



**ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA YÖNTEMİ VE
ANOTLAMA İŞLEMLERİNİN ALÜMİNYUM VE
ÇİNKO ESASLI MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ
KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İdris DURNA

Danışman: Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MEKANİK BİLİM DALI

**ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA YÖNTEMİ VE ANOTLAMA İŞLEMLERİNİN
ALÜMİNYUM VE ÇİNKO ESASLI MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

(The Effect of Electric Arc Spray Coating Method and Anodizing Process on Corrosion
Properties of Aluminum and Zinc Based Magnesium Alloys)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İdris DURNA

Danışman: Prof. Dr. Hikmet ALTUN
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

Erzurum
Ocak, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA YÖNTEMİ VE ANOTLAMA İŞLEMLERİNİN
ALÜMİNYUM VE ÇİNKO ESASLI MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Prof. Dr. Hikmet ALTUN danışmanlığında, İdris DURNA tarafından hazırlanan bu çalışma, 04/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yaşar TOTİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Danışman:	Prof. Dr. Hikmet ALTUN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mehmet KARAKAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih YILDIZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.

Enstitü Yönetim
Kurulunun
tarih ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır.

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.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Hikmet ALTUN* danışmanlığında sunulan “Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi ve Anotlama İşlemlerinin Alüminyum ve Çinko Esaslı Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Özelliklerine Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	12	30
Kuramsal Temeller	12	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Bulgular	1	20
Tartışma	2	20
Tezin Geneli	9	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
İdris DURNA	Prof. Dr. Hikmet ALTUN
07.01.2022	07.01.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında katkıları olan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım başta danışman hocam Prof. Dr. Hikmet ALTUN olmak üzere yardımcı danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım esnasında yardımları ve emekleri için başta Prof. Dr. Yaşar TOTİK olmak üzere Arş. Gör. Dr. Taha Çağrı ŞENOCAK ve Arş. Gör. Taha Alper YILMAZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

İdris DURNA



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ARK SPREY KAPLAMA YÖNTEMİ VE ANOTLAMA İŞLEMLERİNİN ALÜMİNYUM VE ÇİNKO ESASLI MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İdris DURNA

Danışman: Prof. Dr. Hikmet ALTUN

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

Amaç: Bu çalışmada, AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına elektrik ark spreycaplama ve anotlama işlemi ile kaplama yapılarak, bu alaşımların korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ilk olarak elektrik ark spreycaplama yöntemi ile saf alüminyum kaplanmış, daha sonra silikat esaslı çözeltide alüminyum kaplama üzerine anotlama işlemi ile yeni bir kaplama üretilmiştir. Kaplamaların yapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji yayımlı X-ışını analizi (EDS) ve X-ışını kırınım (XRD) cihazları ile incelenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon yöntemi kullanılarak %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde korozyon deneyleri yapılmıştır.

Bulgular: XRD analizlerine göre alüminyum kaplanmış numunelerde çok miktarda alüminyum piklerine rastlanmış, anotlama işlemi sonrasında ise Al_2O_3 fazına rastlanmıştır. XRD sonuçları EDS analiz sonuçları ile uyumluluk göstermiştir. Al kaplamaların SEM kesit görüntüleri incelendiğinde tüm numuneler için kaplama kalınlıkları yaklaşık 350-400 μm civarında ölçülmüştür. Anotlama işlemine ait SEM görüntüleri incelendiğinde ise kaplama yapısının kompakt, homojen ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve kaplama kalınlığının yaklaşık 70-75 μm civarında olduğu belirlenmiştir. Korozyon deneyleri sonucunda, yapılan kaplamaların tüm numunelerde korozyon potansiyel değerlerini pozitif değerlere doğru artırdığı gözlemlenmiştir. AZ31 ve AZ61 magnezyum alaşımlarına yapılan kaplamaların korozyon akım yoğunluğunu belli miktarda düşürdüğü tespit edilmişken, AZ91 magnezyum alaşımına yapılan kaplamalar korozyon akım yoğunluğunu belli miktarda artırmıştır.

Sonuç: Yapılan kaplamaların AZ31 ve AZ61 magnezyum alaşımlarının korozyon dirençlerini belli bir miktar iyileştirdiği, ancak AZ91 alaşımında ise kaplama yapılmayan numuneye göre daha kötü korozyon direncine neden olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum kaplamalar arasında taban malzemeye göre korozyon akım yoğunluğunda en fazla azalma AZ61 magnezyum alaşımında görülmüştür. Anotlama işlemiyle yapılan kaplamalar arasında ise taban malzemeye göre korozyon akım yoğunluğunda en fazla azalma AZ31 magnezyum alaşımında görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrik ark spreycaplama, anotlama, magnezyum alaşımları, korozyon

Aralık 2021, 70 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

THE EFFECT OF ELECTRIC ARC SPRAY COATING METHOD AND ANODIZING PROCESS ON CORROSION PROPERTIES OF ALUMINUM AND ZINC BASED MAGNESIUM ALLOYS

İdris DURNA

Supervisor: Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Co-supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

Purpose: In this study, it was aimed to improve the corrosion resistance of AZ31, AZ61 and AZ91 magnesium alloys by coating with electric arc spray coating method and anodizing process.

Method: Pure aluminum was first coated with electric arc spray coating method on AZ31, AZ61 and AZ91 magnesium alloys, and then a new coating was produced by anodizing on the aluminum coating in silicate-based solution. The structural properties of the coatings were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray analysis (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Corrosion tests were carried out in 3,5% NaCl solution using the potentiodynamic polarization method.

Findings: According to the XRD analysis, a large amount of aluminum peaks were found in the aluminum coated samples, and Al_2O_3 phase was also found after the anodizing process. The XRD results were consistent with the EDS analysis results. When the SEM cross-section images of the Al coatings were examined, the coating thicknesses were measured around 350-400 μm for all samples. According to the SEM images of the anodizing process, the coating structure was compact, homogeneous and porous, and the coating thickness was around 70-75 μm . As a result of corrosion experiments, it was observed that the coatings increased the corrosion potential values towards positive values in all samples. It was determined that the coatings made on AZ31 and AZ61 magnesium alloys decreased the corrosion current density to a certain extent, while the coatings on AZ91 magnesium alloy increased the corrosion current density by a certain amount.

Results: It was determined that the coatings made improved the corrosion resistance of AZ31 and AZ61 magnesium alloys to a certain extent, but it caused worse corrosion resistance in the AZ91 alloy than the uncoated sample. Among the aluminum coatings, the highest decrease in corrosion current density was observed in AZ61 magnesium alloy compared to the base material. Among the coatings made with the anodizing process, the highest decrease in corrosion current density was observed in the AZ31 magnesium alloy compared to the base material.

Keywords: Electric arc spray coating, anodizing, magnesium alloys, corrosion

December 2021, 70 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	7
Korozyon	7
Korozyonun Elektrokimyasal Mekanizması	8
Korozyon Türleri	12
Magnezyum ve Alaşımları.....	14
Magnezyum Alaşımlarında Korozyon.....	17
Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi	20
Anotlama İşlemi	23
MATERYAL VE METOT	33
Elektrik Ark Sprey Kaplama İşlemi	33
Anotlama İşlemi	34
XRD Analizleri.....	35
SEM Analizleri	35
Korozyon Deneyleri	36
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
Elektrik Ark Sprey Kaplama İşlemi	37
Anotlama İşlemi	37
Kaplama ların XRD Analizleri	38
Kaplama ların SEM-EDS Analizleri	40
Korozyon Deneyleri	48
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Havacılıkta kullanılan bazı magnezyum alaşımlarının, bu alanda kullanılan diğer alaşımlarla karşılaştırılması	3
Tablo 2. Mg ve Al elementlerinin bazı fiziksel özellikleri	15
Tablo 3. ASTM standartlarında magnezyum alaşımlarının gösterimi.....	16
Tablo 4. Bazı alaşım elementlerinin magnezyum alaşımları üzerindeki etkileri.....	16
Tablo 5. Bazı döküm ve dövme magnezyum alaşımları.....	17
Tablo 6. Yaygın olarak kullanılan metal ve alaşımların %3-6 NaCl çözeltisindeki korozyon potansiyelleri	18
Tablo 7. Elektrik ark sprej kaplama işleminde kullanılan bazı elektrotlar ve püskürtme hızları	21
Tablo 8. Magnezyum alaşımlarına farklı elektrolitlerde uygulanan anotlama işlemi ve elektrokimyasal korozyon parametreleri	26
Tablo 9. Elektrik ark sprej kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış alaşımlara ait numunelerin gösterimi.....	35
Tablo 10. Numunelerin korozyon deneyine ait sonuçlar	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çeşitli alaşım elementlerinin ilavesiyle, magnezyum elementinin bazı mekanik özelliklerindeki gelişim	1
Şekil 2. Magnezyum alaşımlarından imal edilmiş ve havacılıkta kullanılan bazı ekipmanlar ..	3
Şekil 3. Magnezyum alaşımlarından yapılmış bazı otomotiv bileşenleri.....	5
Şekil 4. Korozyon oluşumunun şematik gösterimi	7
Şekil 5. Kuru pil düzeneği	8
Şekil 6. Çinkonun HCl çözeltisinde çözünmesi	9
Şekil 7. Metallerde korozyon olayının elektrokimyasal mekanizması.....	10
Şekil 8. Artan yüzey potansiyeli ile korozyon hızının artışı gösteren grafik	11
Şekil 9. Kritik potansiyel değeri E_p 'nin üzerindeki oksitleyici potansiyelerde pasifleşme	12
Şekil 10. Korozyon türleri	13
Şekil 11. Mg ve Al elementlerinin bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	15
Şekil 12. Galvanik korozyon a) iç galvanik korozyon b) dış galvanik korozyon	19
Şekil 13. Elektrik ark spreyci kaplama yönteminin şematik görüntüsü	21
Şekil 14. Anotlama işleminde Mg yüzey filminin şematik akım-voltaj grafiği.....	24
Şekil 15. Anotlama işleminin genel adımları	24
Şekil 16. Magnezyum alaşımlarında anotlama işleminin şematik mekanizması	25
Şekil 17. AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık)	33
Şekil 18. Elektrik ark spreyci kaplama sistem ünitesi.....	33
Şekil 19. Anotlama işleminde kullanılan deney düzeneğinin şematik görüntüsü	34
Şekil 20. VersaSTAT 3 potansiyostat cihazı ve korozyon hücresi	36
Şekil 21. Elektrik ark spreyci kaplama yöntemiyle Al kaplanan numunelerin yüzey görünüşleri	37
Şekil 22. Anotlama işlemi sonrası numunelerin yüzey görünüşleri	37
Şekil 23. Anotlama işlemlerine ait voltaj-zaman grafiği.....	38
Şekil 24. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ31 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği	39

Şekil 25. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ61 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği	39
Şekil 26. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ91 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği	40
Şekil 27. AZ31-Al numunesine ait SEM görüntüleri.....	41
Şekil 28. AZ61-Al numunesine ait SEM görüntüleri.....	41
Şekil 29. AZ91-Al numunesine ait SEM görüntüleri.....	41
Şekil 30. AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerine ait SEM kesit görüntüleri	42
Şekil 31. AZ31-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları	43
Şekil 32. AZ61-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları	43
Şekil 33. AZ91-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları	43
Şekil 34. AZ31-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri.....	44
Şekil 35. AZ61-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri.....	44
Şekil 36. AZ91-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri.....	45
Şekil 37. AZ31-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları.....	46
Şekil 38. AZ61-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları.....	46
Şekil 39. AZ91-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları.....	46
Şekil 40. AZ31-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri	47
Şekil 41. AZ61-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri	47
Şekil 42. AZ91-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri	48
Şekil 43. Kaplanmamış AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri	48
Şekil 44. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ31 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri	49
Şekil 45. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ61 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri	50
Şekil 46. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ91 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri	50

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
DC	: Doğru Akım
EDS	: Enerji Yayılımlı X-ışını analizi (<i>Energy Diffusion X-ray Analysis</i>)
GKÇ	: Gerilmeli Korozyon Çatlağı
HV	: Vickers Sertlik Birimi
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
OCP	: Açık devre potansiyeli
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
pH	: Potansiyel Hidrojen Birimi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
SSRT	: Düşük Deformasyon Hızı Testi (<i>Slow Strain Rate Test</i>)
XRD	: X-Işınları Kırınımı (<i>X-Ray Diffraction</i>)

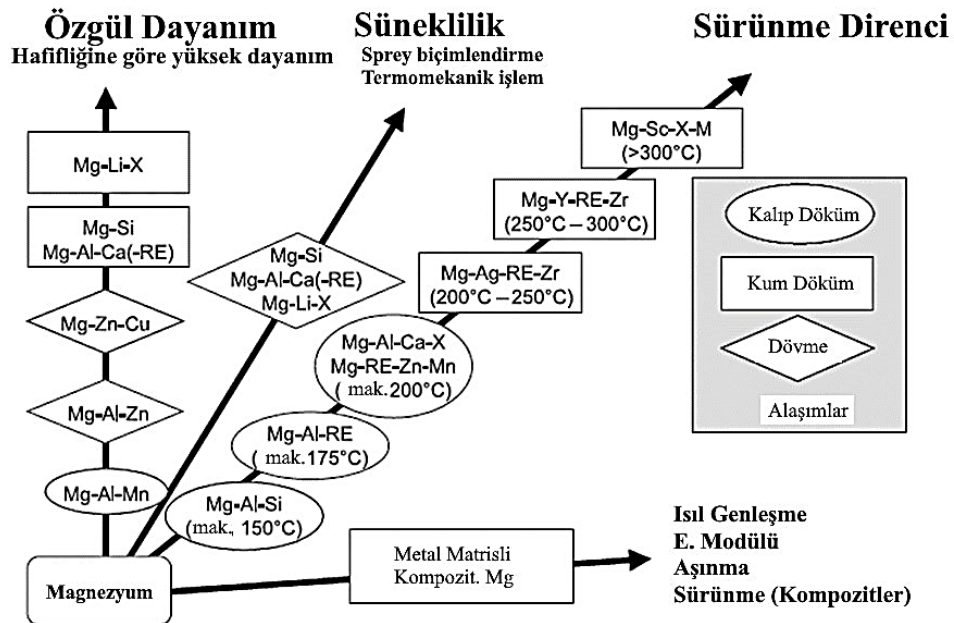
Simgeler

A	: Amper
V	: Volt
W	: Watt
Θ	: Kırınım açısı
I_{kor}	: Korozyon akım yoğunluğu
E_{kor}	: Korozyon potansiyeli
keV	: Kiloelektronvolt
μm	: Mikrometre
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
KOH	: Potasyum hidroksit
rpm	: Dakikadaki devir sayısı (<i>revolutions per minute</i>)

GİRİŞ

Magnezyum yerkürede bileşik halde en çok bulunan sekizinci elementtir. Özellikle okyanuslarda ve dünyadaki diğer büyük kaynaklarda en yaygın bileşikler olan magnezit (MgCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ve karnalit ($\text{KCl.MgCl}_2.6(\text{H}_2\text{O})$) şeklinde doğada bol miktarda bulunmaktadır. Ayrıca deniz suyunda en çok miktarda bulunan üçüncü mineraldir. Düşük yoğunluk ve yüksek özgül mukavemet oranlarına ek olarak, iyi termal iletkenlik, sönümleme ve mükemmel dökülebilirlik gibi birçok avantajlara sahiptir. Tüm yapısal metaller içerisinde en hafifi olan magnezyum ve alaşımları çeliğe oranla $\frac{1}{4}$, alüminyuma oranla $\frac{3}{4}$ daha düşük yoğunluktadır. Bu özelliklerinden dolayı kritik öneme sahip olan magnezyum alaşımları; günümüzde havacılık, otomotiv, askeri ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır.

Mekanik özelliklerini iyileştirmek ve kullanıldığı alanlarda daha iyi bir performans elde etmek için magnezyuma ilave alaşım elementleri katılarak alaşımlandırma işlemleri yapılmaktadır. Ticari olarak genellikle döküm ve dövme yöntemleriyle üretilen magnezyum alaşımlarının, alaşımlandırma ile bazı mekanik özelliklerindeki gelişim Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çeşitli alaşım elementlerinin ilavesiyle, magnezyum elementinin bazı mekanik özelliklerindeki gelişim (Mordike and Ebert 2001)

Ticari olarak en yaygın kullanılan magnezyum alaşımları AZ alaşım serisidir. Bu alaşım türlerinde alaşımlandırma elementi olarak en fazla miktardaki element alüminyumdur (Al). Alüminyum, mukavemet ve korozyon direncini artırır. AZ serisinde alüminyum ile birlikte en yaygın kullanılan alaşım elementi ise çinkodur (Zn). Sünekliği azaltmadan mukavemeti artırmak için alüminyum ile birlikte kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının gösterimine örnek verecek olursak; AZ91 alaşımında, A Alüminyum, Z Çinko, 9 rakamı Al'nin bileşiminin ağırlıkça %9 olduğunu ve son olarak 1 rakamı ise, Zn'nin ağırlıkça bileşiminin %1 olduğunu göstermektedir (Gupta and Ling 2011; Kandemir and Can 2003; D. S. Kumar *et al.* 2015).

Magnezyum alaşımları geçmişte birçok uygulamada kullanılmıştır. II. Dünya Savaşı esnasında tasarımına başlanan 8,6 ton ağırlığındaki B-36 bombardıman uçağının 3,4 tonu magnezyum alaşımından oluşmaktaydı. Bu özellikleri ona “Dünyanın Magnezyum Harikası” unvanını verdi. Bu uçakta magnezyum alaşımı yerine alüminyum alaşımı kullanılmış olsaydı ağırlıkça 4,5 tonluk bir artış yaşanacaktı. B-36'dan sonra yeni bir model olan B-47 tipi jet bombardıman uçağı ise toplam 5,5 ton ağırlığa sahipti ve magnezyum alaşımı bu uçağın birçok bölümünde kaplama malzeme olarak kullanıldı. İtme ters çeviriciler (Boeing 737, 747, 757, 767), dişli kutusu (Rolls-Royce), motorlar, helikopter şanzıman kutuları vb. havacılık elemanlarında magnezyum alaşımları kullanılmıştır. Düşük yoğunluğundan dolayı magnezyum alaşımlarından, Eurofighter Typhoon, Tornado ve F16 gibi askeri uçakların şanzıman kutularında yararlanılmaktadır (Gupta and Ling 2011; Kaçar *et al.* 2006).

Magnezyum alaşımları, havacılıkta kullanılan araçların, üzerine yük binmeyen parçalarında (yakıt depoları, hidrolik depolar ve kuyruk paneline hareket veren quadrant vs.) kullanılmaktadır (Şekil 2). Hidrolik depo ve quadrant parçaları genellikle AZ91 dökümdür. Bazı helikopter modellerinin (MD500, Eurocopter EC120, NH90 ve Sikorsky S92) transmisyonlarının korunmasında magnezyum alaşımlarından ZE41 kullanılmaktadır. Uydu cihazlarında kullanılan parçalarda ise genellikle AZ31 ve AZ61 alaşımları kullanılır (Kaçar *et al.* 2006; Öztürk and Kaçar 2012).

Havacılıkta kullanılan bazı magnezyum alaşımlarının, bu alanda kullanılan diğer alaşımlarla karşılaştırılması Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Havacılıkta kullanılan bazı magnezyum alaşımlarının, bu alanda kullanılan diğer alaşımlarla karşılaştırılması (Kaçar *et al.* 2006)

Malzeme	ρ (kg/m ³)	σ^* (MPa)	Muk/Yoğ (Pa/kg/m ³)	E (GPa)	R (GPa)	Term. Gen. Kat. (10 ⁻⁶ /°C)	Standart Elektrot Pot. (V)
MAGNEZYUM							
AZ80	1800	345	191666,7			25,2	
AZ31	1770	255	144067,8			25,2	
AZ91D	1810	240	132596,7			26	
AM50A	1770	230	129943,5	45	16	26	-2,37
AM60B	1780	235	132022,5			25,6	
WE54	1850	320	172973,0			24,6	
ZK60A	1830	310	169398,9			27,1	
ALÜMİNYUM							
100-1114	2710	110	40590,4	70	26	23,6	
2014-T6	2800	455	162500,0	75	27	23,0	-1,71
2024-T4	2800	470	167857,1	73	30	23,2	
5456-H116	2630	320	121673,0	72	30	23,9	
6061-T6	2710	260	95941,0	70	26	23,6	
7075-T6	2800	570	203571,4	72	28	23,6	
Ti-6Al-4V İslah edilmiş	4730	900	190274,8	120	235	9,5	-1,63
Cu Tavlanmış	8910	220	24691,4	120	44	16,9	0,334
Cu Sert çekilmiş	8910	390	43771,1	120	44	16,9	0,334
Fe	7860	400	50890,6	208	77	11,7	0,771
PLASTİKLER							
Naylon 6/6	1140	75	65789,5	2,8		144	
Polikarbonat	1200	65	54166,7	2,4		122	
polyester							
PBT	1340	55	41044,8	2,4	-	135	-
Polyester	1200	45	37500,0	0,2		130	
Elastomer	1030	55	53398,1	3,1		125	
Yapıştırıcı	1440	40	27777,8	3,1		135	
lastik							
Sert PVC	910	15	16483,6	0,5		162	
lastik							
Epoksi/Cam SMC	1600	260	162500,0	-	-	3,65	-
H254 Polyester	1600	41	25625,0	-	-	0,29	
Laminat							
Termoset	1820	55	30219,8	-	-	1,2	-
Polyester							

* çekmede kopma mukavemeti



(a) DC-3 throttle quadrant



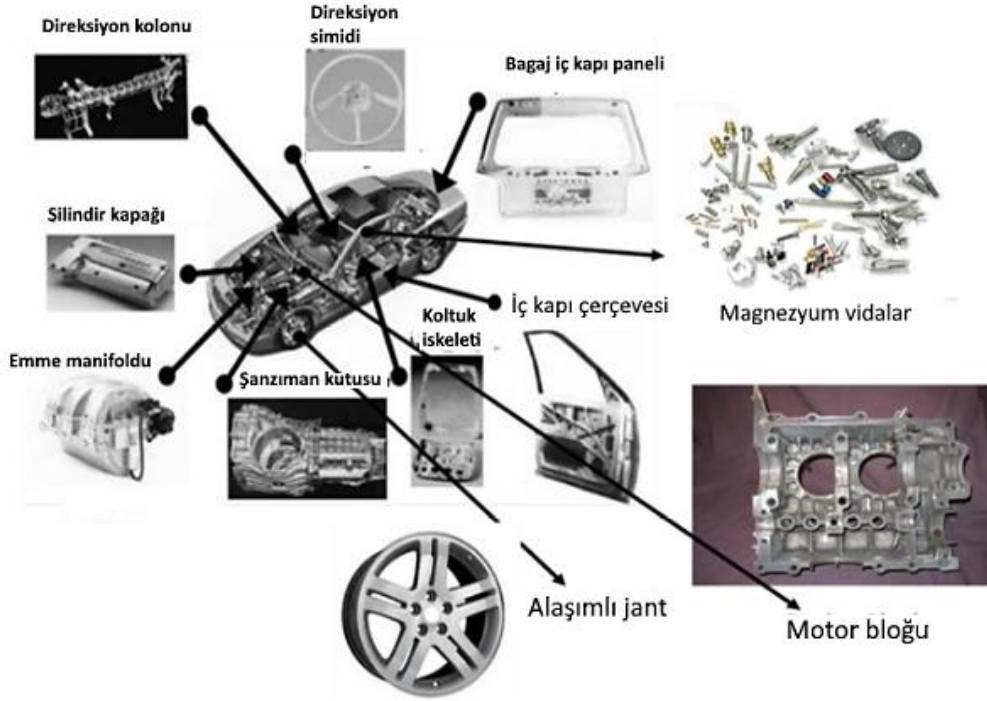
(b) Mg emme sübabı manifoldu



Şekil 2. Magnezyum alaşımlarından imal edilmiş ve havacılıkta kullanılan bazı ekipmanlar (Kaçar *et al.* 2006)

Magnezyum alaşımları otomotiv endüstrisinde geçmişten beri kullanılmaktadır. 1920'lerde magnezyum alaşımları yarış arabalarının bazı parçalarında kullanılmıştır. Bununla birlikte, 1930'lara kadar, Volkswagen (VW) Beetle gibi ticari araçlarda magnezyum alaşımları kullanılmamıştır. O zamanlar VW Beetle, şanzıman muhafazasında ve karterde 20 kg'dan fazla magnezyum alaşımı içermektedir. Geçtiğimiz on yılda, otomotiv endüstrisi üzerinde daha hafif, daha yüksek yakıt verimliliği ve daha yüksek performanslı araçlar üretmeye yönelik artan çevresel ve yasal baskılar, magnezyum kullanımında artışa neden olmuştur. Yaygın olarak kullanılan geleneksel çelik parçalar; magnezyum, alüminyum ve metal matrisli kompozitler gibi yeni gelişmiş malzemelerle değiştirilmektedir. Audi, Volkswagen, Mercedes Benz, Toyota, Ford, BMW, Jaguar, Fiat, Hyundai ve Kia Motors Corporation gibi önde gelen otomobil üreticileri, otomotiv parçalarında magnezyum alaşımları kullanmışlardır. VW Passat ve Audi A4 modellerinin şanzıman kutusunda magnezyum alaşımları kullanılmaktadır. Toyota Lexus, Carina, Celica ve Corolla modellerinde direksiyon simidi magnezyum alaşımlarından yapılmıştır. Mercedes-Benz SLK modelinde yakıt deposu kapağı magnezyum alaşımından yapılmıştır. Hyundai Azera (Grandeur) ve Kia Amanti modellerinde magnezyum alaşımları, koltuk çerçevesi, direksiyon kolunu muhafazası, sürücü hava yastığı muhafazası ve direksiyon simidi gibi iç kısımlarda da kullanılmaktadır (Gupta and Ling 2011).

İç donanım bileşenlerinde alüminyum alaşımlarının yerine magnezyum alaşımlarının kullanılması ağırlıkça %30'luk bir azalmaya neden olmuştur. BMW, alüminyum alaşımlı krank karteri yerine Mg-Al alaşımlı krank karteri kullanmış ve geleneksel alüminyum alaşımlı motordan ağırlıkça %24 tasarruf etmiştir. Böylece daha iyi güç performansı ve yakıt verimliliği de elde edilmiştir. Gelecekte magnezyum alaşımlarının otomotivde daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Magnezyum alaşımlarının taşıt başına 40 kg'a kadar kullanılması ile araç ağırlıklarının 1200 kg'dan 900'kg düşmesi tahmin edilmektedir. Şekil 3'te magnezyum alaşımlarından yapılmış bazı otomotiv bileşenleri gösterilmiştir (Kelen 2021; Külekçi 2008).



Şekil 3. Magnezyum alaşımlarından yapılmış bazı otomotiv bileşenleri (D. S. Kumar *et al.* 2015)

Magnezyum alaşımlarının birçok avantajına rağmen en büyük sorunlarından biri korozyon direncinin alüminyum alaşımlarına kıyasla zayıf olmasıdır (Candan and Candan 2018). Aslında saf halde oldukça iyi bir korozyon direncine sahip olmasına rağmen daha yüksek mukavemet gerekliliği için yapılan alaşımlandırma işlemleri sonucu korozyon direnci düşmektedir.

Magnezyum alaşımlarının yüksek özgül mukavemet değerlerine rağmen zayıf korozyon direnci, birçok sektörde kullanımını kısıtlamaktadır. Magnezyum havada kolayca oksitlenir. Bununla birlikte hava ortamındaki oksidasyon oranı, düşük karbonlu çeliklere göre daha azdır. Hava ile temas ettiğinde ince bir film oksit tabakası oluşturur. Bu özelliğiyle birçok alaşımlara göre hava ortamında daha iyi bir korozyon direnci sağlamaktadır. Magnezyum ve alaşımları nemli ortamda ince bir oksit film oluştursa da düzgün olmayan, kusurlu ve gözenekli film yapısı nedeniyle yüzeyi korumasız bırakır. Magnezyum alaşımlarının bazı alüminyum alaşımlarından daha iyi korozyon direnci sağladığı da görülmektedir. Klorür içeren çözeltilerde ise korozyona karşı hassasiyeti oldukça fazladır (Prabhu *et al.* 2017; Song and Atrens 1999).

Magnezyum alaşımlarının korozyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan yaygın işlemlerden bazıları anotlama, termal sprey kaplama, plazma elektrolit oksitleme (PEO), hibrit kaplama ve organik/polimer kaplamalardır.

Bu yöntemlerden biri olan anotlama işlemi, akım ve voltaj uygulanarak metallerin yüzeylerinin oksit bir tabaka ile kaplanmasına dayanan elektrokimyasal bir işlemdir. Anotlama işlemi, akım veya voltajla tahrik edilen sulu bir ortamda gerçekleştirilen oksidasyon reaksiyonudur. Anotlama işlemine etki eden bazı parametreler; yüzey morfolojisi, çözelti türleri, akım ve voltaj karakteristiğidir (Gupta and Ling 2011; Song 2011).

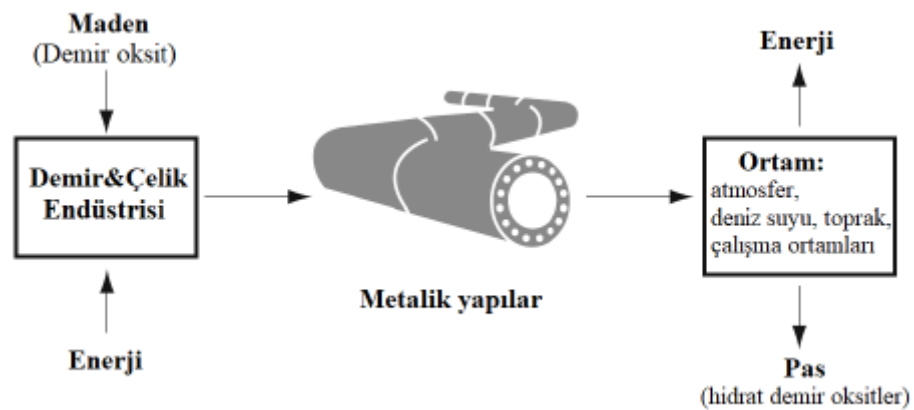
Magnezyum alaşımlarının korozyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan bir başka işlem ise, termal spreylendirme yöntemlerinden biri olan elektrik ark spreylendirme yöntemidir. Bu yöntem, metalleri korozyondan korumak için diğer termal yöntemlere göre yüksek püskürtme ve birikme oranı, düşük yatırım maliyeti gibi bazı avantajlara sahiptir. Sistem içerisinde iki tel arasında bir ark oluşturulmakta ve meydana gelen ark, tel uçlarını eritmektedir. Ergitilen elektrot, basınçlı gaz vasıtasıyla kaplanacak malzeme üzerine püskürtülür ve kaplama işlemi tamamlanır. Diğer kaplama yöntemlerine göre daha ekonomiktir. Bu yöntemle korozyona dirençli kaplamalar elde edilerek makine parçalarının geri kazanılması sağlanabilir (Pawlowski 2008).

Bu tez çalışmasında AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına önce elektrik ark spreylendirme yöntemi ile saf alüminyum kaplanmış ve daha sonra aynı kaplama üzerine silikat esaslı çözeltide anotlama işlemi ile yeni bir kaplama yapılarak çift kaplama elde edilmiştir. Elde edilen kaplamaların faz yapıları XRD analizleri ile, kimyasal bileşimleri ise EDS analizleri ile incelenmiştir. Numunelerin korozyon deneyleri ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Korozyon

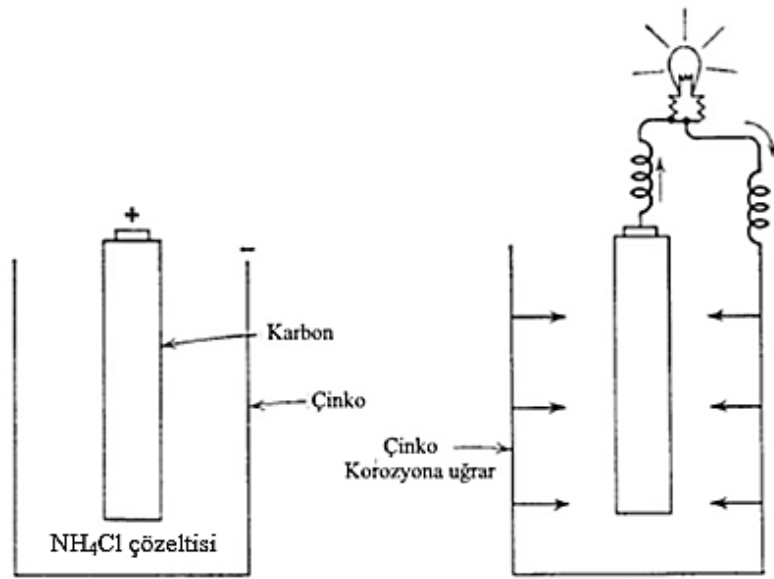
Korozyon, metallerin çevresiyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bozunmalarıdır. Fiziksel nedenlerle bozunma korozyon olarak adlandırılmaz; erozyon veya aşınma olarak tanımlanır. Ancak erozyon korozyonu ve aşındırıcı korozyon gibi bazı kimyasal terimler, fiziksel bozunmalara neden olmaktadır. Koroziif ortamlarda nem, oksijen, inorganik ve organik asitler, yüksek basınç, sıcaklık ve klorürler bulunur. Korozyon sırasında metaller; oksitler, hidroksitler, tuzlar veya karbonatlar gibi termodinamik olarak daha kararlı bileşiklere dönüşme eğilimindedirler. Korozyon, ekonomi ve güvenlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle günümüzde mühendisler, tanklarda, makinelerin metal bileşenlerinde, gemilerde, köprülerde vb. korozyon sonucunda oluşan metal kaybını, güvenlik ve ekonomiyi göz önünde tutarak azaltmaya çalışmaktadırlar. Korozyon; basınçlı kaplar, kazanlar, toksik kimyasallar için metalik kaplar, türbin kanatları, rotorlar, köprüler, uçak bileşenleri ve otomotiv direksiyon mekanizmalarında arızaya neden olarak, çalışan ekipmanın güvenliğini tehlikeye atabilir. Korozyonla metal kaybı, yalnızca metalin değil; aynı zamanda enerjinin, suyun ve ilk etapta metal yapıları üretmek ve imal etmek için kullanılan insan çabasının da bir israfıdır. Ek olarak, aşınmış ekipmanın yeniden inşası, tüm bu kaynakların (metal, enerji, su ve insan) daha fazla yatırımını gerektirir. Şekil 4'te korozyon oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. (Popov 2015; Revie 2008).



Şekil 4. Korozyon oluşumunun şematik gösterimi (Pedferri and Ormellese 2018)

Korozyonun Elektrokimyasal Mekanizması

Korozyon olayları çoğunlukla elektrokimyasaldır. Sulu ortamdaki korozyon reaksiyonları, esas olarak NH_4Cl çözeltisinden oluşan bir elektrolitle ayrılmış merkezdeki bir karbon elektrot ve bir çinko kap elektrottan oluşan bir kuru pil hücresinde meydana gelen reaksiyonlara benzerdir. Her iki elektrotla bağlı bir ampul, her iki elektrottaki kimyasal reaksiyonlarla sağlanan elektrik enerjisiyle sürekli olarak yanar. Karbon elektrotunda (pozitif kutup) kimyasal indirgenme reaksiyonları gelmektedir. Çinko elektrotta (negatif kutup) ise oksidasyon (yükseltgenme) reaksiyonları meydana gelmektedir. Metalik çinko, hidratlı çinko iyonlarına dönüşür ($\text{Zn}^{2+} \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Hücredeki elektrik akımı ne kadar büyük olursa, korozyona uğrayan çinko miktarı da o kadar artar. Korozyon hücresi olarak da adlandırılan Şekil 5'teki düzeneğe, kimyasal indirgenmenin olduğu "katot" olarak isimlendirilir iken kimyasal yükseltgenme ile çözünen (korozyona uğrayan) elektrot ise "anot" olarak isimlendirilmektedir (Altun 2004; Revie 2008).



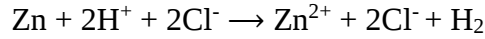
Şekil 5. Kuru pil düzeneği (Revie 2008)

Şekil 6'da şematik olarak gösterildiği gibi, HCl çözeltisine daldırılan çinko (Zn) çözünür (korozyona uğrar). Bu olayın kimyasal reaksiyonu şu şekilde yazılabilir;



Çinko, asit çözeltisiyle reaksiyona girerek çözünür ve çinko klorür oluşturur. Ayrıca yüzeyde hidrojen kabarcıkları açığa çıkar. Bu tür reaksiyonlar birçok metal ve alaşımların yüzeylerinin

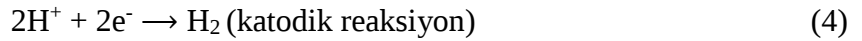
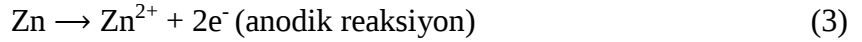
temizlenmesi ve oksit tabakanın giderilmesi için kullanılmaktadır. Reaksiyonlar iyonik formda aşağıdaki gibi yazılabilir.



Yukarıda verilen reaksiyonun her iki tarafından Cl^- iyonları yok edilirse;

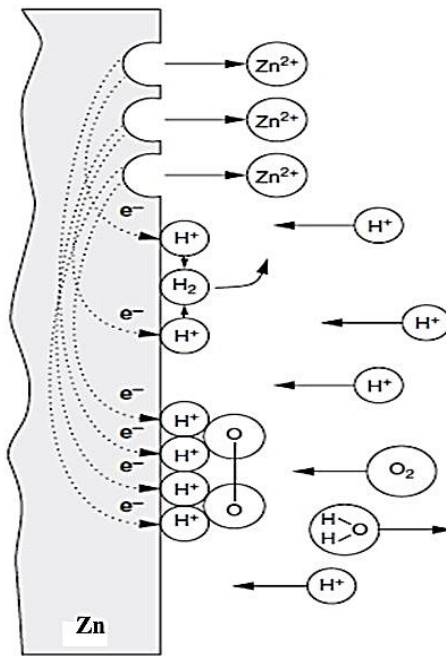


(2) numaralı reaksiyon ikiye bölünürse;



reaksiyonları elde edilir.

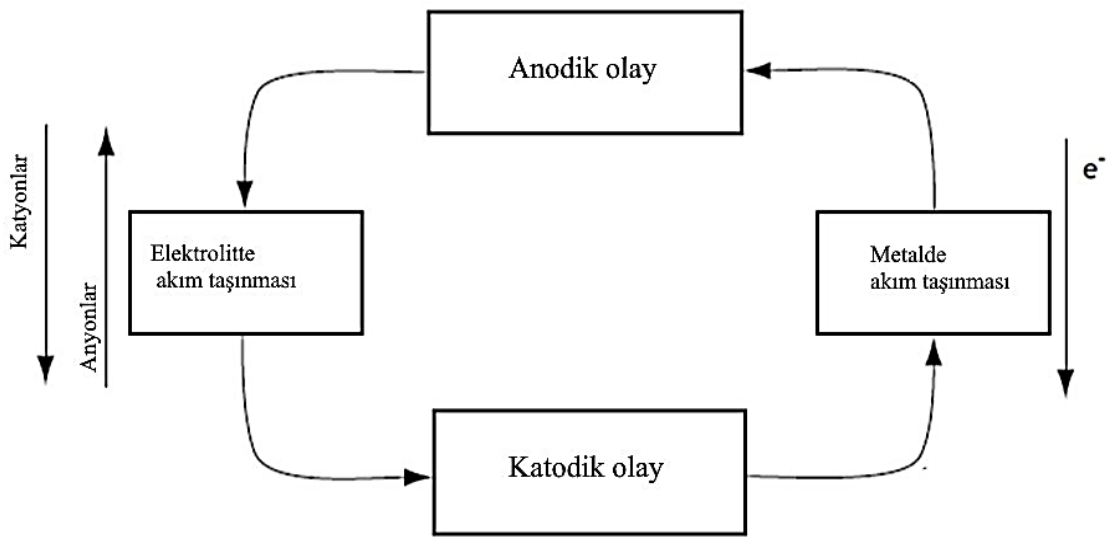
(3) nolu reaksiyonda metal, elektron kaybederek pozitif yüklü metal iyonlarına dönüşmüştür ve bu yüzden anodik reaksiyon olarak tanımlanır. (4) nolu reaksiyon ise indirgenme reaksiyonu olarak bilinen ve anodik reaksiyonla üretilen elektronu harcayan katodik reaksiyon olarak adlandırılmaktadır (Jones 1996).



Şekil 6. Çinkonun HCl çözeltisinde çözünmesi (Roberge 2019)

Yukarıda bahsedilen ve korozyon olayında görülen anodik ve katodik olayların yanı sıra, metal içinde elektron akışı ve elektrolitte akım akışı olayları da görülmektedir. Şekil 7’de korozyon olayının elektrokimyasal mekanizması gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, elektronların serbest bırakıldığı anodik alandan, elektronların tüketildiği katodik alana doğru

metal içinde bir elektron akışı vardır. Elektronun akış yönü, geleneksel akım yönünün tersidir çünkü elektron yükü negatiftir. Diğer yandan anottan katot bölgesine iyon taşınmasıyla, elektrolit içinde bir akım akışı (dolaşım) meydana gelir. Pozitif iyonlar akımla aynı yönde, negatif iyonlar ise zıt yönde hareket eder. Kısacası bir korozyon olayı, Şekil 7’de gösterildiği gibi seri halinde dört süreçten oluşur. Bu dört süreç aynı oranda gerçekleşir. Başka bir ifadeyle anodik reaksiyon tarafından salınan elektronların sayısı (yani metal yüzeyinde değiş tokuş edilen anodik akım), katodik reaksiyon tarafından tüketilen elektronların sayısı (katodik akım), metal içinde katottan anodik bölgeye akan akım ve son olarak elektrolit içinde dolaşan akım aynı olmalıdır (Pedferri and Ormellese 2018).



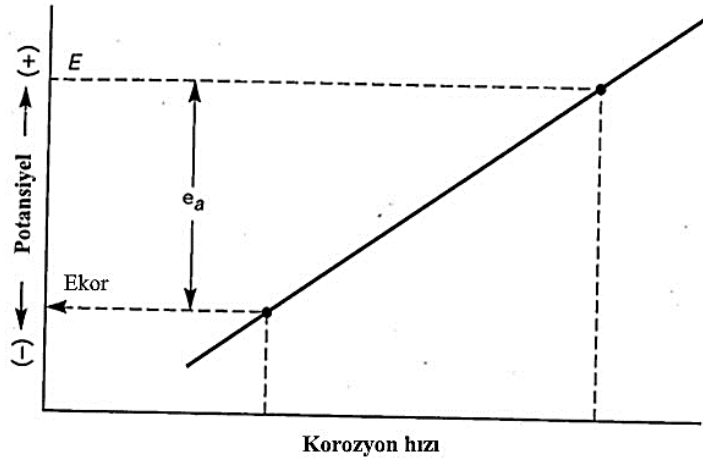
Şekil 7. Metallerde korozyon olayının elektrokimyasal mekanizması (Pedferri and Ormellese 2018)

Polarizasyon

Açık devre potansiyeli, elektrolit çözelti içerisine daldırılan bir metalin potansiyeli olarak adlandırılmaktadır. Açık devre potansiyeli, korozyon hücrelerinde gerçekleşen reaksiyonların yönü hakkında bilgi vermektedir. Ancak korozyon hızı hakkında herhangi bir fikir vermez. Bundan dolayı, korozyon hızını ölçmek için elektroda akım verilerek bu akım ile elektrot potansiyelindeki değişim ölçülmektedir. Elektrot potansiyelinde meydana gelen bu değişim “polarizasyon” olarak adlandırılmaktadır (Altun 2004).

(3) ve (4) nolu reaksiyonlar sınırlı sürelerde gerçekleşen reaksiyonlardır. (4) nolu reaksiyonda elektronların varlığı, yüzeydeki potansiyeli daha negatif hale getirmektedir. Bu da negatif yüklü sayıca fazla elektronların metal/çözelti ara yüzeyinde birikmesine neden

olmaktadır. Bu nedenle tüm elektronların yerini alabilmesi için reaksiyon yeterli hızda gerçekleşmemiştir. Benzer şekilde (3) nolu reaksiyonda elektronların ayrılması, pozitif yönde potansiyel değişime neden olur ve bu durum anodik polarizasyon olarak adlandırılmaktadır. Polarizasyon arttıkça, anodik çözünme eğilimi de artmaktadır. Anodik polarizasyon, anodik reaksiyon (3) tarafından, korozyon için bir itici gücü temsil eder. Yüzey potansiyeli daha pozitif ölçüldüğünde, anodik polarizasyon daha büyük olduğu için çözeltinin oksitleme gücü artar. Şekil 8’de gösterildiği gibi yüzey, sulu elektrolit çözeltisinde mevcut katodik ve anodik reaksiyonlarla elektron alışverişine ve hızına bağlı olarak “kararlı sabit durum potansiyeli” veya “denge potansiyeli” (E_{kor}) olarak adlandırılan potansiyel değere ulaşacaktır. Yüzey potansiyeli E_{kor} ’ dan E ’ ye yükseldikçe, anodik reaksiyon hızı yani korozyon hızı genellikle artar. Anodik polarizasyon, $e_a = E - E_{kor}$ olarak açıklanabilir (Jones 1996).

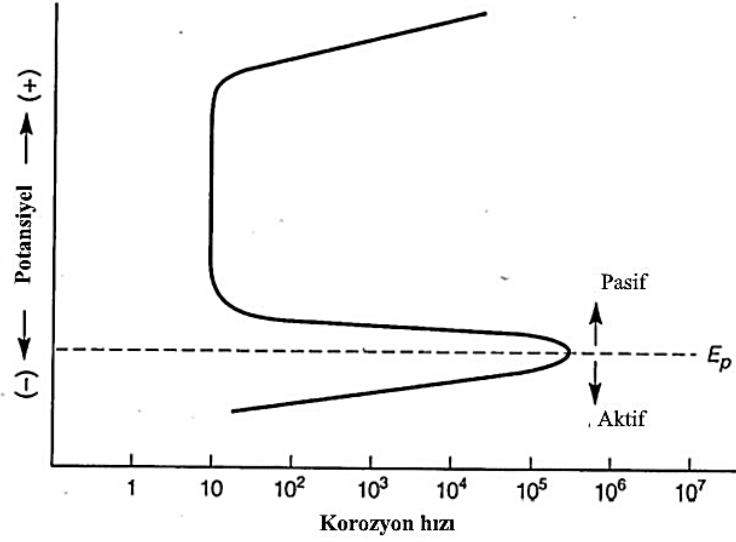


Şekil 8. Artan yüzey potansiyeli ile korozyon hızının artışı gösteren grafik (Jones 1996)

Pasifleşme

Birçok metalin (demir, nikel, krom, kobalt, titanyum vs.) korozyon hızı, Şekil 9’ da gösterildiği gibi kritik potansiyel değerlerinin (E_p) üzerinde düşmektedir. Korozyona karşı yüksek itici güce rağmen E_p değerinin üzerindeki bu korozyon direnci “pasifleşme” olarak tanımlanır. E_p değerinin altında birçok metal, yüksek hızda korozyona uğramaktadır. Pasif bölgedeki korozyon hızı oldukça düşüktür ve aktif bölgeye göre bu azalma 10^3 - 10^6 kat aralığında değişiklik gösterebilmektedir. Pasifleşme, anodik çözünme reaksiyonu ile metal yüzeyinde ince, koruyucu, hidrat oksit, korozyon ürünü yüzey filminin oluşumuna neden olur. Çözeltinin potansiyeline veya oksitleme gücüne bağlı olarak, bir metal E_p ’nin üzerinde pasif

durumda veya altında aktif durumda bulunabilir. Örneğin, 304 paslanmaz çelik hava ortamında bulunan tuzlu suda pasif durumda iken, hava ortamından izole edilmiş tuzlu suda aktif durumdadır (Jones 1996).



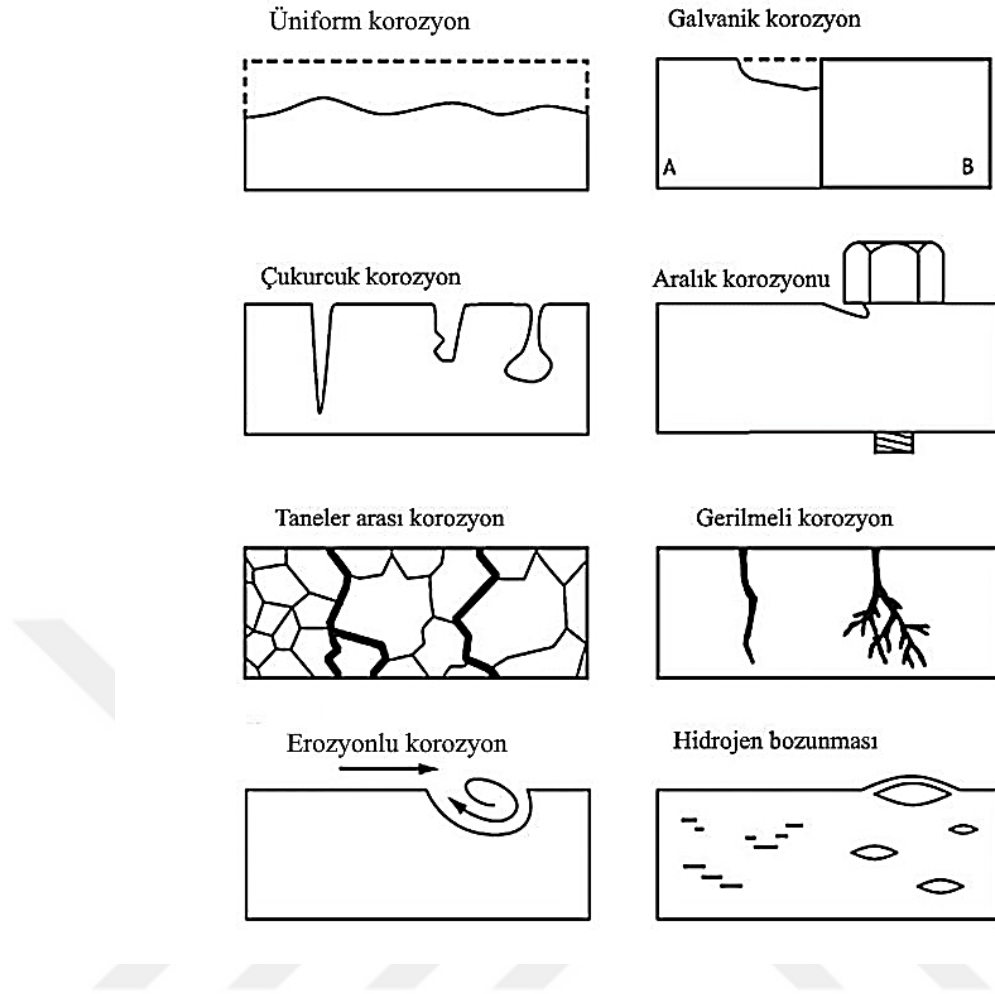
Şekil 9. Kritik potansiyel değeri E_p 'nin üzerindeki oksitleyici potansiyellerde pasifleşme (Jones 1996)

Korozyon Türleri

Literatürde korozyon, ortamın kimyasal bileşimi, elektrokimyasal özellikleri, sıcaklığı ve korozyon hızı gibi durumlarına göre sınıflandırılmıştır (Popov 2015). Şekil 10'da korozyon türlerinin şematik görüntüleri verilmiştir. Başlıca korozyon türleri;

- Üniform korozyon
- Galvanik korozyon
- Çukurcuk korozyon
- Aralık korozyonu
- Taneler arası korozyon
- Gerilmeli korozyon
- Erozyonlu korozyon
- Hidrojen bozunması

olarak sıralanabilir.



Şekil 10. Korozyon türleri (Pedferri and Ormellese 2018)

Üiform korozyon: Genel korozyon olarak da bilinen üiform korozyon, metalin tüm yüzeyinde eşit olarak gerçekleşir. Bunun nedeni, anodik ve katodik reaksiyonların yüzey üzerinde eşit olarak bölünmüş olmasıdır. En yaygın görülen korozyon türlerinden biridir ve düzenli karakteristik özelliğinden dolayı korozyon hızı, korozyon ölçüm teknikleri ile ölçülebilir (During 2018).

Galvanik korozyon: İletken bir elektrolit çözeltide farklı potansiyellere sahip iki metal arasında potansiyel farktan dolayı elektron akışı gerçekleşir. Negatif potansiyele sahip metal korozyona uğrar. Pozitif metal katot görevi görür ve korozyona uğrayan (anot görevi gören) metal tarafından korozyona karşı korunmuş olur. Başka bir ifadeyle çözeltideki iki metal arasında daha pasif olan metal katodik davranış sergileyerek kendisi korozyondan korunur. Bu tür korozyon türü galvanik korozyon olarak adlandırılmaktadır (During 2018).

Çukurcuk korozyon: Çukurcuk korozyonu, metalde çukurcuklar oluşturarak lokal bozunmalara neden olan tehlikeli bir korozyon çeşididir. Yüzey çapına göre eşit, küçük veya

daha büyük derinliğe sahip olan bu delikler metale nüfuz ederek metal kaybına yol açabilirler (Popov 2015).

Aralık korozyonu: Bu korozyon türü, kondansatörlerde, metal yüzeyler ile valfler arasında, cıvata conta perçinleri veya yüzey birikintileri altında oluşan yarıklarda başlar. Korozyonun meydana gelmesi için saldırgan ortamın aralıktan geçmesi ve korozyon ürünlerini aralık içinde tutacak kadar dar olması gerekir (Altun 2004; Popov 2015).

Taneler arası korozyon: Tüm metaller küçük kristal veya tanecikli yapılara sahiptirler. Birbirine bitişik bu tanecikli yapılar tane sınırını oluşturur. Belirli koşullar altında, tane sınırlarına yakın küçük alanlar, tanelerin kütesinden çok daha reaktif hale gelebilir. Bu nedenle metal içerisinde farklı potansiyele sahip bölgeler oluşur ve korozyon, tane sınırları yoluyla metale nüfuz edebilir. Bu korozyon türü taneler arası korozyon olarak adlandırılmaktadır (During 2018).

Gerilmeli korozyon: Gerilmeli korozyon, aktif metaller veya alaşımlar üzerinde eş zamanlı çekme gerilimi ve korozif ortamlar nedeniyle çatlak büyümesi olarak tanımlanır. Gerilmeli korozyonun oluşabilmesi için metalin bu korozyon türüne duyarlı olması ve klorür iyonları, su, oksijen, pH vb. gibi korozif bir ortamda olması gerekir (Popov 2015).

Erozyonlu korozyon: Yüksek akış hızına sahip aşındırıcı bir sıvı metal yüzeyine çarptığında erozyonlu korozyona neden olur. Ayrıca durgun veya yavaş akan sıvı da düşük veya orta düzeyde bir korozyon hızına neden olur, ancak aşındırıcı sıvının hızlı hareketi, korozyondan koruyucu film tabakasını aşındırır ve korozyonu hızlandırır (Jones 1996).

Hidrojen bozunması: Genellikle malzeme içinde hidrojen bulunmasından kaynaklanan, malzemede sonradan istenmeyen bir kırılganlığa neden olan bozunma olarak adlandırılır. Hidrojen metalik malzemelere nüfuz edebilirse, pratik olarak bu metaller hidrojen bozunmasına uğrayabilir (Woodtli and Kieselbach 2000).

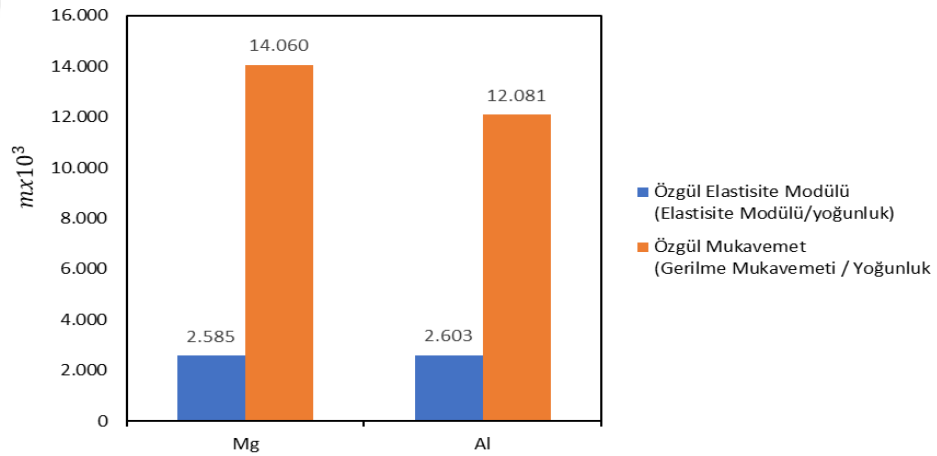
Magnezyum ve Alaşımları

Periyodik tablo incelendiğinde, yükseltgenme değeri +2, atom numarası 12 olan magnezyumun, toprak alkali metal grubunda yer aldığı görülmektedir. Son derece reaktif olması nedeniyle yeryüzünde doğal olarak bulunmaz. Magnezyum, atmosfere maruz kaldığında beyaz parlak bir ışık veren hafif, güçlü ve gümüşü beyaz bir metaldir. Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, termal iletkenlik ve dökülebilirlik gibi bazı avantajlara sahiptirler. Ayrıca magnezyum ve alaşımları özgül mukavemet açısından alüminyum ve birçok ticari çeliklere

göre benzer hatta daha iyi özellikler göstermektedirler. Tablo 2’de Mg ve Al elementlerinin bazı fiziksel özellikleri, Şekil 11’te ise Mg ve Al elementlerinin bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırılması grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Mg ve Al elementlerinin bazı fiziksel özellikleri (D. S. Kumar *et al.* 2015)

Özellikler	Magnezyum	Alüminyum
Atom Numarası	12	13
Atom Ağırlığı (g/mol)	24,32	26,98
Kristal Yapısı	SDH	YMK
Yoğunluğu (20°C –g/cm ³)	1,74	2,70
Elastisite Modülü (GPa)	45	69
Erime Noktası (°C)	650	660
Kaynama Noktası (°C)	1105	2520
Poisson Oranı	0,35	0,33
Özgül Dayanımı (kNm/kg)	35-260	7-200
Çekme Dayanımı (MPa)	240 (AZ91D)	320(A380)



Şekil 11. Mg ve Al elementlerinin bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Külekçi 2008)

Magnezyum alaşımlarının dayanımı alüminyum alaşımları kadar yüksek değildir. Buna rağmen özgül dayanımları alüminyum alaşımlarına oranla daha yüksek olabilmektedir. Magnezyum alaşımları bu özelliklerinden dolayı otomotivden havacılığa birçok sektörde tercih edilmektedir. Magnezyum alaşımlarının başlıca dezavantajlarından biri, düşük korozyon direncidir. Bu nedenle genellikle alüminyum, çinko, zirkonyum, manganez ve diğer bazı nadir

elementler ile alaşımlandırılarak kullanılmaktadırlar. Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) standartlarında, ilave edilen alaşım elementleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Magnezyum alaşımlarının isimlendirmesi ASTM standartlarında iki harf ve iki rakamla gösterilir. Alaşımda miktarca en çok bulunan element birinci harf ile miktarca en çok bulunan ikinci element ise ikinci harf ile gösterilir. Rakamlar ise sırasıyla bu elementlerin miktarca yüzdesini ifade etmektedir (Avedesian and Baker 1999; Kandemir and Can 2003; Prabhu *et al.* 2017).

Tablo 3. ASTM standartlarında magnezyum alaşımlarının gösterimi (Friedrich and Mordike 2006)

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

Tablo 3'te gösterilen bazı alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarının bazı özellikleri üzerindeki etkileri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Bazı alaşım elementlerinin magnezyum alaşımları üzerindeki etkileri (D. S. Kumar *et al.* 2015)

Alaşım Elementleri	Özellikler	Etkisi
Alüminyum	Dayanım	Artırır
	Süneklik	Artırır
	Sürünme Direnci	Azaltır
Kalsiyum	Oksidasyon	Azaltır
	Sürünme Direnci	Artırır
Lityum	Dayanım	Azaltır
	Süneklik	Artırır
Mangan	Dayanım	Artırır
	Korozyon Direnci	
Nadir Elementler	Dayanım	
	Sürünme Direnci	Artırır
	Korozyon Direnci	
Çinko	Korozyon Direnci	Artırır

Magnezyum alaşımları imalat işlemleri açısından döküm ve dövme magnezyum alaşımları olarak ikiye ayrılır. Yaygın olarak kullanılan alaşımlardan bazıları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Bazı döküm ve dövme magnezyum alaşımları (Campbell 2008)

Döküm Mg Alaşımları	Dövme Mg Alaşımları
AZ91, AZ63, AZ81	AZ31, AZ61, AZ80,
ZE41, ZE63 WE54, WE43	ZK30, ZK40, ZK60

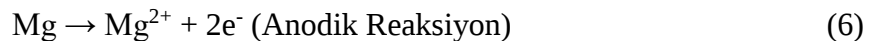
Magnezyum Alaşımlarında Korozyon

Malzemeler bulunduğu ortamlarda çoğunlukla yüksek korozyon direnci göstermezler. Malzemelerin yüksek korozyon direnci her zaman belirli şartlar altında geçerlidir. Tüm malzemelerde olduğu gibi magnezyumun da korozyon direncinin daha iyi olduğu ortamlar vardır. Ancak birçok çelik ve alüminyum alaşımlarına göre bu ortamlar sınırlıdır. Örneğin magnezyum alaşımları genellikle bazik ortamda kararlıyken nötr ve asidik ortamlarda yüksek oranlarda çözünürler. Bu durum, normalde nötr ortamda kararlı olan ancak hem bazik hem de asidik çözeltilerde kararsız olan alüminyum alaşımlarından oldukça farklıdır (Henry *et al.* 2014).

Sulu ortamlarda magnezyum çözünmesi genellikle suyun elektrokimyasal reaksiyonuyla elde edilir ve oksijen konsantrasyonuna nispeten duyarlı olmayan bir mekanizma olan magnezyum hidroksit ve hidrojen gazı üretir (Makar and Kruger 1993).



Bu reaksiyon aşağıdaki kısmi tepkimelerin toplamıdır.



Magnezyum, oda sıcaklığı koşullarında atmosfere maruz bırakıldığında, bir magnezyum oksit yüzey filmi oluşur. Atmosferdeki nemin varlığı, magnezyum oksidin magnezyum hidroksite dönüşmesine yol açar. Tablo 6'da görüldüğü üzere %3-6 NaCl çözeltisinde magnezyumun korozyon potansiyeli -1,73 V olarak bulunmuştur (Gupta and Ling 2011).

Tablo 6. Yaygın olarak kullanılan metal ve alaşımların %3-6 NaCl çözeltisindeki korozyon potansiyelleri (Gupta and Ling 2011)

Metal veya Alaşım	V _{kor} (Korozyon Potansiyeli) (V)
Mg	-1,73
Çinko kaplı düşük karbonlu çelik	-1,14
Çinko	-1,05
Kadmiyum kaplı düşük karbonlu çelik	-0,86
Al (%99,99)	-0,85
Al %12 Si	-0,83
Düşük karbonlu çelik	-0,78
Dökme demir	-0,73
Pb	-0,55
Sn	-0,50
Paslanmaz çelik 316 (aktif)	-0,43
Pirinç	-0,33
Cu	-0,22
Ni	-0,14
Paslanmaz çelik (pasif)	-0,13
Ag	-0,05
Au	0,18

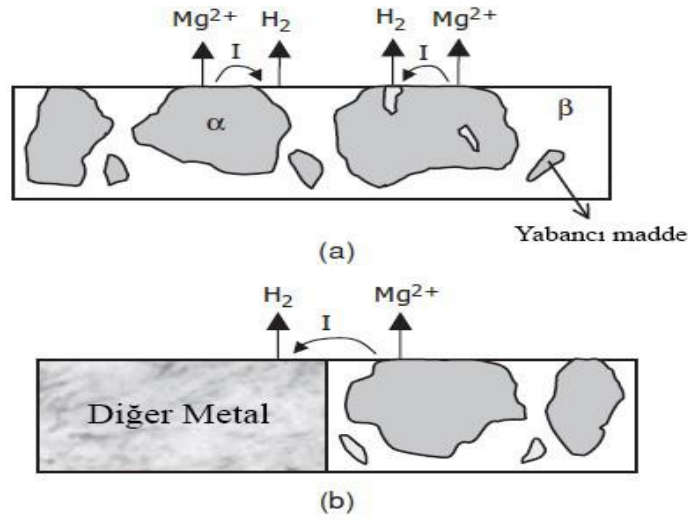
Galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu, taneler arası korozyon ve gerilmeli korozyon çatlağı magnezyum alaşımlarında görülen korozyon türlerinden bazılarıdır.

Galvanik Korozyon

Aşındırıcı veya iletken bir çözelti içerisinde iki metal arasında potansiyel farklarından dolayı aralarında bir elektron akışı oluşur. Aktif olan metal anodik hale gelir ve korozyona uğrar. Diğerine göre daha az aktif olan metal ise katodik haldedir ve korunur. Bu korozyon türü iki metal arasındaki korozyon olarak da adlandırılır. Şekil 12’de gösterilen bu korozyon türü, iç galvanik korozyon ve dış galvanik korozyon olmak üzere iki tür şeklinde görülür. İç galvanik korozyon türüne ikinci fazlar (α ve β) veya yabancı maddeler neden olurken; dış galvanik korozyon türü ise diğer metallerle bağlanmadan kaynaklanır. Galvanik korozyonu önlemek için uygun yüzey kaplamaları ve diğer malzemelerle uygun birleştirme işlemleri yapılmalıdır.

Magnezyum düşük elektrot potansiyeli nedeniyle son derece reaktif bir metaldir ve galvanik korozyona son derece yatkındır. Bu korozyon türünün başlıca görülme nedenleri şunlardır:

- Başka bir metalle bağlanma
- İkincil fazların varlığı (α ve β gibi)
- Yabancı maddelerin varlığı (Gupta and Ling 2011; Henry *et al.* 2014).



Şekil 12. Galvanik korozyon a) iç galvanik korozyon b) dış galvanik korozyon (Gupta and Ling 2011)

Çukurcuk Korozyonu

Korozyona uğramış metalin yüzeyinde çukurcuklar oluşmasına neden olan bölgesel korozyonun bir şeklidir. Çukurcukların oluşumu, magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşim ve mikro yapısal özellikleri ile alakalıdır. Kimyasal bileşim, tanecik boyutu, ısıtım şartları, morfoloji ve ikinci fazların dağılımı magnezyum alaşımlarının korozyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca ağır metal kirliliği de çukurcuk oluşumunu artırır. Mg-Al alaşımlarında ikincil fazların etkisiyle $Mg_{17}Al_{12}$ ağı boyunca çukurlar oluşmaktadır. Ayrıca magnezyum alaşımlarının korozyonu, oksijen konsantrasyonu farklılıklarına nispeten duyarsız olduğundan, magnezyum alaşımlarında çatlak korozyonu oluşmamaktadır (Song and Atrens 1999; Zeng *et al.* 2018).

Taneler Arası Korozyon

Magnezyum ve alaşımları genel anlamda taneler arası korozyona eğilimli değildir. Çünkü tane sınırı bileşeni genellikle tane gövdesine göre katodik özellik gösterir. Bununla birlikte, tanelerde ve tane sınırına bitişik alanlarda korozyon yoğundur (Gupta and Ling 2011).

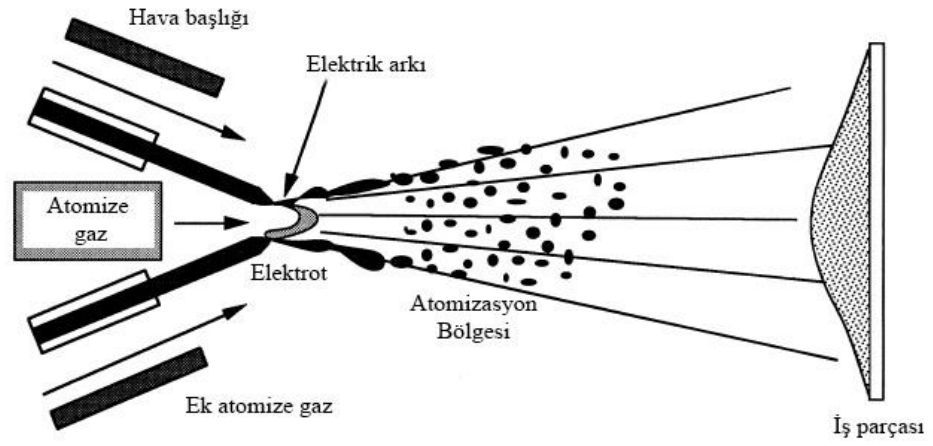
Gerilmeli Korozyon Çatlağı (GKÇ)

Magnezyum alaşımlarında görülen bir diğer korozyon türü gerilmeli korozyon çatlağıdır (GKÇ). Bu korozyon türü elektrokimyasal ve gerilme mekanizmasının ortak sonucudur. Ticari olarak kullanılan magnezyum çoğu ortamda akma dayanımına kadar yüklendiğinde gerilmeli korozyon çatlağına eğilimli değildir. Magnezyum alaşımlarında Al ve Zn gibi alaşımlandırma elementlerinin varlığı GKÇ'yi ilerletir. Dövme ve döküm magnezyum alaşımları ve özellikle Al içeren magnezyum alaşımları GKÇ'ye karşı en yüksek eğilime

sahiptirler. Temelde gerilmeli korozyon çatlağı tane içidir. Tane içi GKÇ'ye hidrojen gevrekliği neden olmaktadır. Bazı durumlarda ise taneler arası GKÇ görülmektedir. Başka bir ifadeyle, alaşımlar ısıtılma işlemine tabi tutulduğunda, malzemelerin tane boyutunda değişiklik ve tane sınırlarında fazların çökmesiyle taneler arası gerilmeli korozyon çatlağı görülebilir. Mg-Al-Zn alaşımlarının tane sınırları boyunca $Mg_{17}Al_{12}$ fazının çökmesinin bir sonucu olarak taneler arası gerilmeli korozyon çatlağı meydana gelir. Zirkonyum içeren magnezyum alaşımlarında pratikte GKÇ'ye rastlanmaz. Zirkonyum içeren alaşımlarda, GKÇ yalnızca akma gerilmesine yaklaşan gerilmelerde oluşur. Hem alüminyum hem de çinko ilaveleri içermeyen magnezyum alaşımları GKÇ'ye karşı en dayanıklı alaşımlardır. pH derecesinin 10,2'den büyük olduğu alkali ortamda magnezyum alaşımlarının GKÇ'ye karşı oldukça dirençli olduğu görülür. Magnezyum alaşımları florürde veya florür içeren çözeltilerde GKÇ'ye karşı dayanıklıdır (Gupta and Ling 2011; Song and Atrens 1999).

Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi

Elektrik ark sprej kaplama yöntemi termal sprej kaplama yöntemlerinden birisidir. 1910'lu yıllarda Dr. Schoop tarafından bulunmuştur. Şekil 13'te gösterildiği gibi sistem tarafından elektrotların ergitilmesi için iki elektrot arasına doğru akım verilir ve elektrik arkı oluşturulur. Oluşturulan bu ark elektrotları ertirir. Elektrotlar doğrudan oluşturulan bu ark tarafından ertitildiği için, elektrik ark sprej kaplama yönteminin ısıtılma verimi, diğer termal sprej kaplama yöntemlerine göre daha yüksektir. Ergitilen elektrotlar, sistemde bulunan atomize edilmiş hava jeti tarafından kaplaması yapılacak malzemeye püskürtülür. Yüksek hızlı hava akışı genellikle 0,8-1,8 m³/dk arasında değişir. Ayrıca hava jetinin bir diğer görevi, ertiyen metali daha küçük parçacıklara ayırarak atomize etmektir. Plazma ve alev püskürtme yönteminden farklı olarak bu yöntemde parçacıklar ark bölgesini terk ettikten sonra hemen soğumaya başlar. Kaplanacak malzemeye herhangi bir alev veya plazma tesiri olmadığından diğer termal püskürtme yöntemlerine göre bu bölgeye daha az sıcaklık tesir eder. Parçacık boyutu ve dağılımı, işlemde kullanılan bazı parametrelere bağlıdır. Akım arttıkça veya voltaj düştükçe, hava akış hızı azaldıkça veya elektrot tel boyutu arttıkça parçacık boyutu artar. Ters durumlarda ise parçacık boyutu azalır (Davis 2004).



Şekil 13. Elektrik ark spray kaplama yönteminin şematik görüntüsü (Davis 2004)

Elektrik iletkenliği bulunan tüm malzemeler kaplama için elektrot malzemesi olarak kullanılabilir. Kullanılan teller, genellikle saf veya alaşımlı metalik (bakır, çinko, alüminyum vb.) malzemeler veya seramik esaslı partikül içeren tellerdir (Pawlowski 2008). Tablo 7’de yaygın olarak kullanılan bazı elektrotların elektrik ark spray püskürtme hızları gösterilmiştir.

Tablo 7. Elektrik ark spray kaplama işleminde kullanılan bazı elektrotlar ve püskürtme hızları (Davis 2004)

Elektrot	g/dk (100A DC)
Alüminyum	45
Pirinç	83
Bakır	83
Molibden	76
Çelik	76
Paslanmaz çelik	76
Kalay	341
Titanyum	23
Çinko	182

Elektrik ark spray kaplama işlemi süresince kaplamaya etki eden temel parametreler; biriktirme oranı, spray mesafesi, püskürtme atmosferi (hava veya inert gaz), atomize gaz türü (hava, nitrojen vs.), gaz basıncı ve gaz akış hızı şeklinde sıralanabilir (Pawlowski 2008). Literatürde magnezyum alaşımlarının korozyon özelliklerini iyileştirme amacıyla yapılan elektrik ark spray kaplama yöntemine dair çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Wei *et al.* (2005) AZ31 magnezyum alaşımına elektrik ark spray kaplama işlemi ile alüminyum kaplamışlardır. Alüminyum kaplı numunenin korozyon direncini tuza daldırma testi ve elektrokimyasal testler ile incelemişlerdir. Kaplamanın yoğunluğunu ve kaplama ile alt tabaka arasındaki bağlanma mukavemetini iyileştirmek için püskürtmeden sonra bir ısıtma işlemi

gerçekleştirmişler. Elektrokimyasal deneylerde hem AZ31 numunesi hem de ısıtım işlem görmüş numunenin korozyon akım değerklerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Sonuç olarak AZ31 alaşıımının korozyon direncinin elektrik ark sprey kaplama ve ısıtım işlem ile büyük ölçüde iyileştğini ifade etmişlerdir.

Ma *et al.* (2008) AZ91D magnezyum alaşıımına elektrik ark sprey kaplama işlemi ile önce saf alüminyum kaplama daha sonra Mg-Al kompozit kaplama yapmışlardır. Kaplama mikro yapısının ve ara yüzün özelliklerini, modern analiz yöntemleri kullanılarak araştırmışlar ve kaplamanın korozyon direncini, kaplama elektrot potansiyeli ve tuz püskürtme deneyi ile test ederek analiz etmişlerdir. Sonuç olarak kaplamanın korozyon direncinin magnezyum alaşıımlı matristen daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Arrabal *et al.* (2009) termal sprey alüminyum kaplama işlemi uyguladıkları AZ31, AZ80 ve AZ91D magnezyum alaşıımlarının, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi ve nötr tuzlu suyun (ASTM B117) bulunduğı ve bağıl nemin yüksek olduğı ortamda korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Klorür içeren ortamda kaplamanın gözenekli yapısından dolayı numunenin galvanik korozyonunu hızlandırdığını belirtmişlerdir. Gözenekli yapısından dolayı numunelere soğuk presleme işlemi yapılmış ve böylece daha az gözenekli yapı ile numunelerde daha iyi bir korozyon davranışı gözlemlenmişlerdir. Yüksek nemli ortamda incelenen numunelerin korozyon direnci tuzlu çözeltilere oranla düşük olmasına rağmen, benzer korozyon özellikleri gösterdiklerini ifade etmişler ve yaptıkları kaplamanın numunelerin korozyon dirençlerini artırdıklarını belirtmişlerdir.

Pardo *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada, AZ31, AZ80 ve AZ91D magnezyum alaşıımlarına uygulanan termal püskürtmeli alüminyum kaplamaların korozyon direncini, %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal ve gravimetrik ölçümlerle incelemişlerdir. Soğuk presleme işleminden sonra da kaplamaların morfolojisindeki ve korozyon davranışındaki değişimi incelemişlerdir. Sonuçlarda, soğuk presleme işlemi yapılmayan numunelerde daha çok gözenekli bir yapı ve düşük korozyon direnci gözlemlerken; soğuk presleme işlemi yapılan numunelerde ise daha az gözenekli bir yapı ve daha iyi korozyon direnci gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Arrabal *et al.* (2010) termal sprey yöntemle Al/SiC kaplaması yaptıkları AZ31, AZ80 ve AZ91D magnezyum alaşıımlarını, nötr tuzlu su (ASTM B117) ve bağıl nemin yüksek olduğı ortamda korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Soğuk presleme işleminin korozyon direncini iyileştirdiğini gözlemlenmişlerdir. Ayrıca yüksek nemli ortamda kaplamaların en dış yüzeyinde Al/SiC ara yüzlerinde korozyon oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Ura-Bińczyk *et al.* (2019) AZ91E magnezyum alaşıma sıcak püskürtme işlemi ile yapılan alüminyum kaplamanın korozyon direncini %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde incelemişlerdir. Sıcak püskürtme işlemini üç farklı nitrojen akış debi değerlerinde (1,0 m³/dk, 1,5 m³/dk ve 2,0 m³/dk) uygulamışlardır. Sıcak püskürtme sırasında nitrojen akış debi hızının azalmasının, kaplamaların gözeneklerinde yaklaşık %2,0'dan %0,5'e kadar bir azalmaya yol açtığını gözlemlemişlerdir. 14 gün boyunca yapılan daldırma testlerinde, alüminyum kaplamanın kaplama yapılan alaşım tabakasını iyi bir şekilde koruduğunu gözlemlemişler ve kaplama ara yüzeyinde herhangi bir korozyona rastlamamışlardır. Yüksek nitrojen akış debi hızının daha fazla gözeneklere ve kaplamada daha çok bozunmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

Anotlama İşlemi

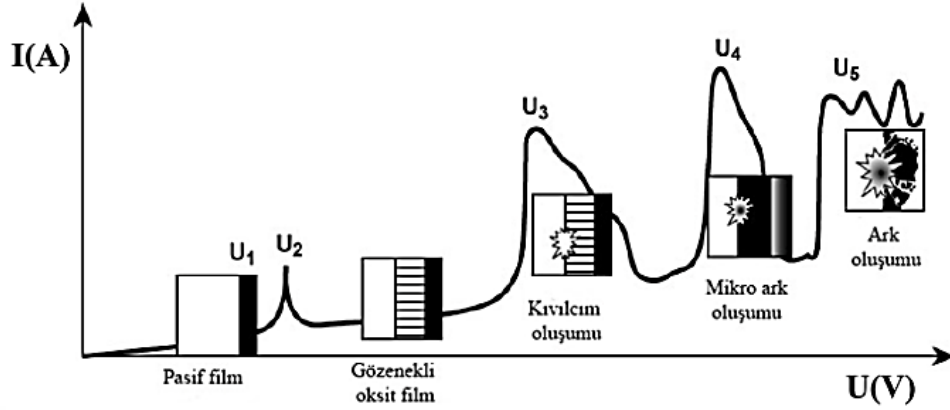
Anotlama işlemi, metaller ve alaşımların yüzeylerine kararlı bir oksit film oluşturarak onların daha dekoratif ve korozyona karşı daha dayanıklı olması için yapılan elektrokimyasal bir işlemdir. Anotlama işlemi aşağıda belirtilen ihtiyaçlara cevap vermelidir.

- Yüzeyi korumak için korozyon ortamlarında dayanıklı olmalıdır.
- Hem bozunma hem kırılma olayı olmadan; yüzey, çizilmeye ve aynı zamanda deformasyona karşı dirençli ve esnek olmalıdır.
- Alt tabakayı korumak adına iletken olmayan bir tabaka bulunmalı, eğer tabaka deforme olursa korozyon hızını ciddi şekilde artıracak galvanik etki yapmamalıdır.
- Başka bir kaplama üzerine yapılması gerekirse yüzeyi pürüzlü olmalıdır.
- Yüzeydeki tüm bölgeyi dolduracak biçimde iyi bir kaplama olmalıdır.

Anotlama, oksit bir film oluşturmak için metale anodik akım veya voltaj uygulanarak yapılan ve en çok tercih edilen işlemlerden bir tanesidir. Genellikle anotlama işlemleri esnasında akım ve voltaj yardımıyla oksidasyon reaksiyonları kontrol edilir. Ayrıca 'ark', 'kıvılcım', 'plazma' ve 'anodik kaplama' gibi bazı farklı terimler ile ifade edilir. Gözenekli morfolojik yapıya ve kimyasal kararlılığa sahip anodik kaplamalar, seramik görünümlüdürler (Song 2011).

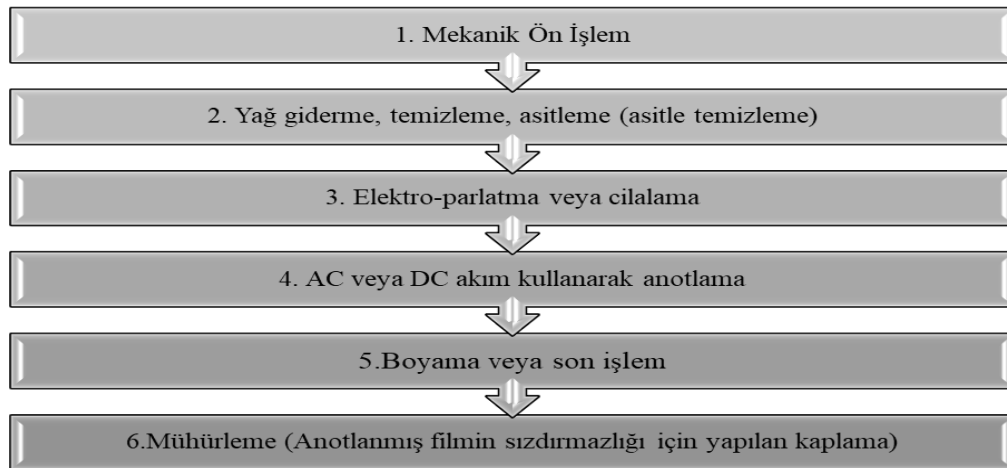
Magnezyum ve alaşımlarının anodik davranışı, uygulanan voltaj veya akımdan büyük ölçüde etkilenir. Genel olarak, uygulanan voltaj- akım, alaşım ve elektrolite bağlı olarak farklı pasif ve aktif durumlar ortaya çıkar. Farklı anotlama voltajı veya akım değerlerinde, anodik kaplamalar farklı oluşum süreçlerine sahiptirler. Şekil 14'te Mg yüzey filminin anotlama voltajına bağlı değişimi şematik olarak gösterilmektedir. Mikro ark adımı ve kıvılcım oluşumu

genellikle yüksek voltaj gerektiren adımlardır. Teknik olarak anotlama işlemi hem voltaj hem de akım değerleriyle kontrol edilebilir. İşlem süresince belli bir voltaj değeri altında, yalıtkan oksit film büyüdükçe, akım düşer (Blawert *et al.* 2006).



Şekil 14. Anotlama işleminde Mg yüzey filminin şematik akım-voltaj grafiği (Blawert *et al.* 2006)

Endüstriyel olarak anotlama işlemi genelde Şekil 15'te gösterildiği gibi altı aşamadan oluşur. Aslında 4. aşama, sürecin temel aşamasıdır. Anotlama işlemi öncesi mekanik işlemler bu aşamadan önceki işlemleri kapsar ve normal yüzeyin aşınması ile bu işlemler gerçekleştirilir. Ardından sıcak alkalin temizleyici ve kromik asit temizleyici çevreye zararsız olan bir kimyasal ile kademeli olarak değiştirilir. Son olarak saf suda durulanır. (Gupta and Ling 2011).

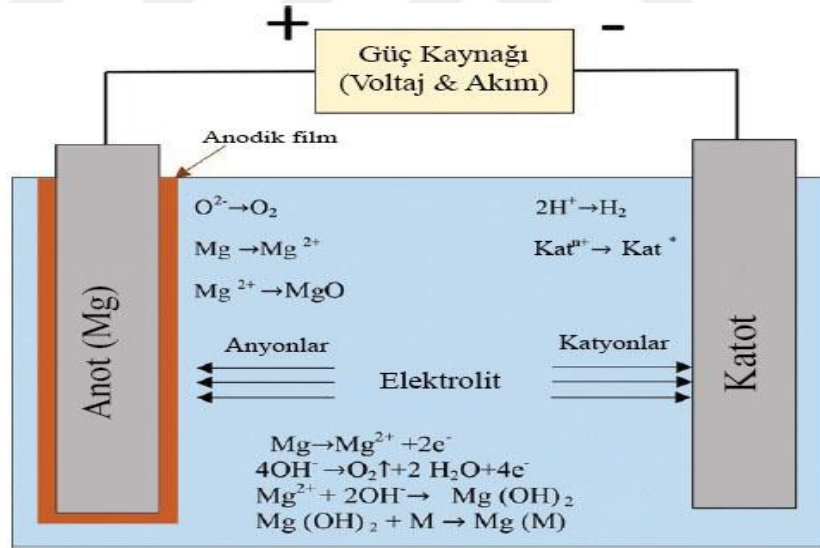


Şekil 15. Anotlama işleminin genel adımları (Gupta and Ling 2011)

Magnezyum alaşımlarının korozyona dirençli olmadığı ve birçok uygulamada yüzey işlemleri veya kaplamalar yapılması gerektirdiği iyi bilinmektedir. Magnezyum alaşımlarını korozyondan korumak için, yüzey dönüştürme işlemleri (kromatlama, fosfatlama), anotlama

(DOW 17, HAE, Anomag, Keronite, Tagnite, Magoxid-Coat) ve galvaniz kaplama (Zn, Cu, Ni, Cr) gibi endüstriyel uygulamalar mevcuttur.

Tipik olarak, anodik oksit tabakalar, işlem süresine ve uygulanan voltajlara bağlı olarak büyür, bu da oksit kalınlığının Şekil 16'da gösterildiği gibi uygulanan gerilime doğrudan bağımlı olduğunu gösterir. Bariyer tipi anodik oksit filmlere sahip olan metaller ve alaşımlar için, anodik polarizasyon altında elektron iletimini bloke eden sulu çözeltilerde yüksek voltajda anotlama işlemi yapılabilir. Metal yüzeyindeki iletken oksit tabakaları üzerinde anotlama işlemi ile büyüyeabilen kalın oksitler, uygulanan gerilim ile sınırlandırılır. Magnezyum elektro kimyasal bir iletkenliğe ve potansiyele sahip olduğundan anotlama işleminde elde edilen potansiyel değerleri temel olarak elektrolitin kimyasal bileşimine bağlıdır. Elektrolit malzemelerin büyüyen oksit / hidroksit tabakaları ile birleşmesi, korozif iyonlara karşı daha yüksek engelleme yeteneğine sahip oksit tabakaları oluşturabilir. Ancak kalın ve karmaşık filmler magnezyum alaşımlarının anotlama işlemi için bir sorun teşkil eder. Diğer yandan oluşan anodik film için düşük bir Pilling-Bedworth (bir metalin oksidinin spesifik hacminin, aynı metalin saf halinin spesifik hacmine oranı) oranı elde edilir. Bu durum, oluşturulan anodik film üzerinde bir iç gerilime ve ardından çatlak kusurlarına neden olabilir.



Şekil 16. Magnezyum alaşımlarında anotlama işleminin şematik mekanizması (Hamouda *et al.* 2017)

Gözeneklerin derecesi ve oksit filmin kalitesi, anotlama işleminde uygulanan parametrelerin ayarlanmasıyla geliştirilebilir. Bu parametreler; elektrolitin kimyasal bileşimi, anotlama voltajı, akım ve zamandır. Anotlama işlemi farklı kimyasal banyolarda (örneğin bir alkali elektrolit, potasyum hidroksit, fosfat, florür veya silikat içeren banyolarda) gerçekleştirilebilir. Elektrolitin kimyasal bileşimi, yalnızca yüksek voltajda anotlama işlemini

kolaylaştırmak için değil, aynı zamanda işlem sırasında magnezyum çözünmesini azaltmak için de kritik bir rol oynar. Bu anodik filmleri üretmek için çok sayıda patentli yöntem ve teknikler vardır. Temelde metal yüzeyler üzerindeki oksit-hidroksit filmlerini kalınlaştırmak için kullanılan anodizasyon yaklaşımlarına ek olarak, nano-gözenekli oksit tabakaları elde etmek için de özel anodizasyon yaklaşımları da araştırılmıştır. Tablo 8’ de bazı magnezyum alaşımlarının, farklı elektrolit çözeltilerde yapılan anotlama işlemine ait bazı parametreler gösterilmiştir (Hamouda *et al.* 2017).

Tablo 8. Magnezyum alaşımlarına farklı elektrolitlerde uygulanan anotlama işlemi ve elektrokimyasal korozyon parametreleri (Hamouda *et al.* 2017)

Alaşım	Elektrolit	Kalınlık	Tabaka yapısı	I_{kor}	E_{kor}
AZ91D	PEO (NaOH)+(NaPO ₃) ₆ + Ca(H ₂ PO ₂) ₂ çözeltisi	3-5µm	Mg, Al, P ve Ca az kristalize edilmiş MgO	x	x
	PEO (Na ₂ SiO ₃) + (NaPO ₃) ₆ + Ca(H ₂ PO ₂) ₂ çözeltisi	8-10µm	Mg, Al, Si, P ve Ca, kristalize edilmiş Mg ₂ SiO ₄ MgO	x	x
AM50	PEO (CaOH ₂) + Na ₃ PO ₄	20-70µm	MgO, Mg ₃ (PO ₄) ₂ ,	x	x
	Farklı kütle oranlarında çözelti		amorf Ca-fazları, CaH(PO ₄) ₂ , CaO ₂		
AZ91	NaOH	1-2µm	MgO ve Mg	x	x
ZK60	100 g/l NaOH + 20 g/l Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O + 50 g/l C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ .2H ₂ O + 60 g/l Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O	10-60µm	MgO ve Mg ₂ SiO ₄	1,829x10 ⁻² (mA/cm ²)	-1,46
AZ31	SBF çözeltisi	5-25µm	MgO, Mg ve amorf apatit	103/ 0,9 (µA/cm ²)	-1,39/-1,45
AZ31	ZrO ₂ -NPs	x	Mg, MgO, ZrO ₂ , Mg ₂ Zr ₅ O ₁₂	-1,46/-1,38	2,796/1,9
AZ31	(SBF çöz+ HA) daha sonra 5 M NaOH de 60°C 2s bekletilmiş hidrotermal çöz.	x	Mg, MgO, CaO ve HA	7,6 /1025 (nA/cm ²)	1,52/1,31

Teorik araştırmalara baktığımızda, magnezyum alaşımlarının anotlama işlemine etkileyen temel parametrelerin, yüzeyin morfolojisi ve mikro yapısı, anotlama işlem süresi, akım, voltaj, sıcaklık ve çözelti banyosunun kimyasal bileşimi gibi birçok etkenin belirleyici olduğu görölmektedir. Ayrıca literatür incelendiğinde, elektrolit kullanımında yaygın olarak iki elektrolit türünün kullanıldığı, bunların silikat ve fosfat temelli çözeltiler olduğu görölmektedir. Literatürde magnezyum alaşımlarının anotlama işlemine dair çalışmalar incelenerek aşağıda özetlenmiştir.

Fukuda and Matsumoto (2004) AZ91D alaşımına 3 M KOH çözeltisinde, 0,5-5 M Na_2SiO_3 ekleyerek ve eklemeyen düşük potansiyel elektroliz ile anotlama işlemi yapmışlardır. Sabit 4 V potansiyelle 3 M KOH çözeltisinde Na_2SiO_3 eklenerek elde edilen kaplamanın, Na_2SiO_3 eklenmeden elde edilen kaplamaya göre daha üniform ve kalın bir kaplama olduğunu belirtmişlerdir. 0.1 M KCl çözeltisindeki anodik polarizasyon testinde, Na_2SiO_3 'le oluşturulan çözeltilerde filmlerin korozyon direncinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Chai *et al.* (2008) silikat içeren NaOH çözeltisinde AZ31 magnezyum alaşımına anotlama işlemi uygulamış ve anodik filmin yüzey morfolojisini ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Alkaline ve sodyum silikat çözeltileri ayrı ayrı eklenerek yapılan deneylerde, korozyon direncinin sodyum silikat temelli çözeltide daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Barbosa and Knörschild (2009) 0,1 M, 1 M ve 4 M NaOH içeren çözeltilerde AZ91 magnezyum alaşımına 30 V ve 90 V aralığında değişen ve 20 mA/cm² ile 1500 mA/cm² aralığındaki akım yoğunluklarında anotlama işlemi yapmışlar, ardından anodik filmi elektron mikroskobu, XRD ve mikro-Raman spektroskopisi ile incelemişlerdir. Akım yoğunlukları düşük iken, anodik filmin $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'den kaynaklanan koruyucu bir film tabaka içerdiiğini ve MgO tabakasından kaynaklanan gözenekli bir yapıda olduğunu tespit etmişlerdir.

Yue and Hua (2010) MAO yöntemiyle Na_2SiO_3 elektroliz çözeltisinde farklı akım yoğunluklarında (3, 4, 5 A/cm²) oksitleme işlemi yapmışlardır. X ışını kırınım yöntemiyle magnezyum alaşımlarında oluşan oksit kaplamaların temel olarak MgO ve MgAl_2O_4 fazlarından oluştuğunu ifade etmişlerdir. Kaplamaların yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğünü konfokal lazer taramalı mikroskobu (CLSM) ile incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, artan sabit akımla yüzey sertlik değerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda, 5 A/cm² akım yoğunluğunda Na_2SiO_3 elektrolitinde üretilen MgO kaplamasının en iyi korozyon direncini gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Srinivasan *et al.* (2011) döküm AZ31 magnezyum alaşımını PEO yöntemiyle fosfat ve silikat temelli alkalın elektrolitte kaplamışlardır. Düşük deformasyon hızı testi (SSRT) ile ASTM D1384 çözeltisinde kaplamanın GKÇ etkisini incelemişler ve PEO kaplamanın iyi bir korozyon direnci sağlarken, kaplama yapılmayan ve PEO kaplanmış AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyona karşı hassas olduklarını belirtmişlerdir.

Durdu and Usta (2012), farklı akım yoğunluklarında sodyum silikat ve sodyum fosfat içeren çözeltilerde mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemiyle kaplanan ticari saflıktaki magnezyum alaşımının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca X-Ray ve SEM mikroskobunda yüzey morfolojisini incelemişlerdir. Ayrıca kaplamanın yüzey sertliğini ölçmüşler ve aşınma direncini de incelemişlerdir. Sodyum silikat çözeltisinde MAO yöntemiyle oksitlenmiş kaplamanın ortalama kalınlığının, sodyum fosfat çözeltisine göre yüksek çıktığını ifade etmişlerdir. Mikro ark ile oksitlenmiş kaplamanın ortalama sertliklerinin sodyum silikat çözeltisi için 260 HV ile 470 HV arasında, sodyum fosfat için ise 175 HV ile 260 HV değerlerinde olduğunu tespit etmişlerdir. Sodyum silikat çözeltisinde yapılan kaplamaların adhezyon mukavemeti ve aşınma dirençlerinin, sodyum silikat çözeltisinde yapılan yüksek sertlikteki kaplamalar nedeniyle sodyum fosfat çözeltisindeki kaplamalara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang *et al.* (2013) anotlama işlemi ile AZ31 alaşımı üzerine alkalın çözelti içerisinde 500 nm çapındaki süper ince alüminyum oksit (Al_2O_3) parçacıklar içeren kompozit anodik kaplama ve Al_2O_3 parçacıkları içermeyen anodik kaplama işlemi yapmışlardır. Alkalın çözeltisine katılan Al_2O_3 parçacıklarının çözelti içerisinde tamamen dağılmasını sağlamak için az miktarda damıtılmış su ve yüzey aktif madde ilave etmişlerdir. Elde edilen kaplamaların mikro yapısını ve yüzey morfolojisini; XRD ve SEM cihazlarında incelemişlerdir. Kaplanmamış AZ31 alaşımı alt tabakasının ve kaplanan anodik kaplamaların korozyon direncini, %3,5 NaCl çözeltisinde potansiyodinamik polarizasyon testleri ile incelemişlerdir. Numunelerin aşınma direncini değerlendirmek için, sürtünme ve aşınma testleri yapmışlardır. Sonuç olarak kompozit oksit kaplamanın, Al_2O_3 nano partikülleri içermeyen oksit kaplamaya göre daha iyi bir korozyon direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Al_2O_3 nano partiküller içeren kompozit oksit kaplamanın mikro sertliğinin 358 HV değerine kadar ulaştığını belirtmişlerdir. Al_2O_3 nano partikülleri içeren kompozit oksit kaplamanın, Al_2O_3 nano partikülleri içermeyen oksit kaplamaya göre daha iyi korozyon direnci ve aşınma önleyici özellikleri gösterdiğini ifade etmişlerdir.

A. M. Kumar *et al.* (2015) AZ31 alaşımına plazma elektrik oksidasyon (PEO) yöntemi ile çift kaplama yapmışlar ve kaplama ana malzemesinin yüzeyini ve korozyon direncini incelemişlerdir. Bu amaçla AZ31 numuneleri fosfat ve silikat temelli elektrolitlerde PEO işlemine tekli ve çiftli olarak ayrı ayrı tabi tutmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile silikat elektrolit içinde yapılan PEO kaplamadaki gözenek sayısının diğerklerinden fazla olduğunu göstermişlerdir. PEO kaplamanın X ışını kırınımı (XRD) analizi ile PEO işlemine bağlı olarak kaplamanın farklı miktarlarda Mg_2SiO_4 , $Mg_3(PO_4)_2$ ve MgO ’ dan oluştuğunu belirtmişlerdir. AZ31 magnezyum alaşımı ile karşılaştırıldığında, her iki PEO kaplamanın %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon potansiyel değerini (E_{kor}) yaklaşık 250- 400 mV değerlerinde pozitif olarak artırdığını ve korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) değerini ise 3-4 mertebe düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Yapılan tüm gözlemler sonucunda, çift PEO kaplamanın, tek PEO kaplamaya göre daha iyi bir korozyon direnci sağladığını gözlemlemişlerdir.

Vatan *et al.* (2016) PEO işlemi uygulanmış AZ31 magnezyum alaşımı üzerine silisyum karbür (SiC) nano partiküller içeren oksit kaplamanın, mikro yapısal, tribolojik ve elektrokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. SiC nano partikülleri içeren ve içermeyen alüminyum silikat ve fosfat esaslı elektrolitlerde, farklı akım yoğunluklarında PEO işlemi gerçekteşirmişlerdir. Kaplamaların mikro yapısı ve kimyasal bileşimini, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişler; kaplanan numunelerin elektrokimyasal davranışını ise potansiyodinamik polarizasyon testi ve ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi içinde elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri ile araştırmışlardır. Alümina-silikat esaslı elektrolitten üretilen kaplamaların yüksek sertliğe sahip olduklarını gözlemlemişler ve fosfat esaslı elektrolitten elde edilen kaplamalara göre düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca silisyum karbür içeren kaplamaların, kaplanmamış AZ31 alaşımı ve silisyum karbür içermeyen kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, alümina-silikat esaslı elektrolitten elde edilen kaplamaların, kimyasal kararlılıklarının daha yüksek olması ve mikro yapısı gibi nedenlerden dolayı, daha iyi korozyon direncine sahip olduklarını ifade etmişlerdir.

Asgari *et al.* (2017) elektrolit karıştırma hızı ve nano partikül konsantrasyonunun, AZ31 alaşımı üzerinde plazma elektrolit oksidasyon ile imal edilen kaplamaya ilave edilen alümina nano partiküllerin emilimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Nano kompozit kaplamanın mikro yapısı, korozyon direnci ve aşınma davranışını taramalı elektron mikroskobu (SEM),

potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri ile analiz etmişlerdir. Sonuçlarda, en yüksek miktarda nano partikül absorpsiyonunun 100 rpm karıştırma hızında gerçekleştiğini tespit etmişler, ancak nano partikülleri anot yüzeyinden uzaklaştıran elektrolitin yüksek türbülansı nedeniyle daha yüksek karıştırma hızlarında absorpsiyon hızının azaldığını belirtmişlerdir. Elektrolit içerisindeki alümina konsantrasyonunun, alümina nano partiküllerin absorpsiyonu üzerindeki etkisini analiz etmişler ve elektrolit içerisindeki nano partikül konsantrasyonunun artırılmasıyla, nano partiküllerin absorpsiyonunun 30 g/L seviyesine kadar arttığını daha sonra doymuş seviyeye ulaştığını ifade etmişlerdir. Ayrıca en iyi korozyon direncini ve en düşük aşınma hızını, 30 g/L alümina nano partikül konsantrasyonunda, 100 rpm karıştırma hızında elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Cui *et al.* (2017) MAO işlemi ile AZ31 alaşımına poly metil trimetoksisilan (PMTMS) hibrit kaplama yapmışlar ve kaplamaların yüzey morfolojileri, kimyasal bileşimleri ve korozyon dirençlerini SEM, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), XRD, elektrokimyasal ve hidrojen çıkışı ölçümleri kullanarak incelemişlerdir. MAO kaplamanın PMTMS filmi ile verimli bir şekilde kapatıldığını gözlemlemişlerdir. MAO-PMTMS kaplamasının kendi kendini onarma özelliğinden dolayı AZ31 alaşımının korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Yang *et al.* (2018) mikro gözenekli, MAO seramik kaplamanın morfolojik özelliklerini göz önüne alarak, AZ31 magnezyum alaşımının yüzeyine MAO kaplamanın yanında elektrostatik toz püskürtme tekniği (EPS) ile çift katmanlı kompozit kaplama işlemi uygulamışlardır. Dupleks kaplama yapılan numuneleri, sadece MAO ve EPS işlemi ile kaplanmış olan numunelerle ayrı ayrı karşılaştırmışlardır. İncelemeler sonucunda, AZ31 alaşımının korozyon direncinin, mükemmel bağlama kuvvetine sahip MAO-EPS kaplaması ile önemli ölçüde iyileştiğini belirtmişlerdir.

Khiabani *et al.* (2018) kalsiyum florür (CaF_2) içeren fosfat esaslı elektrolit kullanarak plazma elektrolit oksidasyon (PEO) yöntemi ile, AZ91 magnezyum alaşımı üzerine modifiye edilmiş oksit tabakası hazırlamışlardır. Oksitlenmiş AZ91 magnezyum alaşımının korozyon davranışını vücut sıvısı (SBF) çözeltisinde simülasyon etmişler ve potansiyodinamik polarizasyon testleri ile değerlendirmişlerdir. Elektrolite CaF_2 ilavesinin; yüzey gözeneklerinde, oksit tabakası kalınlığında ve MgF_2 fazının oluşumundan kaynaklanan korozyon hızında önemli bir düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testi ile, oksit kaplamanın dış gözenekli ve iç bariyer kısımlarının direncinin sırasıyla 3 ve 41 kat arttığını ifade etmişlerdir.

Muhaffel and Cimenoglu (2019) fosfat ve alüminat esaslı elektrolitlerin MAO kaplamalarının korozyon ve aşınma performansları üzerindeki etkisini göz önünde bulundurarak, AZ91 magnezyum alaşımını, 5 ve 10 g/L konsantrasyonlarında Na₃PO₄ eklenmiş ve eklenmemiş alüminat esaslı elektrolitte MAO işlemine tabi tutmuşlardır. Alüminat esaslı elektrolitte yapılan MAO kaplamanın, AZ91 alaşımını beklenildiği gibi korozif ortama karşı (%0,9 ağırlık. NaCl) iyi bir koruma sağlayamadığını belirtmişlerdir. MAO kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü ve kalınlığını değiştirmeden, alüminat esaslı elektrolite 5 g/L Na₃PO₄ eklenmesinin, kimyasal ve mekanik bozunmalara (korozyon-aşınma) karşı yeterli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Xue *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, döküm yöntemiyle imal edilmiş olan AZ31B alaşımına MAO işlemi uygulamışlar ve korozyon performansını incelemişlerdir. 5-10 dk boyunca uygun akım değerlerinde yapılan kaplamanın, uzun süreli korozyon ve yorulmalı korozyon davranışlarını incelemişlerdir. MAO kaplamanın, korozyon direncini artırdığını belirtmişler; ancak yüzeyindeki mikro gözenekler ve çatlaklardan ötürü yorulmalı korozyon ömrünün %55 azaldığını ifade etmişlerdir.

He *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, MAO yöntemi ile kaplama yapılan AZ31 alaşımının ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde düşük deformasyon hızı deney yöntemi ile gerilmeli korozyon çatlağını incelemişlerdir. MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin gerilmeli korozyon çatlağı duyarlılığının, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde belirgin bir şekilde iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Ek olarak yapılan kaplamanın numunenin kırılma mekanizması üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmadığını gözlemlemişler ve bunu malzemenin doğal yapısı ve deney için hazırlandığı ortama bağlamışlardır.

Liu *et al.* (2020) sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yapılmış AZ31 alaşımı üzerindeki dubleks kaplamanın korozyon direncini elektrokimyasal testler ile incelemişlerdir. Yapılan dubleks kaplamaya ara yüzey olarak MAO kaplaması yapmışlar ve korozyon direncini artırmak için FSW bağlantısına üst tabaka olarak elektriksiz nikel (EN) kaplama işlemi uygulamışlardır. Deney sonuçlarında, FSW bağlantısının farklı bölgelerindeki heterojen mikro yapının yerel korozyona karşı homojen olmayan duyarlılıklara neden olduğunu belirtmişlerdir. Isının tesiri altında kalan bölgenin (ITAB), ikinci fazın korozyon direncini azalttığını gözlemlemişlerdir. Mikro yapının farklı bölgelerde farklılık göstermesine rağmen, dubleks kaplamanın morfolojisinin FSW bağlantısının farklı bölgelerinde önemli bir farklılık göstermediğini belirtmişlerdir. En üstteki EN kaplamanın parçaları orta tabaka olan gözenekli MAO kaplamanın içinde gömülü olduğu için, bu iki kaplamanın mekanik kenetlenme yöntemi ile

birbirine bağlandığını ifade etmişlerdir. Bu işlemten sonra korozyon potansiyelinin yükseldiğini ve korozyon akım yoğunluğunun da azaldığını göstermişlerdir. Sonuç olarak, dubleks kaplamanın FSW bağlantısına göre daha iyi bir korozyon direnci sağladığını belirtmişlerdir.

Literatür incelendiğinde, magnezyum alaşımlarının korozyon dirençleri üzerine hem elektrik ark sprej kaplama hem de anotlama işlemine ait çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Ancak elektrik ark sprej kaplama üzerine anotlama işlemiyle kaplama yapılarak elde edilen çift kaplamaların, magnezyum alaşımlarının korozyon direncine etkisi üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak; AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına elektrik ark sprej kaplama yöntemi ile alüminyum kaplanmış ve bunun üzerine anotlama işlemi ile yeni bir kaplama daha yapılarak çift kaplama elde edilmiş, böylece bu alaşımların korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Deneyisel çalışmalarda Şekil 17’de ağırlıkça kimyasal bileşimleri gösterilen ve Yıldırım Ticaret A.Ş’den temin edilen AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları kullanılmıştır.

AZ31	AZ61	AZ91
• Al (3,069) • Zn (1,133) • Mn (0,486) • Fe (0,019) • Cu (0,001) • Si (0,131) • Mg (Kalan)	• Al (6,242) • Zn (1,246) • Mn (0,369) • Fe (0,029) • Cu (0,001) • Si (0,137) • Mg (Kalan)	• Al (9,231) • Zn (1,348) • Mn (0,286) • Fe (0,012) • Cu (0,004) • Si (0,148) • Mg (Kalan)

Şekil 17. AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

Elektrik Ark Sprey Kaplama İşlemi

Elektrik ark sprej kaplama işleminde Şekil 18’de gösterilen Emin Metal firmasına ait Oerlikon Metco Flexi Arc 300 model elektrik ark sprej kaplama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 18. Elektrik ark sprej kaplama sistem ünitesi (Çatar 2019)

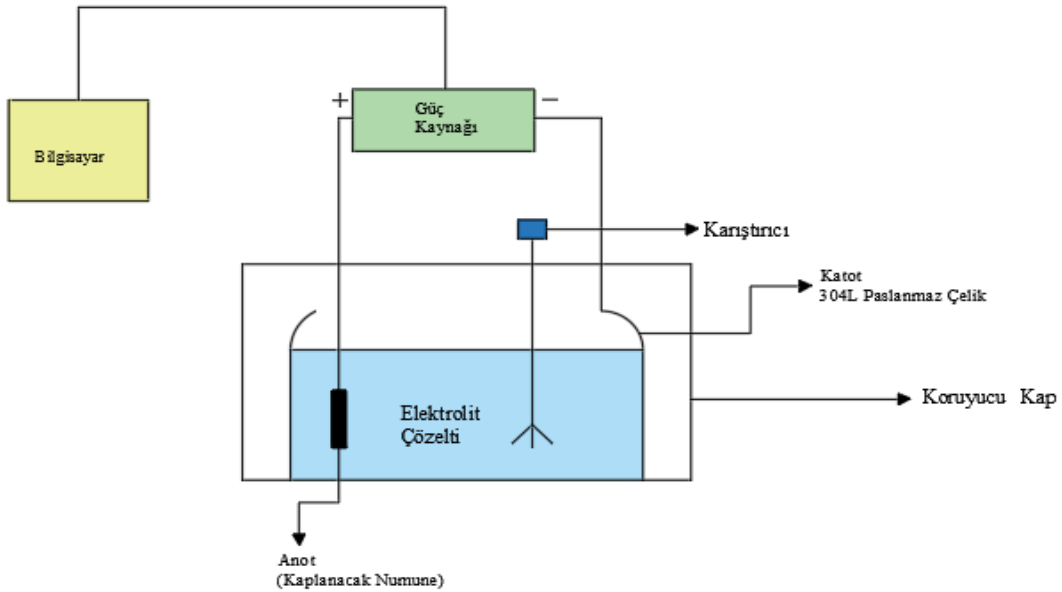
Bu işlemde AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına ticari saflıkta 1,6 mm kalınlığında alüminyum elektrot kullanılarak kaplama yapılmıştır. Sistemde 300 A akım ve 18-42 V gerilim aralığında 12 adımlı hava soğutmalı bir güç kaynağı kullanılmıştır. Kaplamalar 26 V’den 29 V’ye kadar değişen gerilim aralıklarında ve 60 A’dan 70 A’ya kadar değişen akım aralıklarında

gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde hava basıncı 6 bar olarak ayarlanmıştır. Püskürtme mesafesi ise 150 mm ayarlanarak işlem gerçekleştirilmiştir.

Anotlama İşlemi

Elektrik ark sprej kaplama işlemi uygulanmış olan numunelere daha sonra anotlama işlemi uygulamak için Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 600 V gerilim, 2,6 A akım, 1560 W güç kapasitelerine sahip Keysight N5772A marka DC güç kaynağı kullanılmış olup, güç kaynağı LabVIEW programının ara yüzü yardımıyla kontrol edilmiştir.

Anotlama işleminde kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 19’da gösterilmiştir. Deney düzeneğinde; bilgisayar ile kontrol edilebilen bir güç kaynağı, katot görevi gören 5 l hacminde bir kap (304L paslanmaz çelikten imal edilmiş), karıştırıcı ve güvenlik amacıyla ahşaptan yapılmış elektriği iletmeyen koruyucu bir kap bulunmaktadır.



Şekil 19. Anotlama işleminde kullanılan deney düzeneğinin şematik görüntüsü

Elektrik ark sprej kaplama işleminden sonra tüm numunelere 10 g/l Na_2SiO_3 + 5 g/l KOH bileşimine sahip silikat temelli çözeltide anotlama işlemi uygulanmıştır. Anotlama işlemleri $0,140 \text{ A/cm}^2$ sabit akım modunda ve 400-460 V gerilim aralığında son voltaj değerine kadar silikat temelli çözeltide yapılmıştır. Elektrik ark sprej kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına ait numunelerin gösterimi Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Elektrik ark spreyl kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış alaşımlara ait numunelerin gösterimi

Numunenin Gösterimi	Yapılan İşlem
AZ31-Al	Elektrik ark spreyl kaplama işlemi ile Al kaplama yapılmış AZ31 alaşımı
AZ61-Al	Elektrik ark spreyl kaplama işlemi ile Al kaplama yapılmış AZ61 alaşımı
AZ91-Al	Elektrik ark spreyl kaplama işlemi ile Al kaplama yapılmış AZ91 alaşımı
AZ31-Al-O	Elektrik ark spreyl kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış AZ31 alaşımı
AZ61-Al-O	Elektrik ark spreyl kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış AZ61 alaşımı
AZ91-Al-O	Elektrik ark spreyl kaplama ve anotlama işlemleri uygulanmış AZ91 alaşımı

XRD Analizleri

AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına elektrik ark spreyl kaplama işlemiyle yapılan alüminyum kaplamaların XRD analizleri ile hem elektrik ark spreyl kaplama hem de anotlama işlemi yapılan çift kaplamaların XRD analizleri ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışmalar Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan D8 DISCOVER model cihaz ile yapılmıştır. XRD analizleri 2 derece/dakika tarama hızında ve $2\theta=20^{\circ}-80^{\circ}$ tarama aralığında yapılmıştır.

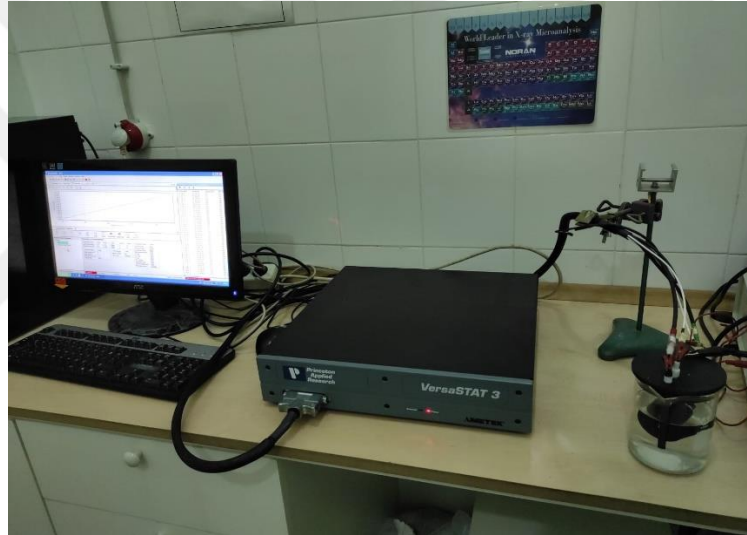
SEM Analizleri

Elektrik ark spreyl kaplama işlemi ile yapılan alüminyum kaplamalar ve sonrasında anotlama işlemi ile yapılan çift kaplamaların yüzey görüntüleri FEI Nova NanoSEM 450 taramalı elektron mikroskobu cihazında incelenmiştir. Numunelerin kimyasal bileşimlerini incelemek amacıyla SEM cihazına bağlı olarak çalışan EDAX Element marka EDS sistemi kullanılmış ve yapılan EDS analizlerinde çalışma voltajı 10 keV olarak ayarlanmıştır.

Korozyon Deneyleri

Tüm numunelerin korozyon deneyleri Şekil 20’de gösterilen AMETEK firmasına ait VersaSTAT 3 potansiyostat cihazı ve 3 elektrotlu bir korozyon hücresinde gerçekleştirilmiştir. Referans elektrot olarak Ag/AgCl₂, karşıt elektrot olarak grafit çubuk ve çalışma elektrotu olarak ise numuneler kullanılmıştır.

İlk olarak numunelerin korozyon ölçümlerini gerçekleştirmek için ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde açık devre potansiyeli (OCP) ölçülmüş ve denge potansiyeline ulaşılmıştır. Numuneler, denge potansiyelinin -0,2 V aşağısındaki potansiyel değerinden maksimum 2 V değerine kadar 1 mV/s tarama hızında polarize edilmiş ve potansiyodinamik polarizasyon eğrileri kaydedilmiştir.



Şekil 20. VersaSTAT 3 potansiyostat cihazı ve korozyon hücresi

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Elektrik Ark Sprey Kaplama İşlemi

AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına elektrik ark sprey kaplama işlemi ile saf alüminyum kaplanmış ve Şekil 21’de gösterildiği üzere oldukça homojen ve aynı zamanda pürüzlü bir kaplama elde edilmiştir.



Şekil 21. Elektrik ark sprey kaplama yöntemiyle Al kaplanan numunelerin yüzey görüntüleri

Anotlama İşlemi

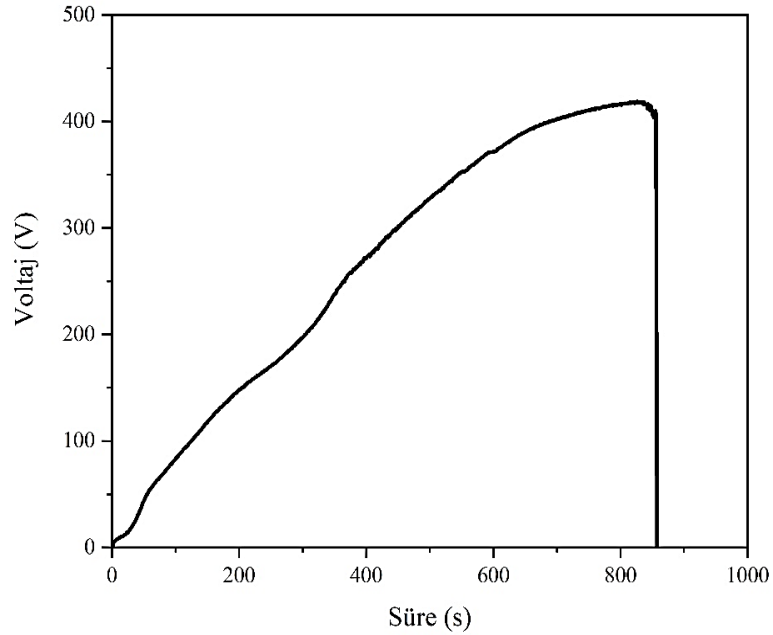
AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına elektrik ark sprey kaplama işlemi ile saf alüminyum kaplama yapıldıktan sonra, anotlama işlemi ile bu kaplamaların üzerine 0,140 A/cm² sabit akım yoğunluğunda silikat esaslı çözeltide (10 g/l Na₂SiO₃ + 5 g/l KOH) yeni bir kaplama yapılmıştır. Anotlama işlemi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 22’de verilmiştir. Görüldüğü üzere silikatlama işlemi sonrası koyu gri renkte kaplamalar elde edilmiştir.



Şekil 22. Anotlama işlemi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri

Yapılan tüm anotlama işlemlerine ait voltaj-zaman grafiği Şekil 23’te gösterilmiştir. Bu işlem süresince ilk kıvılcımlar 200-230 V değerleri arasında gözlemlenmiştir. Bu değer aralığında sayıca fazla ve düşük şiddette olan kıvılcımlar, voltaj değeri 350-370 V aralığına ulaşınca, sayıca daha az ve daha yüksek şiddette meydana gelmişlerdir. Kıvılcımlar 380-420 V

aralığında bir noktada toplanmaya başlamış ve anotlama işlemi tamamlanmıştır. Kıvılcımların tek bir noktada toplanma süresi her bir numune için farklılık göstermiştir.



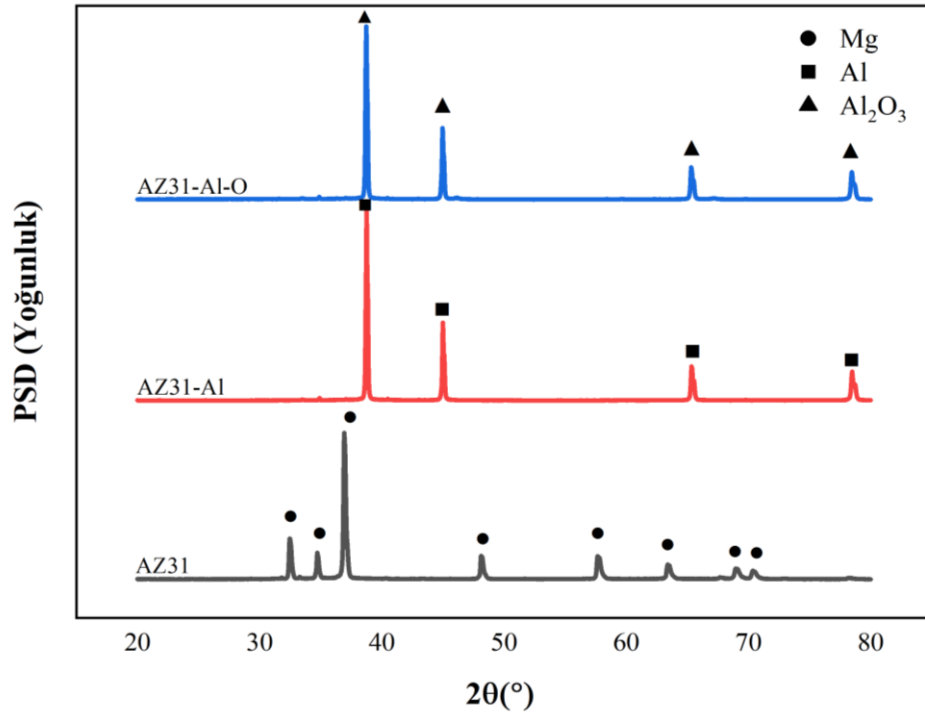
Şekil 23. Anotlama işlemlerine ait voltaj-zaman grafiği

Kaplamaların XRD Analizleri

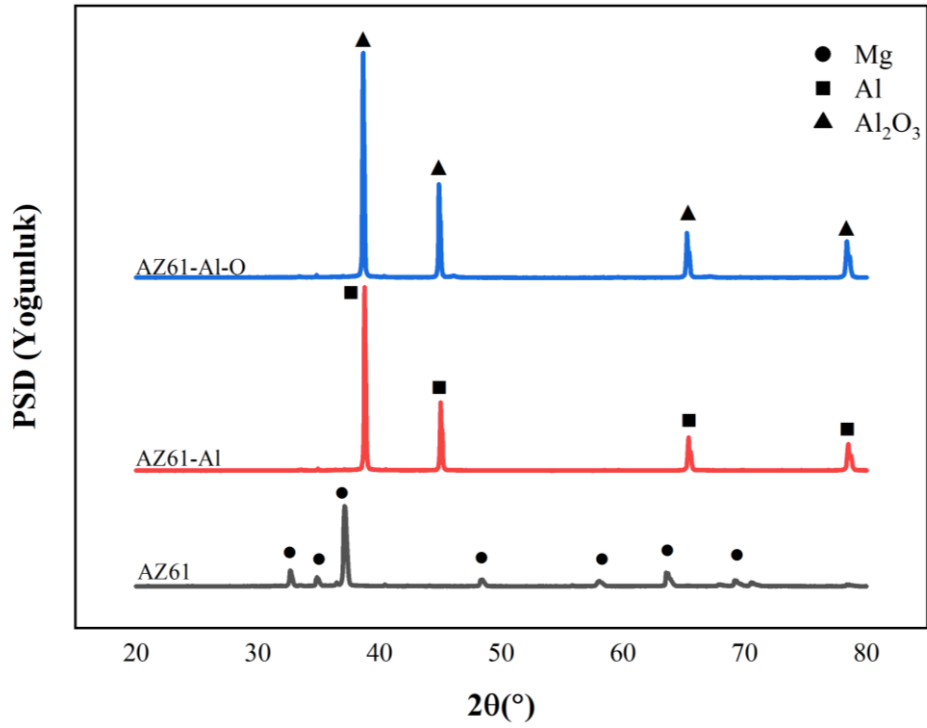
Numunelerin korozyon özelliklerini belirleyebilmek için kaplamanın faz yapısını belirlemek önemlidir. Elektrik ark sprej kaplama ve anotlama işlemleri uygulanan AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına ait numunelerin XRD analizleri yapılmış ve XRD grafikleri Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26’da gösterilmiştir.

Elektrik ark sprej kaplama işlemiyle saf alüminyum kaplanarak elde edilen AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerinin faz yapısına ait XRD analizleri incelendiğinde, bu numunelerde farklı açılarda yüksek alüminyum piklerine rastlanmıştır. Kaplanmamış numunelere ait piklere rastlanmamıştır. Elde edilen pikler literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumludur (Arrabal *et al.* 2009; Arrabal *et al.* 2010; Pardo *et al.* 2009).

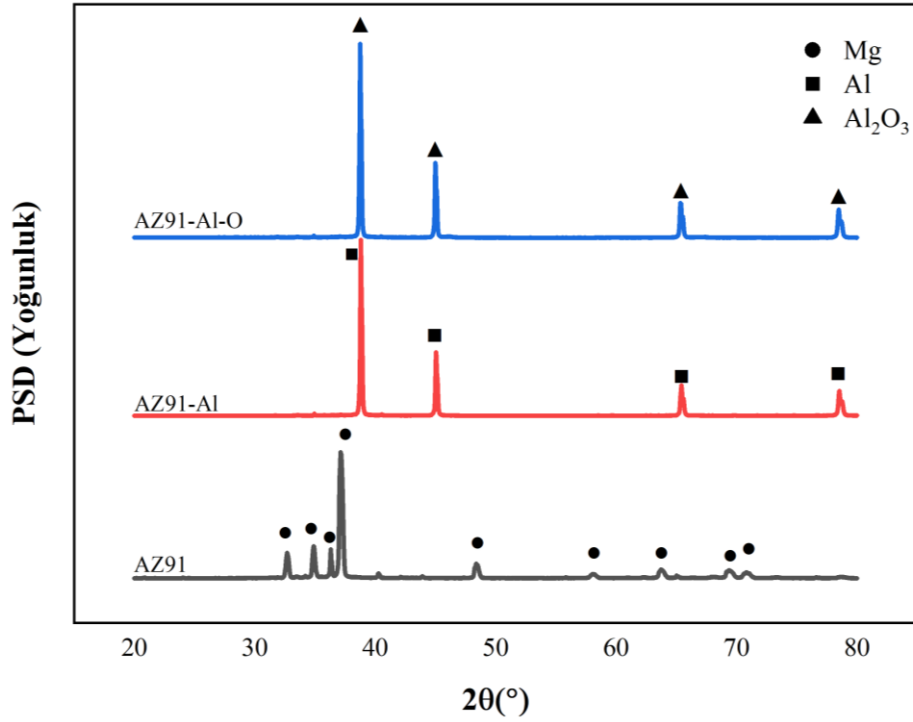
Elektrik ark sprej kaplama işlemi ile elde edilen alüminyum kaplama üzerine silikat temelli çözeltide gerçekleştirilen anotlama ile elde edilen kaplamaların faz yapılarına ait XRD analizleri de Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26’da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, yapılan bu çift kaplamalar sonrasında Al_2O_3 fazına ait pikler görülmektedir. Elde edilen bu pikler literatür ile uyumludur (Li *et al.* 2020; Shao *et al.* 2018; Yang and Zhou 2014).



Şekil 24. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ31 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği



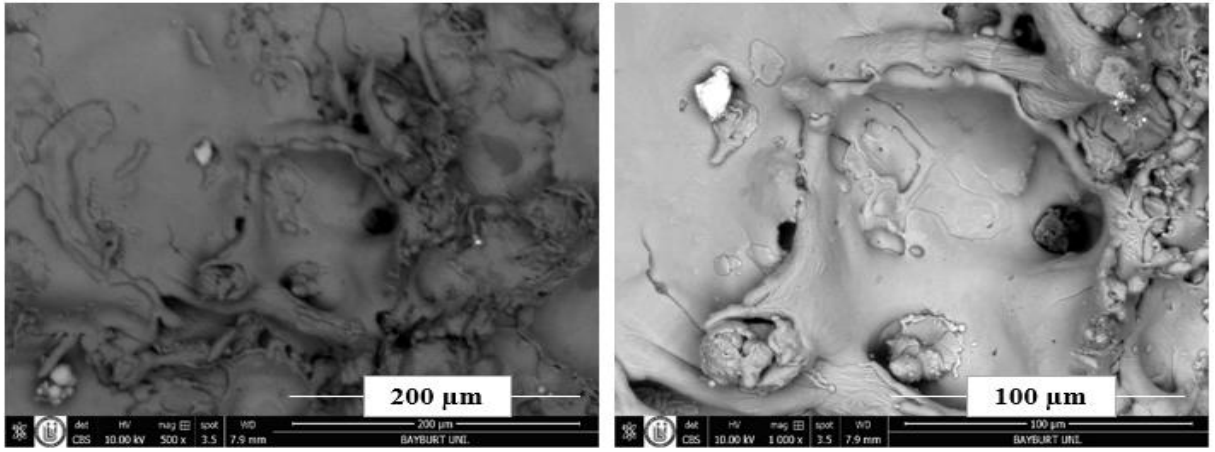
Şekil 25. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ61 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği



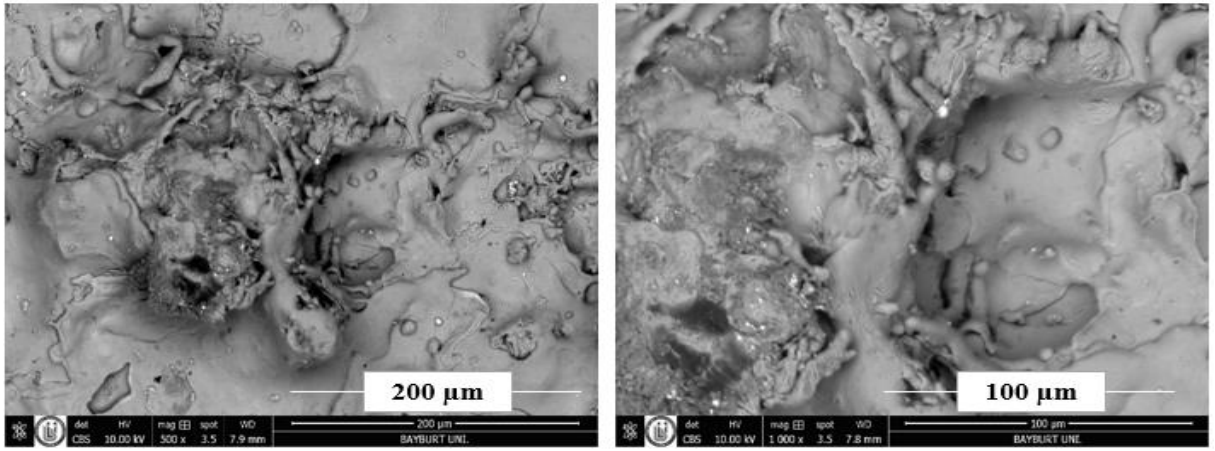
Şekil 26. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ91 alaşımına ait numunelerin XRD grafiği

Kaplamaların SEM-EDS Analizleri

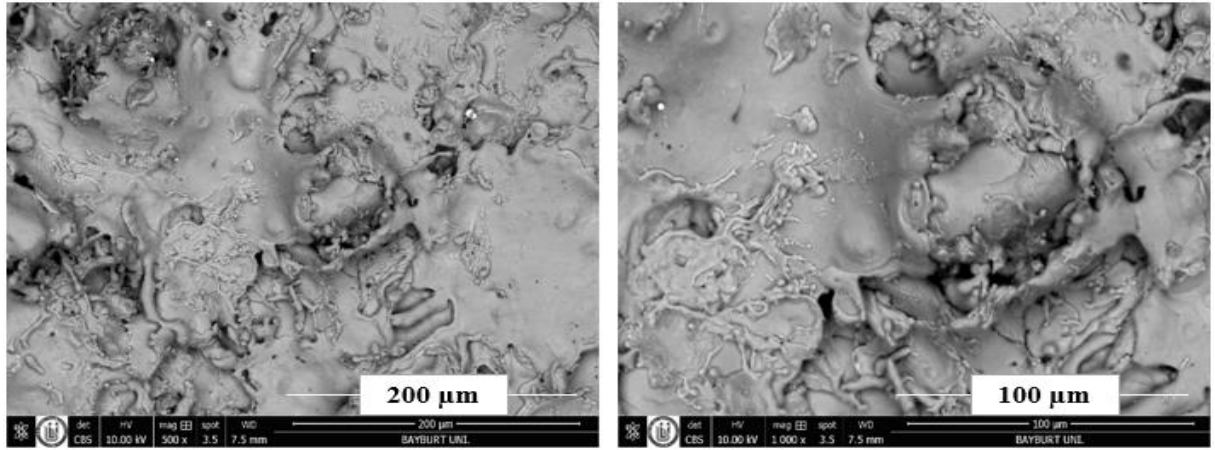
Elektrik ark sprej kaplama işlemi uygulanmış AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerinin yüzey morfolojilerine ait farklı büyültmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29’da gösterilmiştir. Elektrik ark sprej işlemi ile ergitilen Al’nin taban numunesi üzerine püskürtülmesi sonucunda elde edilen kaplamanın, taban numune yüzeyinde dağınık kaplandığı gözlemlenmektedir. Yüzeye çarpan partiküller, çarpma etkisiyle numune yüzeyine sıvanmıştır. Al kaplanmış numunelerin Şekil 21’deki yüzey görüntüleri ile Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29’daki SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde, yapılan Al kaplamaların makro boyutta homojen bir kaplama, mikro boyutta ise homojen olmayan bir kaplama olduğu görülmektedir.



Şekil 27. AZ31-Al numunesine ait SEM görüntüleri

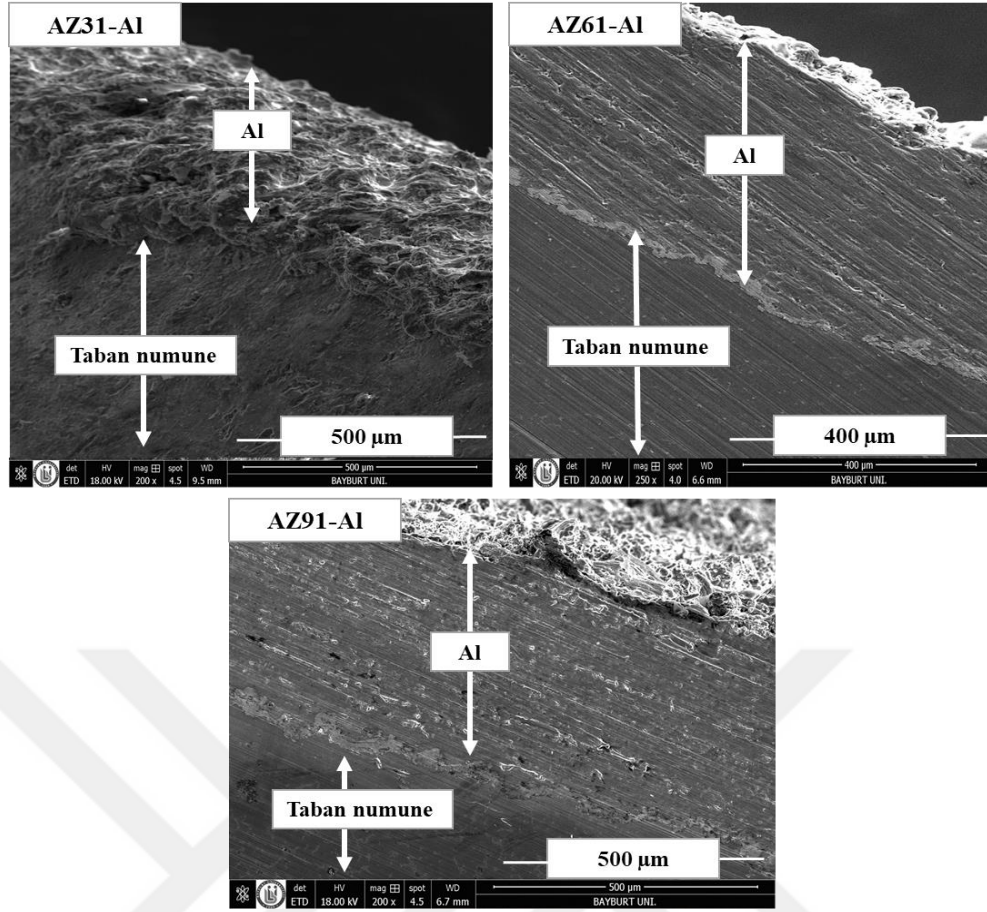


Şekil 28. AZ61-Al numunesine ait SEM görüntüleri



Şekil 29. AZ91-Al numunesine ait SEM görüntüleri

Alüminyum kaplanmış AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerine ait SEM kesit görüntüleri Şekil 30’da gösterilmiştir. Tüm numunelerin kaplama kalınlıkları 350-400 µm civarında ölçülmüştür.



Şekil 30. AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerine ait SEM kesit görüntüleri

AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerine ait EDS analizleri Şekil 31, Şekil 32 ve Şekil 33'te gösterilmiştir.

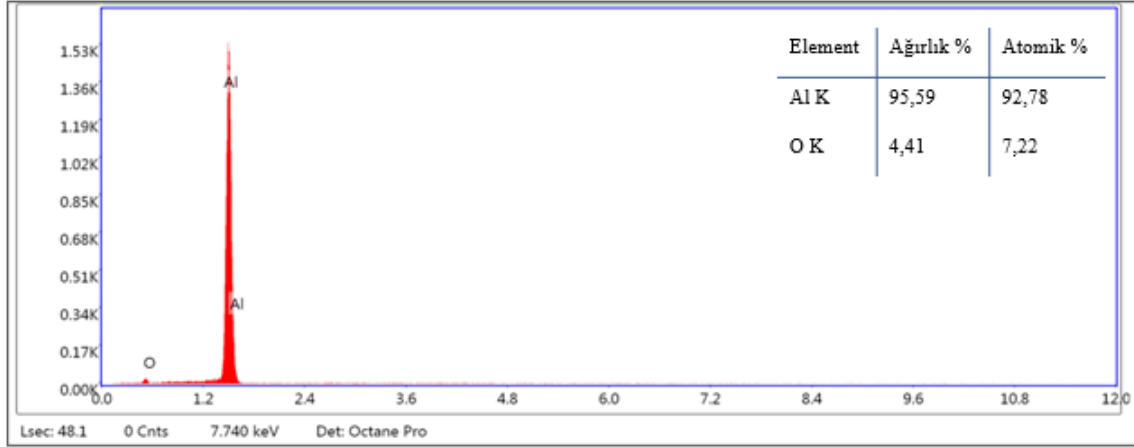
Şekil 31'te AZ31-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ31-Al numunesinde elde edilen kaplamada, ağırlıkça %95,59 Al ve %4,41 O elementlerinin bulunduğu görülmektedir.

Şekil 32'de AZ61-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ31-Al numunesinde elde edilen kaplamada, ağırlıkça %97,20 Al ve %2,80 O elementlerinin bulunduğu görülmektedir.

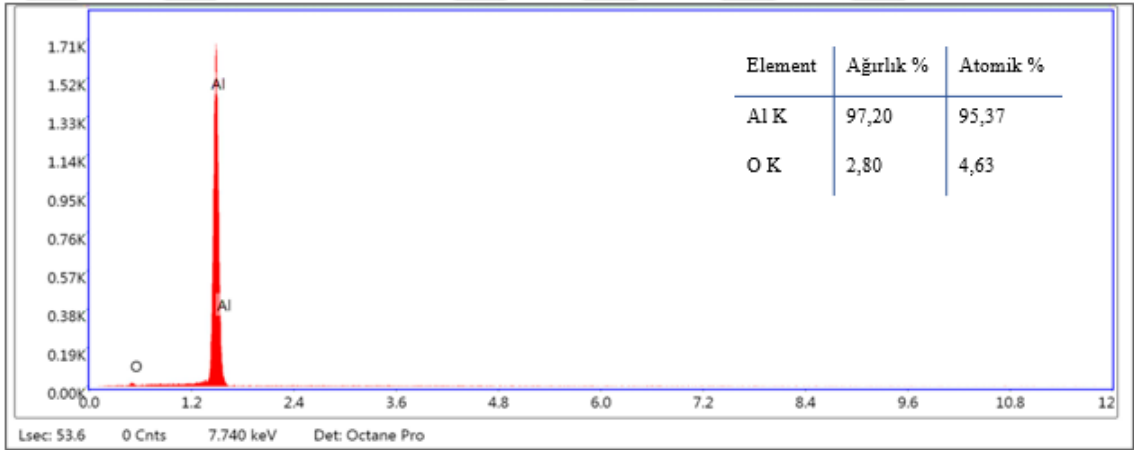
Şekil 33'te AZ91-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ31-Al numunesinde elde edilen kaplamada, ağırlıkça %96,33 Al ve %3,67 O elementlerinin bulunduğu görülmektedir.

EDS analizleri incelendiğinde, Al kaplanmış bütün numunelerde en fazla miktarda Al elementinin çok az miktarda da O elementinin bulunduğu görülmüştür. Al kaplamaların XRD

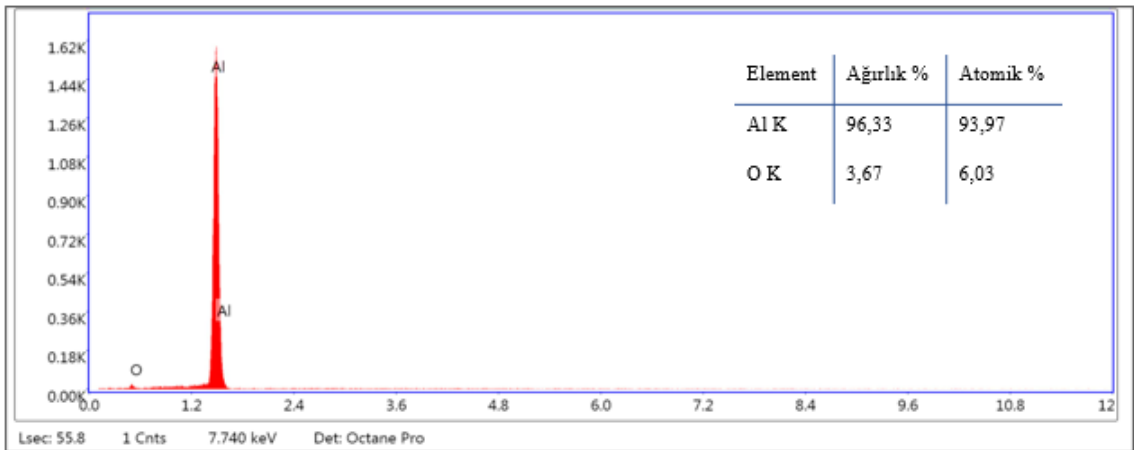
analizlerinde de yüksek şiddette Al piklerine rastlandığından bu sonuçlar Al kaplamaların XRD ve EDS analizlerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 31. AZ31-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları



Şekil 32. AZ61-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları

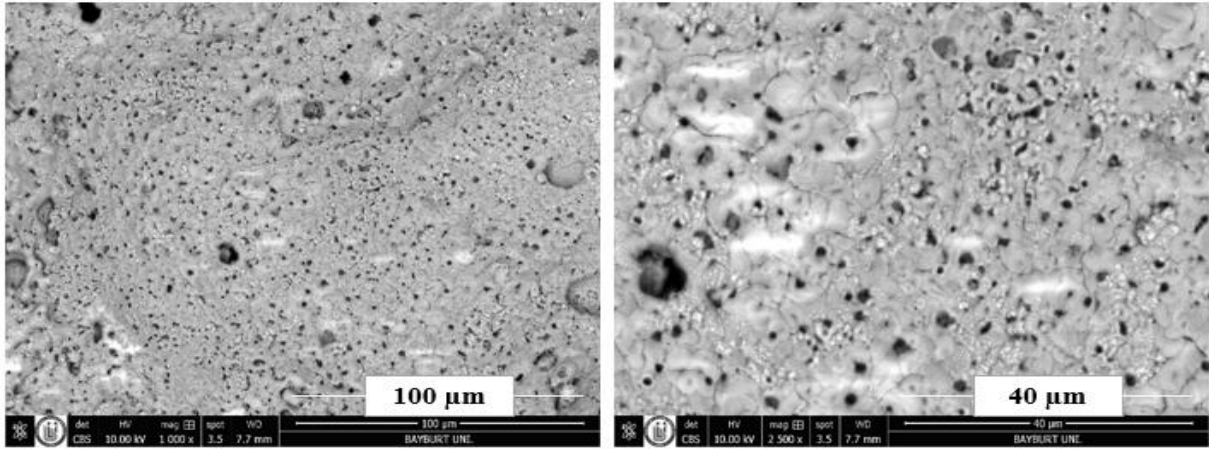


Şekil 33. AZ91-Al numunesine ait EDS analiz sonuçları

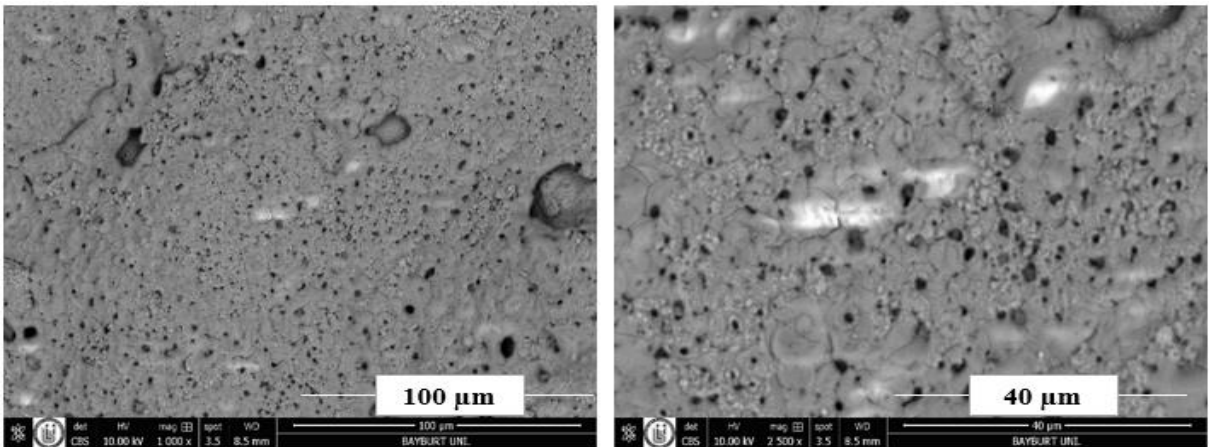
Elektrik ark spreyl kaplama işlemi ile Al kaplandıktan sonra silikat esaslı çözeltide yapılan anotlama işlemi sonrası elde edilen AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O

numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36’da gösterilmiştir. Bu görüntülerden de anlaşılaçağı gibi, gözenekli, homojen ve aynı zamanda pürüzlü bir yapı elde edilmiştir. Gözenek çapları tüm numuneler için yaklaşık 1,5-2 μm aralığında ölçülmüştür. Anotlama işlemi ile elde edilen kaplamaların, özellikle üst yüzeye doğru belli bir dereceye kadar gözeneklilik ve mikro çatlaklar sergilediğı bilinmektedir (Yang and Zhou 2014).

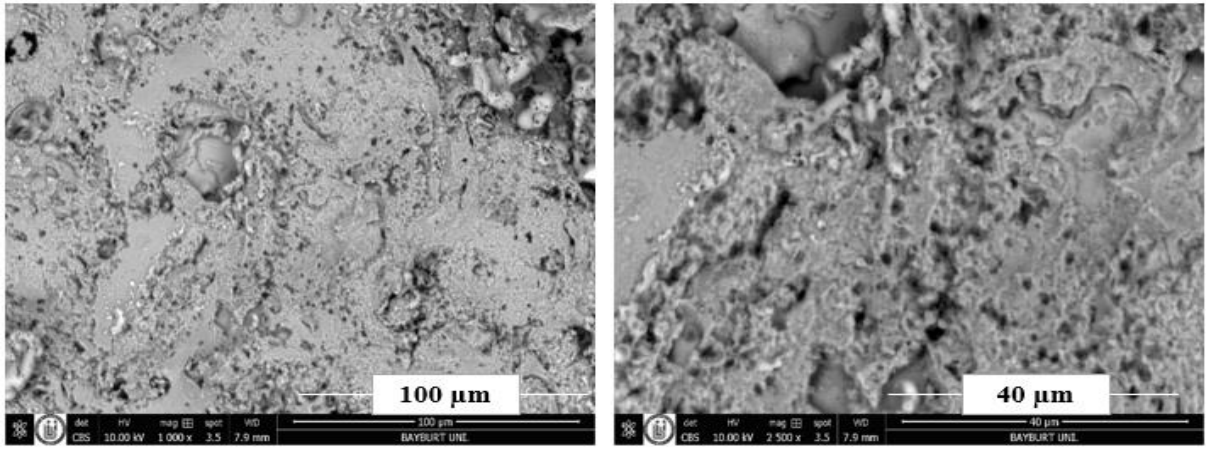
Yapılan anotlama işleminden sonra yüksek voltaj değerlerinin ve yüksek akım değerlerinin gözenek çaplarını artırdığı, yüksek voltaj değerlerinin de kaplamadaki mikro çatlakları artırdığı gözlemlenmiştir. Literatür incelendiğinde, gözenek oluşumunun anotlama işlemi süresince doğal bir durum olduğı belirtilmiş, gözeneklerin mümkün olduğunca küçük ve kaplama yapısının, homojen olarak oluşturulması gerekliliğı üzerinde durulmuştur (Blawert *et al.* 2006; Luan *et al.* 2011).



Şekil 34. AZ31-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri



Şekil 35. AZ61-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri



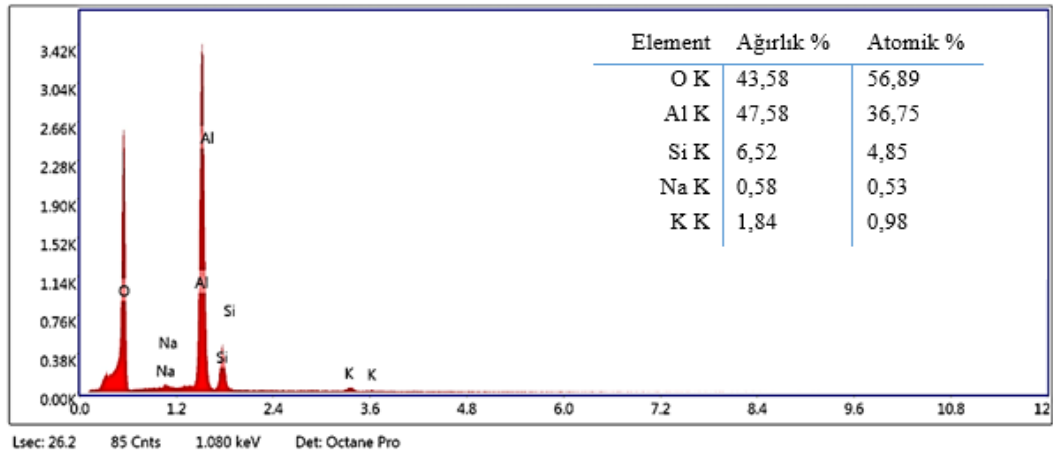
Şekil 36. AZ91-Al-O numunesine ait SEM görüntüleri

Silikat esaslı çözeltide anotlama işlemi yapılmış olan AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerine ait EDS analizleri Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39’da gösterilmiştir.

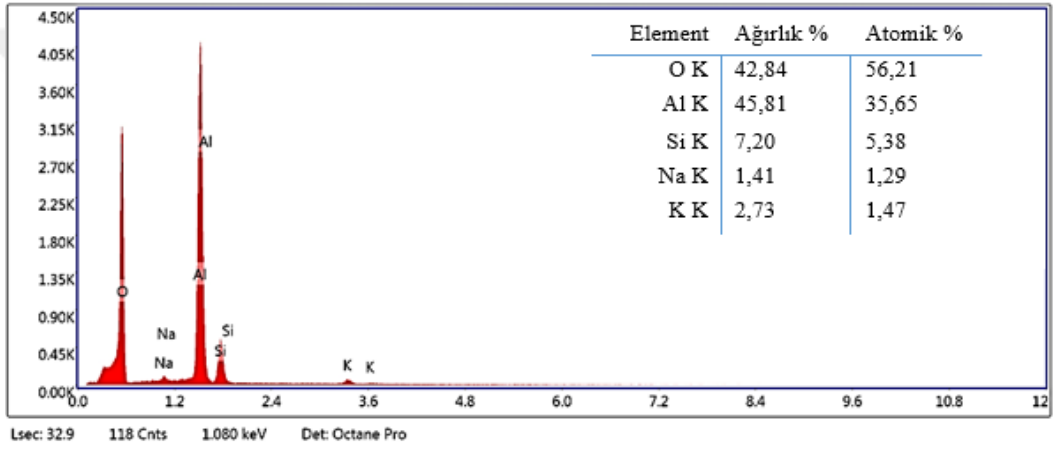
Şekil 37’de AZ31-Al-O numunesine ait kaplamanın EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ31-Al-O numunesinde elde edilen kaplamada, ağırlıkça %47,58 Al, %43,58 O, %6,52 Si, %1,84 K ve %0,58 Na elementlerinin bulunduğu görülmektedir.

Şekil 38’de AZ61-Al-O numunesine ait kaplamanın EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ61-Al-O numunesinde elde edilen kaplamada ağırlıkça %45,81 Al, %42,84 O, %7,20 Si, %2,73 K ve %1,41 Na ve elementlerinin bulunduğu görülmektedir.

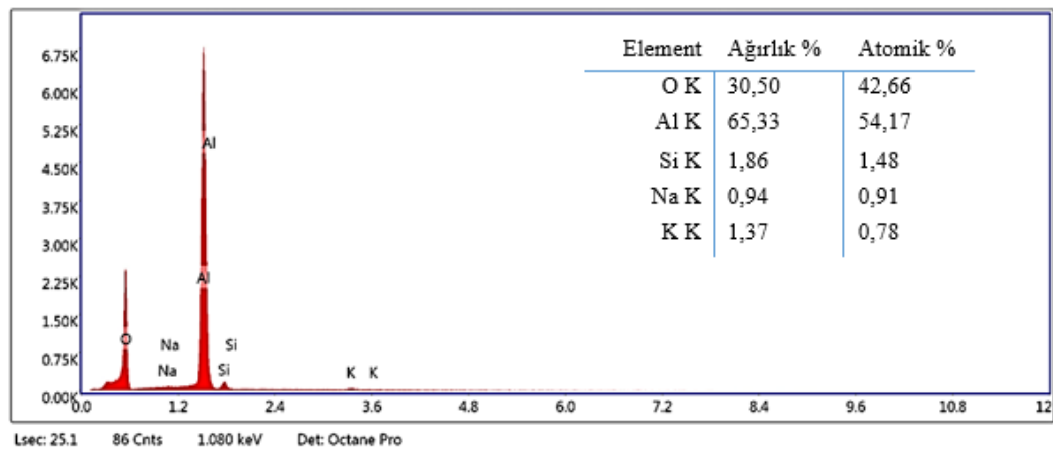
Şekil 39’da AZ91-Al-O numunesine ait kaplamanın EDS analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde AZ91-Al-O numunesinde elde edilen kaplamada ağırlıkça %65,33 Al, %30,50 O, %1,86 Si, %1,37 K ve %0,94 Na ve elementlerinin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 37. AZ31-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları



Şekil 38. AZ61-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları

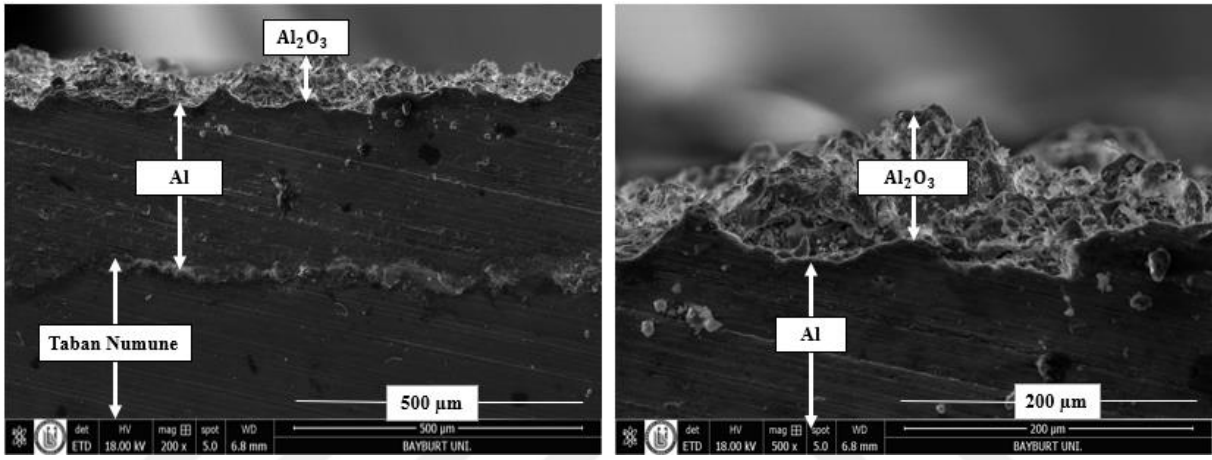


Şekil 39. AZ91-Al-O numunesine ait EDS analiz sonuçları

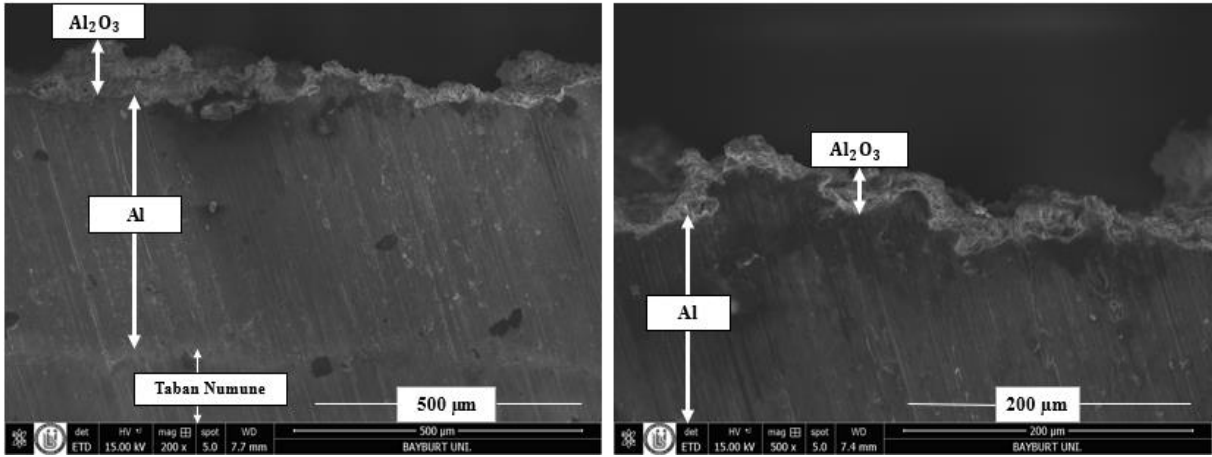
Elektrik ark sprej kaplama işlemi ile Al kaplandıktan sonra silikat esaslı çözeltide yapılan anotlama işlemi sonrasında yapılan EDS analizleri incelendiğinde, tüm numunelerde

ağırlıkça en fazla miktarda Al ve O elementlerine rastlanmıştır. Anotlama işlemi silikat temelli çözeltide gerçekleştiği için de belli oranlarda Si elementinin olduğu görülmektedir. Anotlama işlemi sonrasında EDS analizlerinde yüksek oranlarda Al ve O elementlerinin tespiti ve XRD analizlerinde tüm kaplamalarda Al_2O_3 fazının görülmesi, EDS ve XRD analiz sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermektedir.

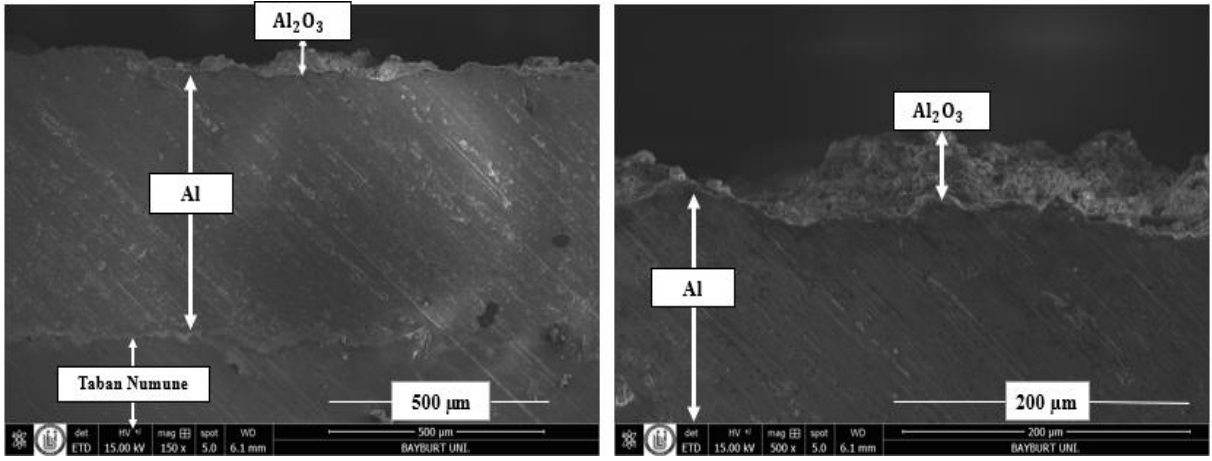
Şekil 40, Şekil 41 ve Şekil 42’de AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerine ait SEM kesit görüntüleri gösterilmiştir. Tüm numunelerde, anotlama işlemi sonrasında, Al kaplama üzerinde oluşan Al_2O_3 kaplamanın kalınlığı yaklaşık 70-75 μm civarında ölçülmüştür.



Şekil 40. AZ31-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri



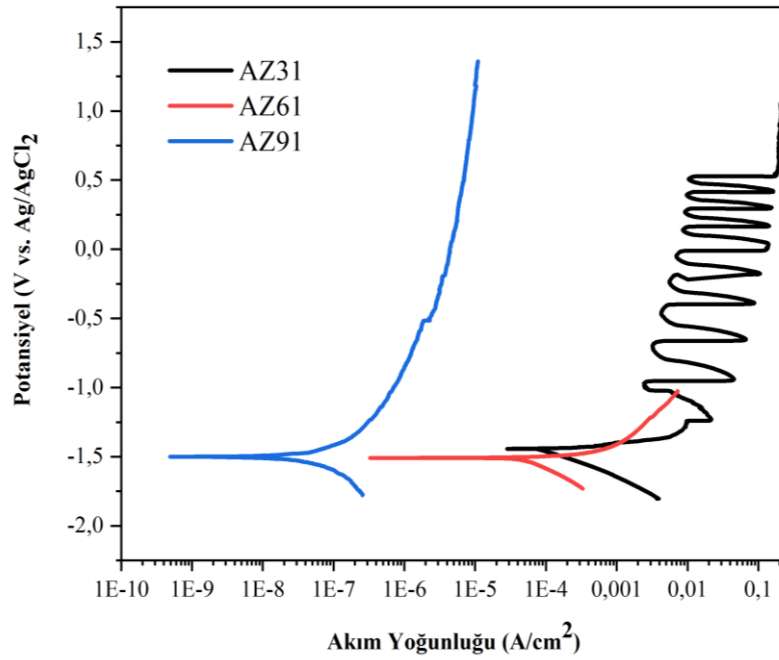
Şekil 41. AZ61-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri



Şekil 42. AZ91-Al-O numunesine ait SEM kesit görüntüleri

Korozyon Deneyleri

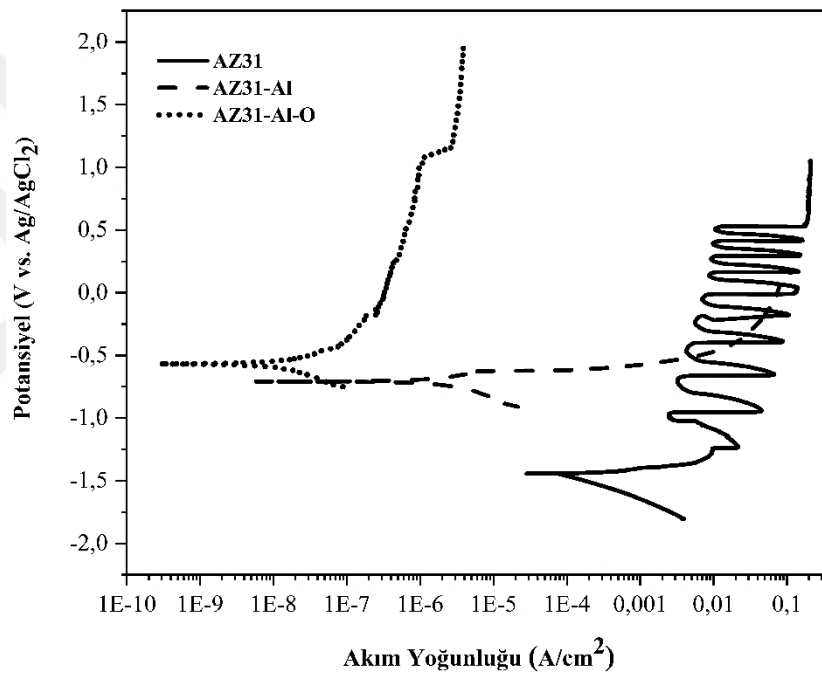
Şekil 43'te kaplanmamış AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Polarizasyon eğrileri incelendiğinde, her üç alaşımda da korozyon potansiyeli değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Korozyon akım yoğunlukları incelendiğinde ise, en düşük korozyon akım yoğunluğu değerinin AZ91 alaşımında, en yüksek korozyon akım yoğunluğu değerinin ise AZ31 alaşımında elde edildiği görülmektedir. AZ91 alaşımına ait anodik polarizasyon eğrisinde diğer alaşımlardakine göre daha düşük akım yoğunluğu değerleri elde edilmiş olup; kaplanmamış alaşımlar arasında en iyi korozyon direnci AZ91 alaşımında gözlemlenmiştir.



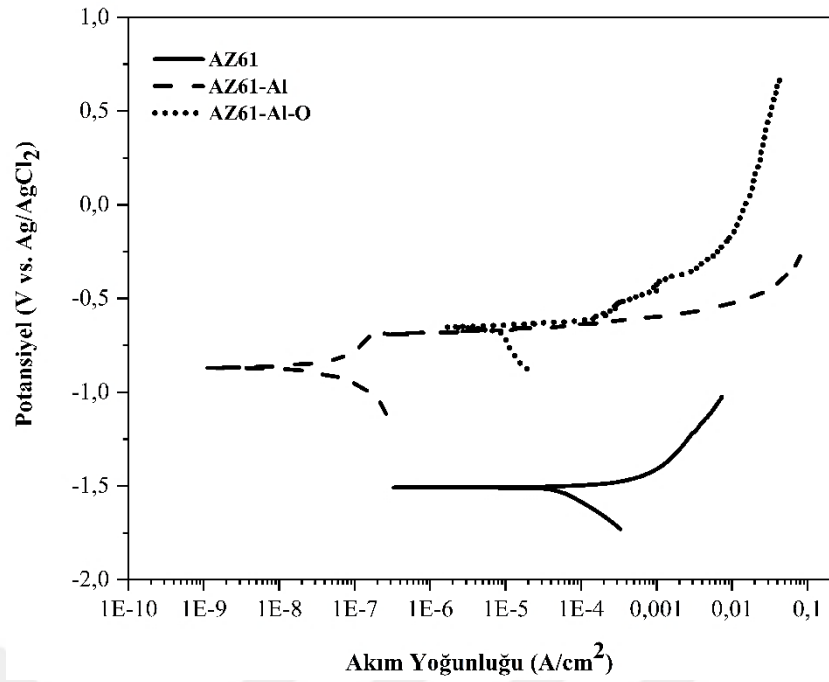
Şekil 43. Kaplanmamış AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri

AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına elektrik ark sprey kaplama işlemi ile alüminyum kaplanmış numunelerin (AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al) ve sonrasında anotlama işlemiyle aynı kaplamalar üzerine silikat esaslı çözeltide kaplanmış numunelerin (AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O) %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 44, Şekil 45 ve Şekil 46’da verilmiştir.

Şekil 44 ve Şekil 45’teki Al kaplanmış AZ31-Al ve AZ61-Al numunelerinin polarizasyon eğrileri incelendiğinde, kaplama yapılmamış numunelere göre AZ31-Al ve AZ61-Al numunelerinin korozyon akım yoğunluğu değerlerinin düştüğü, korozyon potansiyel değerlerinin ise pozitif yönde arttığı görülmektedir. Ayrıca anodik polarizasyon eğrilerinin de daha düşük akım yoğunluğu değerlerine kaydığı gözlemlenmektedir.

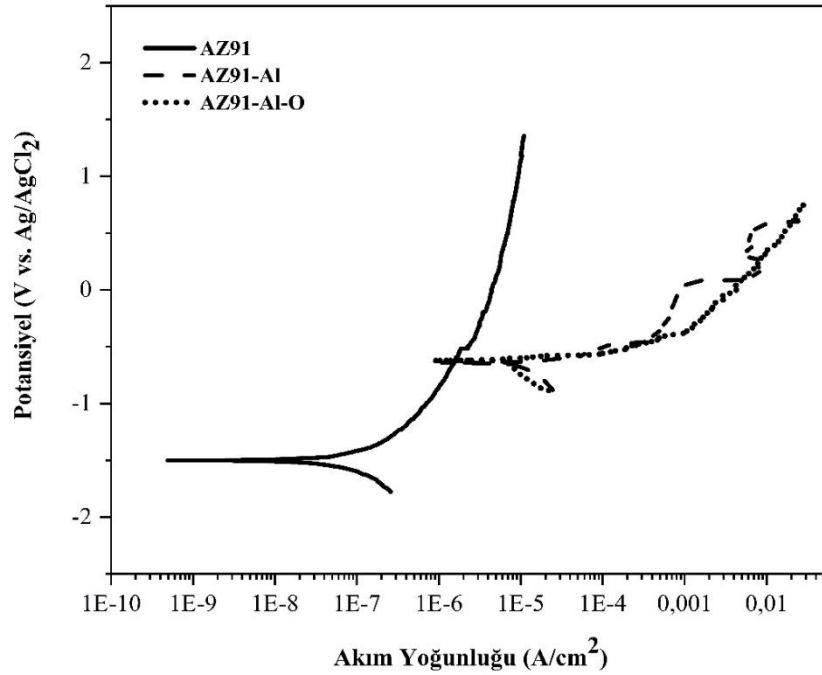


Şekil 44. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ31 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri



Şekil 45. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ61 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri

Şekil 46'daki AZ91-Al numunesine ait polarizasyon eğrileri incelendiğinde ise, AZ31-Al ve AZ61-Al numunelerinden farklı olarak, kaplama yapılmamış durumdakine göre korozyon potansiyeli değerlerinin daha pozitif değerlere doğru artmasına rağmen, korozyon akım yoğunluğu değerlerinin de arttığı ve anodik polarizasyon eğrilerinin daha yüksek akım yoğunluğu değerlerine kaydığı görülmektedir.



Şekil 46. Kaplanmamış ve kaplanmış AZ91 alaşımlarına ait polarizasyon eğrileri

Tablo 6 incelendiğinde, %3-6 NaCl çözeltisinde Mg elementinin korozyon potansiyel değeri -1,73 V iken Al elementinin korozyon potansiyel değerinin -0,85 V olduğu görülmektedir. Bir başka ifadeyle, Mg elementinin Al elementine göre korozyon direnci daha düşüktür (Gupta and Ling 2011). Bu nedenle Al kaplanmış üç magnezyum alaşımında da korozyon potansiyel değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Al kaplama üzerine anotlama işlemi yapılmış AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerinin polarizasyon eğrileri incelendiğinde, kaplanmamış numunelere göre tüm numunelerin korozyon potansiyel değerlerinin arttığı, AZ31-Al-O ve AZ61-Al-O numunelerinin korozyon akım yoğunluklarının azaldığı, AZ91-Al-O numunesinin ise AZ91-Al numunesine benzer bir davranış göstererek kaplanmamış AZ91 alaşımına kıyasla korozyon akım yoğunluğunun arttığı ve korozyon potansiyel değerinin pozitif değerlere doğru kaydığı gözlenmektedir.

Kaplanmamış ve kaplanmış tüm numunelerin E_{kor} ve I_{kor} değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre, kaplanmamış ve kaplanmış AZ31 numunelerinde en fazla korozyon direnci AZ31-Al-O numunesinde, kaplanmamış ve kaplanmış AZ61 numunelerinde en fazla korozyon direnci AZ61-Al numunesinde, kaplanmamış ve kaplanmış AZ91 numunelerinde ise en fazla korozyon direnci AZ91 numunesinde gözlemlenmiştir.

Elektrik ark spreyl kaplama yöntemiyle Al kaplanan numuneler arasında korozyon direnci en yüksek olan numune AZ61-Al numunesiyken korozyon direnci en düşük olan numune ise AZ91-Al numunesi olmuştur.

Elektrik ark spreyl kaplama yöntemiyle Al kaplama sonrasında anotlama işlemi uygulanmış numunelerde en yüksek korozyon direnci AZ31-Al-O numunesinde görülürken, korozyon direnci en yüksek numunenin ise AZ61-Al-O numunesi olduğu görülmüştür.

Tüm numunelerin korozyon dirençleri birlikte değerlendirildiğinde, korozyon direnci en yüksek numune AZ31-Al-O iken, korozyon direnci en düşük numunenin ise AZ31 numunesi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak tüm numuneler arasında en iyi korozyon direncini AZ31-Al-O numunesi göstermiştir.

Tablo 10. Numunelerin korozyon deneyine ait sonuçlar

Numune	E _{kor} (mV)	I _{kor} ($\mu\text{A.cm}^{-2}$)
AZ31	-1488	298,23
AZ31-Al	-707,88	0,415
AZ31-Al-O	-562,664	0,014
AZ61	-1504	36,29
AZ61-Al	-867,709	0,025
AZ61-Al-O	-658,507	6,53
AZ91	-1502	0,096
AZ91-Al	-643,15	10,25
AZ91-Al-O	-619,689	6,6

Literatürde, anotlama işleminde kullanılan çözeltilerde sodyum silikatın varlığının homojen ve kompakt anodik kaplamalar için son derece önemli olduğu ve bu durumun korozyon direncini artırabileceği belirtilmiştir (Zhang *et al.* 2012). Silikat iyonları korozyon direnci açısından önemli rol oynamaktadırlar (Song and Shi 2013). Örneğin yapılan bir çalışmada, AZ31 alaşımına uygulanan anotlama işleminde SiO_3^{2-} , PO_4^{3-} , MoO_4^{2-} ve AlO_2^- anyonlarının etkisi karşılaştırılmış ve en iyi korozyon direncini sodyum silikat çözeltisinde elde edilmiştir (Chai *et al.* 2008).

Anotlama işleminde elektrolitte bulunan kimyasal bileşenler kaplama yapılan anodik filmin yapısında da bulunmaktadır. Örneğin elektrolit çözeltide alüminat varsa, doğal olarak anodik kaplamanın yapısında da Al bulunmaktadır (Song and Shi 2013). Silikat iyonları Mg ve Al iyonlarıyla birleşerek anodik kaplama oluşturmaktadırlar (Zhang *et al.* 2012). Tüm bu hususlar göz önünde tutulduğunda, AZ31-Al-O ve AZ61-Al-O yapılan anotlama işlemi sonucunda oluşan kararlı Al_2O_3 fazı korozyon direncinin artmasında önemli bir rol oynamıştır.

Literatürde, Al ve Zn alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırdıkları belirtilmiştir (Ding *et al.* 2014; Medhashree and Shetty 2017). AZ91 alaşımındaki Al elementi miktarı AZ31 ve AZ61 alaşımlarındaki Al elementi miktarına göre daha fazladır. Yapılan çalışmada da, kaplanmamış numuneler arasında en iyi korozyon direncini Al elementinin en fazla olduğu AZ91 magnezyum alaşımı göstermiştir. Dolayısıyla, yapılan çalışmada, elektrik ark spreylendirme yöntemiyle Al kaplanmış AZ91-Al numunesi ve elektrik ark spreylendirme işlemi sonrasında anotlama işlemiyle oksit kaplama yapılmış AZ91-Al-O numunesine göre kaplanmamış AZ91 alaşımının daha iyi korozyon direnci göstermesi, AZ91 alaşımının kaplanmamış halinin korozyon direncinin yeterince yüksek olmasından kaynaklanabilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları elektrik ark sprey kaplama yönetimi ile başarılı bir şekilde alüminyum kaplama yapılmıştır.
2. AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerinin SEM kesit görüntüleri alınmış ve kaplama kalınlığı tüm numuneler için yaklaşık 350-400 μm civarında ölçülmüştür.
3. XRD analizleri sonucunda AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerinin hepsinde Al elementine ait yüksek şiddette pikler elde edilmiştir.
4. Al kaplanmış AZ31-Al, AZ61-Al ve AZ91-Al numunelerinin üzerine silikat esaslı çözeltide anotlama işlemi gerçekleştirilmiş ve seramik kaplamalar elde edilmiştir.
5. Elektrik ark sprey kaplama yöntemiyle Al kaplanan numunelere silikat esaslı çözeltide uygulanan anotlama işlemi sonucunda elde edilen AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerinin SEM görüntüleri alınmış olup, elde edilen görüntüler sonucunda kaplamanın yüksek oranda homojen ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Gözenek çapları yaklaşık olarak 1,5-2 μm olarak ölçülmüştür.
6. AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerinin SEM kesit görüntüleri alınmış ve oksit kaplamanın kalınlığı yaklaşık 70-75 μm olarak ölçülmüştür.
7. AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numuneleri üzerinde yapılan XRD analizleri sonucunda, her üç numunede de Al_2O_3 fazına ait pikler elde edilmiştir. AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerinin EDS analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. EDS analizlerinden, Al ve O elementlerinin varlığının kaplamaların yapısında Al_2O_3 fazının oluşumuna neden olduğu anlaşılmıştır.
8. Kaplanmamış AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına %3,5 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde, her üç alaşımın korozyon potansiyeli değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Korozyon akım yoğunluğu ise en düşük AZ91 alaşımında ve en yüksek AZ31 alaşımında elde edilmiştir. Kaplanmamış alaşımlar arasında en iyi korozyon direnci AZ91 alaşımında görülmüştür.
9. Al kaplamanın AZ31, AZ61 ve AZ91 numunelerinin her üçünde de korozyon potansiyelini pozitif değerlere doğru artırdığı görülmüştür. Al kaplama sonrası korozyon akım yoğunluğunun ise AZ31 ve AZ61 alaşımlarında düştüğü, AZ91 alaşımında ise arttığı gözlemlenmiştir.
10. AZ31-Al-O, AZ61-Al-O ve AZ91-Al-O numunelerine %3,5 NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde, AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarına göre her üç numunenin de

korozyon potansiyel değeri arttı; korozyon akım yoğunluğunun ise AZ31-Al-O ve AZ61-Al-O numunelerinde düştüğü, AZ91-Al-O numunesinde ise arttığı gözlemlenmiştir.

11. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde; AZ31 ve AZ61 alaşımlarına hem elektrik ark spreyle kaplama yöntemiyle yapılan Al kaplamanın, hem de Al kaplama sonrası anotlama işlemiyle seramik kaplamaların korozyon direncini taban numunelere göre bir miktar iyileştirdiği görülmüştür. AZ91 alaşımlarının ise, Al kaplanan AZ91-Al ve anotlama işlemi sonrası elde edilen AZ91-Al-O numunelerine göre daha iyi korozyon direnci gösterdiği belirlenmiştir.
12. Tüm numuneler arasında en iyi korozyon direnci AZ31-Al-O numunesinde elde edilmiştir.

Yapılan çalışma sonucundaki öneriler aşağıda verilmiştir.

1. Elektrik ark spreyle kaplama işlemi sırasında Al eriyik halde taban numunesi üzerine püskürtüldüğünden oksidasyon artmış olabilir. Bu yöntem yerine termal kaplama yöntemlerinden bir diğeri olan soğuk spreyle kaplama yöntemi tercih edilebilir. Bu yöntemin başlıca avantajları, parçacıkların yüksek hızlarda numune üzerine püskürtülmesi, düşük sıcaklıkta püskürtülen bu parçacıkların eriyik halde olmaması, böylece oksidasyona uğramalarının elektrik ark spreyle kaplama yöntemine göre daha zor olmasıdır.
2. Anotlama işlemi sonrasında oluşan gözenekler ve çatlaklar korozyon direncini etkilemektedir. Bu gözenekli ve çatlak yapıyı gidermek, başka bir ifadeyle korozyonun kolayca ulaşabileceği bu kusurlu bölgeleri kapatmak için, anotlama işlemi sonrası mühürleme yapılabilir. Böylece gözenekli ve çatlak yapı belli miktarda azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- Altun, H. (2004). *Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamaların Korozyon Davranışlarına Etkisi* [Doktora, Atatürk Üniversitesi]. Erzurum.
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M., 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), 2767-2774.
- Asgari, M., Aliofkhazraei, 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.
- Avedesian, M. M., and Baker, H. (1999). *ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys*. ASM international.
- Barbosa, D. P., and Knörnschild, G. (2009). Anodization of Mg-alloy AZ91 in NaOH solutions. *Surface and Coatings Technology*, 203(12), 1629-1636.
- 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*, 8(6), 511-533.
- Campbell, F. C. (2008). *Elements of metallurgy and engineering alloys*. ASM International.
- Candan, S., and Candan, E. (2018). Comparative study on corrosion behaviors of Mg-Al-Zn alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(4), 642-650.
- 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*, 50(12), 3274-3279.
- Cui, L.-Y., Gao, S.-D., Li, P.-P., Zeng, R.-C., Zhang, F., Li, S.-Q., and Han, E.-H. (2017). Corrosion resistance of a self-healing micro-arc oxidation/polymethyltrimethoxysilane composite coating on magnesium alloy AZ31. *Corrosion Science*, 118, 84-95.
- Çatar, R. (2019). *Anotlama ve Elektrik Ark Sprey Kaplama İşlemlerinin Magnezyum Alaşımlarının Yapısal, Korozyon ve Gerilmeli Korozyon Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi* [Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi]. Erzurum.
- Davis, J. R. (2004). *Handbook of thermal spray technology*. ASM international.
- Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P., and Li, Y. (2014). Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: a review. *Journal of materials chemistry B*, 2(14), 1912-1933.
- Durdu, S., and Usta, M. (2012). Characterization and mechanical properties of coatings on magnesium by micro arc oxidation. *Applied Surface Science*, 261, 774-782.
- During, E. D. (2018). *Corrosion atlas: A collection of illustrated case histories*. Elsevier.
- Friedrich, H. E., and Mordike, B. L. (2006). *Magnesium technology* (Vol. 212). Springer.
- 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.
- Gupta, M., and Ling, S. N. M. (2011). *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. John Wiley & Sons.
- Hamouda, M. M., Chan Hee, P., and Cheol Sang, K. (2017). Surface Modification of Magnesium and its Alloys Using Anodization for Orthopedic Implant Application.
- He, X. L., Liang, H. Y., Yan, Z. F., and Bai, R. (2020). Stress corrosion cracking behavior of micro-arc oxidized AZ31 alloy [Article]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(8), 1640-1652.

- Henry, H., Xueyuan, N., and Yueyu, M. (2014). Corrosion and Surface Treatment of Magnesium Alloys.
- Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion*.
- Kaçar, İ., Zile, M., and Öztürk, F. (2006). Havacılık Sanayinde Magnezyum Alaşımları.
- Kandemir, K., and Can, A. Ç. (2003). Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 37-45.
- Kelen, F. (2021). Magnezyum ve Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Önemi ve Uygulamaları. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 548-562.
- Khiabani, A. B., Ghanbari, A., Yarmand, B., Zamanian, A., and Mozafari, M. (2018). Improving corrosion behavior and in vitro bioactivity of plasma electrolytic oxidized AZ91 magnesium alloy using calcium fluoride containing electrolyte. *Materials Letters*, 212, 98-102.
- Kumar, A. M., Kwon, S. H., Jung, H. C., and Shin, K. S. (2015). Corrosion protection performance of single and dual Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coating for aerospace applications. *Materials Chemistry and Physics*, 149, 480-486.
- Kumar, D. S., Sasanka, C. T., Ravindra, K., and Suman, K. (2015). Magnesium and its alloys in automotive applications—a review. *Am. J. Mater. Sci. Technol*, 4(1), 12-30.
- Külekcı, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10), 851-865.
- Li, X.-J., Zhang, M., Wen, S., Mao, X., Huo, W.-G., Guo, Y.-Y., and Wang, Y.-X. (2020). Microstructure and wear resistance of micro-arc oxidation ceramic coatings prepared on 2A50 aluminum alloys. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125853.
- Liu, J., Li, S., Han, Z., and Cao, R. (2020). Improved corrosion resistance of friction stir welded magnesium alloy with micro-arc oxidation/electroless plating duplex coating. *Materials Chemistry and Physics*, 257, 123753.
- Luan, B. L., Yang, D., Liu, X. Y., and Song, G. L. (2011). Corrosion protection of magnesium (Mg) alloys using conversion and electrophoretic coatings. In G.-l. Song (Ed.), *Corrosion of Magnesium Alloys* (pp. 541-564). Woodhead Publishing.
- Ma, K., Sun, D., Xuan, Z., and Lu, J. (2008). Microstructure and interface analysis of aluminum coating sprayed by electro-arc spraying on AZ91D magnesium alloy [Article]. *Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution*, 29(12), 89-92.
- Makar, G., and Kruger, J. (1993). Corrosion of magnesium. *International materials reviews*, 38(3), 138-153.
- Medhashree, H., and Shetty, A. N. (2017). Electrochemical corrosion study of Mg–Al–Zn–Mn alloy in aqueous ethylene glycol containing chloride ions. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(1), 40-49.
- Mordike, B. L., and Ebert, T. (2001). Magnesium: Properties - applications -potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Muhaffel, F., and Cimenoglu, H. (2019). Development of corrosion and wear resistant micro-arc oxidation coating on a magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 357, 822-832.
- Öztürk, F., and Kaçar, İ. (2012). Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 12-20.
- Pardo, A., Casajús, P., Mohedano, M., Coy, A., 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.
- Pawlowski, L. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley & Sons.
- Pedefferri, P., and Ormellese, M. (2018). *Corrosion science and engineering*. Springer.

- Popov, B. N. (2015). *Corrosion engineering: principles and solved problems*. Elsevier.
- Prabhu, T., Vedantam, S., and Singh, V. (2017). Magnesium Alloys. In (pp. 3-27).
- Revie, R. W. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Roberge, P. R. (2019). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill Education.
- Shao, L., Li, H., Jiang, B., Liu, C., Gu, X., and Chen, D. (2018). A comparative study of corrosion behavior of hard anodized and micro-arc oxidation coatings on 7050 aluminum alloy. *Metals*, 8(3), 165.
- Song, G.-L. (2011). *Corrosion of magnesium alloys*. Elsevier.
- Song, G. L., and Atrens, A. (1999). Corrosion mechanisms of magnesium alloys. *Advanced engineering materials*, 1(1), 11-33.
- Song, G. L., and Shi, Z. (2013). 9 - Anodization and corrosion of magnesium (Mg) alloys. In G.-L. Song (Ed.), *Corrosion Prevention of Magnesium Alloys* (pp. 232-281). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857098962.2.232>
- Srinivasan, P., Riekehr, S., Blawert, C., Dietzel, W., and Kocak, 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.
- 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.
- Vatan, H. N., 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.
- 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*,
- Woodtli, J., and Kieselbach, R. (2000). Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 7(6), 427-450. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(99\)00033-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1350-6307(99)00033-3)
- 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.
- Yang, W., Xu, D., Wang, J., Yao, X., and Chen, J. (2018). Microstructure and corrosion resistance of micro arc oxidation plus electrostatic powder spraying composite coating on magnesium alloy. *Corrosion Science*, 136, 174-179.
- Yang, Y., and Zhou, L. (2014). Improving Corrosion Resistance of Friction Stir Welding Joint of 7075 Aluminum Alloy by Micro-arc Oxidation. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(12), 1251-1254.
- Yue, Y., and Hua, W. (2010). Effect of current density on corrosion resistance of micro-arc oxide coatings on magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, s688-s692.
- Zeng, R.-C., Yin, Z.-Z., Chen, X.-B., and Xu, D.-K. (2018). Corrosion types of magnesium alloys. *Magnesium Alloys-Selected Issue*.
- Zhang, D., Gou, Y., Liu, Y., and Guo, X. (2013). A composite anodizing coating containing superfine Al₂O₃ particles on AZ31 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 236, 52-57.
- Zhang, R. F., Zhang, S. F., Xiang, J. H., Zhang, L. H., Zhang, Y. Q., and Guo, S. B. (2012). Influence of sodium silicate concentration on properties of micro arc oxidation coatings formed on AZ91HP magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 206(24), 5072-5079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.018>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	İdris DURNA
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Eğitim	
Lise:	Şükrüpaşa Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2018)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	(İyi)