



**GRAFEN KATKISININ AZ31 ALAŞIMININ MİKRO
ARK OKSİDASYON KAPLAMASINA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Meral ERDİL

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih AYDIN**

**GRAFEN KATKISININ AZ31 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYON
KAPLAMASINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Meral ERDİL

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih AYDIN**

**KARABÜK
Mart-2021**

Meral ERDİL tarafından hazırlanan “GRAFEN KATKISININ AZ31 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMASINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Fatih AYDIN

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 01/03/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI (BÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih AYDIN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN (KBÜ)

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Meral ERDİL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRAFEN KATKISININ AZ31 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMASINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Meral ERDİL

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Tez Danışmanı:

Dr.Öğr.Üyesi Fatih AYDIN

Mart 2021, 63 sayfa

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, iyi titreşim sönümleme özelliklerine sahip olması sebebiyle son yıllarda en yaygın kullanılan malzemelerden birisi haline gelmiştir. Bununla beraber, magnezyum alaşımlarının en önemli dezavantajları aşınma ve korozyon dayanımlarının düşük olmasıdır. Bu tür dezavantajlar yapılan kaplama işlemleri ile önemli ölçüde giderilmektedir.

Bu çalışmada, AZ31 alaşımının aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için kullanılan mikro ark oksidasyon (MAO) kaplamasına grafen katkısının etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda; 10g/L Na₂SiO₃ ve 4g/L NaOH ile hazırlanmış elektrolit bileşimine, 0.5g/L, 1g/L ve 2g/L oranlarında grafen partikül konsantrasyonları eklenmiştir. Aşınma testleri 2N, 4N ve 8N yükleri altında yapılmıştır. Kaplamaların bileşimi ve morfolojisi taramalı elektron mikroskopu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR) ile incelenmiştir. Artan grafen konsantrasyon oranı ile kaplama kalınlığında artış

ve yüzey pürüzlülüğünde azalma gözlenmiştir. Korozyon performansını değerlendirmek için numuneler; %3.5 NaCl çözeltisine 0.5, 16 ve 32 saat süreyle daldırılmış ve potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonuçları, artan grafen konsantrasyonu ile aşınma hızında önemli derecede azalma olduğunu göstermiştir. Korozyon testleri, grafen ilaveli kaplamalarda grafen ilavesiz kaplamalara göre polarizasyon direncinin arttığını ve korozyon akım yoğunluğunun azaldığını göstermiştir.

Anahtar Sözcükler : AZ31 alaşımı, grafen, mikro ark oksidasyon, aşınma davranışı, korozyon direnci

Bilim Kodu : 91510

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE INVESTIGATION OF THE ADDITION OF GRAPHENE ON MICRO ARC OXIDATION COATING OF AZ31 ALLOY

Meral ERDİL

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assist.Prof.Dr. Fatih AYDIN

March 2021, 63 pages

Magnesium alloys have become one of the most widely used materials in recent years due to their low density, high specific strength, good vibration damping properties. However, the most important disadvantage of magnesium alloys is their low wear and corrosion resistance. These disadvantages are significantly reduced by different coating treatments.

In this study, the effects of graphene additive on the micro arc oxidation (MAO) coating used to improve the wear and corrosion resistance of the AZ31 alloy were investigated. In this context, graphene particle concentrations of 0.5g/L, 1g/L and 2g/L were added to the electrolyte composition prepared with Na₂SiO₃ (10g/L) and NaOH (4g/L). The wear tests were conducted under loads of 2N, 4N and 8N. The composition and morphology of the coatings were studied by scanning electron

microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). An increase in coating thickness and a decrease in surface roughness were observed with increasing graphene concentration. To evaluate the corrosion performance, samples were immersed in 3.5% NaCl solution for 0.5, 16 and 32 hours and potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy tests were performed. Wear test results showed that with increasing graphene concentration there was a significant reduction in the wear rate. Corrosion tests showed that graphene-added coatings have increased polarization resistance and reduced corrosion current density compared to coatings without graphene addition.

Key Words : AZ31 alloy, graphene, micro-arc oxidation, wear behaviour, corrosion resistance

Science Code : 91510

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr.Öğr.Üyesi Fatih AYDIN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Testlerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Karabük Üniversitesi Demir elik Enstitüsü çalıőanlarına teşekkür ederim.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımını esirgemedi yanımdayken oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu alıőma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2020-2212 proje numarası ile desteklendiği için KBÜ-BAP birimine teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. SAF MAGNEZYUMUN ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1.1. Kimyasal Özellikleri.....	4
2.1.2. Mekanik Özellikler	5
2.2 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMALARI	6
2.2.1. Otomotiv Uygulamaları.....	6
2.2.2. Havacılık ve Uzay Uygulamaları.....	7
2.2.3. Tıbbi Uygulamalar.....	7
2.2.4. Elektronik Uygulamalar	8
2.2.5. Diğer Uygulamalar	8
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI	8
2.3.1. Bazı Alaşım Elementlerin Katılmasının Magnezyum Üzerindeki Etkileri	
.....	9
2.3.1.1. Alüminyum	9
2.3.1.2. Bakır.....	9

	<u>Sayfa</u>
2.3.1.3. Manganez.....	9
2.3.1.4. Çinko.....	9
2.3.1.5. Demir	9
2.3.1.6. Nikel.....	9
2.3.2. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	9
2.3.2.1. AZ31 Alaşımının Özellikleri	11
2.4. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞLARI	12
2.4.1. Aşınma Davranışı	13
2.4.2. Korozyon Davranışı.....	13
2.4.2.1. Korozyonu Azaltma Yolları.....	15
 BÖLÜM 3	 16
MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ.....	16
3.1. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNİN TARİHÇESİ.....	16
3.2. MİKRO ARK OKSİDASYON TEKNİĞİ ve UYGULAMASI	16
3.3. MİKRO ARK OKSİDASYONUN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	17
3.4. MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER	18
3.4.1. Elektriksel Parametreler.....	18
3.4.2. Elektrolit Bileşimi.....	18
3.4.3. Partikül İlavesi	20
 BÖLÜM 4	 21
GRAFEN.....	21
4.1. GRAFENİN ÖZELLİKLERİ.....	21
4.2. GRAFENİN UYGULAMA ALANLARI.....	22
4.3. GRAFEN KATKISININ MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMALARINA ETKİSİ	23

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5	25
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
5.1. NUMUNE HAZIRLAMA	25
5.2. MAO KAPLAMA	26
5.3. KAPLAMA KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	27
5.4. AŞINMA-PÜRÜZLÜLÜK TESTLERİ.....	29
5.5 KOROZYON TESTLERİ	30
BÖLÜM 6	31
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	31
6.1. KAPLAMA KARAKTERİZASYONU	31
6.2. AŞINMA SONUÇLARI	40
6.3. KOROZON SONUÇLARI.....	43
6.3.1. Potensiyodinamik Korozyon Sonuçları	43
6.3.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi.....	47
BÖLÜM 7	54
SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Mg alaşımlarının kullanıldığı otomotiv parçaları	6
Şekil 2.2. Mg alaşımlarından yapılmış olan ilk uçak Northrop XP-56	7
Şekil 3.1. MAO işleminin şematik görünümü.....	17
Şekil 4.1. a) Grafen, b) Grafit c) Karbon nanotüp, d) Fulleren (C ₆₀).	21
Şekil 5.1. a) Hassas kesme b) Zımpara-parlatma cihazları	25
Şekil 5.2. AZ31 alaşımının kaplama öncesi görüntüleri.	26
Şekil 5.3. Kaplama sonrası numune yüzey görüntüleri.....	26
Şekil 5.4. MAO kaplama düzeneği	27
Şekil 5.5. SEM cihazı.....	28
Şekil 5.6. XRD cihazı.....	28
Şekil 5.7. FTIR cihazı.....	28
Şekil 5.8. Aşınma cihazı.....	29
Şekil 5.9. Profilometre cihazı	29
Şekil 5.10. Potansiyodinamik test cihazı.....	30
Şekil 6.1. 200V için kaplamaların yüzey görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.	31
Şekil 6.2. 225V için kaplamaların yüzey görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3	32
Şekil 6.3. 200V için kaplamaların kesit görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.	34
Şekil 6.4. 225V için kaplamaların kesit görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.	35
Şekil 6.5. 225V için kaplamaların yüzey EDX analizleri a) G1, B) G2, c) G3	36
Şekil 6.6. 225V için G3 kaplamasının çizgi EDX analizi.	37
Şekil 6.7. 200V için numunelerin XRD kırınım örnekleri a) Altlık b) GO c) G1 d) G2 e) G3	38
Şekil 6.8. 225V için numunelerin XRD kırınım örnekleri a) Altlık b) GO c) G1 d) G2 e) G3	38
Şekil 6.9. 225V için numunelerin FTIR analizleri.	39
Şekil 6.10. 200V için numunelerin yüke bağlı aşınma grafiği.....	40
Şekil 6.11. 225V için numunelerin yüke bağlı aşınma grafiği.....	41
Şekil 6.12. 200V numunelerin farklı yükler altında aşınma yüzey görüntüleri (a-b) AZ31 altlık malzeme, (c-d) G0, (e-f) G1, (g-h) G2, ve (i-j) G3	42

Sayfa

Şekil 6.13. 225V için numunelerin farklı yükler altında aşınma yüzey görüntüleri (a-b) AZ31 altlık, (c-d) G0, (e-f) G1, (g-h) G2, ve (i-j) G3	43
Şekil 6.14. 200V için numunelerin farklı daldırma süreleri sonrası potansiyodinamik polarizasyon eğrileri a) 0.5s, b) 16s ve c) 32s.....	44
Şekil 6.15. 225V için numunelerin farklı daldırma süreleri sonrası potansiyodinamik polarizasyon eğrileri a) 0.5s, b) 16 s ve c) 32s.....	46
Şekil 6.16. Eşdeğer devre modeli.....	48
Şekil 6.17. 200V için farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrileri a)0.5s, b)16s ve c)32s	49
Şekil 6.18. 225V için farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrileri a)0.5s, b)16s ve c)32s	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Yaygın kullanılan yapısal malzemelerin yoğunlukları	3
Çizelge 2.2. Saf Mg'un kimyasal özellikleri.....	4
Çizelge 2.3. 20°C'de saf Mg'un mekanik özellikleri.....	5
Çizelge 2.4. Alaşımvelementlerininvisimlendirme karşılıkları	10
Çizelge 2.5. Bazı yaygın kullanılan Mg Alaşımlarının; kimyasal alaşımları, mekanik özellikleri	11
Çizelge 2.6. AZ31 alaşımının kimyasal içeriği.....	12
Çizelge 2.7. AZ31 Alaşımının mekanik özellikleri.....	12
Çizelge 2.8. Mg, Al ve Düşük C'lu çeliklerin korozyon karşılaştırması	14
Çizelge 3.1. Farklı partikül ilavelerinin MAO kaplamalarında korozyon direnci üzerindeki etkileri	20
Çizelge 4.1. Grafenin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	22
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi.....	25
Çizelge 5.2. Numune isimleri ve elektrolit bileşimleri	26
Çizelge 6.1. 200V için kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları ve ortalama gözenek çapı değerleri	33
Çizelge 6.2. 225V için kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları ve ortalama gözenek çapı değerleri.....	33
Çizelge 6.3. Kaplamaların EDX sonuçları.....	36
Çizelge 6.4. 200V için numunelerin korozyon verileri.....	45
Çizelge 6.5. 225V için numunelerin korozyon verileri.....	47
Çizelge 6.6. 200V için EIS verileri	50
Çizelge 6.7. 225V için EIS verileri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Zn	: çinko
Ca	: kalsiyum
Mn	: mangan
NaOH	: sodyum hidroksit
KOH	: potasyum hidroksit
SiO_3^{2-}	: silikat
AlO_2^-	: alüminat
PO_4^{3-}	: fosfat
Al_2O_3	: alüminyum oksit
CeO_2	: seryum oksit
Si_3N_4	: silisyum nitrür
C_{60}	: fulleren
R_p	: polarizasyon direnci
i_{corr}	: korozyon akım
β_c	: katodik eğim
β_a	: anodik eğim

KISALTMALAR

MAO : Micro Ark Oxidation (Mikro Ark Oksidasyon)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

UNS : The Unified Numbering System (Birleşik Numaralandırma Sistemi)

XRD : X-ray Diffractometer

FT-IR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)

SEM : Scanning Electrone Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)

ağ : ağırlıkça

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yıllar geçtikçe, kıt enerji kaynaklarının ekonomik kullanımına yönelik artan talep, hızla yükselen ham petrol fiyatları ve daha düşük çevresel etkiyi sağlamak için karbon emisyonlarının azaltılması düşük yoğunluktaki malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Düşük yoğunlukta malzeme kullanımı, nihai ürünün ağırlığını önemli oranda düşürmesi sebebiyle yakıt tüketiminde tasarruf sağlamaktadır. Düşük yoğunluğa sahip malzemeler özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe odak noktası olmuştur. Bu malzeme gruplarının en önemlilerinden olan magnezyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, iyi titreşim sönümleme özelliklerine sahip olması sebebiyle son yıllarda en yaygın kullanılan malzemelerden birisi haline gelmiştir. Bununla beraber, Mg ve alaşımlarının aşınma ve korozyon dayanımlarının düşük olması önemli dezavantajları arasındadır ve kullanımını kısıtlamaktadır. Fakat bu tür dezavantajlar malzeme yüzeylerine yapılan kaplama işlemleri ile önemli ölçüde giderilmektedir. Farklı malzeme grupları için genel olarak tercih edilen kaplama işlemleri; fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, mikro ark oksidasyon, elektrolitik biriktirme, sol-gel, termal sprey yöntemleridir. Bu yöntemler arasında plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi olarak da bilinen mikro ark oksidasyon (MAO) kaplama yöntemi, çevreye zararsız olması, kaplamanın adhesif özelliğinin çok iyi olması ve kaplama bileşiminin istenen kombinasyonlarda ayarlanabilmesi gibi nedenlerle, Mg, Al ve Ti esaslı malzemeler için en önemli kaplama yöntemlerinde birisi haline gelmiştir.

Mikro ark oksidasyon işlemi, anot ve katot arasındaki yüksek voltaj farkından dolayı oluşan mikro arkların altlık malzemeye temasıyla malzeme yüzeyinde kısmi ergimeler meydana getirerek elde edilen kaplama yöntemidir. Bu kaplama yöntemi

genel olarak, altlık malzemeye göre yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. MAO işlemleri, yüksek yüzey sertliği, iyi adhezyon (yapışma) özellikleri sergilemektedir.

Kaplamanın kalitesi; elektrolit bileşimi, voltaj, akım yoğunluğu, işlem süresi, darbe akımı ve akım türü (AC veya DC) parametrelerine bağlıdır.

Mikro ark oksidasyon yönteminin en önemli dezavantajları arasında kaplamanın yüksek poroziteli yapıda olması yer almaktadır bu da koruyucu etkiyi azaltmaktadır. Bunun üstesinden gelebilmek için son yıllarda, kaplamada kullanılan elektrolit çözeltisine partikül ilavesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ilavelerle, kaplama faz bileşimi, por karakteristiği, kalınlığı ve tabakanın yoğunluğu değişmektedir. MAO kaplama çalışmaları incelendiğinde en yaygın kullanılan partiküller MoS₂, SiO₂, Al₂O₃, grafit, CeO₂'dir. Literatür çalışmalarına bakıldığında grafit ilavesinin MAO süreci üzerindeki etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunduğu görülmektedir. İki boyutlu yapıya sahip grafit, yüksek elastik modül, elektriksel ve ısı iletkenlik gibi üstün özellikler gösterir. Bazı araştırmacılar grafitin MAO reaksiyonunu hızlandırdığını ve kaplama özelliklerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında, grafit katkısının, endüstride yaygın olarak kullanılan AZ31 alaşımına Mikro Ark Oksidasyon işlemiyle kaplama kalitesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, çözeltiye farklı oranlarda (0g/L, 0,5g/L, 1g/L ve 2g/L) grafit eklenip, kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama yapılan yüzeylerin, karakterizasyonları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını difraktometresiyle (XRD) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile incelenmiştir. Kaplamaların aşınma dayanımını incelemek için, 2N, 4N ve 8N yükleri altında ileri geri aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların korozyon özellikleri, elektrokimyasal korozyon deneyleriyle (potansiyodinamik polarizasyon, elektrokimyasal empedans) araştırılmıştır. Aşınma ve korozyon mekanizmalarını açıklamak için deneyler sonrası malzemeler SEM ile incelenmiştir. Sonuç olarak, AZ31 alaşımının, elektrolit bileşimine eklenen grafit ile MAO kaplanma işlemi, korozyon ve aşınma dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

Mg yer kabuğunda en çok bulunan altıncı elementtir. Magnezyum, farklı Mg bileşikleri olarak yer kabuğunda bulunabilir [1]. En yaygın bulunan bileşikler; Manyezit ($MgCO_3$), Dolomit ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$), Karnalit ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ve ayrıca deniz suyudur [2]. Mg, deniz suyunda en çok bulunan üçüncü çözülmüş mineraldir ($1,1kg/m^3$). Mg yapısal metallerin arasında yaklaşık $1,74g/cm^3$ yoğunluğu ile en hafifidir (Çizelge 2.1). Bu da, çeliğin yoğunluğunun yaklaşık dörtte birine ve alüminyumun üçte ikisine tekabül etmektedir [5-7].

Çizelge 2.1. Yaygın kullanılan yapısal malzemelerin yoğunlukları [3-4].

Malzemeler	Yoğunluk
Çelik	7.2
Titanyum	4.51
Alüminyum	2.71
Magnezyum	1.74

Düşük yoğunluğu ve yüksek spesifik mekanik özellikleri nedeniyle Mg esaslı malzemeler şirketler tarafından ağırlık açısından kritik uygulamalar için aktif olarak talep edilmektedir [4].

2.1. SAF MAGNEZYUMUN ÖZELLİKLERİ

2.1.1. Kimyasal Özellikleri

Yer kabuğunun %2,7'sinde bulunan, atom numarası 12 ve toprak alkali metaller grubunda olan Saf Mg'nin kimyasal özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [2].

Çizelge 2.2. Saf magnezyumun kimyasal özellikleri [2].

Sembol	Mg
Atom Ağırlığı	24.3050
Atom Hacmi	14.0 cm ³ /mol
Atom Yarıçapı	0.160nm
Serbest atomlarda yörünge elektron dizilimi	1s ² ,2s ² ,2p ⁶ ,3s ²
En yaygın değerlik	2+
Kristal yapı	Hekzagonal sıkı paket (HCP)
Yoğunluk (20°C'de)	1.738 g / cm ³
Erime noktası	650°C
Kaynama noktası	1090°C
Isıl iletkenlik (27°C'de)	156 W · m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül ısı kapasitesi (20°C'de)	1.025 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Elektriksel iletkenlik	% 38,6 IACS

2.1.2. Mekanik Özellikler

Çizelge 2.3'te 20° C'de farklı koşullar altında işlenen saf Mg'nin mekanik özellikleri verilmiştir [2,8-10].

Çizelge 2.3. 20°C'de saf magnezyumun mekanik özellikleri.

Saf magnezyum	Tavlanmış levha	Elle haddelenmiş sac	Kum kalıba döküm	Ekstrüde	PM-ekstrüde	DMD-ekstrüde
%0,2 Basma akma dayanımı (MPa)	69-83	105-115	21	34-55	92±12 ^a	74±4 ^b
%0,2 Çekme akma dayanımı (Mpa)	90-105	115-140	21	69-105	132±7 ^c	97±2 ^d
Çekme dayanımı (MPa)	160-195	180-220	90	165-205	193±2 ^c	173±1 ^d
Sertlik HB ^e	40-41	45-47	30	35	-	-

a-PM: 350°C'de ekstrüde edilmiş toz metalurjisi yöntemi, ekstrüzyon oranı 20.25: 1 [8].

b-DMD: 350°C'de ekstrüde edilmiş parçalanmış eriyik biriktirme yöntemi, ekstrüzyon oranı 20.25: 1 [10].

c-PM: 250°C'de ekstrüde edilmiş toz metalurjisi yöntemi, ekstrüzyon oranı 20.25: 1 [9].

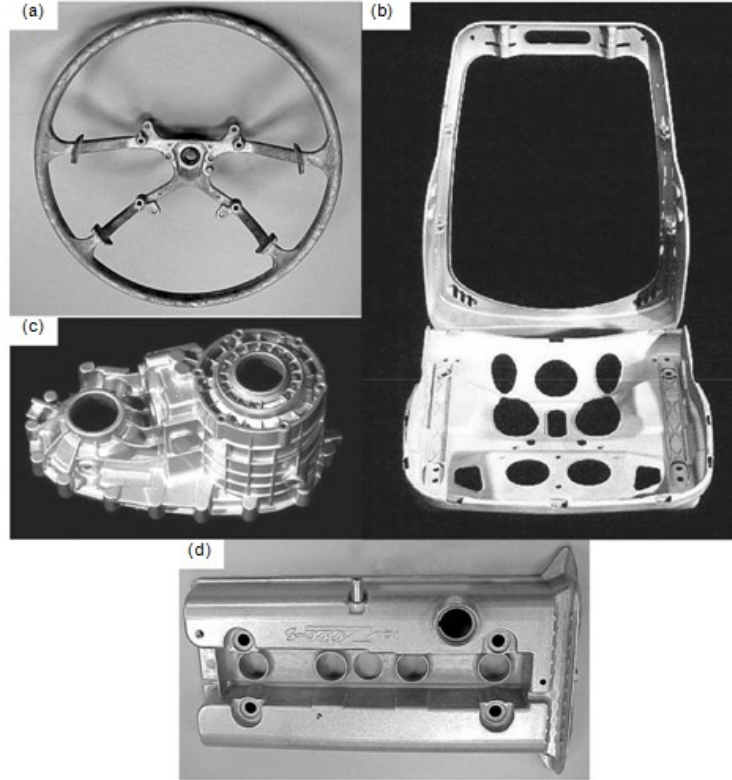
d-DMD: 250°C'de ekstrüde edilmiş parçalanmış eriyik biriktirme yöntemi, ekstrüzyon oranı 20.25: 1 [9].

e: 10 mm çapında bilya, 500 kg yük kullanarak

2.2 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMALARI

2.2.1. Otomotiv Uygulamaları

Otomotiv endüstrisinde; daha hafif, daha yüksek yakıt verimliliği ve daha yüksek performanslı araçlar üretmek için artan çevresel ve yasal baskılar, Mg kullanımında artışa neden olmuştur. Sektörde yaygın olarak kullanılan geleneksel çelik parçaların yerini magnezyum, alüminyum ve metal matrisli kompozitler gibi yeni gelişmiş malzemeler almaktadır. Şekil 2.1 otomotiv endüstrisinde kullanılan Mg parçalardan bazılarını göstermektedir (a) Toyota Camry de kullanılan direksiyon simidi. b) 2,6 kg ağırlığındaki Jaguar ve Fiat modellerinde kullanılan koltuk desteği. c) 2,7 kg ağırlığındaki AZ91D'den yapılmış ara şanzıman. d) Ford Zetec modelinde kullanılan kapak eksantiriği) [11].



Şekil 2. 1. Mg alaşımlarının kullanıldığı otomotiv parçaları [11].

VW Passat ve Audi A4'te vites kutusu Mg parçalar kullanılmış, Toyota Lexus, Carina, Celica ve Corolla'da direksiyonlar Mg'den yapılmıştır [11]. Mercedes Benz

SLK'da yakıt deposu kapağı Mg alaşımdan yapılmıştır. Hyundai Azera ve Kia Amanti'de Mg, şasi, direksiyon kolunu muhafazası, sürücünün hava yastığı muhafazası, direksiyon simidi ve kilit gövdesi gibi iç kısımlara yerleştirilmiştir [12].

2.2.2. Havacılık ve Uzay Uygulamaları

Havacılık endüstrisinde, emisyon azaltma ve yakıt verimliliği için artan ihtiyaç nedeniyle ağırlık azaltma en kritik hedeflerden biridir. Mg esaslı malzemeler hem sivil hem de askeri uçaklarda yaygın olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bazı uygulamalar arasında ters itme gücü (Boeing 737, 747, 757, 767 için), dişli kutusu (Rolls-Royce), motorlar ve helikopter şanzıman muhafazaları vb. yer alır. Mg alaşımları hafif olmalarından dolayı Eurofighter Typhoon, Tornado ve F16 gibi askeri uçaklar da şanzıman kasalarında kullanılır [14]. Başlıca MD500, Eurocopter EC120, NH90 ve Sikorsky S92 olmak üzere gibi birçok helikopterin dişli kutularında, uydu parçalarında ZE41, AZ31, AZM ve AZ61 dövme alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Şekil 2.2'de, hemen hemen tüm parçaları Mg alaşımlarından yapılmış olan ilk uçak Northrop XP-56 verilmiştir [16].



Şekil 2.2. Mg alaşımlarından yapılmış olan ilk uçak Northrop XP-56 [16].

2.2.3. Tıbbi Uygulamalar

Kullanılan diğer implant materyallerinden çok daha hafif bir yoğunluğa sahip olan Mg, hidroksiapatite kıyasla da daha fazla kırılma tokluğuna sahiptir. Ayrıca, elastik modülü ve basınç akma dayanımı değerleri, doğal kemiğinki ile benzerdir [17]. Mg

iyi biyouyumluluğa sahiptir ve insan vücut sıvısında korozyonla biyolojik olarak parçalanabilir, böylece implantı çıkarmak için başka bir operasyona olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Tüm bu istenen özellikler, Mg esaslı malzemeyi umut verici bir implant materyali haline getirir [17-19].

2.2.4. Elektronik Uygulamalar

Elektronik ekipmanlarda da aranan özelliklerin başında hafiflik ve dayanıklı olması gelir. Mg esaslı malzemeler, plastik kadar hafif olduklarından ve plastik benzerlerine kıyasla mukavemet, ısı transferi ve elektromanyetik parazit ve radyo frekansı parazitini koruma becerisinde büyük gelişme gösterdiklerinden dolayı, cep telefonlarının, bilgisayarların, dizüstü bilgisayarların ve taşınabilir ortam oynatıcılarının muhafazalarında kullanılır [14].

2.2.5. Diğer Uygulamalar

Mg'nin hafif ve optik stabilite özellikleri; tüfek dürbünleri ve dürbünlerde optik ekipmanlarda kullanılmaktadır. Daha yüksek çalışma verimliliği elde etmek için, elde tutulan çalışma aletlerinin daha fazla taşınabilirlik sağlamak üzere hafif olması arzu edilir. Bu nedenle, düşük yoğunluklu Mg'nin darbeye karşı direnci, gürültüyü ve titreşimi azaltma yeteneği, onu çok çeşitli elde taşınır aletler için tercih edilen malzeme haline getirmektedir [14].

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Saf Mg'nin özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek için alaşım elementlerinden faydalanılır. Mg alaşımlarının çoğunda, intermetalik fazların varlığı gözlemlenebilir. Bu fazlar, mikro yapıyı etkilemeye yardımcı olur ve dolayısıyla Mg alaşımının mekanik özelliklerini etkiler.

2.3.1. Bazı Alaşım Elementlerin Katılmasının Magnezyum Üzerindeki Etkileri

2.3.1.1. Alüminyum: Mg üzerinde en olumlu etkiye sahip olduğundan en yaygın kullanılan alaşım elementlerindedir. Alüminyum eklenmesi, Mg'nin sertliğinin ve dayanımının artmasına neden olur. Aynı zamanda dökülebilirliği de geliştirir [2].

2.3.1.2. Bakır: Bakırın Mg içinde katı çözünürlüğü sınırlıdır [1]. Mg'ye bakır eklenmesine dair yapılan çalışmalar, Mg'nin dayanımını artırmaya yardımcı olduğunu; ancak, sünekliği düşürdüğünü göstermiştir [19-21]. Bakır ilavesinin korozyon direncini olumsuz etkileyebileceğinden de söz edilebilir [2].

2.3.1.3. Manganez: Manganez genellikle diğer alaşım elementleriyle birlikte kullanılır. Manganez ilavesi, Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının tuzlu su korozyon direncini artırır. Manganezin Mg'deki düşük çözünürlüğü, Mg'deki ilave oranını sınırlar [2].

2.3.1.4. Çinko: Çinko da Mg'de en etkili alaşım elementlerinden biri olduğu için çok sık kullanılır. Mukavemeti artırırken sünekliği azaltmamak adına genellikle alüminyum ile birlikte kullanılır [22].

2.3.1.5. Demir: Demirin çok düşük oranda dahi olsa varlığı, Mg alaşımlarında zararlıdır ve korozyon direncini çok ciddi oranda düşürür. Korozyona karşı en iyi koruma için izin verilebilir demir içeriği en fazla %0,005 olabilir [2].

2.3.1.6. Nikel: Nikel de bakır gibi Mg'de sınırlı katı çözünürlüğe sahiptir [1]. Mg alaşımlarına nikel ilavesi çok küçük miktarlarda bile olsa korozyon direncini olumsuz etkiler [2].

2.3.2. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Mg alaşımları döküm veya dövme alaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımların kimyasal bileşimlerinde ana alaşım elementi olarak; Al, Mn, Zn ve bazı nadir toprak elementleri (RE) yer alır [3]. Bu ana alaşım elementlerini

isimlendirmede ASTM B275 (American Society for Testing and Materials) kullanılır. Her alaşım, ana alaşım elementlerini belirten harflerle etiketlenir, ardından bu elementlerin yüzdelerini temsil eden rakamlar gelir [2].

Çizelge 2.4. Alaşım elementlerinin isimlendirme karşılıkları [11].

Alaşım Elementi	Al	Cu	Cd	RE	Fe	Th	Zr	Li	Mn	Ni	Pb	Ag	Cr	Si	Sn	Zn
Harf	A	C	D	E	F	H	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	Z

Mg alaşımının tanımı üç kısımdan oluşur. İlk kısım, yüzde sırasına göre oranı yüksek olan önce olacak şekilde düzenlenmiş iki ana alaşım elementini temsil eden iki kısaltma harfinden oluşmaktadır (Çizelge 2.4). Alaşım elementlerinin yüzdeleri eşit olduğu durumda, harfler alfabetik olarak sıralanır. İkinci kısımda, elementlerin alaşım içindeki yaklaşık olarak yüzdelerini belirtir. Üçüncü kısım ise aynı ana kimyasal yapıya sahip alaşımların ayrılması için vardır [11].

Kompozisyonlar standart hale gelirken sırayla atanan alfabenin bir harfinden oluşur, yani:

- A ASTM ile kayıtlı ilk kompozisyonlar
- B ASTM ile kayıtlı ikinci kompozisyonlar
- C ASTM ile kayıtlı üçüncü kompozisyonlar
- D Yüksek saflık, ASTM'ye kayıtlı
- E ASTM'ye kayıtlı yüksek korozyon direnci
- X Deneysel alaşım, ASTM'ye kayıtlı değil

Örneğin, Mg alaşımlarından AZ31B göz önüne alındığında:

A → yüzde ağırlık olarak Mg'den sonra Al'nin daha fazla olduğunu

Z → yüzde ağırlık olarak Al'den sonra da Zn'nin ana alaşım elementi olduğunu belirtir

3 → Al'nin % oranının (2,6-3,4 arasında olduğunu) en yakın tam sayıya tamamlandığını,

1 → Zn'nin % oranının (0,6-1,4 arasında olduğunu) en yakın tam sayıya tamamlandığını ifade eder.

B Bu nominal bileşime sahip kayıtlı ikinci özel bileşimi gösterir.

Bazı yaygın olarak kullanılan Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri Çizelge 2.5’de verilmiştir [3].

Çizelge 2.5. Bazı yaygın kullanılan Mg Alaşımlarının; kimyasal alaşımları, mekanik özellikleri [3].

					Mekanik Özellikler		
	ASTM Numarası	UNS Numarası	Bileşim (%ağ) ^a	Durumu	Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Süneklik *
Dövme	AZ31B	M11311	3,0 Al, 1,0 Zn, 0,2 Mn	Ekstrüzyon Yapılmış	262	200	15
	HK31A	M13310	3,0 Th, 0,6 Zr	Soğuk Şekillendirilmiş, kısmen tavllanmış	255	200	9
	ZK60A	M16600	5,5 Zn, 0,45 Zr	Yapay Yaşlandırılmış	350	285	11
Döküm	AZ91D	M11916	9,0 Al, 0,15 Mn, 0,7 Zn	Dökülmüş halde	230	150	3
	AM60A	M10600	6,0 Al, 1,0 Si, 0,13Mn	Dökülmüş halde	220	130	6
	AS41A	M10410	4,3 Al, 1,0 Si, 0,35 Mn	Dökülmüş halde	210	140	6

^a Bileşimin geri kalanı Mg’dir.

* 50mm ölçü boyu için %kopma uzaması cinsinden sünekliği [3].

2.3.2.1. AZ31 Alaşımının Özellikleri

AZ31 Mg alaşımı Al (% 2,5-3,5), Zn (% 0,6-1,4), Mn (% 0,2-1,0) ve denge Mg'den oluşur [23]. Al ve Zn malzemenin sertleşmesini artırır ve sertleşme süresini hızlandırırken, Mn korozyon direncini artırır [24]. AZ31 alaşımı, AZ serisinde Al oranı en düşük olan alaşımdır. AZ31 alaşımının ortalama kimyasal içeriği Çizelge 2.6’da verilmiştir [25].

Çizelge 2.6. AZ31 alaşımının kimyasal içeriği [25].

Element	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
% Ağırlık oranı	3	0,83	0,31	0,01	0,003	0,001	0,001	Geri Kalan

AZ31 alaşımı ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına göre dövme yöntemi ile üretilmektedir. AZ31 alaşımının UNS (The Unified Numbering System) numarası M11311'dir. AZ31 alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 2.7'de verilmiştir [3].

Çizelge 2.7. AZ31 Alaşımının mekanik özellikleri [3].

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Dayanımı MPa	50mm'deki sünekliği %
AZ31	262	200	15

AZ31 alaşımının düşük yoğunluğu, iyi boyut kararlılığı, kolay işlenebilir olması gibi iyi mekanik özellikleri nedeniyle son yıllarda daha sık tercih edilen malzeme olmasına sebep olmuştur. Özellikle otomobil parçaları, biyolojik tıp ve iletim ekipmanlarında kullanılmaktadır. Fakat AZ31 alaşımının dezavantajı sertliğinin nispeten düşük olması ve oda sıcaklığında korozyona uğrayabilmesidir. Düşük sertliği ve hızlı korozyon oranı, endüstride ve tıbbi malzemelerde kullanımına engel teşkil eder [26].

2.4. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞLARI

Son yıllarda kullanımı istikrarlı bir şekilde artan Mg ve alaşımları, en çok hafif olması, şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek olması, geri dönüştürülebilmesi ve uygun fiyatlı olması gibi sağladığı avantajlardan ötürü, yoğun talep görmektedir [27]. Ayrıca Mg cevherlerinin arzı, yaygın ve kolay bulunabilir olduğundan kolay bir şekilde tükenmeyeceği bilinmektedir. [28]. Mg ve alaşımlarının düşük elektrot potansiyelinden kaynaklı sergilediği düşük korozyon ve aşınma direnci kullanım alanını büyük ölçüde kısıtlamaktadır [11].

Bu bölümde Mg ve alaşımlarında sıkça görülen korozyon türleri, korozyona etki eden faktörler, önleme-iyileştirme yöntemleri, aşınma davranışları ve aşınma mekanizmaları sunulmaktadır.

2.4.1. Aşınma Davranışı

Aşınma, ortamda bulunan başka bir malzeme ile temas sırasında ana malzemenin yüzeyinde sürekli ve kademeli olarak gerçekleşen malzeme kaybıdır [29]. Mg ve alaşımlarının sahip olduğu düşük sertlik özelliği, malzemenin hızlı aşınmasına neden olmaktadır. Malzemenin maruz kaldığı yük ve hızın durumuna göre farklı aşınma mekanizmaları oluşmaktadır [30-31].

Mg ve alaşımlarında görülen başlıca aşınma mekanizmalarıdır [30].

- Abrasif aşınma
- Delaminasyon
- Adhesif
- Termal yumuşama ve ergime
- Oksidasyon

2.4.2. Korozyon Davranışı

Mg'nin korozyon potansiyeli, oda sıcaklığında (25°C), derişimi azaltılmış klorür çözeltisi veya standart H elektrotuna göre nötr bir çözelti içinde -2.37 V'dir. Bu, Mg'nin, asidik çözeltilerde dahi oldukça düşük iletkenliğe sahip kararlı bir filmle birlikte aşındığını gösterir. Mg üzerinde oluşan oksit film, önemli bir yüzey koruması sağladığı için değişik sıvı çözeltiler dışında avantaj sağlar. Mg'nin korozyon oranının, Al ve düşük C'lu çeliklerin korozyon oranı ile karşılaştırılması Çizelge 2.8'de verilmiştir [32].

Çizelge 2.8. Mg, Al ve Düşük C'lu çeliklerin korozyon karşılaştırması [32].

Malzeme	Korozyon hızı ($\mu\text{m}/\text{year}$)	Çekme Dayanımı Kaybı (2-5 yılsonra,%)
Deniz atmosferi		
Al alaşımı 2024	2.0	2.5
Mg alaşımı AZ31	18.0	7.4
Düşük C'lu çelik (%0.27C)	150.0	75.4
Endüstriyel atmosfer		
Al alaşımı 2024	2.0	1.5
Mg alaşımı AZ31	27.7	11.2
Düşük C'lu çelik (%0.27C)	25.4	11.9
Kırsal Atmosfer		
Al alaşımı 2024	0.1	0.4
Mg alaşımı AZ31	13.0	5.9
Düşük C'lu çelik (%0.27C)	15.0	7.5

Mg alaşımlarının düşük korozyon direncine sahip olmasının iki temel sebebi:

- İkincil fazların veya safsızlıkların varlığı (İç galvanik korozyona sebep olur) ve
- Mg üzerinde oluşan yarı pasif hidroksit filmin, Al ve paslanmaz çeliğin üzerinde oluşan pasif filminden daha az kararlı olmasıdır [11].

Mg alaşımlarında en sık görülen korozyon türleri [11]:

- Galvanik korozyon
- Çukurcuk (pitting) korozyonu
- Gerilim korozyonu
- Yüksek sıcaklık korozyonu

2.4.2.1. Korozyonu Azaltma Yolları

Mg esaslı malzemelerin korozyon direncini ve dolayısıyla kullanım alanını geliştirmek ve performansını arttırmak amacıyla, malzeme yüzeyleri üzerinde koruyucu seramik, kompozit veya polimer kaplamalar yapılmaktadır. Bu yüzey kaplamaları altlık malzemenin yapısını değiştirmeden mekanik özellikler etkin bir şekilde korur [33].

Aşağıda, Mg esaslı malzemeler için kanıtlanmış korozyon önleme yöntemlerinden bazıları özetlenmiştir [11]:

- Yüzey başkalaşım teknolojisinin (lazer tavlama, iyon implantasyonu vb.) kullanımı.
- Mg esaslı malzemelerin çevre ile etkileşimini kesmek için koruyucu kaplama ve filmlerin uygulanması.
- Kullanılan alaşımların yüksek saflıkta olması ve tolerans limiti olan yabancı maddelerin sınırın altına düşürülmesi.
- Mg esaslı malzemelere farklı alaşım elementleri, yeni takviyeler veya ikincil fazların eklenmesiyle yeni alaşımlar geliştirilmesi.

Mg esaslı malzemeleri kaplamada en yaygın kullanılan yöntemler; kimyasal dönüşüm, anotlama, termal spreycaplamaları, organik/polimer kaplamalar ve mikro ark oksidasyon (MAO) kaplamalarıdır [11].

Bunlar arasında ise MAO kaplama, güçlü yapışması, iyi korozyon ve aşınma direnci sağlaması sebebiyle son yıllarda oldukça popülerdir.

BÖLÜM 3

MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİ

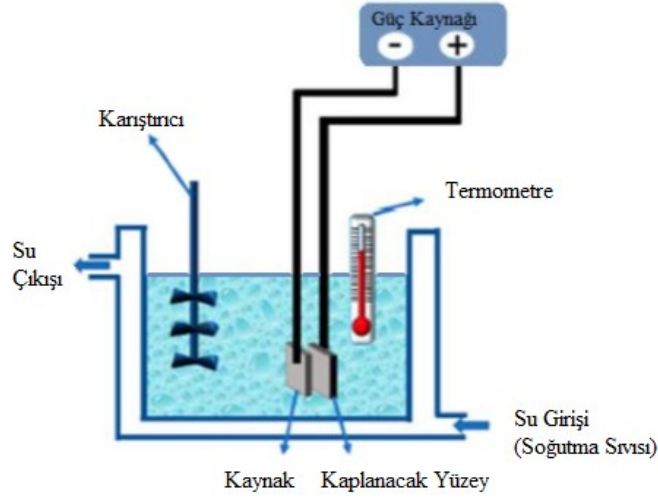
3.1. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNİN TARİHÇESİ

Amerikalı bilim insanları (W. McNeil ve L. Gruss) tarafından yayınlanan bir çalışma, mikro ark oksidasyonu (MAO) üzerine araştırmanın 1950'li ve 1960'lı yıllarda başladığını göstermektedir. Altlık malzemenin bileşenlerinden ve bir elektrolitten karmaşık oksit kaplamaları sentezlemek için anot kıvılcımları ilk onlar tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemin daha kapsamlı araştırılması ve kullanımı ise ilk kez 1976 yılında Sovyetler Birliği'nde, G. A. Markov tarafından gerçekleştirilmiştir. Yöntem, Markov'un araştırmasının yayınlanmasından sonra başta Rusya olmak üzere pek çok ülkede yaygın olarak kullanılmıştır [34].

Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) olarak da bilinen Mikro ark Oksidasyon (MAO) yöntemi Al, Mg ve Ti gibi hafif metaller üzerinde inorganik "seramik" kaplama üreten su bazlı bir yüzey işleme yöntemidir [35-36].

3.2. MİKRO ARK OKSİDASYON TEKNİĞİ ve UYGULAMASI

Mikro Ark Oksidasyon, titanyum, alüminyum, zirkonyum, magnezyum ve alaşımları başta olmak üzere hafif metaller üzerinde oksit bazlı bir kaplama ile sonuçlanan yüksek voltajlı, anodik bir biriktirme işlemidir [37]. MAO işlemi temel olarak; anot ve katot, elektrolit banyosu, bir güç kaynağı ve soğutma sisteminden oluşur. İşlemin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. MAO, anot ve katot arasındaki yüksek voltaj farkından dolayı oluşan mikro arkların altlık malzemeye temasıyla malzeme yüzeyinde kısmi ergimeler meydana getirilerek elde edilen kaplama yöntemidir. Elektrolitin içindeki Oksijenin varlığı, kimyasal reaksiyon oluşturarak, yüzeyde oksitli bileşenin birikmesine neden olmaktadır [38].



Şekil 3.1. MAO işleminin şematik görünümü [38].

Genel olarak hafif alaşımlar için tercih edilen MAO yönteminde kaplanacak malzeme elektrolit içerisine anot olarak yerleştirilir [39]. Katot, elektrolit çözeltisi içinde çözünmeyecek bir metalden seçilir ve böylece sisteme güç verildiğinde oksijen oluşumu sağlanmış olur [40]. Güç kaynağından verilen voltaj değeri, seçilen malzemeye göre belirli bir değeri aştığında reaksiyon başlar ve numune yüzeyinde arklar oluşur böylece kaplama başlamış olur. Reaksiyon sonucu elektrolit çözeltisi ısınmaya başlayacaktır, elektrot sıcaklığı 35 °C' nin altında tutulması gerektiğinden, şekilde görüldüğü gibi bir soğutma sistemine ihtiyaç vardır.

3.3. MİKRO ARK OKSİDASYONUN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

MAO'nun, yaygın olarak kullanılan anotlama yöntemlerine göre daha çok tercih edilmesini sağlayan avantajları: mekanik (sertlik, aşınma direnci, yorulma direnci, yapışma kabiliyeti) ve fizikokimyasal özellikleri bakımından daha iyi kaplamalar elde etme imkânı, numune hazırlamada teferruat gerektirmemesi ve dolayısıyla işlem süresinin kısa ve ekonomik olması, korozyon direnci sağlaması ve çevre kirliliğine neden olmamasıdır [34].

MAO'nun sağladığı bu avantajların yanı sıra eksiklikleri de mevcuttur;

- MAO'nun yüksek voltajı, yüksek akımı ve düşük enerji verimliliği nedeniyle, büyük ölçekli iş parçalarını imal etmek zor ve masraflıdır.
- MAO, mikro deşarjların yüksek elektrik alanı altında anodik oksit filmin dielektrik parçalanmasına neden olduğu bir anotlama işlemidir. Ve bu süreçte enerji verimliliği % 30'dan azdır, bu yüzden kaçınılmaz olarak yüksek enerji tüketimine sebep olur [41].
- MAO'nun bir diğer ve en önemli dezavantajı da yüksek poroziteli yapıda olmasıdır. Fakat bunun üstesinden gelmek mümkündür [42].

3.4. MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

Kaplamanın kalitesi; elektrolit bileşimi, voltaj, akım yoğunluğu, işlem süresi, darbe akımı ve akım türü (AC veya DC) parametrelerine bağlıdır.

3.4.1. Elektriksel Parametreler

MAO kaplama işlemi, uygun koşullarda mikro deşarjların etkisi altında elektrokimyasal ve elektrotermal oksidasyon işlemi olarak tanımlanabilir. Akım-voltaj ($I - V$) yapısal özellikleri, mikro ark oksidasyon sürecini ve kaplamanın özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Akım / voltaj, polarite, frekans ve görev döngüsü, akım yoğunluğu ve uygulanan voltaj gibi elektriksel parametreler çok önemlidir [43].

3.4.2. Elektrolit Bileşimi

Elektrolit bileşimi, MAO kaplamanın porozitesi, şekli, dağılımı, kaplama oluşumunun kinetiği, kaplama bileşimi ve kaplamaların genel korozyon direnci de dahil olmak üzere morfolojik özelliklerini etkileyen ana parametrelerden biridir. MAO kaplamalarında yaygın olarak alüminatlar, fosfatlar ve silikatlar dahil olmak üzere çeşitli elektrolit türleri kullanılmaktadır [37].

Alkali elektrolitler, genellikle Mg alaşımlarının MAO kaplamaları için kullanılır. Alkali metal hidroksitler (NaOH ve KOH gibi) genellikle MAO işlemlerinde elektrolit bileşiminin pH'ı ayarlamak için kullanılır. pH'ı ayarlamanın yanı sıra, bu bileşikler ayrıca MAO için kullanılacak olan çözeltinin iletkenliğini de geliştirir [42]. Mg üzerine yapılan MAO çalışmalarından çıkarılan sonuçlara bakacak olursak [43];

- Silikat elektrolitinde üretilen kaplamaların, fosfat çözeltisinde üretilenlerden daha sert, yapışma mukavemetinin daha yüksek ve aşınma direncinin önemli ölçüde daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [42]. Ayrıca fosfatın 5g/L eşik değerinin üzerinde kullanıldığı çözeltilerde daha büyük gözeneklerin oluşmasına neden olduğu, yüzey pürüzlülüğünü artırdığı ve dolayısıyla korozyon direncini azalttığı gözlemlenmiştir.
- Hidroksit, fosfat veya ikisinin bir arada olduğu durumda potasyum iyonları içeren elektrolitler, sodyum iyonlarınınkinden korozyona daha dirençli kompakt tabakalar üretir. Elektrolitik çözelti, fosfat iyonlarına ek olarak yalnızca potasyum iyonları (sodyum iyonları olmadığında) içerdiğinde, daha iyi korozyon koruması elde edilir [43].
- Ek olarak elektrolitte SiO_3^{2-} anyonlarının varlığı MAO kaplamalarında korozyon direncine PO_4^{3-} veya AlO_2^- iyonlarından daha faydalı olduğu da görülmüştür [43].
- Li vd. tek başına NaOH varlığını araştırmıştır. Bu kapsamda Fosfat ve NaOH'nin rollerini karşılaştırmak için, konsantrasyonları 0.1 mol olarak sabitlemişler ve MAO kaplamasını oluşturmaya yetecek bir minimum akım yoğunluğu seçmişlerdir. Daha net bir sonuç elde etmek için, MAO kaplamaları sadece fosfat (P), sadece NaOH (N) ve hem fosfat hem de NaOH (PN) elektrolitlerinin bir kombinasyonunu kullanılarak hazırlamışlardır. Elektrolitte NaOH'nin varlığının, gözenek morfolojisini değiştirdiği, gözenek boyutunu azalttığı, kaplama homojenliğini iyileştirdiği ve genel korozyon direncini arttırdığı sonuçlarını elde etmişlerdir [44].

Bunların yanı sıra elektrolit katkı maddesinin etkinliği tek başına değerlendirilemez zira katkı maddesinin etkinliği, elektrolit içindeki diğer kimyasal bileşenlerin

varlığına da bağlıdır ve elektrolit bileşimi hazırlanırken dikkat edilmesi gereken temel husus çevreye zararlı olmamasıdır [37].

3.4.3. Partikül İlavesi

Kaplama kalitesini iyileştirmek için mikroyapı ve bileşimi en uygun hale getirmenin bir diğer yolu da elektrolit bileşimini değiştirmektir. Son yıllarda, MAO kaplamalarında tabakanın gözenek özelliğinin, kalınlığının ve kompaktlığının sızdırmaz hale getirilmesi amacıyla elektrolite partikül ilavesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Partikül ilavesi MAO işlemini, elektrolit bileşiminde ki değişen pH değeri, iletkenlik ve viskoziteden kaynaklı olarak etkilemektedir. MAO kaplamalarda yağlayıcı özellik, kimyasal dayanım ve kararlılık sağlaması, antibakteriyel özellikleri geliştirmesi ve yüksek sertliğe olanak tanınması amacıyla yaygın olarak kullanılan partikül takviyeleri; Ag, MoS₂, SiO₂, Al₂O₃, CeO₂ ve grafittir [45].

Literatürde bazı Mg alaşımları için kullanılan partiküller ve korozyon direnci üzerindeki etkileri Çizelge 3.1’de verilmiştir [37].

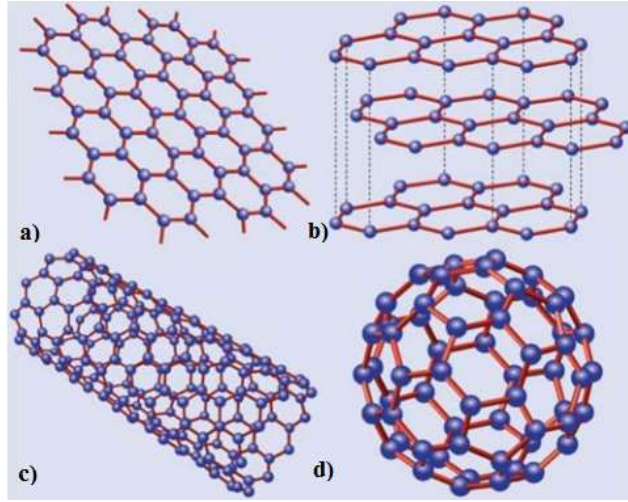
Çizelge 3.1. Farklı partikül ilavelerinin MAO kaplamalarında korozyon direnci üzerindeki etkileri [37].

Partikül	Altık Malzeme	Sonuçlar
Al ₂ O ₃	AZ31	Gözenekleri doldurarak kaplama homojenliğini ve korozyonu iyileştirmiştir.
Si ₃ N ₄	AZ31	Mg ₃ SiO ₄ fazının biriktirilmesi ve koruyucu tabakanın kalınlığının artırılmasıyla korozyon iyileştirmiştir.
Grafen oksit	AZ31	Yoğun bir mikroyapı oluşturarak korozyonu iyileştirmiştir.
Grafen	AZ91	Mikro çatlaklar ve gözeneklilikte azalma yoluyla korozyon iyileştirme.

BÖLÜM 4

GRAFEN

Organik kimyanın temeli olan karbon, bağlanma esnekliğinden kaynaklı, çok çeşitli fiziksel özelliklere sahip sınırsız sayıda farklı yapıya sahiptir. Grafen; tek bir atomik katman kalınlığına sahip, iki boyutlu, altıgen düzende karbon allotropudur (Şekil 4.1 a). Diğer karbon allotroplarının elektronik özellikleri bünyesinde barındırdığı için grafen önemli bir yere sahiptir. Grafit; bir grafen katman yığını olarak görülebilir (Şekil 4.1 b). Karbon nanotüpler, grafen silindirleridir (Şekil 4.1 c). Fullerenler (C₆₀), altıgen kafes üzerine beşgenlerin eklenmesiyle sarılmış grafenden oluşan moleküllerdir (Şekil 4.1.d) [46].



Şekil 4.1. a) Grafen, b) Grafit c) Karbon nanotüpler, d) Fullerenler (C₆₀) [46].

4.1. GRAFENİN ÖZELLİKLERİ

Şimdiye kadar ölçülen en güçlü (güçlü karbon bağlarının etkisi), en sert malzeme olan grafenin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tüm bu özellikler grafenin, birçok uygulamada kullanılan benzer malzemelere göre, daha çok tercih edilmesine neden olur [47].

Çizelge 4.1. Grafenin mekanik ve fiziksel özellikleri [47].

Özellik	Grafen
Yoğunluk	2.25 g/cm ³
Elastiklik Modülü	0.5 – 1 Tpa
Çekme Dayanımı	130 GPa
Isıl iletkenlik	5.3 ×10 ³ WK ⁻¹ m ⁻¹
Termal Genleşme katsayısı	-6×10 ⁻⁴ /K
Belirli yüzey alanı	2630 m ² /g
Elektron devinirliği	1500 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Geçirgenlik	2 nm kalın film için; >% 95 10 nm kalın film için; >% 70
Özdirenç	10 ⁻⁶ Ω-cm
Kristal Yapısı	Hegzoganal
Hibrit şekli	sp ²

4.2. GRAFENİN UYGULAMA ALANLARI

Grafenin tüm bu üstün özellikleri, alan etkili transistörler, elektromekanik sistemler, gerinim sensörleri, elektronik eşyalar, süper kapasitörler, güneş pilleri, biyonic cihazlar gibi pek çok uygulama alanına sahip olmasına olanak sağlamıştır [48].

Ayrıca yüksek mukavemete ve benzersiz termal ve elektriksel özelliklere sahip olan grafen, son yıllarda kompozit teknolojisi için önemli bir takviye malzemesi haline gelmiştir. Bu kapsamda, Aydın ve Turan (2020) grafen takviyeli saf alüminyum matris kompozitlerin geliştirilmiş yüksek sıcaklık mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak grafen ilavesi, tüm test sıcaklıkları altında verim ve gerilme mukavemetinde artışa yol açtığını ve saf Al'a ağırlıkça %0.25 grafen nanoplatelet eklendiğinde, 25°C, 150°C ve 250°C'de sırasıyla %24.38, %12.5 ve %5.7 akma dayanımı artışı sağladığını bildirmişlerdir [49].

4.3. GRAFEN KATKISININ MİKRO ARK OKSİDASYON KAPLAMALARINA ETKİSİ

Son yıllarda özellikle dikkat çeken grafen, MAO kaplama çalışmalarında da takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlardan bazıları şöyledir;

Li vd. (2017) 6063 alüminyum alaşımının MAO davranışları üzerine grafen partiküllerinin etkisi ve kaplama özellikleri üzerine yaptığı çalışmada, grafen ilavesinin kaplama kalınlığını ve sertliğini arttırdığı, kaplama yüzeyindeki poroziteyi ise azalttığı rapor edilmiştir. Korozyon özellikleri incelendiğinde, elektrolite ilave edilen grafenin, korozyon dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Bu durum grafenin yüksek elektrik iletkenliğine sahip olması ve MAO prosesindeki elektrik alanı etkilemesi ve kaplamaya grafen birikiminin artmasıyla açıklanmıştır [50].

Chen vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada; grafen ilavesinin Mg-Li alaşımında MAO kaplamanın mikro yapısı ve özelliklerine etkisini incelemiştir. Grafen etkisinin, kaplamada yapısal hataların daha az olduğu ve daha uniform bir yapı elde edildiği rapor edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda da grafen ilavesinin kaplamanın korozyon ve aşınma direncini arttırdığı rapor edilmiştir [51].

Han vd. (2018) tarafından grafen katkısının AZ91 alaşımında Mikro Ark Oksidasyon kaplamasında korozyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda; grafen ilavesinin kaplamadaki mikro gözeneklerin ve çatlakların sayısı ve boyutunu azalttığını, grafen ilavesiz AZ91 Mg alaşımı ile karşılaştırıldığında, MAO kaplamasının mikro sertliği 15 kattan fazla arttığı ve korozyon akımı yoğunluğu yaklaşık üç kat azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [52].

Vatan ve Adabi (2018) MAO ile üretilen seramik-grafen kompozit kaplamanın tribolojik davranışını incelemişlerdir. Farklı proses zamanlarında 0 ve 5 g/l grafen içeren fosfat elektrolitinde AZ31 Mg alaşımından oluşan kaplamalar, SEM ile incelendiğinde, kaplama süresinin artmasıyla gözeneklilikte azalma, gözenek çapında artış görülmüştür. Ayrıca, seramik grafen kompozit kaplamalarla ilgili gözeneklerin

apı ve sayısı seramik olanlara göre daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Aşınma kaybı ve sürtünme katsayısının ise basit oranlarda daha düşük olduğu bildirilmiştir [53].

Aydın vd. (2019) yaptığı çalışmada ise grafen ilavesinin Mg-MWCNT kompozitinin MAO kaplamasına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda grafen ilavesinin kaplama kalınlığını arttırdığı ve daha iyi aşınma performansına sahip olduğu rapor edilmiştir [54].

Literatür alışmaları incelendiğinde, MAO işlemine grafen katkısının korozyon ve aşınma direncini artırdığı, MAO kaplamaların dezavantajı olan poroziteli yapının azaldığı ve daha uniform yapıda kaplamalar elde edildiği görülmektedir.

Literatürde AZ31 alaşımının mikro ark oksidasyon kaplamasına grafen ilave edilmesi ile ilgili çalışma bulunsa da detaylı bir inceleme sunulmadığı görülmektedir. Bu alışma kapsamında; AZ31 alaşımının mikro ark oksidasyon kaplamasına farklı oranlarda grafen partikülleri eklenmiştir ve 2 farklı volt değerinde (200V, 225V) kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Grafen ilavesiz ve farklı oranlarda (0.5g/L, 1g/L ve 2g/L) grafen ilaveli olarak gerçekleştirilen AZ31 alaşımının MAO kaplamasının aşınma ve korozyon direnci detaylı şekilde incelenmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

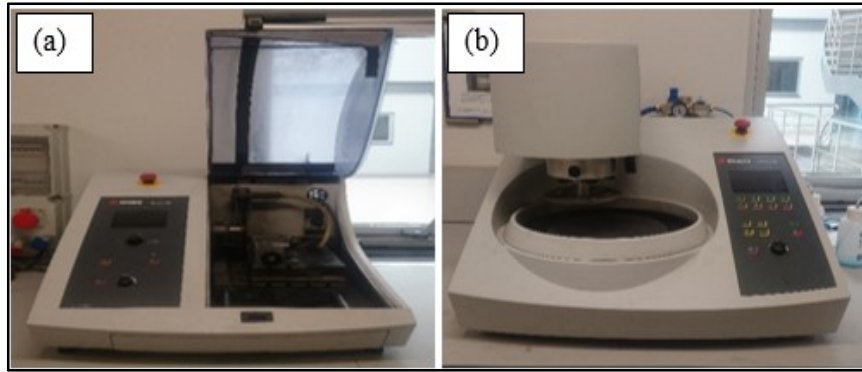
Bu çalışmada altlık malzeme olarak AZ31 alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Al	Zn	Mn	Ca	Fe	Mg
% Ağırlık oranı	2.9	1.2	0.22	0.03	0,003	Geri Kalan

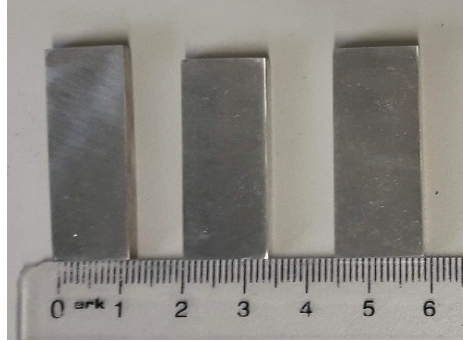
5.1. NUMUNE HAZIRLAMA

Altlık malzemenin boyutu yaklaşık 40 mm x 10 mm x 5 mm olacak şekilde önce hassas kesme cihazıyla (Şekil.5.1.a) kesilmiş ardından zımparalama-parlatma makinesinde (Şekil.5.1.b) SiC zımpara kağıtlarıyla (240 - 2500 mesh arası) zımparalanmıştır.



Şekil 5.1. a) Hassas kesme b) Zımpara-parlatma cihazları.

Zımpara sonrası alkolle yıkayıp kurutulanan numuneler kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 5.2’de AZ31 alaşımı olan altlık malzemenin kaplamasız yüzeyi verilmiştir.



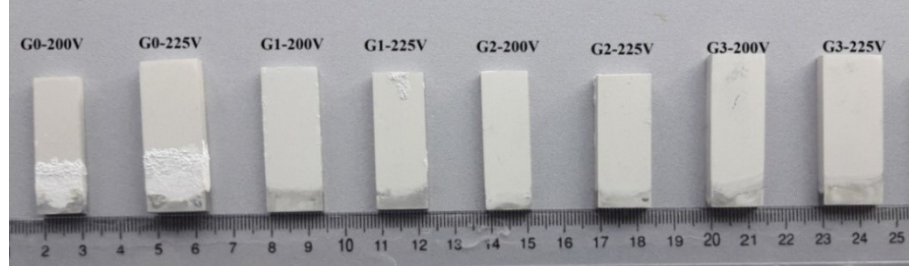
Şekil 5.2. AZ31 alaşımının kaplama öncesi görüntüleri.

5.2. MAO KAPLAMA

MAO işlemi için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Baz elektroliti Na_2SiO_3 (10 g/L), NaOH (4 g/L) ve grafen konsantrasyonu, grafensiz, 0.5 g/L, 1 g/L ve 2 g/L olarak seçilmiştir. Kaplamalar G0, G1, G2 ve G3 olarak belirtilmiştir. Kaplama voltajı 200V ve 225V olarak iki farklı voltaj değerinde çalışılmıştır. Kaplama süresi tüm numuneler için aynı tutulmuş olup süre 8 dakikadır. Elektrolitler ve numune isimleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Kaplama sonrası numune yüzey görüntüleri Şekil 5.3’te görülmektedir.

Çizelge 5.2. Numune isimleri ve elektrolit bileşimleri.

Numuneler	Elektrolit Bileşimi
G0	Na_2SiO_3 (10 g/L)+ NaOH (4 g/L)
G1	Na_2SiO_3 (10 g/L)+ NaOH (4 g/L) + Grafen (0.5 g/L)
G2	Na_2SiO_3 (10 g/L)+ NaOH (4 g/L) + Grafen (1 g/L)
G3	Na_2SiO_3 (10 g/L)+ NaOH (4 g/L) + Grafen (2 g/L)



Şekil 5.3. Kaplama sonrası numune yüzey görüntüleri.

Çözeltinin pH değeri tüm kaplamalar öncesi ölçülmüştür ve 12.5 olarak kaydedildi. Kaplama işlemi sırasında elektrolit sıcaklığı 30° C'nin altında tutulmuştur. Karıştırma sistemi, grafenin çözelti içinde iyi bir şekilde dağılmasını sağlamak için kullanılmıştır. MAO kaplama düzeneğinin görüntüsü Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4. MAO kaplama düzeneği.

5.3. KAPLAMA KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

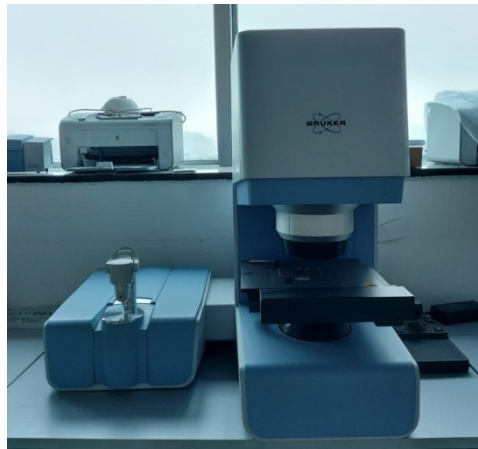
Kaplamaların yüzey ve enine kesit görüntüleri, EDX (Bruker) ile donatılmış Carl Zeiss Ultra Plus marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 5.5). Kaplamaların faz analizi, RigakuUltima IV marka X-ışını kırınımı (XRD) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). FT-IR analizi, bir Bruker Alpha cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.5. SEM cihazı.



Şekil 5.6. XRD cihazı.



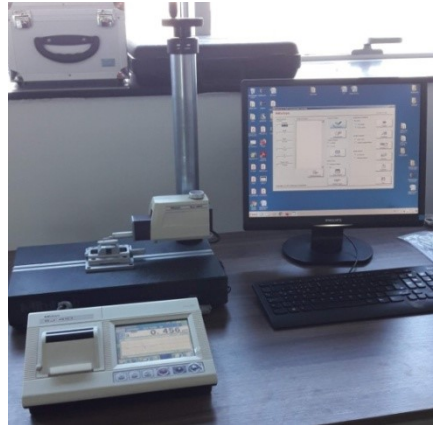
Şekil 5.7. FTIR cihazı.

5.4. AŞINMA-PÜRÜZLÜLÜK TESTLERİ

Numunelerin aşınma performansı, kuru kayma koşulları için 2, 4 ve 8N'lik yükler altında ileri geri aşınma test cihazı (UTS 10/20) tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8). Kayma mesafesi 50 m olarak seçilmiştir. Numunelerin hacim kaybı Mitutoyo SJ410 Profilometre ile ölçülmüştür (Şekil 5.9). Hacim kaybının kayma mesafesine bölünmesiyle aşınma (mm^3/m) oranı bulunmuştur. Kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü de Profilometre ile ölçülmüştür. Kaplama yüzeyleri aşınma testlerinden sonra SEM ile incelenmiştir.



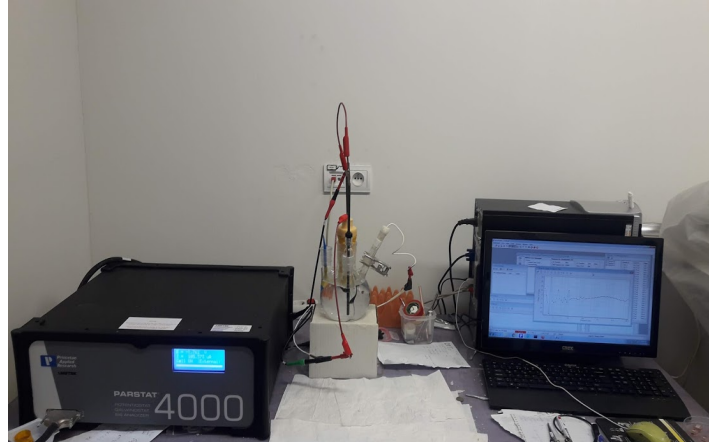
Şekil 5.8. Aşınma cihazı.



Şekil 5.9. Profilometre cihazı.

5.5 KOROZYON TESTLERİ

Numunelerin korozyon performansı, potansiyodinamik polarizasyon ve galvanostat (Partstat 4000) ile elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile incelenmiştir (Şekil 5.10). Korozif ortam, % 3.5NaCl çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. Referans ve karşı elektrotlar sırasıyla Ag / AgCl ve grafiti. Tarama hızı 1.5 mV/s olarak seçilmiştir. EIS testleri 100 kHz'den 0.1 Hz'ye gerçekleştirilmiştir. Gerilim sinyalinin genliği 10 mV olarak tutuldu. Numuneler 0.5 saat, 16 saat ve 32 saat süreyle çözeltiliye daldırılmıştır. Numunelerin daldırılmasından sonra, farklı daldırma sürelerine bağlı olarak numunelerin korozyon performansını görmek için elektrokimyasal korozyon testleri yapılmıştır. Korozyona uğramış numunelerin yüzey morfolojileri SEM ile değerlendirilmiştir.



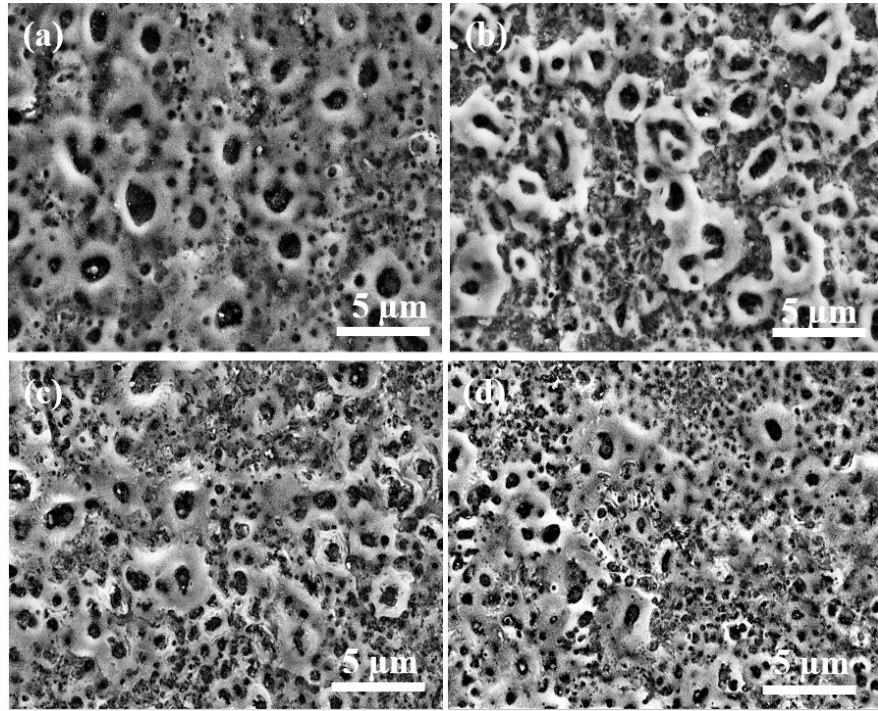
Şekil 5.10. Korozyon test düzeneği.

BÖLÜM 6

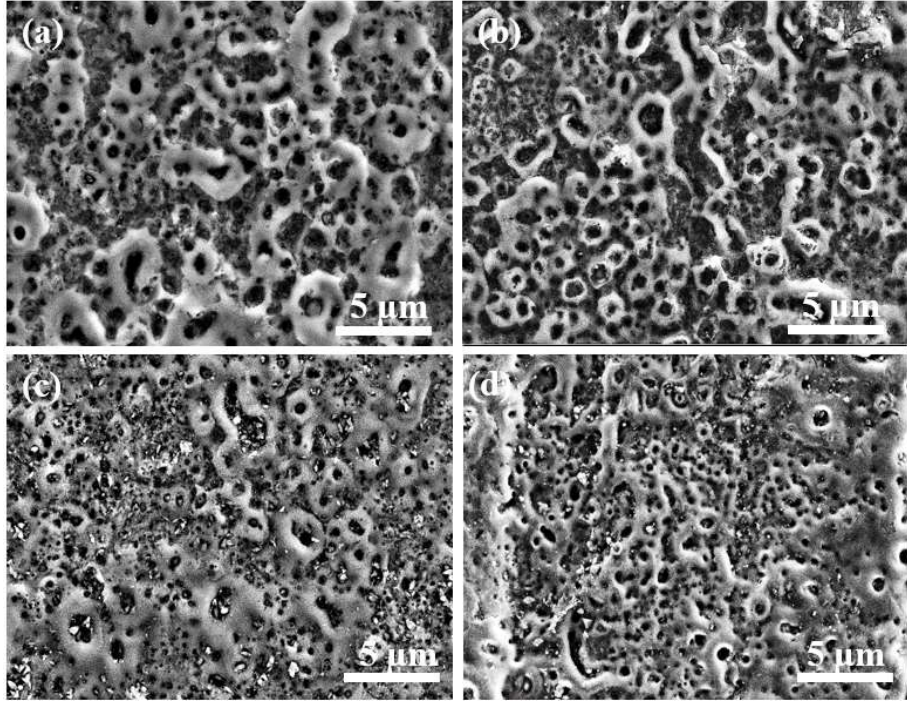
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. KAPLAMA KARAKTERİZASYONU

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 sırasıyla 200 ve 225 volt gerilim uygulanarak elde edilmiş kaplamaların yüzey SEM resimlerini göstermektedir. Şekillerden görüleceği üzere, tüm kaplamalar mikro çatlaksız ve çeşitli krater tipi gözeneklerden oluşmaktadır. MAO kaplamasında, mikro gözeneklerin oluşumu erimiş oksit ve gaz kabarcıklarının mikro ark kanallarından dışarı atılması ile oluşmaktadır. Bu yapı genel olarak tüm MAO kaplanmış yüzeylerde görülebilmektedir [53]. Ayrıca şekillerden, MAO kaplama çözeltisindeki grafen oranının artmasıyla krater tipi gözeneklerin ortalama çapının azaldığı net olarak görülmektedir.



Şekil 6.1. 200V için kaplamaların yüzey görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.



Şekil 6.2. 225V için kaplamaların yüzey görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de sırasıyla 200V ve 225V uygulanmış kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları ve ortalama gözenek çapları verilmiştir. Çizelge 6.1’den görüldüğü gibi, 200 V uygulanmış kaplamalarda G0, G1, G2 ve G3 için ortalama gözenek çapı sırasıyla 2.27, 2.12, 1.67 ve 1.13 olarak ölçülmüştür. Çizelge 6.2’den anlaşılacağı üzere 225 V uygulanmış kaplamalarda G0, G1, G2 ve G3 için ortalama gözenek çapı sırasıyla 1.33 ± 0.33 , 1.25 ± 0.28 , 0.80 ± 0.29 ve 0.73 ± 0.24 olarak ölçülmüştür. Benzer sonuçlar, grafen katkısının MAO kaplamasına dahil edilmesiyle rapor edilmiştir [52,53]. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de ayrıca kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerleride görülmektedir. Grafen ilavesinin artmasıyla pürüzlülük değerleri azalmaktadır. Grafen ilavesiyle yüzey pürüzlülüğünün azalması, tahliye kanallarından çıkan ergimiş oksitlerin gözenekleri tıkanmasına bağlanmıştır [55].

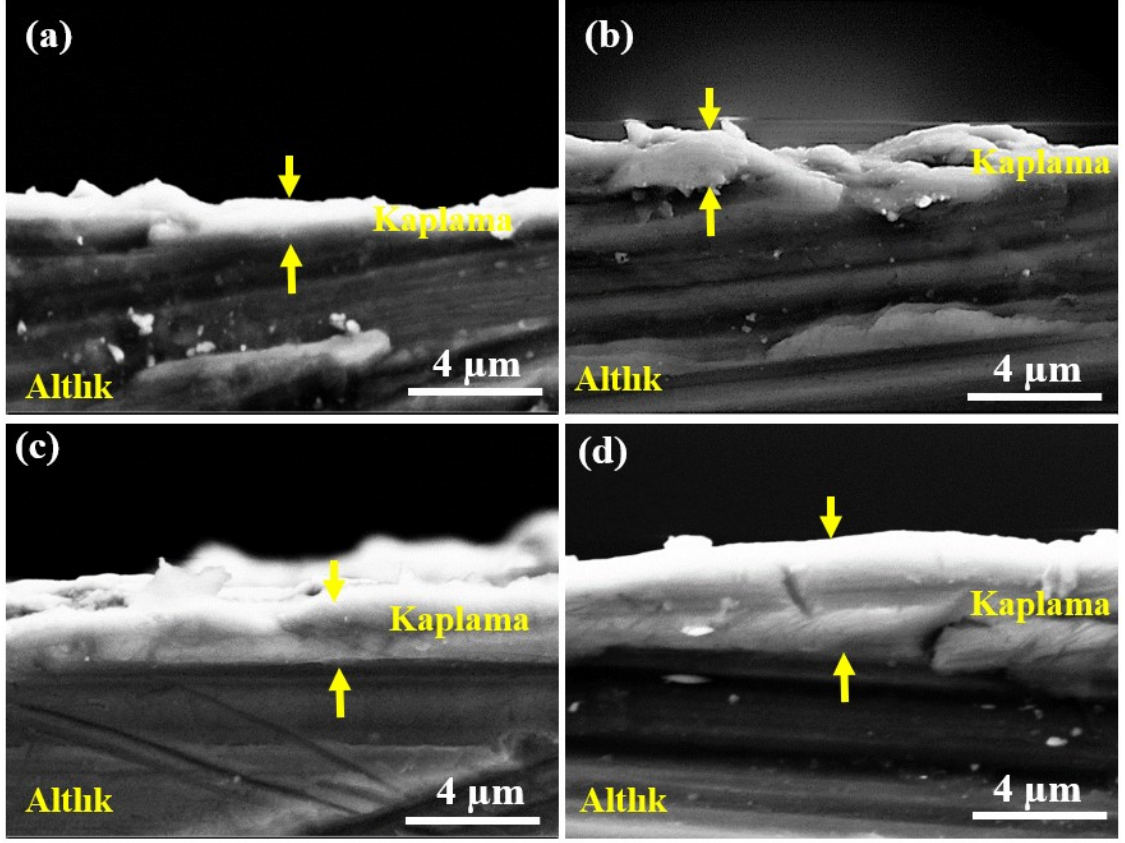
Çizelge 6.1. 200V için kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları ve ortalama gözenek çapı değerleri.

	AZ31	G0	G1	G2	G3
Yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	0.116	0.319	0.288	0.277	0.267
Kaplama kalınlığı (µm)	-	1.59±0.29	2.20±0.17	3.32±0.22	4.09±0.19
Ortalama gözenek çapı (µm)	-	2.27±0.27	2.12±0.16	1.67±0.11	1.13±0.20

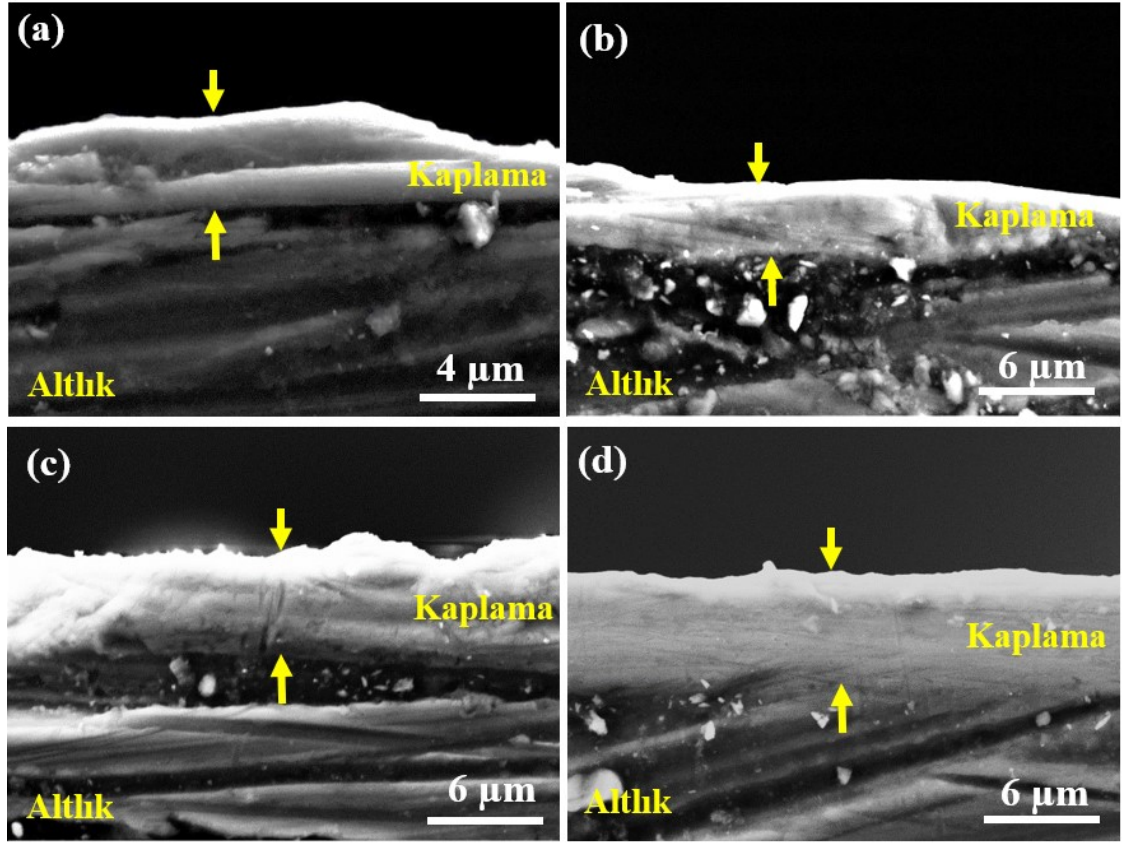
Çizelge 6.2. 225V için kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplama kalınlıkları ve ortalama gözenek çapı değerleri.

	AZ31	G0	G1	G2	G3
Yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	0.116	0.463	0.368	0.315	0.292
Kaplama kalınlığı (µm)	-	3.06±0.17	3.63±0.28,	5.50 ±0.51	5.52±0.29
Ortalama gözenek çapı (µm)	-	1.33±0.33	1.25±0.28	0.80±0.29	0.73±0.24

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 sırasıyla 200V ve 225V değerlerinde gerçekleştirilmiş kaplamaların kesit resimlerini göstermiştir. Şekillerden genel olarak, grafen içeriğinin artmasıyla kaplama kalınlıklarının arttığı görülmektedir. 200V için, G0, G1, G2 ve G3 kaplamalarının kalınlıkları sırasıyla 1.59, 2.20, 3.32 ve 4.09 µm olarak ölçülmüştür. 225V için, G0, G1, G2 ve G3 kaplamalarının kalınlıkları sırasıyla 3.06, 3.63, 5.50 ve 5.52 olarak ölçülmüştür. Grafen takviyesinin artmasıyla kaplama kalınlıklarının artması, grafen ilaveli çözeltilerin yüksek iletkenliği sayesinde MAO kaplamasının büyümesini sağlamasına bağlanabilir [56]. İki farklı gerilim içinde kaplama yüzeyleri genel olarak homojendir ve G3 kaplaması yoğun ve daha düzgün bir görüntüye sahiptir.

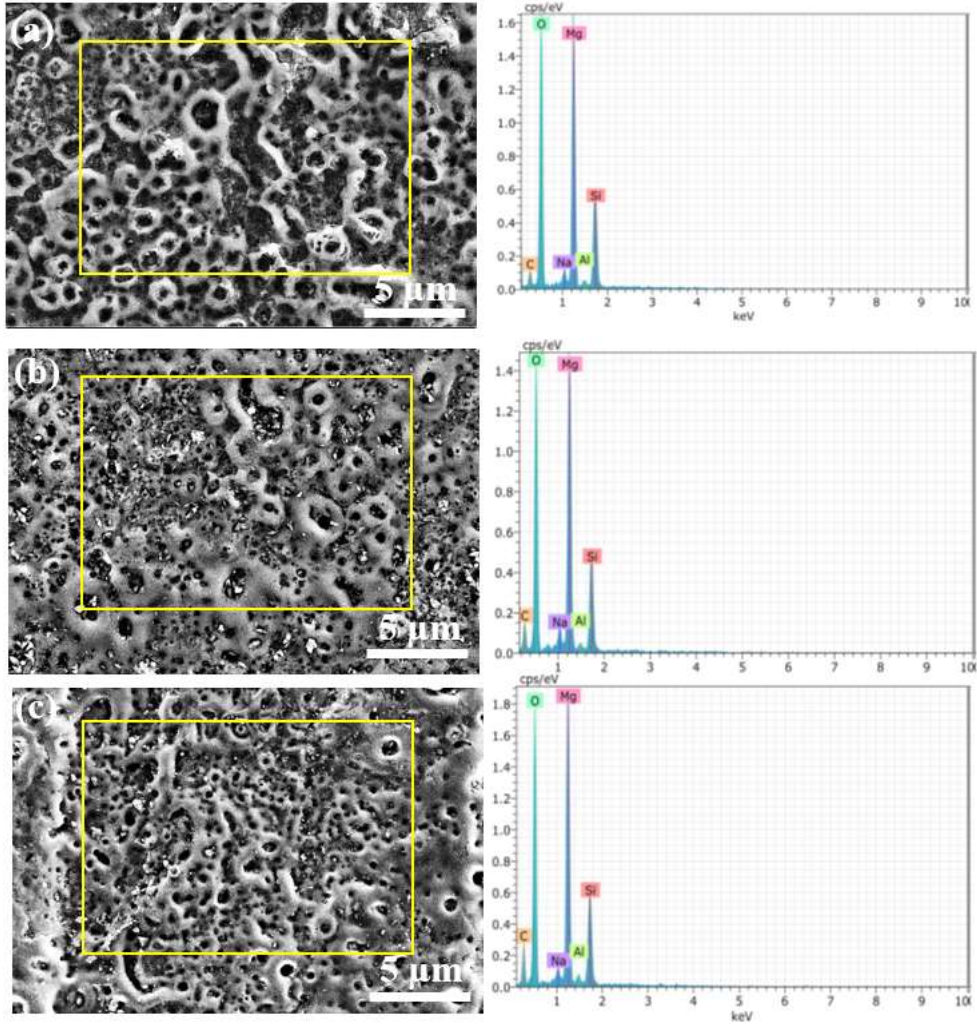


Şekil 6.3. 200V için kaplamaların kesit görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.



Şekil 6.4. 225V için kaplamaların kesit görüntüleri a) GO, b) G1, c) G2 ve d) G3.

Şekil 6.5, 225V için G1, G2 ve G3 kaplamalarının EDX analizlerini göstermektedir. Kaplamaların EDX analizleri yapıda Na, Mg, O, Al, Si elementlerinin varlığını kanıtlamıştır. Mg ve Al elementlerinin piki AZ31 altlıktan gelmiş, Na, Si, O, C elementleri de silikat elektrolit ve grafen takviyesinden gelmektedir. Analiz sonucunda, G1, G2, G3 kaplamalarının farklı C oranlarına sahip olduğu görülmüştür. G1, G2 ve G3 kaplamalarının C oranları sırasıyla %7.5, %10.3, %13.4 olarak elde edilmiştir. C oranlarının artması grafen partiküllerinin MAO kaplamalarının yapısında yer almasından kaynaklandığı söylenebilir.

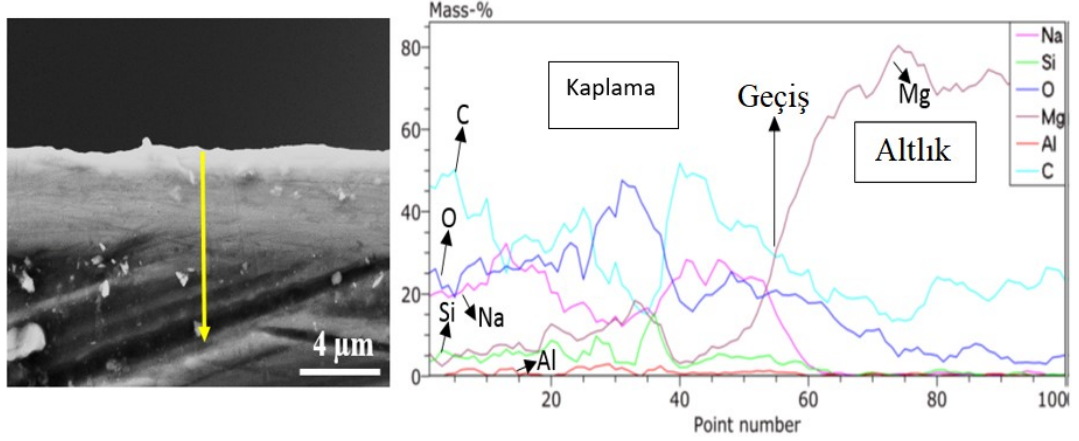


Şekil 6.5. 225V için kaplamaların yüzey EDX analizleri a) G1, B) G2, c) G3.

Çizelge 6.3. Kaplamaların EDX sonuçları.

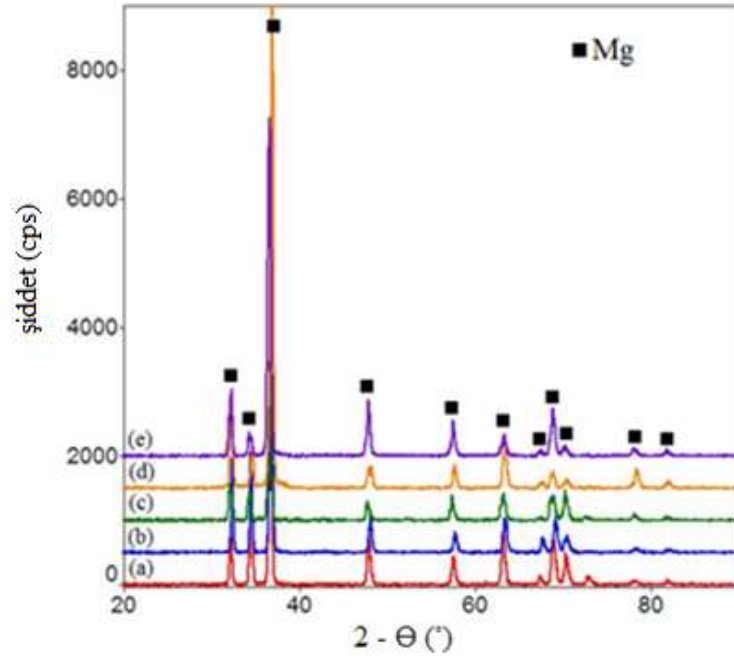
%ağ	O	C	Na	Si	Al	Mg
G1	49.7	7.5	1.7	15.6	0.6	26.3
G2	47.2	10.3	2.0	13.2	0.6	26.4
G3	45.7	13.4	1.4	12.7	0.9	25.6

Şekil 6.6, G3 kaplamasının çizgi EDX analizini göstermektedir. Kaplama alanı için, önemli oranda C, O, Si ve Na elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu sonuç alan EDX analizlerinin sonuçlarıyla tutarlıdır. Geçiş bölgesinden itibaren, Mg elementinin ani artışı algılanmıştır. Bu sonuç, Mg altlıktan geçiş noktasından sonra sinyallerin geldiğini göstermektedir.

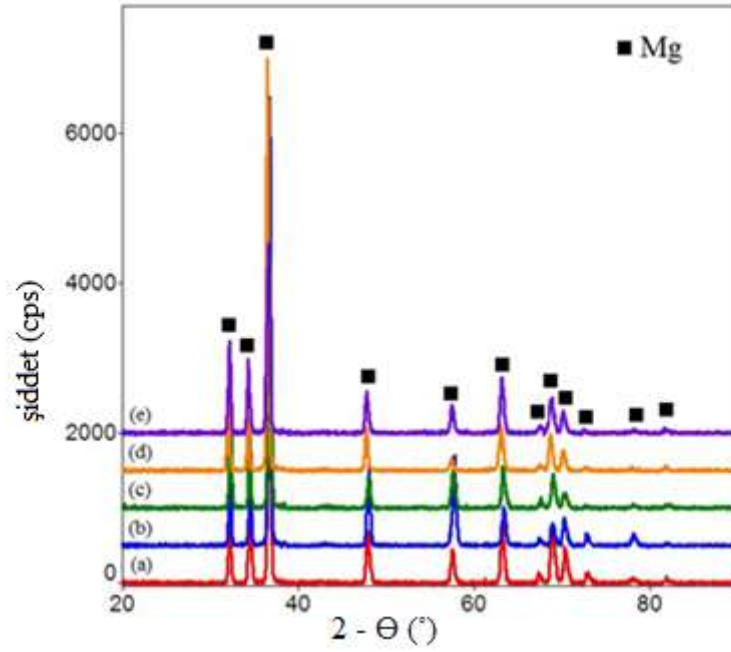


Şekil 6.6. 225V için G3 kaplamasının çizgi EDX analizi.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 sırasıyla 200 ve 225V için kaplamaların XRD analizlerini göstermektedir. Tüm numuneler için numunelerde Mg pikleri algılanmıştır. Bununla beraber, silikat esaslı elektrolit kullanılan kaplamalarda genel olarak MgO ve Mg_2SiO_4 gibi oluşumların gözlenmesi beklenmektedir [54]. Fakat, bu çalışmada, bu fazların algılanamamasının sebebi kaplama kalınlıklarının çok düşük olması ve bu nedenle X ışınlarının altlık malzemeye penetre etmesi ve Mg piklerini algılamasıdır. Bilindiği üzere AZ31 alaşımı çok yüksek oranda (%96) Mg içermektedir.

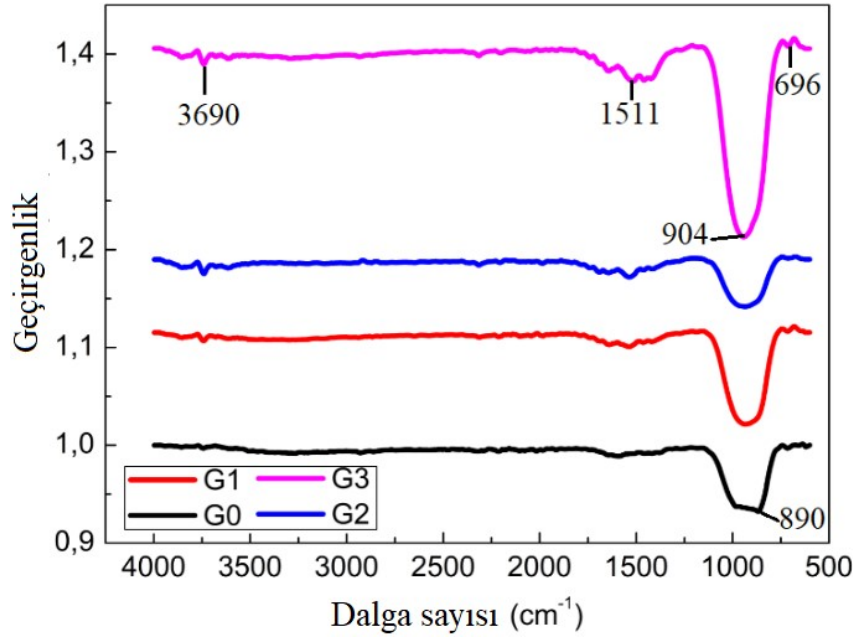


Şekil 6.7. 200V için numunelerin XRD kırınım örnekleri a) Altlık b) GO c) G1 d) G2 e) G3.



Şekil 6.8. 225V için numunelerin XRD kırınım örnekleri a) Altlık b) GO c) G1 d) G2 e) G3.

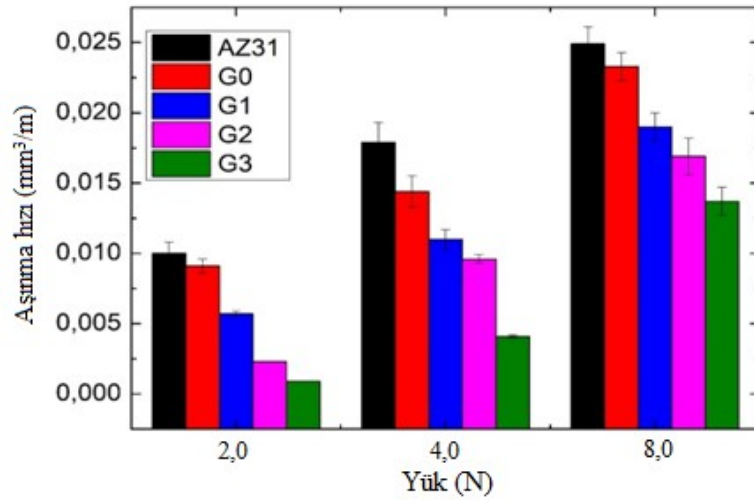
XRD analizleri sonucunda yüzeyde oluşan fazlar algılanamadığı için kaplamaların FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9 225 V için kaplamaların FTIR analizlerini göstermektedir. 3690 cm^{-1} 'de elde edilen zayıf pik AZ31 altlık yüzeyinde emilen su moleküllerinin serbest OH gerilme titreşimi ile ilgilidir [57-60]. MAO kaplamaların 1511 cm^{-1} 'de gösterdiği pik Mg_2SiO_4 oluşumuna bağlanabilir. Bu sonuç literatürdeki çalışmalarla desteklenmiştir [61]. 904 cm^{-1} 'deki adsorpsiyon piki Si-OH grubuyla ilişkilendirilmiştir [62]. Ayrıca, Mg-O gerilim titreşim piki 890 cm^{-1} 'de algılanmıştır [57,63,64]. 696 cm^{-1} 'deki bant literatürde metal-oksijen gerilim titreşimine bağlanmıştır [65].



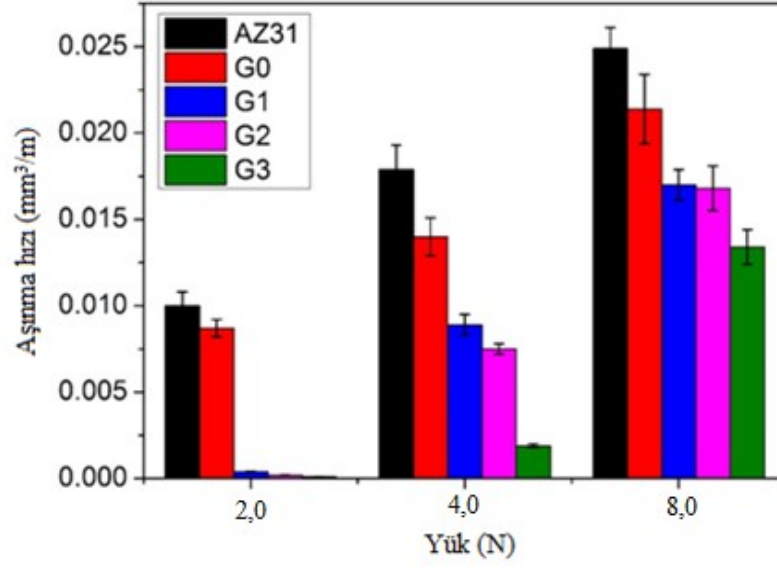
Şekil 6.9. 225V için numunelerin FTIR analizleri.

6.2. AŞINMA SONUÇLARI

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 sırasıyla 200V ve 225V için kaplamasız ve kaplama yapılmış numunelerin 2, 4 ve 8N altında aşınma grafiklerini göstermektedir. Kaplamasız AZ31 altlıkla karşılaştırıldığında, kaplamaların aşınma hızları tüm yük koşulları altında azalmıştır. Numunelerin aşınma hızları büyükten küçüğe AZ31 altlık malzeme (kaplamasız) > G0 > G1 > G2 > G3 olarak sıralanmıştır. Grafen takviyesinin artmasıyla aşınma dayanımının artması ve aşınma hızının azalması, kaplamaların aşınma karşıtı ve sürtünme karşıtı özelliklerini göstermektedir. Grafen içeren kaplamaların aşınma karşıtı davranışları düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek yüzey sertliği ve grafenin yağlayıcı etkisine sahip olmasına dayandırılabilir [55]. Literatürde, grafenin kaplamalara ilavesiyle kaplamaların sertliğinin dispersiyon sertleşmesi etkisiyle arttığı rapor edilmiştir [53]. Grafiklerden görüleceği üzere 225V için yapılan kaplamaların aşınma dayanımları daha yüksek ve aşınma hızları daha düşük olarak görülmektedir. Özellikle, 2N yük altında 225V’ta gerçekleştirilen grafen içeren G1, G2 ve G3 kaplamalarının aşınma hızları altlık malzemeye kıyasla büyük oranda azalmıştır. 2N yük altında AZ31 altlığın aşınma hızı G3 kaplamasında 0.0100’den 0.0001’e düşmüştür. 8N yük altında kaplamaların koruyucu etkisi azalmıştır fakat hala aşınma hızları altlık malzemeden daha düşük olarak hesaplanmıştır. 225V için yapılan kaplamalardaki elde edilen daha düşük aşınma hızları kaplama kalınlıklarının 200V için yapılan kaplamalara göre daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

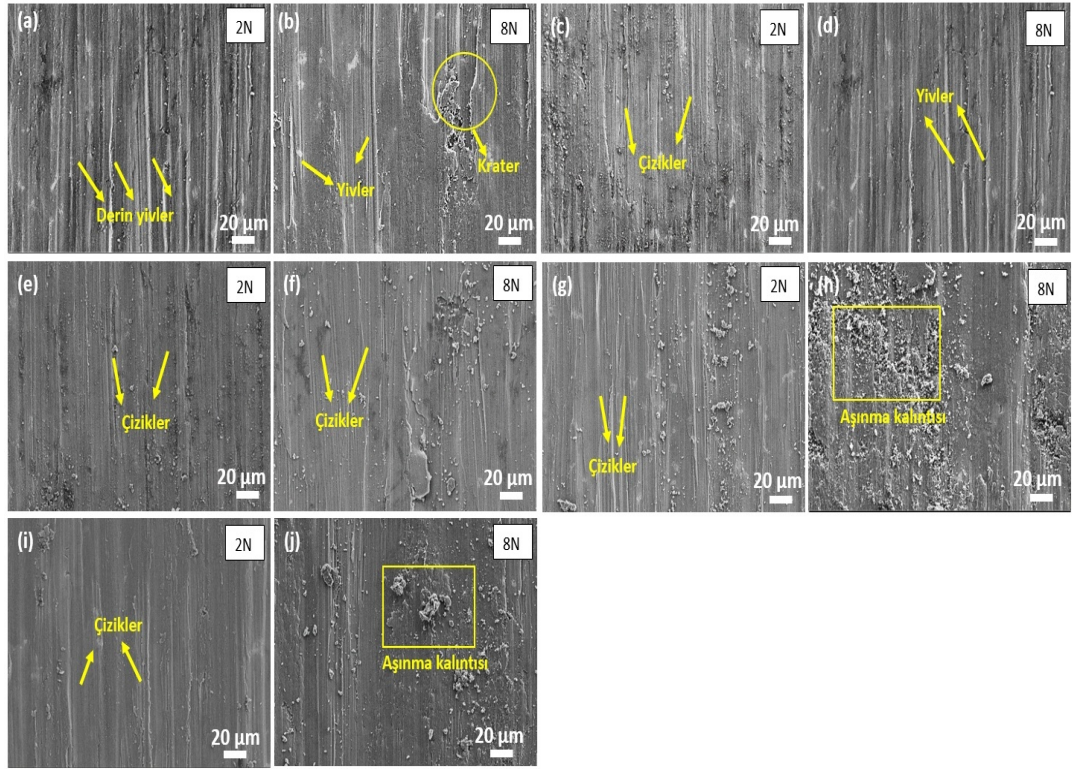


Şekil 6.10. 200V için numunelerin yüke bağlı aşınma grafiği.



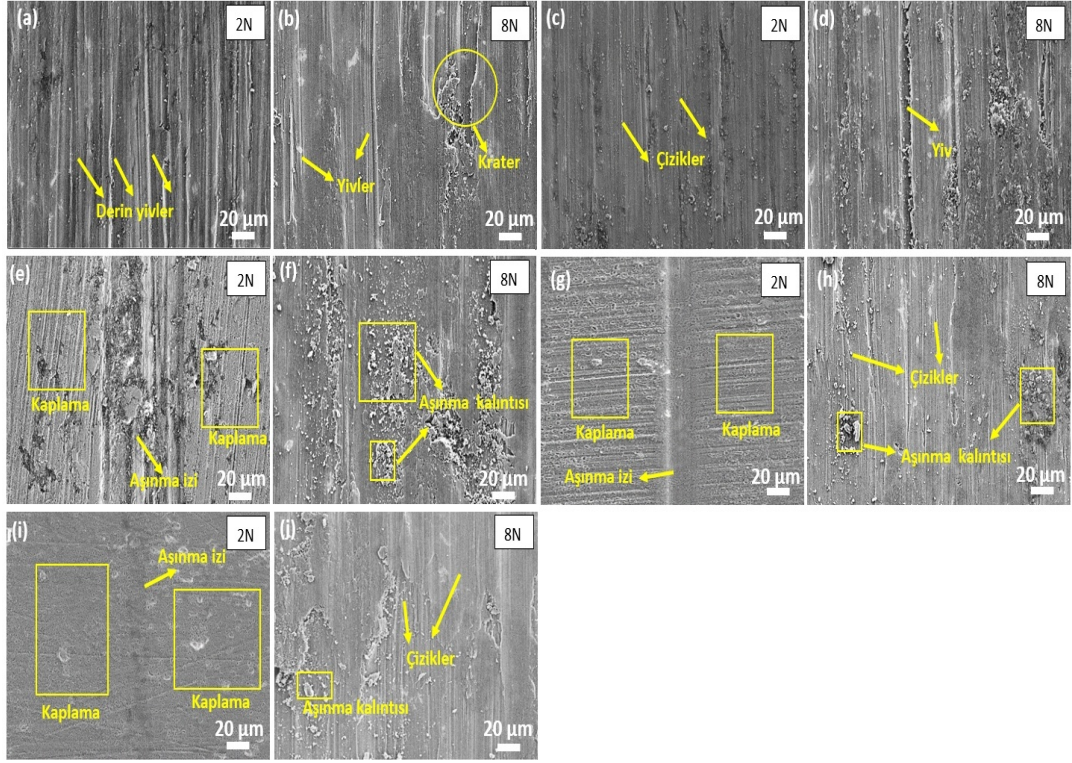
Şekil 6.11. 225V için numunelerin yüke bağlı aşınma grafiği.

Şekil 6.12’de 200 volt için numunelerin 2 ve 8N altında aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.12a’da AZ31 altlık için, kaplama yönüne paralel olarak derin yivler görülmektedir. Bu AZ31 altlık için abrasif aşınmanın bir göstergesidir [66-69]. Bu yivler, karşıt malzemenin sert yüzeyinin, kaplamanın yüzeyini kazınmasıyla oluşmaktadır [70]. Daha yüksek yük altında (8N), yivlerle beraber bazı kraterlerinde varlığı gözlenmektedir. Kraterlerin varlığı delaminasyon aşınma mekanizmasının varlığıyla ilişkilidir [71-73]. GO kaplaması için yüzeyde düşük yükte çizikler ve yüksek yükte yivler görülmektedir. Fakat oluşan çiziklerin ve yivlerin derinliğinin kaplamasız numuneye göre daha az derin olduğu gözlenmiştir. Grafen ilaveli kaplamalar için, 2N yük altında aşınma yüzeylerinin daha düz ve hasar görmemiş olduğu anlaşılmıştır. Aşınma yüzey görüntüleri, grafen takviyeli kaplamaların, abrasif aşınma şiddetinin azaldığını göstermektedir. Daha yüksek yük altında, kaplamalar için bazı çiziklerle beraber aşınma kalıntılarının da bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. 200V için numunelerin farklı yükler altında aşınma yüzey görüntüleri (a-b) AZ31 altlık malzeme, (c-d) G0, (e-f) G1, (g-h) G2, ve (i-j) G3.

Şekil 6.13'te 225V için numunelerin 2 ve 8N altında aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Altlık malzemesinin düşük yükte aşınma mekanizması abrasif, yüksek yükte aşınma mekanizması delaminasyondur. GO numunesi için, bazı çizikler 2N yük altında görülmektedir. 8N yük geçişinde aynı numune için bazı yivler görülmektedir. Bu yüksek yükün aşındırıcı etkisinin artmasıyla ilgilidir. Genel olarak, G2 ve G3 kaplamasının aşınma iz genişliklerinin diğer numunelerden daha az olduğu görülmektedir. 2N yük altında en düşük aşınma izinin G3 numunesinde elde edildiği görülmektedir. Bu gözlem aşınma grafiğindeki sonuçlarla uyumludur. 8N yük altında, kaplamaların hasarı tüm numuneler için gözlenmiştir. Bununla beraber, grafen içeren kaplamalardaki yüzeylerinin daha düz ve daha az aşınmış olduğu görülmektedir. Abrasif aşınmanın kısıtlanması, grafen ilavesiyle yüzey pürüzlülüğünün azalması ve grafenin yağlayıcı etkisiyle açıklanmaktadır [53].



Şekil 6.13. 225V için numunelerin farklı yükler altında aşınma yüzey görüntüleri (a-b) AZ31 altlık, (c-d) G0, (e-f) G1, (g-h) G2, ve (i-j) G3

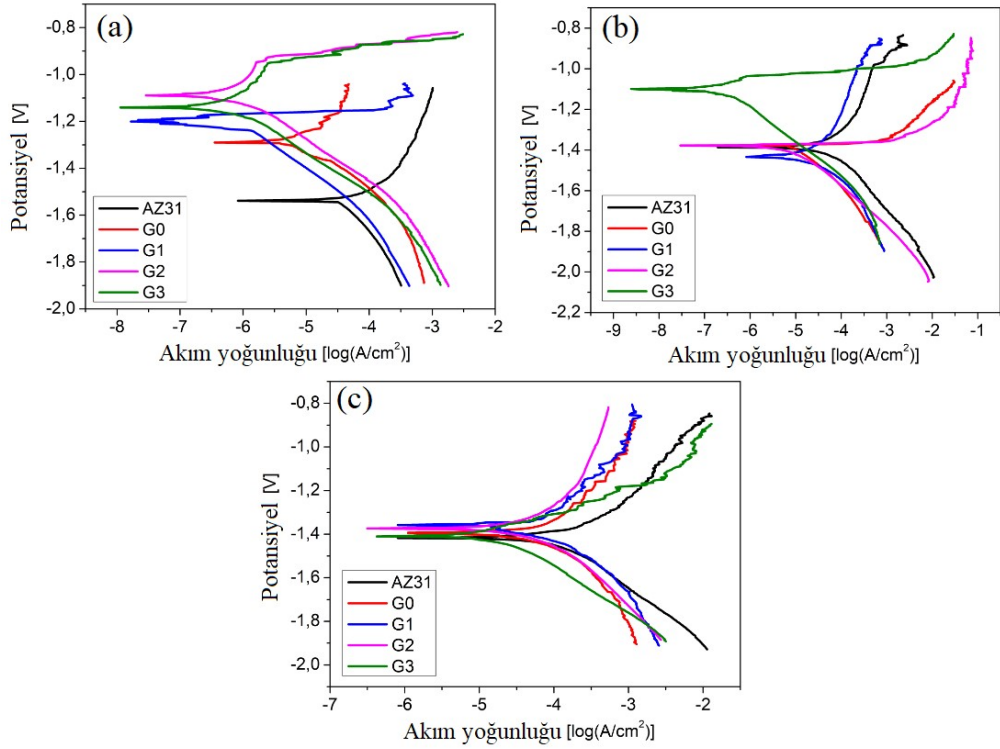
6.3. KOROZON SONUÇLARI

6.3.1. Potansiyodinamik Korozyon Sonuçları

Potansiyodinamik polarizasyon testi korozyon akım yoğunluğunun ve korozyon hızının bulunması için kullanılan en önemli testtir [74]. Şekil 6.14, 200V için 0.5, 16 ve 32 saat daldırma sonrasındaki numunelerin polarizasyon eğrilerini göstermektedir. Korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu polarizasyon eğrilerinden elde edilmiştir. Polarizasyon direnci Stern-Geary eşitliğine göre hesaplanmıştır. Bu eşitlik aşağıda verilmiştir [58,75].

$$Rp = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.303 \cdot i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

Bu formülde, R_p polarizasyon direncini, β_a anodik eğimi, β_c katodik eğimi ve i_{corr} korozyon akım yoğunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 6.14. 200 V için numunelerin farklı daldırma süreleri sonrası potansiyodinamik polarizasyon eğrileri a) 0.5s, b) 16s ve c) 32s.

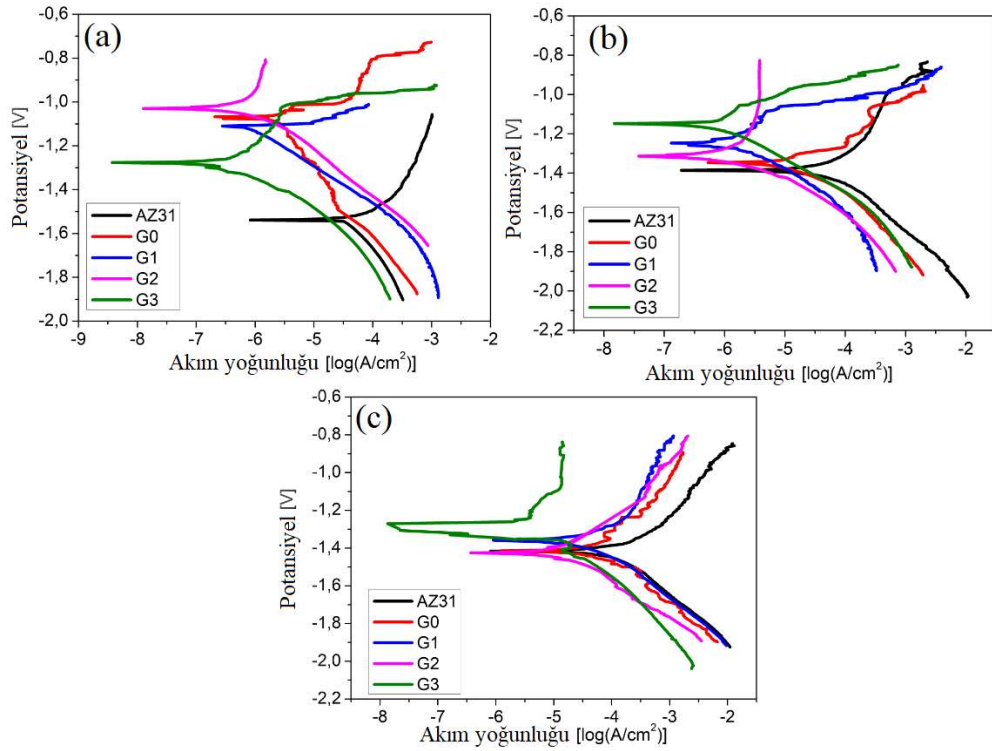
Şekil 6.14'teki eğrilerden elde edilen elektrokimyasal veriler Çizelge 6.4'te verilmiştir. AZ31 altlık malzemeye karşılaştırıldığında, kaplanmış numunelerin korozyon akım yoğunlukları azalmakta ve polarizasyon dirençleri artmaktadır. Kaplama yapılmış numunelerde korozyon potansiyelleri AZ31 altlığa göre daha düşük olarak görülmektedir. Bu durum kaplamaların kaplamasız yüzeyden daha az reaktif olduğunu göstermektedir. Ayrıca grafen ilavesinin artmasıyla beraber kaplamaların korozyon akım yoğunlukları azalmış ve polarizasyon dirençleri artmıştır. Bu durum, grafen içeren kaplamaların, altlık malzemeyi korozyon çözeltisinde daha iyi izole edebilmesiyle açıklanmıştır [53]. 0.5 saat daldırma süresi incelendiğinde, G3 kaplaması, en yüksek polarizasyon direncine ($3,52 \times 10^4$) ve en düşük korozyon akım yoğunluğuna (76.66×10^{-8}) sahiptir. Özetle G3 kaplamasının en iyi korozyon performansına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Artan daldırma zamanıyla beraber, kaplamaların akım yoğunluklarının arttığı ve polarizasyon dirençlerinin azaldığı görülmektedir. Bununla beraber, tüm şartlar altında kaplamalı numunelerin korozyon dayanımları kaplamasız altlığa göre daha yüksek seviyededir.

Çizelge 6.4. 200V için numunelerin korozyon verileri.

	Malzemeler	Korozyon potansiyeli E_{corr}/V	Anodik eğim β_a (V/dec.)	Katodik eğim β_a (V/dec.)	Akım yoğunluğu I_{corr} (A/cm ²)	Polarizasyon direnci R_p (Ω.cm ²)
0.5h	AZ31	-1.520	0.337	0.470	45.40x10 ⁻⁶	1,87x10 ³
	G0	-1.290	0.226	0.276	65.75x10 ⁻⁷	8,2x10 ³
	G1	-1.197	0.047	0.247	9.25x10 ⁻⁷	1,85x10 ⁴
	G2	-1.090	0.080	0.207	8.66x10 ⁻⁷	2,89x10 ⁴
	G3	-1.134	0.091	0.196	76.66x10 ⁻⁸	3,52x10 ⁴
16h	AZ31	-1.382	0.432	0.256	55.25x10 ⁻⁶	1,26x10 ³
	G0	-1.375	0.137	0.252	13.75x10 ⁻⁶	2,8x10 ³
	G1	-1.42	0.459	0.242	23.0x10 ⁻⁶	2,99x10 ³
	G2	-1.380	0.138	0.205	10.16x10 ⁻⁶	3,52x10 ³
	G3	-1.101	0.021	0.183	33.3x10 ⁻⁸	2,45x10 ⁴
32h	AZ31	-1.417	0.334	0.241	10.83x10 ⁻⁵	5,5 x10 ²
	G0	-1.390	0.342	0.381	79.75 x10 ⁻⁶	9,81x10 ²
	G1	-1.358	0.300	0.346	47.0x10 ⁻⁶	1,48x10 ³
	G2	-1.374	0.386	0.294	42.66x10 ⁻⁶	1,69x10 ³
	G3	-1.410	0.131	0.212	20.16x10 ⁻⁶	1,74x10 ³

Şekil 6.15 225V için 0.5, 16 ve 32 saat daldırma sonrasındaki numunelerin polarizasyon eğrilerini göstermektedir. Şekil 6.15'teki eğrilerden elde edilen elektrokimyasal veriler Çizelge 6.5'te verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi, altlık malzemeyle karşılaştırıldığında, tüm kaplamaların korozyon akımları daha düşük ve polarizasyon dirençleri daha yüksektir. 200V'ta elde edilen verilere benzer olarak, kaplamaların korozyon potansiyelleri daha düşük olarak elde edilmiştir. 0.5 saat daldırma süresi için, G3 kaplaması en yüksek polarizasyon direncine ($6,99 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$) ve en düşük akım yoğunluğuna ($60.83 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) sahiptir. Bu sonuçlar G3 kaplamasının en yüksek korozyon direncine ve elektrokimyasal kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. G3 kaplamasının en yüksek korozyon dayanımına sahip olmasının nedeni deşarj deliklerinin tıkalı olması ve korozyon çözültisinin kaplamadan altlık malzemeye hareket edememesidir [53]. Daha önceki bölümlerde grafen ilavesinin poroziteyi ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığı rapor edilmiştir. Bu durum korozyon hasarına karşı önemli bir koruma sağlamaktadır.

Artan daldırma sürelerinde elde edilen akım yoğunluklarının artması ve polarizasyon dirençlerinin azalması, zamanla kaplamaların Cl^- iyonlarıyla zarar görmesi ve bazı çatlakların oluşumu nedeniyle çözeltinin altlık malzemeye ulaşmasının kolaylaşmasına bağlanabilir. 200V ve 225V ile gerçekleştirilen kaplamalar karşılaştırıldığında, 225V kaplamalarının daha iyi korozyon performansı gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebinin, 225V kaplamalarının daha yüksek kaplama kalınlıklarına sahip olması olduğu söylenebilir.



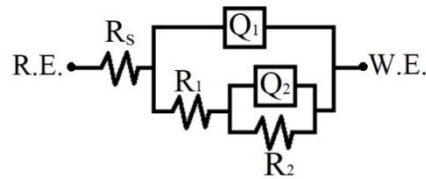
Şekil 6.15. 225V için numunelerin farklı daldırma süreleri sonrası potansiyodinamik polarizasyon eğrileri a) 0.5s, b) 16 s ve c) 32s.

Çizelge 6.5. 225V için numunelerin korozyon verileri.

	Malzemeler	Korozyon potansiyeli E_{corr}/V	Anodik eğim β_a (V/dec.)	Katodik eğim β_a (V/dec.)	Akım yoğunluğu I_{corr} (A/cm ²)	Polarizasyon direnci R_p (Ω.cm ²)
0.5h	AZ31	-1.520	0.337	0.470	45.40x10 ⁻⁶	1,87x10 ³
	G0	-1.067	0.183	0.336	20.41x10 ⁻⁷	2,52x10 ⁴
	G1	-1.100	0.075	0.194	8.91x10 ⁻⁷	2,63x10 ⁴
	G2	-1.032	0.389	0.209	10.33x10 ⁻⁷	5,71x10 ⁴
	G3	-1.276	0.194	0.198	60.83x10 ⁻⁸	6,99x10 ⁴
16h	AZ31	-1.382	0.432	0.256	55.25x10 ⁻⁶	1,26x10 ³
	G0	-1.346	0.216	0.284	22.0x10 ⁻⁶	2,42x10 ³
	G1	-1.246	0.102	0.255	20.16x10 ⁻⁷	1,56x10 ⁴
	G2	-1.307	0.464	0.220	25.16x10 ⁻⁷	2,57x10 ⁴
	G3	-1.144	0.087	0.205	9.08x10 ⁻⁷	2,92x10 ⁴
32h	AZ31	-1.417	0.334	0.241	10.83x10 ⁻⁵	5,5 x10 ²
	G0	-1.413	0.225	0.263	60.91x10 ⁻⁶	8,64 x10 ²
	G1	-1.357	0.310	0.304	37.33x10 ⁻⁶	1,78x10 ³
	G2	-1.423	0.281	0.196	20.91x10 ⁻⁶	2,39x10 ³
	G3	-1.270	0.283	0.245	67.41x10 ⁻⁷	8,45x10 ³

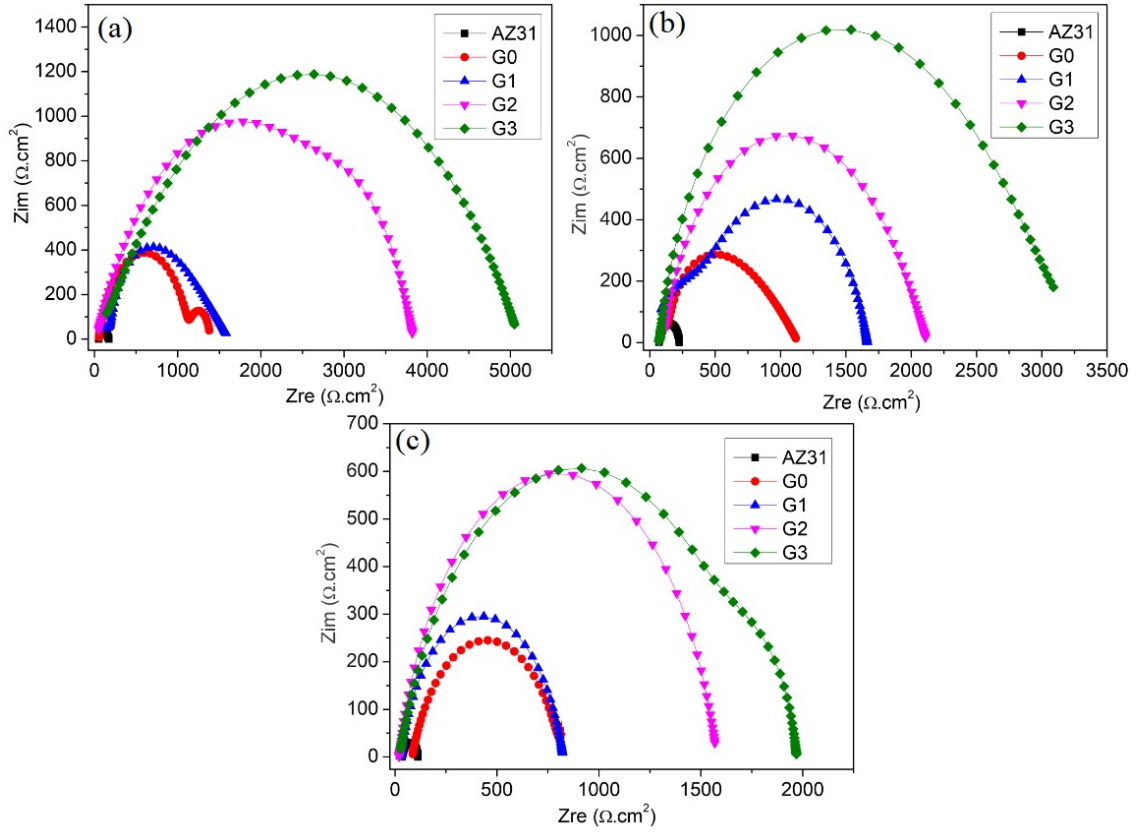
6.3.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Şekil 6.16 EIS çalışmaları için, eşdeğer elektrik devresini göstermektedir. Bu çalışmada, $R_s(Q_1(R_1(Q_2R_2)))$ devresi kullanılmıştır. Eşdeğer devre için, elektrik elemanları dirençler (R_s , R_1 ve R_2) ve sabit devre elemanları (Q_1 ve Q_2) dır. R_s çözeltinin direncini, R_1 ve Q_1 dıştaki poroz tabakanın direncini ve kapasitansını, R_2 ve Q_2 iç taraftaki yoğun tabakanın direncini ve kapasitansını göstermektedir.



Şekil 6.16. Eşdeğer devre modeli.

Şekil 6.17. 200V için malzemelerin farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrilerini göstermektedir. Şekil 6.17'den de görüleceği üzere, kaplanmış numunelerin empedansları kaplamasız numuneden daha yüksektir. Bir malzemenin, kapasitatif eğrisinin çapının büyük olması, korozyon direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir [33, 55, 76]. Numunelerin kapasitatif eğirlerinin çapı grafen ilavesiyle artmaktadır. Tüm daldırma zamanları için, G3 kaplaması maksimum yarım daire çapına ve en yüksek empedans modülüne sahiptir. Bu da G3 numunesinin en yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Grafiklerden, Nyquist eğrilerinin genel olarak bir adet kapasitör döngüsüne sahip olduğu görülmektedir. Bu durum kaplamanın bozulmaması ve korozyona direnç göstermesiyle ilgilidir. Grafiklerden, kaplamaların daire çaplarının artan daldırma zamanıyla azaldığı görülmektedir. Bu durum yüksek daldırma zamanları için literatürde rapor edilmiştir [58].



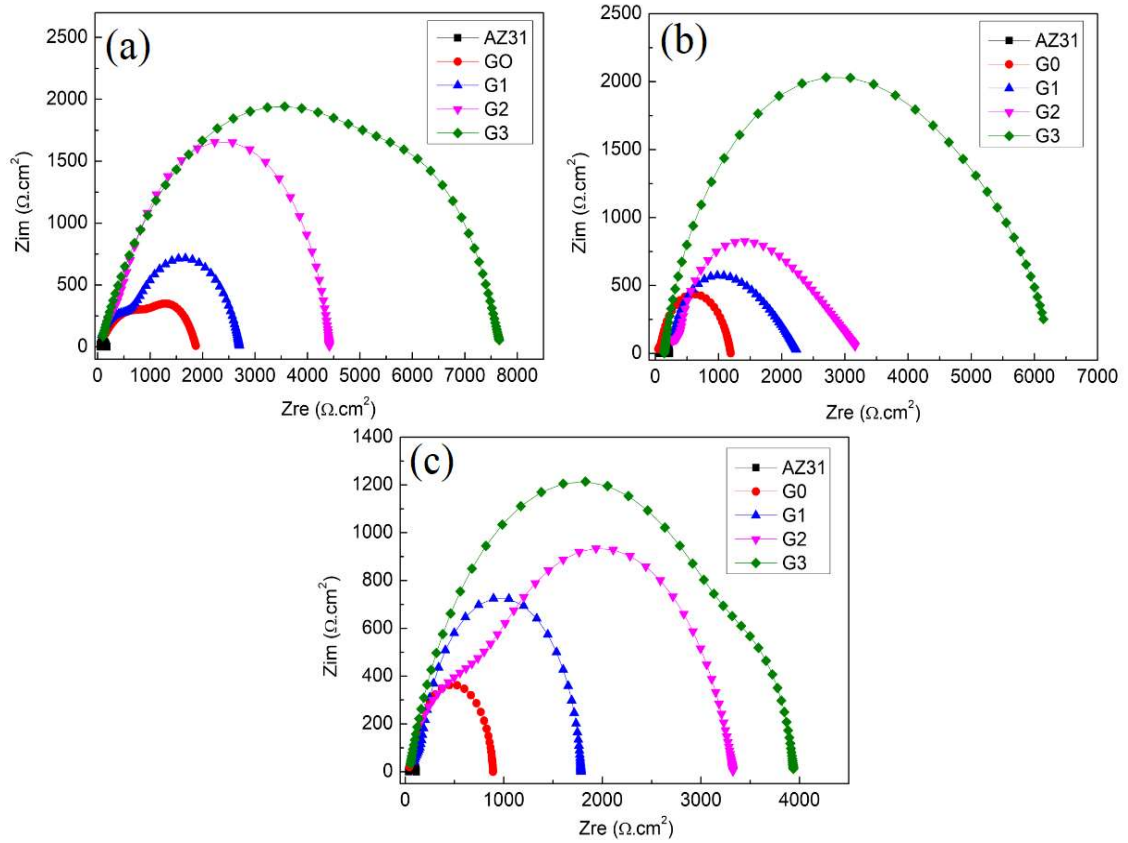
Şekil 6.17. 200V için farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrileri a) 0.5s, b) 16s ve c) 32s.

Çizelge 6.6'da 200V için yapılan kaplamalar için EIS verileri gösterilmiştir. Çizelgede, R1 ve R2 değerlerinin grafen ilavesiyle önemli oranda arttığı görülmüştür. Bu durum grafen içeren çözeltilerin korozyon direncinin ve elektrokimyasal kararlılığının, kaplamasız numuneye ve grafen içermeyen kaplamaya göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. 0.5 saat daldırma süresi için, R2 değeri grafen ilavesinin 0.5 den 2 g/L ye artması durumunda, 1322 den 4985 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ' ye artmıştır. Bu durum kısa daldırma süresi için, korozyon çözeltisinin gözeneklerin içinden hareket edemeyişine bağlanmaktadır. Fakat, daldırma zamanı arttıkça, korozyon çözeltisi gözenekli yapıdan içeri girer ve bariyer tabakaya ulaşır. Bu da kaplamaların korozyon koruma verimliliğini düşürmektedir [74].

Çizelge 6.6. 200V için EIS verileri.

	Malzemeler	R_s $\Omega.cm^2$	R_1 $\Omega.cm^2$	Q_1 $\Omega^{-1}.s^n.cm^{-2}$	R_2 $\Omega.cm^2$	Q_2 $\Omega^{-1}.s^n.cm^{-2}$
0.5h	AZ31	11.03	49.9	1.6×10^{-5}	111.6	7.01×10^{-3}
	G0	52.2	236.9	3.48×10^{-6}	1098	1×10^{-2}
	G1	10.1	298,8	$2,29 \times 10^{-5}$	1322	$2,06 \times 10^{-5}$
	G2	24,6	473,6	$2,73 \times 10^{-6}$	3338	$1,52 \times 10^{-5}$
	G3	30.1	117,2	$2,2 \times 10^{-9}$	4985	$4,59 \times 10^{-6}$
16h	AZ31	24.9	67.2	7.89×10^{-6}	133.3	8.6×10^{-6}
	G0	33.5	254.9	$2,12 \times 10^{-5}$	879,5	$2,1 \times 10^{-7}$
	G1	5.5	555.8	$3,46 \times 10^{-7}$	1103	$1,16 \times 10^{-6}$
	G2	25.4	117.6	$5,78 \times 10^{-5}$	1978	$1,01 \times 10^{-6}$
	G3	31.1	76,5	$3,2 \times 10^{-5}$	3290	$8,9 \times 10^{-5}$
32h	AZ31	15.42	33.6	2.13×10^{-5}	63.7	1.18×10^{-5}
	G0	84.0	183	$6,2 \times 10^{-6}$	732	3.5×10^{-3}
	G1	12.8	27.5	$1,93 \times 10^{-6}$	784	$2,08 \times 10^{-5}$
	G2	19.4	46,7	$1,77 \times 10^{-5}$	1512	$1,01 \times 10^{-6}$
	G3	20.8	173	$1,79 \times 10^{-6}$	2197	$4,53 \times 10^{-5}$

Şekil 6.18. 225V için malzemelerin farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrilerini göstermektedir. Şekillerden tüm daldırma süreleri için kaplamaların kapasitatif eğri çaplarının, kaplamasız numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, G3 numunesinin en yüksek eğri çapına sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç G3 numunesinin en yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, potansiyodinamik testlerinin sonuçlarıyla uyum içindedir.



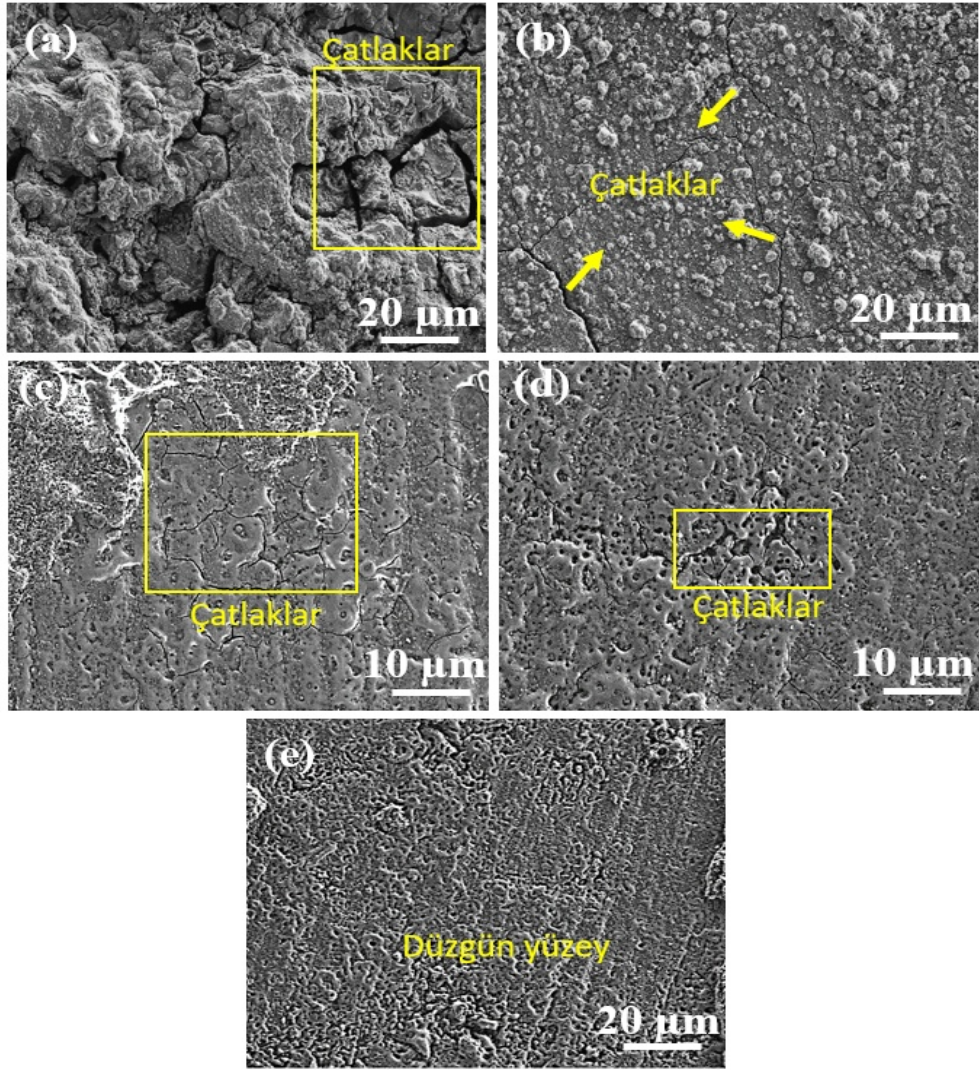
Şekil 6.18. 225V için farklı daldırma süreleri için Nyquist eğrileri a) 0.5s, b) 16s ve c) 32s.

Çizelge 6.7’de 225V için yapılan kaplamalar için EIS verileri gösterilmiştir. Çizelgeden, altlık malzemenin R1 ve R2 değerlerinin kaplamalı malzemelerin değerlerinde düşük olduğu görülmektedir. Grafen ilavesinin artmasıyla R1 ve R2 değerleri önemli oranda artmıştır. Yoğun iç tabakanın MAO kaplamalarında korozyon direncinde önemli bir etkisi olduğu literatürde rapor edilmiştir [45]. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, kaplama kalınlığı grafen ilavesinin artmasıyla artmaktadır. Daha kalın ve daha az gözenekli yapıdaki kaplamalar daha büyük empedans ve daha yüksek korozyon dayanımına sahiptir [35]. Tüm kaplamalar için, artan daldırma süresiyle R1 ve R2 değerlerinde düşüşler gözlenmiştir. Artan daldırma zamanıyla korozyon direncinin azaldığı literatürde rapor edilmiştir [58]. Grafen ilavesiyle kaplamaların elektrokimyasal korozyon performanslarının artması, grafenin mikro gözenek ve çatlakların sınırlarına yerleşmesi ve daldırma testi sırasında korozyon çözeltilisinin iç tabakaya ulaşmasını engellemesiyle açıklanabilir [58].

Çizelge 6.7. 225V için EIS verileri.

	Malzemeler	Rs $\Omega.cm^2$	R1 $\Omega.cm^2$	Q1 $\Omega^{-1}.s^n.cm^{-2}$	R2 $\Omega.cm^2$	Q2 $\Omega^{-1}.s^n.cm^{-2}$
0.5h	AZ31	11.03	49.9	1.6×10^{-5}	111.6	7.01×10^{-3}
	G0	44.8	624.5	3.4×10^{-6}	1210	8.08×10^{-6}
	G1	21.3	745	3.39×10^{-7}	1940	3.47×10^{-6}
	G2	76.6	777.2	8.1×10^{-8}	3565	9.46×10^{-7}
	G3	48.8	1006	1.35×10^{-6}	6625	7.19×10^{-6}
16h	AZ31	24.9	67.2	7.89×10^{-6}	133.3	8.6×10^{-6}
	G0	23.63	187.1	1.37×10^{-6}	982.8	1.24×10^{-7}
	G1	20.1	509.6	1.06×10^{-5}	1758	1.07×10^{-5}
	G2	27.1	597.6	1.14×10^{-5}	2645	1.03×10^{-7}
	G3	138.5	987.2	5.9×10^{-6}	5124	2.01×10^{-4}
32h	AZ31	15.42	33.6	2.13×10^{-5}	63.7	1.18×10^{-5}
	G0	35.6	85.0	1.97×10^{-7}	771.1	4.54×10^{-7}
	G1	71.3	169.8	9.81×10^{-8}	1542	2.27×10^{-7}
	G2	12.3	110.2	1.7×10^{-7}	2207	5.82×10^{-7}
	G3	41.5	437.7	8.9×10^{-7}	3463	2.29×10^{-5}

Şekil 6.19, 225V için yapılan kaplamalarda 32 saat daldırma testi sonrası korozyon yüzey görüntülerini göstermektedir. Şekillerden kaplamasız AZ31 alaşımının geniş ve derin çukurlara ve çatlaklara sahip olduğu görülmektedir. Bu durum korozyon hasarının şiddetinin büyüklüğünü göstermektedir. Kaplamasız altlıkla karşılaştırıldığında, kaplamalı numunelerdeki korozyon hasarı önemli ölçüde azalmıştır. G0, G1 ve G2 numuneleri için bazı çatlaklar korozyon yüzeylerinde görülmektedir. Grafen içeriği arttıkça (G3), hasara uğramamış korozyon yüzeyi görülmektedir. Korozyon yüzey görüntüleri, potansiyodinamik ve EIS test sonuçlarını desteklemektedir.



Şekil 6.19. 225V için 32 saat daldırma testi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri a) AZ31, b) G0, c) G1, d)G2, ve e) G3.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada, AZ31 alaşımının mikro ark oksidasyon kaplamasına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, silikat içeren elektrolite 0.5, 1 ve 2 g/L grafen ilave edilip, iki farklı kaplama voltajı uygulanarak (200-225V) kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların morfolojisi, aşınma ve elektrokimyasal korozyon davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Grafen ilavesi, uygulanan her iki voltaj için de gözenek boyutunu, yüzey pürüzlülüğünü azaltırken, kaplama kalınlığını arttırmıştır. Bununla beraber, 225 V ile gerçekleştirilen kaplamada kaplama kalınlıklarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir.
2. Grafen takviyeli kaplamaların EDS sonuçlarında, Mg, O, Si, C elementleri algılanmıştır. FTIR analizleri sonucunda, kaplamalarda MgO ve Mg₂SiO₄ oluşumu gözlenmiştir.
3. Aşınma testleri sonrasında her iki voltajda gerçekleştirilen kaplamalar için, en yüksek aşınma performansı 2g//L grafen ilaveli kaplamalarda elde edilmiştir. 2g//L grafen ilaveli, 225 V ile yapılan kaplamalarda, 2N yük altında, altlık malzemenin aşınma hızı 0.0100 den 0.0001'e düşmüştür.
4. Aşınma yüzey incelemeleri, baskın aşınma mekanizmasının genel olarak abrasif olduğunu göstermiştir. Grafen ilaveli kaplamalarda aşınmış yüzeylerin daha az hasara uğradığı ve aşınma izlerinin daha küçük olduğu gözlenmiştir.
5. Farklı daldırma sürelerinden sonra (0.5, 16, 32 s) yapılan potansiyodinamik ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri sonucunda, en yüksek grafen takviyesinin en iyi korozyon performansına sahip olduğu gözlenmiştir. Altlık malzemeye kıyasla, kaplanmış numunelerin korozyon

akım yoğunlukları azalmış ve polarizasyon dirençlerinin arttığı gözlenmiştir. Örnek olarak, 225V ile kaplama sonucunda (2g/L grafen), kaplanmamış numunenin polarizasyon direnci 1.87×10^3 ten 6.99×10^4 e yükselmiştir.

6. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonrasında, kaplama tabakasının direncinin grafen ilavesiyle önemli oranda arttığı görülmüştür. Daldırma sürelerinin artması genel olarak, kaplamaların dirençlerini azaltmıştır. Bununla beraber altlık malzemeye karşılaştırıldığında kaplama dirençlerinin artan grafen oranıyla hala önemli oranda yüksek olduğu görülmüştür.
7. Korozyon sonrası yüzey görüntüleri, altlık malzemeye karşılaştırıldığında daha az yüzey hasarına uğradığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Nayeb-Hashemi, A., "Phase diagrams of binary magnesium alloys." *ASM International, Metals Park, Ohio 44073, USA, 1988.* 370 (1988).
2. Avedesian, Michael M., and Baker H., eds., "ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys." *ASM international*, (1999).
3. Callister W. D., "*Materials Science and Engineering: An introduction.*" *New York: Wiley* (2003)
4. King, JF89., "Magnesium: commodity or exotic?." *Materials science and technology* 23.1:1-14 (2007).
5. Mordike B. L. and Kainer K.U., (ed.) "Magnesium Alloys and Their Applications." *Frankfurt, Germany: Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH.* (1998).
6. Mordike B.L. and Ebert T., "Magnesium Properties-applications-potential" *Materials Science and Engineering A*,302:37-45 (2001).
7. Neite G., Kubota K., Higashi K., and Hehmann F., In Cahn R. W., Haasen P., and Kramer E. J. (eds) *Materials Science and Technology, Vol. 8.* Germany: WileyVCH. (2005)
8. Thakur S.K., Paramsothy M., and Gupta M., "Improving tensile and compressive strengths of magnesium by blending it with aluminum." *Materials Science and Technology*, 26(1), 115–120. (2010)
9. Hassan S. F. and Gupta M., "Effect of type of primary processing on the microstructure, CTE and mechanical properties of magnesium/alumina nanocomposites." *Composite Structures*, 72, 19–26. (2006)
10. Paramsothy M., Gupta M., and Srikanth N., "Improving compressive failure strain and work of fracture of magnesium by integrating it with millimeter length scale aluminum." *Journal of Composite Materials*, 42(13), 1297–1307. (2008)
11. Gupta, M., and Sharon N. M. L., Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites. *John Wiley & Sons*, (2011).
12. Kim J. J. And Han D.S., "Recent development and applications of magnesium alloys in the Hyundai and Kia Motors Corporation." *Materials Transactions*, 49, 894–897 (2008).

13. Friedrich H. E. And Mordike B.L. (ed.) "Magnesium Technology—Metallurgy," *Design Data, Applications. Springer.* (2006)
14. Öztürk, F., ve Kaçar İ., "MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE KULLANIM ALANLARININ İNCELENMESİ." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 1.2:12-20 (2012).
15. Demirci M., VANLI A. S., ve Akdoğan A. "Savunma Sanayinde Kullanılan Magnezyum Alaşımları ve Uygulama Alanları." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 7.4 : 13-20 (2015).
16. Staiger, M. P., et al. "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review." *Biomaterials* 27.9 1728-1734 (2006).
17. Song Y. W., Shan D. Y., and Han E. H., "Electrodeposition of hydroxyapatite coating on magnesium alloy for biomaterial application." *Materials Letters*, 62, 3276–3279 (2008).
18. Song Y. W., Shan D. Y., Chen R. S., Zhang F., and Han E. H., "Biodegradable behaviors of AZ31 magnesium alloy in simulated body fluid." *Materials Science and Engineering C*, 29(3), 1039–1045 (2009)
19. Hassan S.F. and Gupta M., "Development of a novel magnesium-copper based composite with improved mechanical properties." *Materials Research Bulletin*, 37, 337–389 (2002).
20. Hassan S.F. and Gupta M., "Development of a novel magnesium-copper based hybrid composites with enhanced tensile properties." *Materials Science and Technology*, 19, 253–259 (2003).
21. Wong W. L. E. and Gupta M., "Development of Mg/Cu nanocomposites using microwave assisted rapid sintering." *Composites Science and Technology*, 67, 1541–1552 (2007).
22. Lyon P., Wilks T., and Syed I., "The influence of alloying elements and heat treatment upon the properties of elektron 21(EV 31 A) alloy." *Magnesium Technology 2005* : 303-308. (2005).
23. Lu, Y., Zhang, Y., Cong, M., Li, X., Xu, W., & Song, L., "Microstructures, mechanical and corrosion properties of the extruded AZ31-xCaO alloys." *Materials*, 11(8), 1467 (2018).
24. Zhang, L., Zhang, J., Chen, C. F., & Gu, Y., "Advances in microarc oxidation coated AZ31 Mg alloys for biomedical applications." *Corrosion Science*, 91, 7-28 (2015).
25. Calado, L. M., Taryba, M. G., Morozov, Y., Carmezim, M. J., & Montemor, M. F. "Novel smart and self-healing cerium phosphate-based corrosion

- inhibitor for AZ31 magnesium alloy”. *Corrosion Science*, 170, 108648 (2020).
26. Wang, P., Gong, Z. Y., Li, H. L., Yang, Q. G., Cao, W. J., Hu, J., ... & Xiang, D. “Effect of CoSO₄ on the characteristics of micro-arc oxidation coatings.” *Surface Engineering*, 36(2), 216-224 (2020).
 27. Skar, J. I. “Corrosion and corrosion prevention of magnesium alloys.” *Materials and Corrosion*, 50(1), 2-6 (1999).
 28. Busk, R. S., & Head, H. “Magnesium and its alloys.” *John Wiley and Sons, New York*, 8, 259-265 (2007).
 29. Ghavidel, N., Allahkaram, S. R., Naderi, R., Barzegar, M., & Bakhshandeh, H. “Corrosion and wear behavior of an electroless Ni-P/nano-SiC coating on AZ31 Mg alloy obtained through environmentally-friendly conversion coating.” *Surface and Coatings Technology*, 382, 125156 (2020).
 30. Aydin, F., Sun, Y., Ahlatci, H., & Turen, Y. “ Investigation of microstructure, mechanical and wear behaviour of B 4 C particulate reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy.” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(4), 873-882 (2018).
 31. Aydin, F., & Sun, Y. “Investigation of wear behaviour and microstructure of hot-pressed TiB₂ particulate-reinforced magnesium matrix composites.” *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(4), 455-469 (2018).
 32. Ghali, E., Dietzel, W., & Kainer, K. U., “General and localized corrosion of magnesium alloys: a critical review.” *Journal of materials engineering and performance*, 13(1), 7-23 (2004).
 33. Zheng, Z., Zhao, M. C., Tan, L., Zhao, Y. C., Xie, B., Yin, D., & Atrens, A., “Corrosion behavior of a self-sealing coating containing CeO₂ particles on pure Mg produced by micro-arc oxidation.” *Surface and Coatings Technology*, 386, 125456 (2020).
 34. Rakoch, A. G., & Bardin, I. V., “Microarc oxidation of light alloys.” *Metallurgist*, 54(5-6), 378 (2010).
 35. Wilke, B. M., Zhang, L., Li, W., Ning, C., Chen, C. F., & Gu, Y., “Corrosion performance of MAO coatings on AZ31 Mg alloy in simulated body fluid vs. Earle's Balance Salt Solution.” *Applied Surface Science*, 363, 328-337 (2016).
 36. Kaseem, M., Hussain, T., Rehman, Z. U., & Ko, Y. G., “Stabilization of AZ31 Mg alloy in sea water via dual incorporation of MgO and WO₃ during micro-arc oxidation.” *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 157036 (2021).

37. Farshid, S., &Kharaziha, M., “Micro and nano-enabled approaches to improve the performance of plasma electrolytic oxidation coated magnesium alloys.” *Journal of Magnesium and Alloys* (2020).
38. Fotovvati, B., Namdari, N., &Dehghanhadikolaei, A., “On coating techniques for surface protection: A review.” *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 3(1), 28 (2019).
39. Wang, P., Gong, Z. Y., Li, H. L., Yang, Q. G., Cao, W. J., Hu, J., ... & Xiang, D., “Effect of CoSO₄ on the characteristics of micro-arc oxidation coatings.” *Surface Engineering*, 36(2), 216-224 (2020).
40. Yin, Z. Z., Qi, W. C., Zeng, R. C., Chen, X. B., Gu, C. D., Guan, S. K., & Zheng, Y. F., “Advances in coatings on biodegradable magnesium alloys.” *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 42-65 (2020).
41. Dou, J., Chen, Y., Yu, H., & Chen, C., “Research status of magnesium alloys by micro-arc oxidation: a review.” *Surface Engineering*, 33(10), 731-738 (2017).
42. Darband, G. B., Aliofkhaezrai, M., Hamghalam, P., &Valizade, N., “Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications.” *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(1), 74-132 (2017).
43. Krishna, L. R., & Sundararajan, G., “Aqueous corrosion behavior of micro arc oxidation (MAO)-coated magnesium alloys: a critical review”. *Jom*, 66(6), 1045-1060 (2014).
44. Li, L. H., Sankara Narayanan, T. S. N., Kim, Y. K., Kang, J. Y., Park, I. S., Bae, T. S., & Lee, M. H., “Characterization and corrosion resistance of pure Mg modified by micro-arc oxidation using phosphate electrolyte with/without NaOH.” *Surface and interface analysis*, 46(1), 7-15 (2014).
45. Lu, X., Mohedano, M., Blawert, C., Matykina, E., Arrabal, R., Kainer, K. U., &Zheludkevich, M. L., “Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions–A review.” *Surface and Coatings Technology*, 307, 1165-1182 (2016).
46. Neto, A. C., Guinea, F., Peres, N. M., Novoselov, K. S., &Geim, A. K., “The electronic properties of graphene.” *Reviews of modern physics*, 81(1), 109 (2009).
47. Kumar, H. P., &Xavior, M. A., “Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review.” *Procedia Engineering*, 97, 1033-1040 (2014).
48. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J., “Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites.” *Progress in Materials Science*, 90, 75-127 (2017).

49. Turan, M. E., & Aydin, F. “Improved elevated temperature mechanical properties of graphene-reinforced pure aluminium matrix composites.” *Materials Science and Technology*, 36(10), 1092-1103 (2020).
50. Chen, Q., Jiang, Z., Tang, S., Dong, W., Tong, Q., & Li, W., “Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties.” *Applied Surface Science*, 423, 939-950 (2017).
51. Chen, F., Zhang, Y., & Zhang, Y., “Effect of graphene on micro-structure and properties of MAO coating prepared on Mg-Li alloy”. *Int. J. Electrochem. Sci*, 12(7), 6081-6091 (2017).
52. Han, B., Yang, Y., Li, J., Deng, H., & Yang, C., “Effects of the graphene additive on the corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation (PEO) coating on the AZ91 magnesium alloy.” *Int. J. Electrochem. Sci*, 13, 9166-9182 (2018).
53. Vatan, H. N., & Adabi, M., “Investigation of tribological behavior of ceramic-graphene composite coating produced by plasma electrolytic oxidation.” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(7), 1643-1652 (2018).
54. Aydin, F., Ayday, A., Turan, M. E., & Zengin, H., “Role of graphene additive on wear and electrochemical corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on Mg-MWCNT nanocomposite.” *Surface Engineering*, 36(8), 791-799 (2020).
55. Zhang, Y., Chen, F., Zhang, Y., & Du, C., “Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy.” *Tribology International*, 146, 106135 (2020).
56. Zuo, Y., Li, T., Yu, P., Zhao, Z., Chen, X., Zhang, Y., & Chen, F. “Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy.” *Applied Surface Science*, 480, 26-34 (2019).
57. Muhaffel, F., & Cimenoglu, H., “Development of corrosion and wear resistant micro-arc oxidation coating on a magnesium alloy.” *Surface and Coatings Technology*, 357, 822-832 (2019).
58. Cai J., Cao, F., Chang, L., Zheng, J., Zhang, J., & Cao, C., “The preparation and corrosion behaviors of MAO coating on AZ91D with rare earth conversion precursor film.” *Applied Surface Science*, 257(8), 3804-3811 (2011).
59. Zhang, F., Liu, Z. G., Zeng, R. C., Li, S. Q., Cui, H. Z., Song, L., & Han, E. H., “Corrosion resistance of Mg-Al-LDH coating on magnesium alloy AZ31.” *Surface and Coatings Technology*, 258, 1152-1158 (2014).

60. Pan, Y., He, S., Wang, D., Huang, D., Zheng, T., Wang, S., ... & Chen, C., "In vitro degradation and electrochemical corrosion evaluations of microarc oxidized pure Mg, Mg-Ca and Mg-Ca-Zn alloys for biomedical applications." *Materials Science and Engineering: C*, 47, 85-96 (2015).
61. Castellanos, A., Altube, A., Vega, J. M., García-Lecina, E., Díez, J. A., & Grande, H. J., "Effect of different post-treatments on the corrosion resistance and tribological properties of AZ91D magnesium alloy coated PEO." *Surface and Coatings Technology*, 278, 99-107 (2015).
62. Zhang, Z. Q., Zeng, R. C., Lin, C. G., Wang, L., Chen, X. B., & Chen, D. C. (2020). "Corrosion resistance of self-cleaning silane/polypropylene composite coatings on magnesium alloy AZ31." *Journal of Materials Science & Technology*, 41, 43-55.
63. Bhowmick, S., Muhaffel, F., Sun, G., Cimenoglu, H., & Alpas, A. T., "Role of counterfaces with DLC and N-based coatings on frictional behaviour of AZ31 magnesium alloy subjected to plasma electrolytic oxidation (PEO) process." *Surface & Coatings Technology*, 397 (2020).
64. Chen, M. A., Ou, Y. C., Yu, C. Y., Xiao, C., & Liu, S. Y., "Corrosion performance of epoxy/BTESPT/MAO coating on AZ31 alloy." *Surface Engineering*, 32(1), 38-46 (2016).
65. Zhang, C. L., Zhang, F., Song, L., Zeng, R. C., Li, S. Q., & Han, E. H., "Corrosion resistance of a superhydrophobic surface on micro-arc oxidation coated Mg-Li-Ca alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 815-826 (2017).
66. Aydin, F., & Turan, M. E., "The effect of Boron Nitride on tribological behavior of Mg matrix composite at room and elevated temperatures." *Journal of Tribology*, 142(1) (2020).
67. Aydin, F., Sun, Y., & Emre Turan, M., "Influence of TiC content on mechanical, wear and corrosion properties of hot-pressed AZ91/TiC composites." *Journal of Composite Materials*, 54(2), 141-152 (2020).
68. Aydin, F., & Sun, Y., "Microstructure and Wear of a Sintered Composite with a Magnesium Alloy AZ91 Matrix Reinforced with ZrO₂ Particles." *Metal Science and Heat Treatment*, 61(5-6), 325-329 (2019).
69. Aydin, F., Sun, Y., & Turan, M. E., "Investigation of microstructure, mechanical and wear behaviour of B₄C particulate reinforced AZ91 matrix composites by powder metallurgy" *Indian Journal Chemical Technology IJCT* Vol.26(4) (2019).
70. Zahmatkesh, B., Enayati, M. H., & Karimzadeh, F., "Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy." *Materials & Design*, 31(10), 4891-4896 (2010).

71. Aydın, F. "Toz Metalurjisi ile üretilmiş Al/Y₂O₃ nanokompozitlerinin oda ve yüksek sıcaklıktaki Korozyon Davranışının İncelenmesi." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 576-588 (2020).
72. Aydın, F., & Durgut, R. "Estimation of wear performance of AZ91 alloy under dry sliding conditions using machine learning methods." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(1), 125-137 (2021).
73. Aydın, F., "The investigation of the effect of particle size on wear performance of AA7075/Al₂O₃ composites using statistical analysis and different machine learning methods." *Advanced Powder Technology*, 32(2), 445-463 (2021).
74. Gu, Y., Bandopadhyay, S., Chen, C. F., Guo, Y., & Ning, C., "Effect of oxidation time on the corrosion behavior of micro-arc oxidation produced AZ31 magnesium alloys in simulated body fluid." *Journal of Alloys and Compounds*, 543, 109-117 (2012).
75. Bakhsheshi-Rad, H. R., Abdellahi, M., Hamzah, E., Ismail, A. F., & Bahmanpour, M., "Modelling corrosion rate of biodegradable magnesium-based alloys: The case study of Mg-Zn-RE-xCa (x= 0, 0.5, 1.5, 3 and 6 wt%) alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 630-642 (2016).
76. Peitao, G., Mingyang, T., & Chaoyang, Z., "Tribological and corrosion resistance properties of graphite composite coating on AZ31 Mg alloy surface produced by plasma electrolytic oxidation." *Surface and Coatings Technology*, 359, 197-205 (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Meral ERDİL 1993 yılında Karabük'te doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (%100 İng) Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2018 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalında yüksek lisansına başladı.