



**ANOTLAMA VE ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA
İŞLEMLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ
YAPISAL, KOROZYON VE GERİLMELİ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Recep ÇATAR

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Bilim Dalı

Prof. Dr. Hikmet ALTUN

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ANOTLAMA VE ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ YAPISAL, KOROZYON VE GERİLMELİ
KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Recep ÇATAR

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU

**ANOTLAMA VE ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN MAGNEZYUM
ALAŞIMLARININ YAPISAL, KOROZYON VE GERİLMELİ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Hikmet ALTUN'un danışmanlığında, Recep ÇATAR tarafından hazırlanan bu çalışma, 12/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Hikmet ALTUN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Birol SOYSAL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Fatih YILDIZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **19.09/2019** tarih ve **..37.../..31.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2016-193

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ANOTLAMA VE ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ YAPISAL, KOROZYON VE GERİLMELİ KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Recep ÇATAR

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Bu çalışmada, farklı miktarlarda alüminyum içeren AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına üç farklı çözeltide anotlama işlemi uygulanmış, ayrıca bu alaşımlar elektrik ark sprey yöntemi ile ticari saflıkta alüminyum kaplanmıştır. Farklı yüzey işlemi uygulanmış malzemelerin yapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji yayımlı X-ışını analizi (EDS) ve X-ışını kırınım (XRD) cihazları ile incelenmiştir. Elektrokimyasal özelliklerinin tayini, potansiyodinamik polarizasyon yöntemi kullanılarak %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Gerilmeli korozyon dirençlerinin belirlenmesi için düşük deformasyon hızı testi (SSRT) yöntemi kullanılmıştır. Kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu cihazı kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, üç farklı çözeltide yapılan anotlama işlemlerinin korozyon potansiyeli değerlerini artırdığı görülmüştür. Anotlama işleminin alaşımların gerilmeli korozyon dirençlerini genellikle belli bir miktarda iyileştirdiği, bazılarında ise bir miktar kötüleştirdiği görülmüştür. Elektrik ark sprey yöntemi ile alüminyum kaplanmış numunelerde kaplama ile birlikte %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyon akım yoğunluğu değerleri pek değişmemişken, korozyon potansiyeli değerleri pozitif değerlere doğru artmıştır. Ayrıca alüminyum kaplamanın her üç alaşımında da gerilmeli korozyon direncini artırdığı tespit edilmiştir. Hem anotlanmış numunelerde hem de alüminyum kaplanmış numunelerde taneler arası ve tane içi gerilmeli korozyon çatlaklarına rastlanmıştır.

2019, 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Anotlama, ark sprey kaplama, magnezyum alaşımları, korozyon, gerilmeli korozyon

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ANODIZATION AND ELECTRIC ARC SPRAY COATING ON THE STRUCTURAL, CORROSION AND STRESS CORROSION PROPERTIES OF MAGNESIUM ALLOYS

Recep ÇATAR

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Mechanic Science

Supervisor: Prof. Dr. Hikmet ALTUN

In this study, AZ31, AZ61 and AZ91 magnesium alloys containing different amounts of aluminum were subjected to anodization process in three different solutions and these alloys were coated with commercial purity aluminum by electric arc spray method. Structural properties of different surface treated materials were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy diffusion X-ray analysis (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Electrochemical properties were determined by using potentiodynamic polarization method in 3.5% NaCl solution. Slow strain rate test (SSRT) was used to determine the stress corrosion resistance. Fracture surface images were examined using scanning electron microscopy. As a result of the study, it was found that anodization treatments carried out in three different solutions increased the corrosion potential values. Anodization treatments generally improve the stress corrosion resistance to a certain extent and to some extended degree of deterioration. Corrosion current density values in 3.5% NaCl solution did not change together with coating in aluminum coated samples by electric arc spray method, while corrosion potential value increased towards positive values. In addition, it was found that aluminum coatings increased stress corrosion resistance in all three alloys. Both anodization coated samples and aluminum coated samples showed intergranular and transgranular stress corrosion cracks.

2019, 113 pages

Keywords: Anodization, electric arc spray, magnesium alloys, corrosion, stress corrosion

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımını, anlayışını, desteğini ve zamanını esirgemeyen çok değerli tez yöneticim Sayın Prof. Dr. Hikmet ALTUN'a teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında bilgi ve destekleriyle katkıları bulunan, Tez İzleme Komitesi üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet KARAKAN'a ve Sayın Prof. Dr. Birol SOYSAL'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım esnasında katkı ve yardımları nedeniyle Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıza KALELİ ile Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI'ya ve tezin hazırlanması esnasında emeği geçen tüm arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına 2016-193 numaralı bilimsel araştırma projesi ile destek sağlayan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Recep ÇATAR

Eylül, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak özetleri	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	17
2.1. Korozyon.....	17
2.1.1. Korozyonun ekonomik etkileri.....	17
2.1.2. Korozyonun elektrokimyasal mekanizması	18
2.1.3. Elektrokimyasal polarizasyon	20
2.1.4. Pasifleşme.....	21
2.1.5. Korozyon türleri	22
2.2. Magnezyum ve alaşımları	25
2.3. Magnezyum ve alaşımlarının korozyonu	27
2.4. Magnezyum ve alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışları.....	28
2.4.1. Gerilmeli korozyon.....	28
2.4.1.a. Çatlak oluşumu	31
2.4.1.b. Çatlak yayılması ve mekanik kırılma.....	32
2.4.2. Metallerde gerilmeli korozyon çatlak testleri.....	33
2.4.2.a. Kullanılan numuneler ve yükleme modları	34
2.4.2.b. Deney yöntemleri	36
2.4.3. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon.....	37
2.4.3.a. Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışına alaşım elementlerinin etkileri	38
2.4.3.b. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlak türleri.....	40
2.5. Anotlama işlemi	41

2.5.1. Magnezyum ve alaşımlarında anotlama işlemi	42
2.6. Elektrik ark sprej kaplama işlemi.....	49
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	51
3.1. Materyal	51
3.2. Yöntem.....	53
3.2.1. Anotlama işlemi	53
3.2.2. Elektrik ark sprej kaplama.....	54
3.2.3. Korozyon deneyleri	55
3.2.4. Gerilmeli korozyon deneyleri.....	56
3.2.5. SEM görüntüleri	57
3.2.6. XRD analizleri.....	57
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	58
4.1. Anotlama işlemi	58
4.1.1. Anotlanmış numunelere ait XRD analizleri	62
4.1.2. Anotlanmış numunelere ait SEM-EDS analizleri	64
4.1.3. Anotlanmış numunelere ait korozyon deneyleri	75
4.1.4. Anotlanmış numunelere ait gerilmeli korozyon deneyleri	79
4.1.5. Anotlanmış numunelere ait kırılma görüntüleri	88
4.2. Elektrik ark sprej kaplama işlemi.....	91
4.2.1. Elektrik ark sprej kaplama XRD analizleri	91
4.2.2. Elektrik ark sprej kaplama SEM görüntüleri.....	93
4.2.3. Elektrik ark sprej kaplama korozyon deneyleri.....	95
4.2.4. Elektrik ark sprej kaplama gerilmeli korozyon deneyleri	97
4.2.5. Elektrik ark sprej kaplama numunelerine ait kırılma görüntüleri	102
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	104
5.2. Sonuçlar.....	104
5.3. Öneriler	106
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

KBB	Kimyasal Buhar Biriktirme
FBB	Fiziksel Buhar Biriktirme
GKÇ	Gerilmeli Korozyon Çatlağı
SSRT	Düşük Deformasyon Hızı Testi (<i>Slow Strain Rate Test</i>)
TİGKÇ	Tane İçi Gerilmeli Korozyon Çatlağı
TAGKÇ	Taneler Arası Gerilmeli Korozyon Çatlağı
PEO	Plazma Elektrolitik Oksidasyon
MAO	Mikro Ark Oksidasyon
I _{sc}	Gerilmeli Korozyon İndeksi
TEL	İnce Elektrolit Katman (<i>Thin Electrolyte Layer</i>)
ABD	Amerika Birleşik Devleti
pH	Potansiyel Hidrojen Birimi
GSMH	Gayri Safi Milli Hasıla
HV	Vickers Sertlik Birimi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (<i>International Organization for Standardization</i>)
NACE	Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği (<i>National Association of Corrosion Engineers</i>)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
EDS	Enerji Yayılımlı X-ışını analizi (<i>Energy Diffusion X-ray Analysis</i>)
XRD	X-Işınları Kırınımı (<i>X-Ray Diffraction</i>)
°C	Santigrat derece
V	Volt
A	Amper
W	Watt
DC	Doğru Akım (<i>Direct Current</i>)
θ	Kırınım açısı

MPa	Megapaskal
E_p	Kritik potansiyel
E_{kor}	Korozyon potansiyeli
μm	Mikrometre
$t_{\text{özelti}}$	Çözelti içerisinde kırılma süresi
t_{hava}	Hava ortamında kırılma süresi
t_i	Çatlak oluşum süresi
t_r	Metallerin servis süreleri
d_{cr}	Kritik hata boyutu



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Korozyon oluşumunun ters metalürjik olarak gösterimi.	17
Şekil 2.2. HCl asit içerisine daldırılan metalin çözünmesini gösteren şematik diyagram	20
Şekil 2.3. Anodik polarizasyon ve artan E potansiyeli ile korozyon hızının artışı gösteren grafik	21
Şekil 2.4. Kritik potansiyel (Ep) üzerindeki oksitleyici potansiyelerde pasiflik.	22
Şekil 2.5. Korozyon türleri.....	23
Şekil 2.6. Magnezyumun 25°C'deki su içerisindeki potansiyel-pH (Pourbaix) diyagramı.	28
Şekil 2.7. Basitleştirilmiş GKÇ mekanizması	30
Şekil 2.8. GKÇ yayılım mekanizması: (a) taneler arası (b) tane içi (c) taneler arası nehir kırılma.	30
Şekil 2.9. Yüzeyle bir çukurdan başlayan gerilmeli korozyon çatlağı.	32
Şekil 2.10. Çukurcuktan başlayan farklı kırılma tokluklarına sahip A ve B metallerinin gerilmeli korozyon çatlağı hasar sürelerinin şematik gösterimi.	33
Şekil 2.11. Gerilmeli korozyon testleri için kullanılan numune tipleri.....	35
Şekil 2.12. Sabit yükleme testi deney düzenekleri	36
Şekil 2.13. Sabit deformasyon testi deney düzenekleri	37
Şekil 2.14. Magnezyum alaşımının anotlama işleminin şematik gösterimi.....	42
Şekil 2.15. Anotlama işleminde şematik voltaj-zaman grafiği.	43
Şekil 2.16. Son hücre geriliminin anodik kaplama kalınlığına etkisi.	47
Şekil 2.17. Farklı anotlama voltajlarında anodik kaplamadaki bileşenler	48
Şekil 2.18. Anodik kaplamada gözenekli mikro yapı.	48
Şekil 2.19. Ark-sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	50
Şekil 3.1. Kullanılan gerilmeli korozyon deney numunelerinin teknik resmi	52
Şekil 3.2. AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının mikro yapı görüntüleri	52
Şekil 3.3. Anotlama için kullanılan güç kaynağı ve kontrol için oluşturulan ara yüz	53
Şekil 3.4. Anotlama için kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi	54
Şekil 3.5.. Oerlikon Metco Flexi Ark 300 Elektrik ark sprej sistemi	55

Şekil 3.6. Düşük deformasyon hızı testi deney düzeneği	57
Şekil 4.1. 1 M NaOH çözeltisinde 100 V sabit voltajda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait akım yoğunluğu-voltaj-zaman grafikleri	59
Şekil 4.2. Fosfat temelli çözeltide 0,140 A/cm ² sabit akımda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait voltaj-zaman grafikleri	60
Şekil 4.3. Silikat temelli çözeltide 0,140 A/cm ² sabit akımda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait voltaj-zaman grafikleri	61
Şekil 4.4. Farklı çözeltilerde anotlanmış numuneler	61
Şekil 4.5. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri	63
Şekil 4.6. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri	63
Şekil 4.7. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri	64
Şekil 4.8. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri	67
Şekil 4.9. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri	68
Şekil 4.10. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri	69
Şekil 4.11. Anotlanmış magnezyum alaşımlarının SEM kesit görüntüleri.....	70
Şekil 4.12. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri	72
Şekil 4.13. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri	73
Şekil 4.14. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri	74
Şekil 4.15. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri	76
Şekil 4.16. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri	77

Şekil 4.17. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri	77
Şekil 4.18. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları	81
Şekil 4.19. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları	82
Şekil 4.20. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları.....	82
Şekil 4.21. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri	84
Şekil 4.22. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının maksimum kopma mukavemeti değerleri.....	86
Şekil 4.23. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri.....	87
Şekil 4.24. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri	88
Şekil 4.25. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri	89
Şekil 4.26. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri	90
Şekil 4.27. Alüminyum kaplanmış numuneler	91
Şekil 4.28. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri	92
Şekil 4.29. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SEM görüntüleri	93
Şekil 4.30. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SEM kesit görüntüleri.....	94
Şekil 4.31. Alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum ara yüzeyinden alınmış SEM-EDS görüntüsü.....	95
Şekil 4.32. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri	96
Şekil 4.33. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının	

polarizasyon eğrileri	96
Şekil 4.34. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri	97
Şekil 4.35. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları	99
Şekil 4.36. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları	99
Şekil 4.37. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları	100
Şekil 4.38. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri	101
Şekil 4.39. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının maksimum kopma mukavemeti değerleri	101
Şekil 4.40. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri	102
Şekil 4.41. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki SSRT deneyi sonundaki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Magnezyum alaşım elementlerinin ASTM standartlarında gösterimi.....	26
Çizelge 2.2. Magnezyum alaşım elementlerinin çeşitli etkileri.....	26
Çizelge 3.1. Kullanılan AZ31,AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri	51
Çizelge 4.1. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları.....	80
Çizelge 4.2. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deney sonuçları	98

1. GİRİŞ

Magnezyum (Mg) ve alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek sönümleme kapasitesi, üstün dökülebilirlik, mükemmel elektrik koruma etkisi, düşük ısı kapasitesi, sıfır mıknatıslanma, olağanüstü geri dönüşüm, mükemmel biyouyumluluk ile insan vücudu ve çevreye toksit olmama gibi birçok üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir (Song 2011). Tüm bu özelliklere ek olarak, yüksek özgül mukavemete (mukavemet/yoğunluk) sahip olmasından dolayı özellikle otomotiv ve havacılık sektörleri başta olmak üzere medikal, bilgisayar, cep telefonları ve spor malzemeleri gibi pek çok endüstriyel alanda kullanımı giderek artmaktadır. Bu alanlarda kullanılmasını kısıtlayan en önemli etmen ise zayıf korozyon direncidir (Makar and Kruger 1993; Gray and Luan, 2002; Blawert *et al.* 2006). Magnezyum alaşımlarını korozyona karşı korumak için birçok uygulamada yüzey işlemine ya da kaplamaya ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir. Magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırmak için; yüzey dönüştürme işlemleri (fosfatlama, kromlama v.b), anotlama (*DOW 17, HAE, Anomag, Keronite, Tagnite, Magoxid-Coat* v.b), galvanizleme/kaplama (Zn, Cu, Ni, Cr) gibi yüzey işlemleri kullanılmaktadır. Bu işlemler tek başlarına ya da organik kaplama işlemleri ile birlikte uygulanabilmektedir. Bunlara ek olarak kimyasal buhar biriktirme (KBB), fiziksel buhar biriktirme (FBB), alev ya da plazma sprey ve lazer/elektron/iyon demeti gibi yüzey işlemleri de magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için yapılan diğer işlemlerdir (Shi *et al.* 2006).

Magnezyum alaşımlarının kullanımı esnasında, korozyon haricinde üzerinde durulması gereken diğer önemli bir konu ise gerilmeli korozyon davranışdır. Gerilmeli korozyon; korozif ortam etkisinde bulunan bir malzemede çekme gerilmesi ile birlikte çatlak oluşması ve bu çatlağın ilerlemesi ile ani ve beklenmedik hasarlara yol açabilmektedir. Magnezyum alaşımlarının yapısal eleman (yük taşıyan) olarak kullanıldığı ve kullanılmasının düşünüldüğü alanlara bakıldığında zaman bu alaşımların hem korozif ortama hem de gerilmeye maruz kaldığı/kalacağı aşıkardır. Dolayısıyla magnezyum alaşımlarının sadece korozyon direncinin iyileştirilmesi yeterli olmayacaktır. Gerilmeli korozyon çatlağı kritik boyutlara ulaştığında numunelerin akma dayanımının %30'u kadar bir gerilme altında bile beklenmedik şekilde hasara uğrayabileceği literatürde

belirtilmiştir (Song 2011). Bu sebeple yapısal eleman olarak kullanılacak magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu konuda literatürde yapılan çalışmaların bazıları “Kaynak Özetleri” başlığı altında sunulmuştur.

Yapılan tez çalışması kapsamında I. bölümde “Giriş” başlığı altında kaynak özetleri ve çalışma ile ilgili amaç ve kapsam sunulmuştur. II. Bölüm olan “Kuramsal Temeller” kısmında korozyon, magnezyum alaşımlarının özellikleri, magnezyum alaşımlarının korozyonu, gerilmeli korozyon, magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyonu, anotlama işlemi ve elektrik ark spreycaplama yöntemi konularında kuramsal bilgilere yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan materyallerin özellikleri ve uygulanan yüzey işlemleri III. Bölüm olan “Materyal ve Yöntem” başlığı altında sunulmuştur. IV. Bölümde “Araştırma Bulguları ve Tartışma” başlığı altında elde edilen bulgular verilerek tartışılmış ve son olarak deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve sonuçlarla ilgili öneriler V. Bölümde “Sonuç ve Öneriler” başlığı altında sunulmuştur.

1.1. Kaynak özetleri

Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışları hakkındaki çalışmalar incelendiğinde; araştırmacıların genellikle alaşım bileşimleri, korozif ortam, kaplama ve kaynak işlemlerinin gerilmeli korozyon çatlağı (GKÇ) davranışına etkisinin yanı sıra, kırılma mekanizmaları ve sebepleri konularını da inceledikleri görülmektedir.

Magnezyum alaşımlarında görülen gerilmeli korozyon çatlağı hasarları literatürde ilk olarak 1980’li yıllardan önce nadiren servis kusurlarında görülmüştür. Bunların (1) Dow tarafından açıklanan uçak panelleri, (2) dövme alaşımı olan AZ80’den yapılan Fransız hava taşıtlarında kullanılan parçalar büyük montajlar ve artık gerilmelerden kaynaklanan hasarlar ve (3) döküm ve dövme alaşımlarından yapılan Güney Afrika magnezyum uçak tekerleklerinde servis süresince meydana gelen hasarlardan oluştuğu ifade edilmiştir. Song (2011)’in bildirdiğine göre, Speidel ve Fourt 1977’de yaptıkları bir çalışmada, magnezyum alaşımlarında 1960-1970 yılları arasında her yıl tahminen 10 ile 60 arasında uzay taşıtlarındaki magnezyum parçalarında GKÇ hasarı meydana geldiğini rapor

etmişlerdir. Bunların %70'ten fazlası döküm AZ91-T6 ya da dövme AZ80-F'den yapılan parçalardır. Ayrıca ABD'nin güvenilir endüstriyel kaynakları Zr içeren alaşımların GKÇ hasarının bazı kazalara neden olduğunu belirtmişlerdir.

Stampella *et al.* (1984) yaptıkları çalışmada, ticari saflıkta ve yüksek saflıktaki magnezyumun gerilmeli korozyon davranışını hava, havasız ve 10^{-3} M Na_2SO_4 ortamlarında düşük deformasyon hızı testi (*Slow Strain Rate Test, SSRT*) deney yöntemini kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Bazı çevresel koşullar altında magnezyumun hidrojen gevrekleşmesine ve Na_2SO_4 çözeltisine duyarlı olduğunu belirtmişlerdir.

ASM Handbook'un magnezyum alaşımlarının GKÇ'nin anlatıldığı bölümüne göre (Avedesian and Baker 1999) %1,5'ten daha fazla Al içeren magnezyum alaşımlarının GKÇ'ye karşı hassasiyetleri bulunmaktadır. Dövme alaşımlar döküm alaşımlara göre daha hassastırlar. Döküm alaşımlarındaki servis süresince meydana gelen GKÇ ile ilgili çok az sayıda doküman olmasına rağmen, yapılan laboratuvar çalışmalarında GKÇ'nin akma gerilmesinden %50 daha az çekme gerilmesi uygulanan korozyonun göz ardı edilebilecek kadar az korozif olan ortamlarda oluştuğunu göstermiştir. Servis süresi boyunca düşük miktarda uygulanan gerilme, GKÇ'nin etki oranını azaltmıştır.

Jones *et al.* (2004), yapısal uygulamalarda Al-Mg ve Mg-Al alaşımlarının otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılabilmesi için yeterli gerilmeli korozyon direncine sahip olmaları gerektiğini ve her iki alaşım için de bazı durumlarda GKÇ oluşabileceğini ifade etmişlerdir. Al-Mg alaşımlarında tane sınırlarında bulunan zengin Mg β -fazının (Al_3Mg_2), Mg-Al alaşımlarında ise tane sınırlarında bulunan γ -fazının ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) gerilmeli korozyon direncinde kritik öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Mg-Al alaşımında γ -fazının matrikse göre katodik (soy) özellik gösterdiğini, Al-Mg alaşımlarında ise β -fazının matrikse göre anodik (aktif) olduğunu belirtmişlerdir. Bu fazların, Al-Mg ve Mg-Al için çözeltiye maruz kalmış durumdan, sırasıyla 350 ve 1800 kat daha hızlı taneler arası korozyon çatlamasına ve çatlak büyüme hızlarına yol açan lokal galvanik korozyonun neden olduğunu belirtmişlerdir.

AZ91 magnezyum alaşımının tane içi gerilmeli korozyon çatlaması (TİGK), uzun süreli yükleme testi ve sabit deformasyon testi yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Saf su ve 5 g/l NaCl çözeltisinde 7×10^{-10} m/s - 5×10^{-9} m/s hız aralığında TİGK eşik gerilme değeri 55-75 MPa olarak bulunmuştur. TİGK yayılması sırasında, çatlak ucunun arkasında yüksek dinamik bir hidrojen konsantrasyonunun oluşmasının bekleneceğini belirtmişler ve gerilmeli korozyonun etkili olduğu düşünülen servis şartlarında maksimum çekme dayanımının %50'sinin alınması önerisinde bulunmuşlardır (Winzer *et al.* 2007).

Kannan *et al.* (2008), düşük deformasyon hızı testi yöntemini kullanarak nadir toprak elementi içeren yüksek performanslı ZE41, QE22 ve Elektron 21 (EV31A) magnezyum alaşımlarının hava, saf su ve %0,5 NaCl ortamlarında gerilmeli korozyon davranışlarını incelemişler ve karşılaştırma için AZ80 magnezyum alaşımını kullanmışlardır. ZE41, QE22 ve EV31A magnezyum alaşımının %0,5 NaCl özeltisi içerisindeki GK'ye duyarlılığının, saf suya kıyasla daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. EV31A'nın, hem saf suda hem de %0,5 NaCl özeltisi içinde AZ80, ZE41 ve QE22 ile karşılaştırıldığında daha yüksek gerilmeli korozyon direncinin olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, magnezyum alaşımlarındaki nadir toprak elementlerinin, EV31A magnezyum alaşımında gözlendiği gibi, GK direncini önemli lde artırabileceğini belirtmişlerdir.

Kannan and Raman (2008), yapay vücut sıvısındaki kum döküm Mg-Al-Zn alaşımının gerilmeli korozyon davranışını düşük deformasyon hızı testi yöntemini kullanarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada, kum döküm magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon çatlağı duyarlılığının önemli olmadığını ve bu yönünün implant uygulamaları için endişe yaratmaması gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Wang *et al.* (2008), galvanostatik yükleme ve yüklemesiz AZ91 magnezyum alaşımının $0,1 \text{ kmol/m}^3$ Na₂SO₄ çözeltisinde gerilmeli korozyon davranışını, düşük deformasyon hızı test yöntemini kullanarak incelenmişlerdir. Yükleme yapılan ve yapılmayan alaşımlarda ana kırılma mekanizması olarak TİGK görüldüğünü belirtmişlerdir. Galvanostatik yükleme işleminin mekanik özellikler üzerinde çok az etkisinin olduğunu

ifade etmişlerdir. AZ91 magnezyum alaşımının $0,1 \text{ kmol/m}^3$ Na_2SO_4 çözeltisi içerisindeki GKÇ'nin ana sebebinin hidrojen gevrekleşmesi olduğunu iddia etmişlerdir.

Srinivasan *et al.* (2009), otojen lazer ışını kaynağı kullanılarak birleştirilmiş ve PEO (Plazma Elektrolit Oksidasyon) yöntemi uygulanmış AZ31HP magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon davranışını ASTM D1384 çözeltisinde düşük deformasyon hızı testi deney yöntemini kullanarak incelemişlerdir. AZ31HP magnezyum alaşımının birleştirilmesinde Nd-YAG lazer sistemi kullanmışlar; mikro sertlik ölçümlerinde ve hava ortamında yapılan gerilmeli korozyon deneylerinde kaynak metalinin mekanik özelliklerinin ana alaşıma yakın olduğunu belirtmişlerdir. ASTM D1384 çözeltisinde yapılan deneyler sonucunda ise kaynak bölgesinin GKÇ hassasiyetinin ana metalden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ana alaşımın ve kaynak numunelerinin GKÇ direncinin, plazma elektrolitik oksidasyon kaplanmasıyla bir miktar iyileştiğini rapor etmişlerdir.

Chen *et al.* (2009), döküm AZ91 magnezyum alaşımının farklı konsantrasyonlardaki buz çözücü çözelti içerisindeki gerilmeli korozyon davranışını sabit yük testi yöntemini kullanarak incelemişlerdir. 0,5 M buz çözücü çözelti içerisinde kritik gerilme değerinin AZ91 magnezyum alaşımının akma dayanımının üçte biri, 0,005 M çözeltide ise dörtte üçü değerinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Buz çözücü çözeltide GKÇ'nin ana mekanizmasının hidrojen gevrekleşmesi olduğunu ifade etmişlerdir.

Uematsu *et al.* (2012), döküm AZ31 magnezyum alaşımının hidrojen yüklü farklı konsantrasyonlarda NaCl çözeltisi içerisindeki GKÇ davranışını yüklem testi yöntemi ile incelemişlerdir. Gerilmeli korozyon deneylerini -1,4 V sabit katodik potansiyelde gerçekleştirmişlerdir. Artan NaCl konsantrasyonu ile birlikte klor iyonlarının sebep olduğu anodik çözünmenin hızlandığını ve çatlak ilerleme hızının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca katodik potansiyelin etkisini araştırmak için -1,4 V, -2,5 V ve -3,0 V katodik potansiyele sahip %3 NaCl çözeltisi kullanarak gerilmeli korozyon deneyleri yapmışlardır. Bu potansiyel değerlerinin seçilmesinin sebebinin ise Pourbaix diyagramına göre -3,0 V'un bağımsızlık bölgesine denk gelmesi, -1,4 V'un korozyon

bölgesine karşılık gelmesi ve -2,5 V'un ise bu iki bölge arasında sınır bölge olması şeklinde belirtmişlerdir. -1,4 V sabit katodik potansiyelde gerçekleştirilen gerilmeli korozyon deneyinde, kırılma türündeki ana etmenin anodik çözünme olduğunu ve çatlak ilerleme hızının artan NaCl konsantrasyonu ile birlikte arttığını bildirmişlerdir. %3 NaCl çözeltisinde ve -2,5 V ile -3,0 V değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde ise hidrojen gevreklesmesinin etkin olduğunu ve kırılma yüzeyinde herhangi bir korozyon ürününün görülmediğini ifade etmişlerdir.

Argade *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada, farklı tane büyüklüklerine sahip AZ31 magnezyum alaşımının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon davranışını düşük deformasyon hızı testi deney yöntemi kullanarak incelemişlerdir. İnce taneli ve çok ince taneli mikro yapıların elde edilmesi için tek geçişli ve iki geçişli sürtünme karıştırma işlemi yöntemini kullanmışlardır. İnce taneli ve çok ince taneli işlenmiş numunelerde daha yüksek gerilmeli korozyon çatlak hassasiyeti gözlemlendiğini belirtmişler ve bunu da artan hidrojen absorpsiyonuna bağlamışlardır.

Padekar *et al.* (2013), saf su ve doymuş $Mg(OH)_2$ içeren 0,1 M NaCl çözeltisindeki kum kalıba dökülmüş EV31A ve AZ91E magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon çatlak davranışlarını sabit çekme deney yöntemini kullanarak incelemişlerdir. EV31A magnezyum alaşımının AZ91E magnezyum alaşımına kıyasla daha yüksek K_{ISCC} (GKÇ için eşik gerilme şiddeti yoğunluğu) değerine sahip olduğunu, fakat kırılmanın ikinci adımında ise EV31A magnezyum alaşımının daha yüksek çatlak ilerleme hızına ulaştığını belirtmişlerdir. AZ91E ve EV31A magnezyum alaşımlarının saf su içerisinde tane içi gerilmeli korozyon çatlak gösterdiğini, klorür içeren ortamda ise EV31A magnezyum alaşımında hem tane içi hem de taneler arası gerilmeli korozyon çatlak gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çatlak ilerlemesinde hidrojen gevreklesmesinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Casajús and Winzer (2014), sıcak haddelenmiş AZ31 magnezyum alaşımı plakaların saf sudaki GKÇ hassasiyetlerini farklı deformasyon hızlarında kompakt uzama hızı testi yöntemini kullanarak incelemişlerdir. GKÇ hasarının baskın olduğu durumlarda mikro

yapının oldukça önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. İnce taneli numunelerde çatlak ilerlemesinin taneler arasında gerçekleşirken, daha büyük tane boyutlarında ise tane içi boyunca ilerlediğini tespit etmişlerdir.

Kappes *et al.* (2014), AZ31B magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon davranışını farklı potansiyelerde ve farklı NaCl konsantrasyonlarında, düşük deformasyon hızı testi deney yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Gerilme-uzama eğrilerinin sonuçlarının, potansiyel ve klorür konsantrasyonundaki değişikliklere rağmen benzer olduğunu ifade etmişlerdir.

Shi *et al.* (2015), farklı hızlarda ve farklı gerilmelerde haddelenmiş AZ31 magnezyum alaşımlarının saf sudaki gerilmeli korozyon çatlak davranışını lineer artan gerilme testi yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Uygulanan gerilme hızından ve malzeme mukavemetinden bağımsız olarak gerilmeli korozyon çatlak ilerleme hızının $5,0 \pm 2,5 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ olarak gerçekleştiğini bildirmişlerdir. GKÇ duyarlılığının, işlem parametrelerine bağlı olarak eşik gerilmenin akma dayanımına oranının 0,3'e kadar olabileceğini belirtmişlerdir.

Chen *et al.* (2016) hidrojenin, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon ve gerilmeli korozyon çatlak davranışı üzerine sulu çözeltilerde etkisini araştırmışlardır. Sulu çözelti içerisinde korozyonla üretilen hidrojenin, hidrür oluşturmak üzere Mg matriksi içerisinde dağılıp reaksiyona girdiğini belirtmişlerdir. Hidrojenin bir kısmının, hidrit/Mg matriksinde (veya ikincil faz) yavaş hidrit oluşumunun ve hidritin Mg matriksi ile uyumsuzluğunun bir sonucu olarak ara yüzey halinde biriktiği ve moleküler hidrojen oluşturmak için birleştiklerini bildirmişlerdir. Bunun, hidrit/Mg matriksinin ara yüzeyinde yerel bir basıncın gelişmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Hidrit oluşumunun neden olduğu genleşme gerilmesi ve birikmesi nedeniyle oluşan lokal hidrojen basıncının, hidritin gevrek kırılmasına neden olduğunu iddia etmişlerdir. Bu iki birleşik etki, hem AZ91 alaşımının korozyon hızına hem de dış bir yük olmadığında bile çatlak başlamasına ve ilerlemesine sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Hidrojen absorpsiyonunun, AZ91 alaşımının mekanik özelliklerinde çok fazla bozulmaya yol

açtığı, bunun da sulu çözeltilerde tane içi gerilmeli korozyon çatlamasından ve hidrojen gevrekliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Ge *et al.* (2017), lazer şok yöntemi ile işlenmiş ve işlenmemiş AZ31B magnezyum alaşımlarının $36,5 \pm 0,5$ °C sıcaklığındaki yapay vücut sıvısı içerisindeki gerilmeli korozyon davranışını araştırmışlardır. İşlem yapılmamış örneklerle karşılaştırıldığında, korozyon potansiyelinin 131 mV, korozyon akımı yoğunluğunun %85,4, gerilmeli korozyon indeksinin (I_{SCC}) ise lazer şok yönteminden sonra %47,5 azaldığını ifade etmişlerdir.

Xie *et al.* (2017), döküm AZ61 magnezyum alaşımına uygulanan eşit-kanallı açılal preslemenin saf sudaki gerilmeli korozyon davranışını, düşük deformasyon hızı testi deney yöntemini kullanarak incelemiştir. Presleme sonrasında alaşımda; preslenmemiş numuneye kıyasla GKÇ hassasiyetinde ve çekme dayanımında bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Yuasa *et al.* (2017), ekstrüzyon işlemi görmüş %6 Al, %1 Zn, %2 Ca (AZX612) magnezyum alaşımının 0,001 M NaCl çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon davranışını incelemişler ve ekstrüzyon işlemi görmüş AZ61 magnezyum alaşımı ile karşılaştırmışlardır. AZX612 magnezyum alaşımının AZ61 alaşımına göre daha düşük uzama ve daha yüksek GKÇ hassasiyeti gösterdiğini belirtmişler ve buna da Mg-Al alaşımına ilave edilen kalsiyumun sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Zhou *et al.* (2017), ZK60 magnezyum alaşımının farklı koşullar altında, yani ince elektrolit katman (*Thin Electrolyte Layer, TEL*) ve çözelti içerisinde gerilmeli korozyon davranışını düşük deformasyon hızı testi deney yöntemini kullanarak araştırmışlardır. TEL altındaki ile karşılaştırıldığında, çözelti içindeki ZK60 magnezyum alaşımının daha zayıf bir anodik çözünme ve daha güçlü bir hidrojen gevrekliği içeren bir GKÇ mekanizması ile daha yüksek bir GKÇ hassasiyeti sergilediğini ifade etmişlerdir.

Song *et al.* (2017), erbiyum (Er) ve seryum (Ce) ile modifiye edilmiş AZ91 magnezyum alaşımının (AZErCe olarak adlandırılan) havada, klorürlü ve klorürsüz nemli atmosfer ortamlarında gerilmeli korozyon çatlağı davranışını düşük deformasyon hızı testi deney yöntemiyle araştırmışlardır. Er ve Ce element ilavesinin Al₃Er ve Al₁₁Ce₃ fazlarını oluşturduğu, bu fazların ise β fazının hem büyüklüğünü hem de hacimce oranını azalttığını ifade etmişlerdir. Azalan mikro-galvanik korozyon ve daha koruyucu filmler nedeniyle AZErCe alaşımının AZ91 magnezyum alaşımına kıyasla daha yüksek korozyon direncine ve daha kolay pasifleşme karakteristiğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Er ve Ce ilavesinin AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmişlerdir. AZErCe alaşımında AZ91 magnezyum alaşımından daha az hidrojen gevrekleşmesi oluştuğunu ifade etmişlerdir.

He *et al.* (2017), AZ31 magnezyum alaşımının %3,5 Na₂SO₄ çözeltisi içerisinde farklı pH değerlerinde potansiyodinamik polarizasyon testi ve düşük deformasyon hızı testi deney yöntemlerini kullanarak korozyon ve gerilmeli korozyon çatlağı davranışlarını araştırmışlardır. %3,5 Na₂SO₄ çözeltisinde azalan pH ile birlikte GKÇ hassasiyetinin arttığını bulmuşlar ve bunun da elektrokimyasal özellikleri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. %3,5 Na₂SO₄ çözeltisinde deformasyon hızı gerilme testinden sonra, numune yüzeyinde genel korozyon karakteristiğinde görüldüğü gibi filiform korozyon oluşumu ve ayrıca yüzeyde birçok gerilmeli korozyon çatlağı başlama noktası tespit etmişlerdir. Hava ortamında yapılan gerilmeli korozyon deneyinde karmaşık bir kırılma, %3,5 Na₂SO₄ çözeltisinde ise klivaj kırılma görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Prabhu *et al.* (2018), Mg-4Zn alaşımlarının yapay vücut sıvısı içerisinde farklı deformasyon hızlarında gerilmeli korozyon çatlağı davranışını araştırmışlardır. $3,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ hızından $3,6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ hızına azalan deformasyon hızında, uzama ve maksimum çekme gerilmesi değerlerinin sırasıyla %80 ve %58 oranlarında azaldığını bulmuşlardır. Test edilen en yüksek gerilme hızında bile, maksimum çekme dayanımı ve uzamadaki azalmanın, yapay vücut sıvısında Mg-4Zn alaşımının gerilmeli korozyonu çatlaması için kritik gerilme oranının, $3,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ hızına kadar yüksek olabileceğini göstermişlerdir.

Yin *et al.* (2018), yaptıkları çalışmada farklı yüzey koşullarına sahip dövme Mg-Al-Zn magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışını dört nokta eğme testi ve NaCl çözeltisinde alternatif daldırma deneyi ile incelemiştir. Bu alaşımlara ayrıca Mikro Ark Oksidasyon (MAO) kaplama işlemi ve daha sonra ise mühürleme işlemi uygulayarak kompozit bir kaplama elde etmişlerdir. Mg-Al-Zn magnezyum alaşımlarının düşük GKÇ hassasiyetine sahip olduğunu ifade etmişler ve 5 günlük bir daldırma testinden sonra ise $0,15\sigma_{0.2}-0,75\sigma_{0.2}$ (akma dayanımı) gerilme altında ani bir kırılmanın oluşmadığını belirtmişlerdir. Yüzeyi kaplanmış olan numunelerde ise korozyon direncinin arttığını, fakat yüzeyde daha fazla yüzey çatlaklarının oluştuğunu belirlemişlerdir. Kaplamasız numuneye benzer gerilme değerleri $0,75\sigma_{0.2}$ olduğunda ise, çukurcuk korozyonlarının yüzeyde oluştuğunu belirlemişlerdir.

Li *et al.* (2018), EV31A magnezyum alaşımının $Mg(OH)_2$ bakımından doymuş 0,1 M Na_2SO_4 çözeltisi içerisindeki GKÇ davranışını doğrusal artan gerilme testi ile incelemiş ve saf magnezyum ve WE43B magnezyum alaşımı ile karşılaştırmışlardır. Her üç alaşımın da GKÇ hassasiyetlerinin bulunduğunu ifade etmişlerdir. Eşik gerilme değerlerini saf magnezyum için $0,3x$ (akma dayanımı), EV31A için $0,6x$ (akma dayanımı) ve WE43B için $0,8x$ (akma dayanımı) olarak hesaplamışlardır. $7,3 \times 10^{-4} \text{ MPa s}^{-1}$ gerilme hızında yapılan deneylerde GKÇ hızlarını ise saf magnezyum için $7,2 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$, WE43B magnezyum alaşımı için $5,6 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ ve EV31A magnezyum alaşımı için $1,5 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ olarak ölçmüşlerdir.

Jafari *et al.* (2018), haddelenmiş ZK21 magnezyum alaşımının 37°C 'deki yapay vücut sıvısı içerisindeki $3,7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında gerilmeli korozyon davranışını, düşük deformasyon hızı testi deney yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Farklı elektrokimyasal ortamlarda mekanik özelliklerle birlikte GKÇ direncinin de oldukça azaldığını ifade etmişlerdir.

Huang *et al.* (2018), sürtünme karıştırma işlemi uygulanmış AZ80 magnezyum alaşımının mikro yapı, mekanik, statik ve elektrokimyasal korozyon özellikleri ve GKÇ davranışını araştırmışlar, ayrıca tane büyüklüğünün ve yapısının GKÇ üzerine etkilerini

analiz etmişlerdir. İnce (2,7 µm) ve kaba taneli (7,17 µm) numunelerin benzer mikro yapı görüntülerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ince taneli numunenin mikro sertliğinin (75,3 HV), kaba taneli numuneye (69,4 HV) göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Tane inceltme işleminin %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde hem korozyon direncini hem de gerilmeli korozyon direncini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Jiang *et al.* (2019), nadir toprak elementi içeren ve ticari olarak üretilen ME21 magnezyum alaşımına ince taneli mikro yapı elde etmek için yapılan kanallı açılmalık presleme işleminin gerilmeli korozyon direnci üzerine etkisini araştırmışlardır. Gerilmeli korozyon deneylerini $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında hava, saf su ve Hanks çözeltisi içerisinde, düşük deformasyon hızı testi deney yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Hanks çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen deneylerde, kırılma yüzeylerinde ve yan yüzeylerde belirgin aktif çözünme ve hidrojen gevrekleşmesi izlerini gördüklerini ifade etmişlerdir. Daha fazla kristal kusur içeren ve ince taneli mikro yapıya sahip ME21 magnezyum alaşımında pasif oksit film oluştuğunu bunun da korozyon ve gerilmeli korozyon direncini artırdığını belirtmişlerdir.

Anotlama işlemi; metallerin üzerinde anodik akım ya da voltaj uygulayarak seramik oksit bir film üretmek için yapılan en popüler endüstriyel işlemlerden biridir. Anotlama işlemi magnezyum alaşımlarında ise özellikle korozyondan korumak için yapılmaktadır. Anotlama işlemi literatürde anodik kaplama, kıvılcım, plazma elektrolitik oksidasyon ya da mikro ark oksidasyon gibi ifadeler içerse de aslında tüm bunlar anotlama işleminde var olan adımları ifade etmektedir. Literatürde, anotlama işlemine etki eden parametreler olan akım-voltaj karakteristikleri ve anodik banyo çözelti türleri gibi kaplama parametrelerinin, magnezyum alaşımlarının yüzey morfolojisi, elektrokimyasal özellikler, aşınma, yorulma vb. mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Mizutani *et al.* (2003), yaptıkları çalışmada 1 mol/dm^3 alkali çözeltisinde 10 dk boyunca 3 V, 10 V ve 80 V değerlerinde uygulanan anotlama işleminin saf magnezyum, AZ31 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal davranışlarını incelemişlerdir. En iyi korozyon direncini 3 V için elde etmişler ve bunun sebebini ise

oluşan taban malzemenin tümüyle magnezyum hidroksit tabakasından oluşmasına bağlamışlardır. 80 V'ta ise 10 V'ta yapılan anotlama işlemine göre daha yüksek korozyon direnci elde ettiklerini belirtmişler ve bunun da yüzeyde oluşan magnezyum oksit tabakasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Fukuda and Matsumoto (2004), AZ91D magnezyum alaşımına, 3 M KOH çözeltisine 0,5-5 M Na₂SiO₃ ekleyerek düşük potansiyellerde anotlama işlemi uygulamışlardır. Na₂SiO₃ eklentisi ile birlikte anodik akımın arttığını ve yüzeyde Mg(OH)₂ ile birlikte Mg₂SiO₄ yapısının da az miktarda oluştuğunu ve bunun da korozyon direncini artırdığını belirtmişlerdir.

Chai *et al.* (2008), AZ31 magnezyum alaşımına silikat içeren NaOH çözeltisinde sabit voltaj altında kıvılcım içeren anotlama işlemi uygulamış ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Eklediği oksisaltların farklı anotlama işlemlerinde kıvılcımlara neden olduğunu ifade etmişlerdir. En iyi korozyon direncinin sodyum silikat içeren elektrolitte elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon davranışı üzerine yapılan diğer bir çalışmada ise, AZ61 magnezyum alaşımı üzerine PEO yöntemiyle kaplama işlemi yapılmış ve alaşım üzerindeki gerilmeli korozyon davranışı, düşük deformasyon hızı deneyi ile farklı deformasyon hızları için incelenmiştir. PEO kaplamasının gerilmeli korozyon direncini az bir miktar artırdığı belirtilmiştir (Srinivasan *et al.* 2008a).

Srinivasan *et al.* (2008b) plazma elektrolitik oksidasyon işlemi uygulanmış AM50 dökme magnezyum alaşımının ASTM D1384 çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon davranışını incelemişlerdir. PEO kaplama işleminin korozyona karşı direnci arttırdığını, ASTM D1384 çözeltisi içerisinde gerilmeli korozyon direncini çok az miktarda iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Oluşan GKÇ'nin sebebini ise kaplamada oluşan mikroçatlakların ilerlemesine ve bunun da düşük deformasyon hızında taban malzemesinin çatlamasına yol açmasına bağlamışlardır.

Barbosa and Knörschild (2009) yaptıkları çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımı 0,1 M, 1 M ve 4 M NaOH elektrolitlerinde 30 V ve 90 V sabit voltaj aralığında değişen ve 20 mA/cm² ile 1500 mA/cm² aralığında değişen akım yoğunluklarında anotlama işlemi gerçekleştirmişler ve büyütülen anodik filmin özelliklerini elektron mikroskobu, XRD ve mikro-Raman spektroskopisi kullanarak incelemişlerdir. Düşük akım yoğunluklarında anodik filmin, Mg(OH)₂'den oluşan bariyer bir tabaka ve MgO tabakasından oluşan gözenekli bir tabaka içerdiğini ifade etmişlerdir.

Srinivasan *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada, dökülmüş AZ31 magnezyum alaşımını plazma elektrolit oksidasyon yöntemiyle fosfat ve silikat temelli alkalın elektrolit içerisinde kaplamışlardır. ASTM D1384 çözeltisi içerisinde düşük deformasyon hızı testi (SSRT) yöntemiyle PEO kaplamanın gerilmeli korozyon çatlama etkisini incelemişler ve PEO kaplamanın mükemmel korozyon direnci sağlamasına rağmen, kaplanmamış ve PEO kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyona hassas olduklarını tespit etmişlerdir. Uzun süre ASTM D1384 çözeltisi içerisinde tutulmuş olan AZ31 alaşımının polarizasyon test sonuçlarına bakıldığında, yüzey üzerinde oluşan film tabakasına korozyon ürünlerinin etki ettiğini belirtmişlerdir.

Durdu and Usta (2012), ticari saflıktaki magnezyumu sodyum silikat ve sodyum fosfat çözeltilerinde farklı akım yoğunluklarında MAO (Mikro Ark Oksidasyon) yöntemiyle kaplamış ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sodyum silikat çözeltisinde yapılan işlemlerde anodik kaplamanın MgO ve Mg₂SiO₄'den oluştuğunu, fosfat temelli çözeltide ise Mg₃(PO₄)₂ ve MgO bileşiklerinden oluştuğunu göstermişlerdir. Sodyum silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamanın sodyum fosfat çözeltisine göre daha yüksek sertlik, adhezyon mukavemeti ve aşınma direnci gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Vatan *et al.* (2016), PEO kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımı üzerine SiC nanokompozit oksit kaplama uygulanmış; yapısal, tribolojik ve elektrokimyasal davranışları incelemişlerdir. PEO kaplama için NaAlO₂ (2 g/l), Na₂SiO₃ (2 g/l) ve KOH (1,5 g/l) alümina-silikat elektroliti ve Na₃PO₄ (4 g/l) ve KOH (1.5 g/l) fosfat elektroliti çözeltileri

hazırlamışlar ve farklı akım yoğunlukları uygulamışlardır. SiC kaplamanın korozyon ve aşınma direncini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Asgari *et al.* (2017), 5g/l $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ve 2 g/l KOH içeren çözelti içerisine farklı miktarlarda ilave edilen alümina nano partiküllerin AZ31 magnezyum alaşımının PEO kaplaması üzerine etkisini ve karıştırıcının hızının etkisini incelemişlerdir. En iyi korozyon direncinin 30 g/l nano partikül ilavesinde elde ettiklerini ve karıştırıcı hızının anodik kaplamanın morfolojisini değiştirdiğini belirtmişlerdir.

Ceschini *et al.* (2017), nadir elementler içeren EV31 magnezyum alaşımının yorulma direncine PEO kaplama işleminin etkisini incelemişlerdir. PEO kaplama işlemi olarak ticari olan MAGOXID-COAT uygulamışlardır. Uygulanan kaplamanın EV31 magnezyum alaşımının yorulmalı korozyon direncini %15 oranında azalttığını ve bunun sebebinin ise PEO sırasında oluşan artık gerilmelerden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Ma *et al.* (2018), ZK60 magnezyum alaşımını 0,05 M Na_3PO_4 ve 0,02 M $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ temelli çözeltiye farklı konstrasyonlarda KOH ilave ederek mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplamışlardır. Kaplanan numunelerin korozyon deneylerini yapay vücut sıvısı içerisinde gerçekleştirmişler ve en yüksek korozyon direncini 0,05 M KOH ilavesinde elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Xue *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, MAO yöntemiyle kaplanmış AZ31B magnezyum alaşımının korozyon ve yorulmalı korozyon davranışlarını incelemişlerdir. MAO işlemini, 0,065 mol/l Na_2SiO_3 , 0,15 mol/l KF ve 0,18 mol/l KOH çözeltisinde farklı süreler ve akımlarda gerçekleştirmişlerdir. Yapılan MAO işleminin korozyon direncini oldukça iyileştirdiğini ve yorulmalı korozyon direncini azalttığını ifade etmişlerdir.

Magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için yapılan diğer bir yüzey kaplama işlemi ise termal spreyle kaplamadır. Termal spreyle kaplama yöntemleri içinde elektrik ark spreyle kaplama yöntemi, diğer termal spreyle kaplama yöntemlerine göre oldukça ekonomik bir kaplama yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca elektrik ark spreyle kaplama yöntemi

ile hasarlı olan parçaların tamiri de yapılmakta olup, bu yöntem endüstride oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Elektrik ark sprej yöntemi ile magnezyum alaşımlarının yüzeyinin kaplanması öne çıkan temel malzeme alüminyumdur. Alüminyumun üzerinde kolaylıkla oksit bir tabaka oluşmakta ve bu da magnezyum alaşımlarından daha iyi korozyon direnci sağlamaktadır. Ayrıca alüminyum, magnezyum alaşımlarında en yaygın olarak kullanılan alaşım elementi olup magnezyum alaşımlarında mukavemeti, sertliği, dökülebilirliği ve korozyon direncini arttırmaktadır. Literatürde farklı yöntemlerle alüminyum kaplanmış magnezyum alaşımlarının korozyon özellikleri incelenmiştir.

Wei *et al.* (2005), elektrik ark sprej kaplama yöntemini kullanarak AZ31 magnezyum alaşımını alüminyum ile kaplamış ve korozyon davranışlarını tuz daldırma testleri ve elektrokimyasal testlerle değerlendirmişlerdir. Kaplama sonrasında kaplamanın yoğunluğunu ve kaplamanın bağlanma mukavemetini artırmak için ısıl işlem uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda AZ31 magnezyum alaşımının korozyon direncinin ark sprej kaplama işlemi ve sonrasında yapılan ısıl işlem ile oldukça arttığını belirtmişlerdir.

Arrabal *et al.* (2009), AZ31, AZ80 ve AZ91D Mg-Al alaşımlarına uygulanan termal sprej alüminyum kaplama işleminin tuz çözeltilerindeki (%3,5 NaCl ve nötr tuzlusu ASTM B117) korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda uygulanan kaplama işleminin korozyon direncini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Pardo *et al.* (2009), AZ31, AZ80 ve AZ91D magnezyum alaşımlarını termal sprej kaplama yöntemini kullanarak Al-11Si kaplamış ve kaplamanın korozyon direncini %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal ve ağırlık kaybı yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Alüminyum kaplama işlemine son işlem olarak 32 MPa basınç altında soğuk presleme işlemi uygulamışlardır. Yaptıkları bu işlemlerin korozyon direncini oldukça iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

Dayani *et al.* (2018), AZ31B döküm magnezyum alaşımını soğuk sprej kaplama yöntemini kullanarak AA7075 alüminyum alaşımı kaplamış ve yorulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Kaplanmış ve kaplanmamış numuneleri yük kontrol modunda değişken yükler için incelemişler ve kaplanmış numunenin yorulma dayanımınının 10 milyon çevrimde %25 arttığını ifade etmişlerdir.

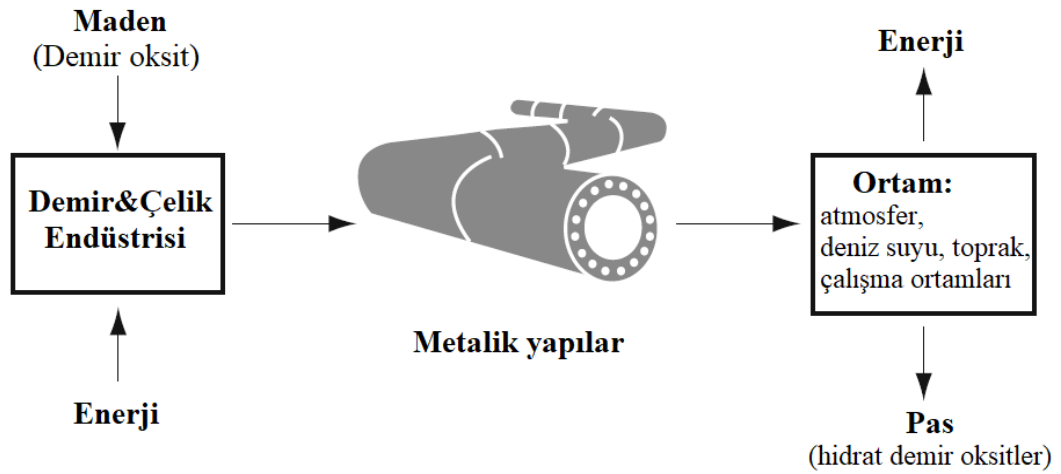
Ura-Bińczyk *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, AZ91E magnezyum alaşımını sıcak püskürtme yöntemiyle alüminyum kaplamış ve korozyon direncini %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde ölçmüşlerdir. Ayrıca sıcak püskürtme işlemini farklı nitrojen akış hızlarında gerçekleştirmişler ve etkilerini incelemişlerdir. 14 günlük daldırma testleri sonucunda alüminyum kaplama işleminin korozyon direncini artırdığını tespit etmişlerdir. Yüksek püskürtme hızlarının daha fazla gözenekliliğe sebep olduğunu ve daha çok bozunmaya yol açtığını belirtmişlerdir.

Anotlama işlemi magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, yapılan literatür incelemesinde özellikle gerilmeli korozyon davranışı üzerine çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Yapılan bu çalışmada ise literatürden farklı olarak farklı miktarlarda Al içeren AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına üç farklı çözelti içerisinde anotlama işlemi uygulanmış ve anotlanmış numunelerin korozyon ve gerilmeli korozyon davranışına etkileri %3,5 NaCl çözeltisinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yine yapılan literatür taramasında elektrik ark sprej yöntemi kullanılarak magnezyum alaşımlarının alüminyum kaplanması ile korozyon direncine etkisinin incelenmesi üzerine az sayıda çalışmaya rastlanılmış, gerilmeli korozyon davranışı üzerine ise herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Elektrik ark sprej yönteminin belirtilen faydası göz önüne alınarak bu çalışmada ayrıca kullanılan magnezyum alaşımları bu yöntem ile saf alüminyum kaplanmış, numunelerin korozyon ve gerilmeli korozyon davranışları yine %3,5 NaCl çözeltisinde incelenmiş ve elektrik ark sprej yönteminin magnezyum alaşımlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Korozyon

Malzemeler saldırgan ortamlara maruz kalmaları sonucu kimyasal ve fiziksel bozunmaya uğrarlar. Bu bozunma “korozyon” olarak adlandırılır. Korozyon sıklıkla “malzemelerin çevreleri ile etkileşime girerek bozunması” ve “doğada buldukları bileşik (mineral) haline kendiliğinden dönmesi” olarak tanımlanır. Korozyon oluşması ile birlikte metaller; metalürjik dönüşümle enerji yayarak, doğada daha kararlı termodinamik durumları olan oksitler, sülfürler ya da diğer birleşik hallerine dönerler. Bu sebeple korozyon; “metalürjinin tersi” olarak da isimlendirilir. Şekil 2.1’de demirin korozyonu ile ilgili doğadaki döngü verilmiştir (Pedferri 2018).



Şekil 2.1. Korozyon oluşumunun ters metalürjik olarak gösterimi (Pedferri 2018)

2.1.1. Korozyonun ekonomik etkileri

Korozyonun doğrudan ve dolaylı olarak etkilediği sektörlere bakıldığında sanayi, enerji, ulaştırma, kimya, gıda, petrol ve gaz, eczacılık, makine, inşaat mühendisliği gibi birçok alan sıralanabilir. Korozyon; metalik ve betonarme yapılar, hidrokarbon ve su taşıyan boru hatları, hava, kara ve deniz ulaştırma altyapıları, köprüler, iskeleler, açık deniz

yapıları, kimyasal tesisler ve nükleer reaktörler, elektrik santralleri, elektronik cihazlar, vücut implantları ve kültürel miras olan eserlerin bozunmasına ve hasara uğramasına neden olabilmektedir (Pedferri 2018).

Korozyonun sebep olduğu ekonomik etkilere yönelik en güncel çalışma raporu, Amerika Birleşik Devleti'nde (ABD) 2016 yılında *NACE International* firması tarafından *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study* isimle yayınlanmıştır. Bu rapordan elde edilen bilgilere göre; İngiltere ve Japonya Sanayi Bakanlıkları, ABD Kongresi adına Ulusal Standartlar Bürosu ve ABD Ulusal Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nün tahminleri, korozyon maliyetinin Gayri Safi Milli Hasıla (GSMH)'nin yaklaşık %3 ila %4'ünü oluşturduğunu doğrulamışlardır. Genel korozyon maliyetinin 2,5 trilyon ABD Doları olduğu tahmin edilmekte ve ortalama bir ülkenin korozyon giderinin GSMH'nin %3,4'ü olduğunu belirtmişlerdir (Koch *et al.* 2016).

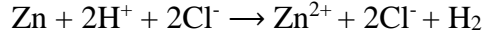
Korozyonun neden olduğu olumsuzluklara bakıldığında; doğrudan kayıplar (hasarlı parçaların yenisiyle değiştirilmesi, korozyona dayanıklı malzeme kullanma, korozyonu önleme için yapılan koruyucu kaplamalar, katodik koruma, korozyon payı bırakma gibi) sonucu oluşan maliyetlerin yanı sıra, dolaylı maliyetler (örneğin, üretim kaybı maliyetleri, çevreye sebep olduğu kirlilikler, görüntü kaybı vb.) de bulunmaktadır. Ayrıca insan hayatının kaybıyla sonuçlanan korozyon hasarlarının tahmin edilemez maliyetleri de söz konusudur.

2.1.2. Korozyonun elektrokimyasal mekanizması

Bütün metalik korozyon prosesleri sulu ortamlar içerisinde yük transferi içerirler. Örneğin çinkodan (Zn) yapılmış bir parça HCl çözeltisi içerisine daldırıldığında çinko çözünmeye başlar ve aynı zamanda çinko üzerinden hidrojen kabarcıklarının çıktığı görülür. Görülen bu olayın kimyasal reaksiyonu şu şekilde yazılabilir:



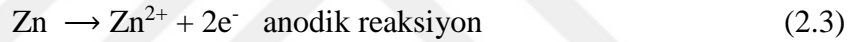
Çinko, asidik çözeltiyle reaksiyona girerek çinko klorür ve yüzeyde hidrojen kabarcıkları oluşur. İyonik formda bu reaksiyonlar yazılacak olursa;



Klorür iyonları her iki taraftan yok edilirse;

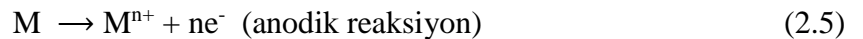


Bu reaksiyon da ikiye bölünürse;

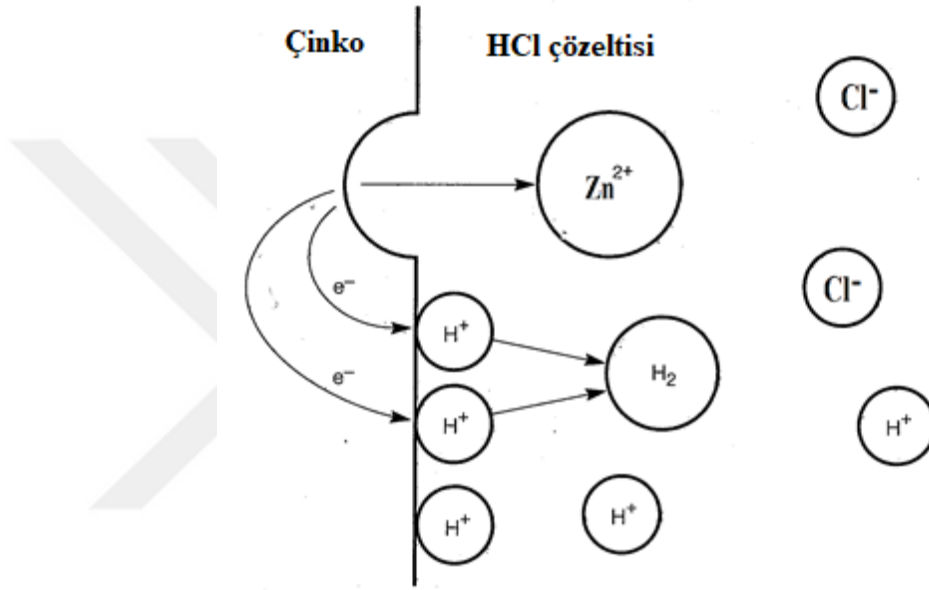
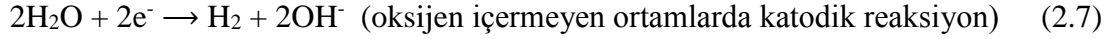


Anodik reaksiyon olarak tanımlanan (2.3) nolu reaksiyon bir oksidasyon reaksiyonudur. Çinko atomunun valans elektron sayısı 0'dan +2'ye yükselmiştir. Diğer taraftan katodik reaksiyon olarak tanımlanan (2.4) nolu reaksiyon ise bir indirgenme reaksiyonu olup hidrojen elementinin valans elektron sayısı +1'den 0'a düşmüştür.

Tüm reaksiyonları içeren yük transferi ya da elektron değişimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Metal çözünmesi ile (2.3) nolu reaksiyonda gösterildiği gibi metal parçasından ayrılmalar gerçekleşir. Diğer taraftan çözelti içerisindeki H^+ iyonları (2.4) nolu reaksiyonda gösterildiği üzere elektron alarak H_2 'ye dönüşmüştür. Bu mekanizma genel olarak bütün metallerin sulu ortamlar içerisindeki korozyonu olarak düşünülebilir. Bütün sulu ortam içerisinde gerçekleşen korozyon mekanizmalarında bir anodik reaksiyon bir de katodik reaksiyon içerilmektedir. Genel olarak bu reaksiyonlar şu şekilde özetlenebilir:



Oksijen içeren ve içermeyen ortamlarda katodik reaksiyonlar ise aşağıdaki şekilde yazılabilir (Jones 1993).

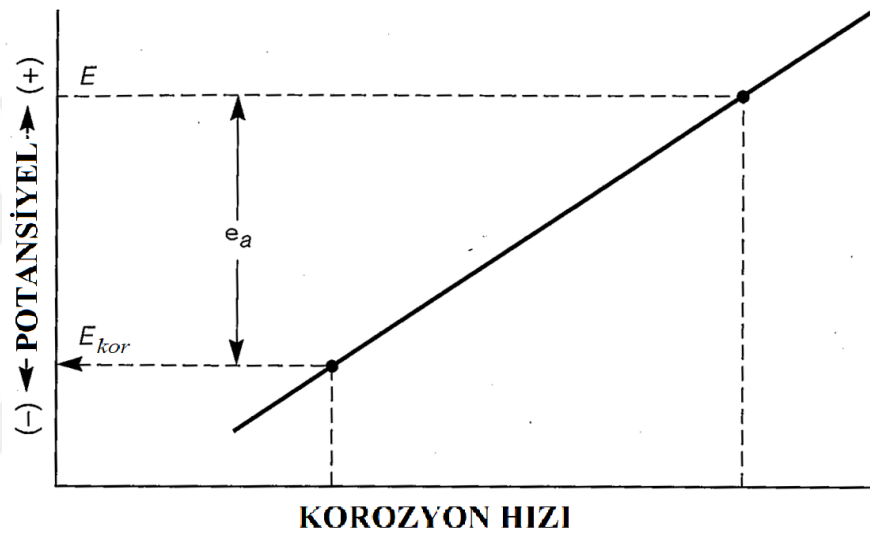


Şekil 2.2. HCl asit içerisinde daldırılan metalin çözünmesini gösteren şematik diyagram (Fontana 1986)

2.1.3. Elektrokimyasal polarizasyon

(2.3) ve (2.4) nolu elektrokimyasal reaksiyonları çoğu zaman sınırlı sürelerde ilerler. (2.4) nolu reaksiyondaki gibi ortamda elektronların bulunması halinde bu elektronlar metal/çözelti ara yüzeyinde reaksiyon için bulunurken, metal yüzeyi daha negatif hale gelir. Tüm elektronların yerini alabilmesi için reaksiyon yeterince hızlı gerçekleşmemiştir. Bu negatif potansiyel değişimi katodik polarizasyon olarak adlandırılır. Benzer şekilde (2.3) nolu reaksiyondaki gibi metal yüzeyinde elektron ayrılması sonucunda pozitif bir potansiyel değişimi gerçekleşir ve bu da anodik polarizasyon olarak adlandırılır. Anodik çözünmenin artması sonucunda, polarizasyon da artar.

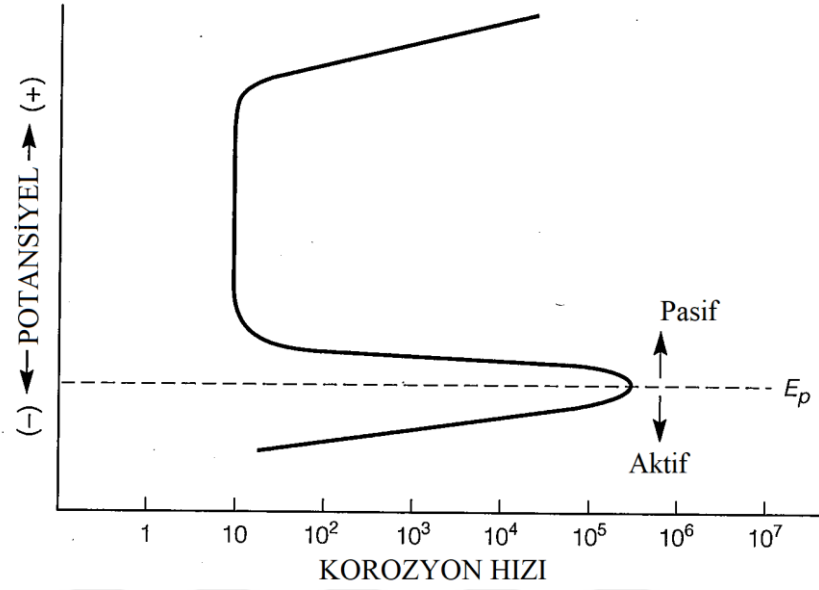
Anodik ve katodik reaksiyonlar sonucunda gerçekleşen elektron transferi hızına ve gerçekleşebilmesine bağlı olarak, sulu ortamlar içerisinde metal yüzeyin sabit durum potansiyeline, korozyon potansiyeli (E_{kor}) denir. Şekil 2.3'te şematik olarak gösterildiği gibi, yüzey potansiyelinin E_{kor} potansiyelinden E potansiyeline kadar artmasıyla anodik reaksiyon hızı yani korozyon hızı genellikle artar. Anodik polarizasyon $e_a = E - E_{kor}$ olarak açıklanabilir (Jones 1993).



Şekil 2.3. Anodik polarizasyon ve artan E potansiyeli ile korozyon hızının artışı gösteren grafik (Jones 1993)

2.1.4. Pasifleşme

Demir, nikel, alüminyum, titanyum, krom ve kobalt gibi birçok metalin, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, bazı kritik potansiyel değerlerinin (E_p) üzerinde korozyon hızları oldukça azalır. Korozyona karşı yüksek itici güç olmasına rağmen (yüksek anodik polarizasyon), E_p üzerindeki bu korozyon direnci pasifleşme olarak adlandırılır. E_p 'den az olan potansiyelerde ise metal oldukça yüksek hızda korozyona uğrar. Pasif bölgede korozyon hızı oldukça düşüktür ve bu azalma aktif bölgeye nazaran 10^3 'ten 10^6 kata kadar gerçekleşebilmektedir. Pasifleşme ile korozif ürünler metal yüzeyinde birikerek koruyucu (daha çok oksit yapısında) ince bir tabaka oluşturmakta, bu da anodik çözünmeyi yavaşlatmaktadır (Jones 1993).



Şekil 2.4. Kritik potansiyel (E_p) üzerindeki oksitleyici potansiyelerde pasiflik (Jones 1993)

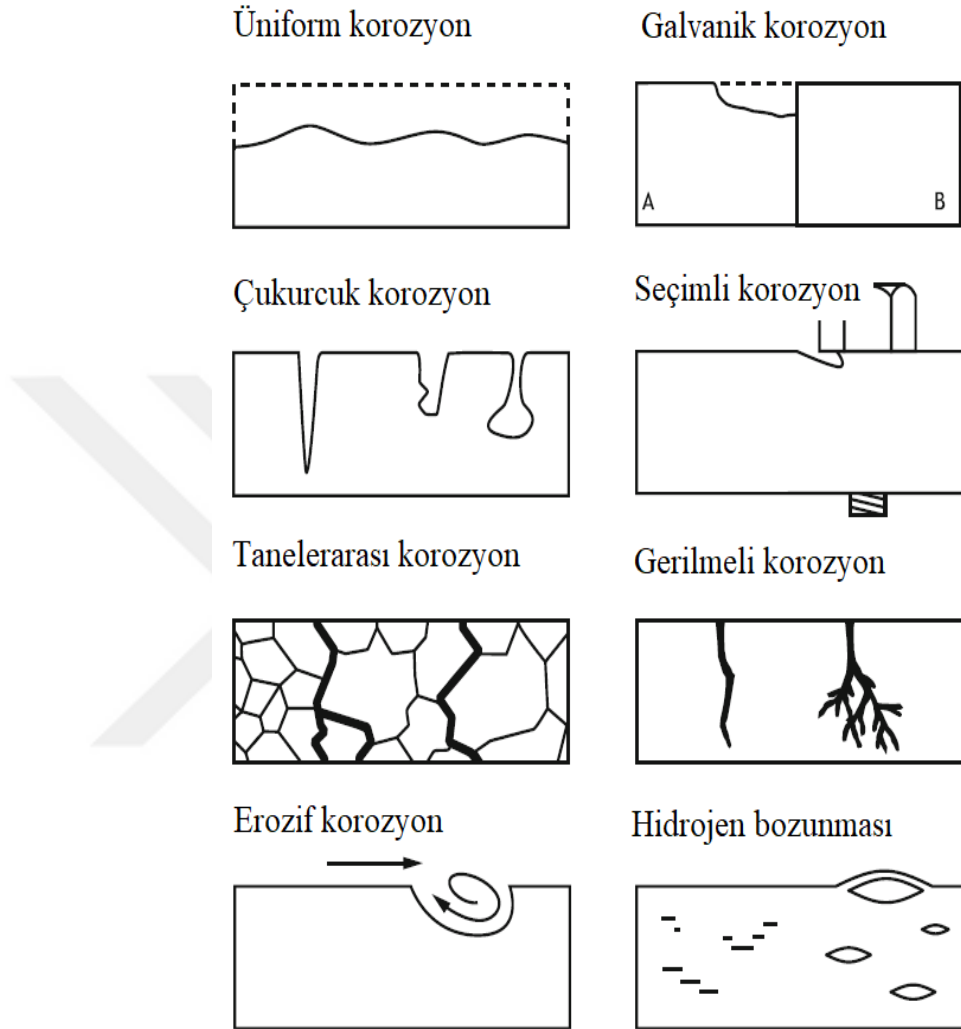
2.1.5. Korozyon türleri

Korozyona uğrayan metalin dış görünümü, mekanik dayanımı, süneklik azalması ve korozyondan etkilenen metal yüzeyinin görünümleri temel alınarak korozyon olayını sınıflandırmak mümkündür (Doruk 2014).

Korozyon türlerini 8 ana başlık altında toplamak mümkündür (Fontana 1986). Bunlar;

- Üniform korozyon
- Galvanik korozyon
- Çukurcuk korozyon
- Seçimli korozyon
- Taneler arası korozyon
- Gerilmeli korozyon
- Eroziv korozyon
- Hidrojen bozunması olarak sıralanabilir.

Şekil 2.5'te korozyon türlerine ilişkin şematik görüntüler verilmiştir.



Şekil 2.5. Korozyon türleri (Pedferri 2018)

Üniform Korozyon: Metal yüzeyinin büyük bir bölümünün homojen olarak korozyona uğradığı durumdur. Tercihli bir korozyon bölgesi olmadığı için hem katot hem de anot sabit bir bölgede oluşmamakta, bu da metal yüzeyinde üniform bir korozyona neden olmaktadır. En yaygın olarak görülen korozyon türlerinden biridir. Korozyon hızları, elektrokimyasal korozyon teknikleri ve ağırlık kaybı ile ölçülebilir (Popov 2015).

Galvanik Korozyon: Farklı iki alaşım aynı korozif ortam (elektrolit) içerisinde bulunduğu anda, daha aktif olan metal anodik davranış sergileyerek korozyona uğrarken

diğerine göre pasif olan alaşım ise katodik davranarak korozyondan korunur. Bu şekilde korozyon türüne galvanik korozyon denir (Jones 1993). Bu tür eşleşmeler genellikle istenilmez, fakat çoğunlukla tasarım veya imalat gereksinimi olarak karşılaşılr (Doruk 2014).

Çukurcuk Korozyon: Çukurcuk korozyonu lokal olarak gerçekleşen bozunmalar sonucunda metal yüzeyinde delinmelerin oluşmasıdır. Bu delik boyutları çoğu durumda çok küçüktür. En tehlikeli korozyon türlerinden biridir. Özellikle pasifleşme sergilemiş veya kaplanmış numunelerde çukurcuk korozyonu neticesinde korozyon hızlanmaya başlar (Fontana 1986).

Seçimli Korozyon: Metal alaşımlarında belirli bir metal veya fazda gerçekleşen korozyon türüdür. Bu tür korozyonda malzemenin dayanımı azalır (Doruk 2014).

Taneler arası Korozyon: Bazı safsızlık elementleri, alaşımların katılaşması esnasında segregasyona uğrayabilir. Bu ayrışma genellikle ana fazın taneleri arasında yer alır. Bu durum alaşım elementi içerisinde farklı potansiyel bölgelere sebep olduğundan tanecik boyunca taneler arası korozyon oluşur (Jones 1993).

Gerilmeli Korozyon: Çekme gerilmesi ve korozif ortamın eş zamanlı etkisiyle genellikle aktif metal ve alaşımlarında ani ve beklenmedik hasarlara neden olan korozyon türüdür (Popov 2015).

Erozif korozyon: Metal ve alaşımların yüzeyine korozif akışkanın çarpmasıyla metal yapısında oluşan bozunma türüne erozif korozyon denir (Fontana 1986).

Hidrojen Bozunması: Malzemenin içindeki hidrojenin varlığından kaynaklanan ve malzemede sonradan kırılabilirliğe sebep olan bozunmaya hidrojen bozunması adı verilir. Hidrojen, malzeme içerisine yeterli miktarda nüfuz edebiliyorsa, pratik olarak tüm metal malzemeler bu bozunmaya uğrayabilir (Woodtli and Kieselbach 2000).

2.2. Magnezyum ve alaşımları

Toprak alkali metal olan Magnezyum (Mg), periyodik tablonun 3. grubunda bulunur. Atom numarası 12, atomik ağırlığı 24,3050 akb, yoğunluğu ise 1,74 g/cm³tür. Sıkı paket hegzagonal kristal yapısına sahiptir (Friedrich and Mordike 2012).

Magnezyum, 1,74 g/cm³ yoğunluğuyla mühendislik malzemeleri içerisinde en hafif olanıdır. Yoğunluğu alüminyumun üçte ikisi ve çeliğin dörtte biri, özgül dayanımı ise her ikisinden fazla olan magnezyum alaşımları bu özelliğinden dolayı birçok sektörde hafif malzeme olarak kullanılmaktadır (Kumar *et al.* 2015). Magnezyum ve alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek sönümlenme kapasitesi, üstün dökülebilirlik, mükemmel elektrik koruma etkisi, düşük ısı kapasitesi, sıfır mıknatıslanma, olağanüstü geri dönüşüm, mükemmel biyoyumluluk ve insan vücudu ile çevreye toksit olmama gibi birçok üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir (Song and Shi, 2011). Tüm bu özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv ve havacılık sektörleri başta olmak üzere medikal, bilgisayar, cep telefonları ve spor malzemeleri gibi pek çok endüstriyel alanda kullanımı giderek artmaktadır.

Magnezyum saf halde kullanıldığı gibi; mukavemet, dökülebilirlik, işlenebilirlik, korozyon direnci ve kaynak edilebilirliği gibi özelliklerini artırmak için çoğu zaman uygun miktarlarda alaşım elementleri ilave edilerek alaşımlandırılarak da kullanılır. ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu, *American Society for Testing and Materials*) standartlarında ilave edilen alaşım elementleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. ASTM standartlarında magnezyum alaşımlarının isimlendirmesi genellikle iki harf ve iki rakamla gösterilir. Birinci harf alaşım içerisinde en çok bulunan ilk elementi, ikinci harf ise en çok bulunan ikinci katkı elementini gösterir. Rakamlar ise sırasıyla bu elementlerin yüzde bulunma oranlarını göstermektedir (Avedesian and Baker 1999).

Magnezyum alaşımlarına ilave edilen katkı elementlerinin etkileri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Magnezyum alaşım elementlerinin ASTM standartlarında gösterimi

Harf	Alaşım Elementleri
A	Alüminyum
C	Bakır
E	Nadir toprak elementleri
H	Toryum
K	Zirkonyum
L	Lityum
M	Mangan
Q	Gümüş
S	Silisyum
Y	İtriyum
Z	Çinko

Çizelge 2.2. Magnezyum alaşım elementlerinin çeşitli etkileri (uygun miktarlarda katıldığında oluşan etkiler verilmiştir, ayrıca birbirlerine olan etkileri göz ardı edilmiştir) (Friedrich and Mordike 2012)

Alaşım Elementi	Özellik	Etkisi
Alüminyum	Dayanım	Artırır
	Süneklik	
Kalsiyum	Sürünme Direnci	Azaltır
	Oksidasyon	Azaltır
	Sürünme Direnci	Artırır
Lityum	Dayanım	Azaltır
	Süneklik	Artırır
Mangan	Dayanım	Artırır
	Korozyon Direnci	
Nadir elementler	Dayanım	Artırır
	Sürünme Direnci	
	Korozyon Direnci	
Silisyum	Korozyon Direnci	Artırır
Gümüş	Yaşlandırma	Artırır
Toryum	Sürünme Direnci	Artırır
	Dökülebilirlik	
İtriyum	Dayanım	Artırır
Çinko	Korozyon Direnci	Artırır

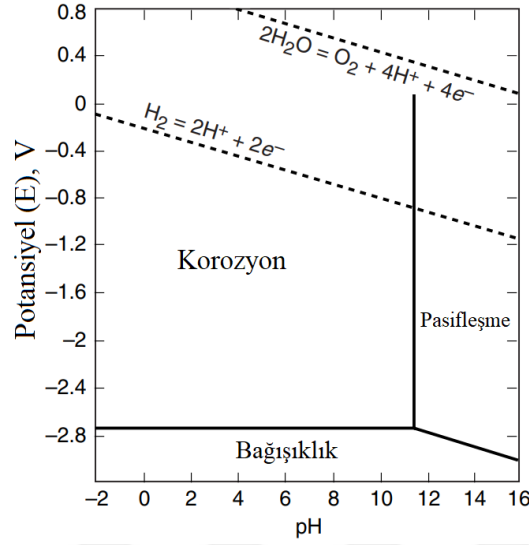
2.3. Magnezyum ve alaşımlarının korozyonu

Magnezyum ve alaşımlarının birçok üstün fiziksel özelliğine rağmen düşük korozyon direnci, kullanımını kısıtlayan en önemli problem olarak durmaktadır. Aslında düşük karbonlu çeliklerle karşılaştırıldığında, magnezyumun atmosferik ortamda korozyon direnci yüksektir. Çünkü magnezyum hava ile temas ettiğinde yüzeyinde koruyucu oksit bir film oluşur. Koruyucu filmin saldırgan ortamlarda zarar görmesi durumunda korozyon hızlanır. Magnezyum ve alaşımlarının korozyonu sulu ortamlarda artar. Magnezyum ve alaşımlarının sulu çözeltiler içerisindeki korozyonu sırasında anodik ve katodik tepkimeler aşağıdaki gibi yazılabilir:



Anodik reaksiyon magnezyumun çözünmesi şeklinde gerçekleşirken, katodik reaksiyon hidrojen oluşumu ile sonuçlanmıştır. Korozyon ürünü olarak ise magnezyum hidroksit oluşmuştur (Ghali 2010). Bu reaksiyonlar magnezyum alaşımları için de geçerliliğini korur (Song and Atrens 2003).

Magnezyumun 25°C su ortamı içerisindeki davranışını gösteren potansiyel-pH diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu diyagrama göre yüksek pH değerlerinde oluşan Mg(OH)₂ tabakası magnezyumun pasifleşmesini sağlar ve koruyucu bir tabaka görevi yapar. Atmosferik ortamda oluşan bu tabaka, klorür, bromür ve sülfat içeren çözeltilerde kolaylıkla çözünür.



Şekil 2.6. Magnezyumun 25°C'deki su içerisindeki potansiyel-pH (Pourbaix) diyagramı (Shaw 2003)

2.4. Magnezyum ve alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışları

2.4.1. Gerilmeli korozyon

Çevreye bağlı çatlama, çekme gerilmesi ve korozyon ortamlarının birleşik etkisinden kaynaklanan gevrek bir mekanik kırılmadır. Çevreye bağlı çatlama, kırılma çeşidine bağlı olarak, gerilmeli korozyon çatlakları, yorulmalı korozyon çatlakları ve hidrojen nedenli çatlama ya da hidrojen gevrekliği şeklinde ayrılabilir.

Gerilmeli korozyon çatlakları, aktif metallerde ve alaşımlarda kendiliğinden gerçekleşen çekme gerilmesi ve korozif ortamın etkisi ile çatlak oluşması olarak tanımlanır. Gerilmeli korozyon çatlaklarının başlaması için, artık gerilmelerin yanı sıra metalin klorür iyonları, su, oksijen gibi korozif ortamlar ile temas halinde bulunması gerekir. GKÇ'nin genellikle hasar oluşmadan tespit edilmesi oldukça zordur ve çoğu zaman ani kırılmalara yol açar. Gerilmeli korozyon oluşması için gerekli olan gerilme, dış yüklerden kaynaklanabileceği gibi; ısıtma işlemi, kaynak, imalat ve soğuk işlem gibi işlemler neticesinde malzemede oluşan artık gerilmelerden de kaynaklanabilir (Popov 2015).

GKÇ mekanizması için birkaç hipotez öne sürülmüştür. Basitleştirilmiş bir yaklaşımla Fontana (1986) GKÇ'yi anodik ve katodik olarak iki temel mekanizmaya dayandırmış ve çatlak büyümesinin aşağıdaki mekanizmalardan birine göre gerçekleştiğini belirtmiştir.

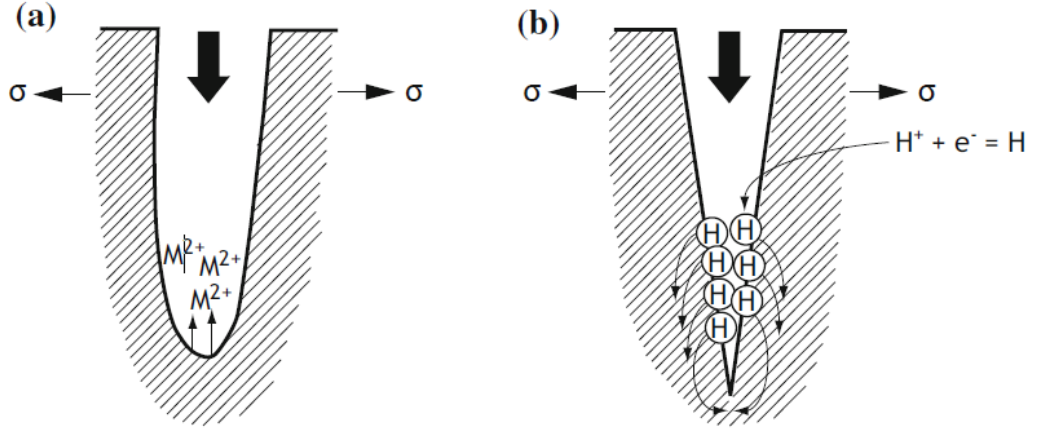
- Anodik çözünmeye dayanan çatlak ucu çözünmesi
- Katodik işlem tarafından üretilen hidrojenin metal içerisine girmesi ve çatlak ucunda birikmesinin neden olduğu çatlak ucu kopması (hidrojen gevrekliği)

Birinci mekanizmada, aktif olan çatlak ucunun anodik çözünmesi ile çatlak sürekli ilerlemek isterken, çatlak ucunun önü ve çatlak dışındaki yüzey pasif kalır ve böylelikle makro bir hücre oluşur. Çatlak ucunun aktif olmasının nedeni, etrafındaki gerilme yığılmasının bir kusur oluşturmasıdır. Çatlak ilerledikçe sürekli aktif olan yeni yüzeyler ortaya çıkmaktadır. Bu kritik koşulu eşleştirmek için, çatlak ucunda kayma deformasyonunun neden olduğu yeni hatasız metal yüzey oluşma oranı ile (gerilme yükünün neden olduğu deformasyon oranına eşittir) pasifleşme hızının aynı büyüklükte olması gerekir. Bu koşul, korozyonun gerçekleşmesi için anodik ve katodik tepkimelerin her ikisinin de devam etmesi koşuludur.

İkinci mekanizma olan hidrojen gevrekliği ise, katodik reaksiyon sonucu oluşan hidrojen atomu birikmesinden kaynaklanan ve metalik bağ kuvvetinin azalmasından dolayı çatlak ucunda peş peşe meydana gelen mekanik yırtılmalar ile çatlağın büyümesidir. Katodik tepkime sonucu metal içerisine giren ve yer değiştirmelerle yayılan hidrojen atomu, çatlak ilerlemesine yeni yollar açar. Açılan bu yeni yollar da tekrardan hidrojen atomu oluşturur ve bozunmaya yol açarak çatlağın ilerlemesini bu şekilde devam ettirir (Pedferri 2018). Bu iki mekanizmaya ait gösterim Şekil 2.7'de verilmiştir.

GKÇ ile ilgili kırılmalar genellikle plastik deformasyon olmadan ortaya çıkar. GKÇ'ye hassasiyeti bulunan malzemeler normalde sünek olmalarına rağmen, GKÇ hasarlarına bakıldığında daha çok gevrek kırılma türü görülür. Oluşan çatlaklar genellikle uygulanan gerilmeye dik yönde oluşur ve büyürler. GKÇ morfolojisi; metal, ortam ve gerilme dağılımına bağlı olarak taneler arası, tane içi ve az ya da çok dallı nehir kırılma şeklinde

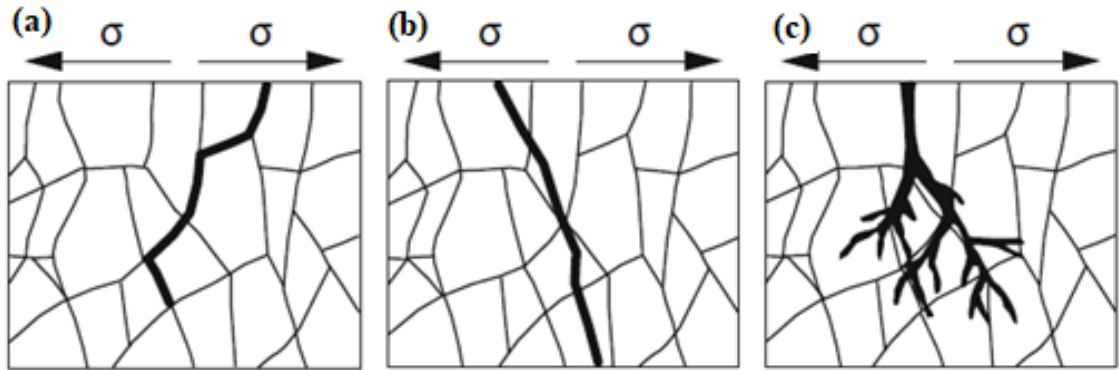
gerçekleşir. İlgili GKÇ'deki çatlak ilerleme türlerinin şematik resmi Şekil 2.8' de gösterilmiştir (Pedferri 2018).



Şekil 2.7. Basitleştirilmiş GKÇ mekanizması: (a) anodik çözünme (b) hidrojen gevrekliği (Fontana 1986; Pedferri 2018)

GKÇ aşağıdaki üç adımda oluşur:

- Çatlak oluşumu
- Çatlak yayılması ya da ilerlemesi
- Mekanik kırılma (Fontana 1986).

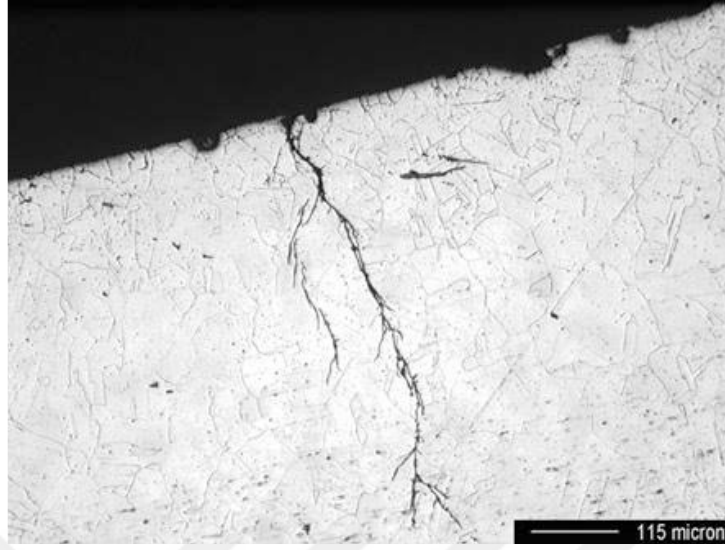


Şekil 2.8. GKÇ yayılım mekanizması: (a) taneler arası (b) tane içi (c) taneler arası nehir kırılma (Pedferri 2018)

2.4.1.a. Çatlak oluşumu

Pürüzsüz bir yüzeyde ilk mikro çatlağın oluşması için belirli bir zamana ihtiyaç vardır. Bu zaman periyodu, kuluçka zamanı olarak adlandırılmaktadır ve çatlak çekirdeklenmesine bağlı olarak birkaç dakika sürebildiği gibi uzun yıllar da sürebilmektedir. Çatlak oluşumu; tuzluluk, pH ve oksijen içeriği, diğer oksitleyici türler, açık devre potansiyeli, sıcaklık, statik veya değişken uygulanan gerilme gibi metal yapısı ve bulunduğu ortam ile ilgilidir. Örneğin, içinde kaynar magnezyum klorid çözelti içeren östenitik paslanmaz çelikler sadece birkaç saat çözeltiye maruz kaldıktan sonra çatlaklar gösterirken; yüksek sıcaklıkta (290–320°C) saf su ile temas halinde bulunan nükleer reaktörlerde kullanılan nikel süper alaşımlarda birkaç yıl sonra çatlak oluşur. Görüldüğü üzere, çatlak oluşumu değişken bir olaydır ve bunu etkileyen birçok parametre bulunmaktadır.

Kaynak hataları veya mekanik çukurlar gibi çentiklerin oluşumu, çatlak başlangıcını kolaylaştırır. Şekil 2.9'da yüzeydeki bir çukurdan başlayan gerilmeli korozyon çatlağı gösterilmiştir. Bununla birlikte, makroskobik olarak kusurlardan arındırılmış yüzeylerde de ortaya çıkmaktadır. GKÇ'nin oluşabileceği düşünülen ortamlarda bunun tahmin edilmesi, çoğu zaman tedbirlerin alınabilmesi açısından güvenilir olarak görülebilir. Ancak lokal değişimlerden kaynaklanan ve beklenmeyen gerilmeli korozyon çatlağı oluşumu oldukça tehlikelidir. Örneğin ham petrolün damıtma kolonlarında olduğu gibi konsantrasyon işlemlerinden dolayı çukurlar ve çatlaklar genellikle iç taraftan başlar ve lokal olarak gerçekleştiğinden bunun fark edilmesi ve önlenmesi oldukça zordur. Diğer bir durumda, örneğin östenitik paslanmaz çeliklerden yapılan ev kazanlarının ısı eşanjörlerinde sıcaklık artmasından dolayı sularda çöken kireçli tortunun saldırganlığının artacağı bilindiğinden, bu bölgeleri GKÇ'den korumak için katodik koruma yapılmaktadır (Pedefferri 2018).

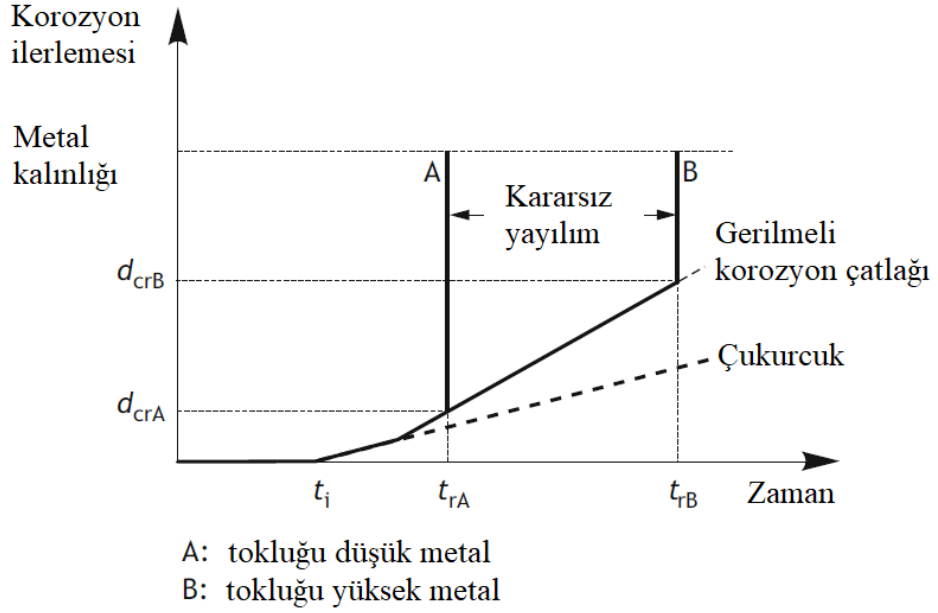


Şekil 2.9. Yüzeydeki bir çukurdan başlayan gerilmeli korozyon çatlakı (Pedferri 2018)

2.4.1.b. Çatlak yayılması ve mekanik kırılma

Bir çatlak başladığında çatlakın yayılması, korozyon mekanizması ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak 10^{-6} m/s (≈ 31 m/y) - 10^{-11} m/s ($\approx 0,3$ mm/y) hızları aralığında değişebilmektedir. Bu çatlak büyüme aşamasına “alt kritik” veya “kararlı yayılma aşaması” denir.

Şekil 2.10’da, farklı tokluklara sahip A ve B metallerinin yüzeydeki bir çukurcuktan başlayan gerilmeli korozyon çatlakı yayılımının şematik gösterimi verilmiştir. Burada çukurcuk oluşumu zamanı t_i ve gerilmeli korozyon çatlakının kararsız yayılma sürelerine ulaşma zamanları t_{rA} ve t_{rB} ise sırasıyla A ve B metallerinin servis süreleri, d_{crA} ve d_{crB} ise sırasıyla A ve B metallerinin kritik hata boyutu olarak alınabilir. Tokluğu yüksek olan B metalinin kritik boyuta ulaşması A metalinden daha uzun sürede gerçekleşmiştir (Brown 1968).



Şekil 2.10. Çukurcuktan başlayan farklı kırılma tokluklarına sahip A ve B metallerinin gerilmeli korozyon çatlakları hasar sürelerinin şematik gösterimi (Brown 1968)

2.4.2. Metallerde gerilmeli korozyon çatlakları testleri

Çalışma şartlarında gerilmeli korozyon çatlaklarını önlemek, beklenmedik kırılmalardan kaynaklanabilecek hasarların olasılığını azaltmak için önemlidir. Burada laboratuvar testleri önemli rol oynamaktadır. GKÇ ile sonuçlanan malzeme ve çevre etkileşimini tahmin etmeyi sağlayacak genel bir analitik yaklaşım olmadığı için, GKÇ'den kaçınılması ya geçmişteki deneyimlere ya da laboratuvar testlerine dayanmalıdır. Mevcut tasarım yaklaşımları, kısa ölçekli deneysel verilerin, uzun vadeli yapısal performansı öngörmek için tahmin edilebileceğini varsaymaktadır. Prensip olarak bu testler, saldırgan bir ortama maruz kalmış ve üzerinde gerilme olan bir materyalden oluşur (Raja and Shoji 2011).

GKÇ testleri için ASTM, ISO (Uluslararası Standardizasyon Örgütü, *International Organization for Standardization*) ve NACE (Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği, *National Association of Corrosion Engineers*) tarafından yayımlanan prosedürler bulunmaktadır.

GKÇ test stratejilerinde iki temel yaklaşım vardır Bunlar;

- Güvenli ömür yaklaşımı
- Hasar toleransı yaklaşımı.

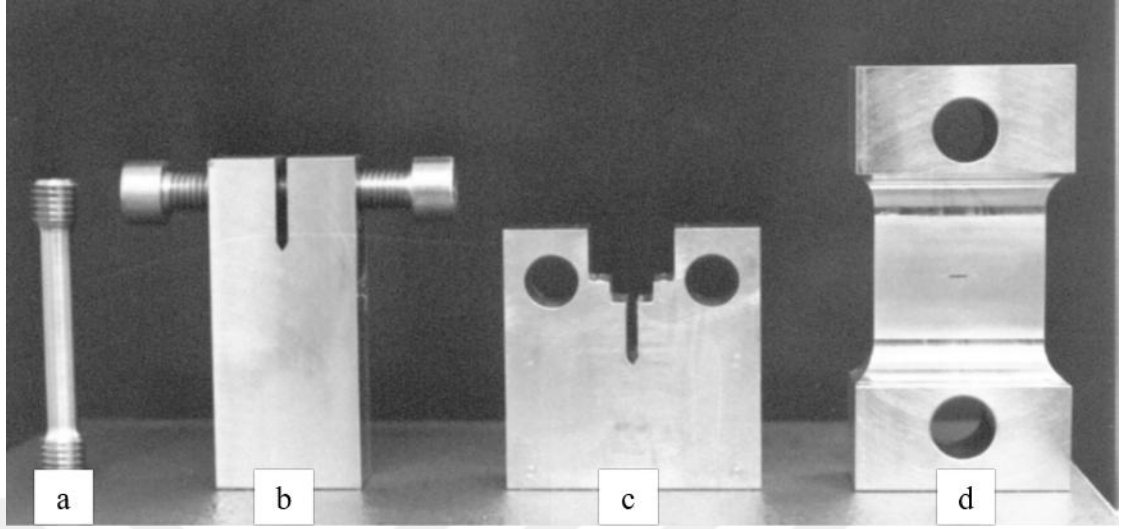
Güvenli ömür yaklaşımı; yapıda kritik çatlak olmadığını, dolayısıyla yapıda sınırlı sürelerde önemli bir hasarın oluşmayacağını öngörmektedir. Hasar toleransı yaklaşımında ise hasarın (yani çatlağın) başladığı kısımda da kullanılabilmesi ve belirgin bir hasar olmadan yeterli bir hizmet ömrünün sağlanması amaçlanmaktadır. Hasar toleransı yaklaşımı, yeni yapılarda zaten mevcut olan çatlak ihtimalini de içerek güvenli ömür yaklaşımının ötesine geçer. Bu iki yaklaşımın her ikisi de hizmet sırasında yapısal bütünlüğü sağlamak zorundadır (Raja and Shoji 2011).

2.4.2.a. Kullanılan numuneler ve yükleme modları

Gerilmeli korozyonla ilgili laboratuvar testleri farklı yaklaşımları yansıtmak için, testin amacına bağlı olarak pürüzsüz ya da çentikli numuneler kullanılarak yapılabilmektedir. Pürüzsüz (yani çatlak içermeyen) bir numuneyi kullanarak yapılan test, başlangıç kusurunun olmadığı bir durum için kullanılırken; önceden çentik açılmış numunelerin kullanımı, hasar toleransı yaklaşımına göre kusurların veya çatlakların varlığını göstermektedir. Şekil 2.11'de gerilmeli korozyon testleri için örnek numuneler gösterilmiştir (Dietzel 2000).

GKÇ testi için uygun bir numune ve yükleme yöntemi, yapılacak test ile ilgili hedefin tanımı ve gerekli olan bilgiye göre değişmektedir. Test örnekleri ve test koşulları kombinasyonlarını kullanan dört temel gerilmeli korozyon testi türü vardır:

- Düz numuneler-statik yük testleri
- Düz numuneler-dinamik yük testleri
- Çentikli numuneler-statik yük testleri
- Çentikli numuneler-dinamik yük testleri.



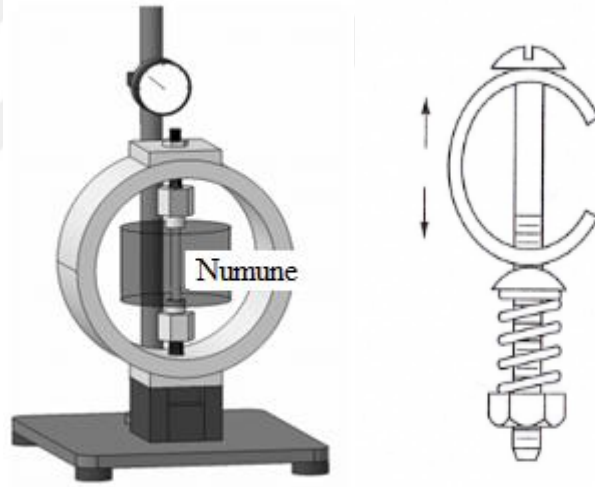
Şekil 2.11. Gerilmeli korozyon testleri için kullanılan numune tipleri: (a) düz(çentik içermeyen) çekme numunesi; (b) cıvata yüklü çift konsol kiriş örneği; (c) önceden çentik açılmış kompakt numune; (d) yüzey çentikli panel

Bu testlerin her birinin farklı faydaları bulunmaktadır. Örneğin bir malzeme statik yükleme altında gerilmeli korozyon çatlama karşı bağımsızlık kazanabileceken, sürekli yavaş deformasyonda çok hassas olabilir (Parkins *et al.* 1972). Çentik açılmış numunelerin kullanımı; imalat, üretim ya da kullanım esnasında oluşabilecek çatlak veya benzeri çukurların tamamen yok sayıldığı anlamına gelmektedir. Bu tür kusurların varlığı, gerilmeli korozyona karşı duyarlılığa neden olabilir. Örneğin sulu ortam içerisindeki titanyum alaşımlarında, sabit yük altında yapılan düz numuneli deneylerde açıkça görülemeyen bu duyarlılığı ortaya çıkarmak için çentikli numunelere ihtiyaç duyulmaktadır (Wanhill 1975). Düz numunelerin kullanımı, yapıların ilk kusurlardan arındırılmış olduğu ve bir kusur oluşmadan önce toplam servis ömürlerinin %90'ından fazlasında çalıştırılabileceği varsayımına dayanmaktadır. Uygulamada hiçbir yapı bu gibi kusurlardan arındırılmış olmadığı için, pürüzsüz örnekler üzerindeki GKÇ testleri temel olarak tarama kriteri olarak kullanılmaktadır (Raja and Shoji 2011).

Aşağıda düz numuneler için kullanılan deney yöntemleri verilmiştir.

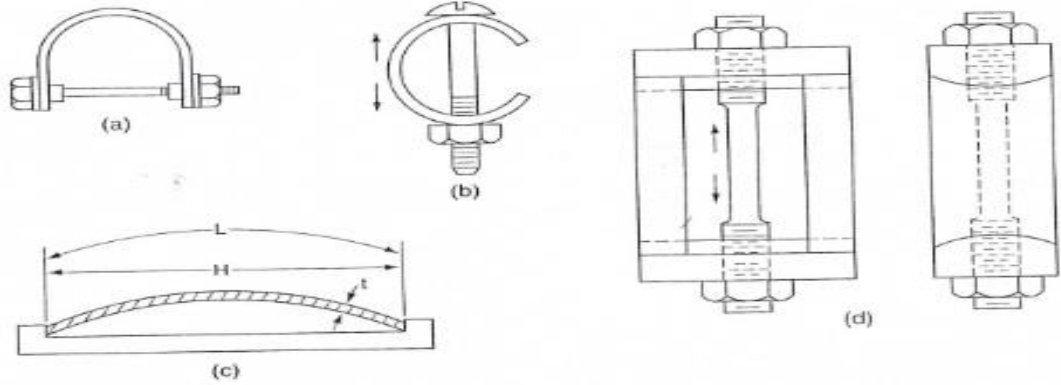
2.4.2.b. Deney yöntemleri

Sabit yük testleri: Bu testlerin en önemli özelliği, test süresince yükün sabit kalmasıdır. Sabit yük testlerinde numuneler silindirik veya düz olabileceği gibi bazen çentikli numuneler de kullanılır. Yükleme, en basit haliyle sabit bir yükün numuneye bağlanmasıyla veya Şekil 2.12’de gösterildiği şekilde gerçekleştirilebilir. Çatlak başlangıcı ile birlikte azalan kesit alanı, yükün sabit olmasından dolayı gerilme artışına sebep olur. Bu yöntemin dezavantajlarından biri, genellikle numunelerin ortam etkisinden önce yüklenmeye maruz kalmasıdır. Çatlağın başlangıç süresi, uygulanan gerilmenin ölçülmesi ya da numune tutucularına bağlanan mikro uzunum ölçerler ile deplasman ölçülmesiyle gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.12. Sabit yükleme testi deney düzenekleri (Lee *et al.* 2018)

Sabit deformasyon testi: Bu yöntemde numune üzerine sabit bir deformasyon uygulanır. Gerilmeli korozyon çatlaklarının oluşması için hasar süresi göz önüne alınmıştır. Numune belli bir ölçüde plastik deformasyona uğratarak çözelti içerisinde çatlak oluşumu gözlenir. Şekil 2.13’te sabit deformasyon için örnek deney düzenekleri verilmiştir. Bu yöntemin dezavantajı ise çatlak gözle görülebilir hale gelmesinin beklenilmesi ve hasar zamanı olarak çatlak oluşum süresinin kullanılmasıdır.



Şekil 2.13. Sabit deformasyon testi deney düzenekleri (Jones 1993)

Düşük deformasyon hızı testi: Bu yöntem, standartlara uygun olarak hazırlanan numunelere çok küçük hızlarda deformasyon uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Genellikle bilgisayar kontrollü çekme cihazlarında gerçekleştirilen bu deneyde, numunelerdeki kırılma süreleri kıyaslanarak gerilmeli korozyon indeksleri belirlenir.

2.4.3. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon

Magnezyum alaşımlarının; düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, mükemmel boyutsal kararlılık, iyi elektromanyetik kalkan, üstün sönümleme, kolay işlenebilirlik ve geri dönüşüm gibi özelliklerinden dolayı, kullanımı yapısal uygulamalarda giderek yaygınlaşmaktadır. Yapısal olmayan uygulamalarla karşılaştırıldığında, yapısal uygulamalarda magnezyum alaşımından yapılan parçaların artmasıyla GKÇ görülme oranı da artmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde, magnezyumdan yapılan parçaların taşıyıcı bağlantılarında kullanılmasından dolayı servis şartları daha fazla yüke maruz kalmaktadır. Motor bloğu, şanzıman gövdesi, karter, tekerlekler, motor contası, kontrol paneli, kapı çerçevesi, şasi traversi gibi yapısal otomobil döküm parçaları magnezyum içerebilmektedir. Gerilme altında çalışan magnezyum alaşımlarından üretilmiş otomotiv parçalarının, özellikle kış aylarında çevreden gelen tuzlu suya maruz kalmaları ya da vücut sıvısıyla temas halinde bulunan medikal parça uygulamalarında gerilmeli korozyon çatlağının açık bir risk olduğu reddedilemez bir gerçektir. Saldırgan çevresel ortamda yüksek miktarda alüminyum içeren alaşımların akma gerilmesinin

%30'u kadar az olan gerilmelerde bile gerilmeli korozyon çatlağının oluşması, beklenmedik sonuçlara yol açabilmektedir. Saf su gibi saldırgan olmayan ortamlarda bile yaygın olarak kullanılan AZ91, AZ31 ve AM50 gibi alaşımların, gerilmeli korozyon çatlağına karşı hassasiyetleri bulunmaktadır. Bu da gerilmeli korozyon çatlağının kolaylıkla otomotiv ve medikal uygulamalarda görülebileceğinin kanıtıdır (Song 2011).

2.4.3.a. Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışına alaşım elementlerinin etkileri

Saf Mg: Saf magnezyumun GKÇ'ye karşı hassasiyeti bulunmaktadır. Winzer *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada 5 g/l NaCl çözeltisi içerisindeki saf magnezyumda tane içi gerilmeli korozyon çatlağı olduğunu belirtmişlerdir. Meletis and Hochman (1984), %99,9 saflıktaki magnezyum alaşımında klor kromat çözeltisi içerisinde TİGKÇ oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Stampella *et al.* (1984), ince taneli (0,025 mm) ticari saflıktaki magnezyumda tane içi gerilmeli korozyon çatlağı; daha kaba taneli (0,075 mm) yüksek saflıktaki magnezyumda ise hem tane içi hem de taneler arası gerilmeli korozyon çatlakları oluştuğunu belirtmişlerdir.

Alüminyumun Etkisi: Magnezyum alaşımlarında alüminyum, mukavemeti ve dökülebilirliği artırır. Mg-Al alaşımlarının hava, saf su ve klor iyonları içeren çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlağına karşı hassasiyetleri bulunmaktadır. GKÇ'nin akma dayanımının %50'si olduğu değerlerde bile görülebildiği ve malzemeyi hasara uğrattığı bilinmektedir (Atrens *et al.* 2011).

AZ91, AM60 ve AS41 popüler magnezyum alaşımlarının saf su içerisinde GKÇ'ye karşı hassasiyetleri bulunmaktadır. Hemen hemen bütün magnezyum alaşımların yaklaşık %40-50 akma dayanımında GKÇ oluşmaktadır. AZ31 magnezyum alaşımının da %0,9 NaCl çözeltisi içerisinde GKÇ hassasiyeti görülmüştür (Song 2011).

Çinkonun Etkisi: Çinko, magnezyum alaşımlarında GKÇ hassasiyetini artırmaktadır. Nadir elementler içeren ZExx gibi Mg-Zn alaşımlarında Mg-Al-Zn içeren alaşımlara göre gerilmeli korozyon çatlakları daha kontrol edilebilir olmaktadır. Hem Al hem de Zn içeren AZxx alaşımlarının hava ve klor içeren çözeltilerde GKÇ hassasiyetlerinin bulunduğu belirtilmiştir (Chen *et al.* 2009; Shaw 2003).

Mangan Etkisi: Mg-Mn alaşımlarının hava, klorür çözeltileri ve klorür-kromat çözeltilerinde bağışıklık oluşturdıkları bilinmesine rağmen, GKÇ'ye karşı hava, damıtılmış su, klorür ve sülfat iyonları içeren çözeltilerde hassasiyetlerinin buldukları ifade edilmektedir (Song 2011).

Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi: Magnezyum alaşımlarındaki nadir toprak elementleri, sürünme direncini, dökülebilirliği, yaşlandırmayı ve korozyon direncini artırmaktadır. Mg-Zn-Zr alaşımlarına Nd ilavesi de GKÇ direncini artırmaktadır (Eskin 2014).

Kannan *et al.* (2008), nadir toprak elementleri içeren ZE41, QE22 ve EV31A magnezyum alaşımları ve AZ80 magnezyum alaşımlarının saf su ve %0,5 NaCl içeren çözeltilerde GKÇ davranışlarını incelediklerinde, bütün alaşımlarda GKÇ oluştuğunu gözlemlemişlerdir. AZ80, ZE41 ve QE22 magnezyum alaşımlarında saf suda tane içi gerilmeli korozyon çatlakları oluştuğunu ve AZ80 magnezyum alaşımında ise hidrojen gevrekleşmesi tespit etmişlerdir. ZE41, QE22 ve EV31A magnezyum alaşımlarında %0,5 NaCl çözeltisinde tane sınırları boyunca bulunan ikincil fazların mikro galvanik korozyon etkisi oluşturduğunu ve bunun da taneler arası gerilmeli korozyon çatlaklarına yol açtığını belirtmişlerdir.

Demirin Etkisi: Demir (Fe) elementi, magnezyum alaşımlarında sadece safsızlık elementi olarak bulunmakta ve tolerans limitleri üzerinde kullanılması ise korozyon hızını oldukça artırmaktadır. Aynı şekilde magnezyum alaşımlarında Fe elementinin artışı ile birlikte GKÇ hassasiyeti de artmaktadır (Song 2011).

Diğer elementlerin Etkisi: Li, Ag, Nd, Pb, Cu, Ni, Sn ve Th gibi elementlerin magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon direncine çok küçük etkisi olduğu ya da herhangi bir etkisi olmadığı söylenmektedir (Avedesian and Baker 1999). Mg-Zn-Zr alaşımlarına Cd ve Nd ilavesi ise gerilmeli korozyon direncini artırmaktadır (Eskin 2014).

2.4.3.b. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlak türleri

Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlağı, taneler arası gerilmeli korozyon çatlağı (TAGKÇ) ve tane içi gerilmeli korozyon çatlağı olarak iki şekilde gerçekleşebilmektedir. Bazen bu ikisi beraber oluşabilmektedir. Bu iki kırılma türü, birbirinden farklı mekanizmalar sonucunda oluşmaktadır. Bu mekanizma tane boyutu ve ortamı ile açıklanabilir. TİGKÇ sürekli olmayan ve değişken kırılmaları içerirken TAGKÇ ise sürekli ve tamamen elektrokimyasal olarak gerçekleşmektedir. Eğer ortamda hidrojen varsa tane boyutuna bağlı olarak hem TİGKÇ hem de TAGKÇ görülebilir. Örneğin ince taneli (0,025 mm) ticari saflıktaki magnezyumda tane içi gerilmeli korozyon çatlağı görülürken, daha kaba taneli (0,075 mm) yüksek saflıktaki magnezyumda ise hem tane içi hem de taneler arası gerilmeli korozyon çatlakları görülebilmektedir. Kırılma türü ayrıca korozif ortam ile de ilgilidir. Mg-5Al alaşımında MgCO₃, %0,5 KF, %0,5 KHF ve %0,5 HF çözeltilerinde TİGKÇ görülürken, %0,05 potasyum kromat çözeltisinde ise TAGKÇ görülmüştür (Atrens *et al.* 2011).

Bazı çalışmalarda Mg-Al-Zn ve Mg-Al alaşımlarında TAGKÇ görülmüş ve bunun sebebinin ise ısı ile işleme ince taneli yapıların oluşturulması ve tane sınırları boyunca Mg₁₇Al₁₂ çökmesi olduğu belirtilmiştir. Al içeriği fazla olan Mg-Al alaşımlarında TAGKÇ oluşma ihtimali çok daha fazladır. Bunun sebebi ise, tane sınırlarındaki Mg₁₇Al₁₂ çökeltisinin birleşik Mg matrisi ile mikro-galvanik korozyon etkisi oluşturmasına bağlanmıştır. Buna ek olarak yapılan diğer çalışmalarda ise sadece, Mg₁₇Al₁₂ fazlarının oluşmasıyla ilgili olmadığı, aynı zamanda tane boyutunun da bunda etkili olduğu belirtilmiştir. Hem tane içi hem de taneler arası kırılmanın oluşması ise şu şekilde açıklanmaktadır. Mg₁₇Al₁₂ çökmesinden kaynaklanan TAGKÇ, hidrojen bulunması durumunda tane büyüklüğünün artırılması ise TİGKÇ'ye geçiş

görülebilmektedir. Çünkü çatlak daha kolay bir yoldan devam etmeyi seçecektir ve hidrojen gevrekleşmesi büyük tanelerde daha kolay olmaktadır (Avedesian and Baker 1999).

2.5. Anotlama işlemi

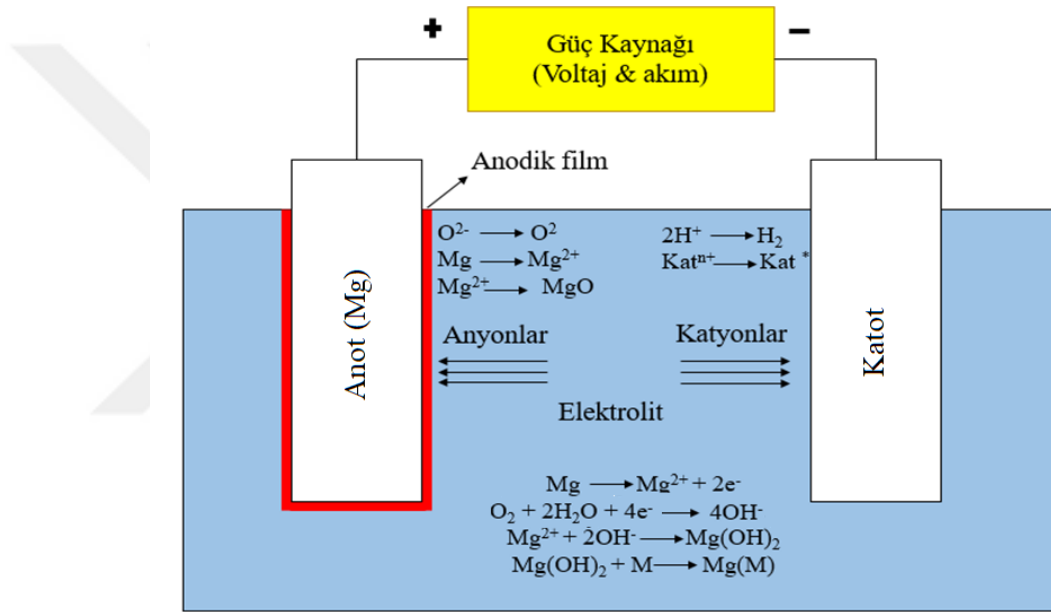
Anotlama, magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için uygulanan en etkili tekniklerden biri olarak görülmektedir. Başarılı bir anodik kaplamanın aşağıdaki ihtiyaçları karşılaması gerekir:

- Korozyon ortamından yüzeyi korumak için çok dayanıklı olmalı,
- Kırılma ve bozunma olmaksızın yüzeyin çizilme ve deformasyona karşı dirençli olmalı,
- Alt tabakayı izole etmek için iletken olmayan bir tabaka olmalı ve tabakanın deforme olması halinde korozyonu ciddi şekilde hızlandıracak galvanik etki yapmamalı,
- Üzerine başka bir kaplama yapılacaksa yüzey morfolojisinin pürüzlü olmalı,
- Yüzey üzerindeki tüm alanları dolduracak şekilde güçlü bir kaplama olmalı.

Anotlama; anodik akım ve voltaj uygulayarak metal yüzey üzerinde oksit bir film oluşturmak için yapılan en popüler endüstriyel işlemlerden biridir. Geleneksel anotlama işlemlerinde oksidasyon reaksiyonları, akım ya da voltaj ile kontrol edilir. Birçok farklı terimle ifade edilmesine rağmen; ‘ark’, ‘kıvılcım’, ‘plazma’ ve ‘anodik kaplama’ gibi sıklıkla kullanılan ifadeler bu tekniği açıklamak için kullanılır. Bunlar geleneksel anotlama işlemi adımlarında var olan olayları ifade eder. Anodik kaplamalar, gözenekli morfolojiye ve kimyasal kararlılığa sahip seramik görünümlüdür. Korozyondan korumak için bir anodik kaplama mühürlenebilir ve/veya üzeri farklı kaplama ile de kaplanabilir (Song and Shi 2011).

2.5.1. Magnezyum ve alaşımlarında anotlama işlemi

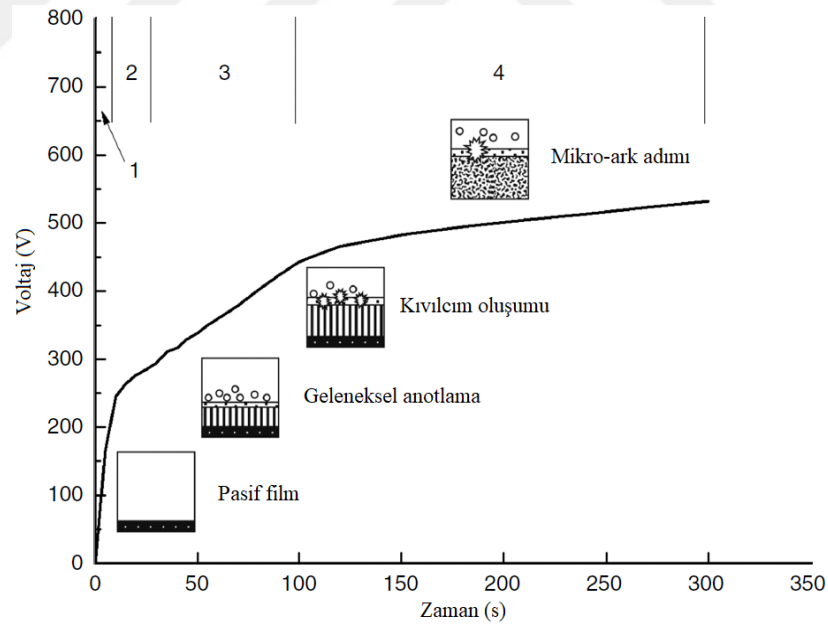
Tagnite, Anomag, Magoxid, Keronite, HAE Dow 17, MGZ gibi magnezyum alaşımları için geliştirilmiş mevcut ticari anodik kaplama yöntemleri mevcuttur. Ticari olarak kullanılan anotlama yöntemlerinin yanında, son yıllarda birçok yeni anotlama teknikleri geliştirilmiştir. Şekil 2.14'te magnezyum alaşımının anotlama işlemi esnasında oluşan reaksiyonlar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Magnezyum alaşımının anotlama işleminin şematik gösterimi (Song and Shi 2011)

Bir magnezyum alaşımında çok düşük potansiyel ya da akım yoğunluğunda anodik film oluşmaya başlamasına rağmen; film, potansiyel ya da akım yoğunluğuyla değişir ve yüksek gerilim değerlerinde kırılır. Diğer bir ifadeyle, yüksek voltaj ya da akım yoğunluğu değerlerinde anotlanmış tabaka kırılır ve film, düşük akım yoğunluğu ya da voltaj değerinde mikro ark süreciyle birlikte yeniden oluşmaya başlar. Başlangıçta kıvılcımlar çok küçüktür ve hızlıca sönerler. Potansiyelin artmasıyla birlikte kıvılcımlar artar ve numune yüzeyinde görülmeye başlar. Tüm kıvılcımlanma süresi boyunca, numune art arda hızlıca aktif ve pasif hale gelir. Filmin kırılmasıyla birlikte kıvılcımın oluşması ve tekrardan hızlıca bir kıvılcımın meydana gelmesi, aktifleşme ve

pasifleşmenin kanıtı olarak görülebilir. Kıvılcımla tekrardan oluşan film, kıvılcımdan önce var olan tabakadan daha kalındır ve kıvılcımlar adımı boyunca film önemli ölçüde büyümeye devam eder. Filmin kırılması ve tekrardan oluşması potansiyel ve akım yoğunluğunda büyük değişikliklere sebep olur. Bu yüzden, kıvılcımlanma boyunca akım ve potansiyelde dalgalanmalar daima gözlemlenir. Şayet anotlama numunesi uzun süre sabit potansiyelde kalırsa, kıvılcımlar büyük ölçüde azalmış demektir. Eğer potansiyel kısmen daha fazla artmaya devam ederse, kıvılcımlar tekrar görülebilir. Oluşan bu farklı anotlama adımları şematik olarak Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Anotlama işlemi süresince büyük pozitif potansiyel, kıvılcımların aniden şiddetlenmesine neden olabilir. Eğer kıvılcımlar sadece keskin kenarlar ya da kusurlu noktalar gibi belirli bölgelerde hareket etmez ve sürekli olarak devam ederse, bu bölgede yanmış çukurların oluşması kaçınılmazdır. Bu hasarlı bölge çok geniş olduğunda kıvılcımlanma bitirilir ve anotlama işlemi başarısızlıkla sonuçlanmış olur (Blawert 2006).



Şekil 2.15. Anotlama işleminde şematik voltaj-zaman grafiği (Song and Shi 2011)

Magnezyum alaşımlarında anodik kaplama; magnezyum alaşımı ve anodik banyo çözeltisinde belirli bir anotlama voltajında gerçekleşen kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlarla oluşmaktadır. Magnezyum alaşımlarının anotlanması, alaşım ve elektrolit arasında birçok karmaşık reaksiyon içermektedir (Song and Shi 2013).

Genellikle söylenen; suda gerçekleşen elektrokimyasal ayrışma reaksiyonları, anotta oksijen oluşumu ve katotta hidrojen oluşumunun kıvılcımlanma olmadan önce gerçekleştiğidir. Elektroliz reaksiyonlarının yoğunluğu çoğu zaman elektrolit bileşimine bağlı olarak geniş ölçüde değişir. Anottan çıkan oksijen oluşumu başlangıçta oldukça fazla iken, kıvılcım oluşmadan önceki safhalarda magnezyum anodunun pasifleşmesinden dolayı oksijen oluşumu zamanla azalır (Mizutani *et al.* 2003). Voltaj belirli bir potansiyelin (ilk kıvılcım potansiyeli olarak da bilinir) üstüne çıktığında, kıvılcım başlar ve ark, yüzey üzerinde rastgele hareket ederek karmaşık bir kaplama oluşur. Aynı zamanda, oksijen oluşumu daha da yoğunlaşır. Çünkü oluşum mekanizması, elektrokimyasaldan suyun kimyasal olarak ayrışmasına dönüşür (Song and Shi 2013).

Bir anotlama işlemi sırasında magnezyum alaşımı yüzeyinde oksidasyon oluşumu ve bazı elektrolitlerin ısıyla ayrışması (örneğin alüminat, silikat ve borat) gerçekleşmelidir. Bir magnezyum alaşımı üzerindeki anodik kaplama, ana metalin oksitleri ve yüksek sıcaklıkta çözülmüş oksit birikintileri gibi anotlama tepkimelerinden elde edilen ürünlerin bir karışımıdır (Avedesian and Baker 1999). Örneğin Magoxid anotlama işlemi sırasında yüksek potansiyellerde (>100 V) bariyer katmanı, yüklü parçacıkların difüzyonu ile lokal olarak tahrip edilir. Yük transferi ve metal iyonlarının difüzyonu ısıya neden olur ve enerjinin serbest bırakılması, metal yüzey/gaz/elektrolit ara yüzlerinde plazma kimyasal işlemlerini (gaz deşarjı) başlatmak için yeterince yükselir. Deşarj kanalları, elektrolit/gaz filmi (yarı katot) ara yüzü ile metal yüzeyi (anot) arasında oluşur. Bu tür bir ark, plazma üretir. Eş zamanlı olarak, deşarj kanallarına yakın olan bölgeler, termal olarak aktifleşir. Bu nedenle bütün yüzeyi magnezyum okside dönüştüren çok sayıda kısmi anot oluşur (Song and Shi 2013).

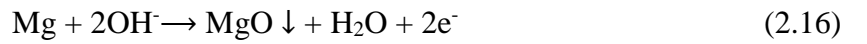
Aşağıda silikat içeren anodik çözelti banyosunda magnezyum alaşımına uygulanan anotlama işlemi esnasında Şekil 2.15'te gösterilen anotlama adımlarında oluşan anodik reaksiyonlar örnek için verilmiştir (Shi *et al.* 2005, 2006a, 2006b).

Birinci adım: Bu adımda anotlama voltajı zamanla doğrusal olarak artar. Magnezyumun çözünmesi, $Mg(OH)_2$ ve $MgSiO_3$ oluşumu ve birikmesi ile oksijen oluşumu meydana gelir. Muhtemel reaksiyonlar aşağıdaki şekilde gerçekleşir.



Bu aşamadaki anotlama akımının çoğu, (2.14) nolu reaksiyon ile harcanır. Bu aşamada oluşan anodik kaplama incedir ve sadece birkaç saniyede gerçekleşebilir.

İkinci adım: Bu adımda anodik voltaj, 190 V'a kadar yükselir. Bu potansiyel aralığında bazı küçük gaz kabarcıkları oluşmaya başlar ve herhangi bir kıvılcım gözükmez. (2.12), (2.13), (2.14) ve (2.15) nolu reaksiyonlara ek olarak aşağıdaki reaksiyon da oluşmaya başlar.



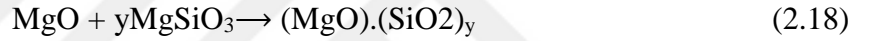
Bu reaksiyon, doğrudan kaplama oluşumuyla sonuçlanan bir elektrokimyasal reaksiyondur. Mg, doğrudan elektrokimyasal olarak MgO içine oksitlenir.

Üçüncü adım: Bu adımda anotlama voltajı 330 V'a kadar ulaşır. Bu aşamadaki en önemli olay anodik kaplama üzerinde düzgün dağılımlı kıvılcımların oluşumu ve belirgin gaz çıkışı olmasıdır. Diğer adımlarda gerçekleşen reaksiyonlara ilaveten aşağıdaki yeni reaksiyonlar da bu adımda meydana gelmektedir.



Başka bir deyişle, bu adımda oluşan reaksiyonlar aslında kimyasal çökelme işlemleridir. (2.17) numaralı reaksiyon, sıcaklık 350 °C'den yüksek olduğunda ortaya çıkabilecek bir dehidrasyon işlemidir. Magnezyum alaşımlarının anotlama sırasında kıvılcım ark sıcaklığının 1000 °C'nin çok üzerinde olduğu belirtilmiştir. Bu aşamadaki kıvılcım nedeniyle, kıvılcım meydana gelen bazı lokal bölgelerde bu dehidrasyonun kolayca gerçekleşebileceği açıkça görülmektedir.

Dördüncü adım: Bu adım voltajın 330 V'u aştığı durumlarda gerçekleşir. Bu durumda oksijen oluşumu çok daha kuvvetli hale gelir ve çok daha fazla kıvılcım meydana gelerek lokalize olur. Aşağıdaki iki reaksiyonun, yukarıda listelenen reaksiyonlara ek olarak anotlamanın dördüncü aşamasında meydana geldiği söylenmektedir.

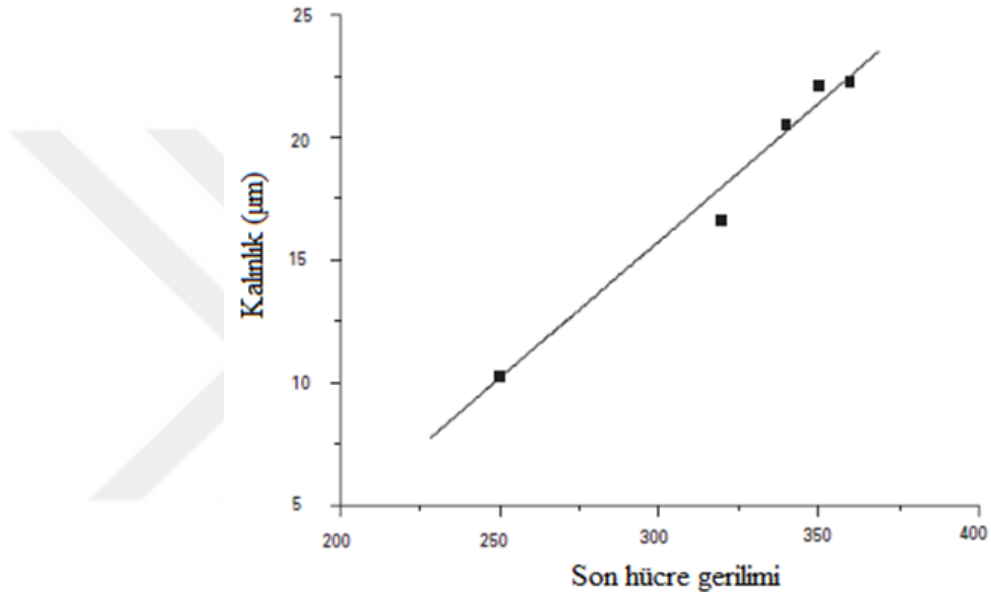


(2.18) nolu reaksiyonun, kıvılcım parlamalarında kaplamada MgO ve MgSiO₃'ün bir erime ve katılaşma işlemi olduğu düşünülmektedir. Aslında, kıvılcım sırasındaki yüksek sıcaklıklarda anotlanan kaplama, kıvılcım parlamaları ile lokal olarak eritilebilir ve bazı bileşenler veya anodik banyo çözeltisinde ayrılmış ürünler ile birlikte karıştırılabilir. Daha sonra hızlı bir şekilde kaplama üzerinde katılaşır. Bu şekilde, ilk üç aşamada biriktirilen kaplama, kalın ve kaba bir kaplama oluşturmak için kıvılcım ile lokal olarak eritilir. Dördüncü aşamada oluşturulan kaplamadaki Si/Mg oranındaki belirgin artış, silikatların banyo çözeltisinden katılaşma yoluyla doğrudan kaplamaya biriktiği şeklinde yorumlanır.

Bir anodik kaplama (film); kalınlık, bileşim ve mikro yapı ile karakterize edilir. Bu parametreler, kaplamanın korozyondan koruma performansında önemli parametrelerdir.

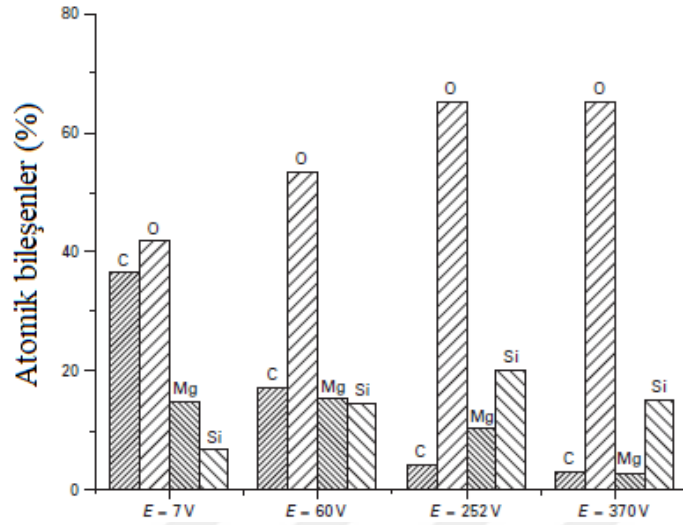
Kaplama Kalınlığı: Anotlama süresince magnezyum yüzeyi, oksidasyon ve oksit filmin yüzeye difüze olmasıyla harcanır. Yüzey film tabakasının %50'si magnezyumun orijinal yüzeyinin içerisine, %50'si yüzey üzerine büyür. Kaplama kalınlığı, anotlama voltajı ya

da akım yoğunluğuna bağlıdır. Şekil 2.16'da, akım kontrol modunda anodik kaplamanın kalınlığının son hücre gerilimine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Aralarında lineer bir iliŐki vardır. Örneğin yüksek hücre voltajı kalın anodik kaplama gerçekleştiğini gösterir. Şayet filmin direncinin lineer olarak film kalınlığına bağlı olduğu biliniyorsa, film kalınlığının arttığı, son anotlama voltajıyla kolaylıkla anlaŐılabilir.



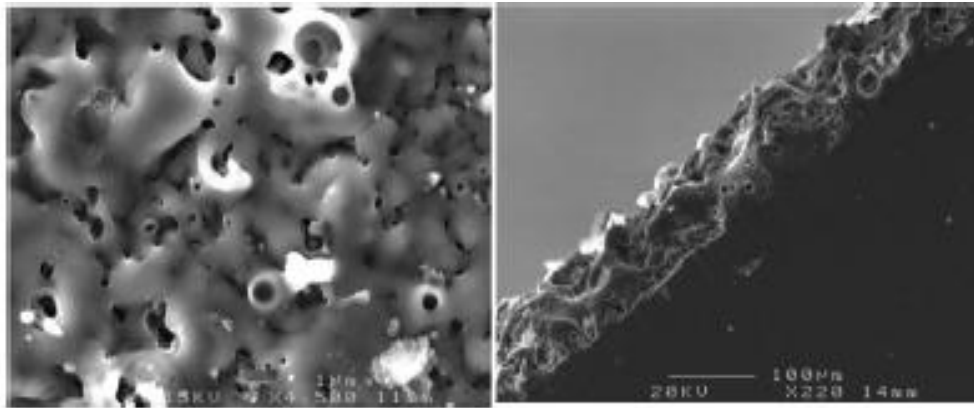
Şekil 2.16. Son hücre geriliminin anodik kaplama kalınlığına etkisi (Shi 2006).

Kaplama Bileşimi: Anodik film, magnezyum, oksijen ve zlti elementlerinden oluşur. Anodik filmde uygulanan son voltaja bağlı olarak, anodik filmin kaplama bileŐiminde farklılıklar meydana gelir. Şekil 2.17'de, silikat içeren bir zltide farklı voltajlarda gerçekleştirilen anotlama işleminin kaplama bileşimine etkisini gösteren bir tablo sunulmuştur. Voltaj değerisi arttığıa zlti içerisinde bulunan silisyum ile birlikte oksijen miktarı artarken, karbon ve magnezyum miktarı azalmıştır.



Şekil 2.17. Farklı anotlama voltajlarında anodik kaplamadaki bileşenler (Shi 2006)

Kaplamanın Mikro Yapısı: Bir anotlama işleminde, anotlamanın ilk adımı boyunca ince amorf film oluşturulur. Uzun süreli anotlama durumunda lokal bozunma ve anodik filmde başlangıç kristalleşmesi oluşur. Yüksek voltajda oluşturulan anodik kaplama gözeneklidir. Yüksek anotlama voltajında gerçekleştirilen Dow 17, HAE, Tagnite, Magoxide, Anomag ve Keronite (bunların çoğunda kıvılcımlanma adımı vardır) gibi ticari anodik kaplamalar, gözenekli bir mikro yapıya sahip olurlar. AZ91D üzerine KOH ve SiO₃ içeren solüsyonda gerçekleştirilen anodik kaplamadaki gözenekli mikro yapı Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Anodik kaplamada gözenekli mikro yapı (Shi 2006)

Teorik olarak magnezyum alaşımlarının anotlanmasını etkileyen ana faktörler; magnezyum alaşımının yüzeyinin mikro yapısı ve bileşimi, anodik çözelti banyosunun bileşimi, anodik akım yoğunluğu, voltaj ve sıcaklık gibi işlem parametreleridir. Örneğin, anotlanmış magnezyum alaşımının korozyon direncini daha iyi açıklayan gözeneklerin boyutu ve dağılımı, elektrolitin bileşimi, anodik akım yoğunluğu ve voltajın bir fonksiyonudur (Dietzel 2004; Shi 2006a, 2006b).

Magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için kullanımı öne çıkan temel elektrolit çözeltiler, silikat ve fosfat temelli çözeltiler olmuştur (Srinivasan *et al.* 2008b, 2008a; Shi *et al.* 2005, 2006a). Ayrıca anotlama işlemi temeline dayanan mikro ark oksidasyon yöntemi ile yapılan kaplamalarda da, yine bu iki elektrolit üzerine durulmuştur (Srinivasan *et al.* 2008c, 2011; Durdu *et al.* 2011, 2013).

2.6. Elektrik ark sprej kaplama işlemi

Termal sprej kaplama işlemlerinden biri olan elektrik ark sprej kaplama yöntemi; temel olarak, iki tel elektrotun ark oluşturarak ergitilmesi ve kaplanacak malzeme üzerine basınçlı gaz ile püskürtülmesi işlemidir. Elektrik ark sprej yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 2.19'da verilmiştir (Pawlowski 2008).

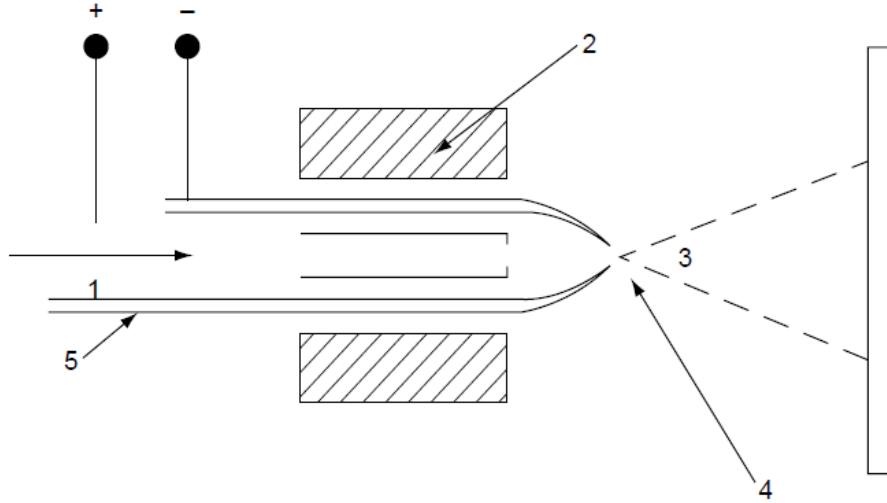
Elektrik ark sprej yönteminde Zn, Al ya da Mo ve alaşımları gibi elektriği iletebilen ve ancak tel şeklinde üretilebilen kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Kaplama işlemi esnasında kaplanacak malzemeye sıcak gaz jeti teması olmadığından, malzeme yüksek sıcaklıklara çıkmamaktadır. Ayrıca bu yöntemde, basınçlı hava gazı kullanıldığı gibi inert gazlar da kullanılır (Pawlowski 2008).

Elektrik ark sprejinin en büyük avantajı, diğer yöntemlere göre ekonomik olmasıdır. Ayrıca kaplamaya etki eden parametreler oldukça azdır. Bu parametreler; atomik gaz basıncı ve gaz türü, uygulanan voltaj, tel besleme hızı, sprej mesafesi şeklinde sıralanabilir.

Atomik gaz basıncı, ergiyik metal üzerinde ve doğal olarak kaplama üzerinde etkilidir. Basıncılı şekilde gönderilen ergiyik metalin yüzeye ulaşması, boyutları, kaplama malzemesine çarpma hızı ve sıcaklıkları üzerinde de etkileri vardır. İner gaz kullanımı, özellikle kaplama esnasında kaplama içerisinde oluşacak oksit ve porozite oluşumunu hava kullanımı ile yapılarına göre azaltır.

Uygulanan voltaj veya akım, partikül hızlarını etkilemektedir. Artırılan akım ile besleme hızı ilişkilidir. Bu iki parametre uygun değerlerde olmalıdır. Besleme hızı yüksek akım ile birlikte artmakta, bu da fazla kaplama malzemesinin ergimesine sebep olmaktadır.

Aynı şekilde sprej mesafesi ergitilen kaplama malzemesinin taban malzeme üzerine çarpma hızına önemli miktarda etki etmektedir. Çünkü ergitilen metalin uygun bir mesafeden püskürtülmesi gerekmektedir. Sprej mesafesinin artması ile birlikte partikül hızında azalma olur ve dolayısıyla tam tutunma gerçekleşmeyebilir; azalması ile çok yüksek partikül hızlarına sebep olur ve bu da istenilen çaplarda partiküllerin yüzeye çarpmaması gibi problemlere yol açabilir.



Şekil 2.19. Ark-sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi (1) atomize gaz; (2) torç kalkanı; (3) ergimiş metal akışı; (4) elektrik ark; (5) tüketilen ark elektrotlar (Pawlowski 2008)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Yapılan deneysel çalışmalarda, piyasadan temin edilen farklı miktarlarda alüminyum içeren AZ31, AZ61 ve AZ91 döküm magnezyum alaşımları kullanılmıştır. Kullanılan magnezyum alaşımlarına ilişkin kimyasal bileşimler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgede bileşim oranı %0,0001’den az olan elementlere yer verilmemiştir. Gerilmeli korozyon deney numuneleri hazırlamak için, 16 mm çapında işlenmemiş haldeki çubuklar piyasada CNC torna tezgâhında işlenmiştir. ASTM E 8 *Test Method* standartlarında hazırlanan numunelerin teknik resim görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.

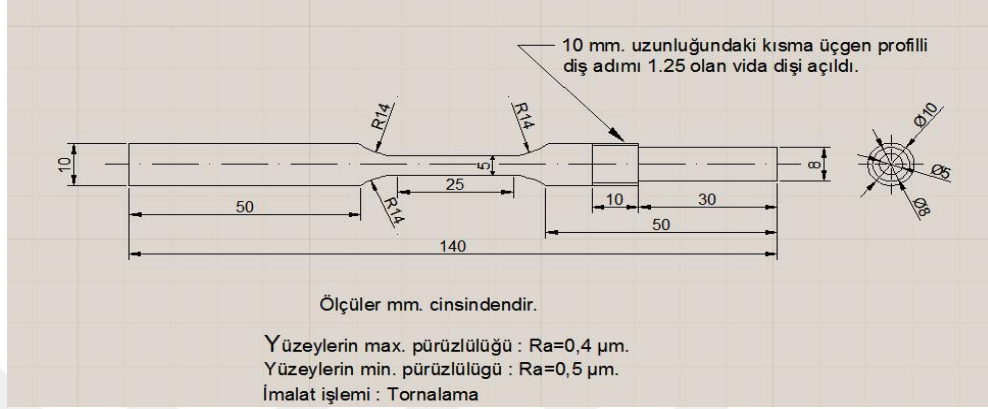
Korozyon deneyleri için ise, 16 mm çapındaki çubuk numunelerden 6 mm kalınlığında numuneler kesilmiş ve bu numuneler üzerinde korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan AZ31,AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

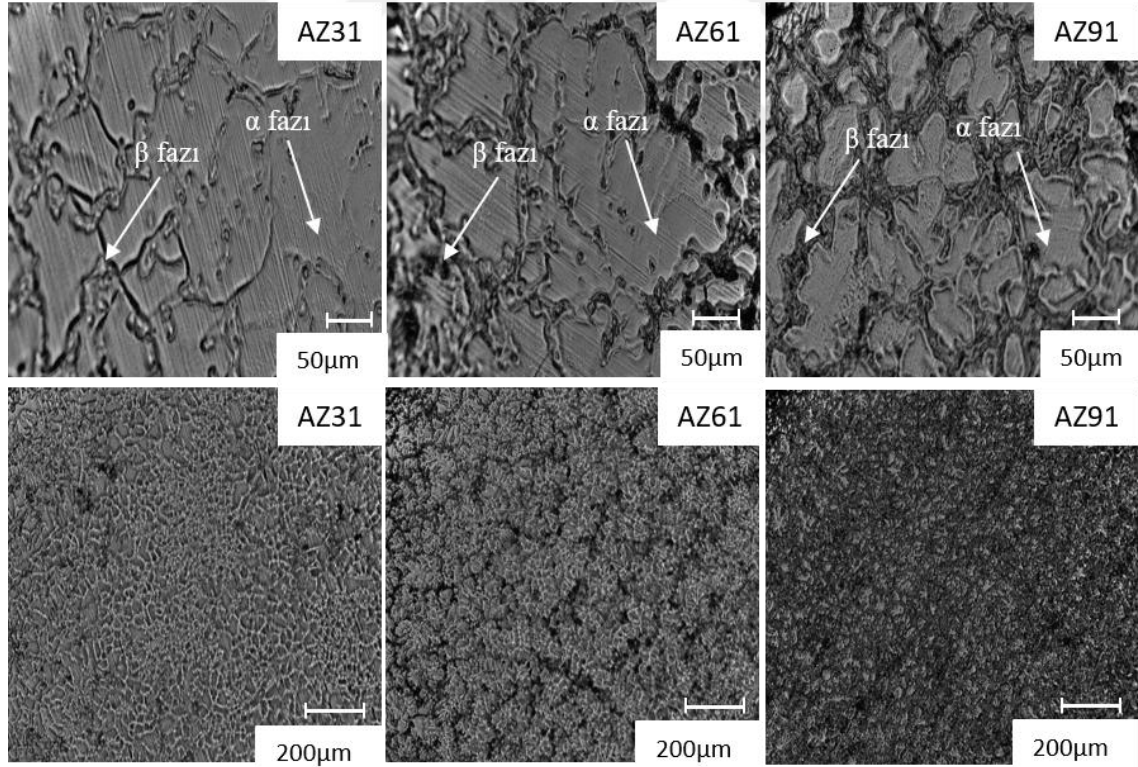
Alaşım	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Mg
AZ31	3.069	1.133	0.486	0.019	0.001	0.131	Kalan
AZ61	6.242	1.246	0.369	0.029	0.001	0.137	Kalan
AZ91	9.231	1.348	0.286	0.012	0.004	0.148	Kalan

Kaplanmamış numunelerin tane boyutlarını ölçmek ve fazları incelemek için, mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler ilk olarak 2500 numaralı zımparaya kadar zımparalanmış, daha sonra alümina ile parlatılmıştır. Numunelerde taneler ve fazların daha iyi görülmesi için; 5 ml asetik asit, 6 g pikrik asit, 10 ml saf su, 100 ml etanol, 5 ml HCl, ve 7 ml nitrik asit içeren çözeltilerde 1-2 saniye süreyle dağlama işlemi uygulanmıştır. Nade NMM-800 TRF marka optik mikroskop üzerine bağlanan dijital bir kamera yardımıyla alınan yüzey görüntüleri Kameram imaj analiz programıyla analiz edilmiş ve tane boyutları ölçülmüştür. AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının mikro yapı görüntüleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Görüntüler x10 ve x50 büyültmede alınmıştır.

Ortalama tane büyüklükleri, AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları için sırasıyla 0,042 mm, 0,037 mm ve 0,031 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Kullanılan gerilmeli korozyon deney numunelerinin teknik resmi

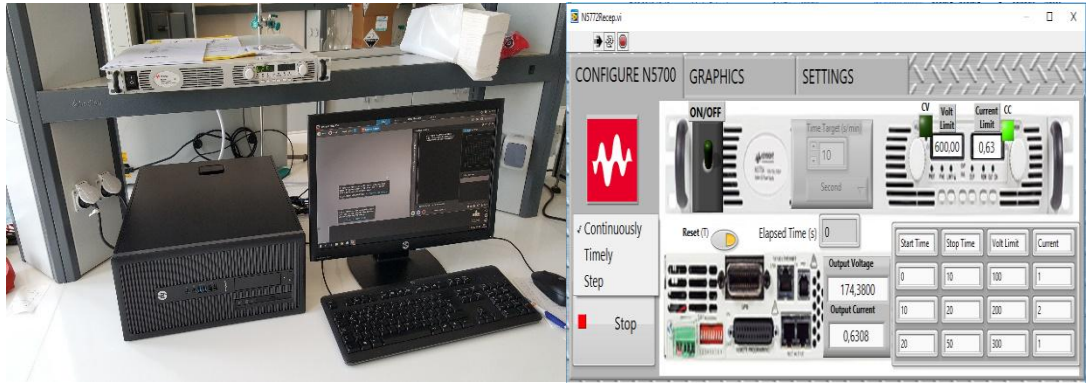


Şekil 3.2. AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının mikro yapı görüntüleri

3.2. Yöntem

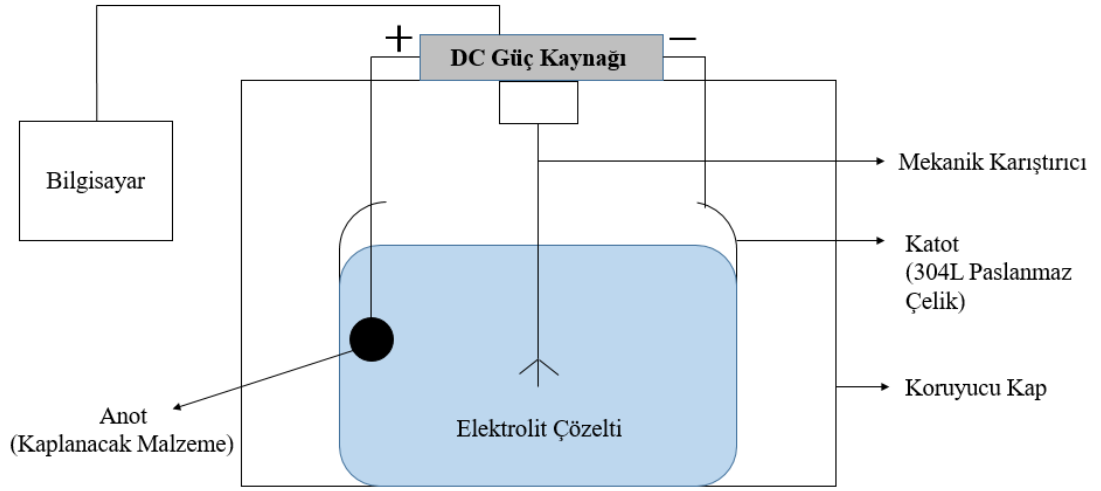
3.2.1. Anotlama işlemi

Tez çalışması kapsamında AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının korozyon ve gerilmeli korozyon deney numunelerine uygulanan anotlama işlemi için, Şekil 3.3'te gösterilen Keysight N5772A marka 600 V gerilim, 2,6 A akım, 1560 W güç kapasitelerine sahip DC güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağını kontrol edebilmek için, LabVIEW programından faydalanılarak Şekil 3.3'te gösterilen ara yüz oluşturulmuştur. Bu program sayesinde güç kaynağı, üç farklı modda anotlama işleminin gerçekleşmesine olanak sağlamıştır. I. mod olan sürekli modda girilen akım ve voltaj değerleri süresiz bir şekilde uygulanırken, II. mod olan zamanlı modda girilen akım ve voltaj değerleri belirlenen süre boyunca uygulanmış ve daha sonra ise sonlanmıştır. III. mod olan adımli modda ise her bir adım ve sürede farklı akım ve voltaj değeri girilmesine imkân sağlanmıştır.



Şekil 3.3. Anotlama için kullanılan güç kaynağı ve kontrol için oluşturulan ara yüz

Anotlama işlemi için kurulan deney düzeneği; bilgisayar kontrollü bir güç kaynağı, mekanik karıştırıcı, 304L paslanmaz çelikten yapılan ve katot olarak kullanılan 5 l hacme sahip bir kap ve güvenlik için elektriği iletmeyen ahşap malzemeden imal edilmiş bir koruyucu kaptan oluşmaktadır. Yapılan anotlama işlemi için kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Anotlama için kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi

Korozyon deneyleri için kullanılacak olan numuneler 400-1200 numara aralığındaki zımparalarla zımparalandıktan sonra, demineralize su ve etanol ile temizlenmiş ve anotlama için hazır hale getirilmiştir. Gerilmeli korozyon deney numuneleri ise, piyasada ilgili yüzey pürüzlülüğünde işlettirilmiştir. Bu numuneler de tekrardan demineralize su ve etanol ile temizlenmiştir.

Hazırlanan tüm numunelere daha sonra; 5 g/l Na_2SiO_3 + 5 g/l KOH bileşiklerinden oluşan silikat temelli çözelti, 5 g/l Na_3PO_4 + 5 g/l KOH bileşiklerinden oluşan fosfat temelli çözelti ve 1 M NaOH çözelti olmak üzere, üç farklı çözeltilerde anotlama işlemi uygulanmıştır. Silikat ve fosfat temelli çözeltilerde anotlama işlemleri $0,140 \text{ A/cm}^2$ sabit akım modunda ve yaklaşık 440-480 V son voltaj değerine kadar yapılırken, NaOH çözeltisindeki anotlama işlemleri, 100 V sabit voltaj modunda ve 10 dk boyunca gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Elektrik ark sprey kaplama

Elektrik ark sprey kaplama işlemi piyasada gerçekleştirilmiş olup Oerlikon Metco firmasına ait Flexi Arc 300 elektrik ark sprey ünitesi kullanılmıştır. İlgili üniteye ait resim

Şekil 3.5'te verilmiştir. Bu sistemde 300 A akım ve 18V'tan 42 V gerilime kadar 12 adımlı hava soğutmalı bir güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Oerlikon Metco Flexi Ark 300 Elektrik ark sprej sistemi

Elektrik ark sprej kaplama işlemi için, Oerlikon-Metco firmasından temin edilmiş 1,6 mm kalınlığına sahip saf ticari saflıkta alüminyum kullanılmıştır. Kaplamalar 26-29 V aralığında uygulanan voltajlarda, 60-70 A aralıklarında akımlarda ve 6 bar hava basıncında gerçekleştirilmiştir. Püskürtme tabancası ile numune arasındaki mesafe 150 mm olarak ayarlanmıştır.

3.2.3. Korozyon deneyleri

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde GAMRY firmasına ait G750TM potansiyostat cihazında gerçekleştirilmiştir.

Polarizasyon ölçümlerinde Ag/AgCl₂ referans elektrot, karşıt elektrot olarak grafit çubuk ve çalışma elektrotu olarak deney numuneleri kullanılarak üç elektrotlu bir korozyon hücresi kullanılmıştır.

Korozyon ölçümleri için ilk olarak açık devre potansiyelleri ölçülmüştür. Bu ölçümler için her bir numune %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde yaklaşık 2 saat bekletilmiş ve sistemin denge haline ulaşması sağlanmıştır. Açık devre potansiyeli, korozyon hücresinden geçen akımın sıfır olduğu denge potansiyelidir. Açık devre potansiyeline ulaşan korozyon hücresi, daha sonra açık devre potansiyelinden yaklaşık -0,5 V düşük potansiyel değerinden başlanarak açık devre potansiyelinden yaklaşık 2 V potansiyel değeri yukarısına kadar 0,5 mV/s tarama hızında %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde polarize edilmiş ve polarizasyon eğrileri çizilmiştir.

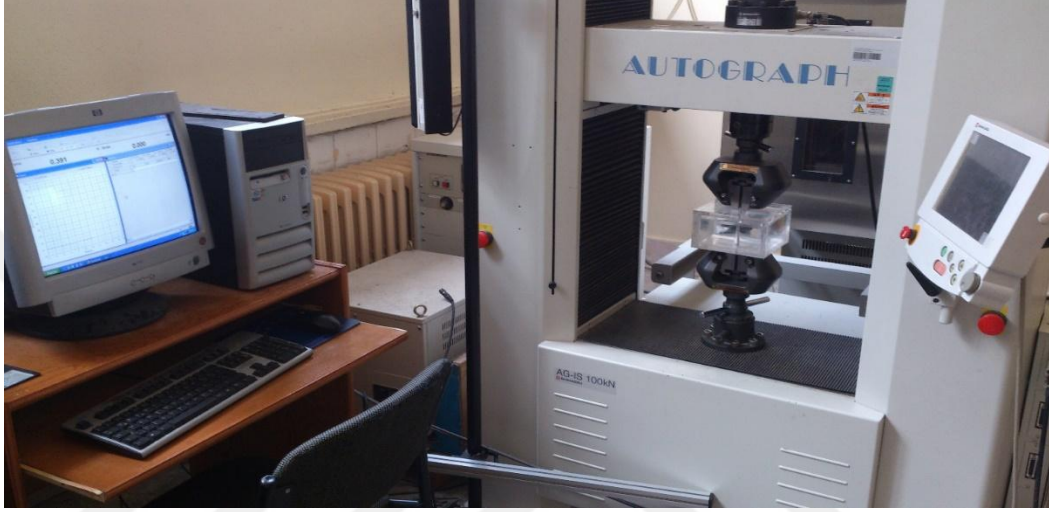
3.2.4. Gerilmeli korozyon deneyleri

Gerilmeli korozyon deneyleri için yapılan çalışmalarda düşük deformasyon hızı deney yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile ASTM E 8 standartlarına uygun olarak hazırlanan gerilmeli korozyon numuneleri, çok düşük deformasyon hızları sağlayacak şekilde uygun hızlarda çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerdeki çekme hızı, ASTM G-129 00 standartlarına uygun olarak 0,005 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalardaki düşük deformasyon hızı, Shimadzu marka universal çekme cihazı tarafından sağlanmıştır. Korozi ortam ise, çekme cihazına monte edilen 1 litrelik iç hacme sahip pleksi glass malzemeden imal edilmiş korozyon hücresi sayesinde sağlanmıştır. Gerilmeli korozyon deneyleri de %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. İlgili deney için hazırlanmış deney düzeneği Şekil 3.6'da verilmiştir.

Gerilmeli korozyon deneyleri sonucunda numunelerin gerilmeli korozyon çatlak indeksleri (I_{SCC}) aşağıdaki 3.1 denklemine göre hesaplanmıştır.

$$I_{SCC} = 1 - \frac{t_{\text{çözelti}}}{t_{\text{hava}}} \quad (3.1)$$

Burada $t_{\text{çözelti}}$ ve t_{hava} sırasıyla numunelerin çözelti ve hava ortamındaki kırılma süreleridir. I_{SCC} değerinin 1'e yaklaşması numunelerin gerilmeli korozyon çatlakına karşı oldukça hassas olduğunu, diğer bir deyişle gerilmeli korozyon direncinin düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.6. Düşük deformasyon hızı testi (*Slow strain rate test, SSRT*) deney düzeneği

3.2.5. SEM görüntüleri

Çalışmalarda kullanılan kaplanmış numunelerin farklı büyültmelerde yüzey görüntüleri ile gerilmeli korozyon deneyleri sonrasında elde edilen yüzey kırılma görüntüleri FEI Nova NanoSEM 450 ve Zeiss Sigma 300 taramalı elektron mikroskobu cihazlarında alınmıştır. Ayrıca yine bu cihaz üzerinde bulunan EDS (Enerji Yayımlı X-ışını analizi, *Energy Diffusion X-ray Analysis*) dedektörü ile elementel analizler yapılmıştır.

3.2.6. XRD analizleri

Çalışmalarda X-ışınları kırınımı (*X-Ray Diffraction, XRD*) analizleri için Bruker firmasına ait D8 DISCOVER model cihaz kullanılmıştır. XRD ölçümleri $2\theta=20^{\circ}-80^{\circ}$ tarama aralığında ve 2 derece/dakika tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

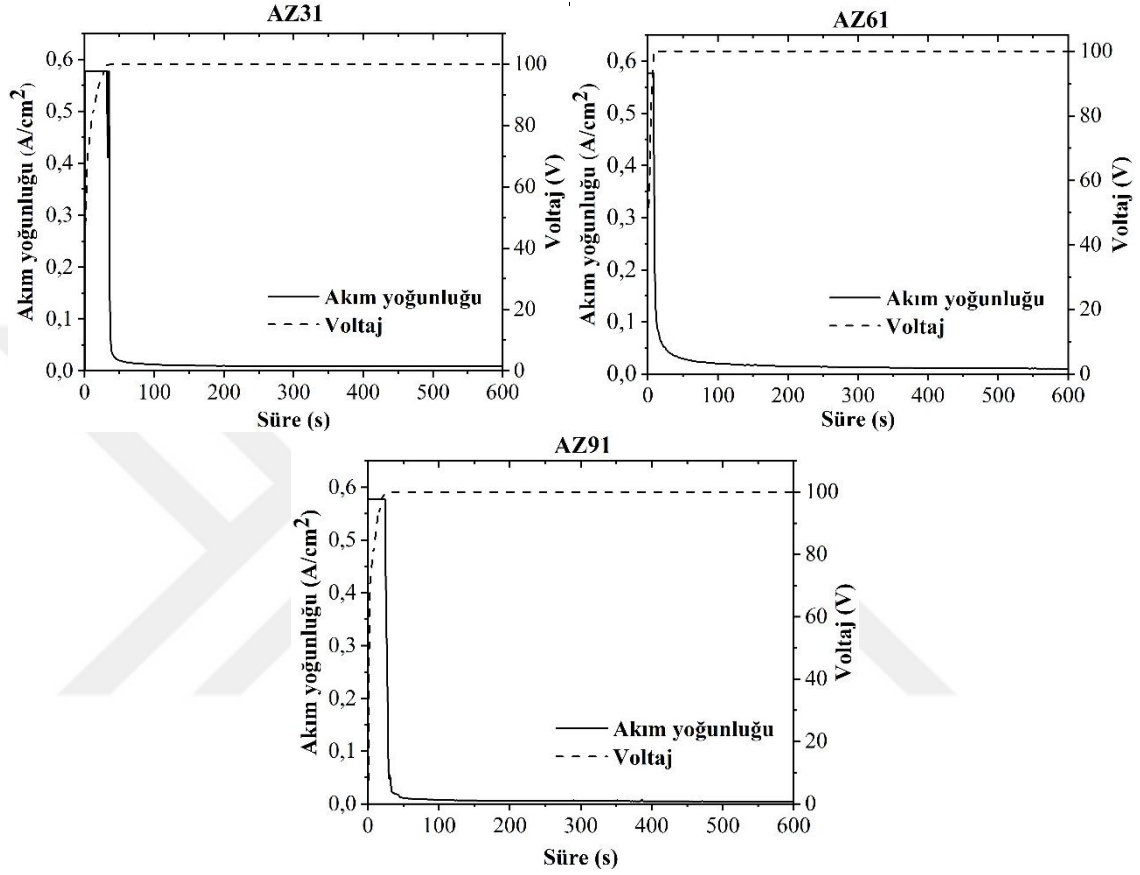
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Anotlama işlemi

Yapılan çalışmada AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına üç farklı çözeltide anotlama işlemi uygulanmıştır. Bunlardan ilki, 1 M NaOH çözeltisinde 100 V sabit voltaj değerinde ve 10 dk boyunca gerçekleştirilen anotlama işlemidir. Bu çözeltide gerçekleştirilen AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait akım yoğunluğu-voltaj-zaman değişim grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere tüm numunelerin benzer akım yoğunluğu-voltaj-zaman grafiklerine sahip oldukları görülmüştür. Yapılan anotlama işlemlerinde yüksek akım yoğunluklarında kıvılcıklar gözlenmiştir. Kıvılcıklar yüzey üzerinde rastgele bölgelerde oluşmuş, parlama ve sönme şeklinde devam etmiştir. Yüzey üzerinde gerçekleşen kıvılcıklar, 0,1 A/cm² akım yoğunluğu değeri altında (yani voltaj değeri yaklaşık 100 V'a ulaştınca) tamamen sona ermiş ve anotlama bu şekilde 10 dk boyunca devam etmiştir. Yapılan anotlama esnasında yüksek akım yoğunluklarında, kıvılcıkların görüldüğü esnada numuneler üzerinde yüksek gaz çıkışı gözlenmiştir. Bu gaz çıkışı kıvılcıkların sona ermesiyle birlikte gözle görülemez hale gelmiştir.

AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan ikinci anotlama işlemi, 0,140 A/cm² sabit akımda, fosfat temelli çözeltide gerçekleştirilmiştir. Fosfat temelli çözelti 5 g/l Na₃PO₄ + 5 g/l KOH bileşiklerinden oluşmuştur. Bu işlemlere ait voltaj değerlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Yapılan tüm deneylerde yaklaşık 190-220 V aralığındaki voltaj değerlerinde kıvılcıklar görülmeye başlamıştır. İlk başlayan kıvılcıklar küçük şiddetlerde olup sayıca fazladır. Bu kıvılcıkların şiddetleri 310-330 V değerleri arasında artarken sayıları giderek azalmış ve anotlama işlemleri bu şekilde devam etmiştir. Voltaj değeri yaklaşık 430-470 V değerine ulaştınca kıvılcıklar tek bir noktada toplanmış ve deneye son verilmiştir. Numunelerin bu son voltaj seviyelerine ulaşması farklı sürelerde gerçekleşmiştir. Yüksek voltaj değerlerinde kıvılcıklarla birlikte voltaj değerlerinde dalgalanmalar meydana gelmiştir. Yapılan işlem esnasında

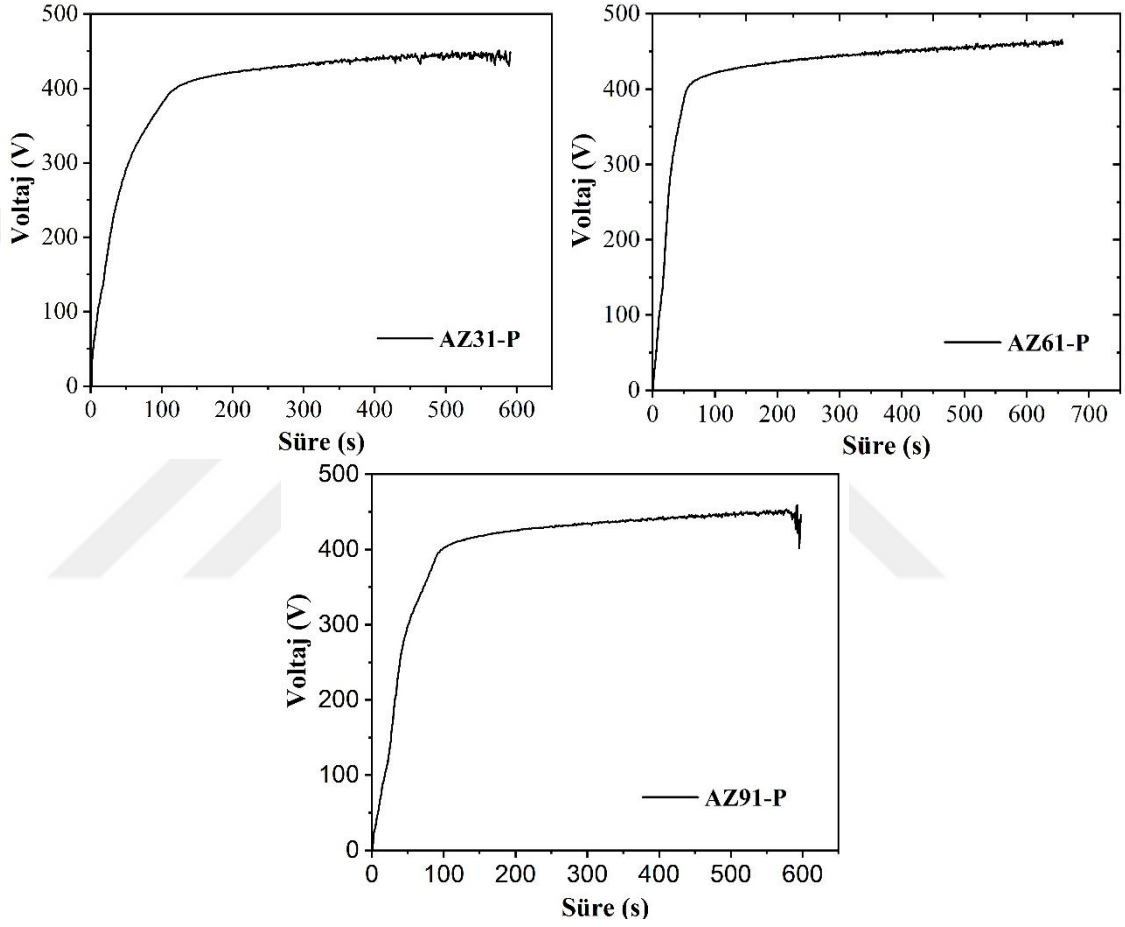
özellikle kıvılcımların görüldüğü andan itibaren yüksek miktarda gaz çıkışı görülmüş ve bu gaz çıkışı voltajın artmasıyla birlikte çoğalmıştır.



Şekil 4.1. 1 M NaOH çözeltisinde 100 V sabit voltajda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait akım yoğunluğu-voltaj-zaman grafikleri

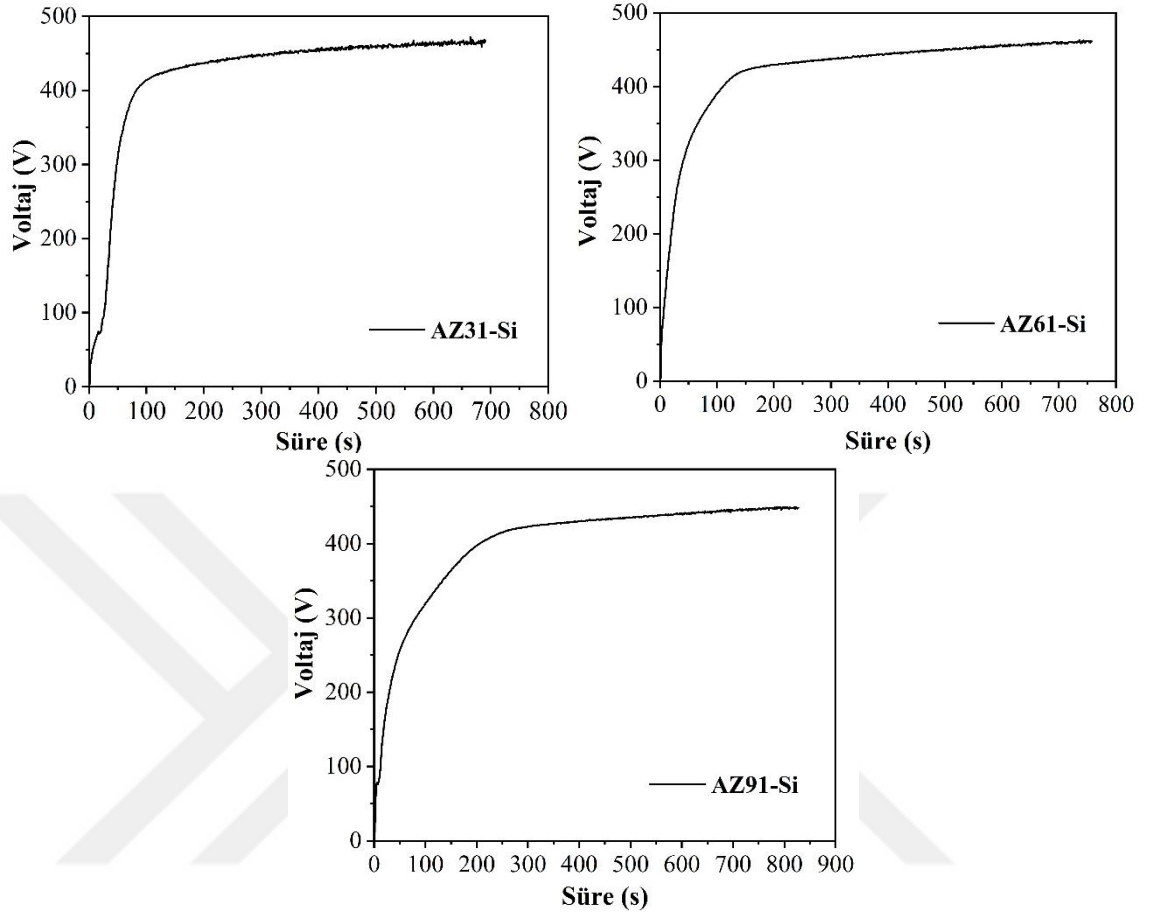
AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan üçüncü anotlama işlemi ise, 0,140 A/cm² sabit akımda silikat temelli çözeltide gerçekleştirilmiştir. Silikat temelli çözelti 5 g/l Na₂SiO₃+ 5 g/l KOH bileşiklerinden oluşmuştur. Bu işlemlere ait voltaj değerlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Yapılan tüm deneylerde voltaj değeri yaklaşık 190-220 V arasında iken kıvılcımlar görülmeye başlamıştır. Başlayan ilk kıvılcımlar küçük şiddetlerde olup sayıca fazladır. Bu kıvılcımların şiddetleri 310-330 V değerleri arasında artarken sayıları giderek azalmış ve anotlama işlemleri bu şekilde devam etmiştir. Voltaj değeri yaklaşık 450-465 V değerine ulaşp kıvılcımlar tek bir noktada toplanınca deneye son verilmiştir. Kıvılcımların tek bir noktada toplanması numuneler için farklı sürelerde gerçekleşmiştir. Ayrıca yüksek voltaj

değerlerinde gerçekleşen kıvılcımlar nedeniyle dalgalanmalar görülmüştür. Fosfat temelli çözeltide gerçekleştirilen anotlama işlemine benzer şekilde bu anotlama işleminde de kıvılcımlarla birlikte gözle görülür halde anottan gaz çıkışı görülmeye başlanmış ve artan voltaj ile birlikte gözlemlenen gaz çıkış miktarı artmıştır.

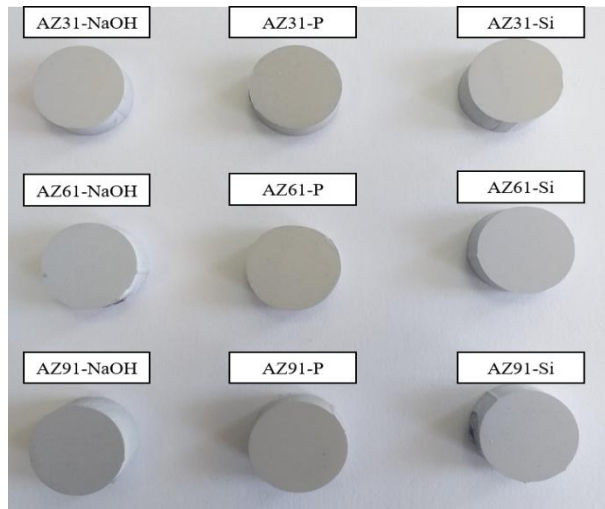


Şekil 4.2. Fosfat temelli çözeltide 0,140 A/cm² sabit akımda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait voltaj-zaman grafikleri

Farklı çözeltilerde anotlanmış numunelere ait görüntüler Şekil 4.4'te verilmiştir. NaOH ve silikat çözeltilerinde elde edilen kaplamalar açık gri renkte oluşurken, fosfat çözeltisinde elde edilen numunelerde ise biraz daha koyu gri renkte kaplamalar elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Silikat temelli çözeltide 0,140 A/cm² sabit akımda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına uygulanan anotlama işlemine ait voltaj-zaman grafikleri



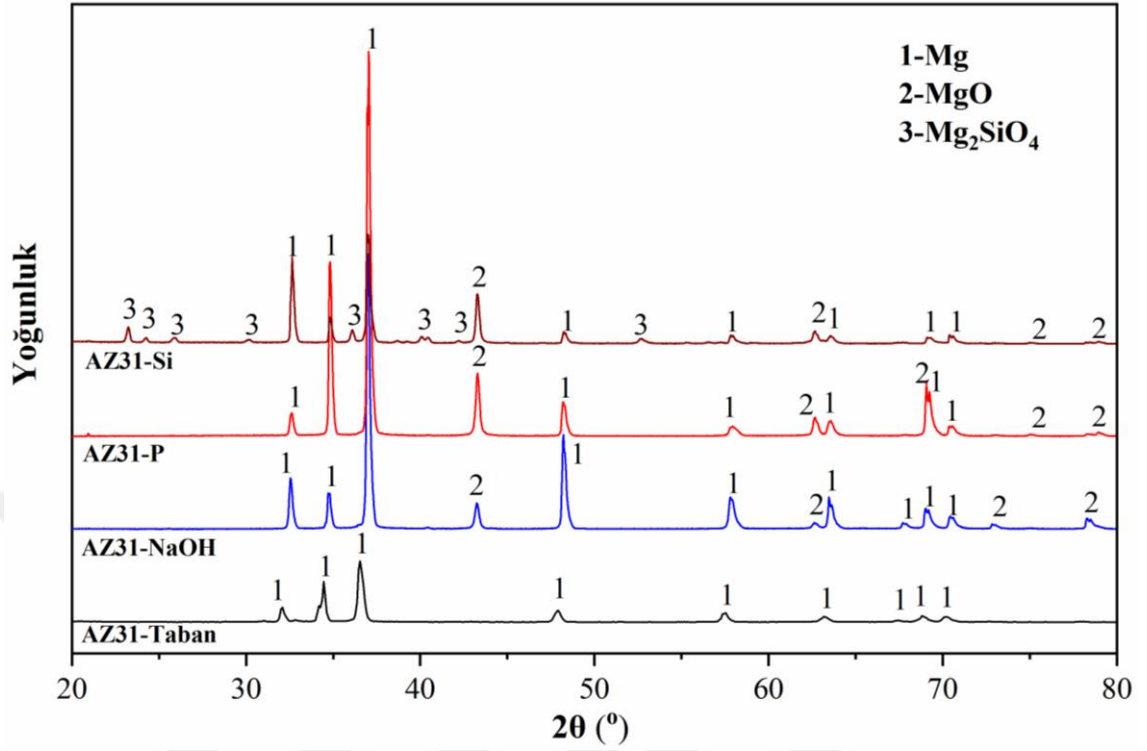
Şekil 4.4. Farklı çözeltilerde anotlanmış numuneler

4.1.1. Anotlanmış numunelere ait XRD analizleri

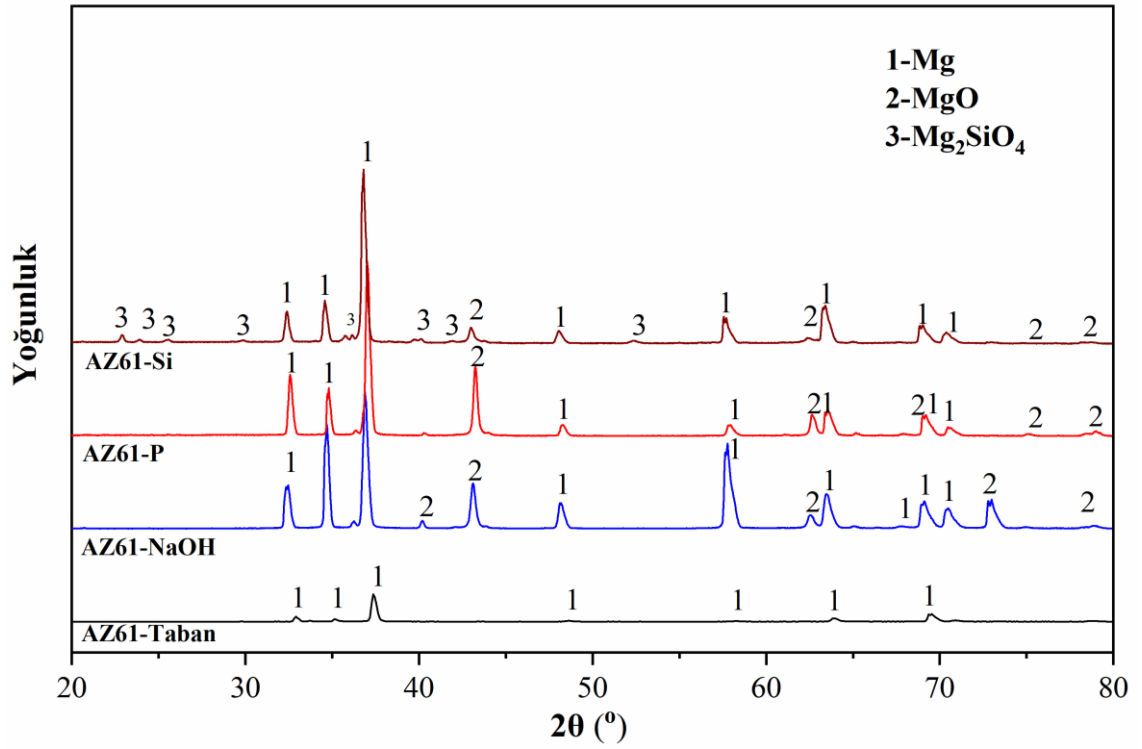
Kaplamanın faz yapısı; malzemenin mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle farklı çözeltilerde, anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri yapılmıştır.

NaOH, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait XRD grafikleri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

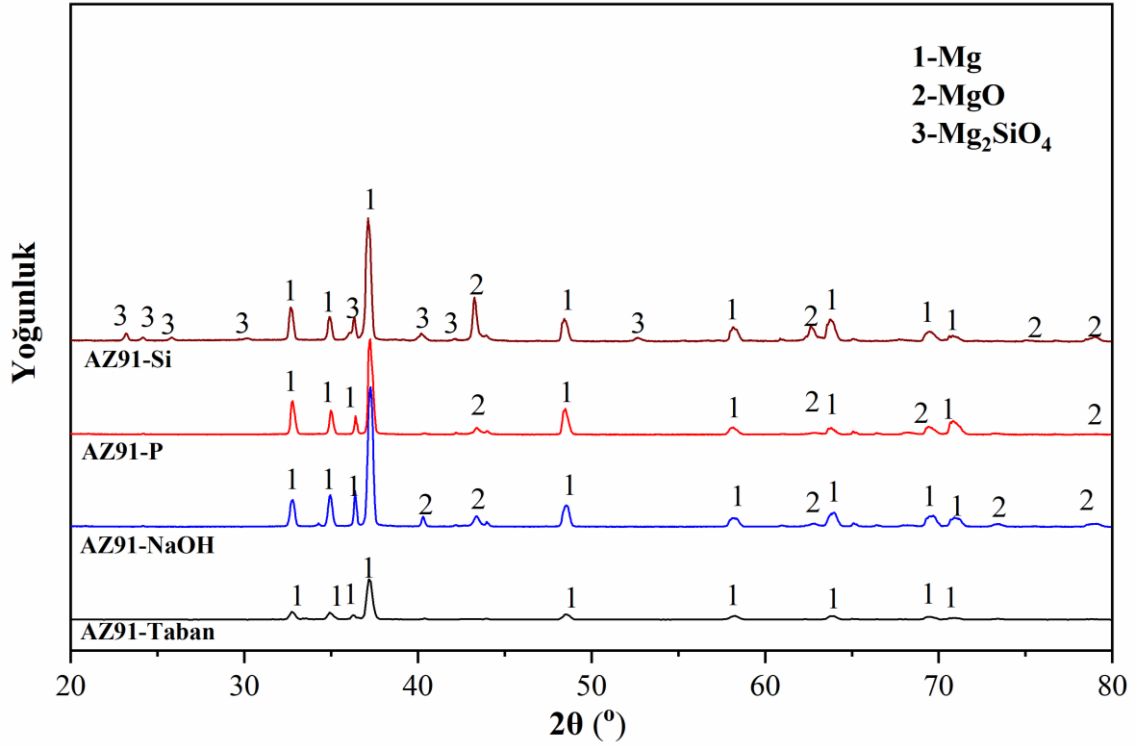
Tüm grafikler incelendiğinde üç alaşımda da, NaOH ve fosfat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemleri sonucunda elde edilen kaplamalarda MgO fazına ait farklı şiddetlerde pikler bulunmaktadır. Silikat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemleri sonucunda elde edilen kaplamalarda ise MgO fazıyla birlikte Mg_2SiO_4 fazlarına ait pikler de görülmüştür. Elde edilen bu piklerin literatürle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (Mizutani *et al.* 2003a, Durdu and Usta, 2012; Durdu *et al.* 2011, 2013).



Şekil 4.5. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri



Şekil 4.6. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri



Şekil 4.7. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri

4.1.2. Anotlanmış numunelere ait SEM-EDS analizleri

Anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

SEM görüntülerinden anlaşılacağı üzere tüm anotlama işlemlerinde gözenekli, pürüzlü ve yüksek oranda homojen bir kaplama gerçekleştirilmiştir. NaOH çözeltisinde anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarında, diğer anotlama işlemlerine kıyasla daha küçük gözenekli kaplamalar elde edilmiştir. Gözenek çapları yaklaşık olarak 0,5-3 µm civarında ölçülmüştür.

Fosfat ve silikat temelli çözeltilerde anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarında ise mikro çatlaklar görülmektedir. Fosfat temelli çözeltide elde edilen kaplamalar silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamalara göre daha büyük gözenekler

görülmüştür. Fosfat temelli çözeltide gözenek çapları 3-7 µm civarında iken silikat temelli çözeltide 3-5 µm civarında ölçülmüştür. Ayrıca silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamada fosfat temelli çözeltiliye göre daha kompakt ve homojen bir kaplama elde edildiği söylenebilir.

Anotlanmış numunelerin yüzey morfolojileri incelendiğinde, yüksek akım yoğunlukları ya da yüksek voltaj değerlerinin gözenek çaplarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek voltajların kaplama üzerinde mikro çatlaklara yol açtığı gözlenmiştir.

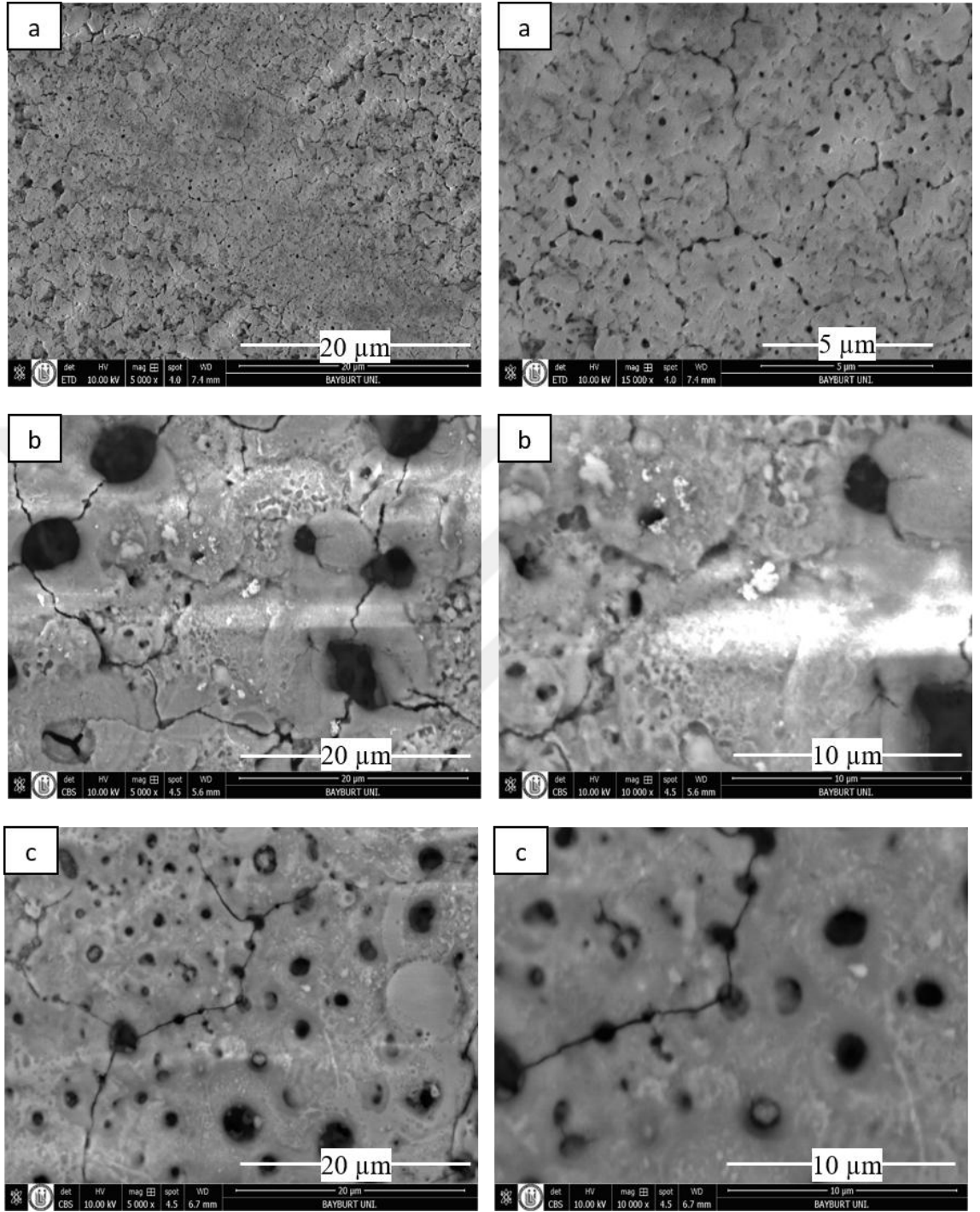
Anotlama işleminde uygulanan anodik akım yoğunluğu ve voltaj değerleri, magnezyum alaşımlarının mikro yapısını etkileyen temel parametreler arasındadır (Moon and Jeong, 2009). Anodik akım yoğunluğu ve uygulanan son voltaj değeri arttıkça, anodik kaplamada oluşan gözenek çapları artmaktadır.

Anodik filmde oluşan yüksek yerel sıcaklıklar, filmdeki gözeneklerden veya kusurlardan geçen yüksek akım yoğunluğunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklar, elektrolitin buharlaşmasına ve yüzeyde yerel bölgelerde plazma oluşmasına neden olmaktadır. Literatürde, yüksek voltajlarda gerçekleştirilen anotlama işlemlerinde kıvılcımların görüldüğü belirtilmiştir. Magnezyum alaşımlarında yüzeyde rastgele hareket eden kıvılcım deşarjları görüldüğü belirtilmiş ve kıvılcımın ince tabakalar veya kusurlu/gözenekli alanlar gibi bazı zayıf alanlarda başlayabileceği ifade edilmiştir. Bir kıvılcım noktasında, kıvılcımın iki sonucu olduğu belirtilmiştir. Birincisi, kıvılcım sırasındaki dielektrik boşalmaların gözeneklerle sonuçlanmasıdır. Bunun doğrudan kanıtının, bu aşamada oluşan kaplamaların gözenekli morfolojisi olduğu belirtilmiştir. Kıvılcım, artan hücre voltajı ile daha yoğun hale geldikçe, kaplamanın gözenek boyutu ve gözenekliliğinin arttığı ifade edilmiştir. İkincisi ise, kıvılcımlanma sonucu oluşan yüksek yerel sıcaklık bir dereceye kadar kaplamayı birleştirebilmesi ve kaplamanın dielektrik parçalanmasından kaynaklanan gözenekleri kapatabilmesidir. Kıvılcım ile üretilen ısının, kıvılcım olan bölgedeki kaplamayı eritebildiği ve bu noktalarda kıvılcımın durduğu, erimiş kaplamanın hızla o bölgede katılaştığı ifade edilmiştir. Bunun, gözenekleri çevreleyen üst üste bindirilmiş inci benzeri morfolojiye ve bir dereceye kadar

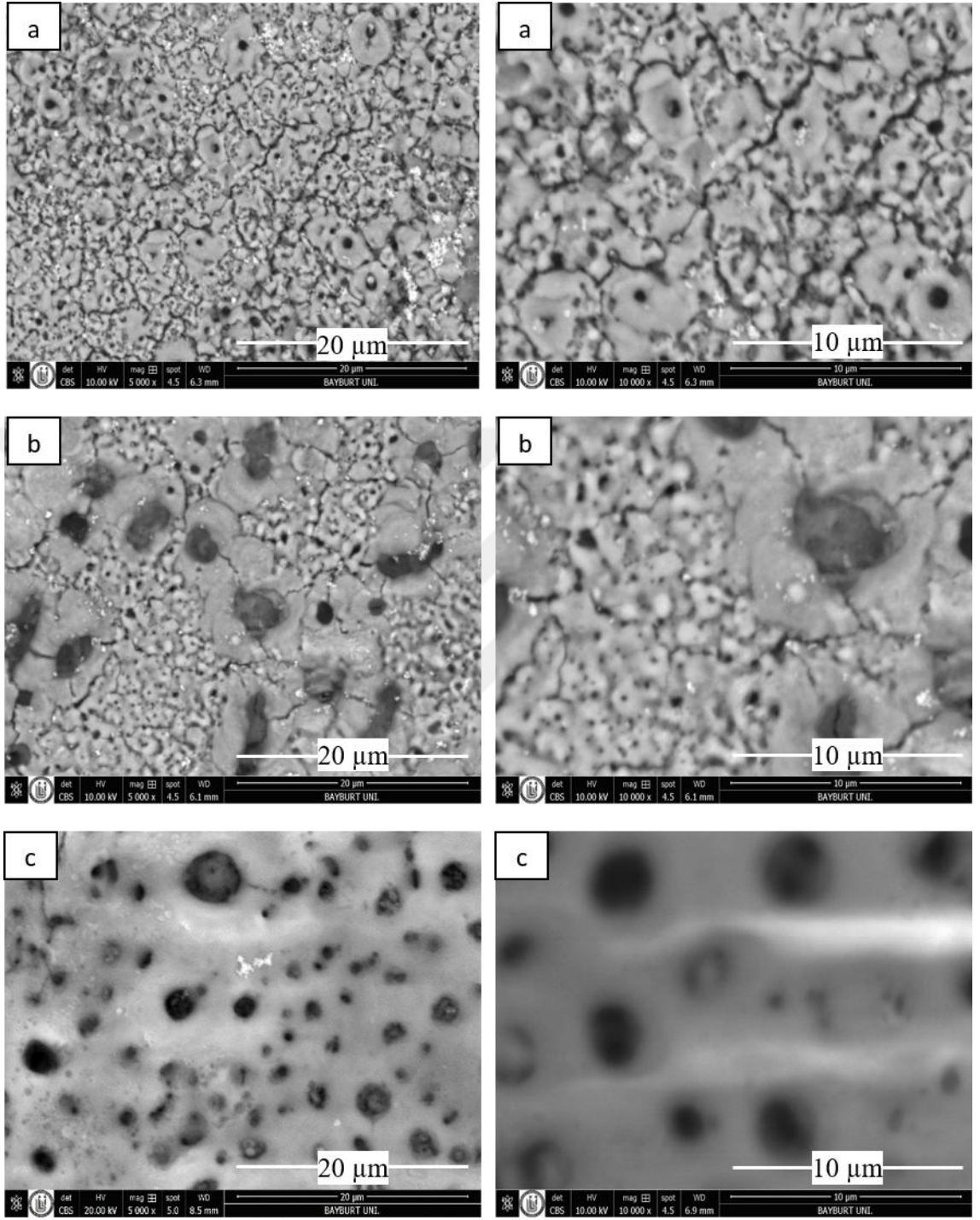
kaplamanın gözenekliliğini kapatmaya neden olabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle, kıvılcımın kıvılcımlı bir noktada tekrar oluşmayacağını ifade etmişlerdir. Kıvılcımların her zaman magnezyum yüzeyinde rastgele hareket edeceği ve oluşacağı vurgulanmıştır. Bazı durumlarda, yoğun kıvılcımların anodize edilmiş bir kaplamada gözenek veya hasarlı bir alan oluşturması durumunda, kıvılcımların ve anotlamanın duracağını ifade etmişlerdir. Bunun sebebinin ise geniş gözenek veya hasar alanının tüm anotlama akımının geçişine izin vermesi olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, numune ve çözelti arasındaki arayüz boyunca yeterince büyük bir potansiyel düşüşünün, kıvılcım oluşumunu sürdürülemez hale getirdiğini belirtmişlerdir. Bu durumda anotlama voltajının aniden düşebileceği ve anodik kaplamada birkaç deforme bölge oluşturup ardından duracağı ifade edilmiştir (Gray and Luan 2002; Bala Srinivasan *et al.* 2008c; Song and Shi 2011).

Yapılan anotlama işlemlerinde de literatürle benzer adımlar gözlenmiştir. Silikat ve fosfat temelli çözeltilerde gerçekleştirilen anotlama işlemlerinde, deneyler kıvılcımların bir noktada toplanması anına kadar devam etmiştir. Böyle bir durumda deneyin sonlandırılmaması halinde kıvılcım toplanan bölgede hasar meydana gelmiş ve bu hasar anodizasyona artık imkân tanımamıştır. Bu yüzden böyle bir durumda deneyler sona erdirilmiştir. Bu olayın oluşumu numuneler üzerinde farklı sürelerde gerçekleşmiştir. Bu olayın gerçekleşmesinin taban malzeme ya da anotlama işlemine bağlı olduğuyla ilgili herhangi bir kanıt bulunamamıştır. Bunun sebebinin ise yüksek voltajlarda oluşan bu bölgelerin rastgele oluşması ve kontrol edilemiyor olması söylenebilir.

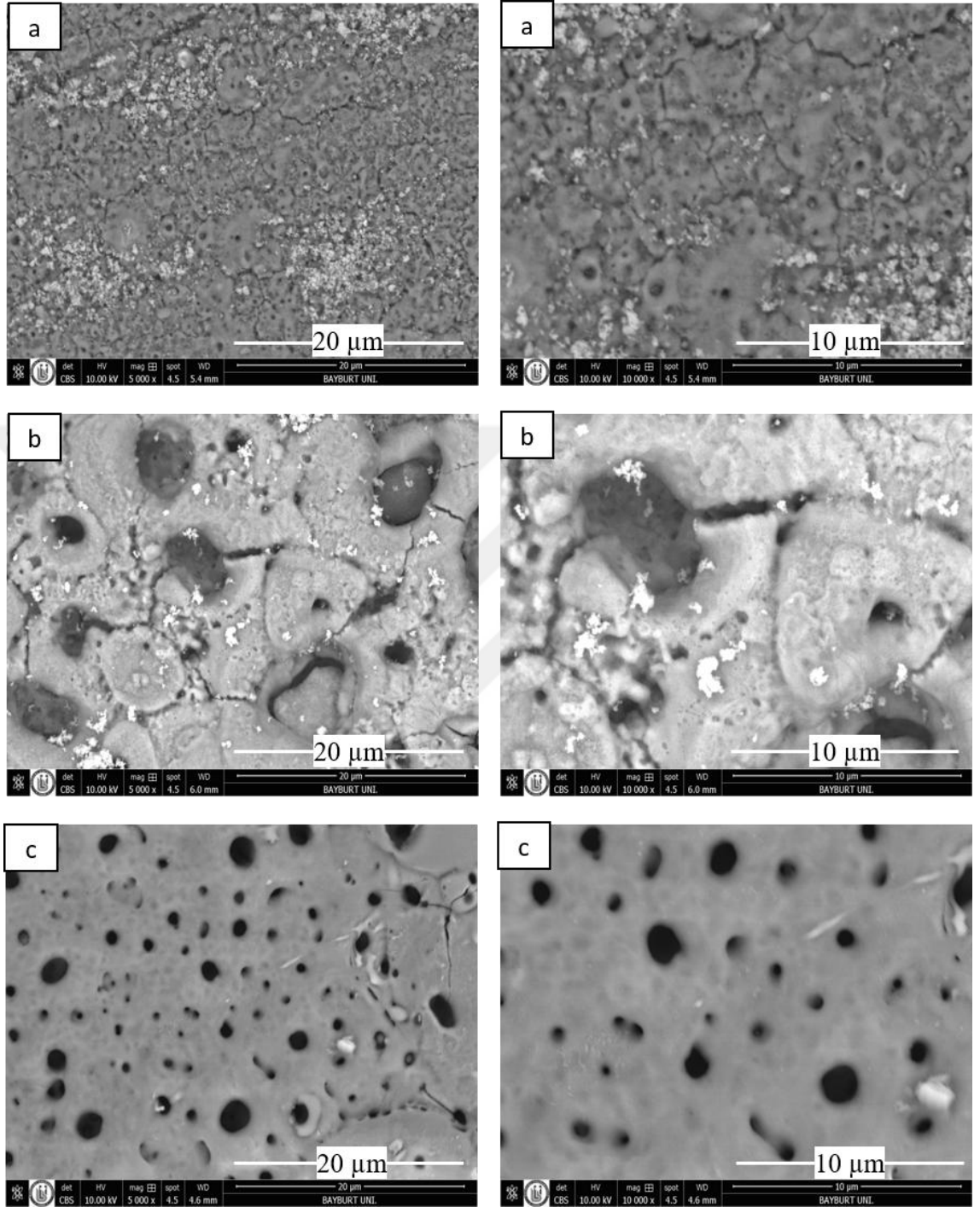
Oksijen oluşumunun, hücre voltajı 3 V değerini geçtikten sonra meydana geleceği ve voltajla birlikte hızla artacağı literatürde belirtilmiştir. Ayrıca, kıvılcım aşamasında çarpıcı şekilde hızlandığı vurgulanmıştır. Oksijen oluşumunun sebebinin ise, kıvılcımlarla birlikte oluşan çok yüksek lokal sıcaklıklarda suyun termal ayrışması olduğunu ifade etmişlerdir (Shi *et al.* 2005, 2006a; Song and Shi 2013). Yapılan anotlama işlemlerinde bu gaz çıkışı kıvılcım başlamasıyla birlikte gözle görülür hale gelmiştir.



Şekil 4.8. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler



Şekil 4.9. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri (a)NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler

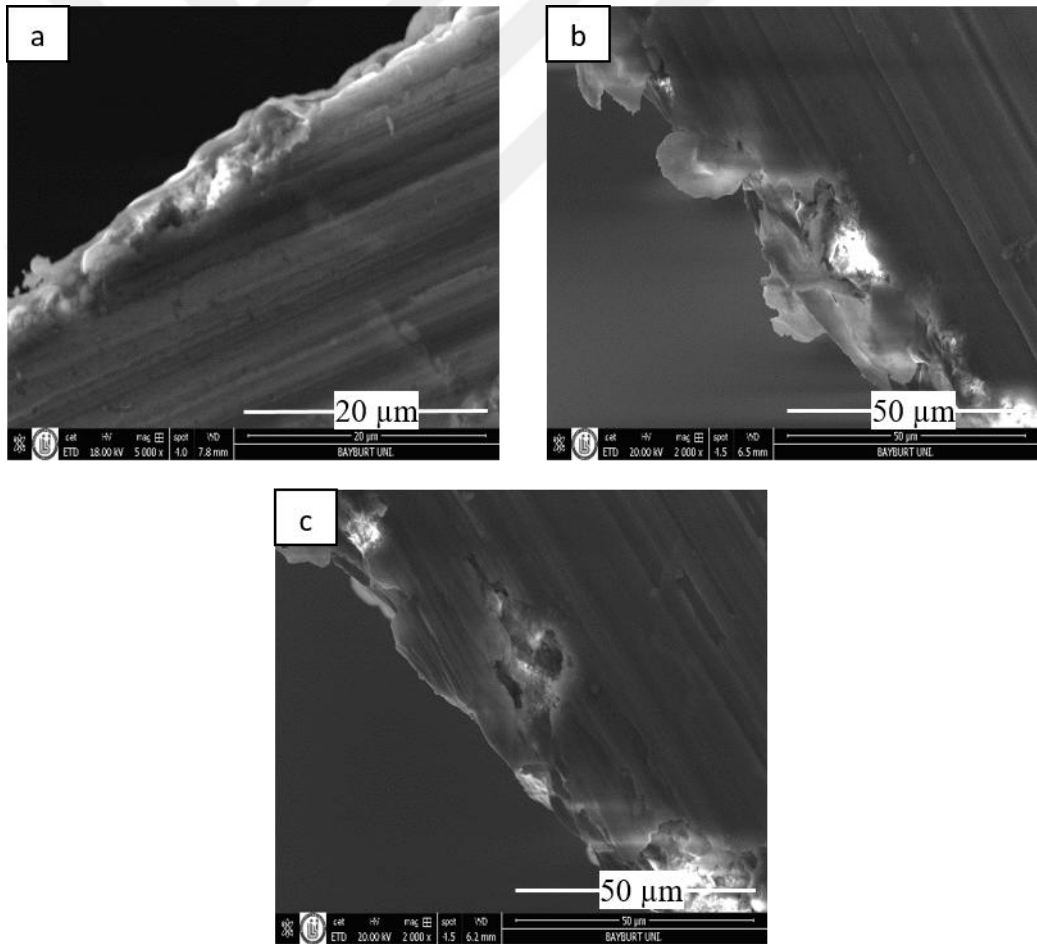


Şekil 4.10. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler

Farklı çözeltilerde anotlanmış magnezyum alaşımlarının kesitlerinin SEM görüntüleri Şekil 4.11'de verilmiştir. NaOH çözeltisinde yapılan anotlama işleminden elde edilen

kaplama kalınlığı, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemlerine göre daha az olduğu şekilde görülmektedir.

Anotlama işlemlerinde, taban malzeme yüzeyindeki magnezyum, oksidasyon yoluyla tüketilerek yüzey üzerinde oksit tabaka şeklinde biriktirilir. Oluşan tabakanın yaklaşık %50'si yüzey içerisinde büyürken %50'si ise taban malzeme yüzeyi üzerine büyür (Song and Shi, 2011). Kaplama kalınlığı, uygulanan akım yoğunluğu ve son voltaj değeriyle doğru orantılıdır (Shi *et al.* 2006a). Yapılan çalışmada silikat ve fosfat temelli çözeltilerde yüksek voltaj değerlerinde kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Doğal olarak bu anotlama işlemlerinde daha kalın kaplamalar elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Anotlanmış magnezyum alaşımlarının SEM kesit görüntüleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler

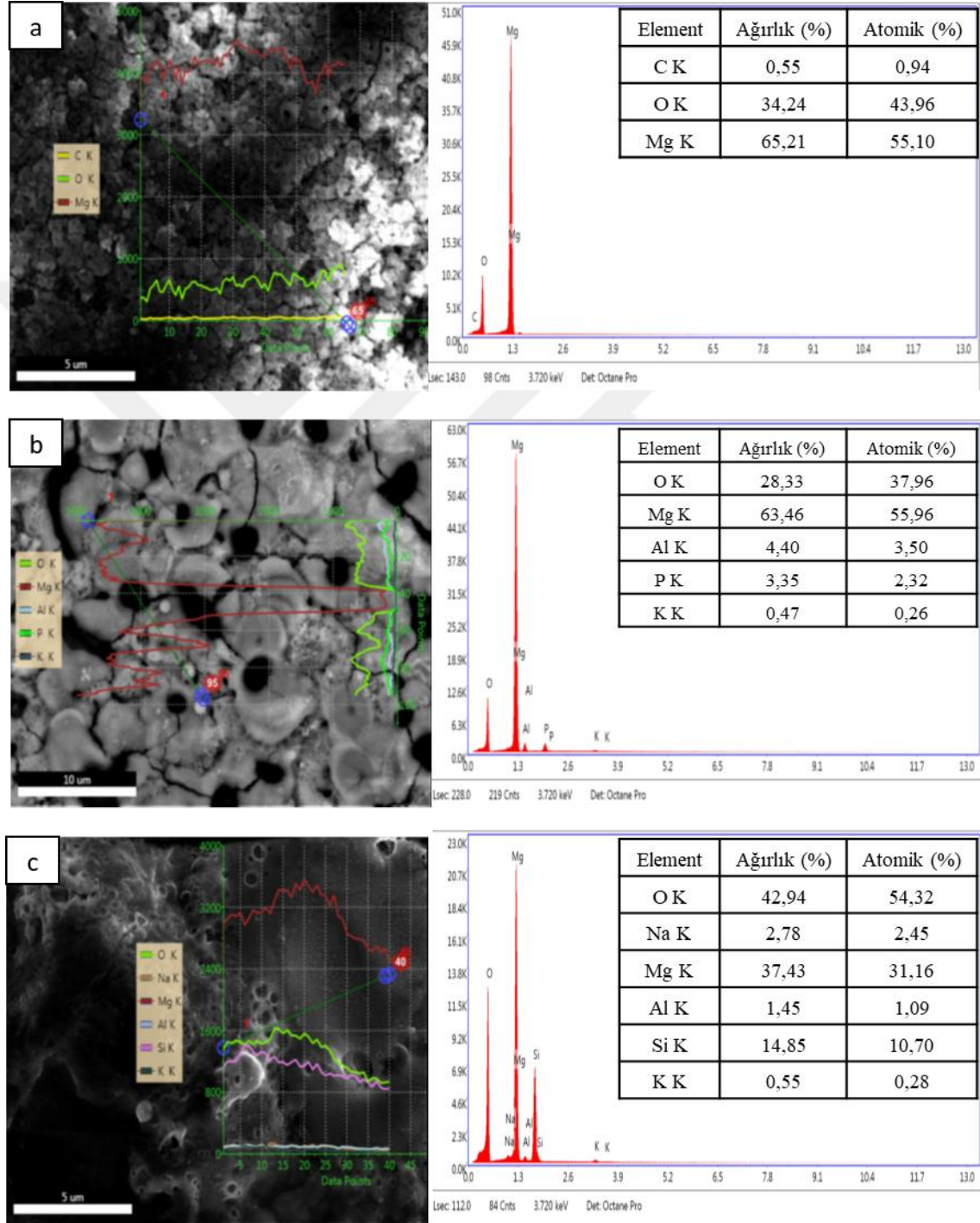
AZ31 magnezyum alaşımına NaOH, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde uygulanan anotlama işlemlerine ait SEM-EDS analizleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu analizler sonucunda NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamanın ağırlıkça %0,55 C, %34,24 O ve %65,21 Mg elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Fosfat temelli çözeltide elde edilen kaplamanın ağırlıkça %28,33 O, %63,46 Mg, %4,40 Al, %3,35 P ve %0,47 K elementlerinden; silikat temelli çözeltide ise ağırlıkça %42,94 O, %2,78 Na, %37,43 Mg, %1,45 Al, %14,85 Si ve %0,55 K elementlerinden oluştuğu görülmektedir.

AZ61 magnezyum alaşımına NaOH, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde uygulanan anotlama işlemlerine ait SEM-EDS analizleri Şekil 4.13’te verilmiştir. Bu analizler sonucunda NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamanın ağırlıkça %0,62 C, %32,26 O, %66,01 Mg ve %1,1 Al elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Fosfat temelli çözeltide elde edilen kaplamanın ağırlıkça %30,83 O, %60,56 Mg, %4,95 Al ve %3,65 P elementlerinden; silikat temelli çözeltide ise ağırlıkça %37,61 O, %2,17 Na, %37,95 Mg, %1,85 Al, %19,46 Si ve %0,96 K elementlerinden oluştuğu görülmektedir.

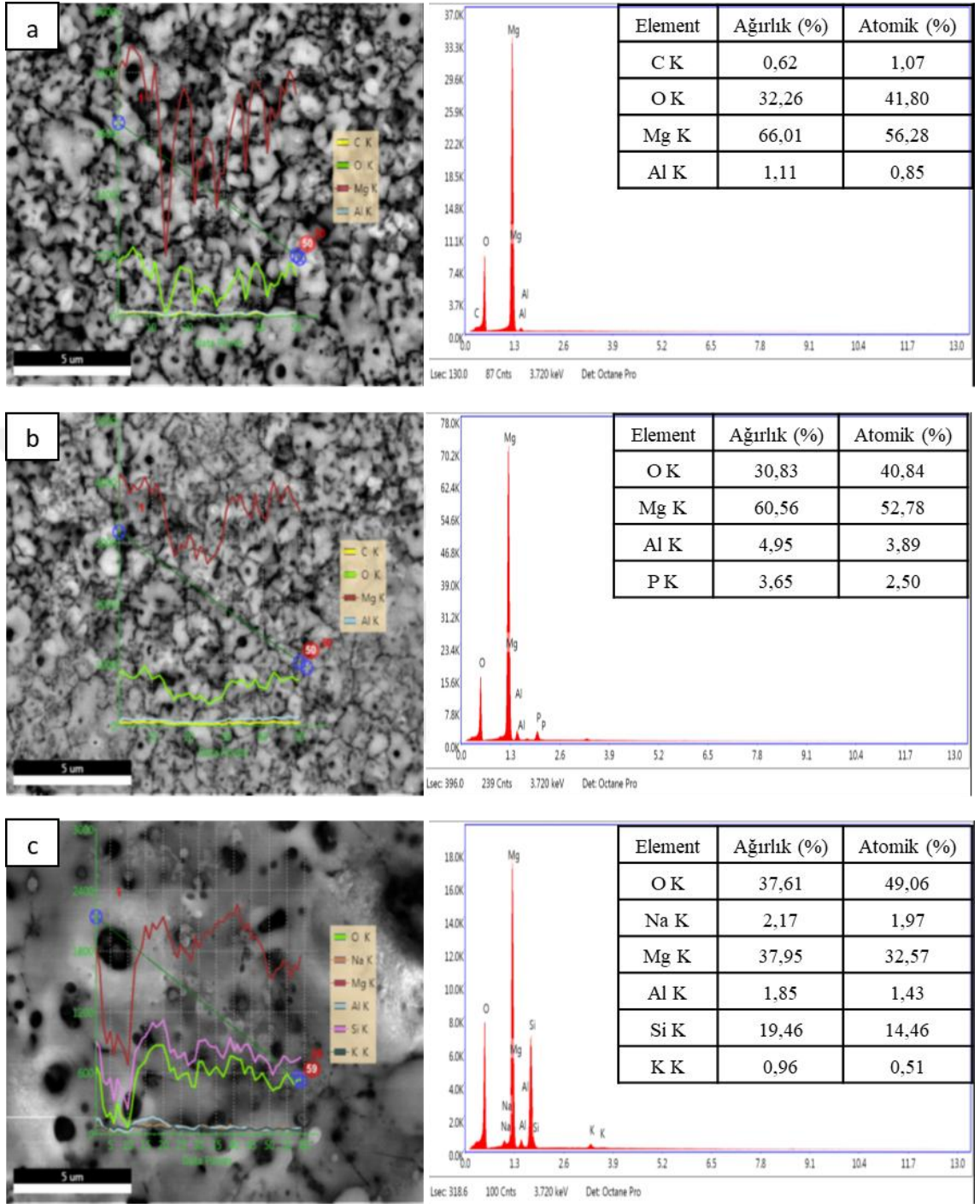
AZ91 magnezyum alaşımına NaOH, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde uygulanan anotlama işlemlerine ait SEM-EDS analizleri Şekil 4.14’te verilmiştir. Bu analizler sonucunda NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamanın ağırlıkça %33,51 O, %64,38 Mg ve %2,1 Al elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Fosfat temelli çözeltide elde edilen kaplamanın ağırlıkça %30,53 O, %60,88 Mg, %3,51 Al, %4,84 P ve %0,24 K elementlerinden; silikat temelli çözeltide ise ağırlıkça %30,83 O, %43,74 Mg, %1,72 Al ve %23,70 Si elementlerinden oluştuğu görülmektedir.

Tüm EDS analizleri birlikte değerlendirildiğinde, özellikle NaOH ve fosfat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemlerinde yüzeylerin yüksek oranlarda Mg ve O elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Silikat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işleminde ise Mg ve O elementleriyle birlikte yüzeyde, çözeltide yüksek miktarda bulunan Si elementinin biriktiği görülmektedir. Bu sonuçların XRD analizleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Daha önce de belirtildiği gibi XRD grafiklerinde tüm

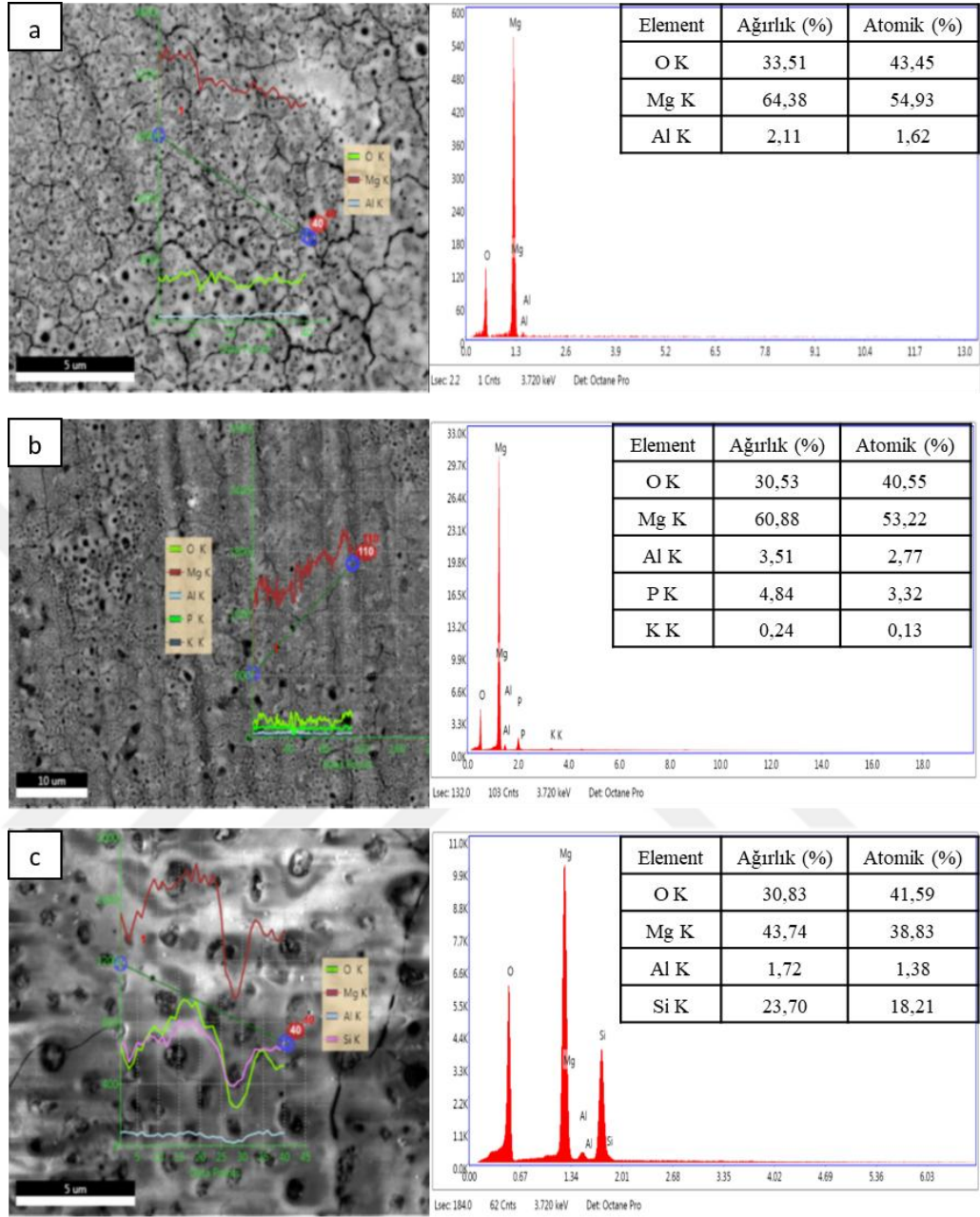
kaplamalarda MgO piklerine rastlanırken, silikat temelli çözeltide yapılan anotlama işleminde MgO piklerine ilaveten Mg_2SiO_4 fazının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler



Şekil 4.13. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler



Şekil 4.14. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının EDS analizleri (a) NaOH, (b) fosfat ve (c) silikat temelli çözeltiler

4.1.3. Anotlanmış numunelere ait korozyon deneyleri

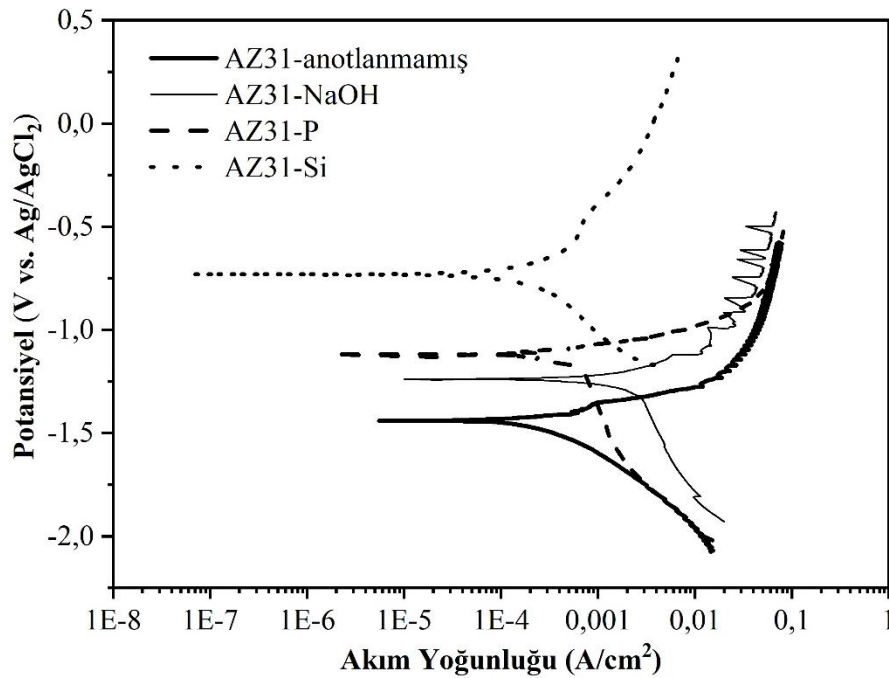
Anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımların %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.

Şekil 4.15’te, AZ31 alaşımı üzerine yapılan anotlama işleminin, bu alaşımın %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyon davranışına etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde NaOH çözeltisinde yapılan anotlama işleminin korozyon akım yoğunluğunu bir miktar artırdığı, korozyon potansiyeli değerini ise pozitif yöne doğru yükselttiği tespit edilmiştir. Anodik polarizasyon eğrisi ise düşük akım yoğunluğu değerlerine kaymıştır. Fosfat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda anodik akım yoğunluğu pek değişmemiş, korozyon potansiyeli değeri ise pozitif yöne doğru bir miktar artmıştır. Silikat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda ise korozyon akım yoğunluğu değeri azalmış ve korozyon potansiyeli değeri ise pozitif yönde artmıştır. Anodik akım yoğunluğu ise düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır. Korozyon direncinde en fazla iyileşme silikat temelli çözeltide yapılan anodik kaplama sonucunda elde edilmiştir.

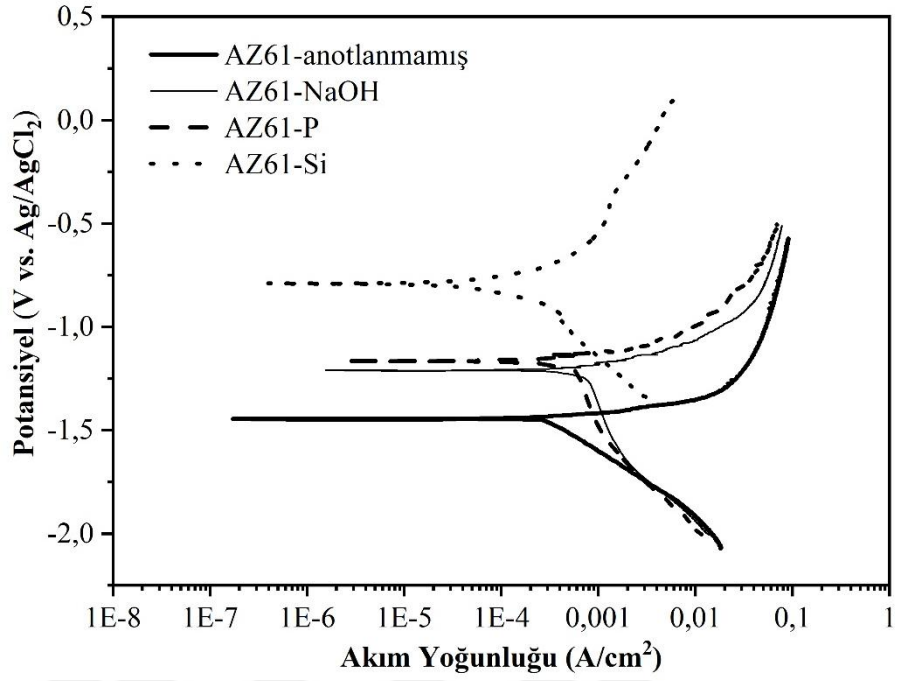
Şekil 4.16’da, AZ61 alaşımı üzerine yapılan anotlama işleminin, bu alaşımın %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon davranışına etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde NaOH ve fosfat çözeltisinde yapılan anotlama işlemlerinin korozyon akım yoğunluğu değerlerini pek değiştirmedeği, korozyon potansiyeli değerlerini ise pozitif yöne doğru yükselttiği tespit edilmiştir. Anodik polarizasyon eğrileri daha düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır. Silikat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda ise korozyon akım yoğunluğu değeri azalmış ve korozyon potansiyeli değeri ise pozitif yönde artmıştır. Anodik akım yoğunluğu ise daha düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır. Korozyon direncinde en fazla iyileşme silikat temelli çözeltide yapılan anodik kaplama sonucunda elde edilmiştir.

Şekil 4.17'de AZ91 alaşımı üzerine yapılan anotlama işleminin, bu alaşımın %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon davranışına etkisi görülmektedir. Şekil incelendiğinde NaOH ve fosfat çözeltisinde yapılan anotlama işlemlerinin korozyon akım yoğunluğu değerlerini pek deyiştirmediği, korozyon potansiyeli değerlerini ise pozitif yöne doğru yükselttiği tespit edilmiştir. Silikat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda ise korozyon akım yoğunluğu değeri azalmış ve korozyon potansiyeli değeri ise pozitif yönde artmıştır. Anodik akım yoğunluğu ise düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır. Korozyon direncinde en fazla iyileşme silikat temelli çözeltide yapılan anodik kaplama sonucunda elde edilmiştir.

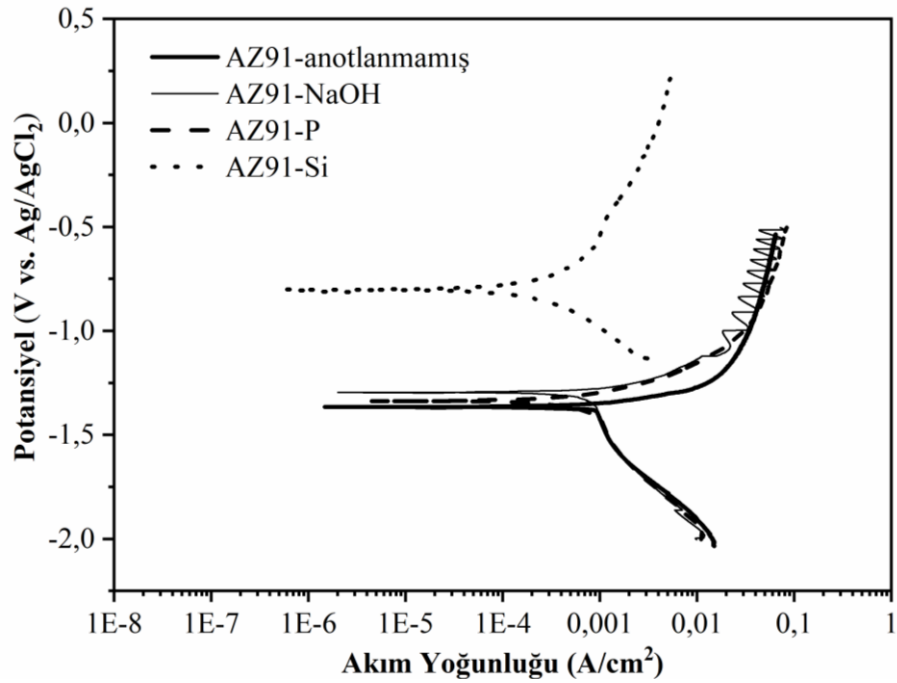
Magnezyum alaşımlarının korozyon direncinin düşük olmasının iki temel sebebi bulunmaktadır. Bunlardan ilki magnezyum alaşımı içerisinde bulunan ikincil fazların veya safsızlıkların galvanik etki oluşturmalarıdır. İkincisi ise magnezyum üzerinde oluşan hidroksit film tabakasının alüminyum alaşımları ve paslanmaz çelik gibi metaller üzerinde oluşan pasif tabakalardan daha az kararlı olmasıdır (Makar and Kruger, 1993; Song and Shi, 2013). Bu durum Şekil 2.6'da gösterilen magnezyum ve 25°C'deki suyun potansiyel-pH (Pourbaix) diyagramında da açıkça görülmektedir.



Şekil 4.15. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri



Şekil 4.16. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri



Şekil 4.17. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri

Eğer kaplama nispeten kompakt bir kaplama ise, korozyona sebep olacak iyonların anodik kaplama içerisine nüfuzu anodize edilmiş bir magnezyum alaşımının korozyon performansı açısından önemlidir. Kaplanmış bir alaşımın korozyon direnci esas olarak kaplamanın saldırgan iyonlara karşı direnci ile belirlenmelidir. Bununla birlikte gözenekli anotlanmış bir magnezyum alaşımı için, kaplamadaki gözeneklerden veya kusurlardan saldırgan iyonların girmesi ve taban/kaplama ara yüzeyine ulaşması çok zor değildir (Blawert *et al.* 2006; Shi *et al.* 2006a). Bu durumda, saldırgan iyonların kaplamanın iç bölgelerine doğru difüze olması ile birlikte taban/kaplama ara yüzeyinin direnci önemli olacaktır. Anotlama işleminde anodik kaplamanın temel rolü, bu saldırgan iyonların difüze olmasını geciktirmek ve “geciktirici etki” olarak adlandırılan bu durumla magnezyum alaşımlarının korozyonunu da geciktirmektir.

Anotlanmış bir kaplamada, tüm gözenekler kaplama üst yüzeyinden taban/kaplama ara yüzeyine kadar ulaşmaz. Anotlanmış bir kaplamanın gözenekliliği yüksek görünse de gözeneklerin çoğu süresizdir ve iç bölgedeki sayısı çok azdır. Ancak bu tabaka gözlemlenmeyecek kadar ince olabilir ve yüzeye benzer bir yapıda olabilir. Saldırgan iyonların son derece az gözenek içinden geçerek taban/kaplama ara yüzeyine ulaşması durumunda, taban malzemenin saldırgan ortama maruz kalan bölgesi çok sınırlı olacaktır. Bu nedenle, anotlanmış bir magnezyum alaşımı “engelleme etkisi” olarak görev yapmış olacaktır.

Alaşımların korozyonunun normalde bazı aktif veya kusurlu bölgelerden başladığı bilinmektedir. Magnezyum alaşımlarında aktif bölgeler, alaşım elementlerine bağlı olarak tane sınırları veya taneler olabilir. Anotlama işlemi ile bu aktif veya kusurlu bölgelerin çoğu ortadan kaldırılabilir. Bu durum “pasifleştirici etki” olarak adlandırılmaktadır (Blawert *et al.* 2006; Song and Shi, 2013).

Tüm bu hususlar dikkate alındığında, yapılan çalışmada tüm anodik kaplamaların korozyon potansiyelini artırdığı görülmüştür. Yani yapılan kaplamalar üç magnezyum alaşımının da korozyon direncini artırmıştır. Silikat temelli çözeltilerde elde edilen kaplamalarda ise hem akım yoğunluğu değerleri azalmış hem de korozyon potansiyeli

değeri pozitif değerlere doğru kaymıştır. En iyi korozyon direnci her üç alaşımda da silikat temelli çözeltide yapılan anotlama sonucu elde edilmiştir. Bu çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda oluşan Mg_2SiO_4 fazı oldukça kararlı bir faz olup korozyon direncinin artmasına neden olmuştur.

4.1.4. Anotlanmış numunelere ait gerilmeli korozyon deneyleri

Gerilmeli korozyon deneyleri SSRT deney tekniği kullanılarak yapılmış, bütün deneyler için maksimum kopma dayanımı, kırılma süreleri ve uzama miktarları kaydedilmiştir. SSRT deneyleri her üç alaşım için anotlanmamış numunelerde hava ve %3,5 NaCl ortamlarında yapılırken, anotlanmış numunelerde ise %3,5 NaCl çözeltisinde yapılmıştır.

Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları numunelerine ait SSRT deney sonuçlarının tümü Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

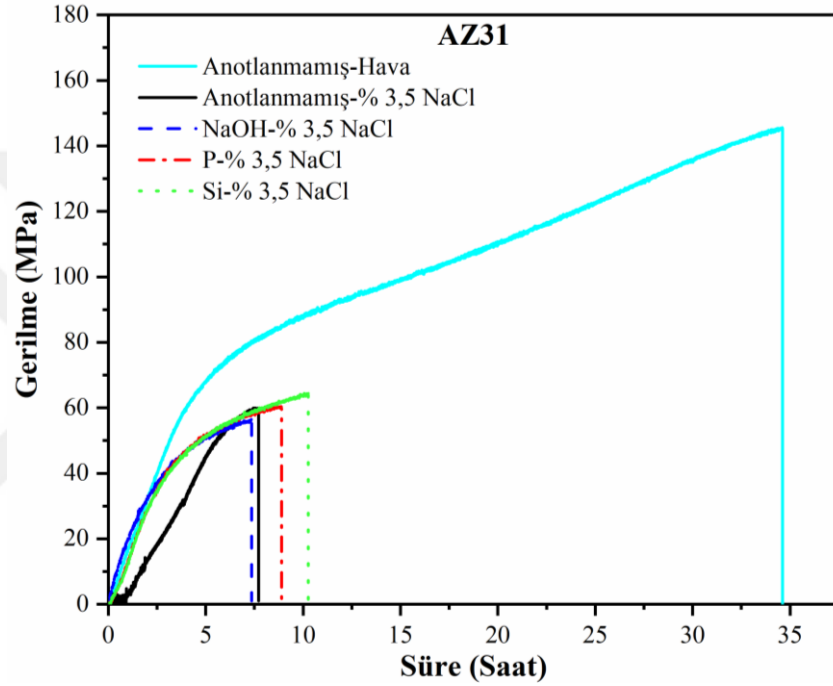
Şekil 4.18'de anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımının SSRT deney sonuçları verilmiştir. Anotlanmamış numunelerin hava ve %3,5 NaCl ortamlarındaki kırılma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 34,6 saat ve 7,7 saat olarak elde edilmiştir. NaOH, fosfat ve silikat temelli çözeltilerde anotlanmış numunelerin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süreleri ise sırasıyla 7,4 saat, 8,9 saat ve 10,3 saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında korozyif ortam olan %3,5 NaCl çözeltisinde anotlanmamış numunenin kırılma süresi hava ortamında yapılabildiğine göre %77,7 azalmıştır. Anotlanmış numunelerde ise, NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamanın anotlanmamış numuneye göre kırılma süresini %3,9 azalttığı, fosfat ve silikat çözeltilerinde elde edilen kaplamaların ise sırasıyla %15,6, %33,8 iyileştirdiği, en fazla iyileştirmenin ise silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamada gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.1. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları

Numune	Yüzey / Ortam	Kırılma Süresi (Saat)	I _{sc}	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
AZ31	Anotlanmamış / Hava	34,6	-	146,9	41,5
	Anotlanmamış / %3,5 NaCl	7,7	0,777	58,7	9,3
	NaOH Anotlanmış / %3,5 NaCl	7,4	0,788	56,0	8,8
	P- Anotlanmış / %3,5 NaCl	8,9	0,743	61,0	10,7
	Si- Anotlanmış / %3,5 NaCl	10,3	0,703	64,9	12,3
AZ61	Anotlanmamış / Hava	56,4	-	184,7	67,7
	Anotlanmamış / %3,5 NaCl	15,7	0,722	115,9	18,9
	NaOH Anotlanmış / %3,5 NaCl	12,0	0,787	91,4	14,4
	P- Anotlanmış / %3,5 NaCl	15,9	0,719	121,1	19,0
	Si- Anotlanmış / %3,5 NaCl	17,3	0,694	118,6	20,7
AZ91	Anotlanmamış / Hava	13,0	-	144,8	15,6
	Anotlanmamış / %3,5 NaCl	6,8	0,478	87,6	8,2
	NaOH Anotlanmış / %3,5 NaCl	5,4	0,588	87,6	6,4
	P- Anotlanmış / %3,5 NaCl	7,8	0,404	95,2	9,3
	Si- Anotlanmış / %3,5 NaCl	8,5	0,346	105,5	10,2

Şekil 4.19’da anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımının SSRT deney sonuçları verilmiştir. Anotlanmamış numunelerin hava ve %3,5 NaCl ortamlarında kırılma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 56,4 saat ve 15,7 saat olarak elde edilmiştir. NaOH, fosfat ve silikat temelli çözeltilerde anotlanmış numunelerin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süreleri ise sırasıyla 12,0 saat, 15,9 saat ve 17,3 saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında korozif ortam olan çözeltisinde

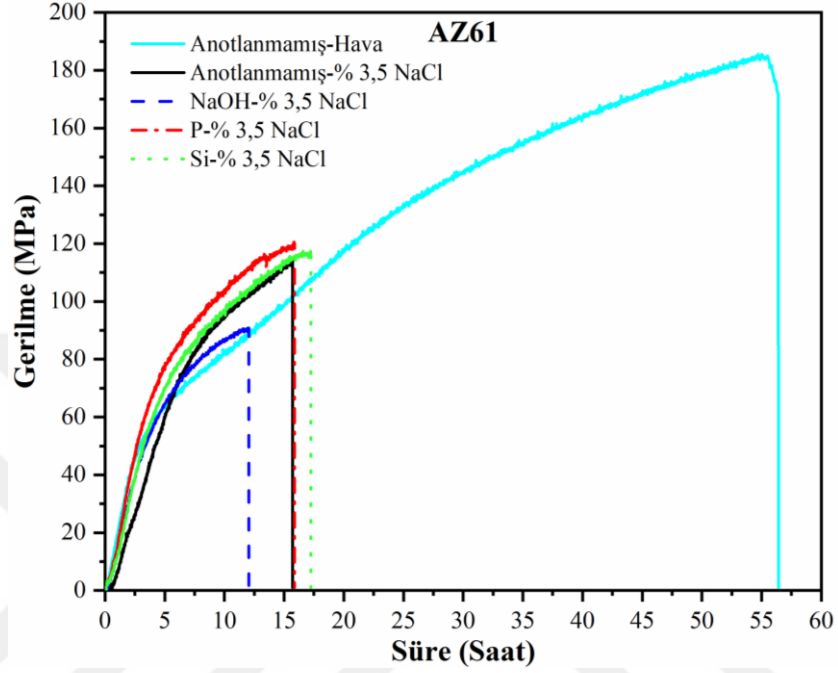
anotlanmamış numunenin kırılma süresi hava ortamında yapılarına göre %72,1 azalmıştır. Anotlanmış numunelerde ise, NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamaların anotlanmamış numuneye göre kırılma süresini %23,6 azalttığı, fosfat ve silikat çözeltilerinde elde edilen kaplamaların ise sırasıyla %1,3, %10,2 iyileştirdiği, en fazla iyileştirmenin ise silikat temelli çözeltilerde elde edilen kaplamada gerçekleştiği görülmektedir.



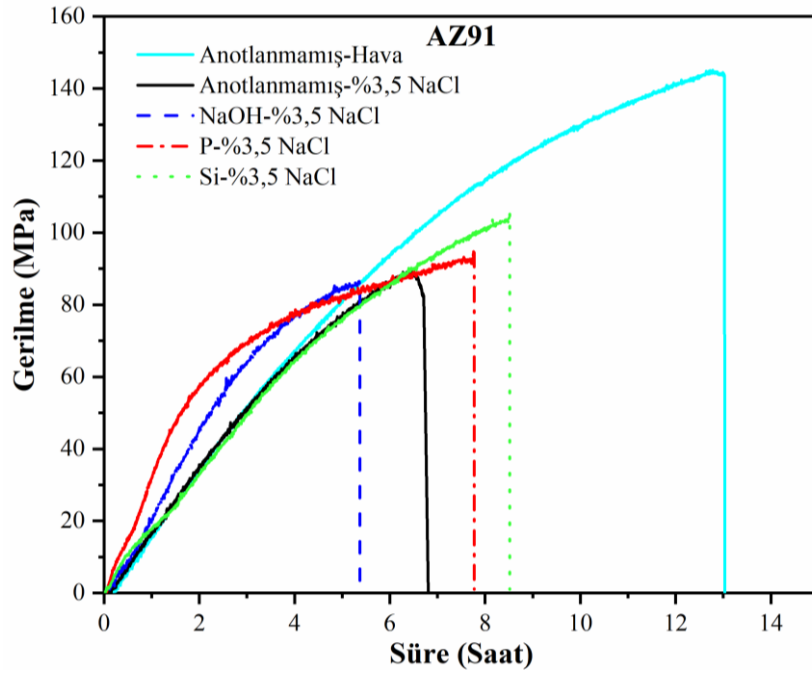
Şekil 4.18. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları

Şekil 4.20'de anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımının SSRT deney sonuçları verilmiştir. Anotlanmamış numunelerin hava ve %3,5 NaCl ortamlarında kırılma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 13,0 saat ve 6,8 saat olarak elde edilmiştir. NaOH, fosfat ve silikat temelli çözeltilerde anotlanmış numunelerin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süreleri ise sırasıyla 5,4 saat, 7,8 saat ve 8,5 saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında korozif ortam olan %3,5 NaCl çözeltisinde anotlanmamış numunenin kırılma süresi hava ortamında yapılarına göre %47,7 azalmıştır. Anotlanmış numunelerde ise, NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamaların anotlanmamış numuneye göre kırılma süresini %20,6 azalttığı, fosfat ve silikat çözeltilerinde elde edilen

kaplamaların ise sırasıyla %14,7, %25 iyileştirdiği, en fazla iyileştirmenin ise silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamada gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.19. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları



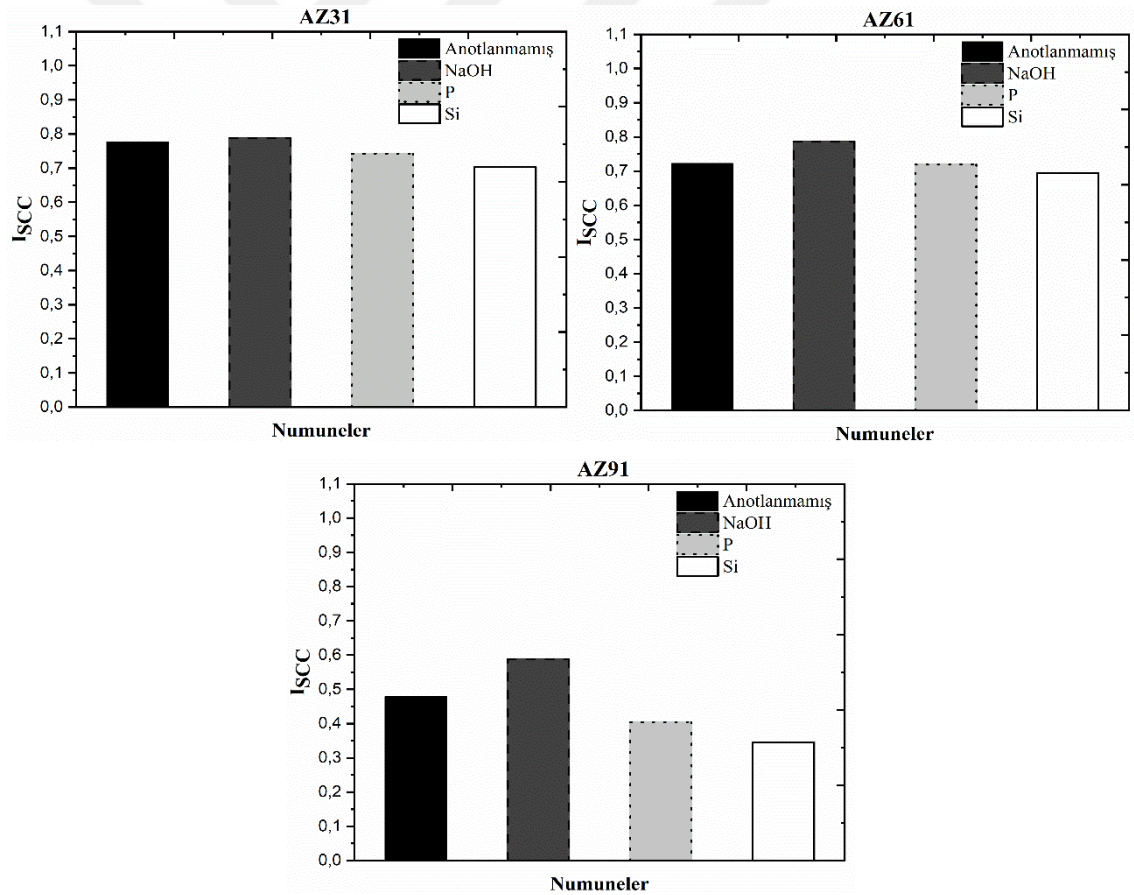
Şekil 4.20. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyi sonuçları

Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait gerilmeli korozyon indeksi değerleri Denklem 3.1'e göre hesaplanmış ve Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Malzemelerin maksimum kopma mukavemetleri ve kırılma süreleri %3,5 NaCl çözeltisinde, korozif ortamın etkisiyle oldukça azalmıştır.

Anotlanmamış magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon indeksleri karşılaştırıldığında en yüksek gerilmeli korozyon indeksi AZ31 magnezyum alaşımında görülürken, en düşük gerilmeli korozyon indeksi AZ91 magnezyum alaşımında görülmüştür. Yani AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncinin en düşük, AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncinin ise en yüksek olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon hassasiyetinin en yüksek, AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon hassasiyetinin ise en düşük olduğu görülmüştür.

Song *et al.* (1998) ve Ghali (2010a), magnezyum alaşımlarındaki alüminyum miktarının korozyon ve gerilmeli korozyon dirençlerini etkilediğini ifade etmişlerdir. Mg-Al alaşımları ve Mg-Zn alaşımları yüksek gerilmeli korozyon direncine sahipken, Al ve Zn içermeyen magnezyum alaşımlarının düşük gerilmeli korozyon direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Al içeren alaşımlarda ise GKÇ'yi azaltmak için %0,15-2,5 eşik seviyesi üzerinde bir alüminyum içeriğinin gerekli olduğunu bildirmişlerdir. Buna ek olarak, Zn ilavesi aynı zamanda magnezyum alaşımlarında GKÇ hassasiyetine sebep olduğundan, AZ serisi magnezyum alaşımlarının da gerilmeli korozyon direncinin düşük olacağını belirtmişlerdir. Mg-Al alaşımlarında alüminyum konsantrasyonunun %2'den %8'e yükseltilmesi korozyon hızını azaltmaktadır. Ağırlıkça yaklaşık %2-4'lük alüminyum ilavesi, α -Mg dentritlerini saran $\alpha+\beta$ ötektik çift fazının tane sınırlarında çökmesine neden olmaktadır. β patiküllerinin tane sınırlarında çökmesi ise %6-9 arasındaki ilavelerde gerçekleşmektedir. Alüminyum ilavesinin %10'dan fazla olması ise katılma esnasında mikro segregasyona neden olmaktadır (Ghali 2000; Winzer *et al.* 2005). β fazı magnezyum alaşımlarında oldukça kararlı ve çözelti içerisinde etkili bir fazdır. β fazı, miktarına bağlı olarak anodik bir bariyer ya da galvanik katot olarak davranabilmektedir. Şayet β fazı miktarı fazla ise, anodik bariyer olarak görev görüp, alaşımı korozyondan

korumaktadır. Magnezyum alaşımlarında β fazı ağırlıkça %2 alüminyum ilavesinden itibaren görülmektedir. Sonuç olarak %10' a kadar Al içeriğinin ilavesi korozyon ve gerilmeli korozyon direncini artırmaktadır (Ghali 2010a). Winzer *et al.* (2008) yaptıkları çalışmada sürekli uzama oranı testi ve doğrusal olarak artan gerilme testini kullanarak saf sudaki AZ31 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının GKÇ davranışını incelemişlerdir. AZ91 magnezyum alaşımının yüksek miktarda β fazına sahip bir α matrisinden oluştuğunu, AZ31 magnezyum alaşımının ise sadece α fazından oluştuğunu söylemişler ve AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncinin AZ31 magnezyum alaşımından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmada da %3,5 NaCl çözeltisinde litratüre uyumlu bir şekilde benzer davranış görülmüştür.



Şekil 4.21. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri

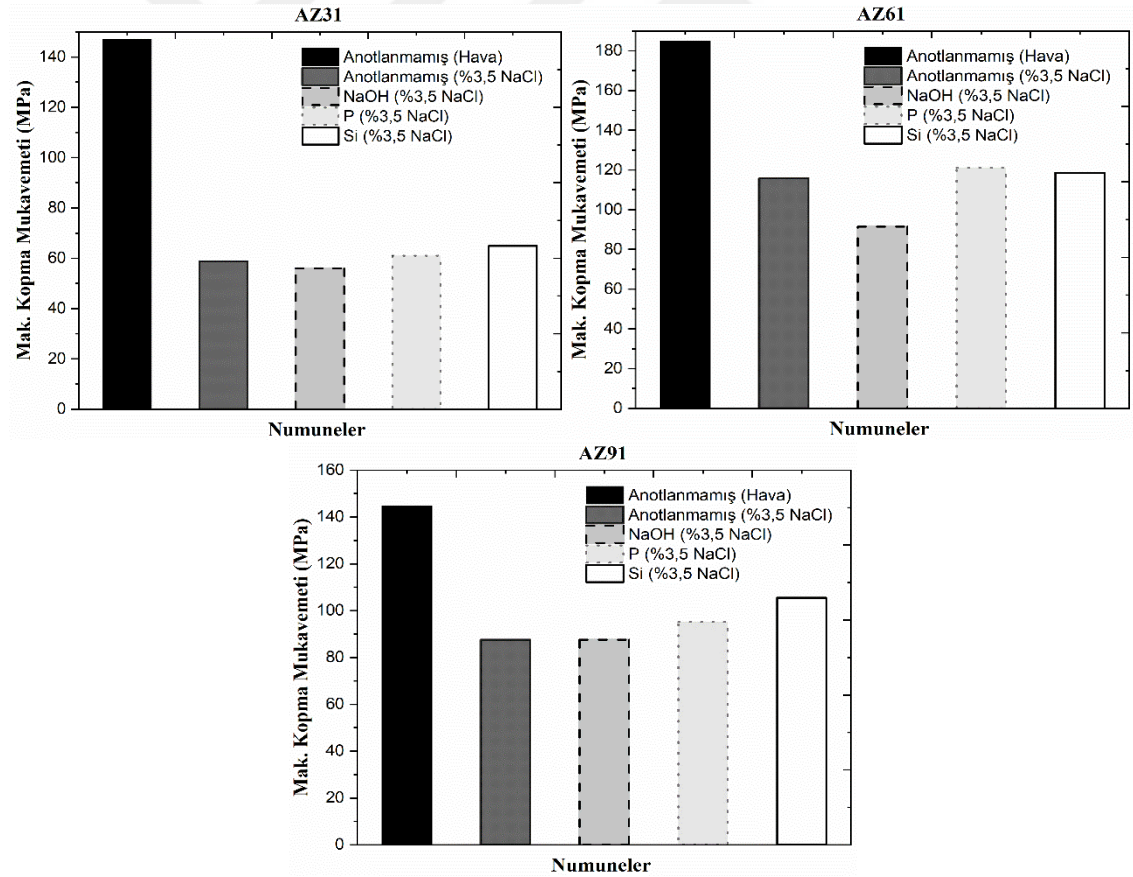
Anotlanmamış numunelerin gerilmeli korozyon indeksleri incelendiğinde ise NaOH çözeltisinde anotlanmış numunelerin gerilmeli korozyon indekslerinin arttığı diğer bir deyişle gerilmeli korozyon direncinin azaldığı görülmektedir. Silikat ve fosfat temelli çözeltilerde ise gerilmeli korozyon indekslerinin azaldığı, yani gerilmeli korozyon dirençlerinin bir miktar iyileştiği söylenebilir. En iyi gerilmeli korozyon dirençleri ise silikat temelli çözeltide elde edilmiştir.

Yapılan kaplamaların özellikle gerilmeli korozyon dirençlerine etkisinin az olmasının sebebi şu şekilde yorumlanabilir: Anotlama işlemi sonucunda malzeme yüzeyinde sert ve seramik bir kaplama oluşur. Gerilmeli korozyon deneyleri esnasında artan gerilme bu kaplamaların gevrek bir şekilde kırılmasına sebep olur. Bu durum ise numune yüzeylerine uygulanan anodik kaplamanın gerilmeli korozyon direncini istenilen düzeyde artırmamasına neden olur. NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamaların, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde elde edilen kaplamalara göre daha ince bir kaplama kalınlığına sahip olduğu görüldü. Dolayısıyla gerilmeli korozyon deneyleri esnasında ince olan bu kaplamaların diğerlerine göre daha az dayanım gösterdiği ve düşük gerilmeler altında hemen çatladığı düşünülmektedir. En yüksek gerilmeli korozyon direnci ise silikat temelli çözeltilerde görülmüştür. Bu durum aslında korozyon deneyleri ile uyumlu çıkmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, silikat temelli çözeltilerde elde edilen kaplamaların her üç magnezyum alaşımının da korozyon direncini oldukça iyileştirdiği görülmüştür. Silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamaların malzemeyi korozyondan daha fazla koruduğu ve bu sebeple gerilmeli korozyon direncini diğerlerine nazaran daha fazla iyileştirdiği söylenebilir.

Hava ve %3,5 NaCl çözeltisindeki SSRT deneyleri sonucunda elde edilen anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait maksimum kopma mukavemeti değerleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Hava ortamında anotlanmamış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının maksimum kopma mukavemeti değerleri sırasıyla 146,9 MPa, 184,7 MPa ve 144,8 MPa olarak ölçülmüştür. %3,5 NaCl çözeltisinde ise anotlanmamış numunelerin maksimum

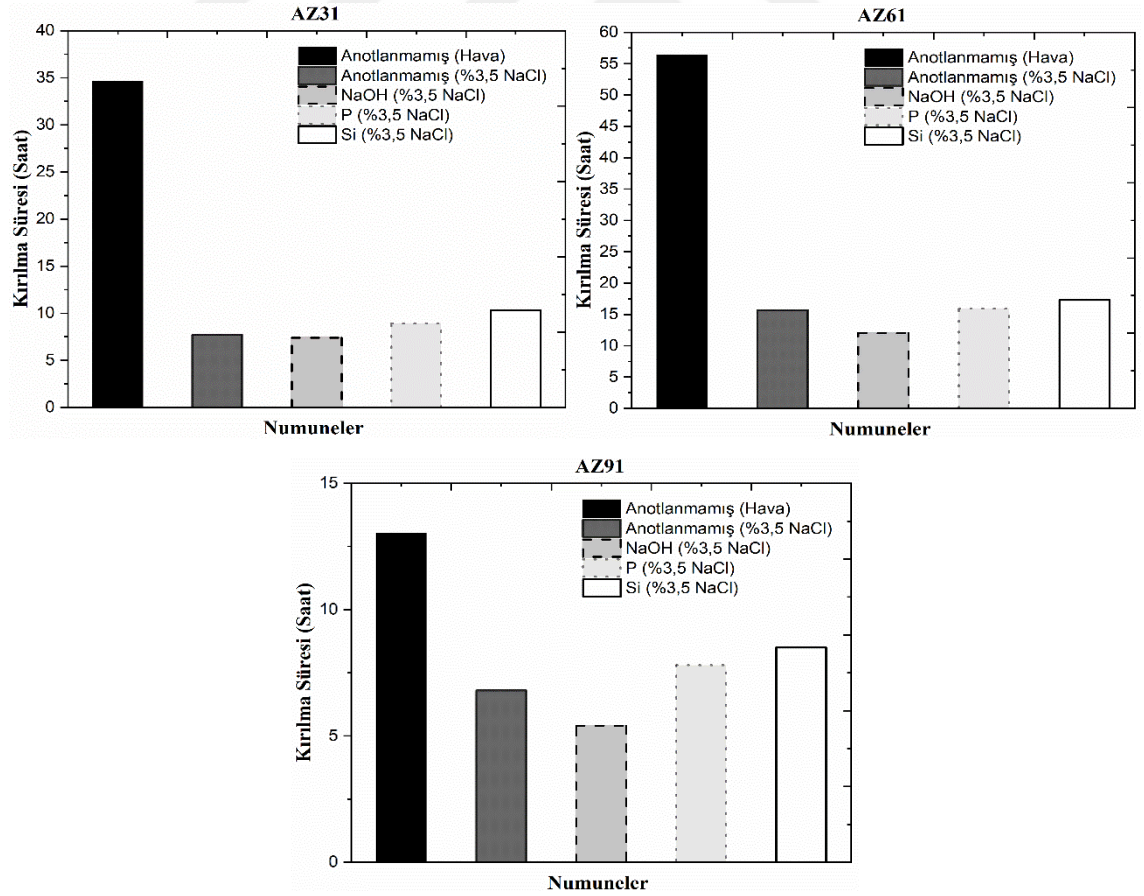
kopma mukavemeti değerleri hava ortamına göre oldukça azalmıştır. %3,5 NaCl çözeltisinde yapılan SSRT deneylerinde, NaOH çözeltisinde anotlanmış numunelerin maksimum kopma mukavemeti değerleri, anotlanmamış numunelere göre bir miktar kötüleşmiştir. Fosfat ve silikat temelli çözeltelerde elde edilen anodik kaplamaların maksimum kopma mukavemeti değerlerinin anotlanmamış numunelere göre bir miktar iyileşme gösterdiği görülmüştür. %3,5 NaCl zeltisi içerisinde en iyi maksimum kopma mukavemeti değeri silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamada gerçekleşmiştir. Maksimum kopma mukavemeti değerleri kırılma süreleri ile benzer davranış sergilemiştir. Silikat temelli çözeltide elde edilen kaplama korozyon direncini artırdığından, başlangıçta gerilmeli korozyon çatlağı oluşma süresini bir miktar engellemiştir denilebilir.



şekil 4.22. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının maksimum kopma mukavemeti değerleri

Hava ve %3,5 NaCl çözeltisindeki SSRT deneyleri sonucunda elde edilen anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait kırılma süreleri Şekil 4.23'te verilmiştir. Anotlanmamış numuneler için hava ortamında kırılma süreleri incelendiğinde en büyük kırılma süresi değeri AZ61 magnezyum alaşımında görülürken, en düşük AZ91 magnezyum alaşımında gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ise magnezyum alaşımlarındaki optimum dayanım ve uzamanın %6 alüminyum ilavesinde olmasından kaynaklanmaktadır (Song *et al.* 1998).

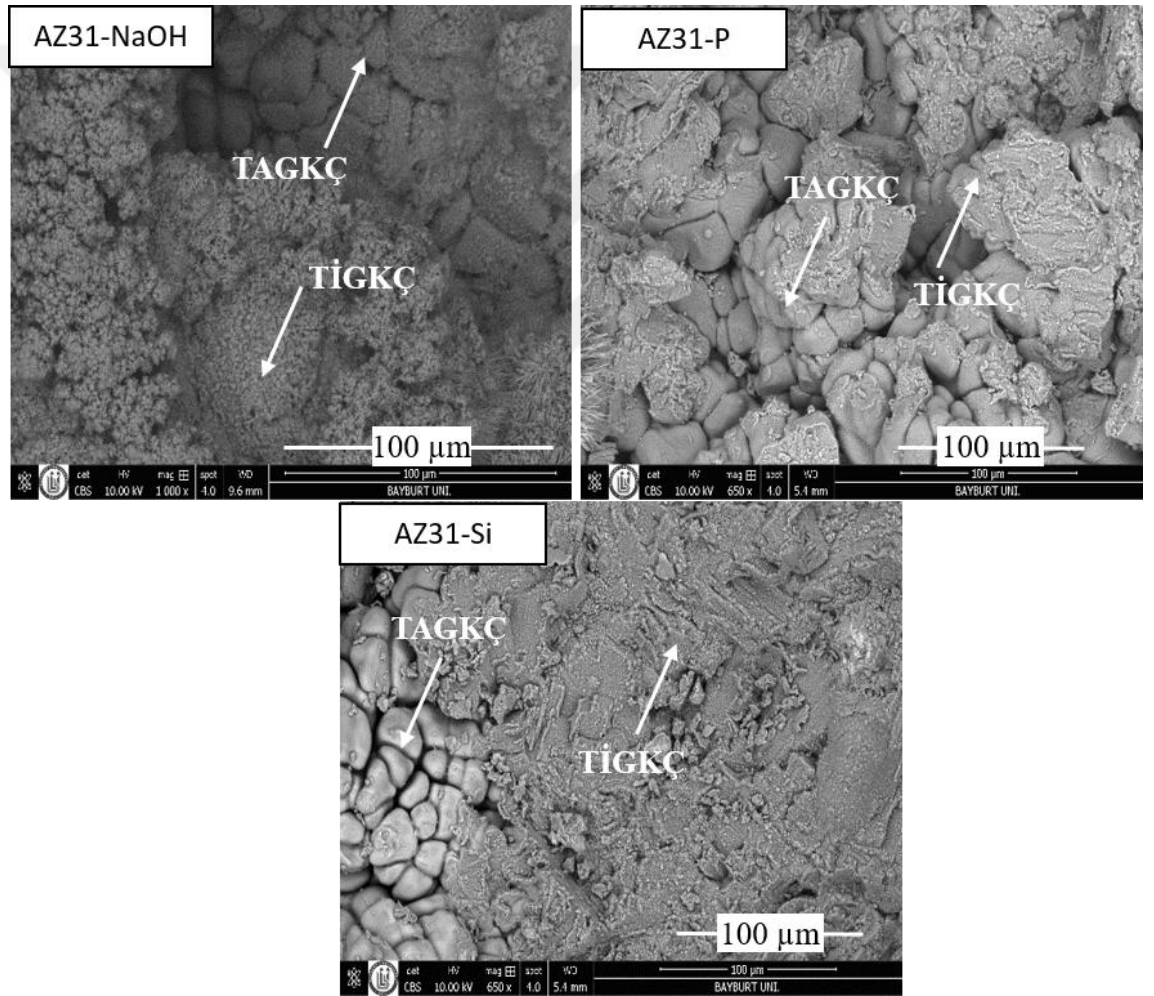
Anotlanmış numunelerin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma sürelerine bakıldığında, NaOH çözeltisinde elde edilen kaplamanın kırılma süresini azalttığı görülürken, silikat ve fosfat temelli çözeltilerde ise, kırılma süresini bir miktar artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.23. Anotlanmamış ve anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri

4.1.5. Anotlanmış numunelere ait kırılma görüntüleri

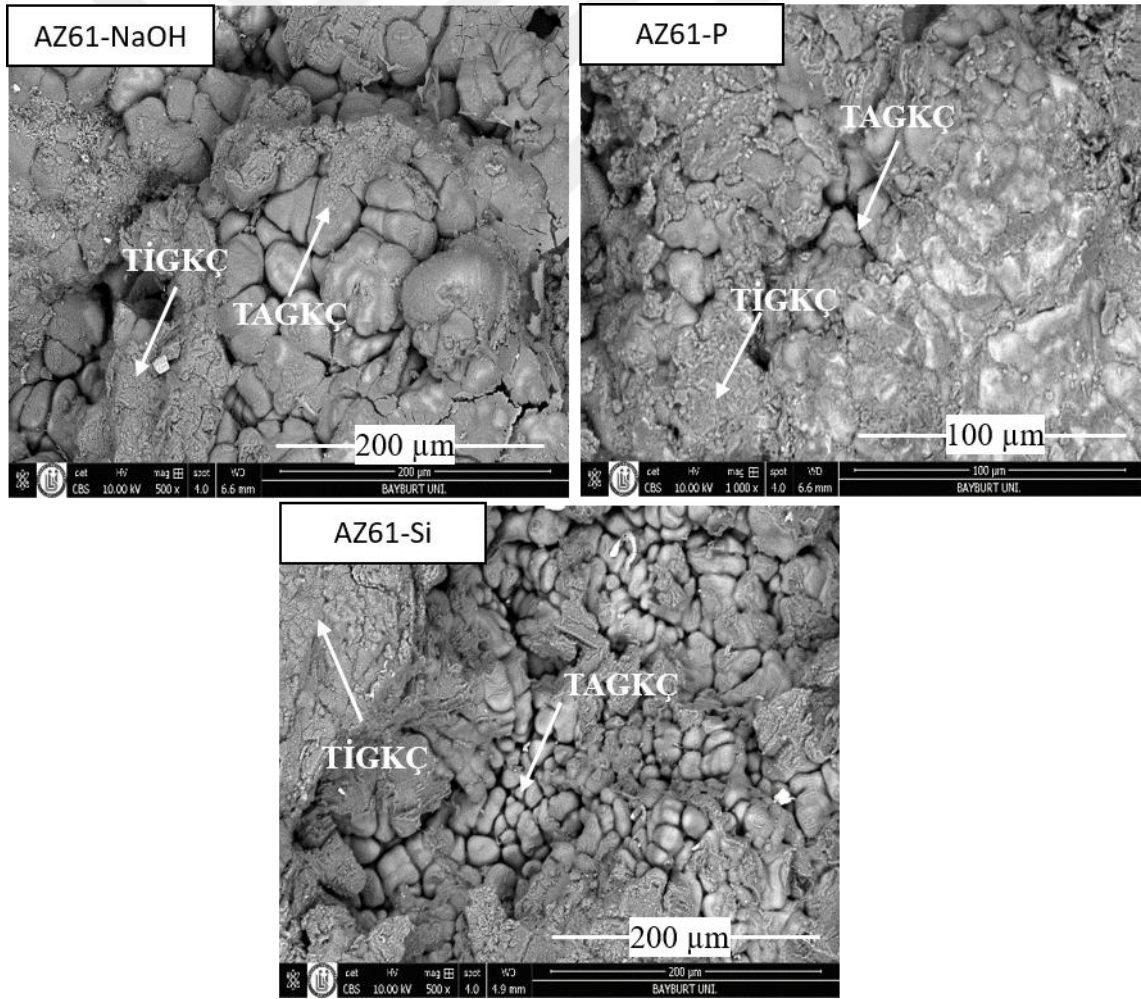
Yapılan çalışmada farklı çözeltilerde anotlanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon deneyleri sonrasındaki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, bütün numunelerde hem taneler arası gerilmeli korozyon çatlakları hem de tane içi gerilmeli korozyon çatlakları görülmüştür.



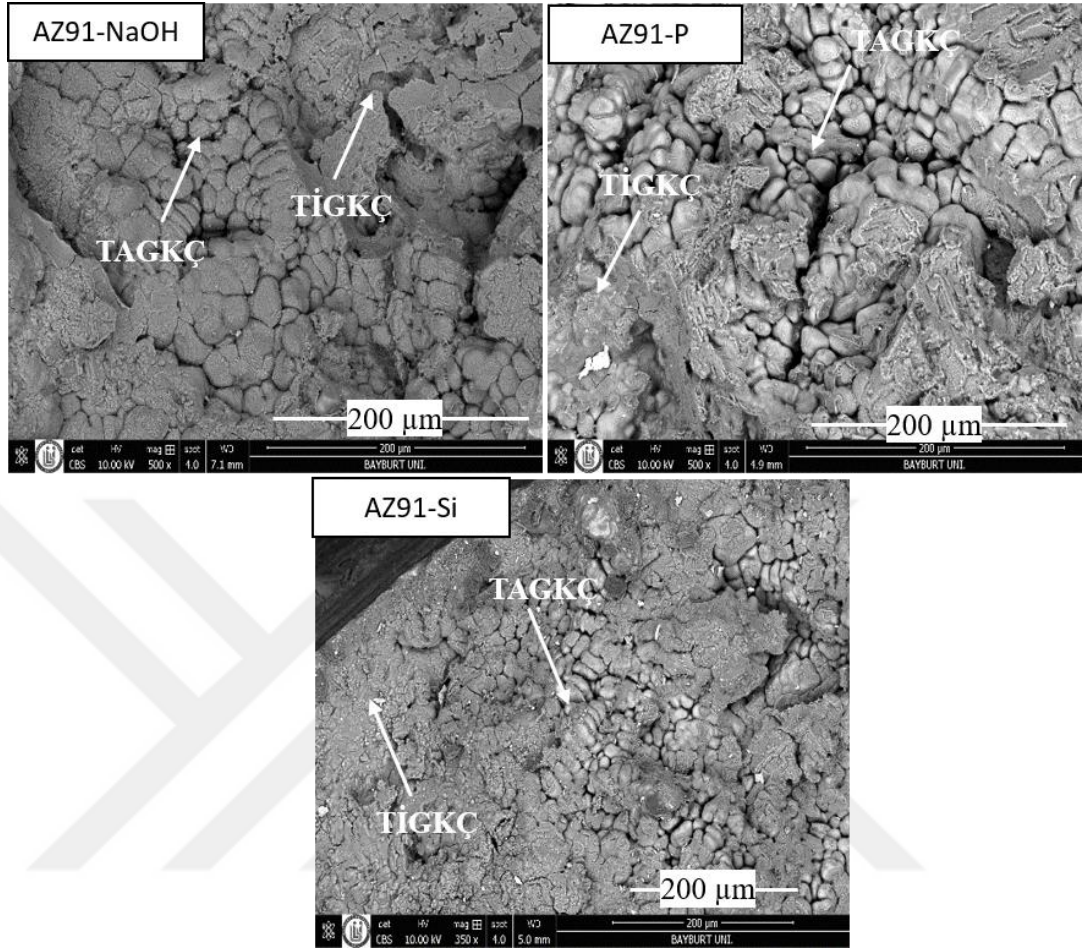
Şekil 4.24. Anotlanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlakları TAGKÇ ve TİGKÇ olarak iki şekilde gerçekleşebilmektedir. Bazen bu ikisi beraber oluşabilmektedir. Bu iki kırılma

türü birbirinden farklı mekanizmalar sonucunda oluşmaktadır. Bu mekanizma tane boyutu ve ortam ile açıklanabilir. TİGKÇ sürekli olmayan ve değişken kırılmaları içerirken; TAGKÇ sürekli ve tamamen elektrokimyasaldır. Eğer ortamda hidrojen var ise tane boyutuna bağlı olarak hem TİGKÇ hem de TAGKÇ görülebilir. Örneğin ince taneli (0,025 mm) ticari saflıktaki magnezyumda tane içi gerilmeli korozyon çatlakları görülürken, daha kaba taneli (0,075 mm) yüksek saflıktaki magnezyumda ise hem tane içi hem de taneler arası gerilmeli korozyon çatlakları görülebilmektedir. Ayrıca bu kırılma türü korozif ortam ile de ilgilidir. Mg-5Al alaşımında $MgCO_3$, %0,5 KF, %0,5 KHF ve %0,5 HF çözeltilerinde TİGKÇ görülürken, %0,05 potasyum kromat çözeltisinde ise TAGKÇ görülmüştür (Atrens *et al.* 2011).



Şekil 4.25. Anotlanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 4.26. Anotlanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

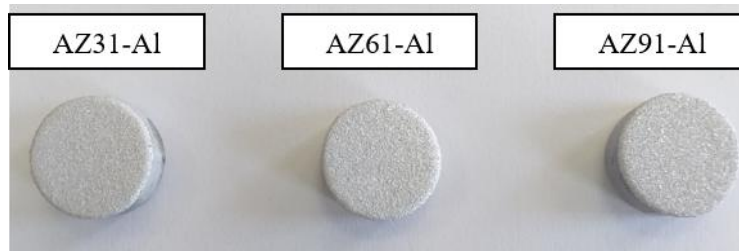
Bazı çalışmalarda Mg-Al-Zn ve Mg-Al alaşımlarında TİGKÇ görüldüğü ve bunun sebebinin ısı ile işleme ince taneli yapıların oluşturulması ve tane sınırları boyunca $Mg_{17}Al_{12}$ çökmesi olduğu belirtilmiştir. Al içeriği fazla olan Mg-Al alaşımlarındaki TAGKÇ oluşma ihtimali çok daha fazladır. Bunun sebebi ise tane sınırlarında $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltisinin birleşik Mg matrisi ile mikro-galvanik korozyon etkisi oluşturmasına bağlanmıştır. Buna ek olarak yapılan diğer çalışmalarda ise, bunun sadece $Mg_{17}Al_{12}$ fazlarının oluşmasıyla ilgili olmadığı, aynı zamanda tane boyutunun da burada etkili olduğu ifade edilmiştir. Hem tane içi hem de taneler arası kırılmanın oluşması ise şu şekilde açıklanmaktadır: $Mg_{17}Al_{12}$ çökmesi TAGKÇ ve hidrojen bulunması durumunda tane büyüklüğünün artırılması ise TİGKÇ oluşmasına neden olmaktadır. Çünkü çatlak

daha kolay bir yoldan devam etmeyi seçer ve hidrojen gevrekleşmesi büyük tanelerde daha kolay olur (Avedesian and Baker 1999).

Şekil 3.2’de kullanılan AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Kullanılan numunelerin ortalama tane büyüklükleri, AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları için sırasıyla 0,042 mm, 0,037 mm ve 0,031 mm olarak ölçülmüştür. Literatür bulgularına göre, elde edilen bu tane büyüklüğü değerleri TİGKÇ ve TAGKÇ kırılma türlerinin görülebileceği tane büyüklükleridir. Ayrıca, mikro yapı görüntülerinde görüldüğü gibi, intermetalik β fazı ($Mg_{17}Al_{12}$) mevcuttur ve bu fazın TİGKÇ ve TAGKÇ'nin bir arada bulunmasında bir faktör olduğu söylenebilir. Tek fazlı alaşımlarda genellikle TAGKÇ görülürken, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının varlığı ise TİGKÇ’ye neden olmaktadır.

4.2. Elektrik ark sprej kaplama işlemi

Elektrik ark sprej yöntemi ile alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımı numunelere ait resimler Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Kplama işlemi sonucunda taban malzeme yüzeyleri homojen ve pürüzlü olarak tümüyle saf alüminyum ile kaplanmıştır.

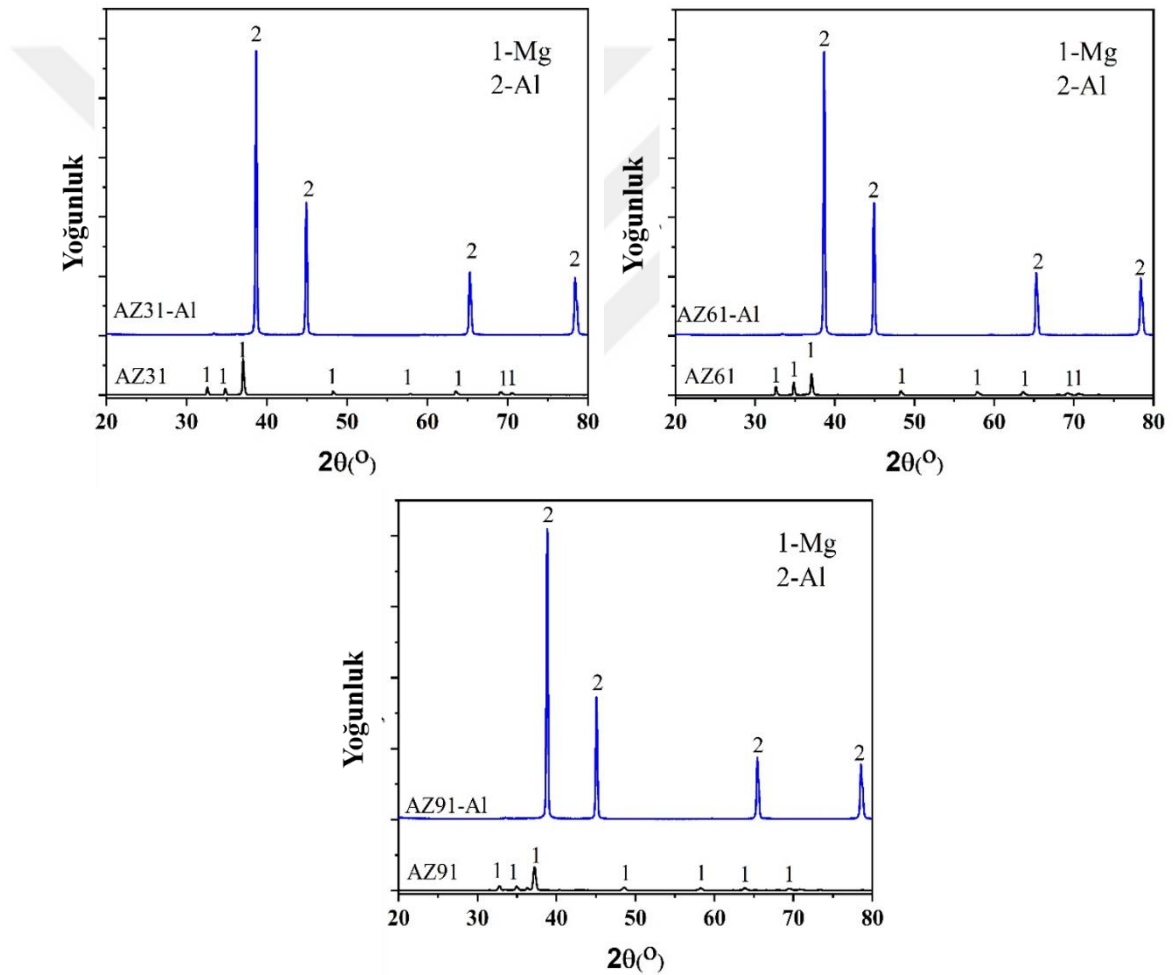


Şekil 4.27. Alüminyum kaplanmış numuneler

4.2.1. Elektrik ark sprej kaplama XRD analizleri

Kaplamanın faz yapısını öğrenebilmek için elektrik ark sprej yöntemi ile alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizi yapılmıştır.

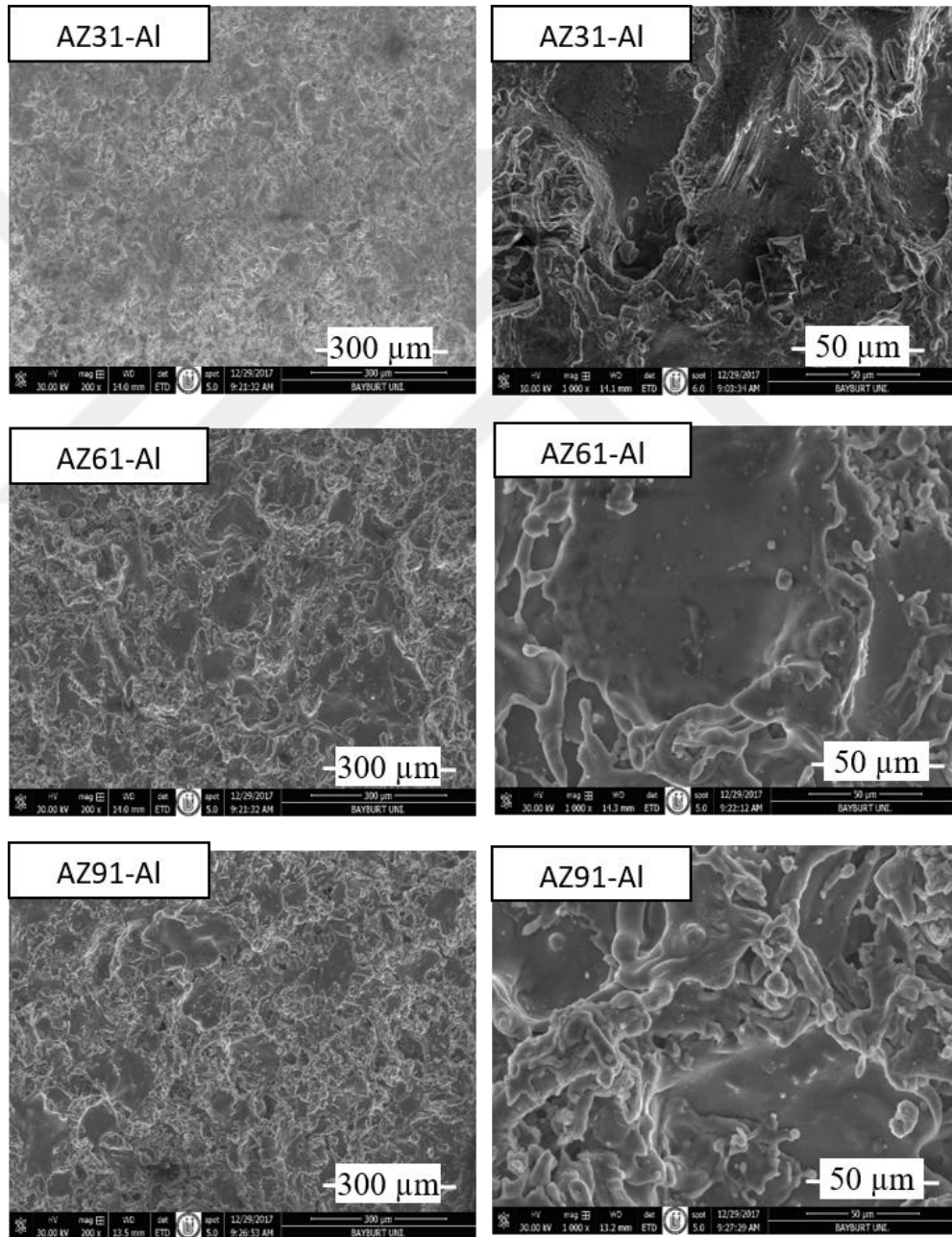
Kaplanmamış ve Al kaplanmış alaşımların XRD grafikleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere tüm alaşımlarda yüzey tamamen saf alüminyum kaplanmış ve farklı açılarda şiddetleri çok yüksek Al elementine ait pikler elde edilmiştir. Kaplanmış numunelerde taban malzemesine ait herhangi bir pik görülmemiştir. XRD analizlerinden elde edilen piklerin literatürle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (Chiu et al. 2005; Pardo, Merino, *et al.* 2009; Pardo, Casajús, *et al.* 2009; Arrabal *et al.* 2010; Song *et al.* 2011).



Şekil 4.28. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının XRD analizleri

4.2.2. Elektrik ark sprej kaplama SEM görüntüleri

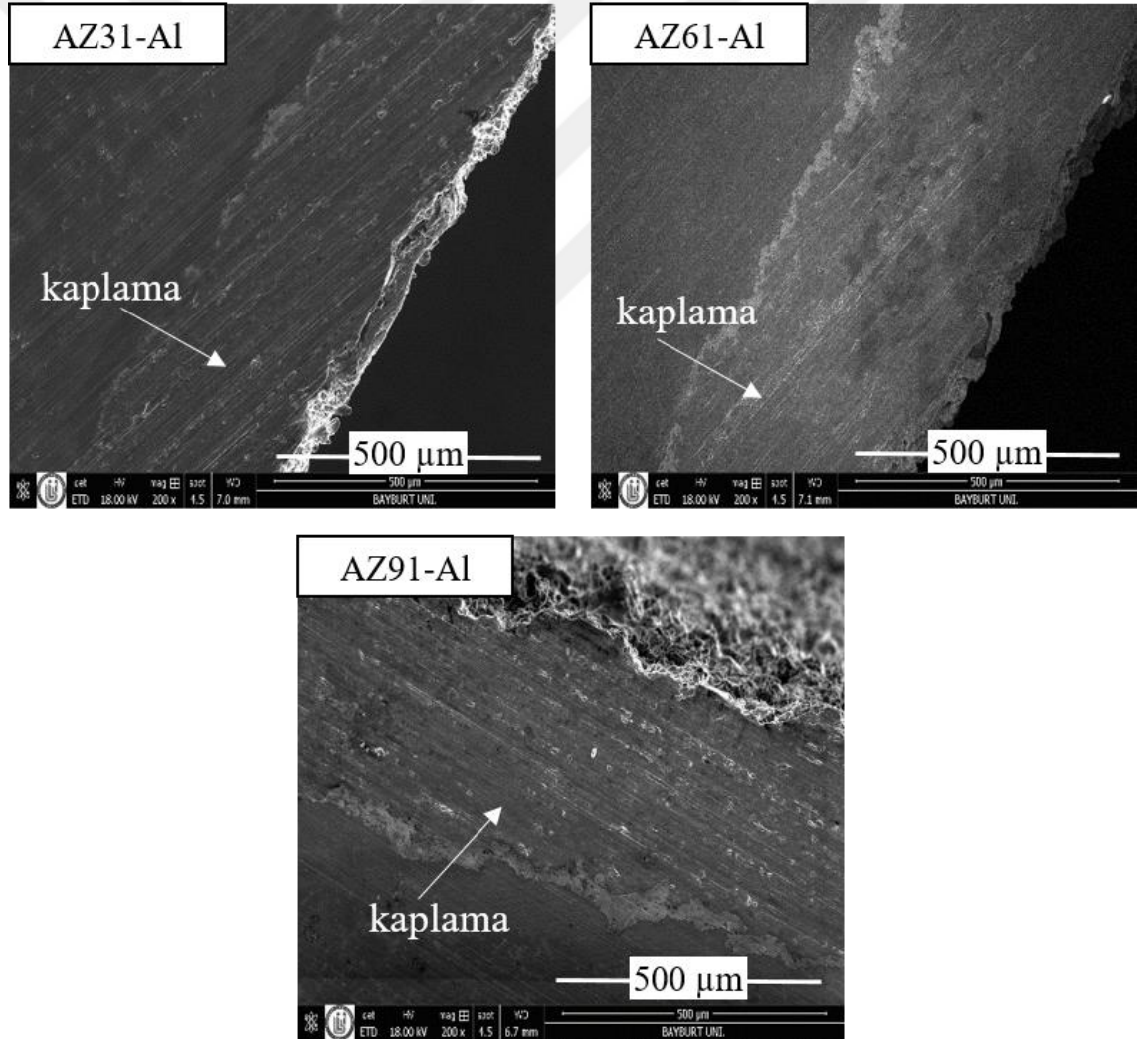
Elektrik ark sprej yöntemi ile alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının yüzey morfolojilerine ait farklı büyültmelerde alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.29'da verilmiştir.



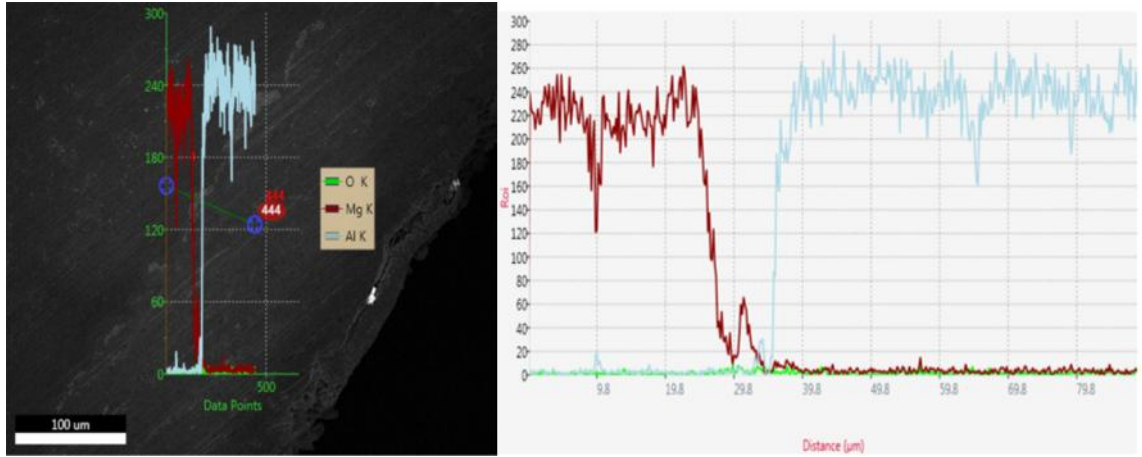
Şekil 4.29. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SEM görüntüleri

Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait kesit görüntüleri Şekil 4.30'da; alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum numunenin kesit ara yüzünü gösteren SEM-EDS analizi Şekil 4.31'de verilmiştir.

Kaplama kalınlıkları tüm numunelerde yaklaşık 350-360 μm civarında elde edilmiştir. Taban malzeme ile kaplama arasında oluşan ara yüzeyin EDS analizinde ise hem Mg hem de Al elementine ait pikler elde edilmiş olup, bu da bu bölgede Mg ve Al elementlerinin bir bileşik oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 4.30. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SEM kesit görüntüleri

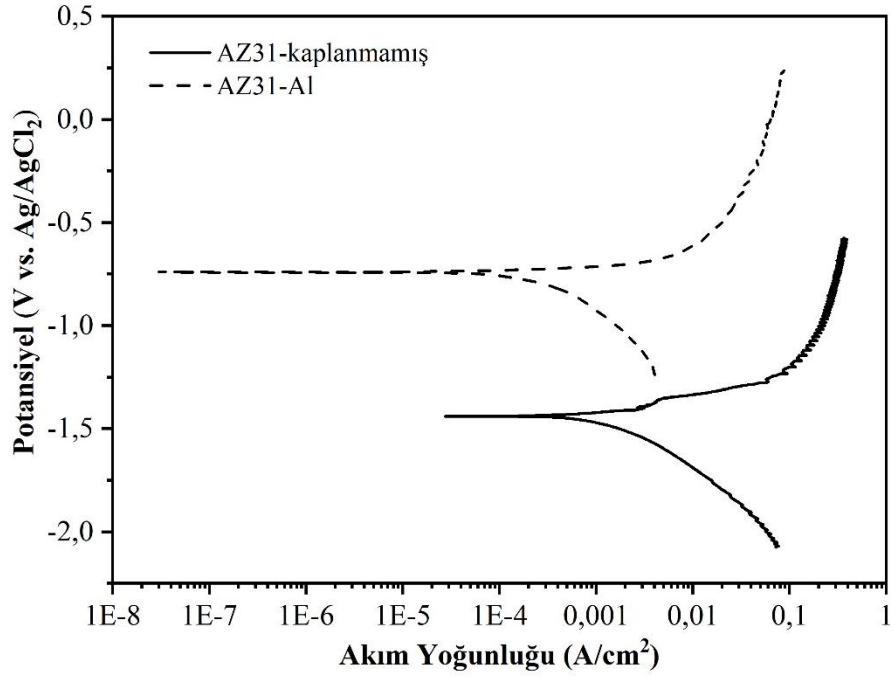


Şekil 4.31. Alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum ara yüzeyinden alınmış SEM-EDS görüntüsü

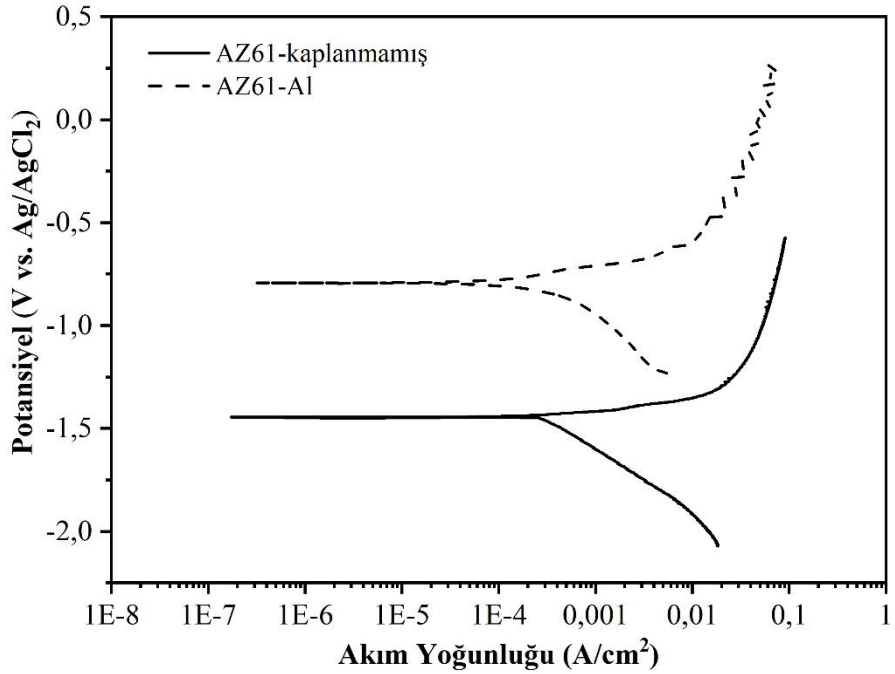
4.2.3. Elektrik ark sprey kaplama korozyon deneyleri

Kaplanmamış ve elektrik ark sprey yöntemi ile alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri sırasıyla Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’te verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, alüminyum kaplama işlemi her üç alaşımda da korozyon akım yoğunluğu değerini bir miktar azaltmıştır. Korozyon potansiyeli değeri ise üç alaşım için de pozitif yöne doğru kaymıştır. Ayrıca anodik polarizasyon eğrileri daha düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır.

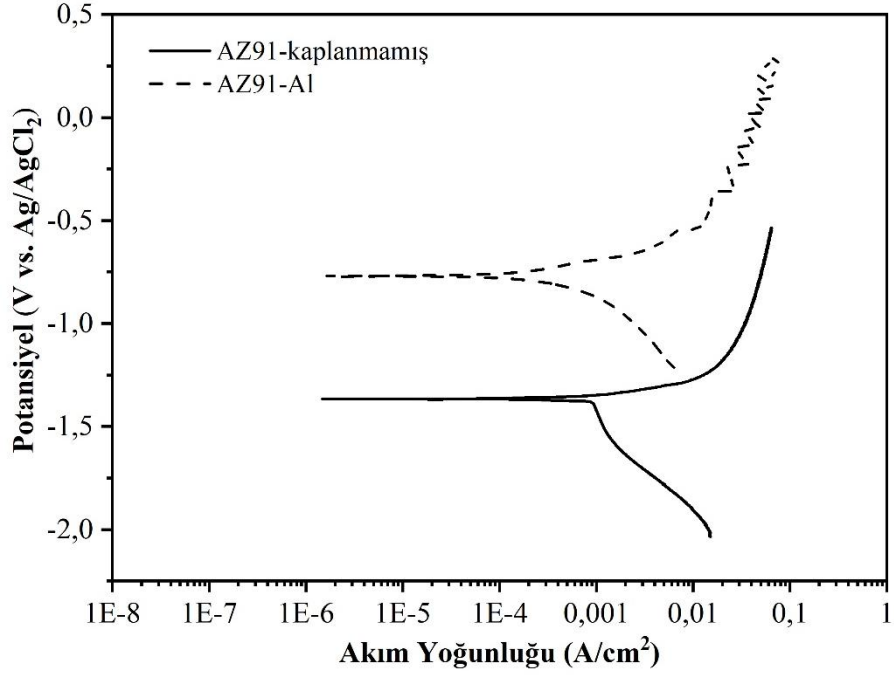
Korozyon eğiliminin saptanmasında gerek duyulan verilerden biri standart elektrot potansiyelidir. Mg elementinin standart elektrot potansiyeli -2,37 V iken, Al elementinin indirgenme potansiyeli -1,66 V’dur (Doruk, 2014). Yani Mg elementinin korozyon eğilimi daha fazladır. Yapılan deneyler sonucunda Al kaplanmış bütün magnezyum alaşımlarının korozyon potansiyellerinin pozitif değerlere doğru kaydığı görülmüştür. Yani alüminyum kaplanmış numunelerin %3,5 NaCl ortamında korozyona uğrama eğilimleri azalmıştır.



Şekil 4.32. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri



Şekil 4.33. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri



Şekil 4.34. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının polarizasyon eğrileri

4.2.4. Elektrik ark sprej kaplama gerilmeli korozyon deneyleri

Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait SSRT deney sonucunda elde edilen bütün veriler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

%3,5 NaCl çözeltisi ve hava ortamlarında alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir. Şekillerde, anotlama yapılan numunelerin SSRT grafiklerinde de gösterilen kaplanmamış numunelere ait %3,5 NaCl çözeltisi ve hava ortamında yapılan SSRT deneylerine ait sonuçlar, kıyaslama yapabilmek için bu grafiklerle birlikte tekrar verilmiştir.

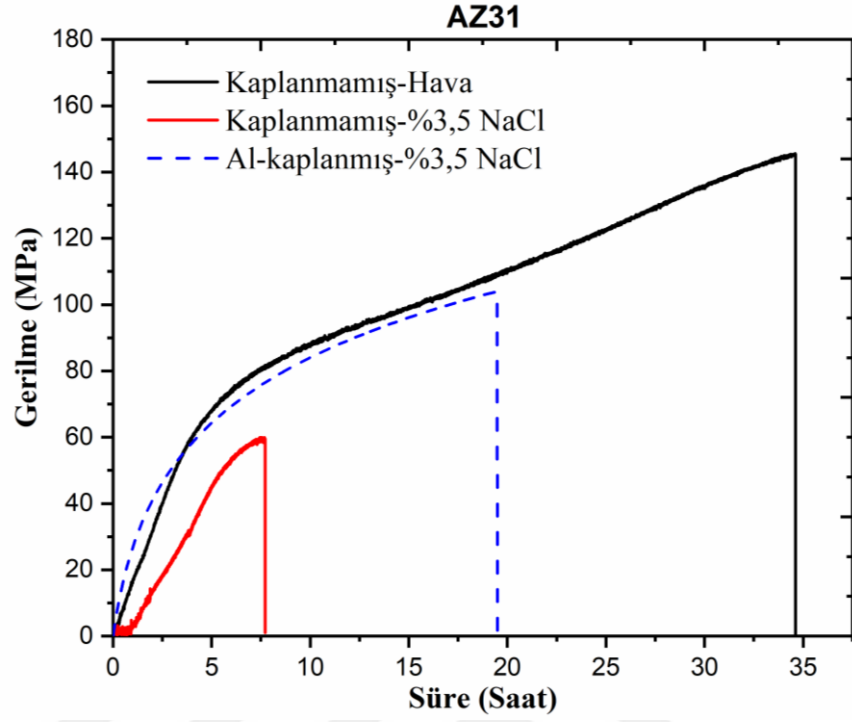
Çizelge 4.2. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deney sonuçları

Numune	Yüzey / Ortam	Kırılma Süresi (Saat)	Isc	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
AZ31	Kaplanmamış / Hava	34,6		146,9	41,5
	Kaplanmamış / %3,5 NaCl	7,7	0,777	58,7	9,3
	Al-Kaplanmış / %3,5 NaCl	19,5	0,437	104,0	23,4
AZ61	Kaplanmamış / Hava	56,4		184,7	67,7
	Kaplanmamış / %3,5 NaCl	15,7	0,722	115,9	18,9
	Al-Kaplanmış / %3,5 NaCl	26,9	0,522	165,8	32,3
AZ91	Kaplanmamış / Hava	13,0		144,8	15,6
	Kaplanmamış / %3,5 NaCl	6,8	0,478	87,6	8,2
	Al-Kaplanmış / %3,5 NaCl	8,2	0,376	133,4	9,8

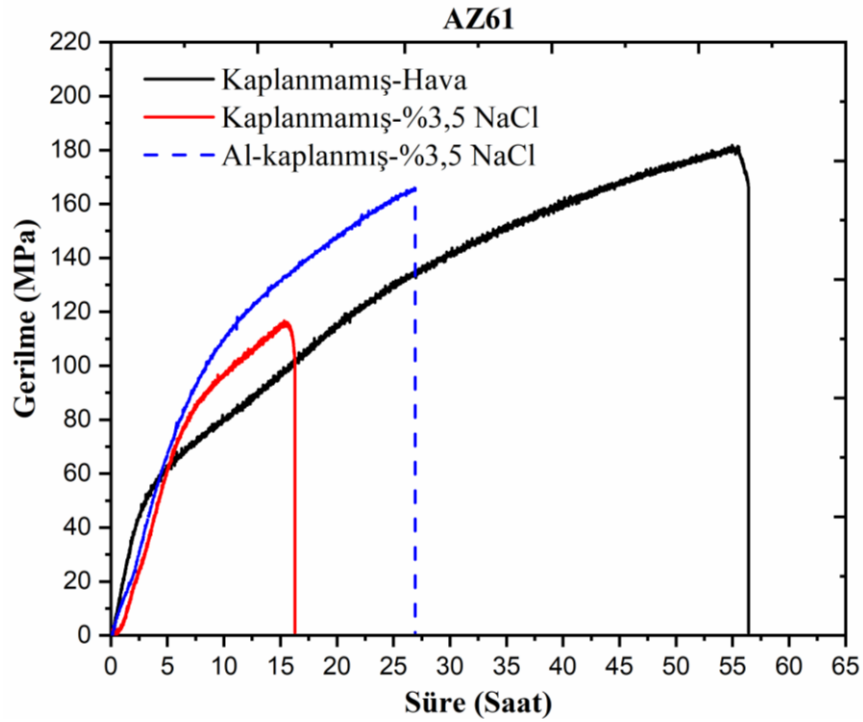
Şekil 4.35'teki kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımı numunelerin SSRT deney sonuçları incelendiğinde, hava ve %3,5 NaCl ortamlarında kırılma süreleri sırasıyla 34,6 saat ve 7,7 saat, alüminyum kaplanmış numunenin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süresi ise 19,5 saat olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.36'daki kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ61 magnezyum alaşımı numunelerin SSRT deney sonuçları incelendiğinde, hava ve %3,5 NaCl ortamlarında kırılma süreleri sırasıyla 56,4 saat ve 15,7 saat, alüminyum kaplanmış numunenin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süresi ise 26,9 saat olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.37'deki kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımı numunelerin SSRT deney sonuçları incelendiğinde, hava ve %3,5 NaCl ortamlarında kırılma süreleri sırasıyla 13 saat ve 6,8 saat, alüminyum kaplanmış numunenin %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma süresi ise 8,2 saat olarak ölçülmüştür.

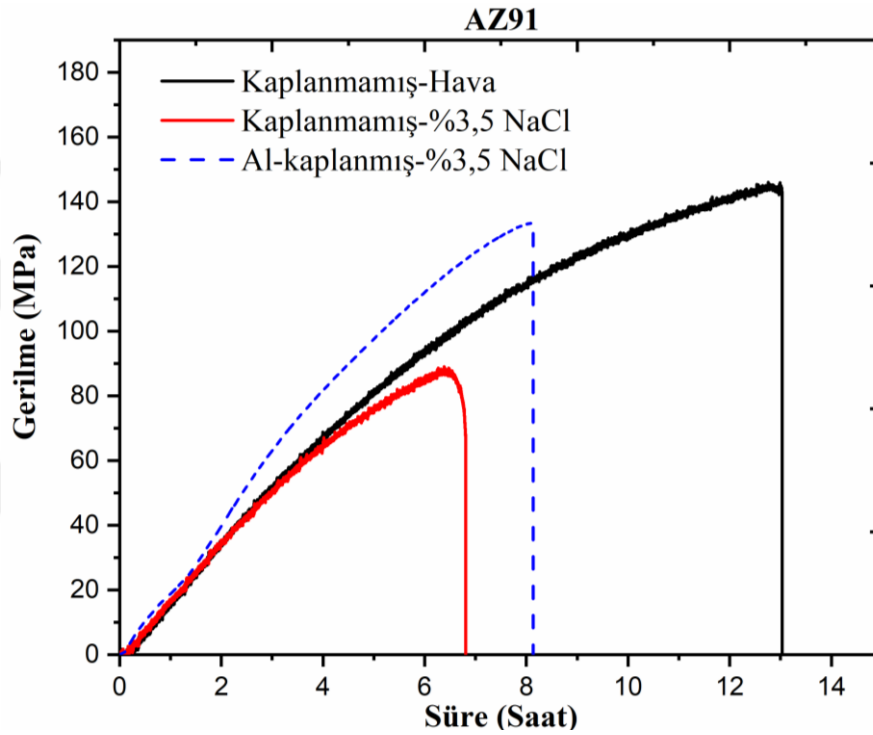


Şekil 4.35. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları



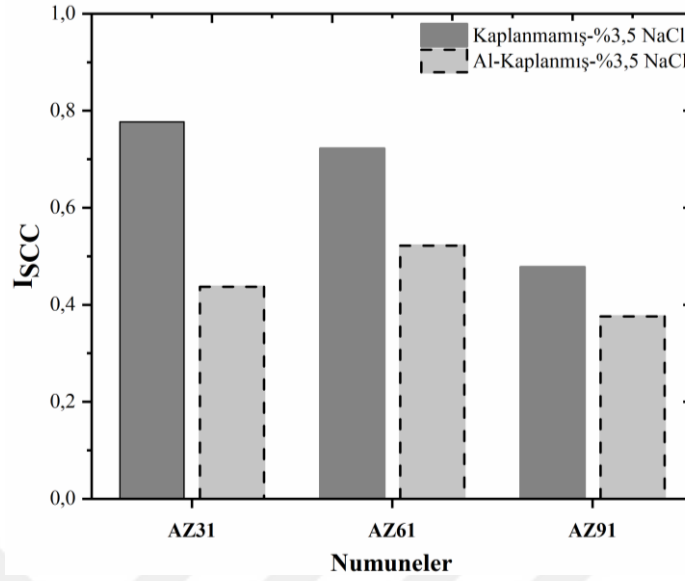
Şekil 4.36. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ61 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, %3,5 NaCl çözeltisinde alüminyum kaplama işleminin AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma sürelerini kaplanmamış numunelere göre sırasıyla %152,3, %71,3 ve %20,6 artırdığı görülmektedir. Diğer bir deyişle alüminyum kaplama işlemi her üç magnezyum alaşımında da gerilmeli korozyon direncini iyileştirmiştir.



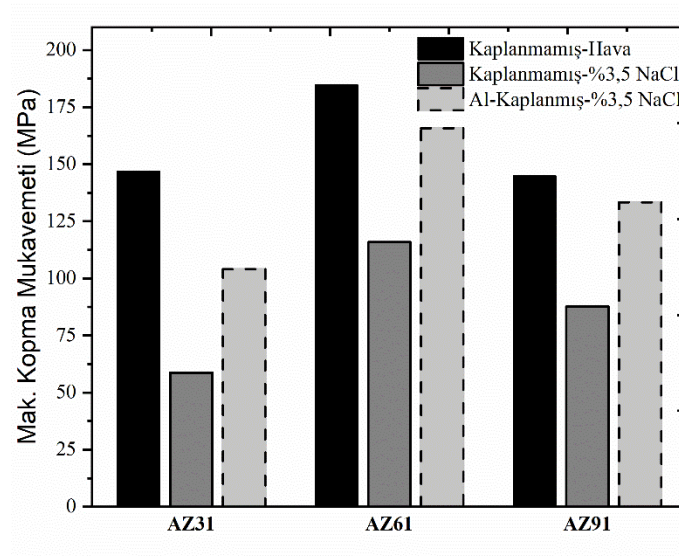
Şekil 4.37. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT sonuçları

Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait gerilmeli korozyon indeksi değerleri Denklem 3.1'e göre hesaplanmış ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Gerilmeli korozyon indeksi değerlerine bakıldığında alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımların I_{SCC} değerleri sırasıyla 0,437, 0,522 ve 0,376 olarak hesaplanmıştır. Alüminyum kaplanmış her üç alaşımda da gerilmeli korozyon indekslerinin kaplamasız numunelere göre azaldığı; alüminyum kaplama işlemi ile gerilmeli korozyon dirençlerinin arttığı görülmüştür.

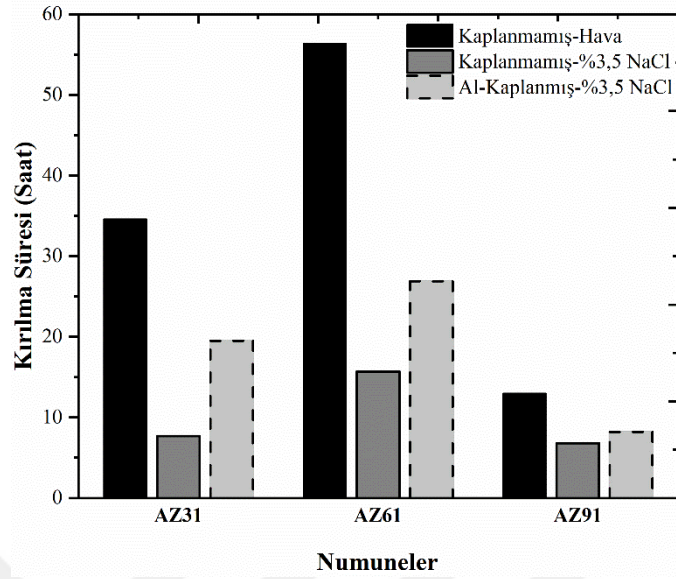


Şekil 4.38. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri

Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait maksimum kopma mukavemeti değerleri ve kırılma süreleri sırasıyla Şekil 4.39 ve 4.40'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde alüminyum kaplama işleminin her üç alaşımında hem maksimum kopma mukavemeti değerlerini hem de kırılma sürelerini kaplanmamış numuneye göre oldukça artırdığı görülmektedir.



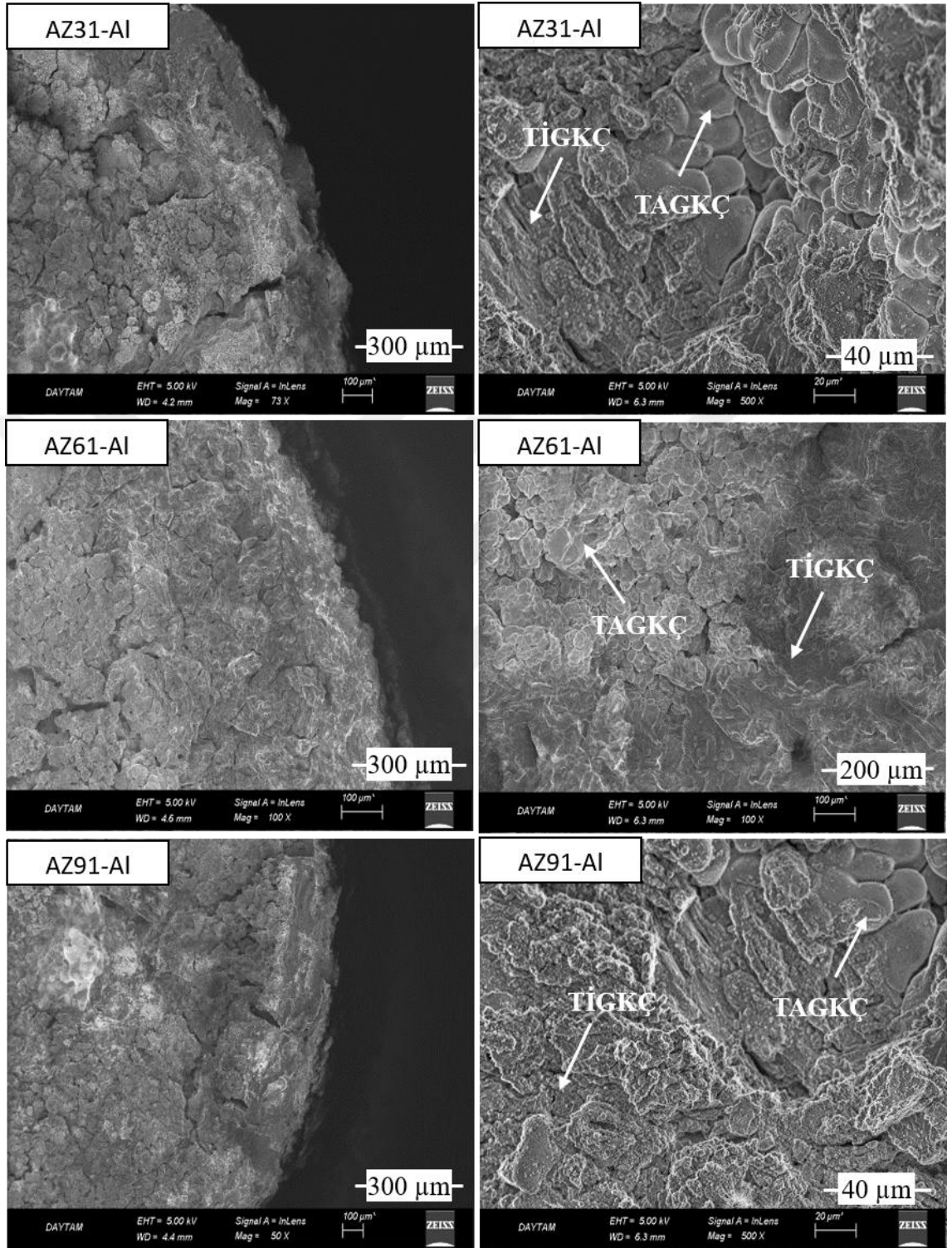
Şekil 4.39. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının maksimum kopma mukavemeti değerleri



Şekil 4.40. Kaplanmamış ve alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri

4.2.5. Elektrik ark sprej kaplama numunelerine ait kırılma görüntüleri

Elektrik ark sprej kaplama yöntemi ile alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının SSRT deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeyine ait farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.41’de verilmiştir. Görüntülerden anlaşılacağı üzere bütün numunelerde TİGKÇ ve TAGKÇ görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda alüminyum kaplamaların yüzeylere iyi bir şekilde tutunduğu ve herhangi bir ayrılmanın oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 4.40. Alüminyum kaplanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki kırılma yüzey SEM görüntüleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.2. Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına farklı çözeltilerde uygulanan anotlama işleminin ve elektrik ark sprey yöntemi ile alüminyum kaplama işlemlerinin korozyon ve gerilmeli korozyon davranışları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Üç farklı çözeltide yapılan anotlama işlemleri sonucunda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımının yüzeyleri başarılı bir şekilde kaplanmıştır.
- Tüm anotlama işlemlerinde pürüzlü, gözenekli ve yüksek oranda homojen bir kaplama gerçekleştirilmiştir. NaOH çözeltisinde daha küçük çapta gözenekli kaplamalar; silikat ve fosfat temelli çözeltilerde ise daha büyük çapta gözenekli kaplamalar oluşmuştur.
- Silikat ve fosfat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemi sonucunda elde edilen kaplama kalınlıkları daha fazla olmuştur.
- XRD analizleri sonucunda, NaOH ve fosfat temelli çözeltilerde gerçekleştirilen anotlama işlemleri sonucunda elde edilen kaplamalarda MgO fazına rastlanırken, silikat temelli çözeltide elde edilen kaplamalarda MgO fazına ilave olarak Mg₂SiO₄ fazına ait pikler de elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara uyumlu bir şekilde çizgisel EDS analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- %3,5 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde; NaOH çözeltisinde yapılan anotlama işleminin üç alaşımın da korozyon akım yoğunluğunu bir miktar artırdığı ve korozyon potansiyeli değerlerini pozitif yöne doğru yükselttiği tespit edilmiştir. Fosfat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemleri sonucunda üç alaşımda da anodik akım

yoğunluklarının pek değişmediği ve korozyon potansiyeli değerlerinin pozitif yöne doğru bir miktar arttığı görülmüştür. Silikat temelli çözeltide yapılan anotlama işlemi sonucunda ise korozyon akım yoğunluğu değerleri azalmış, korozyon potansiyeli değerleri pozitif yönde artmıştır. Ayrıca anodik akım yoğunlukları ise daha düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır.

- Anotlanmamış magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon indeksleri incelendiğinde en yüksek gerilmeli korozyon indeksi AZ31 magnezyum alaşımında görülürken, en düşük gerilmeli korozyon indeksi AZ91 magnezyum alaşımında görülmüştür. AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direnci en düşük, AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncinin en yüksek olduğu gözlenmiştir. Diğer bir deyişle AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon hassasiyeti en yüksek, AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon hassasiyeti en düşük olarak elde edilmiştir.

- NaOH çözeltisinde yapılan anotlama işlemleri, her üç alaşımda da %3,5 NaCl çözeltisindeki gerilmeli korozyon dirençlerini azaltırken, fosfat ve silikat temelli çözeltilerde yapılan anotlama işlemleri ise belli miktarda artmıştır. En iyi sonuç ise silikat temelli çözeltide elde edilmiştir. Silikat temelli çözeltide gerçekleştirilen anotlama işlemi sonucunda %3,5 NaCl çözeltisindeki AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri anotlanmamış numunelere göre sırasıyla %33,8, %10,2 ve %25 artmıştır.

- SSRT deneyleri sonrasında anotlanmış numunelerin yüzey kırılma görüntülerinde her üç alaşımda da TİGKÇ ve TAGKÇ görülmüştür.

- Elektrik ark sprej kaplama yöntemiyle AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları başarılı bir şekilde alüminyum kaplanmıştır.

- Elektrik ark sprej yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi sonucunda her üç alaşımında taban malzeme yüzeyleri tamamen alüminyum kaplanmış ve XRD analizlerinde Al elementine ait yüksek şiddette pikler elde edilmiştir.

- Elektrik ark sprej kaplama yöntemi ile alüminyum kaplama, üç magnezyum alaşımının da %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon akım yoğunluğu değerlerini bir miktar düşürmüştür. Korozyon potansiyeli değerleri ise üç alaşım için de pozitif yöne doğru kaymıştır. Ayrıca anodik akım yoğunluğu daha düşük akım yoğunluğu değerlerine doğru kaymıştır.

- Her üç alaşımda da %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki gerilmeli korozyon dirençleri elektrik ark sprej yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi sonucunda artmıştır. Alüminyum kaplama işlemi sonucunda %3,5 NaCl çözeltisindeki AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının kırılma süreleri kaplanmamış numuneler göre sırasıyla %152,3, %71,3 ve %20,6 artmıştır.

- SSRT deneyleri sonucunda elde edilen yüzey kırılma görüntülerinde alüminyum kaplanmış tüm numunelerde TİGKÇ ve TAGKÇ görülmüştür.

5.3. Öneriler

Bu çalışmada AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına anotlama işlemi uygulanmıştır. Anotlama işlemleri sonucunda yüzeylerde sert seramik kaplamalar elde edilmiştir. Kaplama yüzeylerinde oluşan gözenekler %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon ve gerilmeli korozyon direncini etkilemektedir. Bu gözeneklerin azaltılması için anodik kaplama yüzeyleri mühürlenebilir. Ayrıca seramik olan bu kaplamanın sertliği ve gevrekliği uygulanacak ısı işlem veya benzeri yöntemlerle azaltılabilir ve böylece daha iyi koruma yapması sağlanabilir.

Elektrik ark sprej kaplama yöntemi ile alüminyum kaplanmış numunelerin AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon ve gerilmeli korozyon direncini iyileştirdiği görülmüştür. Elektrik ark sprej kaplama yöntemi yaygın olarak kullanılmakta olup, diğer termal sprej yöntemlerine göre oldukça ekonomik bir yöntemdir. Korozyon ve gerilmeli korozyon açısından daha fazla iyileştirmenin istenileceği durumlarda soğuk sprej kaplama yöntemleri de kullanılabilir.

Elektrik ark sprej kaplama yöntemi diğer termal sprej kaplama yöntemlerine göre oldukça basit ve ekonomik bir yöntem olması sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle çelik ve alüminyum alaşımlarının tamirinde oldukça etkili bir şekilde kullanılan bu yöntem son yıllarda kullanılan magnezyum alaşımları için de kullanılabilir. Çünkü hem korozyon direncine hem de gerilemeli korozyon direncine katkı sağlamıştır.

Anotlama ve elektrik ark sprej kaplama işlemleri karşılaştırıldığında elektrik ark sprej kaplama yönteminin anotlama yöntemine göre oldukça basit ve kaplama işlemine etki eden parametreler de oldukça azdır. Ayrıca elektrik ark sprej kaplama işlemi ile magnezyum alaşımlarının hem korozyon hem de gerilemeli korozyon direncini oldukça iyileştirdiği görülmektedir. Tüm bu faydalar gözetilerek özellikle endüstriyel çalışmalarda elektrik ark sprej kaplama yöntemi anotlamaya tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- Argade, G. R., Yuan, W., Kandasamy, K., and Mishra, R. S., 2012. Stress corrosion cracking susceptibility of ultrafine grained AZ31. *Journal of Materials Science*, 47/19, 6812–6822.
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M. C., Merino, S., Casajús, P., Mohedano, M., and Rodrigo, P., 2009. Corrosion Behavior of Mg–Al Alloys with Aluminum Thermal Spray Coatings in Humid and Saline Environments. *Corrosion*, 65/12, 817–830.
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M. C., Mohedano, M., Casajús, P., and Merino, S., 2010. Al/SiC thermal spray coatings for corrosion protection of Mg–Al alloys in humid and saline environments. *Surface and Coatings Technology*, 204/16–17, 2767–2774.
- Asgari, M., Aliofkhaezai, M., Darband, G. B., and Rouhaghdam, A. S., 2017. Evaluation of alumina nanoparticles concentration and stirring rate on wear and corrosion behavior of nanocomposite PEO coating on AZ31 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 309, 124–135.
- Atrens, A., Winzer, N., Dietzel, W., Srinivasan, P. B., and Song, G. L., 2011. Stress corrosion cracking (SCC) of magnesium (Mg) alloys. *Corrosion of Magnesium Alloys*.
- Atrens, Andrej, Winzer, N., and Dietzel, W., 2011. Stress Corrosion Cracking of Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 13/1–2, 11–18.
- Avedesian, M., and Baker, H., 1999. *ASM Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*. de Gruyter.com.
- Bala Srinivasan, P., Blawert, C., and Dietzel, W., 2008a. Effect of plasma electrolytic oxidation coating on the stress corrosion cracking behaviour of wrought AZ61 magnesium alloy. *Corrosion Science*, 50/8, 2415–2418.
- Bala Srinivasan, P., Blawert, C., and Dietzel, W., 2008b. Effect of plasma electrolytic oxidation treatment on the corrosion and stress corrosion cracking behaviour of AM50 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 494/1–2, 401–406.
- Bala Srinivasan, P., Liang, J., Blawert, C., and Dietzel, W., 2011. Environmentally assisted cracking behaviour of plasma electrolytic oxidation coated AZ31 magnesium alloy. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 46/6, 706–711.
- Blawert, C., Dietzel, W., Ghali, E., and Song, G., 2006. Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments. *Advanced Engineering Materials*.
- Bobby Kannan, M., Dietzel, W., Blawert, C., Atrens, A., and Lyon, P., 2008. Stress corrosion cracking of rare-earth containing magnesium alloys ZE41, QE22 and Elektron 21 (EV31A) compared with AZ80. *Materials Science and Engineering: A*, 480/1–2, 529–539.
- Bobby Kannan, M., and Singh Raman, R. K., 2008. Evaluating the stress corrosion cracking susceptibility of Mg–Al–Zn alloy in modified-simulated body fluid for orthopaedic implant application. *Scripta Materialia*, 59/2, 175–178.

- Brown, B. F., 1968. The application of fracture mechanics to stress-corrosion cracking. *Metallurgical Reviews*, 13/1, 171–183.
- Casajús, P., and Winzer, N., 2014. Intergranular stress corrosion crack propagation in hot-rolled AZ31 Mg alloy sheet. *Materials Science and Engineering: A*, 602, 58–67.
- Ceschini, L., Morri, A., Angelini, V., and Messieri, S., 2017. Fatigue Behavior of the Rare Earth Rich EV31A Mg Alloy: Influence of Plasma Electrolytic Oxidation. *Metals*, 7/6, 212.
- Chai, L., Yu, X., Yang, Z., Wang, Y., and Okido, M., 2008. Anodizing of magnesium alloy AZ31 in alkaline solutions with silicate under continuous sparking. *Corrosion Science*.
- Chen, J., Ai, M., Wang, J., Han, E.-H., and Ke, W., 2009. Stress corrosion cracking behaviors of AZ91 magnesium alloy in deicer solutions using constant load. *Materials Science and Engineering: A*, 515/1–2, 79–84.
- Chen, J., Wang, J.-Q., Han, E.-H., Ke, W., and Shoesmith, D. W., 2016. Effect of Hydrogen on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of AZ91 Alloy in Aqueous Solutions. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29/1, 1–7.
- Chiu, L.-H., Chen, C.-C., and Yang, C.-F., 2005. Improvement of corrosion properties in an aluminum-sprayed AZ31 magnesium alloy by a post-hot pressing and anodizing treatment. *Surface and Coatings Technology*, 191/2–3, 181–187.
- Dayani, S. B., Shaha, S. K., Ghelichi, R., Wang, J. F., and Jahed, H., 2018. The impact of AA7075 cold spray coating on the fatigue life of AZ31B cast alloy. *Surface and Coatings Technology*.
- Dietzel, W., 2000. Standardization of Rising Load/Rising Displacement SCC Testing. *Environmentally Assisted Cracking: Predictive Methods for Risk Assessment and Evaluation of Materials, Equipment, and Structures* (pp. 317-317–10). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. ASTM International.
- Dietzel, W., Klapkiv, M., Nykyforchyn, H., Posuvailo, V., and Blawert, C., 2004. Porosity and Corrosion Properties of Electrolyte Plasma Coatings on Magnesium Alloys. *Materials Science*, 40/5, 585–590.
- Doruk, M., 2014. *Metalik Malzemeler ve Korozyon*. Ankara: Korozyon Derneği.
- Durdu, S., Aytaç, A., and Usta, M., 2011. Characterization and corrosion behavior of ceramic coating on magnesium by micro-arc oxidation. *Journal of Alloys and Compounds*, 509/34, 8601–8606.
- Durdu, S., Bayramoğlu, S., Demirtaş, A., Usta, M., and Üçışık, A. H., 2013. Characterization of AZ31 Mg Alloy coated by plasma electrolytic oxidation. *Vacuum*, 88, 130–133.
- Durdu, S., and Usta, M., 2012. Characterization and mechanical properties of coatings on magnesium by micro arc oxidation. *Applied Surface Science*, 261, 774–782.
- Eskin, D. G., 2014. *Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals*. CRC Press.
- Fontana, M. G., 1986. *Corrosion Engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill. New York.
- Friedrich, Horst E. and Mordike, B. L., 2012. *Magnesium Technology-Metallurgy, Design Data, Applications*. Springer, Berlin.
- Fukuda, H., and Matsumoto, Y., 2004. Effects of Na₂SiO₃ on anodization of Mg–Al–Zn alloy in 3 M KOH solution. *Corrosion Science*, 46/9, 2135–2142.

- Ge, M.-Z., Xiang, J.-Y., Yang, L., and Wang, J. T., 2017. Effect of laser shock peening on the stress corrosion cracking of AZ31B magnesium alloy in a simulated body fluid. *Surface and Coatings Technology*, 310, 157–165.
- Ghali, E., 2000. Corrosion and Protection of Magnesium Alloys. *Materials Science Forum*, 350–351, 261–272.
- Ghali, E., 2010a. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing*.
- Ghali, E., 2010b. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys*. Wiley Publication. Canada, USA.
- Gray, J. E., and Luan, B., 2002. Protective coatings on magnesium and its alloys - A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*.
- He, X., Yan, Z., Liang, H., and Wei, Y., 2017. Study on Corrosion and Stress Corrosion Cracking Behaviors of AZ31 Alloy in Sodium Sulfate Solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26/5, 2226–2236.
- Huang, L., Wang, K., Wang, W., Yuan, J., Qiao, K., Yang, T., Peng, P., and Li, T., 2018. Effects of grain size and texture on stress corrosion cracking of friction stir processed AZ80 magnesium alloy. *Engineering Failure Analysis*.
- Jafari, S., Raman, R. K. S., and Davies, C. H. J., 2018. Stress corrosion cracking of an extruded magnesium alloy (ZK21) in a simulated body fluid. *Engineering Fracture Mechanics*.
- Jiang, J., Xie, Q., Qiang, M., Ma, A., Taylor, E. K., Li, Y., Song, D., and Chen, J., 2019. Stress corrosion cracking behaviors of RE-containing ME21 magnesium alloy processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Rare Earths*.
- Jones, D. A., 1993. Principles and prevention of corrosion. *Materials & Design*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Jones, R. H., Vetrano, J. S., and Windisch, C. F., 2004. Stress Corrosion Cracking of Al-Mg and Mg-Al Alloys. *Corrosion*, 60/12, 1144–1154.
- Kappes, M., Iannuzzi, M., and Carranza, R. M., 2014. Pre-Exposure Embrittlement and Stress Corrosion Cracking of Magnesium Alloy AZ31B in Chloride Solutions. *Corrosion*, 70/7, 667–677.
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., Payer, J., 2016. International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE International. Canada.
- Kumar, D. S., Sasanka, C. T., Ravindra, K., and Suman, K. N. S., 2015. Magnesium and Its Alloys in Automotive Applications – A Review. *American Journal of Materials Science and Technology*.
- Lee, Y., Choi, H., Ahn, S., Lee, C., and Kim, S., 2018. Resistance to Stress Corrosion Cracking of High-Strength 7xxx Series Aluminum Alloys in 3.5% NaCl Solution. *Korean Journal of Metals and Materials*, 56/10, 708–717.
- Li, Y., Zhou, Y., Shi, Z., Venezuela, J., Soltan, A., and Atrens, A., 2018. Stress corrosion cracking of EV31A in 0.1 M Na₂SO₄ saturated with Mg(OH)₂. *Journal of Magnesium and Alloys*.
- Ma, S., 2018. Microstructure and Corrosion Properties of ZK60 Alloys Modified by Micro-Arc Oxidation Coatings Using Phosphate- Borate Electrolyte in KOH Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 6451–6461.

- Makar, G. L., and Kruger, J., 1993. Corrosion of magnesium. *International Materials Reviews*, 38.3, 138-153.
- Meletis, E. I., and Hochman, R. F., 1984. Crystallography of Stress Corrosion Cracking in Pure Magnesium. *Corrosion*, 40/1, 39–45.
- Mizutani, Y., Kim, S. J., Ichino, R., and Okido, M., 2003b. Anodizing of Mg alloys in alkaline solutions. *Surface and Coatings Technology*, 169–170, 143–146.
- Moon, S., Jeong, Y., 2009. Generation mechanism of microdischarges during plasma electrolytic oxidation of Al in aqueous solutions. *Corrosion Science*.
- Nasiri Vatan, H., Ebrahimi-kahrizsangi, R., and Kasiri-asgarani, M., 2016. Structural, tribological and electrochemical behavior of SiC nanocomposite oxide coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ31 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 241–255.
- Padekar, B. S., Raja, V. S., Raman, R. K. S., and Lyon, P., 2013. Stress corrosion cracking behavior of magnesium alloys EV31A and AZ91E. *Materials Science and Engineering: A*, 583, 169–176.
- Pardo, A., Casajús, P., Mohedano, M., Coy, A. E., Viejo, F., Torres, B., and Matykina, E., 2009. Corrosion protection of Mg/Al alloys by thermal sprayed aluminium coatings. *Applied Surface Science*, 255/15, 6968–6977.
- Pardo, A., Merino, M. C., Casajús, P., Mohedano, M., Arrabal, R., and Matykina, E., 2009. Corrosion behaviour of Mg–Al alloys with Al–11Si thermal spray coatings. *Materials and Corrosion*, 60/12, 939–948.
- Parkins, R. N., Mazza, F., Royuelat, J. J., and Scully, J. C., 1972. Stress Corrosion Test Methods. *British Corrosion Journal*, 7/4, 154–167.
- Pawłowski, L., 2008. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (Second Edi)*. John Wiley&Sons, Ltd., England.
- Peixoto Barbosa, D., and Knörnschild, G., 2009. Anodization of Mg-alloy AZ91 in NaOH solutions. *Surface and Coatings Technology*, 203/12, 1629–1636.
- Pietro Pedferri, 2018. *Corrosion Science and Engineering*. (L. L. and M. Pedferri, Ed.). Springer, Milan, Italy.
- Popov, B. N., 2015. *Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems*. Massachusetts: Elsevier.
- Pourbaix, M., 1974. Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice. *Corrosion Science*, 14/1, 25–82.
- Prabhu, D. B., Dhamotharan, S., Sathishkumar, G., Gopalakrishnan, P., and Ravi, K. R., 2018. Stress corrosion cracking of biodegradable Mg-4Zn alloy in simulated body fluid at different strain rates – A fractographic investigation. *Materials Science and Engineering A*.
- Raja, V. S., and Shoji, T., 2011. *Stress corrosion cracking Theory and practice*. Woodhead Publishing Limited Cambridge, UK.
- Shaw, B. A., 2003. Corrosion Resistance of Magnesium Alloys. *ASM Handbook, Volume 13A Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection* (pp. 692–696). ASM International, Ohio.
- Shi, Z., Kim, W. J., Cao, F., Dargusch, M. S., and Atrens, A., 2015. Stress corrosion cracking of high-strength AZ31 processed by high-ratio differential speed rolling. *Journal of Magnesium and Alloys*, 3/4, 271–282.

- Shi, Z., Song, G., and Atrens, A., 2005. Influence of the β phase on the corrosion performance of anodised coatings on magnesium-aluminium alloys. *Corrosion Science*.
- Shi, Z., Song, G., and Atrens, A., 2006a. Influence of anodising current on the corrosion resistance of anodised AZ91D magnesium alloy. *Corrosion Science*.
- Shi, Z., Song, G., and Atrens, A., 2006b. The corrosion performance of anodised magnesium alloys. *Corrosion Science*.
- Song, G.-L., and Shi, Z., 2011. Anodization and corrosion of magnesium (Mg) alloys. Guangling Song (Ed.), *Corrosion of Magnesium Alloys* (pp. 565–614). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Song, G.-L., and Shi, Z., 2013. Anodization and corrosion of Mg alloys. G.-L. Song (Ed.), *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys* (pp. 232–276). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Song, G. L., 2011. *Corrosion of magnesium alloys*. *Corrosion of Magnesium Alloys*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Song, G., Shen, Q. X., and Zhu, M. L., 2011. A novel method for the preparation of Al-Mg intermetallic coating. *Materials Letters*, 65/3, 480–482.
- Song, Guangling, and Atrens, A., 2003. Understanding magnesium corrosion. A framework for improved alloy performance. *Advanced Engineering Materials*.
- Song, Guangling, Atrens, A., Wu, X., and Zhang, B., 1998. Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride. *Corrosion Science*.
- Song, Y., Wang, Z., Liu, Y., Yang, M., and Qu, Q., 2017. Influence of Erbium, Cerium on the Stress Corrosion Cracking Behavior of AZ91 Alloy in Humid Atmosphere. *Advanced Engineering Materials*, 19/7, 1700021.
- Srinivasan, P. B., Blawert, C., Dietzel, W., and Kainer, K. U., 2008. Stress corrosion cracking behaviour of a surface-modified magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 59/1, 43–46.
- Srinivasan, P. B., Riekehr, S., Blawert, C., Dietzel, W., and Koçak, M., 2009. Slow strain rate stress corrosion cracking behaviour of as-welded and plasma electrolytic oxidation treated AZ31HP magnesium alloy autogenous laser beam weldment. *Materials Science and Engineering: A*, 517/1–2, 197–203.
- Srinivasan, P. B., Riekehr, S., Blawert, C., Dietzel, W., and Koçak, M., 2011. Mechanical properties and stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy laser weldments. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21/1, 1–8.
- Stampella, R. S., Procter, R. P. M., and Ashworth, V., 1984. Environmentally-induced cracking of magnesium. *Corrosion Science*.
- Uematsu, Y., Kakiuchi, T., and Nakajima, M., 2012. Stress corrosion cracking behavior of the wrought magnesium alloy AZ31 under controlled cathodic potentials. *Materials Science and Engineering: A*, 531, 171–177.
- Ura-Bińczyk, E., Morończyk, B., Kuroda, S., Araki, H., Jaroszewicz, J., and Molak, R. M., 2019. Corrosion Resistance of Aluminum Coatings Deposited by Warm Spraying on AZ91E Magnesium Alloy. *Corrosion*, 75/6, 668–679.
- Wang, J., Chen, J., Han, E., and Ke, W., 2008. Investigation of Stress Corrosion Cracking Behaviors of an AZ91 Magnesium Alloy in 0.1 kmol/m³ Na₂SO₄ Solution Using Slow Strain Rate Test. *Materials Transactions*, 49/5, 1052–1056.
- Wanhill, R. J. H., 1975. Aqueous Stress Corrosion in Titanium Alloys. *British Corrosion Journal*, 10/2, 69–78.

- Wei, Z. S., Liu, L., and Ding, W. J., 2005. Al Arc Spray Coating on AZ31 Mg Alloy and Its Corrosion Behavior. *Materials Science Forum*, 488–489, 685–688.
- Winzer, N., Atrens, A., Dietzel, W., Song, G., and Kainer, K. U., 2007. Stress corrosion cracking in magnesium alloys: Characterization and prevention. *JOM*.
- Winzer, N., Atrens, A., Dietzel, W., Song, G., and Kainer, K. U., 2008. Comparison of the linearly increasing stress test and the constant extension rate test in the evaluation of transgranular stress corrosion cracking of magnesium. *Materials Science and Engineering A*.
- Winzer, N., Atrens, A., Song, G., Ghali, E., Dietzel, W., Kainer, K. U., Hort, N., and Blawert, C., 2005. A Critical Review of the Stress Corrosion Cracking (SCC) of Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 7/8, 659–693.
- Winzer, Nicholas, Atrens, A., Song, G., Ghali, E., Dietzel, W., Kainer, K. U., Hort, N., and Blawert, C., 2005. A critical review of the Stress Corrosion Cracking (SCC) of magnesium alloys. *Advanced Engineering Materials*.
- Woodtli, J., and Kieselbach, R., 2000. Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 7/6, 427–450.
- Xie, Q., Ma, A., Jiang, J., Cheng, Z., Song, D., Yuan, Y., and Liu, H., 2017. Stress Corrosion Cracking Behavior of Fine-Grained AZ61 Magnesium Alloys Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Metals*, 7/9, 343.
- Xue, Y., Pang, X., Jiang, B., and Jahed, H., 2019. Corrosion and corrosion fatigue performances of micro-arc oxidation coating on AZ31B cast magnesium alloy. *Materials and Corrosion*, 70/2, 268–280.
- Yin, Z., Liu, F., Song, D., He, S., Lin, J., and Yu, F., 2018. Stress Corrosion Cracking of a Forged Mg-Al-Zn Alloy with Different Surface Conditions. *Journal of Chemistry*, 2018, 1–8.
- Yuasa, M., Yukutake, E., Huang, X., Suzuki, K., Saito, N., and Chino, Y., 2017. Stress Corrosion Cracking and Corrosion Resistance of Mg–6%Al–1%Zn–2%Ca Extruded Magnesium Alloys. *Materials Transactions*, 58/9, 1257–1263.
- Zhou, L. F., Liu, Z. Y., Wu, W., Li, X. G., Du, C. W., and Jiang, B., 2017. Stress corrosion cracking behavior of ZK60 magnesium alloy under different conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42/41, 26162–26174.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı zamanda çift anadal programıyla 2007 yılında başladığı İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden ise 2012 yılında mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans öğreniminin 2013 yılında mezun oldu.

2010 yılından beri Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.