens 2003; Zeng, vd., 2006; Guo, vd., 2010; Atrens, vd., 2011; Atrens, vd., 2013; Gusieva vd., 2015; Esmaily, vd., 2017). Bu

çalışmalarda, Mg ve alaşımlarının korozyon direncinin zayıf olmasının nedeni iki sebep ile açıklanabilmektedir; metal yüzeyinde oluşan oksit filmin tam olarak koruma sağlayamaması ve özellikle Fe, Cu ve Ni ile alaşımlandığındaki safsızlıklar, $Mg_{17}Al_{12}$ (Song ve Atrens, 1999; 2003; Maker ve Kruger, 1993; Song, vd., 2005), Mg_2Pb (Song ve Atrens, 2003), $AlMn$ (Zeng, vd., 2005), Al_8Mn_5 (Eliezer, vd., 2003), $Mg_{12}Nd$ (Guo, vd., 2005) gibi ikincil fazlarının yapıda bulunması ile galvanik veya bimetallik korozyonun oluşmasına dayandırılmıştır.

Mg ve alaşımlarında, kullanıldığı farklı metal malzeme ile olan ilişkisi, bulunduğu atmosferin kirlilik durumu ya da ortamın tuzluluk miktarı sebebiyle farklı korozyon türleri görülmektedir.

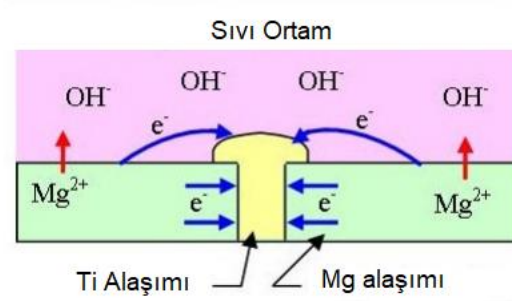
2.4.1. Galvanik korozyon

Galvanik korozyon, elektrolit bir çözelti içerisinde, birbirleri ile temas halinde bulunan farklı metal malzemelerde ya da alaşımlarda meydana gelen korozyondur. Galvanik korozyon, metal malzemelerin aktifliklerinin farklı olmasından kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır. Eşleşmelerde katot davranış sergileyen metal malzemeler korozyondan korunan malzeme olmaktadır. Galvanik korozyona örnek olarak Şekil 2.6'da bir teknede kullanılan su boşaltma pompası giriş borusunda meydana gelen galvanik eşleşme ve korozyon olayı görülmektedir (Callister ve Rethwisch, 2015).



Şekil 2.6. Galvanik korozyona uğramış makine parçası (Callister ve Rethwisch, 2015).

Şekil 2.7’de beraber kullanılan Mg ve Ti malzemelerin aktifliklerinin farklı olmasından kaynaklı olarak galvanik korozyon meydana gelmektedir (Poinern, vd., 2012).



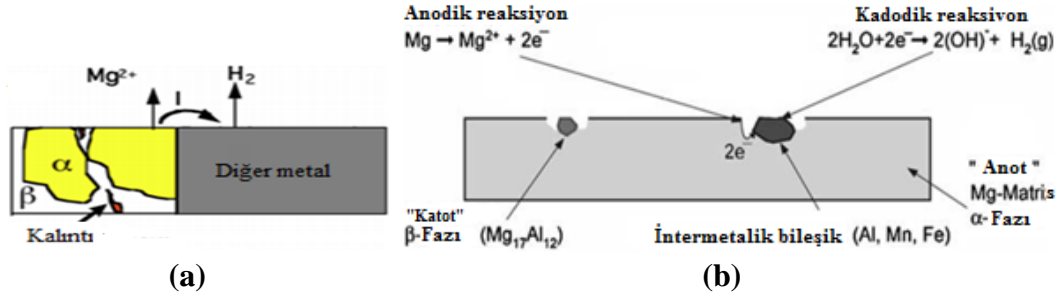
Şekil 2.7. Mg-Ti metallerinin galvanik eşleşme durumu (Poinern, vd., 2012).

Mg, alaşım elementleri ile karşılaştırıldığında daha fazla aktif davranış sergilemektedir ve galvanik çiftte anot özellik göstermektedir. Mühendislikte kullanılan bazı metal malzemelerin korozyon potansiyelleri (E_{kor}) Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Mühendislik malzemelerinin E_{kor} değerleri (Song ve Atrens, 1999, 2003).

| Metal | V_{SCE} (V) |
|------------------------|------------------|
| Mg | -1.75 |
| Mg-alaşimleri | -1.67 |
| Zn | -1.05 |
| Al (%99.99) | -0.85 |
| Dökme demir | -0.73 |
| Paslanmaz çelik, aktif | -0.43 |
| Cu | -0.22 |
| Ni | -0.14 |

Galvanik korozyon, oluşum yerine göre makro ve mikro galvanik korozyon olarak iki farklı şekilde değerlendirilmektedir. Şekil 2.8a’da makro, b’de mikro galvanik korozyon gösterilmiştir (Song ve Atrens, 1999, 2003).

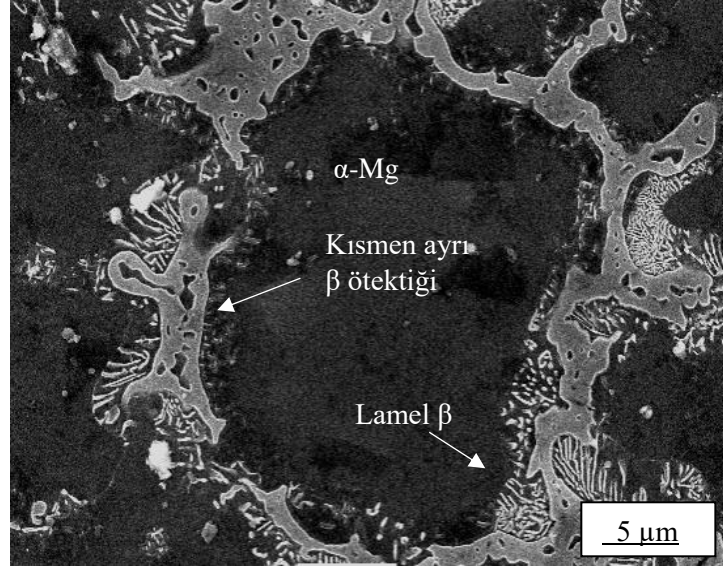


Şekil 2.8. Mg-Al alaşımlarının bazı fazları arasında tipik galvanik korozyonun şematik gösterimi (a) makro, (b) mikro galvanik korozyon.

Mg alaşımlarının korozyon özelliklerini incelerken dikkat edilmesi gereken konulardan biri de yapıdaki ikincil fazların varlığıdır. Çünkü Mg metali diğer alaşım elementleri ile alaşımlandırıldıktan sonra yapıda ikincil fazlar oluşmaya başlamakta bu da korozyon oluşumunu tetiklemektedir. Örneğin; yüksek Al konsantrasyonuna sahip AZ91 Mg alaşımlarında tane sınırları etrafında belirgin bir şekilde Mg₁₇Al₁₂ (β fazı) yapısı oluşmaktadır (Şekil 2.9). Yapıdaki bu Mg₁₇Al₁₂ fazı matris yapısına göre katodik etki göstermektedir. Bu da mikro galvanik korozyonun oluşmasına neden olabilmektedir. Mg ve ikincil Mg fazlarının korozyon potansiyeli değerleri Çizelge 2.4'de verilmiştir (Zeng, vd., 2006).

Çizelge 2.4. Mg ve ikincil Mg fazlarının korozyon potansiyeli değerleri (ASTM D1384) (Lunder, vd., 1993).

| Metal | V _{SCE} (V) |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Mg | -1.55 |
| α3Al | -1.49 |
| α5Al | -1.45 |
| α9Al | -1.40 |
| α5Al10.5Zn | -1.43 |
| (β) Mg ₁₇ Al ₁₂ | -1.31 |
| β-1Zn | -1.24 |
| MnAl | -1.28 |



Şekil 2.9. AZ91 alaşımının mikro yapısı (Candan ve Candan, 2018).

Galvanik korozyon oluşumlarından kaçınmak için korozyon potansiyel değerleri birbirine yakın elementlerin kullanılmasının yanında, boyutsal farklılıklara da dikkat edilmelidir. Bu sebeple tasarım yaparken anot yüzeyin mümkün olduğunca büyük parçanın olmasına ve katot yüzeyin küçük parça olmasına önem verilmelidir.

2.4.2. Çukurcuk korozyon

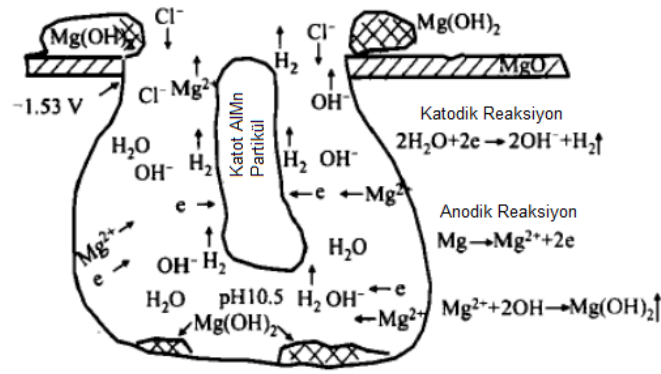
Çukurcuk korozyon, çok küçük boyuttaki oyuklarda ve deliklerde meydana gelen korozyon çeşiti olmaktadır. Korozyon mekanizmasının gelişmesi yüzeyden oyuk içerisine doğru ilerleme şeklinde gerçekleşmektedir. Genellikle yüzeyin altından ilerleme şeklinde gelişme gösterdiği için yüzeyde sadece küçük delikler olarak gözükmekte ve malzemede hasar oluşana kadar anlaşılammamaktadır (Callister ve Rethwisch, 2015). Korozyonun meydana geldiği çukurların çapı, sıklığı ve derinliği, ortamın özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Şekil 2.10'da Mg'den üretilmiş bir boru parçasında meydana gelen çukurcuk korozyon gösterilmiştir.



Şekli 2.10. Magnezyum boruda meydana gelen çukurcuk korozyonu (ASM Handbook, 1987).

Mg, pasif bir metal olmasına rağmen, Cl^- iyonlarının varlığı çukurcuk korozyonun oluşmasına neden olabilmektedir (Song ve Atrens, 1999). Bu, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ve AlMn ikincil faz yapılarına bitişik bir şekilde korozyon çukurlarının oluşması ve bunun sonucunda pasifliğinin bozulmasına neden olmaktadır (Song ve Atrens, 1999; Zeng, vd., 2005). Yapıdaki ikincil faz partiküllerinin (AlMn , AlMnFe , $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, Mg_2Cu), Mg matrisi ile bir elektrolitik hücre mekanizması oluşturması ile daha aktif olan Mg anot davranış sergilemekte ve korozyon olayı gerçekleşmektedir. Örneğin yapılan bir çalışmada, ekstrüde edilmiş bir Mg alaşımı %3.5 NaCl çözeltisi içerisine daldırılmış ve korozyon partiküllerinin AlMn ikincil faz partikülleri etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir (Zeng, vd., 2005).

Mg yüzeyinde çukur büyümesinin elektrokimyasal mekanizması görülmektedir (Şekil 2.11). İlk olarak atmosfer ortamında Mg yüzeyinde pasifliği sağlayan MgO oksit filmi oluşur. Mg, NaCl sulu çözeltisine daldırıldığında pasif tabakadaki Cl^- iyonları film tabakasını zayıflatır ve oksit filminin kırılması sonucu çözünmeye başlar ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oluşumu ve H_2 açığa çıkar. Çukur içerisinde çok hızlı bir şekilde korozyon oluşurken yakın bölgelerde de oksijen indirgenmesi meydana gelir. Sonunda, korozyon ilerlemesi bir yarı küresel korozyon çukuru oluşturarak pH artışına neden olur ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ çukurların tabanlarında ve alaşımın yüzeylerinde çöker.



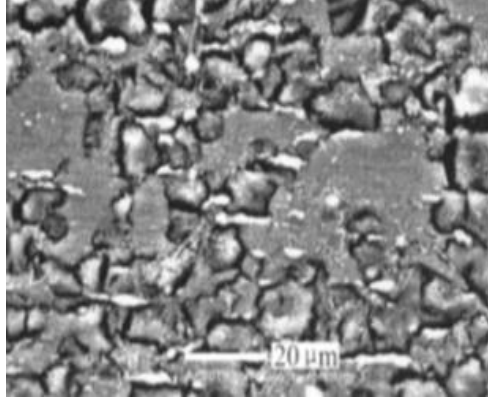
Şekil 2.11. Mg alaşımlarının çukurcuk korozyon oluşum düzeni (Zeng, vd., 2005).

Çukurcuk korozyonuna önlem almak amacıyla öncelikle malzeme seçiminde uygun malzemeyi seçmek gerekmektedir. Ayrıca malzemeleri çeşitli elementler ile alaşımlandırarak korozyon direnci yükseltilebilmektedir.

2.4.3. Taneler arası korozyon

Bu korozyon çeşitinin tane sınırlarında oluşma sebebi, yapıda oluşum gösteren ikincil fazların tane sınırları boyunca çökmesinden dolayı olmaktadır. Malzemelerde genel olarak çökelmelerin ve segregasyonların bulunduğu kısım tane sınırları olmaktadır. Bu sebeple, içerisinde çok fazla intermetalik faz barındıran malzemeler taneler arası korozyona çok duyarlı olmaktadır. Mg alaşımlarında taneler arası korozyonun varlığı konusunda farklı görüşler bulunmaktadır. Maker ve Kruger (Maker ve Kruger, 1993), Mg alaşımlarının faz yapısını incelediklerinde tane sınırlarındaki faz yapılarının, tanelere göre daha fazla katodik davranış gösterdiklerini bildirmişlerdir. Bu fikirden yola çıkarak taneler arası korozyonun oluşmadığını savunmaktadırlar. Fakat, Valente tarafından yapılan başka bir çalışmada (Valente, 2001), Mg alaşımlarının tane sınırları boyunca korozyonun meydana gelebileceği gösterilmiştir. Ayrıca korozyon mekanizmasının, tane sınırlarına bitişik şekilde yoğunlaşma eğiliminde olduğu bilinmektedir (Song ve Atrons, 1999; Zeng, vd., 2005). Valente, yaptığı deneyde, %3.5 NaCl çözeltisi içerisine daldırılmış WE43 alaşımlarının korozyon davranışını incelemiş ve tane arası korozyonun meydana geldiğini gözlemlemiştir. Valenteyi destekler nitelikte Ghali tarafından yapılan farklı bir araştırmada da %3.5 NaCl çözeltisine AZ80 alaşımı daldırılarak malzemenin korozyon davranışları incelenmiştir. Bu deney sonucunda da taneler arasında korozyon meydana geldiği kanıtlanmıştır (Ghali, vd., 2004; Zeng vd., 2007) (Şekil 2.12).

İncelemelerde korozyon oluşumlarının tane sınırları boyunca dar ve derin ilerlemeler şeklinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2.12. AZ80-T5’de meydana gelen taneler arası korozyon morfolojisi (Ghali, vd., 2004).

2.4.4. Gerilimli korozyon

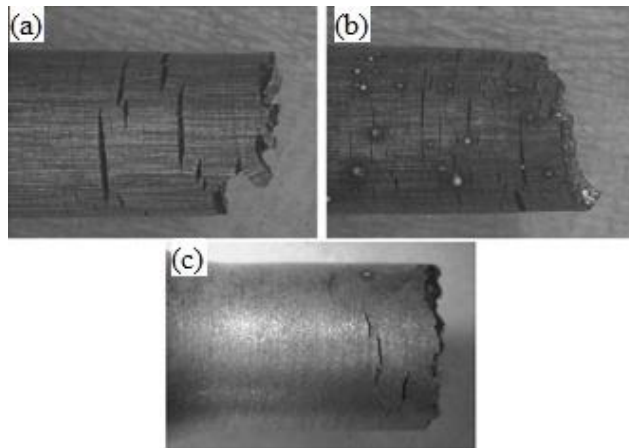
Gerilimli korozyon, malzemede aynı anda meydana gelen mekanik ve koroziv etkilerin sonucunda, hasar oluşması olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca parça yüzeyinde bulunan bir çatlakta oluşan korozyon sonucunda da meydana gelebilmektedir. Korozyon sonucu oluşan çatlaklar, mekanik kuvvetlerin malzemeye etki etmesi sonucunda (yükün büyüklüğüne ve uygulanma sıklığına bağlı olarak değişebilmektedir) malzeme yüzeyinden, malzeme içerisine doğru ilerlemektedir. Malzeme kesitinin bu yükü taşıyamayacak kadar daralması sonucunda kopma meydana gelmektedir. Gerilimli korozyon (SCC), çeşitli mühendislik alanlarında meydana gelen hasarlar arasında son derece tehlikeli ve önlem alınması gereken bir korozyon hasarı olmaktadır. Mg alaşımları açısından gerilmeli korozyon çatlakları genellikle nemli ortamlarda, su içerisinde, NaCl+K₂CrO₄ çözeltilerinde, NaBr, Na₂SO₄, NaCl, NaNO₃, Na₂CO₃, H₂SO₄, KF, KCl, NaI, MgCO₃, NaOH, H₂SO₄, HNO₃ ve HCl çözeltilerinde meydana gelebilmektedir (William, 1993).

Gerilimli korozyon açıklanırken bilinen iki farklı mekanizmadan birisiyle ifade edilmektedir; çatlak ucunda anodik çözünme ile sürekli çatlak yayılması veya çatlak ucunda bir dizi mekanik kırılmalar ile süreksiz çatlak yayılımı sonucu gevrek kırılma (Winzer, vd., 2005). Malzeme çözünmesi ve gevrek kırılması için de iki farklı açıklama sistemi bulunmaktadır. Birincisi, tercihli saldırı modeli (film kırılması, tünel sistem

teorisi vb.), ikincisi de ayrılma süreçleri ve hidrojen gevrekleşmesi (HE) teorisini içermektedir (Winzer, vd., 2005).

Mg alaşımlarının kırılma morfolojileri incelendiğinde, temelde taneler arasında ve tane içinde olmak üzere iki farklı SCC bulunmaktadır. Ayrıca Mg alaşımlarında karşılaşılan en yaygın gerilimli korozyon çatlakları şekli tane içi olmaktadır (Zeng, vd., 2006). Bunun nedeni, çoğu Mg alaşımlarının hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısına sahip olmasından kaynaklı daha az kayma sistemlerine sahip olmaktadır ve bunun sonucunda gevrek kırılma eğilimi göstermektedirler.

Song vd. (Song, vd., 2005) yapmış oldukları deneysel çalışmada AZ31 Mg alaşımlarının 0.01 ve 0.1 mol/L NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon davranışı incelenmiş ve gerilimli korozyona karşı duyarlı olduğu görülmektedir. Deney sonuçları, anodik çözünme sonucunda yüzeyde kusurlar oluşturduğunu, bu kusurların, hidrojenin malzeme içerisinde yayılması ve birikmesi sonucunda da SCC'ye neden olduğunu savunmaktadır. Hidrojenin malzeme içerisine yayılmasıyla, Mg alaşımının bağ kuvvetlerini azaltabilmekte ve hidrojen gevrekliğine neden olabilmektedir. Fakat, SCC çatlaklarının meydana gelebilmesi için her zaman hidrojen gevrekliğinin başlatıcı mekanizma olmadığı durumlarda olabilmektedir (Zeng, vd., 2006). Şekil 2.13'de farklı Al miktarları içeren SCC'a meydana gelmiş Mg alaşımları görülmektedir (Winzer, vd., 2008).



Şekil 2.13. (a) AZ31, (b) AM30 ve (c) AZ91 malzemelerinde meydana gelen SCC çatlakları (Winzer, vd., 2008).

Sonuç olarak, Mg alaşımlarının tane içlerinde meydana gelen SCC belirli bir türdeki çökeltiler ile ilgili meydana gelmemektedir. Ancak taneler arası SCC, katodik β

fazının tane sınırlarında çökelti oluşturması sonucu matris ile galvanik korozyon meydana getirmesi ile ilgili olarak oluşmaktadır (Zeng, vd., 2006).

2.4.5. Korozyonlu yorulma

Korozyonlu yorulma, malzemenin maruz kaldığı korozif ortam hareketliliğinden ve maruz kaldığı dinamik yüklerin, beraber malzemede yoğunlaştığı ve çatlak başlangıçları şeklinde kendini gösteren bir hasar çeşiti olmaktadır. Genellikle malzemeler korozyonun meydana gelmesi için elverişli ortamlarda periyodik yüklere maruz kalmaktadırlar (Yüzey kusurları, artık basınç gerilmeleri ve çevre şartları bu etkenlerden olmaktadır). Korozyonlu yorulma hataları genellikle malzemelerin yorulma ömürleri ile alakalı olarak meydana gelmektedir. Örneğin, Mg alaşımlarının NaCl ve CaCl₂ çözeltilerindeki yorulma ömürleri, normal atmosfer ortamına göre her zaman daha düşük olmaktadır (Zeng, vd., 2005).

Yapılan birçok deneysel çalışmada, musluk suyu veya damıtılmış su içerisinde bile, Mg alaşımlarının yorulma ömürlerinde önemli azalmaların meydana geldiği rapor edilmektedir (Potzies ve Kainer, 2004). Örneğin, AZ91E-T6 Mg alaşımının %3.5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyonlu yorulma direnci, atmosfer ortamındaki direncine göre oldukça düşük olmaktadır (Stephens, vd., 1995). AZ80 Mg alaşımının korozyonlu yorulma dayanımı incelendiğinde korozif çözelti içerisinde mikroskobik çatlakları oluşturan korozyon çukurlarında (β fazının, α -Mg matrisi ile temas ettiği bölgelerde bulunmaktadır) meydana gelirken, atmosferik ortamda korozyon malzeme yüzeyinde veya altındaki inklüzyonlarda oluşmaktadır. (Zeng, vd., 2004). Mg alaşımlarının üretim yöntemindeki farklılık da, korozyonlu yorulma dayanımlarını etkilemektedir. Ekstrüde edilmiş bir Mg alaşımı ile döküm yoluyla üretilmiş bir Mg alaşımının korozif ortamda karşılaştırılması sonucu, ekstrüde edilmiş Mg alaşımının ömrünün daha kısa olduğu görülmektedir (Yue, vd., 1995).

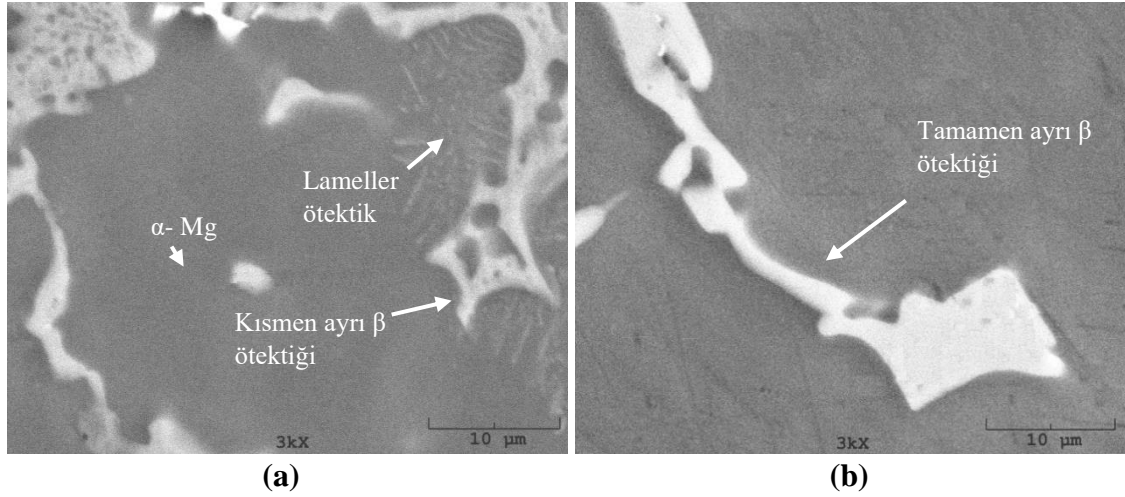
Mg alaşımlarını korozyonlu yorulmadan koruma yöntemi olarak uygun kaplama kullanılması her zaman kabul edilen bir yöntem olabilmektedir.

2.5. AZ Serisi Mg Alaşımalarında β Fazının Korozyon İle Olan İlişkisi

2.5.1. β fazı

Mg- Al faz diyagramı (Bkz. Şekil 1.2) incelendiğinde ötektik yapıdaki β fazının, Al içeriğinin %13'ün üzerine çıkınca yapıda oluşmaya başladığı görülmektedir. Ayrıca dengesiz soğuma şartlarının olduğu durumlarda %2'ye kadar bile Al içeriğinde ötektik yapı meydana gelebilmektedir (Cheng, vd., 2009). β fazının morfolojisi üç farklı etmene bağlı olmaktadır. Bunlar; Al miktarı (Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Koç, vd., 2013; Choi ve Kim, 2017; Candan ve Candan, 2018), ergimiş metalin katılma hızı (Tanverdi, 2005; Candan, vd., 2016) ve alaşımlamada kullanılan elementler olmaktadır (Song vd., 1998; Song, vd., 1999; Guangyin, vd., 2000; Tanverdi, 2005; Zhou, vd., 2006; Wu, vd., 2005; Yu, vd., 2006; Candan, vd., 2009; Candan, vd., 2011; Koç, 2013; Choi ve Kim 2017).

Mg alaşımlarında, alaşımlama veya katılma şartlarına göre tamamen ayrı, kısmen ayrı veya lameller ötektik yapısı oluşabilmektedir (Candan vd., 2011; Candan ve Candan, 2018). Tamamen ayrı veya kısmen ayrı ötektik yapının oluşumu, malzemenin katılma hızına, Al miktarına ve mikro alaşım elementlerine bağlı olmaktadır (Şekil 2.14). Küçük miktarda Zn ilavesi ile Al-Mg alaşımında ötektik morfolojisinin oluşma olasılığı mümkün olabilmektedir. Katılma sırasında Zn'nin yüksek segregasyon eğiliminden ve katılmanın ilk evrelerinde katı-sıvı ara yüzeyi önündeki yapısal alt soğumadan dolayı, birincil dentritlerin büyümesindeki artış dentritler arası mesafeyi azaltır ve buna bağlı tamamen ayrı β ötektiğinin oluşumuna yardımcı olur (Nave, vd., 2000; Dahle, vd., 2001). Lameller ötektik tamamen ayrı β ötektiği ile yan yana olacak şekilde aşırı doymuş α -Mg katı çözeltilisinde oluşur. Genellikle kısmen ayrı β morfoloji yavaş katılma ve yüksek Al içeriğinde oluşmasına rağmen, tamamen ayrı β morfoloji basınçlı döküm veya düşük Al içeriğinde oluşmaktadır.



Şekil 2.14. (a) AZ91 ve (b) AZ91Ti içeren Mg alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi (Candan, vd., 2013).

Barındırdığı yüksek Al içeriği ile AZ91 alaşımlarındaki β fazı, matris yapısına göre katodik davranış gösterdiğinden (Bkz. Çizelge 2.4) Mg-Al alaşımının korozyon dayanımını etkilemektedir. Bu sebeple AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon dirençleri konusunda içerdiği β fazı miktarı önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

2.5.2. Al içeriği- β fazı ilişkisi

AZ serisi Mg alaşımlarındaki β fazının korozyon mekanizmalarını ve etkilerini anlamaya yönelik literatürde birçok araştırma bulunmaktadır (Hermann, vd., 1987; Lunder, vd., 1989; Baker, 1998; Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Cheng, vd., 2009; Salman, vd., 2010; Samaniego, vd., 2013; Candan ve Candan, 2018). Fakat, AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon davranışları konusunda karşıt görüşler bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar (Hermann, vd., 1987; Lunder, vd., 1989), AZ serisi alaşımların korozyon dayanımını alaşım içerisindeki Al miktarının %8-9 değerlerine geldiğinde önemli şekilde arttığını, bunun sebebinin de yapıdaki β fazının korozyonu engelleyici bariyer etkisi yapmasından kaynaklandığını savunmaktadırlar. Bu görüşe karşı olarak diğer bir grup araştırmacı (Song, vd., 1998; Cheng, vd., 2009; Samainego, vd., 2011; Singh, vd., 2015), β faz yapısının korozyonu engelleyici bariyer etkisi yapmadığını aksine alaşım matrisi ile galvanik çift oluşturarak mikro-galvanik korozyona neden olduğunu savunmaktadırlar. Bazı çalışmalarda (Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Salman, vd., 2010), %9 Al içeriğine sahip AZ91 alaşımının korozyon dayanımının, daha az miktarda Al içeren AZ21 ve AZ31 alaşımlarına göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Pardo vd. (Pardo, vd., 2008),

Al'nin AZ31, AZ80 ve AZ91D alaşımlarının üzerindeki etkileri konusunda yaptıkları araştırmada β fazının yapıdaki bariyer etkisinin alaşımdaki Al miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı sonucuna, yani en fazla AZ91 alaşımında olduğunu göstermişlerdir. Wang vd. (Wang, vd., 2012) tarafından yapılan araştırmada, AZ61 ile AZ31 alaşımı karşılaştırılmış ve AZ61 alaşımının korozyon direncinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bir grup araştırmacı (Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Salman, vd., 2010; Wang, vd., 2012), AZ91 alaşımlarının diğer Mg alaşımlarına göre daha düşük korozyon hızına yani daha yüksek korozyon direncine sahip olmasını iki nedene dayandırmaktadırlar; bunlardan biri Al'nin yapıdaki miktarının artması, ikincisi de korozyon meydana gelirken koruyucu bariyer etkisi yapan β fazının miktarı olmaktadır. Bu araştırmacıardan (Anık, vd., 2006; Pardo, vd., 2008; Salman, vd., 2010; Wang, vd., 2012) farklı olarak, başka bir grup araştırmacı (Song, vd., 1998; Cheng, vd., 2009; Samainego, vd., 2013; Singh, vd., 2015), β fazının korozyon sırasında koruyucu bariyer etkisi yapmadığını aksine alaşım matrisi ile mikro-galvanik hücre meydana getirerek korozyonun artmasına neden olduğunu savunmaktadırlar. AZ91 alaşımlarındaki galvanik korozyon yoğunluğunun, AZ21 ve AZ31 alaşımlarına oranla daha fazla olacağını ve yapıdaki mikro-galvanik hücre gibi β fazlarının buna neden olacağını belirtmektedirler (Song, vd., 1998; Cheng, vd., 2009; Samaniego, vd., 2013; Singh, vd., 2015).

Yapılan araştırmalarda (Pardo, vd., 2008; Salman, vd., 2010; Wang, vd., 2012; Samaniego, vd., 2013; Singh, vd., 2015) AZ serisi Mg alaşımlarında meydana gelen korozyon dayanımları karşılaştırılırken araştırmaların sistematik olarak yapılmadığı görölmektedir. şöyle ki, alaşım elementlerinin, soğuma hızlarının ve üretim yöntemlerinin mikroyapıyı önemli oranda etkilediği bilinmektedir. Örneğin, AZ31 ve AZ61 alaşımları, AZ91 ile karşılaştırılırken, alaşımların üretim yöntemlerine bakılmaksızın inceleme yapılarak içerdikleri Al miktarları karşılaştırılmıştır (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012). Çalışmalarda (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012), AZ91 alaşımı biyet formunda ve AZ31 alaşımı haddelenmiş plaka formundadır ve mikroyapılarının farklı olması kaçınılmazdır.

Yukarıda bahsedilen parametrelerin etkisi konusunda Candan ve Candan (Candan ve Candan, 2018) tarafından yapılan çalışmalarında, AZ21, AZ41, AZ61 ve AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları konusunda sistematik (benzer soğuma hızı ve safsızlıkta) incelemeler yapılmıştır. Yapıdaki Al miktarının artması ile birlikte küresel

şekilli β fazının daha kaba lamelli veya kısmen ayrı β ötektik yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Sonuçlar, Al miktarının %4 (AZ41) üzerindeki çalışmalarda korozyon dayanımının daha düşük olduğunu göstermiştir. Alaşımların korozyon dayanımlarındaki azalma, β fazlarının morfolojisi ve miktarı ile alaşım yüzeyindeki oksit filminin devamlılığının kaba β fazları tarafından kesintiye uğraması ile bağlantılı bulunmuştur. Dolayısıyla bu veriler, β fazının bariyer etkisinden daha fazla mikro-galvanik hücre oluşturarak korozyona neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca β fazının bariyer etkisi yapmasının, β faz yapısının boyutu ile ilgili olabileceği düşünülmektedir.

2.5.3. Mikro alaşımlama

Metal malzemelerin korozyon davranışları incelenirken, en önemli etkinin metal saflığından kaynaklandığı belirtilmektedir. Bu sebeple saflık değeri yüksek olan malzemelerde, empürite miktarı kritik seviyenin altında kalması sağlanarak kontrol sağlanmaktadır. Bu düşünceyle tuz miktarı fazla olan ortamlarda, saflık derecesi yüksek olan malzemelerin, saf malzemelere oranla korozyon direnci yüksek olmaktadır (Das ve Davis, 1988).

AZ serisi Mg alaşımları, Y, Ce, Sb, Bi, Si, Ca, Ho, Sr, Sc, Pb ve Ti ile mikro alaşımlandırılarak korozyon özellikleri geliştirilebilmektedir (Rosalbino, vd., 2006; Yu, vd., 2006(a); 2006(b); 2006; Fan, vd., 2007; Srinivasan, vd. 2007; Jihua, vd.,2008; Candan, vd., 2009; Fan, vd., 2009; Zhou, vd., 2009; Candan, vd., 2011; Ai ve Quan, 2012; Gusieva, vd., 2013; Chong, vd. 2015; Candan, vd., 2016; Choi ve Kim, 2017).

Son yıllarda yapılan derleme makalelerinde Mg ve alaşımlarının korozyonu ve korozyon mekanizması ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir (Maker vd Kruger, 1993; Song ve Atrens, 2003; Zeng, vd., 2006; Guo, 2010; Atrens, vd., 2011; Atrens, vd., 2013; Gusieva, vd., 2015; Esmaily, vd., 2017). Bu çalışmalara göre genel olarak Mg ve alaşımlarının zayıf korozyon direnci, yüzeyde oluşan oksit filmlerinin tamamen koruyucu olmaması, özellikle Fe, Ni ve Cu gibi safsızlıklar veya $Mg_{17}Al_{12}$ (Maker ve Kruger, 1993; Song ve Atrens, 1999; Ghali, vd., 2005; Song, vd., 2005; Pardo, vd., 2008), AlMn (Pardo, vd., 2008), $Mg_{12}Nd$ (Mathieu, vd., 2003) gibi benzer ikincil fazlardan kaynaklanan galvanik veya bimetalik korozyonun olmasına dayandırılmaktadır.

Bu tez kapsamında, Ti ile mikro alaşımlandırılmış AZ91 Mg alaşımlarında Ti ve Fe'in korozyon özellikleri üzerine etkisi inceleneceğinden, aşağıda AZ serisi Mg

alaşımalarında Ti ve Fe'in mekanik ve korozyon özellikleri üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.6. Ti ile Mikro Alaşımlandırılmış AZ Serisi Magnezyum Alaşımalarının Mekanik ve Korozyon Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Ti ile mikro alaşımlandırılmış AZ serisi Mg alaşımalarının çekme, akma ve korozyon dayanımlarını arttırdığı literatürde rapor edilmiştir (Candan, vd., 2011, Ai ve Quan, 2012; Candan, vd., 2016, Choi ve Kim, 2017).

AZ91 alaşımını Ti ile mikro alaşımlama çalışmaları kapsamında, Ünal (2008) tarafından yapılan doktora ve Koç (2008) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmalarında; AZ91 Mg alaşımına ağırlıkça %0.5-2.0 oranlarında Ti ilavesinin akıcılık, sıcak yırtılma, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, Ti ilavesinin akıcılık üzerinde belirgin etkisi olmaz iken, çekme ve akma dayanımlarını arttırdığını göstermiştir. Söz konusu çalışmalara paralel olarak, Kuşdemir (2008) tarafından yapılan diğer bir yüksek lisans çalışmasında; ağırlıkça %0.2-0.5 Ti ilave edilen AZ91 Mg alaşımının korozyon davranışları ağırlık kaybı ve elektrokimyasal test sonuçlarıyla değerlendirilmiştir. AZ91 alaşımına Ti ilavesiyle ağırlık kaybının kayda değer oranda azaldığı görülmüştür (Ünal, 2008; Koç, 2008; Kuşdemir, 2008).

Ünver (2011) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında, ağırlıkça %0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında Ti içeren AZ91 Mg alaşımalarının mikroyapı, mekanik ve korozyon dayanımları çalışılmıştır. Ti alaşım elementinin ilavesi AZ91 matris alaşımının sertliğini ve çekme dayanımını arttırmıştır. Ayrıca korozyon dayanımı da artan Ti ilavesi ile artmıştır (Ünver, 2011).

Ünal (2008), Koç (2008) ve Kuşdemir'in (2008) çalışmalarının devamı olarak Çelik (2014) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında ise %0.5 Ti içeren AZ91 Mg alaşımalarında soğuma hızının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, soğuma hızının artmasına bağlı olarak alaşımaların çekme ve akma dayanımlarının arttığını göstermiştir. %0.5Ti içeren AZ91 Mg alaşımı Ti içermeyen AZ91 alaşımına göre daha yüksek çekme ve akma dayanımları göstermiştir (Çelik, 2014).

AZ91 alaşımının Ti ile mikro alaşımlaması ile bunun döküm mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine etkileri ilk kez Candan ve çalışma grubu tarafından rapor edilmiştir (Ünal, 2008; Koç, 2008; Kuşdemir, 2008; Candan, vd., 2011). Candan vd.,

(2011) çalışmalarında, AZ91 Mg alaşımlarına ağırlıkça %0.2-0.5Ti ilavesinin mekanik, mikroyapı ve korozyon davranışları üzerine etkisini rapor etmişlerdir. Korozyon davranışları %3.5 NaCl çözeltisinde, ağırlık kaybı ve potansiyodinamik polarizasyon test yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ti ilavesiyle akma dayanımında %18 ve çekme dayanımında ise %47 artış gözlenmiştir. Sonuçlar, AZ91 alaşımında Ti ilavesi ile ağırlık kaybında önemli azalmalar meydana geldiğini göstermiştir. Potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları ise ağırlık kaybı testlerine paralel olarak korozyon hızının önemli oranda azaldığını göstermiştir (Candan, vd., 2011). Candan vd. (2016), tarafından yapılan diğer bir çalışmada, ağırlıkça %0.5 Ti içeren AZ91 Mg alaşımlarında soğuma hızının mikroyapı ve korozyon özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Daldırma deneyi sonuçları, soğuma hızı arttıkça alaşımın korozyon dayanımının arttığını göstermiştir. En hızlı katılaşılan bölge dikkate alındığında, AZ91 alaşımına %0.5 Ti ilavesiyle korozyon kaybının %90 oranında azaldığı görülmüştür. Çalışmalarda, Ti ilavesiyle β fazının modifiye olduğu ve buna bağlı mekanik ve korozyon özelliklerinin kayda değer oranda arttığı gözlenmiştir (Candan, vd., 2016).

Südholz vd. (2009) yaptığı çalışmada, AZ91E alaşımına ilave edilen alaşım elementlerinin korozyon davranışı üzerine etkilerini incelemiştir. Elektrokimyasal test sonuçları ve mikroskobik görüntüler incelendiğinde, AZ91E alaşımına eklenen bazı elementlerin, alaşımın korozyon direncinin iyileşmesinde yararlı oldukları tespit edilmiştir. AZ91E alaşımının kendi çözünürlük sınırını aşan element eklenmesi durumunda ise korozyon özelliklerinin negatif yönde etkilendiği gözlenmiştir. Bu çalışmada Y, Ce, Sc ve Ti içeren alaşımların korozyon davranışlarında iyileşmeler gözlenmiş olup, elementlerin çözünürlük sınırlarının altında daha iyi korozyon özellikleri elde edilmiştir (Südholz, vd., 2009).

AZ91 Mg alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerine Ti'nun etkisini Ai ve Quan (2012) çalışmışlardır. Sonuçlar, ~ %0.1-0.5 Ti ilavesinin döküm malzemenin mikroyapısını değiştirdiğini, mekanik özellikleri ve korozyon özelliklerinin iyileştirdiğini göstermiştir. % 0.4 Ti içeren AZ91 alaşımının çekme dayanımının 197 MPa ve uzamasının %6.9 olduğu rapor edilmiştir (Ai ve Quan, 2012).

AZ31, AZ61 ve AZ91 Mg alaşımına eser miktarda Ti mikro alaşımlamanın mikroyapı ve korozyon davranışına etkisi, Choi ve Kim (2014, 2016, 2017) tarafından araştırılmıştır. Choi ve Kim (2014) tarafından yapılan ilk çalışmada AZ61 Mg

alaşımlarında Ti ilavesinin (%0.01-0.02) mikroyapı ve korozyon özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, Ti ilavesinin morfolojiyi ve tane boyutunu değiştirdiği göstermiştir. %0.01 Ti alaşımlandırma korozyon direncini önemli ölçüde arttırdığı, ancak %0.02 Ti ilavesi korozyon direncindeki artışı azalttığı ve Ti ilavesinin sistematik bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Choi ve Kim (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada, AZ31 magnezyum alaşımlarına eser miktarlarda Ti ilavesinin (%0.007) malzemenin korozyon davranışı üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar Ti içeren numunenin korozyon direncinin daha iyi olduğunu göstermiştir. Choi ve Kim (2017) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, içerisinde eser miktarda Ti bulunan (%0.006) numunelerde, α fazının AZ91'in korozyon davranışlarının geliştirilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarında Ti ilavesinin AZ91 içerisinde β fazının tane yapısını incelediği ve kütle kaybını azalttığı görülmüştür. Ayrıca Ti içeren AZ91 numunelerinin, Ti içermeyen numunelere göre korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. AZ31 Ti ile AZ91 Ti alaşımları karşılaştırıldığında AZ91 Ti'nin biraz daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu anlaşılmıştır (Choi ve Kim, 2014, 2016, 2017). Bu grup tarafından yapılan araştırmalarda, Ti içeren AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımların korozyon dayanımlarının Ti içermeyen alaşımlara oranla çok daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, Candan vd. (2011, 2016), tarafından ve Ai ve Quan (2012) tarafından yapılan çalışmaları da teyit etmektedir.

Lee ve Kim (2014) tarafından yapılan araştırmada AZ61 Mg alaşımına eser miktarda Ti ilave (%0.01-0.02) edilmesinin malzeme üzerinde yaptığı etkiler incelenmiştir. Eser miktarda Ti ilave edilmesi her iki miktarda da mikroyapıdaki ayrı β fazının boyutunu ve miktarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür ve Ti ilavesinin AZ61 alaşımının deformasyon davranışlarının büyük ölçüde arttırabildiği anlaşılmıştır (Lee ve Kim, 2014).

Yang vd. (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada eser miktarda Ti ilavesinin (%0.1-0.3) Mg-3Sn-2Sr alaşımındaki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarında Ti ilave edilmesi malzemenin sürünme özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir (Yang, vd., 2013).

Chen vd.'nin (2015) yapmış olduğu çalışmada Mg-Zn-Zr-Ca alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde Ti'nin etkisi araştırılmıştır. Numunelerde Mg-%0.4 Zn-%1.0 Zr-%1.5 Ca oranları sabit tutulup Ti değerleri sırasıyla % 0, 0.4, 0.6, 0.8,

1.0 ve 1.2 miktarlarında değiştirilerek kullanılmıştır. Deney sonuçlarında α -Mg tanelerinin Ti ilavesi ile inceltildiği ve homojen bir şekilde dağıtıldığı görülmüştür. % 0.8 Ti içeren numunenin tane boyutunun bu numuneler arasındaki en ince yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca genel olarak Ti ilavesinin Mg-%0.4 Zn-%1.0 Zr-%1.5 Ca alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği ve numuneler arasındaki en yüksek mekanik özelliklere sahip alaşım içerisinde %0.8 Ti içeren olduğu rapor edilmiştir. Bu numunenin çekme gerilmesi 145 MPa, uzama oranı % 3.2 ve Brinell sertlik değeri 57.9 HB olarak oda sıcaklığında ölçülmüştür (Chen, vd., 2015).

Yukarıdaki literatur çalışmaları, AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon ve mekanik özelliklerini geliştirmede Ti ile mikro alaşımlandırmanın β fazının modifikasyonu ve buna bağlı korozyon direncinde iyileşmeler elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ti'nin bu etkisi β fazının morfolojisinde ve dağılımındaki değişikliklere ve α fazındaki katı çözeltilisindeki Al artışına dayandırılmıştır.

2.7. Mg Alaşımlarında Fe Etkisi

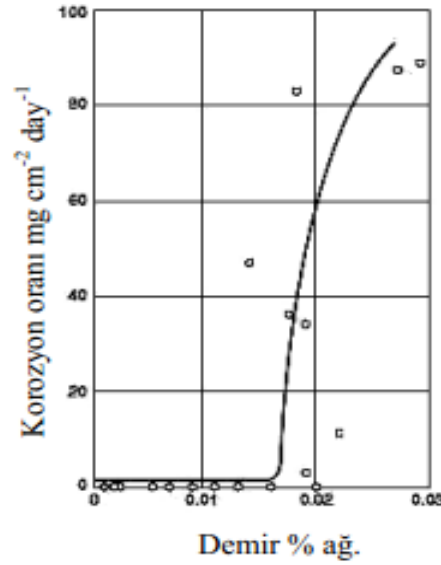
Mg alaşımlarının korozyon dayanımlarında olumsuz etkisi bulunan Fe, Si, Cu ve Ni gibi empürite elementleri her zaman bulunmaktadır (Pan, vd., 2016a; Pan, vd., 2016b). Fe elementi yapıda az bir miktarda bile bulunmasına rağmen, Mg alaşımlarının korozyon dayanımlarını önemli derecede azaltabilmektedir (Pan, vd., 2016). Özellikle, endüstriyel amaçlı yapılan uygulamalarda Fe'nin tolerans limit değerinin bilinmesi maliyet/kalite oranı konusunda son derece önemli olmaktadır. Literatürde, saf Mg için Fe'nin olumsuz etkisi konusunda tolerans limit değerinin bilinmesine rağmen (Polmear, 1995; Friedrich ve Mordike, 2006), AZ91 Mg alaşımları için bu konudaki bilgiler sınırlı olmaktadır (Song ve Atrens, 1999; Pan, vd., 2016a). Döküm yöntemi ile üretimi yapılan AZ91 Mg alaşımlarının Fe içeriğine bağlı korozyon davranışları Pan vd. tarafından çalışılmıştır (Pan, vd., 2016a). Çizelge 2.5'de AZ91 alaşımları içerisindeki farklı Fe miktarına bağlı olarak meydana gelen korozyon değişiklikleri gösterilmiştir ve artan Fe miktarı ile alaşımdaki korozyonun ciddi bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.5. %3.5 NaCl çözeltisi içerisindeki AZ91 alaşımının farklı Fe miktarları ile korozyon özellikleri (Pan, vd., 2016a).

| Alaşım | E_{cor} (V _{SCE}) | i_{cor} (μAcm^{-2}) | P_i (mm/y) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------|
| AZ91-35 ppm Fe | -1.34 | 5.26 | 0.12 |
| AZ91-65 ppm Fe | -1.44 | 46.95 | 1.07 |
| AZ91-150 ppm Fe | -1.33 | 108.38 | 2.47 |

Malzeme içerisinde bulunan katodik Fe, Ni ve Cu empüriteleri, anodik Mg matrisi ile beraber malzemenin korozyona uğramasına neden olmaktadır. Yüksek saflıktaki malzemeler içerisinde, empürite elementlerinin miktarı belli değerlerin altında tutularak korozyon engellenmektedir. Bu sebeple tuz oranı yüksek ortamlarda bulunan yüksek saflıktaki malzemelerin korozyon direnci saflığı düşük malzemelere göre yüksek olmaktadır (Das ve Davis, 1988). Literatürde, mümkün olduğunca düşük seviyede olması istenen Fe için bir dizi tolerans limit değeri rapor edilmektedir (Polmear, 1995; Friedrich ve Mordike, 2006). Bu rapora göre Fe'in saf Mg içerisindeki empürite limit değeri 35-50 ppm olmaktadır (Polmear, 1995). Bu empürite elementlerin konsantrasyon değerleri çözünürlük seviyelerinin altında tutularak ve Zn, Mn gibi alaşımlandırma elementlerinin kullanımı ile birlikte Mg'nin korozyon dayanımı geliştirilmektedir (Song ve Atrens, 1999; Witte, vd., 2006).

Genellikle çelik ergitme potalarından gelen Fe kirliliği de tolerans limit değerini aştığı zaman korozyon oluşumunda önemli etki yaratmaktadır. Magnezyum matrisi ile matris içerisine saçılmış halde bulunan Fe partikülleri galvanik çift oluşturarak metal malzemede korozyon oluşumlarına sebep olmaktadır. Mg alaşımları içerisinde çoğunlukla Al-Fe bileşeni şeklinde çökelti oluşmasına neden olan Fe, katot görevi üstlenirken, Al konsantrasyonun artması ile tolerans değeri azalmaktadır. Yapıda oluşan Al_3Fe faz partiküllerinin Fe partiküllerine oranla daha aktif davranış göstermesi bu durumu açıklamaktadır (Song ve Atrens, 1999). Şekil 2.15'de Fe elementinin yapıdaki miktarının, saf Mg metali üzerindeki korozyon oluşum etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Fe miktarının saf Mg içerisindeki miktarının korozyon oluşumuna etkisi (Polmear, 1995).

Mg-Al alaşımları içerisinde Fe elementince zengin çökelti fazları diğer güçlü katotları oluşturmaktadır. Genellikle, Al-Fe elementleri oluşturdukları Al-Fe intermetelik bileşeni olan bu yapılar, korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Döküm yöntemi şeklinde üretim sırasında Fe ve Ni empüriteleri önlemek amacıyla bu tür elementleri barındırmayan potalar, karıştırıcılar ve kalıplar kullanılabilir. Ayrıca alaşım elementleri eklenerek Fe'nin zararlı etkisini azaltmak mümkün olabilmektedir. Fe'nin yapmış olduğu zararlı etkiyi azaltabilen alaşım elementi Mn olmaktadır (Westenge ve Aune, 2005). Al içeren Mg alaşımına ilave edilen Mn'nin Fe partiküllerini sardığı (AlMnFe) ve bu yolla Mg ile Fe'nin doğrudan temas kurmasının engellendiği varsayılmaktadır. Bu sayede, yapıda sadece Mn ve Mg arasında galvanik hücre oluşmaktadır. Mg-Fe ve Mn-Fe çiftleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında, Mg-Fe çiftinin standart elektrot potansiyelleri arasındaki fark daha az olmaktadır ve dolayısıyla malzeme daha az korozyona uğramaktadır (Polmaer, 1992; Makar ve Kruger, 1993).

Candan vd. tarafından yapılan deneysel çalışmalarda (2011, 2016), AZ91 Mg alaşımlarına Ti ilave edilmesinin malzemenin korozyon dayanımını önemli ölçüde geliştirdiği rapor edilmektedir. Ti'nin bu etkisinin barındırdığı β fazını modifiye etmesi yanında, α -Mg'de bulunan eser miktardaki Fe'nin Ti tarafından bağlanarak yeni bir faz

oluşturmasına dayandırılmaktadır. Bu iki çalışmanın arasındaki en dikkat çekici nokta %0.5 Ti ilavesi ile korozyon kaybının sabit değere ulaşması olmaktadır (1.7mg/cm²d). Ti içermeyen AZ91 alaşımlarının korozyon kaybı yaklaşık 16.87 mg/cm²d (Candan vd., 2016) iken diğer çalışmada 77 mg/cm²d (Candan, vd., 2011) olduğu ve alaşımın aynı olmasına rağmen korozyon kaybındaki farklılık alaşımdaki eser miktardaki Fe oranına dayandırılmaktadır. Candan vd. (2011) çalışmasındaki Fe miktarı 0.09 iken diğer çalışmada (2016) Fe miktarı 0.022 olmaktadır. Farklı Fe miktarları olmasına rağmen 0.5 Ti ile aynı korozyon kayıplarının elde edilmesi Ti'nin etkili bir biçimde yapı içinden temizleme (scavenge) etkisi gösterdiğini ispatlamaktadır (Candan, vd., 2011).

Literatür araştırmaları (Candan, vd., 2011, 2016; Choi ve Kim, 2014, 2016, 2017), AZ serisi Mg alaşımına Ti ilavesi ile alaşımın mekanik dayanım ve korozyon direncinin etkin bir biçimde arttırdığını göstermektedir. Mekanik dayanım ve korozyon direncindeki artış, mikroyapıdaki β fazının Ti ilavesi ile kısmen ayrı ötektikten tamamen ayrı ötektiğe dönüşmesine dayandırılmaktadır (Candan, vd., 2011, 2016). Ancak, Fe'nin AZ91 Mg alaşımlarının korozyonu üzerindeki zararlı etkisini azaltmak, Ti'nin rolü ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada farklı Fe içeriğine sahip Ti ile mikro alaşımlandırılmış (%0.5 Ti) AZ91 alaşımlarının korozyon dayanımlarında Ti rolü araştırılmaktadır.

2.8. Katılma Hızı

Önceki bölümlerde değerlendirilen AZ serisi Mg alaşımlarının korozyon özellikleri hakkında yapılan araştırmalarda (Wenwen, vd., 2003; Wu, vd., 2005; Zhou, vd., 2006; Srinivasan, vd., 2007; Cheng, vd., 2009) numuneler genellikle ticari ürünlerden elde edildiği için, hem bileşimlerinde hemde katılma şartlarında farklılık göstermesi beklenen bir durumdur. Yani çalışmaların sistematik olarak yapılmadığı belirtilmektedir. Örneğin; AZ31 ve AZ61 alaşımları, AZ91 alaşımı ile üretim yöntemlerine dikkat edilmeden içerdikleri Al miktarları baz alınarak karşılaştırma yapılmıştır (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012). Ayrıca değerlendirilen çalışmalarda, AZ91 alaşımı biyet formunda üretimi yapılırken, AZ31 alaşımının üretimi haddeleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Pardo, vd., 2008; Wang, vd., 2012). Yukardaki açıklamalarda da belirtildiği gibi, alaşımdaki elementlerin çeşiti (Song, vd., 1998; Guanyin, vd., 2000; Witte, vd., 2005; Tanverdi, 2005; Yu, vd., 2006; Srinivasan, vd., 2007; Candan, vd., 2009; Candan, vd., 2011; Koç, 2013; Bornappour, vd., 2014; Candan, vd., 2016), alaşımın

soğuma hızı (Tanverdi, vd., 2005; Shih, vd., 2007; Wang, vd., 2013; Candan, vd., 2016) ve üretim yöntemlerindeki (Song ve Atrens, 1999) farklılık mikroyapının şekillenmesini önemli ölçüde etkilediği ve korozyon davranışlarını değiştirdiği bilinmektedir.

Mikro alaşımlandırılma yapılmış AZ91 Mg alaşımının, soğuma hızının korozyon davranışlarına etkisi Tanverdi tarafından incelenmiştir (Tanverdi, 2005). Katılma hızının artırılması ile AZ91 Mg alaşımının tane boyutlarında küçülme meydana gelmiştir. Ayrıca tane içi ve tane sınırlarındaki Al miktarlarında farklılıklar meydana gelerek tane sınırlarında daha fazla miktarda Al biriktiği görülmüştür. Dolayısıyla, katılma hızının artması ile AZ91 alaşımının korozyon dayanımının arttığı anlaşılmıştır.

Çelik ve Candan vd., tarafından yapılan araştırmalarda da hızlı katılma ile tane boyutunun incelmeye bağlı olarak alaşımın korozyon direncinin iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir (Çelik, 2014; Candan, vd., 2016). Döküm yoluyla üretilmiş AZ91 Mg alaşımlarının, külçelerden daha iyi korozyon dayanımına sahip olması bu görüşü destekler niteliktedir (Song ve Atrens, 1999), aksi halde AZ91D alaşımı döküm işleminde kullanılır ve külçeye oranlar daha hızlı katılır. Çelik ve Candan vd., %0.5 Pb ya da Ti ile alaşımlandırılmış AZ91 Mg alaşımlarının mikroyapı ve korozyon dayanımları hakkında katılma hızının etkileri incelenmiştir. Araştırma sonucunda katılma hızının artmasıyla alaşımın korozyon dayanımının arttığı belirtilmiştir (Çelik, 2014; Candan, vd., 2016). Bunun nedeni, Pb ve Ti'un β faz yapısının oluşumunu engellemesinden çok (Bkz. Şekil 2.12, Bkz. Şekil 2.13), katılma hızının artırılmasıyla ağısı β faz yapısının küçük boyutlarda kalmasına dayandırılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Döküm İşlemi ve Numune Hazırlama

Mg alaşımlarının üretimi için %99.9 saflıkta Mg ve Al kullanılmıştır. Mg-Al-Zn (AZ91) esaslı alaşımın hazırlanmasında ve diğer alaşım elementlerinin ilavesi ön alaşım ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ön alaşımlardan ikinci bir ergitme ile deney numunelerinin dökümü yapılmıştır. AZ91 alaşımına alaşım elementi olarak ağırlıkça %0.5Ti ilave edilmiştir. AZ91 alaşımına Ti ilavesi Al-5Ti master alaşımı kullanılarak yapılmıştır. Mg alaşımlarının dökümü hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi farklı Fe oranlarına sahip AZ91 ve AZ91Ti numuneleri üretilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı Fe oranlarına sahip AZ91 ve AZ91Ti Mg numuneleri.

| | |
|----------------|------------------|
| AZ91 (Kontrol) | AZ91Ti (Kontrol) |
| AZ91+0.025Fe | AZ91Ti+0.025Fe |
| AZ91+0.05Fe | AZ91Ti+0.05Fe |
| AZ91+0.1Fe | AZ91Ti+0.1Fe |

Şekil 3.1a’da numunelerin dökülmüş ve Şekil 3.1b’de 17 mm çap ve 12 mm boy ebatlarında işlenmiş hali verilmiştir.



Şekil 3.1. Numunelerin (a) döküm ve (b) işlenmiş hali.

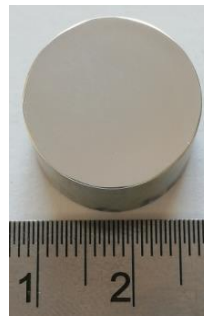
Mg alaşımların analizleri Optik Emisyon Spektrometrede (ICPS) (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Analiz Laboratuarında) yapılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin sahip oldukları kimyasal bileşimler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Numunelerin kimyasal analizleri (% ağırlıkça oran).

| Alaşım | Al | Zn | Mn | Fe | Ti | Cu | Mg |
|-------------------------|------|------|------|-------|--------|-----|-------|
| AZ91 (Kontrol) | 9.1 | 0.85 | 0.28 | 0.018 | <0.002 | <20 | Kalan |
| AZ91+0.025Fe | 8.90 | 0.85 | 0.30 | 0.025 | <0.002 | <20 | Kalan |
| AZ91+0.050Fe | 9.00 | 0.83 | 0.32 | 0.050 | <0.002 | <20 | Kalan |
| AZ91+0.1Fe | 9.15 | 0.87 | 0.29 | 0.10 | <0.002 | <20 | Kalan |
| AZ91Ti (Kontrol) | 9.05 | 0.92 | 0.31 | 0.019 | 0.52 | <20 | Kalan |
| AZ91Ti+0.025Fe | 8.87 | 0.94 | 0.3 | 0.025 | 0.5 | <20 | Kalan |
| AZ91Ti+0.050Fe | 9.13 | 0.83 | 0.27 | 0.050 | 0.60 | <20 | Kalan |
| AZ91Ti+0.1Fe | 9.02 | 0.92 | 0.30 | 0.10 | 0.51 | <20 | Kalan |

3.2. Mikroyapı Deneyi

Dökümü yapılan çubuklardan 17 mm çapında 12 mm boy ebatlarında teslim alınan silindirik numuneler (Şekil 3.2) metalografik incelemeleri yapılmak üzere numunelerin yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işlemleri saf su kullanılarak, sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımpara kağıtları, parlatma işlemi ise polisaj keçesi vasıtasıyla 3 µm ve 1 µm'lük alümina solüsyon kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra numunelerin yüzeyi saf su ve alkol ile yıkanıp kurutulmuş ve Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan JEOL JSM 6060 LV marka Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) mikroyapı görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan magnezyum alaşımı.

Faz analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Panalitikal X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda=1.54059 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ ışınımı kullanılmıştır.

3.3. Korozyon Deneyi

Korozyon deneyleri daldırma deneyi ve elektrokimyasal deney olmak üzere iki farklı yöntem ile yürütülmüştür.

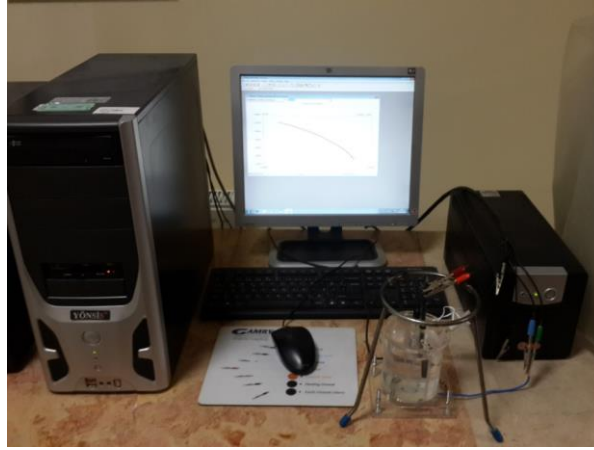
3.3.1. Daldırma deneyi

Daldırma deneyi için numunelerin yüzeyleri sırası ile 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalar ile saf su kullanılarak zımparalama ve 1 μm alümina solüsyon kullanılarak polisaj keçesinde parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra numunelerin yüzey temizliğini sağlamak amacıyla saf su kullanılmış ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur. Metalografik yöntemle hazırlanan numunelerin yüzeyleri temizlendikten ve kurutulduktan sonra 0.001 g hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır.

Numuneler, %3.5 NaCl çözelti içerisinde (oda sıcaklığında) 3, 7 ve 21 gün bekletilmiştir. Her bir deney için 3 adet numune kullanılmıştır. Kaplar belirli zaman aralıklarıyla çalkalanarak 3. 7. ve 21. gün sonunda numuneler çözeltilen çıkartılmıştır. Çözeltilen çıkarılan numuneler, 200 g/L kromik asit çözeltisinde 15 dakika temizlendikten sonra saf su ile ultrasonik olarak 5'er dk temizlenerek kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tekrar hassas terazide tartılmıştır. Korozyon kayıpları, numunelerin birim yüzey alanı başına düşen kütle kaybına göre mg/cm^2 cinsinden değerlendirilmiştir.

3.3.2. Elektrokimyasal deney

Deney numunelerinin (çalışma elektrodu) iletkenliği sağlayabilmek için arka yüzeyine 1.5 mm çapında 300 mm uzunluğunda bakır tel ile temas ettirilerek yalnızca elektrolit ile temasta olan yüzeyleri açıkta kalacak şekilde bağlantı yapılmıştır. Numunelerin yüzeyleri, daldırma deneylerinde olduğu gibi hazırlanmıştır. Şekil 3.2'de potansiyodinamik polarizasyon testleri için kullanılan deney numunesi görülmektedir.



Şekil 3.3. Elektrokimyasal deneyi deney düzeneği.

Korozyon incelemelerinde DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvonostat kullanılmıştır. Deney hücresi olarak 400 ml mika kap kullanılmıştır. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan 6 mm çapında karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Şekil 3.3’de kullanılan korozyon deney düzeneği gösterilmiştir.

Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, %3.5 NaCl çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dk süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{kor}) ulaştıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, -2 V’den +1V’a kadar 1 mVs^{-1} tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) hesaplanmıştır.

3.4. pH Etkisi

pH ölçümleri, daldırma deneyi öncesi ve sonrası 3, 7 ve 21 gün sonunda, oda sıcaklığında Ohaus Starter ST 5000 F masa üstü pH metre ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Mikroyapı

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının mikroyapıları verilmiştir. Alaşımların mikroyapıları incelendiğinde, yapıda Mg matris (α), $Mg_{17}Al_{12}$ (β) fazı, parlak nokta formunda Al-Mn fazı gözlemlenmiştir.

Ayrıca, Şekil 4.1’de Fe içeriğine bağlı olarak mikro yapı değişikliği de gösterilmektedir. Mikroyapıda Fe miktarı arttıkça β fazının kabalaştığı açıkça görülmektedir. β fazının kabalaşması muhtemelen katılaşma sırasında Fe’in dentrit kollarının yapısal alt soğuma değerlerini değiştirerek daha fazla Al’un tane sınırlarına süpürülmesine neden olabilir. Böylece, tane sınırlarına süpürülen yüksek orandaki Al kabalaşmış β fazı oluşmasına neden olabilir. Mikroyapıdaki nokta şeklinde görünen parlak fazların Al-Mn veya Al-Mn-Fe intermetalik fazları olduğu düşünülmektedir.

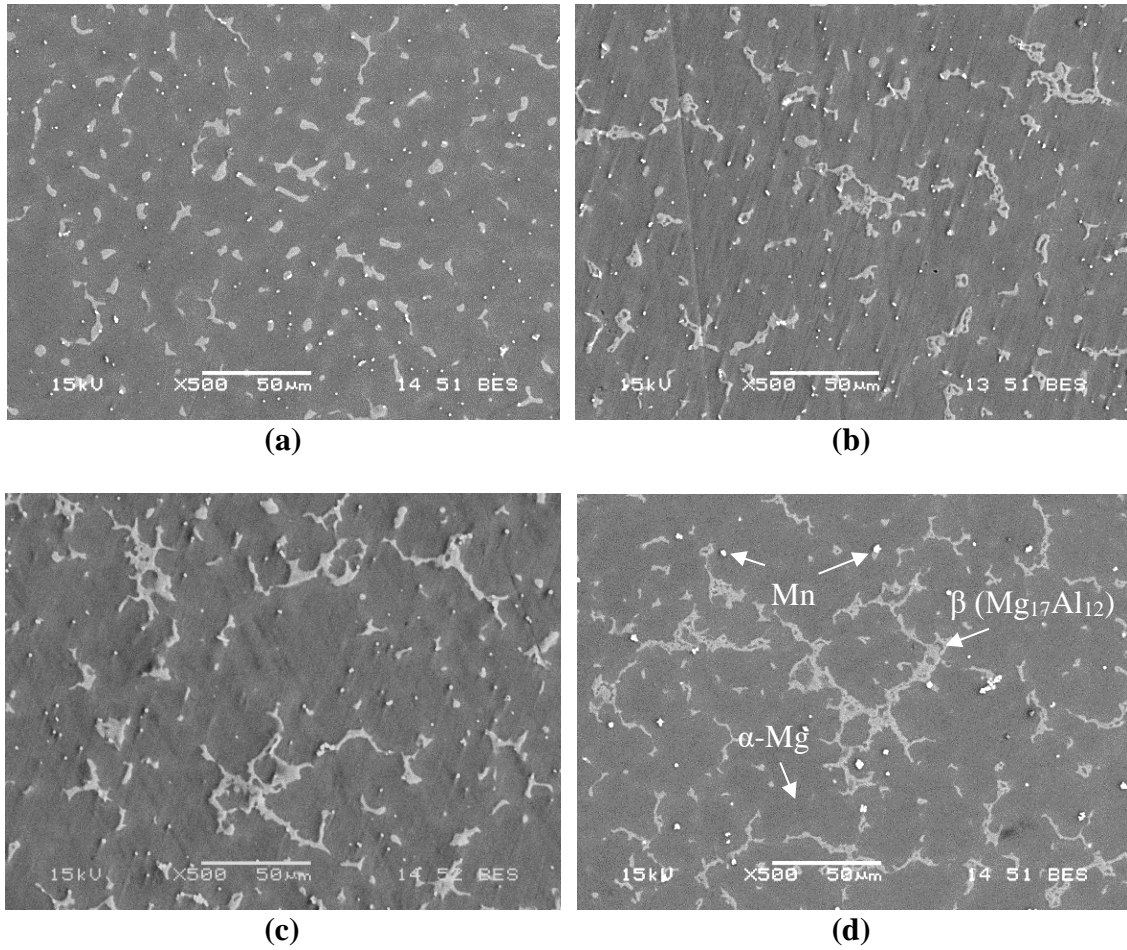
AZ91Ti içeren Mg alaşımının mikroyapılarında (Şekil 4.2) ise Ti ilavesi ile β fazına ait sürekli ağ yapısının bozulduğu daha kopuk, daha izole ve nispeten daha küçük boyutlu β partiküllerine dönüştüğü görülmektedir. Buna ilaveten, Ti içermeyen AZ91 alaşımında olduğu gibi Fe oranının artmasıyla β fazında kısmen kabalaşma meydana geldiği gözlemlenmektedir.

XRD sonuçlarında, AZ91 ve Ti içeren AZ91 Mg alaşımlarının sadece α -Mg ve β intermetalik fazının mevcut olduğu Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te görülmektedir. Mg-Al faz diyagramı incelendiğinde (Bkz. Şekil 1.2) ötektik β fazının Al içeriğinin %13’ün üzerine çıkınca meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, döküm sonrası dengesiz soğuma şartlarında %2’ye kadar bile Al içeriğinde ötektik yapı oluşabilmektedir (Cheng, vd., 2009).

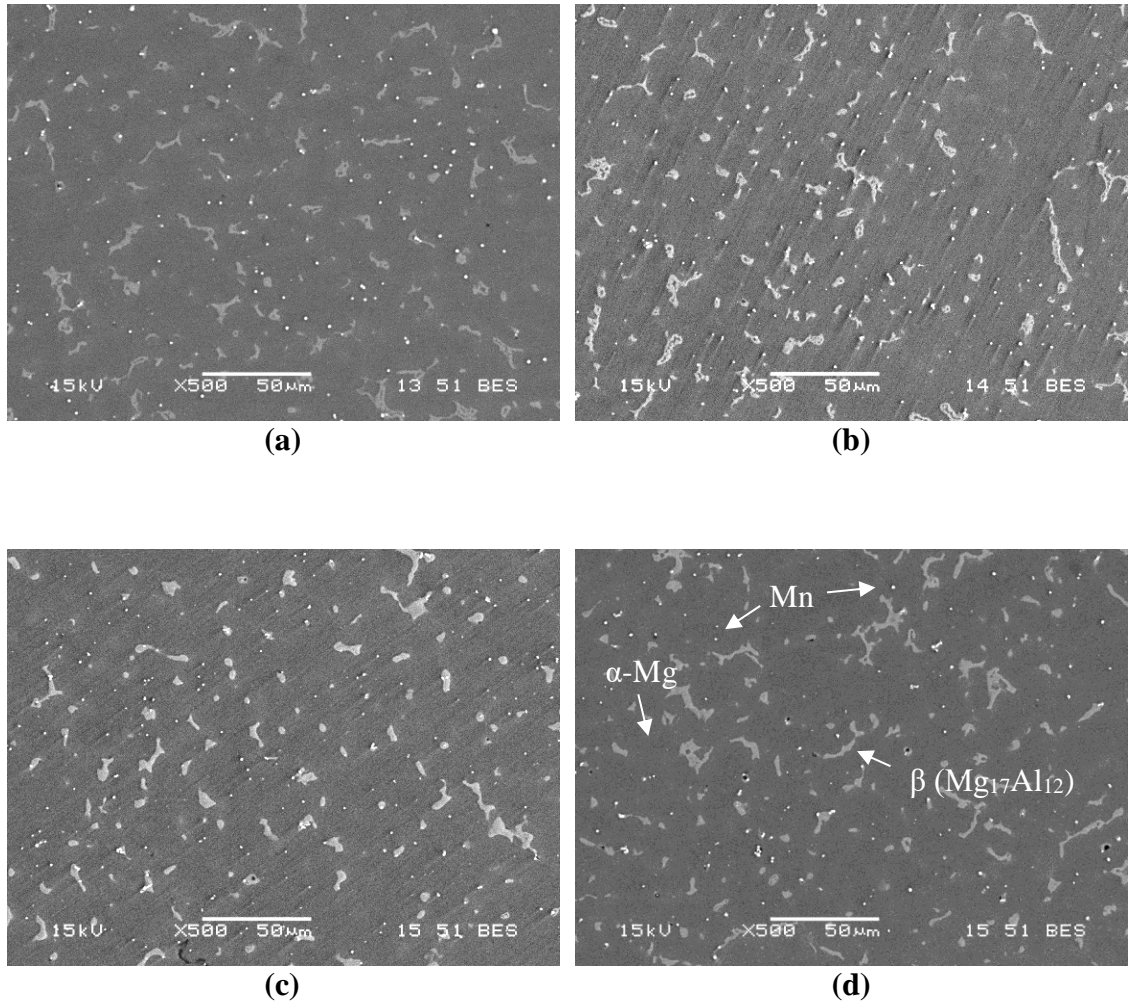
Mg alaşımlarında farklı β fazı morfolojileri Bölüm 2.5.1’de açıklandığı gibi tamamen ayrı, kısmen ayrı veya lameller ötektik şeklinde oluşabilmektedir. Her iki alaşım için ayrıntılı SEM görüntüsü karşılaştırıldığında, β ötektiğinin beyaz renkte, tamamen ayrı, kısmen ayrı ve lamel yapısında olduğu Şekil 4.5a,b’de görülmektedir. Genellikle AZ91 Mg alaşımındaki lamel yapıya sahip ötektik kısmen ayrı ötektiğe bitişik şekildedir (Şekil 4.5b). AZ91 Mg alaşımının yüksek büyültmedeki mikroyapısında gözlemlenen β fazındaki bazı adacıklar ötektik yapının kısmen ayrı olduğunu göstermektedir (Şekil 4.5b). Bu arada, Ti içeren AZ91 Mg alaşımında benzer adacıklara

rastlanmamıştır. Bu durum tamamen ayrı ötektik formun Ti ilavesiyle oluştuğunu göstermektedir (Şekil 4.5c,d).

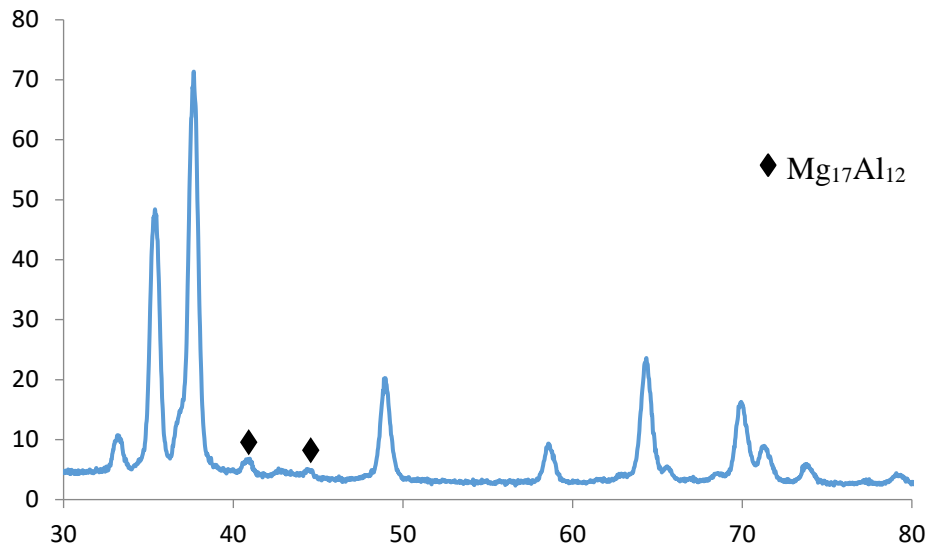
Mg içerisinde Ti'nin çözünürlüğünün çok az olması (%0.2) nedeni ile intermetalik oluşmamaktadır (Polmear, 1999). Candan vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, EDS analizi sonucunda AZ91 ve AZ91Ti içerisinde α -Mg'deki ortalama Al miktarı sırasıyla 3.2 ve 6.1 olduğu rapor edilmiştir. Bu da %0.5Ti ilavesinde α -Mg içerisindeki Al içeriğinin yaklaşık iki kat olduğunu göstermektedir. Ti ilavesinin Mg matris içindeki Al'nin difüzyonunun etkili bir şekilde azalmasına neden olduğu düşünülmektedir (Candan, vd., 2011). Böylece, kısmen ayrı veya lamel ötektiğin bastırılması α -Mg içinde Al'un çözünürlüğünün artmasına dayandırılabilir. Daha önce de açıklandığı üzere (Bkz. Bölüm 2.5.1) tamamen ayrı yapı hızlı katılaşma veya düşük Al içeriğinde oluşur. α -Mg içinde Al'un artması dentrit uçlarında segrege Al miktarını azaltır ki bu da tamamen ayrı ötektik oluşumunu güçlendirir.



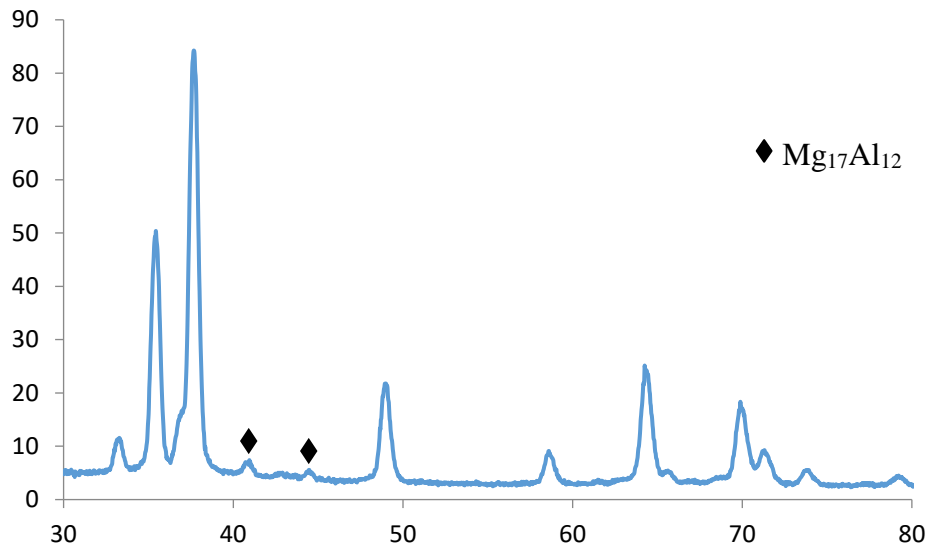
Şekil 4.1. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı SEM görüntüleri.



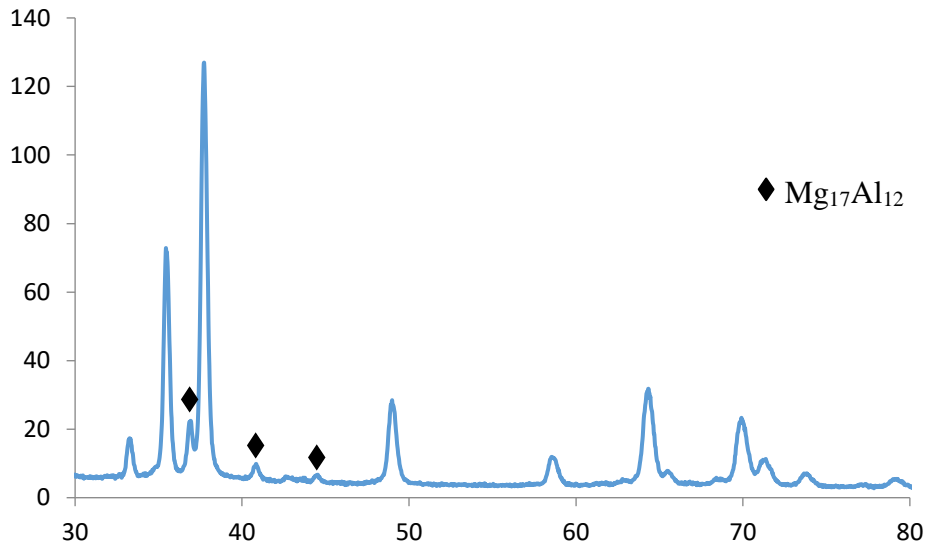
Şekil 4.2. (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı SEM görüntüleri.



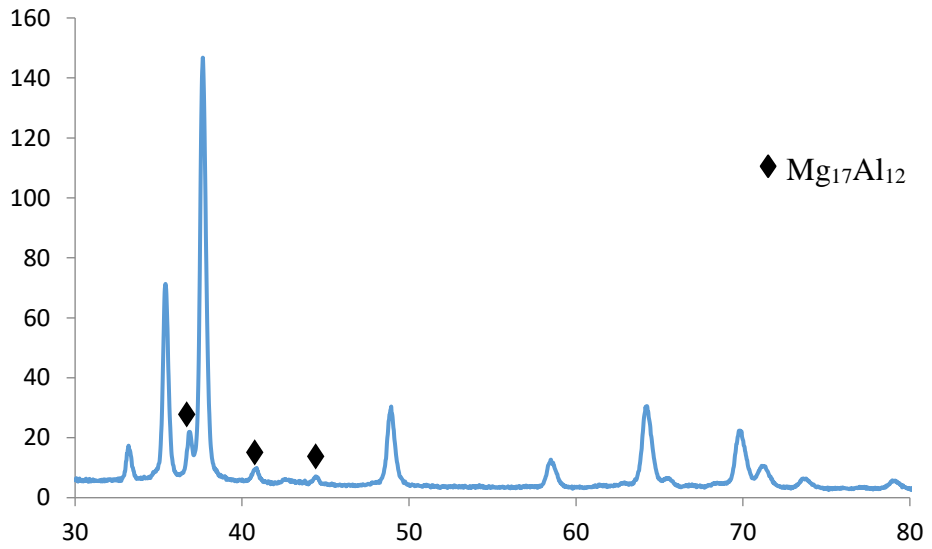
(a)



(b)

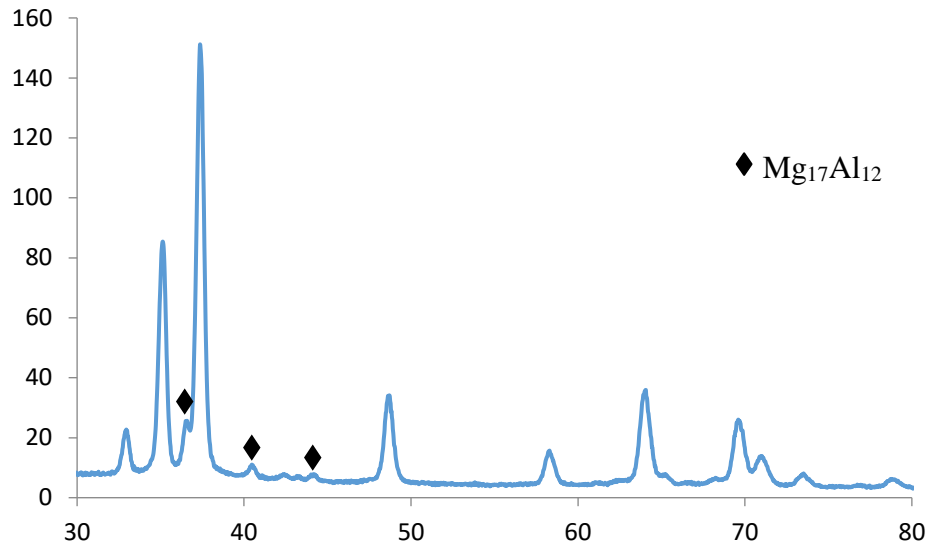


(c)

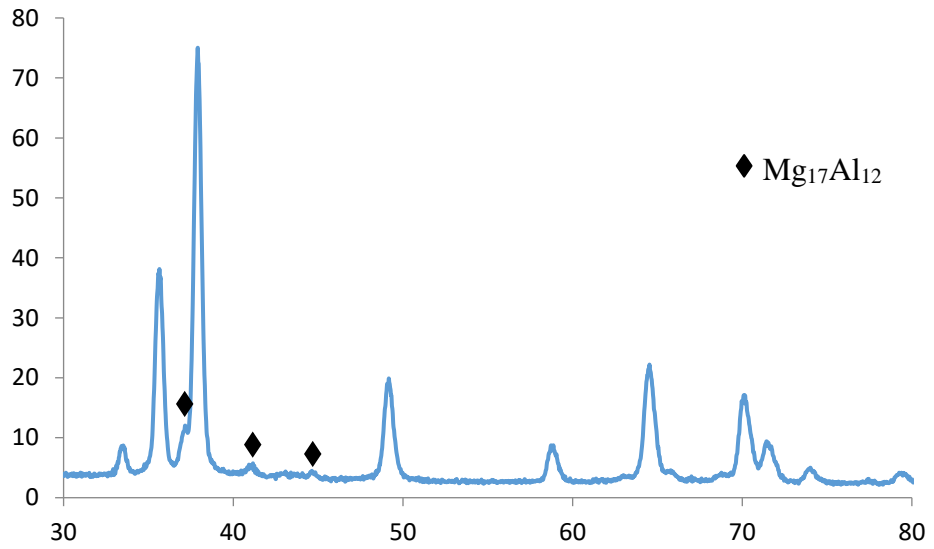


(d)

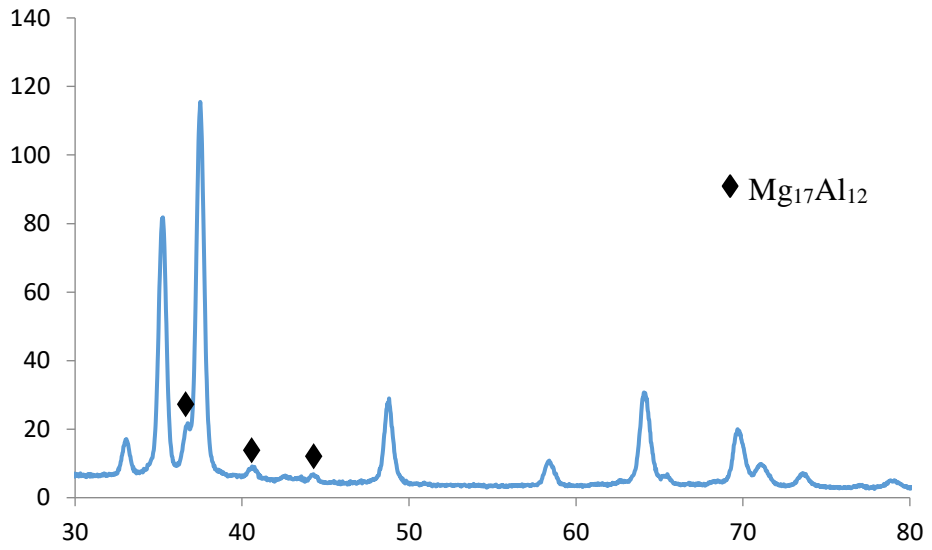
Şekil 4.3. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı Mg alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleri.



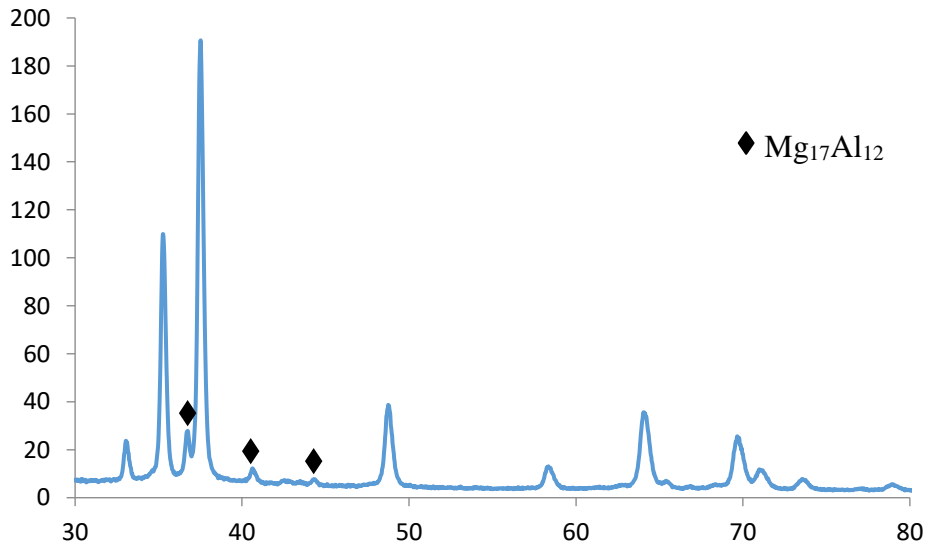
(a)



(b)

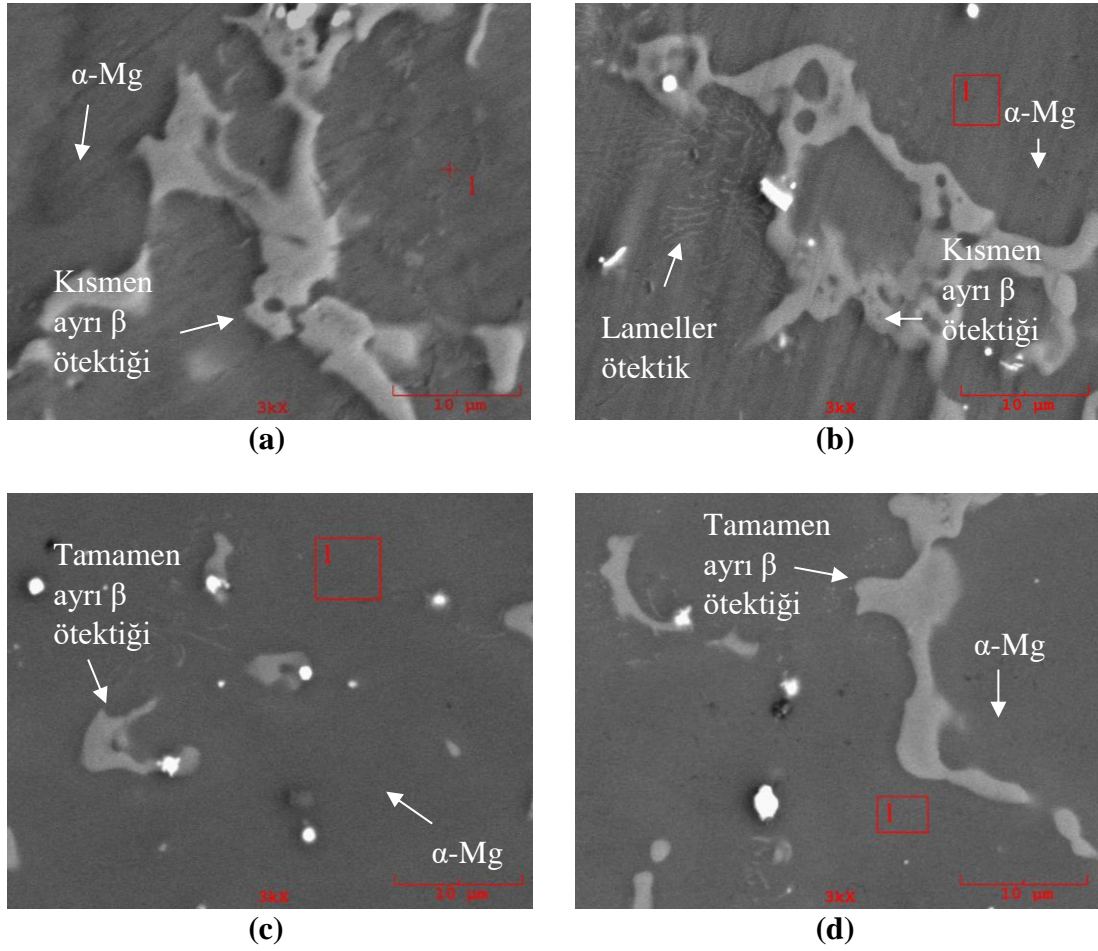


(c)



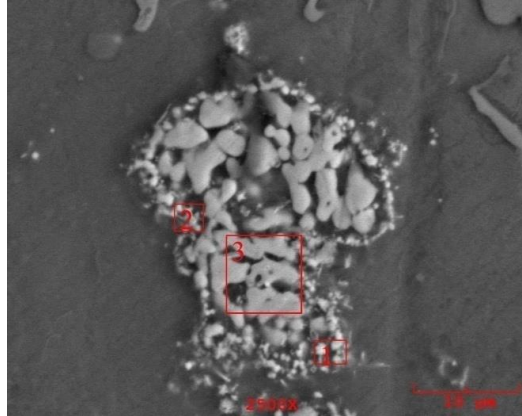
(d)

Şekil 4.4. (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı X-Ray Difraksiyon analizleri.



Şekil 4.5. (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.1Fe, (c) AZ91Ti Kontrol ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi.

Yukarıda bahsedilen fazların haricinde ayrıca, Ti içeren alaşımlarda çok az oranda etrafi iğnemsı yapı ile çevrili parlak farklı bir fazın oluşumu da dikkati çekmektedir (Şekil 4.6). Söz konusu fazın Al-Ti-Fe-Mn elementleri içerdiği SEM-EDS analizi ile tespit edilmiştir (Çizelge 4.1). Parlak faz mikroyapıda çok az oranda bulunduğu için XRD analizlerinde gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.6. AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımında Al-Ti-Fe-Mn içeren parlak fazların morfolojisi.

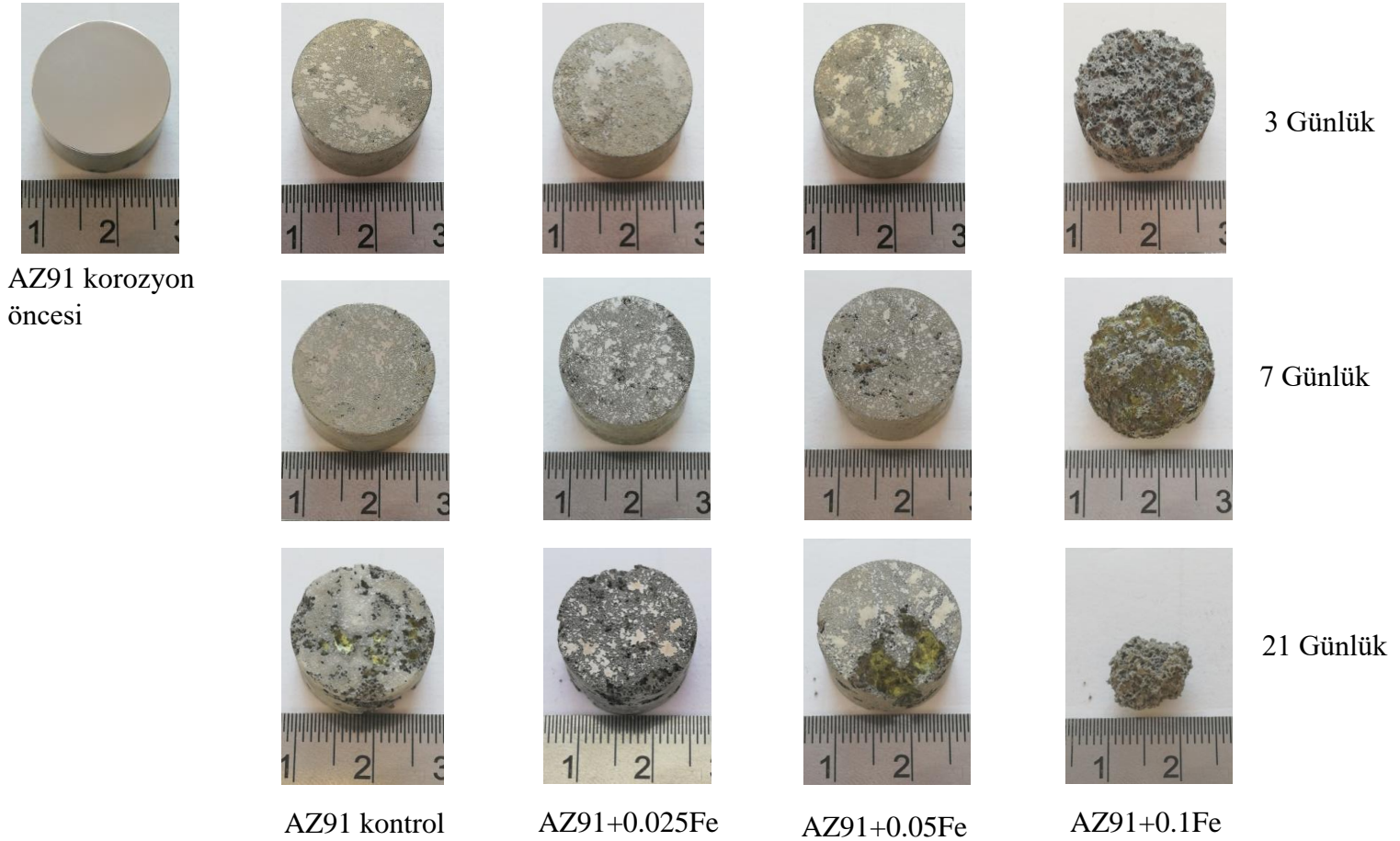
Çizelge 4. 1. Şekil 4.5 'te gösterilen bölgelerin EDS analiz sonuçları.

| Alan/Element (% ağı.) | Mg | Al | Zn | Ti | Mn | Fe |
|--------------------------|------|------|-----|------|-----|-----|
| 1 | 47.3 | 29.9 | 1.1 | 15.3 | 1.3 | 7.8 |
| 2 | 48.9 | 24.9 | 0.6 | 23.3 | 0.5 | 3.7 |
| 3 | 21.2 | 45.7 | 1.1 | 30.4 | 0.8 | 0.8 |

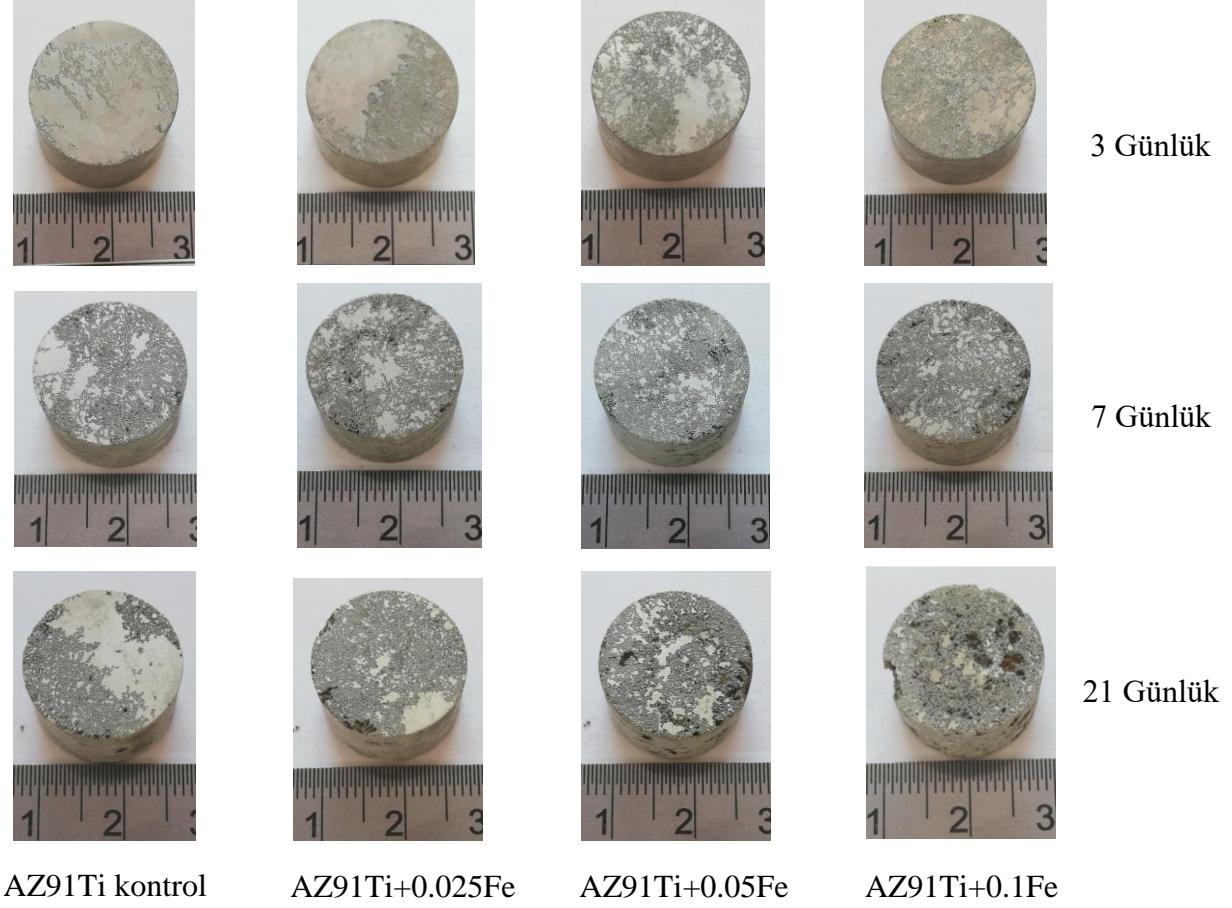
4.2. Korozyon

4.2.1. Makroyapı incelemeleri

Farklı Fe empürite oranlarına bağlı, korozyon öncesi ve sonrası AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının makroyapı fotoğrafları 3, 7 ve 21 gün için sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Makro yapılardan da görüldüğü gibi bütün numunelerin Cl^- iyonu içeren ortamda bekletilmelerinden dolayı korozyona uğradıkları ve Fe oranının artması ile korozyon direncinin azaldığı görülmüştür. 21. günün sonunda en fazla korozyona uğrayan alaşımın en yüksek Fe empürite oranı içeren AZ91+0.10Fe alaşımı olduğu ve aynı alaşımının tekrar edilen bazı numunelerinin ise tamamen çözüldüğü gözlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.7. AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı korozyon öncesi ve sonrası AZ91 Kontrol, AZ91+0.025Fe, AZ91+0.05Fe ve AZ91+0.1Fe makroyapı resimleri.

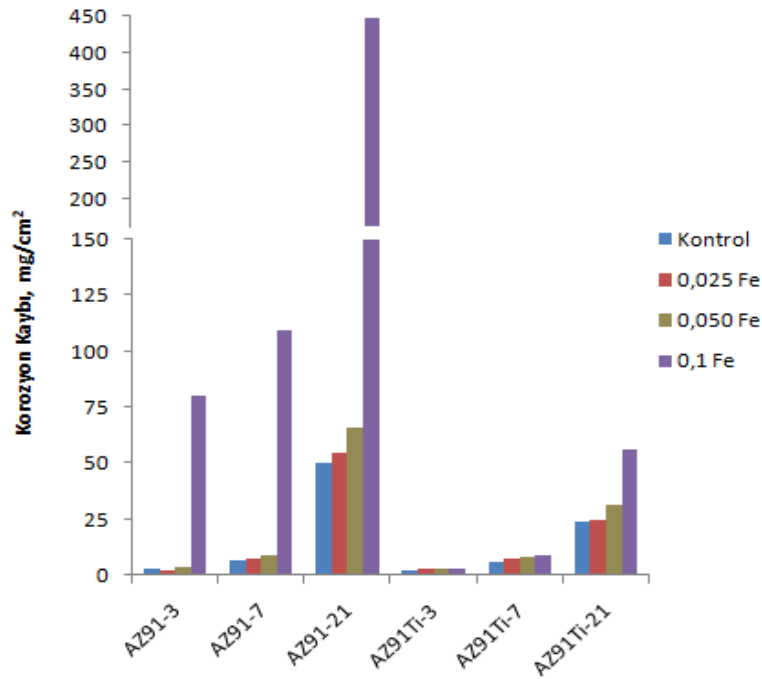


Şekil 4.8. AZ91Ti Mg alaşımının Fe oranına bağlı korozyon sonrası AZ91Ti Kontrol, AZ91Ti+0.025Fe, AZ91Ti+0.05Fe ve AZ91Ti+0.1Fe makroyapı resimleri.

4.2.2. Korozyon kaybı

AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe empürite oranlarına bağlı korozyon kaybı Şekil 4.9’da verilmiştir. Korozyon kaybı, korozyon öncesi ve sonrası ağırlık değişiminin numune yüzey alanına oranlanmasıyla (mg/cm^2) hesaplanmıştır.

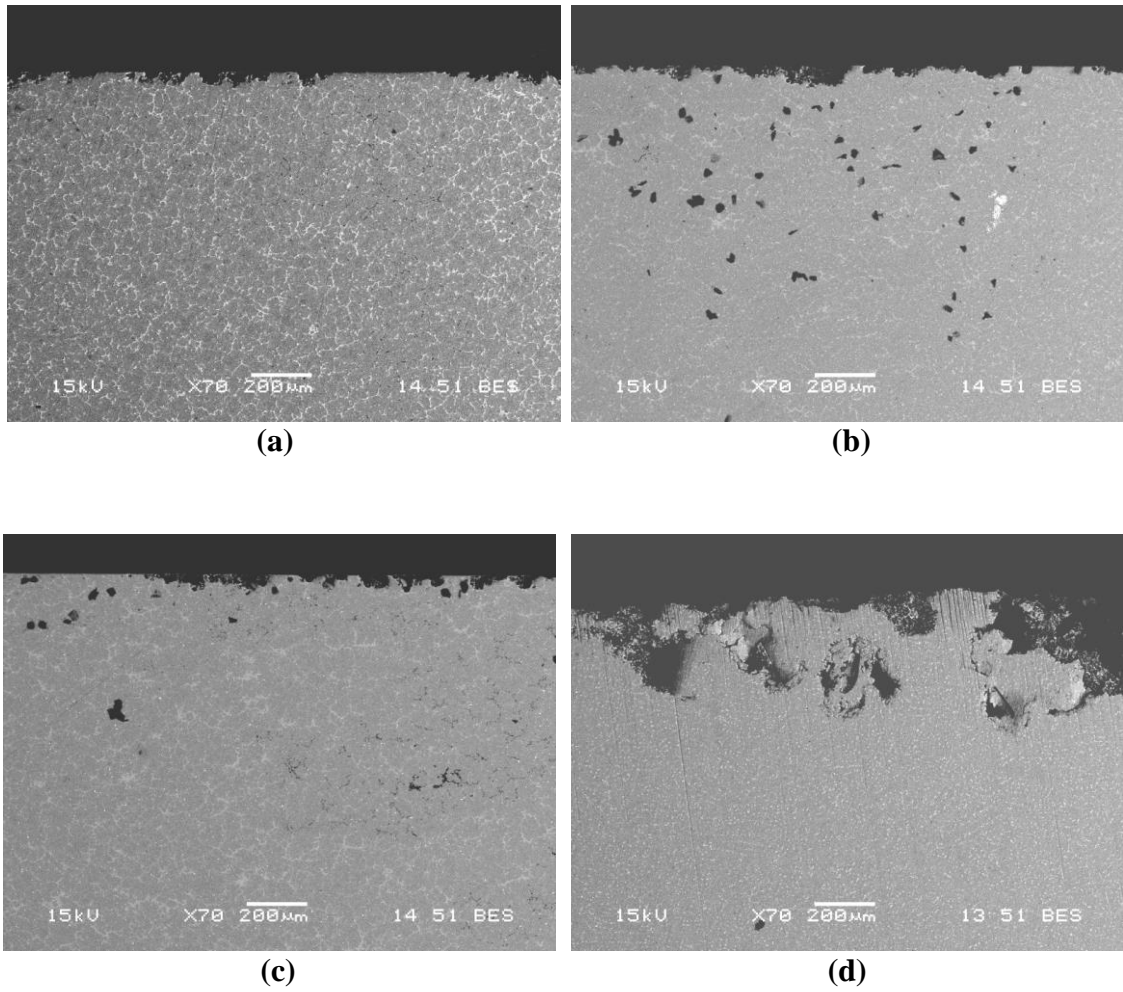
Bütün alaşımlarda Fe empürite oranındaki artışa bağlı olarak korozyon kaybının arttığı görülmektedir. Tüm deneyler en az 3 adet numune için ortalama sonuçlar olup, 21. günün sonunda en yüksek Fe empüritesi içeren AZ91+0.1Fe alaşımının tekrar edilen bazı numunelerinin tamamen çözündüğü gözlenmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi alaşımlardaki korozyon kaybı içerdikleri Fe oranına bağlı olarak değişmiştir ve en fazla korozyon kaybının en yüksek Fe içeren AZ91+0.1Fe alaşımında meydana geldiği gözlenmiştir.



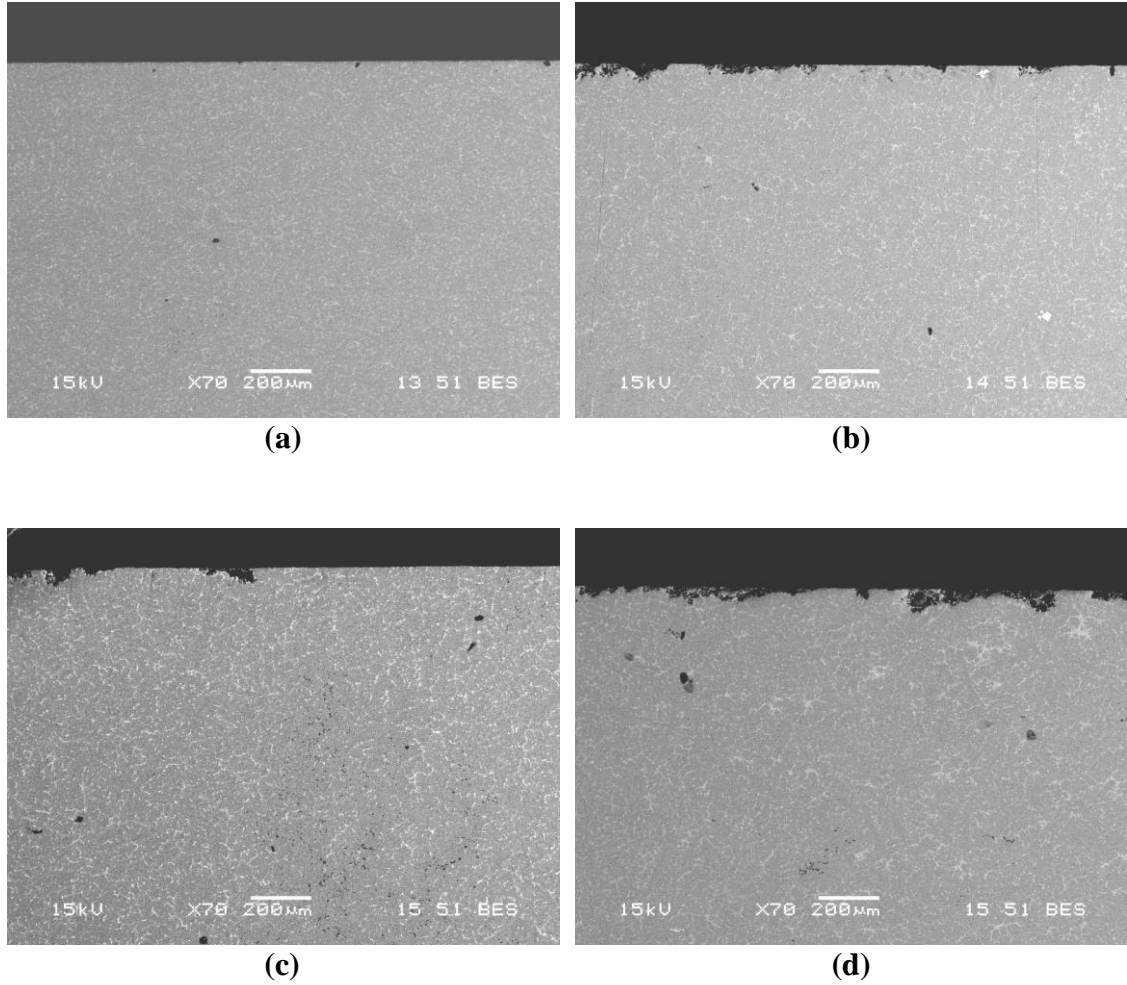
Şekil 4.9. AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe oranlarına bağlı korozyon kaybı.

Şekil 4.10 ve 4.11’de, %3.5 NaCl çözeltisinde 3 gün bekletilen AZ91 ve AZ91Ti içeren Mg alaşımlarının kesit SEM mikroyapıları verilmektedir. Tüm alaşımların kesit SEM görüntüleri incelendiğinde, %0.05’in üstünde Fe içeren alaşımın daha fazla korozyona uğradığı görülmektedir. SEM analizleri korozyon kaybı sonuçlarını teyit

ederek en fazla korozyona uğrayan alaşımın AZ91+0.1Fe olduğunu göstermektedir. AZ91 kontrol numunesinin yüzeyi ile kıyaslandığında Fe içeren numunelerde korozyonun iç kısımlara ilerlediği görülmektedir. Bu durum korozyonun β fazları boyunca iç kısma ilerlediğini işaret etmektedir. %0.1 Fe içeren numune kesiti incelendiğinde, büyük çukurların muhtemelen korozyonun β fazını takip ederek büyük parçalar halinde yüzeyden ayrılması nedeniyle meydana gelmektedir. Daldırma deneylerinde zamanla katı parçaların yüzeyden dibe döküldüğü gözlenmiştir ki bu da yukarıdaki görüşü desteklemektedir.

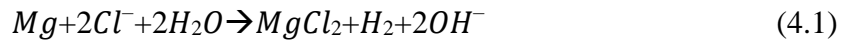


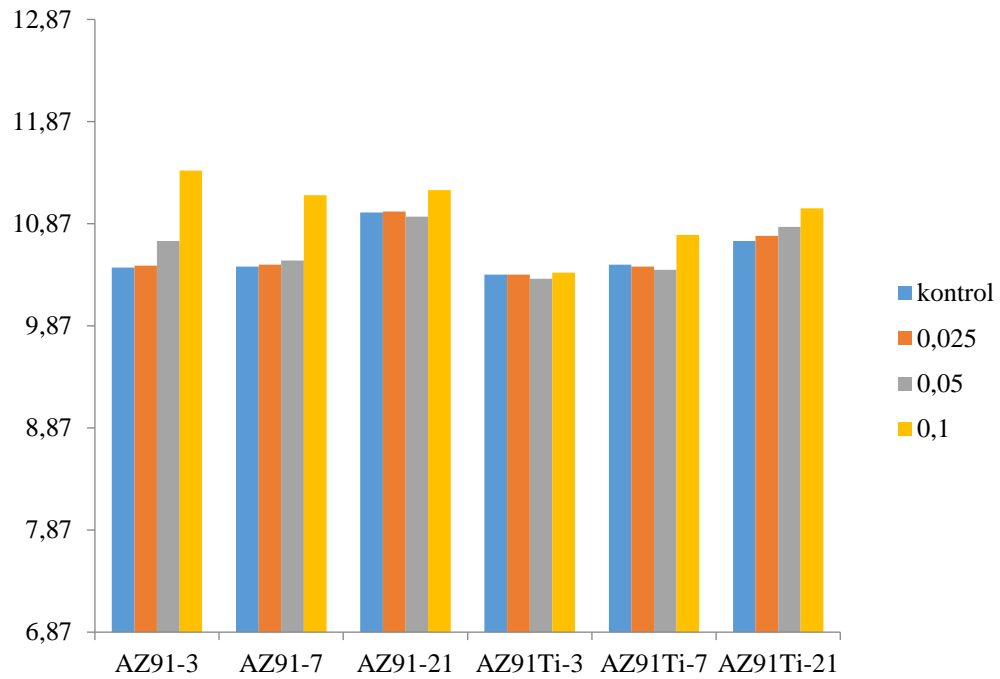
Şekil 4.10. 3 gün korozyon ortamında tutulan (a) AZ91 Kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe Mg alaşımının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri.



Şekil 4.11. 3 gün korozyon ortamında tutulan (a) AZ91Ti Kontrol, (b) AZ91Ti+0.025Fe, (c) AZ91Ti+0.05Fe ve (d) AZ91Ti+0.1Fe Mg alaşımının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri.

Şekil 4.12’de, daldırma deneyi öncesi ve 3, 7, 21 gün daldırma deneyi sonrası yapılan pH ölçümleri sonuçları verilmiştir. Daldırma deneyi öncesi 6.87 olarak ölçülen %3.5 NaCl çözeltisinin pH değeri 3 gün sonra yaklaşık 11 olarak ölçülmüştür. pH değerindeki değişim korozyon mekanizmasının gerçekleşme hızı hakkında bilgi vermektedir (Gerengi vd., 2017). pH artışı metalde gerçekleşen katodik reaksiyonlar sonucu H^+ iyonlarının tüketilmesine bağlı olduğu eşitlikte gösterilmektedir (4.1).



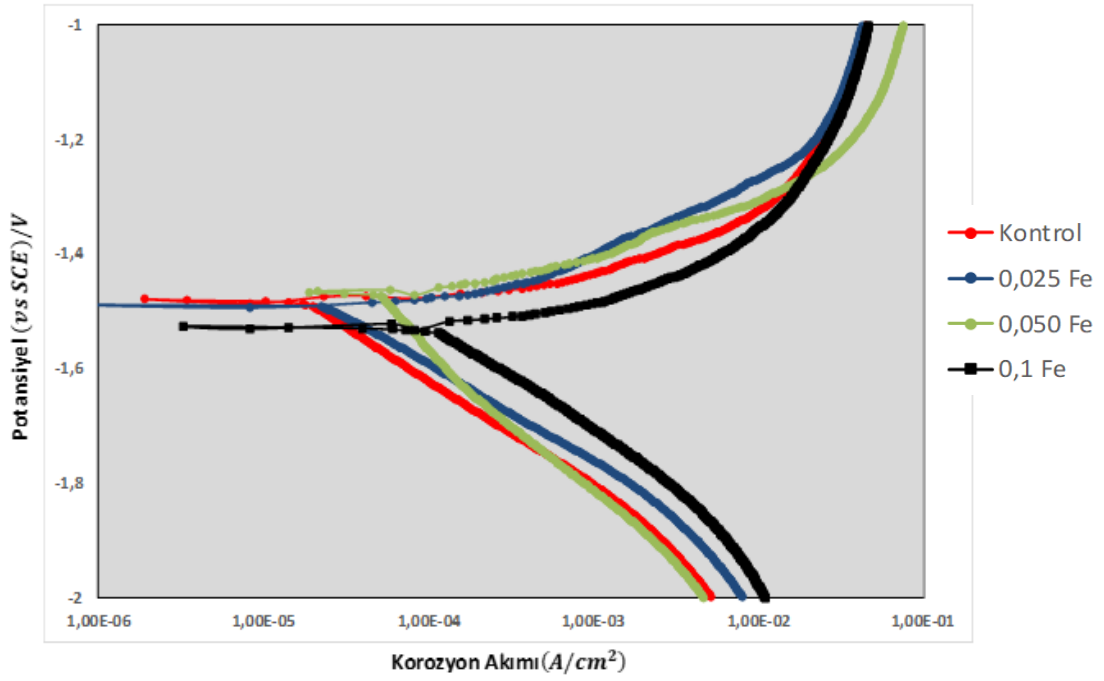


Şekil 4.12. AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı daldırma deneyi öncesi ve sonrası %3.5 NaCl çözeltisindeki pH değişimi.

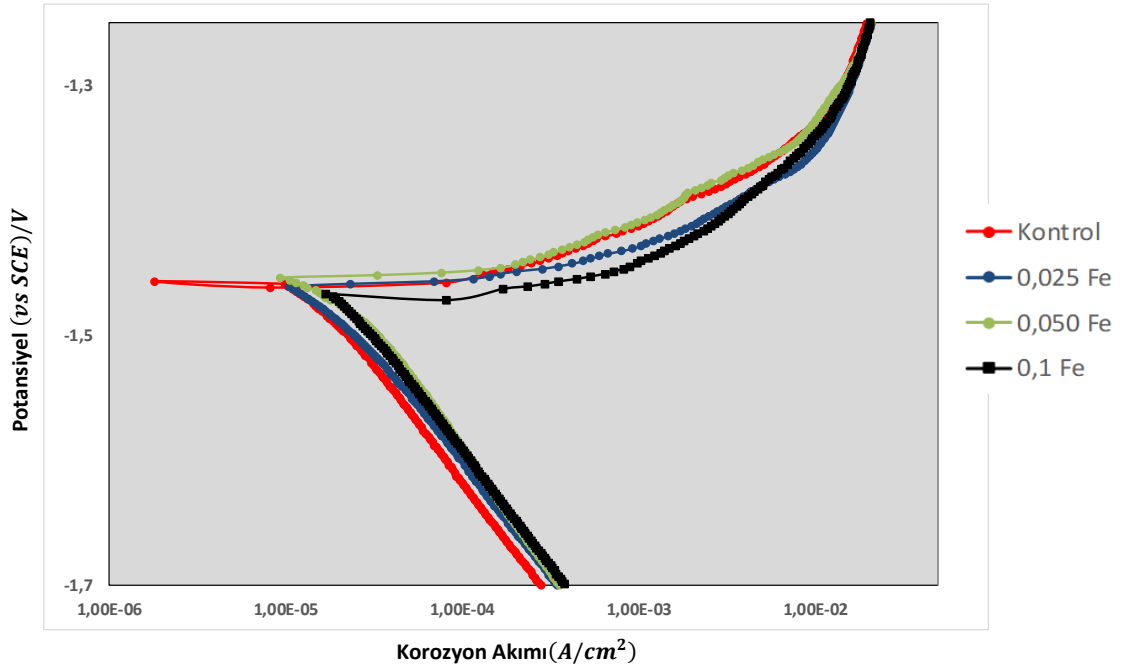
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi AZ91 alaşımlarında Fe oranı artışı ile pH oranı artmaktadır. Bu durum kullanılan tüm alaşımlar için geçerli olsa da oransal olarak Ti içeren alaşımlarda artış biraz daha az gözlemlenmiştir. Özellikle ilk 3 gün için Ti ilavesinin pH oranındaki artışı baskıladığı Şekil 4.16’dan açıkça görülmektedir. pH artışındaki oransal değişim %0.1Fe içeren alaşımlarda daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır ki bu da yüksek Fe içeren alaşımların daha fazla korozyona uğradığını göstermektedir.

4.2.3. Elektrokimyasal test

%3.5 NaCl ortamında AZ91 ve AZ91Ti Mg alaşımlarının Fe oranlarına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve polarizasyon eğrilerinden elde edilen I_{kor} ve E_{kor} değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Fe oranının artması ile AZ91 Mg alaşımlarının I_{kor} değerleri artma eğilimi göstermektedir. Aynı zamanda Fe oranına bağlı olarak elektrokimyasal test sonuçları, korozyon kaybı sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 4.13. AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.



Şekil 4.14. AZ91Ti Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Çizelge 4.2. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen, AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyon potansiyelleri (E_{kor}), korozyon akım yoğunlukları (I_{kor}) ve korozyon hızları (CR).

| Alaşım | E_{kor} (V) | I_{kor} ($\mu A/cm^2$) | CR (mpy) |
|-----------------------|---------------|----------------------------|----------|
| AZ91 Kontrol | -1481 | 25.43 | 22.33 |
| AZ91+0.025Fe | -1454 | 36.72 | 32.24 |
| AZ91+0.050Fe | -1473 | 54.93 | 47.45 |
| AZ91+0.10Fe | -1528 | 161.1 | 144.1 |
| AZ91Ti Kontrol | -1459 | 17.30 | 15.19 |
| AZ91Ti+0.025Fe | -1460 | 21.50 | 18.88 |
| AZ91Ti+0.050Fe | -1454 | 25.42 | 22.33 |
| AZ91Ti+0.1Fe | -1470 | 30.38 | 26.68 |

AZ91 alaşımının Ti içeren alaşımlara göre daha yüksek korozyona maruz kalmasının nedeni, mikroyapı içerisindeki β intermetalik fazının miktarı ve morfolojisine dayandırılmaktadır. Galvanik korozyonun temelinde göre, anot (α -Mg) ile kıyaslandığında katot (intermetalikler) oranının büyük olması galvanik korozyonu hızlandırıcı rol oynar (Song ve Atrens, 1999). Ti ilavesi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görüldüğü üzere β fazının dağılımını, sürekliliğini ve genişliğini azaltmıştır. Bununla birlikte Ti matris içerisindeki katı eriyik Al miktarını da arttırmaktadır. Bu noktadan, azalan katot miktarı korozyonu azaltıcı etki yapabilir.

Candan vd., (2011, 2016) çalışmalarında, %0.022 Fe ve %0.09 Fe içeren AZ91 alaşımına %0.5Ti ilavesi ile korozyon kaybının yaklaşık 5 mg/cm^2 olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada ise aynı oranda Ti içeren AZ91 alaşımının korozyon kaybının yaklaşık 3 mg/cm^2 civarında olduğu hesaplanmıştır ki bu sonuçlar onların çalışması ile uyumluluk göstermektedir. Deney sonuçları şunu göstermiştir ki, AZ91 alaşımında bulunan kısmen ayrı β ve lamel ötektiklerinin Ti ilavesi ile kayda değer biçimde azalması ve azalan bu fazların da tamamen ayrı β -ötektiğine dönüşmesi sonucu korozyon kaybında kayda değer azalma meydana getirmiştir.

Yine bu çalışmalarda (Candan, vd., 2011, Candan, 2016), AZ91 Mg alaşımına Ti ilavesinin üç türlü etkisi olduğu rapor edilmiştir; Birincisi, dentritik yapı içerisinde Al

miktarını arttırması, ikincisi tamamen ayrı β -ötektiğinin oluşumunu teşvik etmesi (mikroyapı bölümünde açıklanmıştır) ve üçüncüsü ise α -Mg'de bulunan eser Fe'nin Ti tarafından bağlanarak yeni bir fazı oluşturmasıdır. Şekil 4.6'da Ti-Fe-Mn içeren faz ve Çizelge 4'de bu fazların EDS analizi incelendiğinde dikkati çeken nokta, Fe miktarının %7.8 civarında olmasıdır. Mikroyapıda toplam Fe oranının %0.1 civarında olduğu OES analizleri ile tespit edildiği noktasından bakıldığında parlak fazda %7.8 civarında Fe bulunması α -Mg içerisindeki Fe oranının %0.1'in oldukça altına düştüğünü işaret etmektedir. Bu durumun EDS ile tespiti oldukça zordur, ayrıca Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) analizi gerektirmektedir. Metalin ergitilmesi ve katılaşması sırasında Ti büyük ihtimalle Fe'i bağlayarak Mg alaşımlarındaki Fe'nin zararlı etkisini azalttığı kanaatine varılmıştır. Bu yaklaşım, farklı Fe miktarları olmasına rağmen %0.5Ti ile aynı korozyon kayıplarının elde edilmesi Ti'nin yapı içerisinde sadece iyi bir ötektik modifiye elementi etkisi olmayıp aynı zamanda Fe'yi de etkili bir biçimde yapı içinden temizleme (scavenge) etkisi gösterdiğini ispatlamaktadır (Candan, vd.,2011).

5. SONUÇLAR

Deneysel sonuçlar, her iki alaşımda da (AZ91 ve AZ91Ti) taneler arasında ağ şeklinde intermetalik fazın, oluştuğunu göstermiştir. XRD analizleri ile bu fazın β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazı olduğu tespit edilmiştir.

Mikroyapıda Mg matris (α), $Mg_{17}Al_{12}$ (β) fazının yanı sıra parlak nokta formunda Al-Mn fazı olduğu SEM analizleri ile gözlemlenmiştir. EDS analizleri bu fazın muhtemelen AlMn fazı olduğunu işaret etmektedir.

AZ91 alaşımı ile kıyaslandığında, Ti içeren Mg alaşımlarının mikro yapılarında β fazı ağ yapısının bozulduğu daha kopuk, daha izole ve nispeten daha küçük boyutlu β partiküllerine dönüştüğü gözlenmiştir.

Ti içeren AZ91 Mg alaşımının β -faz morfolojisi kısmen ayrı veya lamel tipi ötektikten çok tamamen ayrı ötektik şeklinde oluşmaktadır.

Fe oranının artması, her iki alaşımda da β -fazı kabalaşmasını teşvik ettiğini göstermiştir. β fazının kabalaşması, Fe oranının artışı ile AZ91 alaşımında çok daha aktif iken AZ91Ti alaşımlarında kabalaşma çok daha az olmuştur.

Ti içeren alaşımlarda ayrıca, çok az oranda etrafi iğnemsî yapı ile çevrili parlak farklı bir fazın oluşumu gözlenmiştir. Söz konusu fazın Al-Ti-Fe-Mn elementleri içerdiği SEM-EDS analizi ile tespit edilmiştir. Aynı zamanda, Fe oranı artışı ile bu faz mikroyapıda daha fazla ve belirgin olmaktadır.

Polarizasyon testleri, Fe oranı artışı ile I_{kor} değerlerinin arttığını, Ti içeren alaşımlarda ise Fe oranı artışı ile I_{kor} değerlerindeki artış oranının çok daha az olduğunu göstermiştir.

AZ91 alaşımı Fe tolerans limit değerinin max. %0.05'e kadar olduğunu bu değerden sonra korozyon kaybı eksponansiyel olarak artmaktadır. Ti, AZ91 alaşımlarında çok yüksek Fe empürite oranlarında (%0.1Fe) dahi korozyon direncini kayda değer oranda arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S., “Biodegradable Magnesium Alloys For Orthopaedic Applications: A Review On Corrosion Biocompatibility and Surface Modifications”, *Materials Science and Engineering*, 68: 948 – 963 (2016).
- Aghion, E., Bronfin, B., Eliezer, D., “The Role of the Magnesium Industry in protecting the Environment”, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 381 – 385 (2001).
- Ai, X., Quan, G., “Effect of Ti in the Mechanical Properties and Corrosion of Cast AZ91 Magnesium Alloy”, *The Open Materials Science Journal*, 6: 6-13 (2012).
- Aizawa, T., Song, R., “Mechanically Induced Reaction for Solid-State Synthesis of Mg₂Si and Mg₂Sn”, *Intermetallics*, 14: 382-291 (2006).
- Altun, H., “Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamalarının Korozyon Davranışlarının Etkisi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum (2004).
- Andreas, F.B., Christian, L., Andreas, F., Johann, W., “The New BMW Inline Six-Cylinder Composite Mg/Al Crankcase”, *62nd Annual World Magnesium Conference in IMA05*, May 22 – 24, Berlin (2005).
- ASM Handbook, “Corrosion”, *ASM International*, ISBN 0-87170-007-7, 13 (1987).
- Avedesian, M.M., Baker, H., “Magnesium and Magnesium Alloys”, *ASM Specialty Handbook*, 1, USA, (1999).
- Badea, G. E.; Caraban, A., Sebesan, M., Dzitac, S., Cret, P. ve Setel, A., “Polarisation Measurements Used For Corrosion Rates Determination”, *Journal of Sustainable Energy*, 1: 2067-2070 (2010).
- Baker, H., “Alloy Phase Diagrams”, *ASM Handbook*, 3, USA (1998).
- Barber, L.P., “Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys”, Yüksek Lisans Tezi, Degree of Master in Materials Science and Engineering, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester (2004).
- Berglund, I.S., Brar, H.S., Dolgova, N., Acharya A.P., Keselowsky B.G., Sarntinoranont, M. and Manuel M.N., “Synthesis and Characterization of Mg-Ca-Sr Alloys for Biodegradable Orthopedic Implant Applications”, *Journal of Biomedical Materials Research part B 100B*, 100 (6): 1524-1534 (2012).
- Blawert, C., Hort, N., Kainer, K.U., “Automotive Applications of Magnesium And Its Alloys”, *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 57 :397 – 408 (2004).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Brar, H.S., Wong J. and Manuel, M.V., “Investigation of the Mechanical and Degradation Properties of Mg-Sr and Mg-Zn-Sr Alloys for Use As Potential Biodegradable Implant Materials”, *Journal of Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 7: 87-95 (2012).
- Brungs, D., “Light Weight Design with Light Metal Casting”, *Materials and Design*, 18: 285-291 (1997).
- Cai, S., Lei, T., Li, N., Feng, F., “Effects of Zn on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Mg-Zn Alloys” *Materials Science and Engineering*, C 32: 2570-2577 (2012).
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, Kenan Genel, 8.Baskıdan Çeviri, *Nobel Akademik Yayıncılık*, İstanbul (2015).
- Candan S., Candan E., “A Comparative Study on Corrosion of Mg-Al-Zn alloys”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28 (4): 642-650 (2018).
- Candan, Ş., Çim, S., Emir, S., Candan, E., “AZ Serisi Mg Alaşımlarının Korozyon Davranışlarında β -Fazının Rolü”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6: 1139-1162 (2018).
- Candan, S., Ünal, U., Türkmen, M., Candan, E., “Improvement of Mechanical and Corrosion Properties of Magnesium Alloy by Lead Additon”, *Material Science Engineering*, 501: 115-118 (2009).
- Candan, S., Çelik, M., Candan E., “Effectiveness of Ti-Micro Alloying in Relation To Cooling Rate On Corrosion of AZ91 Mg Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 672: 197 – 203 (2016).
- Candan, S., Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Candan, E., “Effects of Titanium Addition on Mechanical and Corrosion Behaviors of AZ91 Magnesium Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 1958 -1963 (2011).
- Chang, T.C., Wang, J.Y., Chu, C.L. and Lee, S., “Mechanical Properties and Microstructures of Various Mg-Li Alloys”, *Materials Letters*, 60 :3272-3276 (2006).
- Chen, J., Sun, Y., Zhang, J., Cheng, W., Niu, X., Xu, C., “Effect of Ti Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Zr-Ca Alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 3: 121 – 126 (2015).
- Choi, H.Y., Kim, W.J., “Development of The Highly Corrosion Resistant AZ31 Magnesium Alloy By The Addition of A Trace Amount of Ti”, *Journal of Alloys and Compounds*, 664: 25- 37 (2016).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Choi, H.Y., Kim, W.J., “The Improvement of Corrosion Resistance of AZ91 Magnesium Alloy Through Development of Dense and Tight Network Structure of Al-Rich α Phase By Addition of Trace Amount of Ti”, *Journal of Alloys and Compounds*, 696: 736-745 (2017).
- Choi, J.Y., Kim, W.J., “Significant Effects of Adding Trace Amounts of Ti On The Microstructure And Corrosion Properties of Mg-6Al-1Zn Magnesium Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 614: 49 – 55 (2014).
- Chong, F., Minghao, L., Ang, H., Haiyan, W., Xiaoyan, L., Liuqun, F., “Effect of Ca on Corrosion Resistance Behaviour of as-cast AZ91 Magnesium Alloys”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(1): 41-47 (2015).
- Çelik, M., “AZ91 Magnezyum Alaşımlarında Soğuma Hızlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik (2014).
- Dahle, A.K., Lee, Y.C., Nave, M.D., Schaffer, P.L., Stjohn, D.H., “Development of the As-Cast Microstructure in Magnesium-Aluminium Alloys”, *Journal of Light Metals*, 1: 61-72 (2001).
- Das, S. K., Davis, L.A., “High Performance Aerospace Alloys via Rapid Solidification Processing”, *Materials Science and Engineering*, 98: 1-12 (1988).
- Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P. and Li, Y., “Effects of Alloying Elements on the Corrosion Behaviour and Biocompatibility of Biodegradable Magnesium Alloys: A Review”, *Journal of Materials Chemistry B*, 2 (14): 1912-1933 (2014).
- Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Dobrzanska-Danikiewicz, A.D., Krol, M., Malara, S., Domagala-Dubiel, J., “Mg-Al-Zn Alloy Structure and Properties”, *Open Access Library*, 5: 15 – 25 (2012).
- Doruk, M., “Korozyon ve Önlenmesi”, *ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayını*, Ankara, 70 (1982).
- Dziubinska, A., Gontarz, A., “A New Method For Producing Magnesium Alloy Twin-Rib Aircraft Brackets”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 87: 180-188 (2015).
- 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).
- Fan, Y., Wu, G., Zhai, C., “Effect of Strontium on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of AZ91”, *Materials Science*, 546-549: 567-570 (2007).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Fan, Y., Wu, Z., Jing-Huai, Xiao-dong, N., Xin, Q., Ke, L., Chang-ming, N., Ding-xiang, T., Jian, M., “Effect of Yttrium-Rich Misch Metal on the Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of Die Cast AZ91 Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1-2): 322-330 (2009).
- Fleming, S., “An Overview of Magnesium based Alloys for Aerospace and Automotive Applications”, Yüksek Lisans Tezi, Master of Engineering in Mechanical Engineering, *Rensselaer Poltechnic Institute*, Hartford, CT (2012).
- Friedrich, H.E., Mordike, B.L., “*Magnesium Technology Metallurgy, Design Data, Applications*”, 1sted., Berlin, Almanya: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2006).
- Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S., “Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).
- Gerengi, H. ve Uğraş, H.İ., “Katyonik Bor İçeren İyonik Sıvıların Korozyon İnhibitörü Olarak Kullanılması ile İlgili Patent Çalışmaları,” *Technological Applied Sciences*, 12 (2): 53-65 (2017).
- Ghali, E., Dietzel, W., Kainer, K.U., “General and Localized Corrosion of Magnesium Alloys: A Critical Review”, *Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)*, 13 (1): 7-23 (2004).
- Gray, J.E. ve Luan, B., “Protective coatings on magnesium and its alloys-a critical review,” *Journal of Alloys and Compounds*, 336 (1-2): 88-113 (2002).
- Gu, X., Zheng, Y., Cheng, Y., Zhong, S. ve Xi, T., “In Vitro Corrosion and Biocompatibility of Binary Magnesium Alloys”, *Biomaterials*, 30 (4): 484-498 (2009).
- Gu, X.N., Zheng, Y.F., Ruan, L., “In Vitro Degradation Performance and Biological Response of a Mg-Zn-Zr Alloy”, *Material Science and Engineering*, 176 (20): 1778-1784 (2011).
- Gu, X.N., Zhou, W.R., Zheng, Y.F., Cheng, Y., Wei, S.C., Zhong, S.P., Xi, T.F., Chen, L.J., “Corrosion Fatigue Behaviors of Two Biomedical Mg alloys—AZ91D and WE43—in Simulated Body Fluid”, *Acta Biomater*, 6 : 4605–4613 (2010).
- Guo-Dong, T., Hai-Feng, L., Yao-Hui, L., “Effect of Rare Earth Additions on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloys”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 336-340 (2010).
- Gupta, M., Sharon, N.M.L., “Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites”, John Wiley & Sons, Inc., *Hoboken*, New Jersey, 39 – 42 (2011).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gusieva, K., Davies, C.H.J., Scully, J.R., Birbilis, N., “Corrosion of Magnesium Alloys: The Role of Alloying”, *International Materials Reviews*, 60: 3, 169 – 194 (2015).
- Gusieva, K., Sato, G., Ringer, S.P., Birbilis, N., “Influence of Low Level Ag Additions on Mg-Alloy AZ91”, *Advanced Engineering Materials*, 15(6): 485-499 (2013).
- Gutman, E.M. Unigovski, Y., Levkovich, M., Koren, Z, Aghion, E., Dangur, M, “Influence of Technological Parameters of Permanent Mold Casting And Die Cast On Creep And Strength Of Mg Alloy AZ91D”, *Materials Science and Engineering A*, 234-6: 880-883 (1997).
- Hanzi, A.C., Gerber, I., Schinhammer, M., Löffler, J.F., Uggowitz, P.J., “On the in Vivo Degradation Performance and Biological Response of New Biodegradable Mg-Y-Zn Alloys”, *Acta Biomater*, 6(5): 1824-1833 (2010).
- Herring, W.B., Leavell, B.S., Paixio, L.M., Yoe, J.H., “Trace Metal In Human Plasma and Red Blood Cells. A Study Of Magnesium, Chromium, Nickel, Copper and Zinc I. Observation Of Normal Subjects”, *American Journal of Clinical Nutrition*, 8: 846 – 854 (1960).
- Heublein, B., Rohde, R., Kaese V., Niemeyer, M., Hartung W., Haverich, A., “Biocorrosion of Magnesium Alloy: A New Principle in Cardiovascular Implant Technology?”, *Heart*, 89 (6): 651-656 (2003).
- Hornberger, H., Virtanen, S., Boccaccini, A.R., “Biomedical coatings on magnesium alloys-A review,” *Acta Biomaterialia*, 8 (7): 2442-2455 (2012).
- Huan, Z.G., Leeflang, M.A., Zhou, J., Fratila-Apachitei, L.E., Duszcyk, J., “In Vitro Degradation Behaviour and Cytocompatibility of Mg-Zn-Zr Alloys”, *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 21 (9): 2623-2635 (2010).
- Ji, S., Yang, W., Gao, F., Watson, D., Fan, Z., “Effects of Iron on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si Diecast Alloys”, *Materials Science and Engineering*, A 564: 130-139 (2013).
- Jihua, C., Zhenjua, C., Hongge, Y., Fuguan, Z., Yingliang, C., “Effects of Sn and Ca Additions on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of as-cast Mg-Zn-Al- Based Alloy”, *Materials and Corrosion*, 59(12): 934-941 (2008).
- Kaesche, H., “Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems”, *Springer* (2003).
- Kainer, K.U, “Magnesium – Alloys and Technologies”, *WILEY-VCH Verlag GmbH*, Weinheim, 1 – 13 (2003).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kandemir, K., Can, A.Ç., “Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi-Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1): 37-45 (2003).
- Kapinos, D., Augustyn, B., Szymanek, M., “Methods of Introducing Alloying Elements Into Liquid Magnesium”, *Metallurgy and Foundry Engineering*, 40 (3): 141-160 (2014).
- Keskin, S., “Kalay ve Çinko Elementlerinin Magnezyum Metaline İlavesi ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malz. Müh. Anabilim Dalı*, Sakarya (2011).
- Kiani, M., Gandikota, I., Rais-Rohani, M., Motoyama, K., “Design of Lightweight Magnesium Car Body Structure Under Crash and Vibration Constraints”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2: 99 – 108 (2014).
- Kima, J.M., Park, B.K., Jun, J.H., Kim, K.T., Jung, W.J., "Microstructure and Properties of Mg-Al Based Casting Alloys Modified with Minor Alloying Elements", *Materials Science Forum*, 488-489: 149-150 (2005).
- Koç, E., “Alaşım Elementlerinin Magnezyum Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı*, Karabük, (2008).
- Koç, E., “Biyoçözünür Magnezyum Alaşımlarının Korozyona Bağlı Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı*, Karabük, (2013).
- Kreysa, G., Schütze, M., “Corrosion Handbook”, *Wiley VCH*, 6 (2004).
- Kuşdemir, H., “AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışlarının Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı*, Karabük, (2008).
- Lee, T.J., Kim, W.J., “The Significant Effect of Adding Trace Amounts of Ti on the High-Temperature Deformation Behavior of Fine-Grained Mg-6Al-1Zn Magnesium Alloys” *Journal of Alloys and Compounds*, 617:352-358 (2014).
- Leontis, T.E., “Effect of zirconium on Magnesium-Thorium and Magnesium-Thorium-Cerium Alloys”, *Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 4(6): 633-642 (1952).
- Li, X., Liu, X., Shuilin, W., Yeung, K.W.K., Zheng, Y., Chu, P.K., “Design of Magnesium Alloys With Controllable Degradation For Biomedical Implants: From Bulk To Surface”, *Acta Biomaterialia*, 45: 2 – 30 (2016).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Li, Y., Wen, C., Mushahary, D., Sravanthi, R., Harishankar, N., Pande, G. and Hodgson, P., “Mg-Zr-Sr Alloys as Biodegradable Implant Materials”, *Acta Biomater*, 8:3177-3188 (2012).
- Li, Y.C., Wong, C.S., Wen, C., Hodgson, P.D., “Biodegradable Mg-Zr-Ca Alloys for Bone Implant Materials”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 27: 49–51 (2012).
- Lin, C., Li, X., “Role of CO₂ in The Initial Stage of Atmospeferic Corrosion of AZ91 Magnesium Alloys in The Presence of NaCl”, *Rare Metals*, 25 (2): 190-196 (2006).
- Liu, C.L., Jiang, J., Wang, M., Wang, Y.J., Chu, P.K. and Huang, W.J., “In Vitro Degradation and Biocompatibility of WE43, ZK60 and AZ91 Biodegradable Magnesium Alloys”, *Advanced Materials Research*, 287: 2008-2014 (2011).
- Liu, M., Uggowitz, P.J., Nagasekhar, A., Schmutz, P., Easton, M., Song, G., Atrens A., “Calculated phase diagrams and the corrosion of die-cast Mg-Al alloys”, *Corrosion Science*, 51 (3): 602-619 (2009).
- Looze, G., Carrig, J., Nguyen, V., “High-Yield, High-Integrity, Permanent Mould Magnesium Casting”, *Foundry Trade Journal*, 3629: 280-282 (2005).
- Luo, A.A.and Sachdev, A.K., “Applications of magnesium alloys in automotive engineering,” *Advances in Wrought Magnesium Alloys*, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 393-426 (2012).
- Makar, G.L., Kruger, J., “Corrosion of Magnesium”, *International Materials Review*, 38: 138-153 (1993).
- Manuel, M.V., Singh, A., Alderman, M., Neelameggham, N.R. “Magnesium Technology 2015”, 1sted., *Wiley Publishing*, USA, 301-347 (2015).
- Maupin, H., Nyberg, E., Mathaudhu, S.N., “Magnesium Alloys in Army Applications: Past, Current and future Solutions”, *The Sixth triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference*, Atlantic City (2010).
- Minarik, P., Kral, R., Janecek, M., “Effect of ECAP Processing on Corrosion Resistance of AE21 and AE42 Magnesium Alloys”, *Applied Surface Science*, '81: 44-48 (2013).
- Mochizuki, A., Kaneda, H., “Study on The Blood Compatibility and Biodegradation Properties of Magnesium Alloys”, *Materials Science and Engineering C*, 47: 204 – 210 (2015).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Mordike, B.L., Ebert, T., “Magnesium Properties-Applications-Potential”, *Materials Science and Engineering*, A302: 37 – 45 (2001).
- Mueller, W.D., Nascimento L.M., Lorenzo de Mele, M.F., “Critical Discussion of the Results from Different Corrosion Studies of Mg and Mg Alloys for Biomaterial Application”, *Acta Biomater*, 6(5): 1749-1955 (2010).
- Nam, N.D., Kim, W.J., Kim, J.G., Shin, K.S., Jung H.C., “Corrosion Resistance of Mg-5Al-xSr Alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (14): 4839-4847 (2011).
- Öztürk, F., Kaçar, İ., “Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 1; 12-20 (2012).
- Pan, F., Yang, M., Chen X., “A Review on Casting Magnesium Alloys Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys”, *Journal of Materials Science and Technology*, 32: 1211-1221, (2016 a).
- Pan, F., Chen, x., Yan, T., Liu, T., Mao, J., Luo, W., Wang, Q., Peng, J., Tang A., Jiang, B., “A Novel Approach To Melt Purification of Magnesium Alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 4: 8-14 (2016 b)
- Pekgülyüz, M., “Melting, Alloying and Refining”, *Magnesium Technology*, Springer, Germany, 109 – 127 (2001).
- Pekgülyüz, M.Ö., Kainer, K.U. and Kaya, A.A., “*Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*,” *Woodhead Publishing*, Philadelphia (2013).
- Peng, Q., Huang, Y., Zhou, L., Hort, N., Kainer, K.U., “Preparation and Properties of High Purity Mg-Y Biomaterials”, *Biomaterials*, 31 (3): 398-403 (2010).
- Peng, Q., Zhao, S., Li, H., Li X., Tian, Y., “High Pressure Solidification: An Effective Approach to Improve the Corrosion Properties of Mg-Y Based Implants”, *International Journal of Electrochemical Science*, 7: 5581-5595 (2012).
- Peuster, M., Hesse, C., Schloo, T., Fink, C., Beerbaum, Schnakenburg, C.V., “Long-Term Biocompatibility of a Corrodible Peripheral Iron Stent in the Porcine Descending Aorta”, *Biomaterials*, 27: 4955 – 4962 (2006).
- Poinern, G.E.J., Brundavanam, S., Fawcett, D., “Biomedical Magnesium Alloys: A review of Material Properties, Surface Modifications and Potential as a Biodegradable Orthopaedic Implant”, *American Journal of Biomedical Engineering*, 2: 218 – 240 (2012).
- Polmear, I.J., “Light Alloys”, 3rd ed., *Metallurgy of the Light Metals*, London, UK, (1995).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Potzies, C., Kainer, U.K., “Fatigue of Magnesium Alloys”, *Advanced Engineering Materials*, 6 (5): 281 – 289 (2004).
- Roberge, P.R., “Handbook of Corrosion Engineering”, *McGrawHill* (2012).
- Rosalbino, F., Angelini, E., De Negri, S., Delfino, S., Saccone, A., “Bio-corrosion Characterization of Mg-Zn-X (X = Ca, Mn, Si) Alloys for Biomedical Applications” *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21: 1091–1098 (2010).
- Rosalbino, F., Angelini, E., De Negri, S., Saccone, A., Delfino, S., “Electrochemical Behaviour Assesment of Novel Mg-Rich Mg-Al-RE Alloys (RE ¼ Ce, Er)”, *Intermetallics*, 12: 1487-1492 (2006).
- Saris, N.E.L., Mervaala, E., Kappanen, H., Khawaja, J.A., Lewenstam, A., “Magnesium An Update On Physiological, Clinical and Analytşcal Aspects”, *Clinica Chimica Acta*, 94: 1 – 26 (2000).
- Smith, W.F., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, Saadet Özkal/Nihat G. Kınıkoğlu, *Mart Matbaacılık*, İstanbul (2001).
- Song, G., Atrens, A., “Understanding Magnesium Corrosion”, *Advanced Engineering Materials*, 5 (12): 837 – 858 (2003).
- Song, G., Atrens, A., “Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys”, *Advence Engineering Materials*, 1: 11 – 33 (1999).
- Song, G., Atrens, A., Dargusch, “Influence of Microstructure on the Corrosion of Die Cast AZ91D”, *Corrosion Science*, 41(2): 249-273 (1999).
- Song, R., Blawert, C., Dietzel, W., Atrens, A. “A Study on Stress Corroion Cracking and Hydrogen Embrittlement of AZ31 Magnesium Alloy” *Materials Science Engineering A*, A399: 308 – 317 (2005).
- Srinivasan, A, Ningshen, S, Mudali, U.K, Pillai, U.T.S, Pai, B.C, “Influence of Si and Sb additons on the corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy”, *Intermetallics*, 15: 1511-1517 (2007).
- Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai J.and Dias, G., “Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review,” *Biomaterials*, 27 (9): 1728-1734 (2006).
- Südholz, A.D., Birbilis, N., Bettles, C.J., Gibson, M.A., “Corrosion Behaviour of Mg-alloy AZ91E with a typical alloying additions”, *Journal of Alloys and Compounds*, 471:109-115 (2009).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Toptaş, V., “Bir Alüminyum Alaşımı ile Basınçlı Döküm Yöntemi Kullanılarak Tabanca Gövdesi Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2014).
- Trojanova, Z., Gartnerova, V., Jager, A., Namesny, A., Chalupova, M., Palcek, P. And Lukac, P., “Mechanical and Fracture Properties of an AZ91 Magnesium Alloy Reinforced by Si and SiC Particles”, *Composites Science and Technology*, 69: 2256-2264 (2006).
- Türen, Y., “Effect of Sn Addition on Microstructure, Mechanical and Casting Properties of AZ91 Alloy”, *Materials and Design*, 49: 1009 – 1015 (2013).
- Ünal, M., “Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2008).
- Üneri, S., “Korozyon ve Önlenmesi”, *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 75-96 (1998).
- Ünver, G., “AZ91 Magnezyum Alaşımına Ti ve Cr Alaşım Elementlerinin İlavesinin Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2011).
- Valente, T., “Grain Boundary Effects on the Behavior of WE43 Magnesium Castings in Simulated Marine Environment”, *Journal Materilas Science Letters*, 20: 67 – 69 (2001).
- Vanlı, A.S., “Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümde Ürün Kalitesine Etki Eden Proses Parametrelerinin Optimizasyonu”, Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2013).
- Vogel, M., “Mikrostuktur und Kriechverhalten von Magnesium-Druckgusslegierungen im System Mg-Zn-Al-Ca”, *Max-Planck-Institut für Metallforschung*, Stuttgart, 6 – 20 (2002).
- Waizy, H., Seitz, J.M., Reifenrath, J., “Biodegradable magnesium implants for orthopedic applications,” *American Journal of Biomedical Engineering*, 48 (1): 39-50 (2013).
- Wang, L., Shinohara, T., Zhang, B.P., “Eletrochemical Behaviour of AZ61 Magnesium Alloy in Dilute NaCl Solution”, *Materials and Design*, 33: 345-349 (2012).
- Wang, J., Huang, S., Guo, S., Wei, Y., Pan, F., “Effects of Cooling Rate on Microstructure, Mechanical and Corrosion of Mg-Zn-Ca Alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23: 1930-1935 (2013)

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Wang, Q., Lu, Y., Zeng, X., Ding, W., Zhu, Y., Li, Q., Jie, L., “Study on the Fluidity of AZ91+xRE Magnesium Alloy”, *Materials Science and Engineering*, 271: 109 – 115 (1999).
- Watarai, H. “Trend of Research and Development for Magnesium Alloys – Reducing the Weight of Structural Materials in Motor Vehicles”, *Science and Technology Trends*, 18: 84 – 97 (2006).
- Westenge, H., Aune T.K., “Magnesium Technolgy: Metallurgy, Design Data, Applications”, 1st edt., *Springer*, Berlin (2005).
- William, K. M., “Stress-Corrosion Cracking” *ASM*, 251, Ohio (1993).
- Windhagen, H., Radtke, K., Weizbaur, A., Diekmann, J., Noll, Y., Kreimeyer, U., Schavan, R., Stukenborg-Colsman, C., Waizy, H., “Biodegradable Magnesium-Based Screw Clinically Ewivalent To Titanium Screw in Hallux Valgus Surgery: Short Term Results Of The First Prospective, Randomized, Controlled Clinical Pilot Study”, *Biomedical Engineering Online*, 12: 62-72 (2013).
- Winzer, N., Atrens, A., Dietzel, W., Raja, V.S., Song, G., Kainer, K.U., “Characterisation Of Stress Corrosion Cracking (SCC) Of Mg-Al Alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 88: 339 – 351 (2008).
- Winzer, N., Atrens, A., Song, C., Ghali, E., Dietzel, W., Kainer, K.U., Hort, N., Blawert, C., “A Critical Review of the Stress Corroison Cracking (SCC) of Magnesium Alloys” *Advenced Engineering Materials*, 7 (8): 659 – 693 (2005).
- Witte, E., Fischer, J., Nellesen, J., Crostack, H.A., Kaese, V., Pisch, A., Beckmann, F. and Windhagen, H., “In Vitro and in Vivo Corrosion Measurements of Magnesium Alloys”, *Biomaterials*, 27(7): 1013-1018 (2006).
- Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth C.J. and Windhagen, H., “In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response,” *Biomaterials*, 26 (17): 3557-3563 (2005).
- Witte, F., Ulrich., H., Rudert, M. and Willbold E., “Biodegradable Magnesium Scaffolds: Part 1: Appropriate Inflammatory Response”, *Journal of Biomedical Materials Research*, 81A (3): 748-756 (2007).
- Wolf, F.I., Cittadini, A., “Chemistry and Biochemistry of Magnesium”, *Molecular Aspects of Medicine*, 24: 3 – 9 (2003).
- Xu, L., Yu, G., Zhang, E., Pan, f. and Yang, K., “In Vivo Corrosion of Mg-Mn-Zn aAlloy For Bone Impant Application”, *Journal of Biomedical Materials Research*, 83A (3): 703-711 (2007).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Yang, M., Li, H., Duan, C., Zhang, J., “Effects of Minor Ti Addition on as-Cast Microstructure and Mechanical properties of Mg-3Sn-2Sr (wt%) Magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 579:92-99 (2013).
- You, S., Huang, Y., Kainer, K.U., Hort, N., “Recent Research and Developments on Wrought Magnesium Alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(3): 239-253 (2017)
- Yu, F., Guohua, W., Chunquan, Z., “Influence of Cerium on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Magnesium Alloys”, *Material Science Engineering*, 433: 208-215 (2006).
- Yu, F., Guohua, W., Hongtao, G., Guanqun, L., Chunquan, Z., “Influence of Lanthanum on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Magnesium Alloy”, *Journal Materials Science*, 4(1): 5409-5416 (2006).
- Yue, T.M., Ha, H.U., Musson, N.J., “Grain Size Effects on the Mechanical Properties of Some Squeeze Cast Light Alloys”, *Journal of Materials Science*, 30: 2277 – 2283 (1995).
- Yun, Y., Dong, Z., Lee, N., Lui, Y., Xue, D., Guo, X., Kuhlmann, J., Doepke, A., Halsall, H.B., Heineman, W., Sundaramurthy, S., Schulz, J.M., Yin, Z., Shanov, V., Hurd, D., Nagy, P., Li, W., Fox, C., “Revolutionizing Biodegradable Metals”, Review, *Materials Today*, 12 (10) : 22-32 (2009).
- Zeng, R., Han, E., Ke, W., “Corrosion of Artificial Aged Magnesium Alloy AZ80 in 3.5 With Pct NaCl Solutions”, *Journal of Materials Science and Technology*, 23 (3): 353-358 (2007).
- Zeng, R., Han, E., Ke, W., Liu, L., Xu, Y., “Corrosion Fatigue of As-Extruded AM60 Magnesium Alloy”, *Chinese Journal of Materials Research*, 19 (1): 1 – 7 (2005).
- Zeng, R., Han, E., Ke, W., Xu, Y.B., Liu, L., “Mechanism of Corrosion Fatigue For As-Extruded Magnesium Alloy AZ80”, *Chinese Journal of Materials Research*, 18 (6) : 561 – 567 (2004).
- Zeng, R., Zhang, J., Huang, W., Dietzel, W., Kainer, K.U., Blawert, C., Wei, K., “Review of Studies on Corrosion of Magnesium Alloys”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 763-771 (2006).
- Zeng, R., Zhou, W., Han, E., Ke, W., “Effect of pH Value on Corrosion of As-Extruded AM60 Magnesium Alloy”, *Acta Metallurgica Sinica*, 44 (3): 307 – 311 (2005).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Zhang, J., Wang, J., Qiu, X., Zhang, D., Tian, Z., Niu, X., Tang, D. and Meng, J. “Effect of Nd on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Die-Cast Mg-4Al-Based Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 464: 556-564 (2008).
- Zhang, S., Li, J., Zhou, C., Zhang, X., Xie, C., Zhang, Y., Tao, H., He, Y., Jiang Y., Bian, Y., “In Vitro Degradation Hemolysis and MC3T3-E1 Cell Adhesion of Biodegradable Mg-Zn Alloy”, *Material Science Engineering C*, 29 (6): 1907-1912 (2009).
- Zhang, S., Zhang, X., Zhou, C., Song, Y., Xie, C., Tao, H., Zhang, Y., Jiang Y., Bian, Y., “Research on an Mg-Zn Alloy as a Degradable Biomaterial”, *Acta Biometer*, 6 (2): 626-640 (2010).
- Zhang, W., Li, M., Chen, Q., Hu, W., Zhang, W., Xin, W., “Effects of Sr and Sn on Microstructure and Corrosion Resistance of Mg–Zr–Ca Magnesium Alloy for Biomedical Applications”, *Materials and Design*, 39: 379–383 (2012).
- Zhang, X.G., “Corrosion and Electrochemistry of Zinc”, *Springer*, Canada (1996).
- Zhang, Z., “Development of Magnesium-Based Alloys for Elevated Temperature Applications”, Doktora Tezi, *Faculte Des Sciences Et De Genie Universite*, Quebec-Canada, 2-75 (2000).
- Zhou, W., Aung, N.N., Sun, Y., “Effect of Antimony, Bismuth and Calcium Addition on Corrosion and Electrochemical Behaviour of AZ91 Magnesium Alloy”, *Corrosion Science*, 51: 403-408 (2009).
- Zhou, X., Huang, Y., Wei, Z., Chen, Q., Gan, F., “Improvement of Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy By Holmium Addition”, *Corrosion Science*, 48(12): 4223-4233 (2006).

Ek-1

KAYNAKLAR

- Anık, M., Avcı, P., Tanverdi, A, Çelikyürek, I., Baksan, B. ve Güler, R., “Effect of the eutectic phase mixture on the anodic behavior of alloy AZ91,” [J]. *Materials and Design*, 27 (5): 347-355, (2006).
- Atalay, O., “Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
- Atrens, A., Song, G.L., Cao, F., Shi, Z., Bowen, P.K., “Advances in Mg corrosion and research suggestions,” *Jornal of Magnesium and Alloys*, 1 (3): 177-200, (2013).
- Atrens, A., Winzer, N. ve Dietzel, W., “Stress corrosion cracking of magnesium alloys,” *Advanced Engineering Materials*, 13 (1-2): 11-18, (2011).
- Balasubramani N., Srinivasan A., Pillai U.T.S, Pai B.C., “Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science & Engineering*, 457: 275-281 (2007).
- Bornappour, M., Celikin, M., Cerruti, M. ve Pekgülyüz, M., “Magnesium implant alloy with low levels of strontium and calcium: the third element effect and phase selection improve bio-corrosion resistance and mechanical performance,” *Materials Science and Engineering: C*, 35: 279-282, (2014).
- Cheng, Y.L., Qin, T.W., Wang, H.M. ve Zhang, Z., “Comparison of corrosion behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium” [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (3): 517-524, (2009).
- Dobrzanski L.A., Tanski T., Cizek L., Brytan, Z., “Structure and properties of magnesium cast alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 567-574 (2007).
- Eliezer, D., Uzan, P. ve Aghion, E., “Effect of second phases on the corrosion behaviour of magnesium alloys,” *Material Science Forum*, 419-422: 857-866, (2003).
- Guangyin, Y., Yangshan, S., ve Wenjiang, D., “Effects of Sb addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy,” *Scripta Materialia*, 43 (11): 1009-1013, (2000).
- Guo, L.F., Yue, T.M., Man, H.C., “Excimer laser surface treatment of magnesium alloy WE43 for corrosion resistance improvement”, *Journal of Materials Science*, 40(13): 3531-3533, (2005).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hehmann, F., Froes, F.H. ve Young, W., "Rapid solidification of aluminium magnesium and titanium," *Journal of Metals*, 39 (8): 14-21 (1987).
- Lin M.C., Tsai C.Y., Uan J.Y., "Converting hcp Mg-Al-Zn alloy into bcc Mg-Li-Al-Zn alloy by Electrolytic deposition and diffusion of reduced lithium atoms in a molten salt electrolyte LiCl-KCl", *Scripta Materialia*, 56: 597-600 (2007).
- Lunder, O., Lein, J.E., Aune T.K. ve Nisancioglu, K., "The role of magnesium aluminium (Mg₁₇ Al₁₂) phase in the corrosion of magnesium alloy AZ91," *Journal Corrosion*, 45 (9): 741-748, (1989).
- Lunder, O., Nisancioglu, K., Hansen, R. S., "Corrosion of die cast magnesium-aluminum Alloys", *SAE Technical Paper Series* #930755, Detroit, (1993).
- Mathieu, S., Rapin, C., Steinmetz, J., "A Corrosion Study of the Main Constituent Phases of AZ91 Magnesium Alloys", *Corrosion Science*, 45 (12): 2741-2755, (2003).
- Mert, F., Özdemir, A., Karataş, Ç., "Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 13(3): 165-176, (2010).
- Nave, M.D., Dahle, A.K. ve St. John, D.H., "The Role of Zinc in the Eutectic Solidification of Magnesium-Aluminium-Zinc Alloys," *Magnesium Technology 2000*, 1rd ed., Tennessee, USA, Wiley Publishing, 243-250, (2000).
- Nümerger, U., "Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen", *Band 1, Bauverlag GmbH, Wiesbaden un Berlin*, (1995).
- Pardo, A., Mercino, M.C., Coy, A.E., Viejo, F., Arrabal, R. ve Fehú Jr. S., "Influence of microstructure and composition on the corrosion behaviour of Mg/Al alloys in chloride media," *Electrochimica Acta*, 53 (27): 7890-7902, (2008).
- Pardo, A., Merino, M.C., Casajus, P., Mohedano, M., Arrabal, R., Matykina, E., "Corrosion Behaviour of Mg-Al Alloys With Al-11Si thermal Spray Coatings", *Materials and Corrosion*, 60 (12): 939-948 (2009).
- Polmear, I.J. , Avedisian M., H. Baker (Eds.), "Magnesium and Magnesium Alloys", *ASM Speciality Handbook*, (1999).
- Qudong, W., Yizhen, L., Xiaqin, Z., Wenjiang, D., Yanping, Z., Qinghua, L., Jie, L. "Study on the fluidity of AZ91+xRE magnesium alloy", *Materials Science and Engineering*, 271: 109-115 (1999).
- Salman, S.A., Ichino, R. ve Okıdo, M., "A Comparative electrochemical study of AZ31 and AZ91magnesium alloy," *International Journal of Corrosion*, 2010: 1-7, (2010).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Samaniego, A., Llorente, I. ve Felu Jr. S., “Combined effect of composition and surface condition on corrosion behaviour of magnesium alloys AZ31 and AZ61,” *Corrosion Science*, 68: 66-71, (2013).
- Shih, T.S., Liu, J.B., Wei, P.S., “Oxide films on magnesium and magnesium alloys”, *Materials Chemistry and Physics*, 104: 497-504, (2007).
- Singh, I.B., Singh, M. ve Das, S., “A comparative corrosion behavior of Mg, AZ31 and AZ91 alloys in 3.5% NaCl solution,” *Journal of Magnesium and Alloys*, 3 (2): 142-148, (2015).
- Song, G., Atrens, A., Wu, X. ve Zhang, Bo., “Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in sodium chloride,” *Corrosion Science*, 40 (10): 1769-1791, (1998).
- Stephens, R.I., Schrader, C.D. ve Lease, K.B. “Corrosion of AZ91E-T6 cast magnesium alloy in a 3.5 percent NaCl aqueous environment,” *Journal of Engineering Material and Technology*, 117 (7): 293-298, (1995).
- Tanverdi, A., “Magnezyum Alaşımı AZ91’in Korozyon Davranışına Katılma Hızı ile Si ve Y Katkı Elementlerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, (2005).
- Wenwen, D., Yangshan, S., Xuegang, M., Feng, X., Min, Z. ve Dengyun, W., “Microstructure and mechanical properties of Mg–Al based alloy with calcium and rare earth additions” *Materials Science and Engineering A*, 356 (1-2): 1-7, (2003).
- Wu, G., Fan, Y., Gao, H., Zhai, C. ve Zhu, Y.P., “The effect of Ca and rare earth elements on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of AZ91D,” *Materials Science and Engineering: A*, 408 (1-2): 255-263, (2005).

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Serdar ÇİM
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir, 11.06.1993

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Makine Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce-Almanca

İş Deneyimi

Stajlar : Bien Yapı Ürünleri Turizm San. Ve Tic. A.Ş., Arslan Alüminyum A.Ş., Demisaş Döküm Emaye Mamülleri San. A.Ş.
Projeler : Ti ile Mikro Alaşımlanmış AZ91 Mg Alaşımının Korozyon Özelliklerinin Geliştirilmesi (BAP Projesi)

İletişim

Adres : İsmetpaşa Mah. Dündar Sok. No: 7/3 Merkez/BİLECİK
E-Posta Adresi : serdar.cim@hotmail.com

Akademik Çalışmaları

Candan, Ş., Çim, S., Emir, S., Candan, E., “AZ Serisi Mg Alaşımalarının Korozyon Davranışlarında β -Fazının Rolü”, *Düzce Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4):1139-1162 (2018).

Candan, Ş., Çim, S., Emir, S., Candan, E., “AZ91 Mg Alaşımalarında Fe Tolerans Limit Değerlerinin Araştırılması”, *XV. International Corrosion Symposium*, 26-28 September, Antakya/Hatay/Turkey (2018).

Tarih: 05.10.2018