

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle maliyet açısından, malzemenin performansını artırmak için kaplama teknikleri uygulanmaktadır. Mikro ark oksidasyon yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla birçok avantaja sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, grafit, hegzagonal bor nitrür, çinko oksit katkılı ve katkısız olmak üzere dört farklı elektrolit çözeltide Al 2024 alaşımı yüzeyine mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilerek, malzemenin yüzey modifikasyonu, tribolojik özellikleri ve korozyon davranışı incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmam süresince, deneyimleri ve fikirleriyle bu çalışmanın başarıya ulaşmasına rehberlik eden saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmalarım sırasında büyük emeği geçen Sayın Doc. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU'na teşekkür ederim. Her türlü çalışmada, beni yalnız bırakmayan bilgi ve deneyimleriyle bana çok yardımcı olan Sayın Dr. Sefa Emre SÜNBÜL'e, Sayın Dr. Kürşat İÇİN'e ve Sayın Dr. Zafer GÖLBAŞI'na ve sevgili arkadaşlarım Selmine AKYOL, Songül DURSUN ve Ataberk YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve bana güç veren değerli babam Arap KILIÇ'a, değerli annem Mahmure KILIÇ'a ve çok kıymetli kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aysu KILIÇ
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Al 2024 Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Farklı Katkı Maddeleri İlave Edilerek Kaplanması, Tribolojik Özelliklerinin ve Korozyon Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/07/2023

Aysu KILIÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımaları	3
1.2.1. Alüminyum Tarihçesi ve Genel Özellikleri	3
1.2.2. Alüminyum Alaşımaları	4
1.2.2.1. Döküm Alüminyum Alaşımaları	5
1.2.2.2. Dövme Alüminyum Alaşımaları.....	5
1.2.2.2.1. 2XXX Serisi Alaşımaları	6
1.3. Mikro Ark Oksidasyon	7
1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi	7
1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Düzenegi ve Prosesi.....	7
1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Kaplama Oluşumu.....	8
1.3.3.1. Akım-Voltaj Profili	10
1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Deşarj Oluşumu.....	12
1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektrolit Etkisi	13
1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Katkı Maddelerinin Etkisi	15
1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları.....	16
1.3.8. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Uygulama Alanları.....	18
1.4. Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu	18
1.5. Sürtünme ve Aşınma.....	20
1.5.1. Aşınma Türleri	22

1.5.1.1.	Adhezif Aşınma	22
1.5.1.2.	Abrazif Aşınma	23
1.5.1.3.	Erozif Aşınma	24
1.5.1.4.	Yorulma Aşınması	25
1.6.	Korozyon.....	26
1.6.1.	Korozyon Türleri	27
1.6.1.1.	Üniform Korozyon.....	27
1.6.1.2.	Galvanik Korozyon.....	27
1.6.1.3.	Çukurcuk Korozyon.....	28
1.6.1.4.	Aralık Korozyon	28
1.6.1.5.	Taneler Arası Korozyon.....	28
1.6.1.6.	Gerilmeli Korozyon	28
1.6.1.7.	Erozyonlu Korozyon.....	29
1.6.1.8.	Hidrojen Bozunması	29
1.7.	Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Kullanılan Katkı Maddeleri	29
1.7.1.	Grafit.....	29
1.7.2.	Hegzagonal Bor Nitrid (h-BN)	30
1.7.3.	Çinko Oksit (ZnO)	31
1.8.	Literatür Çalışması.....	32
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	40
2.1.	Altık Malzemenin Hazırlanması	40
2.2.	Karakterizasyon Çalışmaları	43
2.2.1.	Yüzey Pürüzlülük Ölçümü.....	43
2.2.2.	Morfolojik Analizler	44
2.2.3.	Yapısal Analizler	45
2.2.4.	Sürtünme ve Aşınma Deneyleri	45
2.2.5.	Korozyon Deneyi	48
3.	BULGULAR VE İRDELEME	50
3.1.	Yüzey Pürüzlülüğü ve Kalınlık Ölçümü Sonuçları	50
3.2.	Yapısal Analiz Sonuçları	53
3.3.	Morfolojik Analiz Sonuçları	54
3.4.	Sürtünme ve Aşınma Deney Sonuçları	59
3.5.	Korozyon Sonuçları	76

4.	SONUÇLAR	83
5.	ÖNERİLER.....	85
6.	KAYNAKLAR	86

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Al 2024 ALAŞIMININ MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİYLE FARKLI KATKI MADDELERİ İLAVE EDİLEREK KAPLANMASI, TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN VE KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Aysu KILIÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2023, 94 Sayfa

Bu çalışmada, Al 2024 alaşımı yüzeyine mikro ark oksidasyon yöntemiyle grafit, h-BN ve ZnO partikülleri eklenerek kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonrası oluşan numunelerin, yüzey özellikleri, tribolojik özellikleri ve korozyon davranışları incelenmiştir. Eklenen katkı maddeleri ortalama kaplama kalınlığına etki etmiş ve en yüksek ortalama kaplama kalınlığı (334,71 μm) ZAC kodlu numunede bulunmuştur. Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlükleri artmıştır ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülük ($R_a=11,79 \mu\text{m}$) değeri ZnO katkılı ZAC kodlu numunede elde edilmiştir. Bütün numunelerin dış katmanında $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve iç katmanında $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı olduğu gözlenmiştir. Farklı ortamlarda yapılan aşınma deneyinde, azot ortamı ve deniz suyu ortamında ortalama sürtünme katsayısı hava ortamına göre daha düşük çıkmıştır. En düşük ortalama sürtünme katsayısı (0,047 μm) GAC kodlu numunede meydana gelmiştir. Katkı maddelerinin deniz suyu ortamında sürtünme katsayısına etkisi görülmemiştir. En düşük aşınma oranı ($4,55 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$) azot ortamında GAC kodlu numunede tespit edilmiştir. Kaplama işlemlerinin korozyon üzerinde etkisi olduğu ve en iyi korozyon direncinin grafit katkılı GAC kodlu numunede gözlenmiştir. GAC kodlu numune için E_{corr} ve I_{corr} değerleri sırasıyla, -709,5 V, $1,73 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Mikro ark oksidasyon, Grafit, ZnO, h-BN, AA-2024, Aşınma, Korozyon

Master Thesis

SUMMARY

COATING OF Al 2024 ALLOY WITH MICRO ARC OXIDATION METHOD WITH
ADDITIONAL ADDITIVES, INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES
AND CORROSION BEHAVIORS

Aysu KILIÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK
2023, 94 Pages

In this study, the coating process was carried out by adding graphite, h-BN and ZnO particles to the surface of 2024 Al alloy by micro arc oxidation method. The surface morphology, tribological properties and corrosion behavior of the samples coated were investigated. The added additives influenced the average coating thickness, and the highest average coating thickness (334.71 μm) was observed in the sample coded as ZAC. The surface roughness of the coated samples increased, and the lowest average surface roughness value ($R_a=1.79 \mu\text{m}$) was obtained in the ZnO doped ZAC coded sample. All samples showed the presence of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ in the inner layer with a uniform structure. In the different environmental wear experiments, the average coefficient of friction was found to be lower in the nitrogen atmosphere and seawater environment compared to the air environment. The lowest average coefficient of friction (0.047 μm) was observed in the sample coded as GAC. The effect of additives on the coefficient of friction in the seawater environment was not observed. The lowest wear rate ($4.55 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$) was observed in the sample with coded as GAC in nitrogen atmosphere. The coating processes had an effect on corrosion, and the best corrosion resistance was observed in the graphite doped GAC coded sample. For the GAC coded sample, the E_{corr} and I_{corr} values were determined as -709.5 V, $1.73 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, respectively.

Key Words: Micro arc oxidation, Graphite, ZnO, h-BN, AA-2024, Wear, Corrosion

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Mikro ark oksidasyon düzeneği	8
Şekil 1.2. Mikro ark oksidasyon işlem basamakları.....	9
Şekil 1.3. Mikro ark oksidasyon düzeneğinde elektrolit işlemleri	10
Şekil 1.4. Mikro ark oksidasyon işleminde gözlenen akım-voltaj eğrileri.....	11
Şekil 1.5. Mikro ark oksidasyon işleminde gözlenen akım-voltaj	12
Şekil 1.6. MAO işleminde kullanılan alüminyum elektrolit kimyasalları, 1- Metalin hızlı çözünmesi, 2- Metalin yavaş çözünmesi, 3- Dar gerilim aralığında pasifleşme, 4- Genel pasifleşme aralığı ile komplike davranış, 5- Zayıf pasifleşme, 6- Güçlü pasifleşme.....	14
Şekil 1.7. Elektrolit katkısının kaplama oluşumuna etkisinin şematik görüntüsü. a) negatif yüklü partiküller b) partiküllerin pozitif yüklü altlık metale etkisi c) pasif filmin oluşması d) mikro arkların oluşması d) partikül katkılı oksit kaplamanın oluşması	16
Şekil 1.8. Mikro ark oksidasyon işlem süresine göre oluşan deşarj kanallarının sayısı 19	
Şekil 1.9. Aşınma olayını meydana getiren unsurlar.....	21
Şekil 1.10. Adhezif aşınması şematik gösterimi	22
Şekil 1.11. Abrasif aşınma mekanizması	23
Şekil 1.12. Abrasif aşınma türleri şematik gösterimi	24
Şekil 1.13. Eroziv aşınma.....	25
Şekil 1.14. Elektrokimyasal korozyon hücresi	27
Şekil 1.15. Grafitin kristal yapısı.....	30
Şekil 1.16. h-BN kristal yapısı	31
Şekil 1.17. ZnO kristal yapısı	32
Şekil 2.1. Mikro ark oksidasyon cihazı	42
Şekil 2.2. MAO işlemi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri a) AFC, b) GAC, c) BAC ve d) ZAC.....	43
Şekil 2.3. a) Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı b) Numune üzerindeki görüntüsü	44
Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	44
Şekil 2.5. X-ışınları diffraktometresi (XRD).....	45
Şekil 2.6. Sürtünme ve aşınma test cihazı	46
Şekil 2.7. Aşınma iz genişliği ve derinliğinin şematik gösterimi.....	47

Şekil 2.8.	3 boyutlu yüzey profilometri cihazı	48
Şekil 2.9.	Elektrokimyasal korozyon deney cihazı	49
Şekil 3.1.	AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama kaplama kalınlığı (µm) değerleri.....	51
Şekil 3.2.	(a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunelerin kesit SEM görüntüleri	52
Şekil 3.3.	(a) Altlık numune, (b) AFC, (c) GAC, (d) BAC, (e) ZAC kodlu numunelerin XRD paterni	53
Şekil 3.4.	AFC kodlu numunenin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri	55
Şekil 3.5.	GAC kodlu numunenin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri.....	56
Şekil 3.6.	BAC kodlu numunenin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri.....	56
Şekil 3.7.	ZAC kodlu numunenin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri	57
Şekil 3.8.	AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama gözenek boyutu	58
Şekil 3.9.	(a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunenin gözenek boyutu SEM görüntüsü.....	59
Şekil 3.10.	Numune yüzeyinde aşınan bölgelerin iz derinliğinin ve genişliğinin ölçüldüğü kısımlar.....	60
Şekil 3.11.	1. bölgenin iz derinliği ve genişliği	60
Şekil 3.12.	2. bölgenin iz derinliği ve genişliği	61
Şekil 3.13.	3. bölgenin iz derinliği ve genişliği	61
Şekil 3.14.	4. bölgenin iz derinliği ve genişliği	62
Şekil 3.15.	Hava ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi	63
Şekil 3.16.	Azot ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi	64
Şekil 3.17.	Deniz suyu ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi.....	65
Şekil 3.18.	Ortalara göre numunelerin ortalamalama sürtünme katsayısı.....	66
Şekil 3.19.	Ortalara göre numunelerin aşınma iz hacmi	67
Şekil 3.20.	Ortalara göre aşınma oranları	68
Şekil 3.21.	Hava ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC	69
Şekil 3.22.	Hava ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC	71
Şekil 3.23.	Azot ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC	72
Şekil 3.24.	Azot ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC	73

Şekil 3.25.	Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC	74
Şekil 3.26.	Deniz suyu ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC.....	76
Şekil 3.27.	MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrisi	78
Şekil 3.28.	MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin Nyquist eğrisi	80
Şekil 3.29.	MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin Bode ve Faz açısı grafiği.....	81
Şekil 3.30.	Elektiksel eşdeğer devre modeli.....	82



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Alüminyuma ait mekanik ve fiziksel özellikler	4
Tablo 1.2. Alüminyum döküm alaşımının sınıflandırılması.....	5
Tablo 1.3. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması.....	6
Tablo 1.4. 2024 Al alaşımı içerisindeki ağırlıkça element oranları.....	7
Tablo 2.1. MAO işleminde kullanılan çözeltilerin kimyasal bileşimi.....	41
Tablo 2.2. MAO işlemi için uygulanan kaplama parametreleri	42
Tablo 2.3. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları	46
Tablo 3.1. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	50
Tablo 3.2. Tafel ölçümleri sonucunda elde edilen potansiyel (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon hızı değerleri.....	79
Tablo 3.3. Devre ile elde edilen EIS verileri	81

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Amper
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
cm ²	: Santimetre Kare
h-BN	: Hegzagonal Bor Nitrür
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
Mm	: Milimetre
N	: Newton
Nm	: Nanometre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T	: Sıcaklık
V	: Volt
XRD	: X-ışınları Difraktometresi
ZnO	: Çinko Oksit
°C	: Santigrat Derece
µm	: Mikrometre

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Alüminyum (Al), hafif metaller grubuna dâhil olan bir metaldir ve yüksek elektrik, ısı iletkenlik, iyi korozyon direnci, kolay üretilirlik, düşük ısı genleşme ve özgül ağırlık gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenlerle, Al ve alaşımları, günümüz teknolojisinde uçak, otomotiv, tekstil gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Al, demir dışı metaller arasında en yüksek üretim miktarına sahiptir ve bu özellikleri sayesinde çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır (Zhao vd., 2016). Al üretim sürecinden itibaren, yüzeyinde bir oksit tabakası bulunduğundan dolayı oksijenle etkileşime girer. Bu oksit tabakası, alüminyumun yüzeyini kaplar ve korozyona karşı dayanıklılığını sağlar. Bu özelliği nedeniyle, Al çoğu korozif ortamda tercih edilmektedir. Bazı asit, baz ve tuz çözeltilerine karşı oksit tabakasının yapısı bozulmaktadır (Şimşek, 2014). Alüminyum ve alaşımlarının yüzeyine gelişmiş mekanik özellikler, yüksek korozyon dayanımı ve yüksek aşınma davranışlarını kazandırmak için yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmaktadır (Özcan, 2014). Bu uygulanan yöntemler fiziksel buhar biriktirme, ark iyon kaplama, plazma sprey, plazma nitrürleme ve plazma oksitleme gibi bazı yüzey modifikasyon işlemleridir.

Mikro ark oksidasyon (MAO) veya plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) olarak adlandırılan termokimyasal bir işlem, Al ve alaşımlarının yüzeylerini modifiye etmek için yaygın olarak kullanılır. Bu teknikle, Al yüzeylerinde kalın ve yüksek mekanik özelliklere sahip seramik filmler oluşturulur, bu da Al ve alaşımlarının mekanik özelliklerini, korozyon ve aşınma dirençlerini artırır. MAO yöntemiyle malzemeye aşınma direnci, sertliği, korozyon direnci gibi özellikleri arttırmak, valf metaller üzerinde kalın koruyucu kaplamalar üretmek için yaygın olarak kullanılan yüksek verimli ve uygun maliyetli bir yöntemdir. Bu yöntem ile Al, Mg, Ti, Zr, Nb, ... gibi valf metallerinin ve alaşımlarının MAO yöntemiyle uygulanması mümkün olan bir kaplama yöntemidir. MAO işlemiyle oluşturulan kaplamalar, yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde uzay araçları ve roketlerde koruyucu amaçlı kullanılabilir. Ayrıca, bu kaplamaların olağanüstü dielektrik özelliklerinden faydalanarak yalıtkan ortamlarda da kullanılması mümkündür (Yang vd., 2004).

MAO teknolojisiyle kaplanan Al alaşımları ilk olarak mutfak eşyaları için kullanılmıştır. Ancak son yıllarda, tekstil, otomotiv, petrokimya gibi daha geniş bir

yelpazede kabul gören endüstrilerde, yüksek sıcaklık ve aşınmaya karşı makinelerin parçalarını korumak için kullanılmasıyla büyük ilgi görmektedir. Bunun yanısıra, biyomedikal malzemelerde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Biyomedikal malzemeler, insan vücuduyla uyumu, korozif etkisi olmaması ve uzun süreli kullanım için uygun olması gibi özellikler açısından, günümüzde plazma elektrolitik kaplamanın kullanımının arttığı bir alan haline gelmiştir (Şimşek, 2014).

MAO yöntemiyle üretilen kaplamaların başlıca dezavantajları arasında yüksek poroziteye düzeyi ve yüksek enerji tüketiminin yüksek olması bulunmaktadır. Porozite oranının azaltılması, özellikle korozyon direnci ve aşınma davranışı gibi özellikler açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle elektrolit bileşenler MAO işleminin önemli faktörlerinden birisidir. Bu yöntem ile kaplanan numuneler için kullanılan temel elektrolitik çözeltisi, istenen mekanik, fiziksel ve diğer özellikleri tam anlamıyla sağlamada yetersiz olabilmektedir. Son yıllarda kaplamaların performansını geliştirmek için elektrolit içerisine farklı katkı maddeleri eklenmektedir. İstenilen şartlar ve özellikler sağlanması durumunda elektrolit içerisine grafit, SiC, MoS₂, ZrO₂, grafen, TiO₂, Si₃N₄, h-BN vb. gibi birçok katkı maddeleri ilave edilerek MAO yöntemiyle kaplamalar yapılmaktadır (Özcan, 2014).

Aşınma, istenmeyen bir yüzey bozulması olarak tanımlanan, kullanılan malzemelerin katı, sıvı veya gazlarla temas etmesi sonucunda mekanik etkilerle yüzeyden küçük parçaların ayrılmasıyla oluşur (Bağcı, 2010). Aşınma, yüzey pürüzlülüğünü ve toleransları yok ederek bileşenlerin bozulmasına neden olmaktadır (Demirbaş, 2019). Aşınma, malzemenin özellikleri, yüzey şekilleri, kullanılan yağlayıcılar, sistem hızı, sıcaklık, kayma yüzeyleri arasındaki temas basıncı, çalışma süresi, aşındırıcı maddelerin yüzeye etkileme durumu, sertlik gibi birçok özelliklere bağlı olarak meydana gelir. Bazı aşınma türlerine adhezif, abrazif, yorulma ve erozyon aşınması örnek olarak verilebilir. . Ayrıca bir malzemede oluşan aşınma türleri birden çok olarak gerçekleşebilir (Bağcı, 2010).

Korozyon, metallerin, metal alaşımlarının veya diğer malzemelerin doğal çevre şartları veya kimyasal etkileşimler sonucunda zamanla aşınma, erozyon veya değişime uğramasıdır. Korozyon çeşitleri genellikle etki eden ortamın özelliklerine ve malzemenin yapısına bağlı olarak değişir. Yaygın olarak kullanılan bazı korozyon çeşitleri, üniform, galvanik, çukurcuk, aralık, taneler arası, gerilmeli, erozyonlu, hidrojen korozyon örnek olarak verilebilir (Obuz, 2022).

Bu çalışmada Al 2024 alaşımı yüzeyine MAO yöntemiyle kaplama işlemi yapılmıştır. Temel alkali elektrolit ile bu elektrolit içerisine grafit, çinko oksit ve hegzagonal bor nitrid

partikülleri eklenerek farklı katkılı elektrolit çözeltileri hazırlanarak, MAO işlemi uygulanmış altlık malzeme yüzeyinde oluşan kaplamaya, katkı maddelerinin etkisi incelenmiştir. Elektrolit içerisine ilave edilen partiküller kaplama yapısındaki yüzey özellikleri, kaplama kalınlık ölçümleri, pürüzlülük ölçümleri, XRD analizi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaplanmış numunelerin tribolojik özellikleri ve korozyon davranışları incelenmiştir.

1.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

1.2.1. Alüminyum Tarihçesi ve Genel Özellikleri

Alüminyum, saf haliyle hafif mavimsi beyaz bir metaldir ve sembolü Al olarak kullanılmaktadır. Al, 1808 yılında İngiltere’de ilk defa oksit haldeki bileşiginden ayrıştırılarak elde edilmiştir. Dünya kabuğunun %8’ini oluşturmakta, oksijen ve silisyumdan sonra bulunan üçüncü element olarak yer almaktadır. Alüminyum endüstriyel çapta üretime 1886 yılında Charles Martin Hall ve Paul T. Heroult’un birbirinden habersiz olarak yaptıkları elektroliz yöntemi ile kullanılmaya başlanmıştır. Elektroliz yönteminin keşfedilmesinden bu yana Al üretimi dünyada hızla artarak, demir ve çelikten sonra en yaygın kullanılan ikinci metal haline gelmiştir. Üretim miktarının artmasıyla birlikte, alüminyumun birim fiyatı, ilk keşfedildiği dönemlerde altın ve gümüş gibi değerli metaller seviyesindeyken, sonradan bakırla aynı seviyeye düşmüştür (Varol, 2012). Al sanayi, birincil ve ikincil olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İkincil Al, hurda malzemelerden geri dönüştürülen alüminyumdan elde edilmektedir. Üretim yöntemlerine göre Al ürünleri, hammadde ve yarı mamuller olarak sınıflandırılmaktadır. Bu ürünler arasında ekstrüzyon ürünleri, yassı ürünler, döküm ürünleri ve iletkenler bulunmaktadır. İkincil Al olan talep, yüksek enerji maliyetleri ve çevresel kaygılarla birlikte yükselmektedir. İkincil Al üretimi, birincil Al üretimine göre sadece %5 oranında enerji tüketmektedir. Bu durumda, ikincil Al üretimi maliyetleri düşük olmasına sebep olur (Miller vd., 2000).

Günümüzde alüminyum, dünyada en çok kullanılan demir dışı metaldir ve ulaşım, paketleme, inşaat, elektrik ve ilaç gibi farklı sektörlerde mevcuttur. Gelişmiş mekanik özelliklere ve yeni uygulamalara duyulan ihtiyaç, spesifik kimyasal bileşime sahip yeni alaşım türlerinin sürekli geliştirilmesine yol açmıştır. Alüminyumun düşük özgül ağırlığının

(2,7 g/cm³) yanında sahip olduğu yüksek mekanik ve korozyon özellikleri, Al alaşımının çoğu sektörde öncelikli kullanılmasını sağlamaktadır (Dursun ve Soutis, 2014). Buna ek olarak Al, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik, kolay üretilebilirlik, düşük ısı genleşme ve çekme dayanımı yüksek diğer metallerle alaşım oluşturma özelliklerine sahip hafif metaller grubuna giren metaldir. Alüminyuma ait fiziksel özelliklerinin bir kısmı Tablo 1.1’de verilmiştir.

Al üretim sürecinden itibaren, yüksek oksijen reaktivitesi nedeniyle yüzeyinde bir oksit filmi oluşur. Bu oksit filmi, Al yüzeyini kaplayarak korozyona karşı direncini sağlar. Bu özelliği sayesinde, Al çeşitli korozif ortamlarda kullanılabilir. Ancak bu oluşan oksit tabakası, bazlar, bazı asitler ve tuzlar karşısında etkili değildir (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016).

Tablo 1.1. Alüminyuma ait mekanik ve fiziksel özellikler

Yoğunluk (g/cm ³)	2,70
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Elastite Modülü (GPa)	72
Akma Mukavemeti (MPa)	10-30
Çekme Mukavemeti (MPa)	40-90
Kopma Uzaması (%)	30-40

1.2.2. Alüminyum Alaşımları

Al alaşımları, kullanılan alaşım elementleri ve saflık derecelerine göre sınıflandırılır. Cu, Zn, Si, Mg, Fe ve Ti olmak üzere bazı alaşım elementleri, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini etkiler. Alüminyuma çok az miktarda katılan bu alaşımlar, katı eriyiği oluşturarak yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısında yer almaktadır. Genel olarak, eklenen alaşım elementinin yapı içindeki miktarı arttıkça, malzemenin şekil değiştirebilme yeteneği de artar. Şekillendirme işlemi, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirebilir (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016).

Alüminyum alaşımlarını sınıflandırmak için bir dizi farklı standart vardır. Alüminyum Birliğinin (AA) standardı, bu standartlardan en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. ASTM, DIN ve EN gibi standartlar da kullanılmaktadır. Tüm standartlarda alüminyum

alaşimleri dövme ve döküm olarak iki kategoriye ayrılmıştır. Her iki grubun da alaşimleri ısıtıl işlem uygulanabilen (yaşlandırma) ve uygulanamayan (yaşlandırma) olarak tanımlanır (Doğan, 2006).

1.2.2.1. Döküm Alüminyum Alaşimleri

Alüminyum döküm alaşımlarının numaralandırılmasında, üç basamaklı bir sayı veya ek işlem kullanılır ve üçüncü basamaktan sonra bir nokta konularak işlemin özelliğine göre numaralandırılır. Bu numaralandırma, Al içine eklenen ağırlıkça en yüksek metalin türüne göre değişir. İlave edilen alaşımın türünü sınıflandırmadaki ilk rakam belirlemektedir.

Döküm alaşimleri genellikle kum kalıba veya basınçlı döküm gibi yöntemlerle kullanılır. Alüminyum döküm alaşimleri, yüksek fiziksel özelliklere sahip olup genellikle işlenmeye uygundur. Bu alaşimler, hem mukavemet hem de korozyon özellikleri açısından yüksek performansa sahiptir. Bu nedenle, döküm ve dövme alaşımlarının kimyasal bileşimleri oldukça farklıdır. Tablo 1.2, temel alaşım maddelerinin yanısıra ısıtıl işlem uygulanabilir alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılmasını içerir (Doğan, 2006).

Tablo 1.2. Alüminyum döküm alaşımının sınıflandırılması

Alaşım	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	Ticari saflıkta Al
2xx.x	Al-Cu
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si
4xx.x	Al-Si
5xx.x	Al-Mg
6xx.x	Al-Ms-Si
7xx.x	Al-Zn-Mg
8xx.x	Al-Sn

1.2.2.2. Dövme Alüminyum Alaşimleri

Alüminyum dövme alaşımları, basamak sayısı dört (xxxx) olacak şekilde belirlenir. Bu alaşimler, dövme, haddeleme veya ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleri

kullanılarak üretilmektedir. 1xxx serisi, minimum % 99,00 saflıkta olan saf alüminyum temsil eder. Soldan ikinci rakam, katkı elementlerinin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir. 2xxx'den 8xxx'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişiklikleri (modifikasyon) simgeler ve son iki rakamın özel bir anlamı bulunmamaktadır. Temel alaşım elementleri ve ısıl işlem uygulanabilir alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması Tablo 1.3'te verilmiştir (Doğan, 2006).

Tablo 1.3. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması

Alaşım	Temel Alaşım Elementi
1xxx	Ticari saflıkta Al
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn-Mg
8xxx	Diğer elementler (Li gibi)
9xxx	Kullanılmayan Seri

1.2.2.2.1. 2XXX Serisi Alaşımları

Al alaşımları arasında, bakır (Cu) elementini en yüksek oranda içeren alaşımdır. Bu alaşım, çökelme sertleşmesi yöntemiyle sertleştirilebilir ve çelikle rekabet edebilecek dayanıklılık değerleri elde edilebilir (Doğan, 2006). 2xxx serisi ısıl işlem görebilir ve bireysel alaşımlarda yüksek mukavemet (özellikle yüksek sıcaklıklarda), tokluk ve belirli durumlarda kaynaklanabilirlik gibi iyi kombinasyonlara sahiptir. Fakat atmosferik korozyona dirençli değildirler ve bu nedenle genellikle boyanır veya kaplanırlar. 2xxx alaşımları öncelikle uçak (2024) ve kamyon gövdesi (2014) gibi uygulamalarda kullanılmaktadır ve bu alaşım türleri genellikle cıvatalı veya perçinli yapımda tercih edilmektedir (Davis, 1993). 2024 kalite Al alaşımı içerisindeki ağırlıkça element oranları Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Al 2024 alaşımı içerisindeki ağırlıkça element oranları

2024	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Kimyasal Bileşim Aralığı	<0,25	1,2-1,8	3,8-4,9	<0,1	0,3-0,9	<0,5	0,7-1,3	<0,15	Kalan

1.3. Mikro Ark Oksidasyon

1.3.1. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi

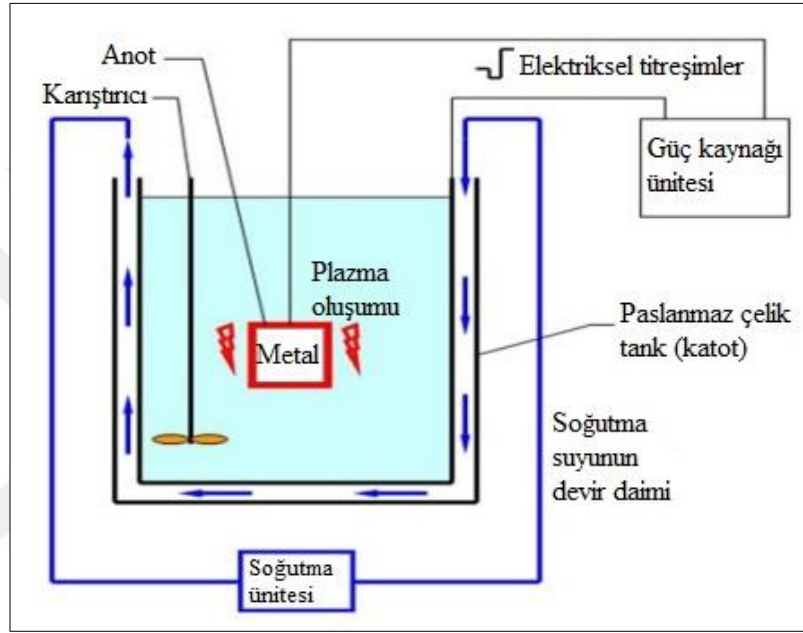
Mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi, yaklaşık 40 yıl önce Sovyetler Birliği'nde geliştirilen bir yöntemdir. İlk başlarda akademik çevrelerde kullanılan bu yöntem, daha sonra denizaltı parçalarının üretiminde askeri amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. 1980'lerin sonlarında MAO tüm dünya genelinde yaygınlaşmış ve günümüzde hala güncel ve yaygın bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır (Hussein vd., 2010; Başoğul, 2014).

MAO işlemi birçok terim ile tanımlanabilir. Bunlar arasında, kıvılcımlı anodik oksidasyon (spark anodizing), anodik kıvılcımlı biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodik oksidasyon (micro arc anodizing), mikro plazma anodik oksidasyon (microplasma anodizing), mikro plazma oksidasyon (mikro plazma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrolytic oxidation) ve elektroplazma oksidasyon (elektroplasma oxidation) sayılabilir. Amerika'da birçok patentli işleme ek olarak Avrupa'da KEPLA-COAT ve İsrail'de ALMAG-AL adı altında kendi MAO teknolojilerini geliştirmişlerdir. Bu ülkelerin yanı sıra, in, Japonya ve Avustralya da MAO teknolojisine katılmışlardır (Hussein vd., 2010).

1.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Düzeneği ve Prosesi

MAO işlem düzeneği, güç kaynağı, bir elektrolit banyosu, anot, katot ve soğutma sisteminden oluşmaktadır. MAO tekniği de kaplanacak numune yüzeyinde, kararlı bir oksit katman meydana getirebilecek Al, Mg, Ti, Ta, Zr, Zn, W, Hf vb. gibi valf metalleri ve bunların alaşımları kullanılmaktadır. MAO işlem düzeneğinde, kullanılan metaller ve alaşımlar, hava ortamında yüzeylerinde kararlı oksit bir film oluşturan metal olarak güç kaynağına anot olarak bağlanır. Tank genellikle paslanmaz çelikten yapılmış olup, katot

görevini üstlenerek devreyi tamamlar. Sulu çözeltinin homojen olması için bir karıştırıcı kullanılır. Metal yüzeyinde plazma oluşumu gerçekleştiği için, sıcaklık yükselişini kontrol etmek için soğutma suyu, çift cidarlı tankın içinden dolaştırılarak sistemin her zaman en uygun sıcaklıkta çalışması sağlanır. Ancak, doğrudan çözeltinin ayrı bir soğutma ünitesinden geçirilmesi durumunda, sıcaklık artışlarını önlemek için filtreleme işlemi yapılması gerekmektedir (Erk, 2019). MAO işlem düzeneği Şekil 1.1’de verilmiştir.

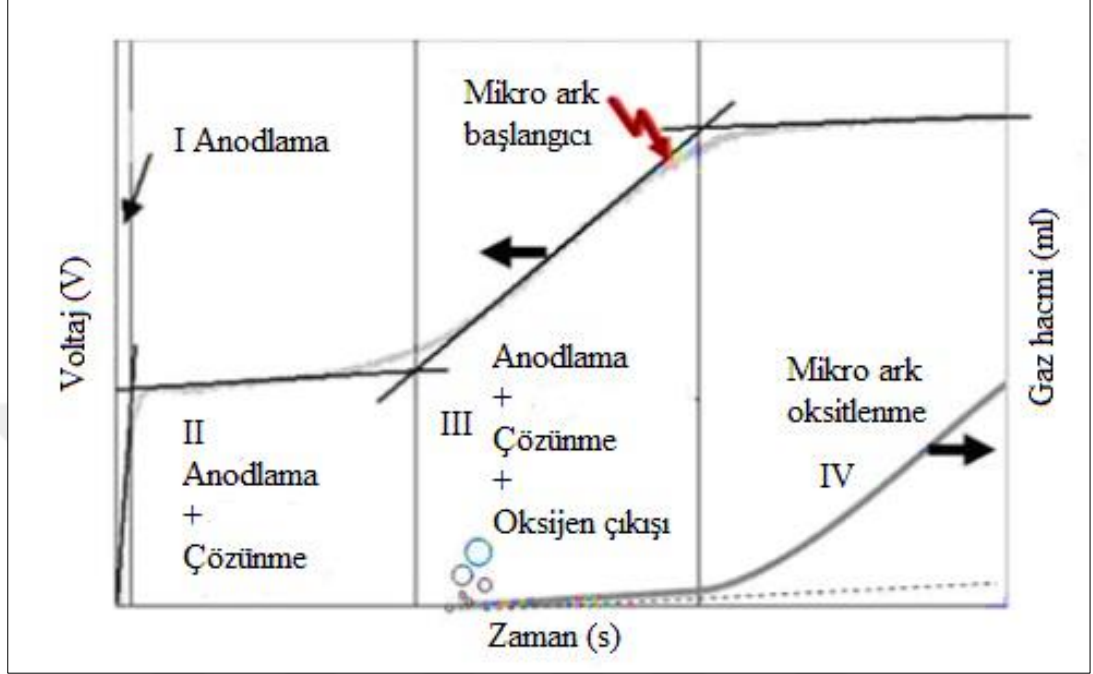


Şekil 1.1. Mikro ark oksidasyon düzeneği

1.3.3. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Kaplama Oluşumu

Anodik oksidasyon işlemi sırasında, anot olarak kullanılan numuneye negatif bir voltaj uygulanır ve bu voltajla birlikte malzeme yüzeyinde bir oksit filmi oluşumu başlar. Fakat, uygulanan voltaj belirli bir değeri aştığında, malzemenin yüzeyinde ark oluşumu ve MAO başlar. Yüzeyindeki mikro boyuttaki ark oluşumundan kaynaklanan voltaj değeri, bozunma voltajı (dielectric breakdown) olarak adlandırılır. Bozunma voltajına ulaşıldığında, malzemenin yüzeyinde metal iyonları ve hidroksil iyonları, karşı yönlere hareket ederek oksit oluşumunu başlatır (Çakıcı, 2009). MAO’daki anodik proseslerini araştırmak için Snizhko ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda işlemin karakteristik olarak dört

basamaktan oluştuğunu belirlemişlerdir. Şekil 1.2'de mikro ark oksidasyon işlem basamakları verilmiştir.

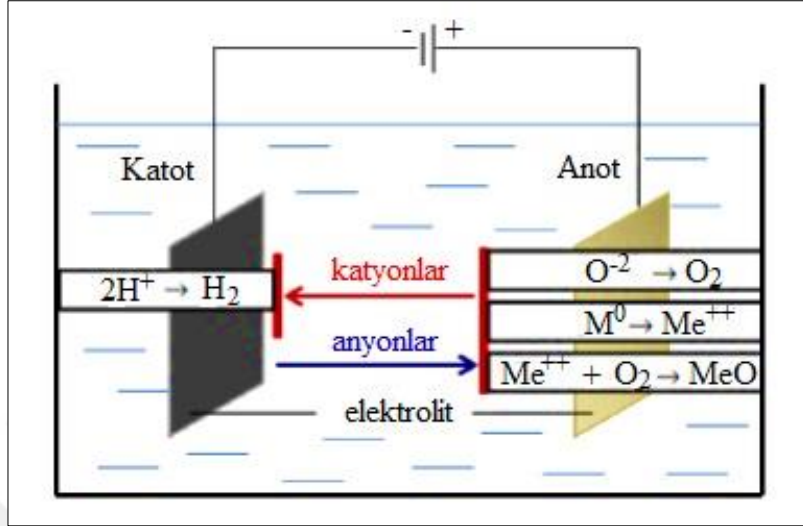


Şekil 1.2. Mikro ark oksidasyon işlem basamakları

- I. Birinci basamak, alüminyum oksidasyonunun gerçekleştiği aşamadır. Grafik de en yüksek eğiminin voltaj eğrisinde olduğu bu aşamada verilmiştir. (Anodlama)
- II. İkinci basamakta voltaj artışı yavaşlamış ve oksidin büyüme hızında düşüş olduğu belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan oksijen kabarcıkları ortaya çıkmıştır. (Anodlama / Çözünme)
- III. Üçüncü basamakta voltaj artışı tekrar artmakta ve oksit tekrar kristalize olmaktadır. (Anodlama / Çözünme / Oksijen çıkışı)
- IV. Dördüncü basamakta ise fazla oksijen çıkışı mikro ark oluşumuna sebep olmaktadır.

Bu ilk üç aşama, tipik bir elektroliz hücresinde meydana gelen olayları temsil etmektedir. Sulu çözelti içindeki reaksiyon, elektrotlarda gerçekleşen çeşitli işlemlerle ortaya çıkmaktadır. Anot yüzeyinde, oksijen çıkışı gerçekleşirken aynı zamanda anot metalinde oksidasyon da meydana gelir. Katot yüzeyinde ise gaz halinde hidrojen çıkışı ve kation redüksiyonu gerçekleşir. Anot metal yüzeyinde anot yüzeyinde metal çözünmesi veya oksit oluşumu, elektrolitin kimyasal aktivitesine bağlı olarak gözlemlenebilir. Voltaj

değeri belirli bir değeri geçtiğinde, zayıf bölgelerde MAO meydana gelebilir (Erk, 2019). MAO işleminde elektroliz sırasında gerçekleşen işlemler Şekil 1.3'te gösterilmektedir.

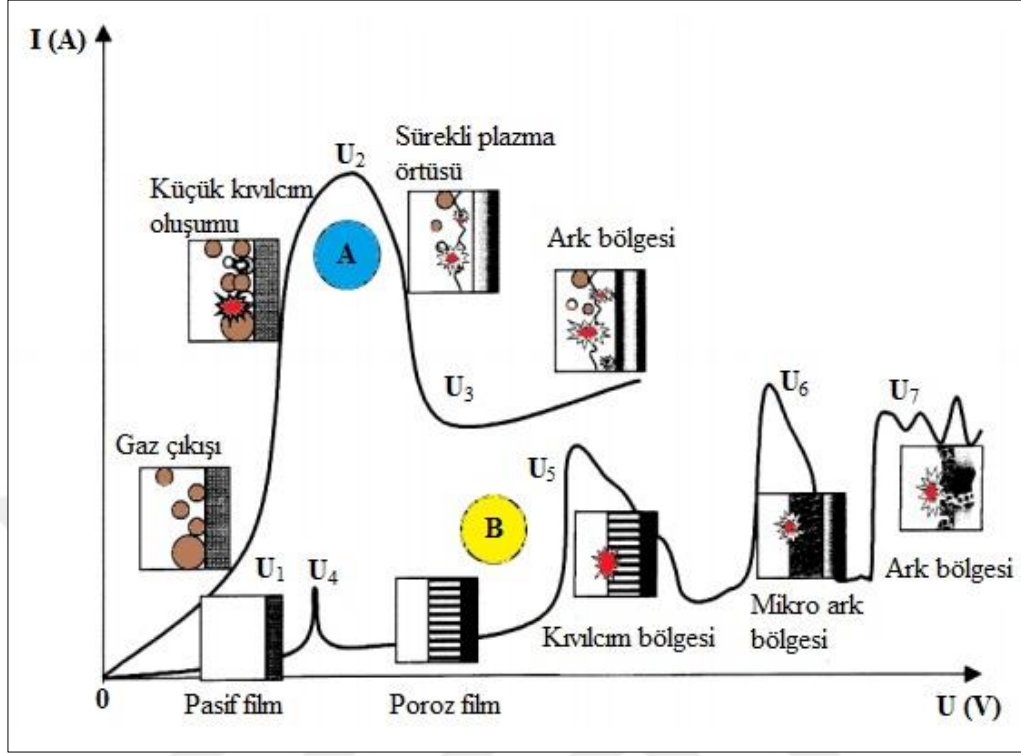


Şekil 1.3. Mikro ark oksidasyon düzeneğinde elektrolit işlemleri (Yerokhin vd., 1999)

Elektrolit işlemi, metale bağlı olan kimyasal aktivite nedeniyle oksidasyon işlemine, yüzeyin çözünmesine ve oksit filmi oluşumuna sebep olabilir. Geleneksel elektrolit işlemleri, elektrolit-elektrolit arayüzeylerini temsil edebilen, basitleştirilmiş bir model çerçevesinde çalışır. Bu işlemler genellikle çift-şarjlı tabakalardan oluşur ve metal-elektrolit veya oksit elektrolit çiftleri tarafından temsil edilir. Buna ek olarak, ürün üretim işlemleri (örneğin, gazın serbest hale geçmesi) genellikle yok sayılabilir veya “current yield” ve “electrode shielding” gibi özel düzeltme faktörleri kullanılarak hesaplanır. Ancak, bu tür basitleştirmeler her zaman güvenilir olmayabilir, bunun sebebi belirli koşullar altında elde edilen sonuçlar, elektrolit veya yüzey tabakalarını çevreleyen gazlı ortamdaki işlemler tarafından önemli ölçüde etkilenebilir (Başoğul, 2014).

1.3.3.1. Akım-Voltaj Profili

Mikro ark oksidasyon elektrolizinde oluşabilecek iki ayrı sistemin akım-voltaj diyagramı Şekil 1.4'te verilmiştir. A tipi akım voltaj grafiği, anot veya katot da gaz çıkışının olduğu metal-elektrolit sistemini temsil etmektedir. B tipi akım-voltaj grafiği ise yüzeyde oksit tabakası oluşan bir sistemi belirlemektedir.



Şekil 1.4. Mikro ark oksidasyon işleminde gözlenen akım-voltaj eğrileri (Yerokhin vd., 1999)

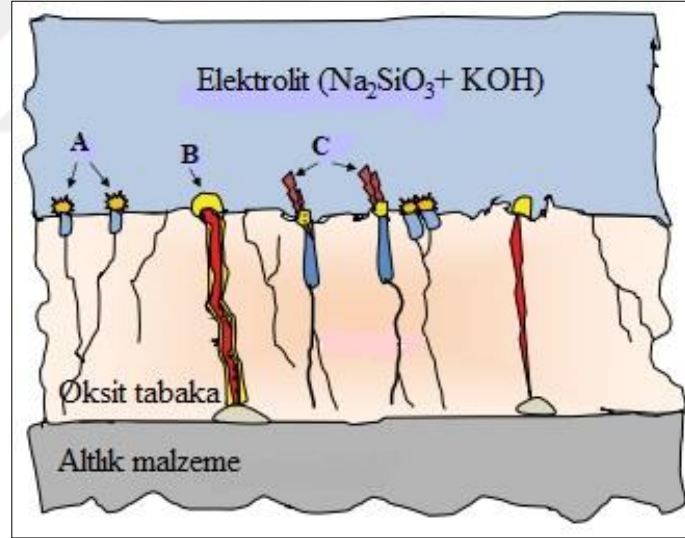
A tipi akım-voltaj eğrisinde; U_1 - U_2 bölgeleri arasındaki potansiyel artış titreşime ve parlaklığa neden olmaktadır. Yükselen akım, elektrot yüzeyindeki gaz olarak çıkan reaksiyon ürünleri (örneğin O_2 ve H_2) tarafından kısmi bir koruyucu etkiyle sınırlanır. Elektrolitin elektrotta teması nedeniyle oluşan kaynama olayları sonucunda akım yoğunluğu sürekli artar. Akım yoğunluğu U_2 bölgesine ulaştığında, elektrot devamlı olarak gaz buharıyla örtünen bir plazma tarafından kaplanır. Hücreler arasındaki gerilimin tamamı, bu ince plazma tabakası tarafında yoğunlaşır. Bu bölgedeki elektrik alan şiddeti (E), 106-108 V/m değerlerine ulaştığında iyonlaşma başlar ve bu, gaz içindeki kıvılcımlarla gözlemlenebilir. Bu kıvılcımlar sonucunda, buhar içinde dağılmış homojen bir parlaklık haline dönüşür.

B tipi akım-voltaj eğrisinde, ilk olarak malzeme yüzeyinde oluşan pasif film tabakası, U_4 noktasında malzemenin korozyon potansiyeline denk gelen bir çözünme başlatır. Ardından, U_5 - U_6 bölgesinde numuneye uygulanan gerilimle birlikte pasif tabakası büyür. U_5 noktasında elektrik alan şiddeti belirli bir değere ulaşır ve bu film, darbe veya tünel

iyonizasyon süreçlerinin etkisiyle daha yavaş ve daha büyük ark deşarjlarına yol açar. U_6 - U_7 arasında kalınlaşan oksit tabakası, termal iyonizasyonu kısmen engelleyerek kısa devreye neden olur. Bu durum, arkların daha mikro seviyede oluşmasına yol açar. Mikro ark nedeniyle film tabakası kademeli şekilde erir ve elektrolit içindeki elementlerle alaşımlanır. U_7 bölgesinin üzerinde, bu mikro deşarjlar film boyunca termal çatlaklar gibi yıkıcı etkilere yol açabilir ve yüzeyin tamamında güçlü ark deşarjlarına dönüşebilir (Yerokhin vd., 1999; Başoğul, 2014).

1.3.4. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Deşarj Oluşumu

Hussein ve arkadaşları, kaplamadaki deşarj tiplerini genellikle başlangıç ve bitiş noktaları ile enerji seviyelerine göre A, B ve C olmak üzere üç farklı şekilde incelemiştir. Şekil 1.5'te deşarj oluşumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.5. Mikro ark oksidasyon işleminde gözlenen akım-voltaj (Hussein vd., 2010)

B tipi deşarjlar, kaplama yüzeyinden altlık malzemeye kadar uzanan en kuvvetli deşarjlardır ve bu deşarjlar yüzeydeki mikro yapılar arasında deşarj kanalının yer aldığı oluşumları içerir. B tipi güçlü deşarjlar, altlık yüzeyine ulaştığında metal veya metal oksitleri ergitip veya buharlaştırarak deşarj kanalları aracılığıyla yüzeye çıkartır. Ergimiş veya buharlaşmış şekilde yüzeye çıkan metal veya metal oksitler, elektrolit çözeltisiyle temas

ettiğinde hızla katılarak pankek şeklinde yapılar oluştururlar. Bu deşarjlar kaplamanın temel bileşeninin altlık malzemenin türevlerini kazanmasından sorumlu olan deşarj türleridir.

A ve C tipi deşarjlar ise yüzeyde veya yüzeye yakın iç bölgelerde oluşan daha zayıf deşarjlardır. Bu deşarjlar, yüzeydeki küçük gözeneklerin kaynağı olarak düşünülmektedir. Ancak, gözenekler daha yüzeysel bir yapıya sahip olup, B tipi deşarjlar gibi alt metale kadar derinlemesine değildir. Dahası, elektrolit içerisindeki bileşenler, A ve C tipi deşarjlarla daha fazla şekilde kaplama yüzeyine ve oluşan gözeneklere katılmaktadır. Özellikle B tipi oluşan deşarjlar sonucunda oluşan porların boyutu, MAO işlemi sırasında meydana gelen deşarjların gücü hakkında önemli bilgiler sunar. Kaplama kalınlığının fazla olması için sayıca fazla ancak şiddeti az olan deşarjların oluşumu önemlidir. Çünkü çok sayıda güçlü deşarj, kaplamayı tahrip edebilir ve kaplama kalınlığını olumsuz etkileyebilir (Hussein vd., 2010).

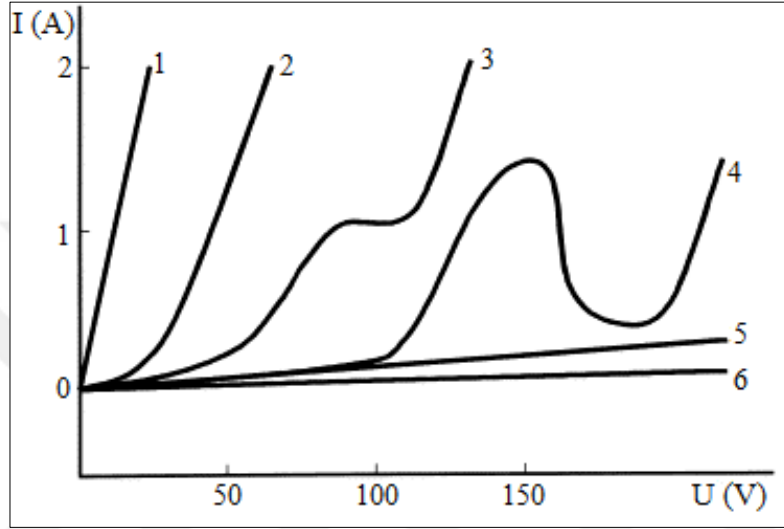
1.3.5. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektrolit Etkisi

MAO işleminin gerçekleştirilebilmesi için metal-elektrolit ikili seçiminin uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Seçilen elektrolite bağlı olarak, MAO işlemi sırasında büyüme hızı, yapı, faz bileşenleri ve element dağılımında farklılıklar gözlemlenebilir. Seçilen elektrolitlerin MAO işlemi sürecindeki rolü;

- Deşarj kanallarının oluşması için gereken dielektrik geçişini sağlayan, yüzeyde pasifleşme etkisini artırmak amacıyla ince bir yalıtkan film oluşması,
- Metal-elektrolit ara yüzeyinde oluşan anodik oksidasyon süreci için gerekli enerji ve iletim ortamı sağlamak,
- Oksidasyon reaksiyonu için gerekli oksit tuzların oluşumunda oksijen kaynağı olarak görev yapmak,
- Bileşenlerin içeriğine bağlı olarak kaplama bileşimini değiştirmek gibi dört madde olarak özetlenebilir.

MAO işleminde kullanılacak elektrolitler Şekil 1.6'da gösterildiği gibi altı grupta incelenebilir (Li vd., 2013). Bu elektrolit kimyasalları; alüminyumun hızlı çözünmesini etkileyen çözeltiler (NaCl, NaClO₃, HCl, NaNO₃, NaOH), metal çözünmesini yavaşlatan çözeltiler (H₂SO₄, (NH₄)₂ S₂O₈, Na₂SO₄), dar bir voltaj aralığında metal pasifleşmesi

sağlayan çözeltiler (sodyum asetat, fosforik asit), kompleks davranış gösteren florür elektrolitler (KF,NaF), metalin zayıfça pasifleşmesini destekleyen elektrolitler, metalin güçlü şekilde pasifleşmesini destekleyen elektrolitler, (borik asit, fosforik ve karbonik asit, inorganik polimerler (silikatlar, alüminatlar, tungstat, molibdat) ve alkali metal fosfatlar) gibi kimyasallar bulunmaktadır.



Şekil 1.6. MAO işleminde kullanılan alüminyum elektrolit kimyasalları (Yerokhin vd., 1999), 1- Metalin hızlı çözünmesi, 2- Metalin yavaş çözünmesi, 3- Dar gerilim aralığında pasifleşme, 4- Genel pasifleşme aralığı ile komplike davranış, 5- Zayıf pasifleşme, 6- Güçlü pasifleşme

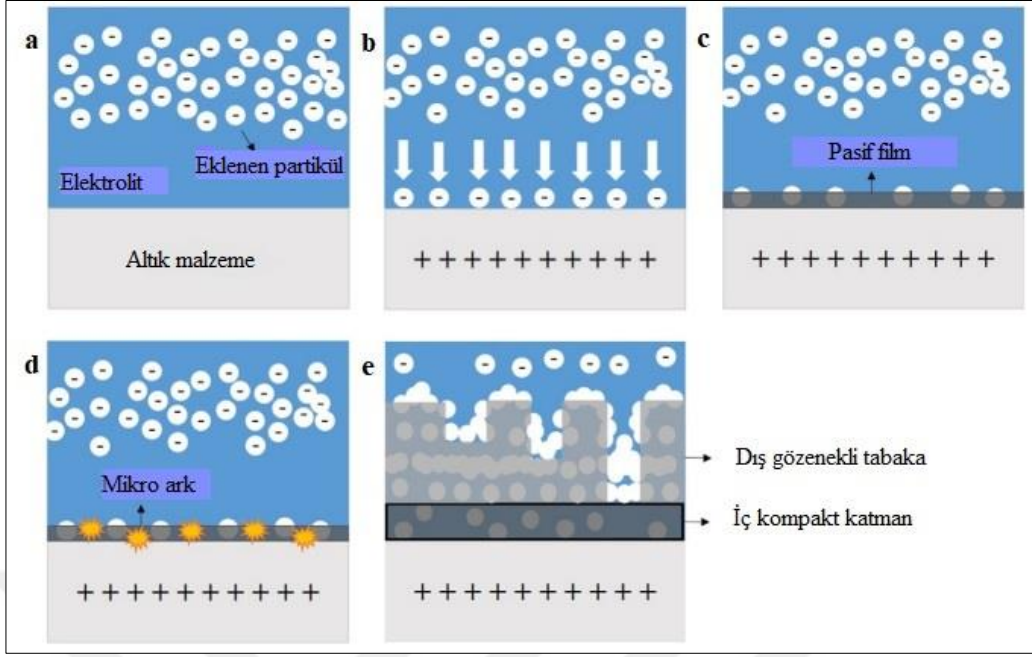
Şekil 1.6'da görüldüğü gibi, 4, 5 ve 6 grup elektrolitleri, MAO yöntemiyle kaplama üretimi için kıvılcım oluşum voltajına ulaşmayı kolaylaştırdığından en avantajlı olanlardır. Bu kimyasallar, kaplama içeriğine katkılarına bağlı olarak dört farklı sınıfa ayrılabilir; kaplamaya sadece oksijen katkısı sağlayanlar, anyonik bileşenler içeren elektrolitlerle kaplamaya diğer elementleri katkı sağlayanlar, katyonik bileşenler içeren elektrolitlerle kaplamaya diğer elementleri katkı sağlayanlar ve makro parçacıkların kaplama kompozisyonuna katılmasını sağlayan süspansiyonlar.

2 ve 3 grup elektrolitleri kullanılarak, kaplama oluşturulurken hem altlığın oksitlenmesi aynı zamanda elektrolit içindeki maddelerin altlık yüzeyine çökmesi sağlanır. Bu grup elektrolit, geniş bir aralıkta kaplama bileşimi ve özelliklerinin değiştirilebileceği için en umut verici grup olarak kabul edilir. Silikat esaslı çok bileşenli elektrolitler gibi

soydum ve potasyum silikat çözeltileri de MAO işleminde genişçe kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra NaF, NaOH ve KOH da çözeltinin iletkenliğini arttırmak amacı ile elektrolite eklenebilir. Bunun yanı sıra, kaplamaya çeşitli fonksiyonel özellikler kazandırmak için renklendirici maddeler, yüksek ergime noktasına sahip toz malzemeler veya kuru yağlayıcılar gibi bileşenler eklenebilir (Yerokhin vd., 1999).

1.3.6. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Katkı Maddelerinin Etkisi

MAO işlemi ile elde edilen kaplamaların özellikleri daha çok mikro yapı ve bileşime bağlıken, bu parametreleri modifiye etmek için elektrolitlere katkı maddeleri eklenmektedir. Katı partikülleri, kaplama yapısına girmeden net bir şekilde yapıda görülebilirken, aynı zamanda daha fazla enerji deşarjları ile eritilerek elektrolitin diğer bileşenleri ve matris ile reaksiyon verebilirler. Katkı partikülleri, kaplama yapısına reaksiyona girmeden doğrudan bütünleşmiş olabilir ve yapı içinde net bir şekilde görülebilir. Aynı zamanda, yüksek enerjili deşarjlarla eritilerek elektrolitin diğer bileşenleri ve matrisle reaksiyona girebilir. Eklenen katkılar genel olarak kaplamaların, bileşim, por özellikleri, kaplamanın dayanıklılığı ve kalınlık temelinde etki etmektedir (Çetin, 2019). Katkı maddeleri eklenen elektrolitlerde gerçekleştirilen MAO yönteminde kaplama oluşumu şematik olarak Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Elektrolit katkısının kaplama oluşumuna etkisinin şematik görüntüsü. a) negatif yüklü partiküller b) partiküllerin pozitif yüklü altlık metale etkisi c) pasif filmin oluşması d) mikro arkların oluşması e) partikül katkılı oksit kaplamanın oluşması

Alkalın elektrolitlerde bulunan partiküller, çözültideki OH^- iyonuyla etkileşime girerek negatif yüzey yüküne sahip olmaktadır. Proses esnasında uygulanan voltajla birlikte, altlık yüzeyi pozitif yüklü hale gelir ve elektroforetik etkiyle partiküller tarafından çekilir ve absorbe edilir. MAO'nun ilk aşamasında, absorbe olan partiküllerden bazıları anodizasyon sonucu oluşan pasif tabakanın içinde kalabilir. Mikro ark oluşumları ve malzeme erimesi sonucunda kaplama büyümesi hızlanır ve partiküller daha fazla kaplama içine katılır. Bu sebeple, altlık-kaplama ara yüzeylerine uzak olmayan bölgelerde partiküller nadiren görülürken, kaplamanın dış bölgeleri ve özellikle gözeneklerde daha fazla partikül yer alır. MAO elektrolitleri çok farklı boyutlarda ve farklı yapılarda partiküller içerebilir. Genel olarak, Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , h-BN, B_4C , grafit, grafen gibi partikülleri farklı tane boyutlarında MAO elektrolitlerinde tercih edilmektedir (Shokouhfar ve Allahkaram, 2016).

1.3.7. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

MAO teknolojisi, gelişmekte olan bir teknoloji olup yapılan çalışmalara dayanarak birçok avantaja sahip olduğu ve aynı zamanda bazı dezavantajları olduğu gözlemlenmiştir.

MAO teknolojisi, üretim sürecinin daha hızlı işlenmesini sağlar ve aynı zamanda işlem öncesi numune hazırlığı sırasında çevresel etkilerin en düşüğe indirilmesini hedefler.

MAO işleminin bir farklı özelliği, geniş bir malzeme grubuna uygulanabilmesidir. Bu yöntem, Al, Mg, Ti, Nb, Zr gibi çeşitli malzemeler üzerinde kullanılabilir. Ayrıca, geleneksel anodik oksidasyon yöntemiyle kaplaması güç olan fazla bakır içeren Al alaşımları ve yüksek silisyum içeren döküm malzemeler, MAO yöntemiyle 300 µm kalınlığa kadar kaplanabilir. MAO teknolojisi, çevreye duyarlı ve zehirli atıklar içermeyen bir kaplama yöntemi olarak hafif metallerin geleneksel yöntemlerle kaplanmasına alternatif bir seçenek sunmaktadır. Özellikle otomotiv sanayisinde kullanılan çelik esaslı parçaların yerine Al, Ti, Mg gibi hafif alaşımların kullanılmasına olanak tanıyan benzersiz aşınma ve korozyon direnci sağlamaktadır (Şimşek, 2014).

MAO prosesinin en önemli avantajlar şöyle sıralanabilir;

- Ön veya son yüzey işlemleri gerektirmez.
- Çevreye duyarlı ve maliyeti düşük elektrolitler kullanılabilir.
- Kaplama renk değişikliği, dekoratif amaçlar için kullanılabilir.
- Yüksek sertlikte kaplamalar elde edilebilir (Al için 2000 HV).
- Kaplamadan sonra özel işlemlerle sürtünme performansı iyileştirilebilir.
- Yüksek aşınma direncine sahiptir.
- Termal bariyer kaplama olarak kullanılmasının sebebi yüksek sıcaklık dayanımı özelliğidir.
- Dielektrik dayanımı, 10-20 V/mikron aralığında bulunmaktadır.
- Farklı ortamlarda korozyona karşı dayanıklılık gösterir.

MAO yöntemiyle oluşan kaplamaların bu özelliklerinin, birden fazla alanda avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, MAO işlemide diğer işlemlerde olduğu gibi bazı sınırlamalar ve olumsuzluklar içermektedir.

MAO işlemini büyük ölçekli ürünlerde uygulamak için yüksek voltaj ve güç kaynağı kapasitesi gerekmektedir. Bu durum, enerji tüketiminin yüksek olması ve üretim ortamının tehlikeli bir hal alması anlamına gelir. Ayrıca, malzeme yüzeyinde oluşan fazla sıcaklık nedeniyle, işlem sırasında kullanılan çözeltilerin soğutulması için büyük kapasiteli bir soğutucu ihtiyaç duyulur. MAO işlemi sonucunda elde edilen seramik kaplama, yüzeyinde pürüzlü ve oldukça kırılabilir bir yapıya sahiptir, bu sebeple dış katmanda aşınma direnci oldukça düşüktür. Ancak, iç katmanları zıt bir özellik gösterir; çok sert ve yüksek aşınma

dayanımına sahiptir. Bununla birlikte, kaplamaların üst kısmının engellenmesi, hem maliyet hem de üretim açısından verimsiz olabilir (Kalkancı, 2004; Şimşek, 2014).

1.3.8. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Uygulama Alanları

Al, Ti, Mg, Zr gibi valf metalleri ve bunların alaşımları, metal yüzeyindeki karalı oksit filmi aracılığıyla dielektrik bariyer tabakası olarak direnç oluşturur ve bu sayede MAO yöntemiyle anotlamaya imkân tanır. Bu metal gruplarının kendi oluşturdukları oksitler, açık devre koşullarında kararludur ve korozyona karşı dirençlidir. Metal elektrot üzerine uygulanan pozitif doğrultuda artan potansiyel ile akım akışı, neredeyse tamamıyla yüzeydeki oksit filminin büyümesine yönlendirilir. Buna ek olarak, paslanmaz çelik gibi bu yöntemle kaplanması zor olan metallerin yüzeylerinin çeşitli işlemlerle modifiye edilerek kaplanma işlemi gerçekleşir.

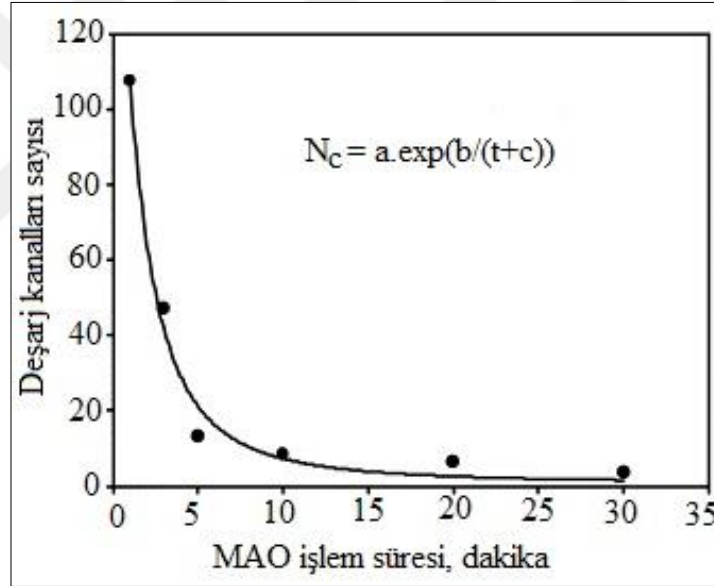
MAO teknolojisiyle oluşturulan seramik kaplamalar, Al parçaların sertleştirilmesi için motor imalatı, hidrolik sistemler, tekstil sanayisi ve benzeri birçok alanda kullanılmaktadır. MAO yöntemiyle işlenmiş Al alaşımından yapılan parçalar, ısıl işlem görmüş çelik parçaların, yüksek mukavemetli dökme demirin, sert metallerin, seramiklerin, sert krom kaplamalı ve sertleştirilmiş parçaların, sert anotlanmış parçaların ve gaz-termal spreyleme yöntemiyle yapılan parçaların yerine geçebilmektedir. MAO işlemi, özellikle otomotiv, uzay, spor ve askeri gibi çeşitli endüstrilerde özel uygulamalarda kullanılmasıyla benzersiz avantajlara sahiptir. MAO kaplamaları, sert seramik kaplamalar gerektiren durumlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, mükemmel dielektrik özellikleriyle elektriksel yalıtkanlara uygun olan ısıya dayanıklı MAO kaplamaları, füzelerin ve uzay mekiklerinin koruyucu kaplamalarının üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Diğer bir taraftan, MAO teknolojisi çeşitli alaşımların kaplanması sonucu ortaya çıkan farklı renklere bağlı olarak mimari alanlarda da uygulama yerleri bulunmaktadır (Şimşek, 2014).

1.4. Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu

MAO işlem sürecinde ilk aşamasında, yüksek voltaj etkisiyle dielektrik stabilite kaybeder ve sonucunda deşarj kanalları oluşur. Deşarj kanallarında sıcaklık 10^4 K seviyesine kadar yükselebilir ve bu bölgelerdeki yoğun elektrik alan nedeniyle elektrolit içinden gelen

iyonlar kanala giriş yapar. Yüksek sıcaklık, deşarj kanalları içindeki alüminyumun oksitlenmesine yol açar ve elektrolit içinden gelen iyonlar oksit yapısının içine girerek oksit yapısını değiştirir. Daha sonra, daha soğuk elektrotla temas eden oksit katılaşır ve bu süreç devam ederek kaplama kalınlığı artar (Özkara, 2009).

Deşarj kanallarının kaplama karakteristiğini belirleyen en önemli faktör olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. MAO işlem süresine göre oluşan deşarj kanallarının sayısı Şekil 1.8’de verilmiştir. Artan kaplama süresiyle deşarj kanallarının yoğunluğu artmaktadır. Katılan yapının çapı ve kalınlığı (kanal çapı düzeni), kaplama süresinin artması ile artar. MAO işlemi, kaplama pürüzlülüğündeki lineer artışlarla doğrudan ilişkili olan deşarj kanalının çapı ve kaplama süresindeki artışın yoğunluk azalmasıyla dengelediği bir süreç olarak lineer bir ilerleme sergilemektedir (Sundararajan ve Rama Krishna, 2003).



Şekil 1.8. Mikro ark oksidasyon işlem süresine göre oluşan deşarj kanallarının sayısı (Sundararajan ve Rama Krishna, 2003)

Alüminanın hızlı katılaşması yarı kararlı γ - Al_2O_3 fazı oluşumuna sebep olmaktadır. MAO kaplamanın yüzeyi, her zaman elektrolitle temasta olduğundan, hızlı soğuma gerçekleşir ve dış yüzey katmanları γ - Al_2O_3 içermektedir. Ancak alüminanın düşük ısı iletim özelliği nedeniyle, kaplamaların temel katmanı (deşarj kanallarında oluşan ve kolayca atılamayan ısı nedeniyle) yeterince yüksek sıcaklıkta kalır ve bu sıcaklık, γ - Al_2O_3 'ten α - Al_2O_3 'e dönüşümü başlatır. Sonuç olarak, beklenen α - Al_2O_3 oranı kaplama-altlık ara

yüzeyine kadar artarak devam eder. α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 'ten sert olduğu için, ara yüzeye yakın pik sertliğin nedeni olarak bu bölgelerdeki artan α - Al_2O_3 fazından kaynaklanmaktadır (Xin vd., 2006).

1.5. Sürtünme ve Aşınma

Sürtünme, iki yüzey arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan hareketi veya hareket etme potansiyelini zorlaştıran bir kuvvettir. Bir cismin başka bir cisme veya ortama temas ettiğinde ortaya çıkar. Sürtünme kuvveti, cisimlerin yüzeylerinin türüne, temas kuvvetine ve yüzeyler arasındaki basınca bağlı olarak değişir. Genellikle, yüzeylerin pürüzlülüğü arttıkça sürtünme kuvveti de artar. Sürtünme kuvveti hareket yönünün tersine çalışır ve hareket etme eğilimini azaltır. Sürtünme katsayısı, yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen bir terimdir. Yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, normal kuvvet (yüzeylere dik olan kuvvet) ve sürtünme katsayısına bağlıdır.

Sürtünme, yüzeylerin birbirine göre hareket ettiği durumlarda yağlayıcı madde bulunup bulunmamasına bağlı olarak kuru sürtünme ve sıvı sürtünme olarak iki farklı şekilde ortaya çıkar. Kuru sürtünme, iki katı yüzeyin doğrudan temas ettiği durumlarda ortaya çıkan sürtünme türüdür. Bu tür sürtünme, yüzeylerin arasında herhangi bir sıvı veya yağlayıcı madde olmadığında meydana gelir. Kuru sürtünme katsayısı, iki kuru yüzeyin arasındaki sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen bir parametredir. Bu katsayı, normal kuvvet ve sürtünme kuvveti arasındaki oran olarak ifade edilir. Malzeme ve yüzey özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Pürüzlülük, malzeme cinsi, sıcaklık gibi faktörler kuru sürtünme katsayısını etkiler. Pürüzlü yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı, genellikle düz yüzeylere göre daha yüksek olabilir. Sıvı sürtünme, bir cismin bir sıvı ortamında hareket ettiği durumlarda ortaya çıkan sürtünme türüdür. Sıvı sürtünmesi, cismin sıvı içerisinde ilerlerken sıvının direncine karşı çalışan bir kuvvet olarak tanımlanabilir. Sıvının viskozitesine (akıcılığına) bağlı olarak sıvı sürtünme katsayısı değişir. Viskozite, sıvının iç sürtünme direncini ölçer ve bir sıvının akışkanlığını tanımlar. Daha yüksek viskoziteli sıvılar, daha yoğun ve akışı zor olan sıvıdır. Sıvı sürtünmesi, hareket eden cisimle sıvı arasındaki hız farklılıklarına bağlıdır. Bu durum, hareket eden cismin hızının artmasıyla birlikte sürtünme kuvvetinin de artmasına neden olur. Sıvı sürtünmesi, hareket eden cismin hızına karşı zıt yönde etki eder ve hızını azaltır. Sıvı sürtünme katsayısı ise sıvı ve cisim

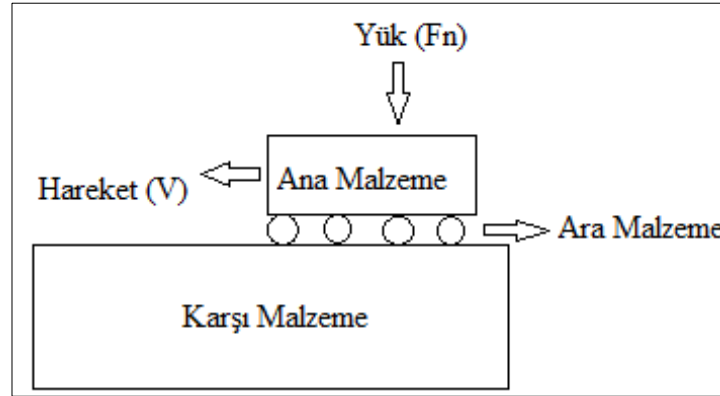
arasındaki sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen parametredir. Bu katsayı, sıvının özelliklerine, cismin şekline ve boyutuna, yüzey pürüzlülüğüne ve hızına bağlı olarak değişir. Sıvı sürtünme katsayısını belirlemek için deneysel çalışmalar veya teorik modeller kullanılır (Ceviz, 2021).

Aşınma, tribolojik sistemlerde bir yüzeyin başka bir yüzeye temas etmesi sonucu ortaya çıkan ve talaşlar tarafından neden olan zarar olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, dış etkenlere maruz kalan temas yüzeyinde meydana gelen fiziksel değişimlerin adıdır. Aşınma, bileşenlerin bozulmasına ve zarar görmesine neden olabilirken aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün ve toleransların kaybolmasına da yol açabilir (Gökşahin, 2007).

Malzeme yüzeyinde oluşan hasarların aşınma olarak tanımlanabilmesi için aşağıdaki şartların gerçekleşmesi gerekmektedir (Ceviz, 2021):

- Mekanik, fiziksel veya kimyasal etkileşim
- Sürtünme
- Sürekli
- Malzeme yüzeyinde hasar/ bozunma
- İstemsiz olarak

Aşınma çifti, aşınma olayının meydana geldiği durumlarda, aşınan ve aşındırılan malzemeler arasında bulunan ana cisim ve karşıt cisimden oluşur. Bu malzemeler, belirli bir ara cisim bulunarak az ya da çok yük altında hareket ettirildiklerinde aşınma gerçekleşir. Ara malzeme, sert taneli, sıvı veya gaz halinde olabilir ve ayrıca aşınma sırasında malzemelerden kopan parçacıklar da aktif bir şekilde aşınma olayına dâhil olabilir. Aşınma olayını oluşturan unsurlar Şekil 1.9’da verilmiştir (Şimşek, 2014; Demirbaş, 2019).



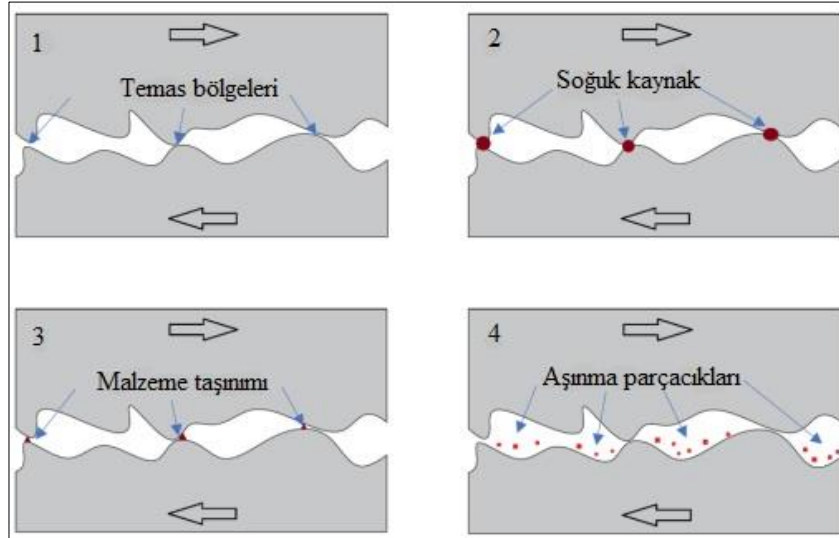
Şekil 1.9. Aşınma olayını meydana getiren unsurlar

1.5.1. Aşınma Türleri

Aşınmanın ortaya çıkmasına neden olan faktörlerin farklı durumları, değişik aşınma tiplerinin oluşumuna neden olur. Aşınma, malzemenin özellikleri, kullanılan yağlayıcı türü, sıcaklık, yük, malzemenin işleme yöntemi ve sertlik gibi parametrelerin değişmesiyle etkilenmektedir (Özcan, 2014).

1.5.1.1. Adhezif Aşınma

Karşılaşılan ve birbirine uzak olmayan malzemelerin yüzeyleri ile güçlü bir kaynama bağı yer almaktadır. Yüzeyde oluşan pürüz tepeleri, özellikle yüksek dış kuvvet etkisi altında malzemenin akma gerilmesini aşarak plastik deformasyona uğramaktadır. Bu zorlama altında, yüzeyde oluşan sıvı veya gaz molekülleri ile oksit tabakaları parçalanır. İlgili yüzeyler birbirine göre hareket ettiğinde, bu bağlar kırılarak malzeme kaybı meydana gelir. Adhezif aşınma, aynı veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında kolaylıkla ortaya çıkar. Bu nedenle, malzeme çiftlerinden biri sert diğeri ise yumuşak olarak seçilmektedir (Başoğul, 2014; Özcan, 2014). Şekil 1.10'da adhezif aşınma olayı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.10. Adhezif aşınması şematik gösterimi (Çakır, 2033)

Adhezif aşınmasını önlemek veya azaltmak amacıyla bazı yöntemler uygulanabilir.

- Seçilen malzemelerin birbirleri ile kolay etkileşim oluşturmayan olması ve malzeme çiftinin birbirinin yumuşak diğerinin sert malzeme olmasına dikkat edilmesi aşınma etkisini azaltmaktadır.
- Metal- metal yüzeylerinde kaplama yapılması aşınmaya engel olmaktadır.
- Birbiri içerisinde çözünmeyen iki metal kullanılması aşınma etkisini geciktirmektedir.
- Sistemde yağlayıcı kullanılması sürtünmeyi düşürmektedir, ısıyı uzaklaştırmakta ve böylece mikro kaynak bölgeleri önlenerek aşınma hızını düşürmektedir.
- Temas eden yüzeylerin pürüzlülükleri düşürülmesi durumunda aşınma azalmaktadır (Başoğul, 2014; Çakır, 2023).

1.5.1.2. Abrazif Aşınma

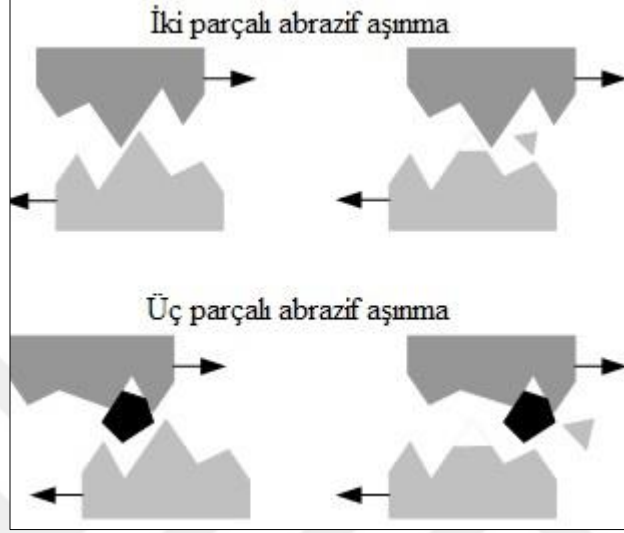
Abrazif aşınma, sürtünme etkisiyle sert yüzeylerin daha yumuşak malzemeleri kesmesi sonucu ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Sisteme dışarıdan giren sert parçacıklar veya içeride oluşan yapışkan aşınma ürünleri tarafından meydana gelir. Bu durumda, sert yüzey pürüzleri kesici takım gibi işlev görerek daha yumuşak malzemedan parçalar koparır. Aşınma nedeniyle ayrılan parçacıklar, yabancı maddeler gibi davranır ve aktif bir şekilde sürecin içine katılır. Şekil 1.11’de abrazif aşınmanın şematik gösterimi bulunmaktadır (Özcan, 2014).



Şekil 1.11. Abrazif aşınma mekanizması (Çakır, 2023)

Abrazif aşınmanın temel faktörleri, sertlik, aşındırıcı malzemenin özellikleri, tane veya pürüzün boyutu ve şekli, uygulanan normal yük ve kayma hızı gibi unsurlardır. Şekil

1.12’de abrasif aşınma mekanizması verilmiştir. Sürtünen yüzeyler arasında, sert ve pürüzlü olanın veya bir yüzeye gömülmüş sert parçacıkların diğer yüzeyi kazınmasıyla iki elemanlı abrasif aşınma olarak isimlendirilir.



Şekil 1.12. Abrasif aşınma türleri şematik gösterimi (Çakır, 2023)

Abrasif aşınma dayanımı, sertlikle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle, abrasif aşınma dayanımını artırmak için en etkili ve ekonomik yöntem, uygun yüzey sertleştirme tekniklerinin kullanılmasıdır.

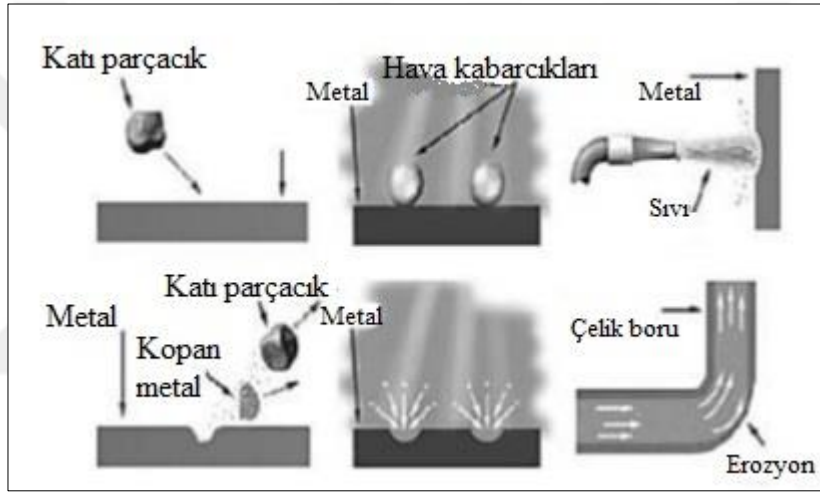
Abrasif aşınmasını önlemek veya azaltmak amacıyla bazı yöntemler uygulanabilir.

- Seçilen malzeme yüzeyleri ısıtılarak veya sert malzeme kaplama ile sertleştirilmelidir.
- Hava, su ve yağlar gibi kullanılan partiküller en aza edilerek yüzeyler arasında girmesini önlemek için sistemden uzaklaştırılmalıdır.
- Makineler ve sistemler oluşan pisliklerden sürekli olarak temizlenmelidir.
- Aşınan parçaların tasarımları değiştirilmesi kolay yapılmalıdır (Özcan, 2014).

1.5.1.3. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, abrasif aşınma ile birçok benzerlik taşır. Bununla birlikte, eroziyon aşınmanın en belirgin farkı, sert partiküllerin yüzeyi kazınması yerine yüzeye çarpması

sonucunda meydana gelmesidir. Örnek olarak, gaz türbinlerinin yanma ürünleri içerisindeki katı parçacıkların nozul ve kanatçıkları tarafından aşındırılması verilebilir. Sert partiküllerin birbirine göre paralel hareket ettiği durumlarda aşınma, abrazyon olarak isimlendirilir. Sert partiküllerin yüzeye dik hareket ettiği durumlarda, aşınma çarpma erozyonu olarak adlandırılır. Eroziyonun aşınmayı etkileyen temel faktörler, aşındırıcı partikülün özellikleri (boyut, şekli, sertlik), aşınmaya maruz kalan elemanın özellikleri (sertlik ve yüzey kalitesi) ve ortamın özellikleri (partikülün çarpma veya sürünme hızı, çarpma açısı ve birim zamanda çarpan partikül miktarı) olarak üç ana grup altında incelenebilir (Özcan, 2014). Şekil 1.13'te eroziyonun aşınma şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.13. Eroziyonun aşınma şematik olarak verilmiştir (Özcan, 2014)

1.5.1.4. Yorulma Aşınması

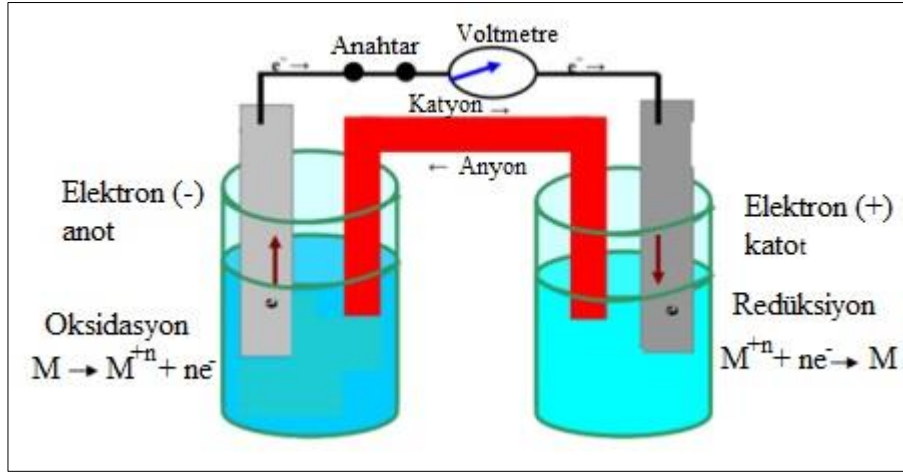
Bu tür aşınma, farklı yüklemelerin etkisi altında meydana gelir ve genellikle bir dizi yüklenme periyodundan sonra gerçekleşir. Malzeme yüzeyinin titreşimli değişken zorlamaya maruz kaldığı durumlarda, yüzey bölgesinin hemen altında mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar yüzeye doğru ilerlediğinde, yüzeyde pulcuk kalkması meydana gelir ve büyük parçaların kopmasıyla çukur ve oluklar oluşur. Bu tür aşınma genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde gözlemlenir (Özcan, 2014).

1.6. Korozyon

Malzemeler doğal çevre şartları veya kimyasal etkileşimler sonucunda zamanla aşınma, erozyon gibi değişimlere uğramaktadır (Bayram, 2022). Metal ve metal alaşımlarının ortamda kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda malzeme de deformasyon ya da fiziksel çözünme olayı korozyon olarak tanımlanabilir (Erge, 2021). Çoğu metaller normal koşullar altında da korozyona uğrayabilirler çünkü metaller suya ve atmosferik etkilere karşı dirençli değildir (Şüküroğlu vd., 2021). Kullanılan malzemenin özellikleri, kimyasal koşulları, sistemdeki stres ve ortamın pH değeri korozyon oluşumundaki parametreleri etkiler. Reaksiyon ortamına göre kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki bölüme ayrılır. Gaz ortamında oluşan korozyona kimyasal korozyon, su ortamında oluşan korozyona ise elektrokimyasal korozyon denilmektedir (Obuz, 2022).

Elektrokimyasal korozyon, özel bir eriyiğe ihtiyaç duyulmadan sürekli olarak meydana gelir. Elektrokimyasal korozyon hücresinde, anot, katot, iletken ve elektrot bulunmaktadır. Metal iyonlarının çözeltilere geçerken ortaya çıkan elektronlar, iletken aracılığıyla anottan katoda taşınır. Elektronlarını veren metal, anot bölgesinde çözünür ve yükseltgenirken, katot bölgesinde elektronlar alınır ve indirgenme gerçekleşir. Anodik reaksiyon, metalin pozitif yüklü iyon haline gelmesine ve oksidasyonun meydana gelmesine neden olur. Korozyon, anodik ve katodik reaksiyonların bir kombinasyonundan oluşur (Bayram, 2022).

Seramikler ve polimerler, kuvvetli atomsal bağlara sahip ve serbest elektron olmayan bileşiklere sahip olduklarından elektrokimyasal korozyondan etkilenmezler. Ancak metallerde ise, havanın nem ve oksijeniyle gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda malzeme yüzeyinde metal oksit tabakası oluşur. Oluşan oksit tabakası normal şartlarda katı haldedir ve oksit tabakasının yoğunluğu, ana metalden (örneğin Al, Cr, Ni gibi metaller) daha yüksek olduğunda ana metalin hava ile teması azalır. Okist tabakasının kalınlığı arttıkça korozyon hızı yavaşlar. Bununla birlikte, Fe, Mg gibi bazı metallerde oluşan oksit tabakası, ana metale göre daha boşluklu olduğundan korozyon lineer bir hızla devam eder (Özer, 2021). Günümüzde korozyon ekonomi ve güvenlik açısından önemli olduğu için mühendisler, tanklarda, makinelerin metal bileşenlerinde, gemilerde, köprülerde vb. korozyon sonucu oluşan metal kaybını azaltmaya çalışılmaktadır.



Şekil 1.14. Elektrokimyasal korozyon hücresi (Taşkent, 2021)

1.6.1. Korozyon Türleri

1.6.1.1. Üniform Korozyon

Metal yüzeyinin bütün noktalarında benzer hızla ilerleyen ve en yaygın korozyon türüdür. Anodik ve katodik çevrelerinin sürekli yer değiştirmesi oluşan korozyonun eşit dağılımına neden olmaktadır. Diğer korozyon türlerine oranla üniform korozyonun sebep olduğu metal kaybı daha yüksektir. Üniform korozyon, çeşitli koruma yöntemleri ile kolayca kontrol edilebilir (Altun, 2004).

1.6.1.2. Galvanik Korozyon

İki metal (alaşım) iletken bir ortamda elektriksel olarak bağlandığında oluşan potansiyel farkı elektron akışı üretir ve bu durum sonucunda diğerinden daha negatif potansiyele sahip metalin korozyona uğramasına sebep olur. Pozitif olan metal katot görevi görür ve anot haline gelen negatif metal tarafından korunur. Metaller arasındaki potansiyel fark korozyonun itici gücü olduğundan, bu tür korozyon şekline galvanik korozyon denir (Altun, 2004).

1.6.1.3. Çukurcuk Korozyon

Metal yzeyinde çukurcuklar oluşturarak lokal bozunmalara neden olan en tehlikeli korozyon türü çukurcuk korozyonudur. Yüzey çapına göre oluşan deliklerin boyutunda metale nüfuz ederek metal kaybına yol açabilirler (Popov, 2015).

1.6.1.4. Aralık Korozyon

Aralık korozyon meydana gelmesi için saldırgan ortamın aralıktan geçmesi ve korozyon ürünlerini aralık içinde tutacak kadar dar olması gerekmektedir. Bu korozyon türü daha çok, kondansatörlerde, metal yüzeyler ile valfler arasında, cıvata conta perçinleri veya yüzey birikintileri altında oluşan yarıklarda görülmektedir (Durna, 2022).

1.6.1.5. Taneler Arası Korozyon

Malzemenin tane sınırları çevresinde korozyon olayının fazlalaşması sonucu ortaya çıktığı korozyon çeşitidir. Taneler arası korozyonda, ağırlık kaybı genellikle küçük olmasına rağmen, korozyon hızı tane sınırları yakınında çok yüksek değerlere ulaşabilir. Taneler bütünlük ve Őekillerini korurlarken, taneler arası bağ bozunmaya başlamaktadır. Metal içerisinde farklı potansiyele sahip bölgeler oluşur ve korozyon, tane sınırları yoluyla metale nüfuz edebilir. Bu korozyon türüne taneler arası korozyon denilmektedir (Altun, 2004).

1.6.1.6. Gerilmeli Korozyon

Aktif metaller veya alaşımlar üzerinde eř zamanlı çekme gerilimi ve korozif ortamlar nedeniyle çatlak büyümesi olayına gerilmeli korozyon denilmektedir. Bu korozyon türünün oluşabilmesi için metalin klorür iyonları, su, oksijen, ph vb. gibi korozif bir ortamda olması gerekir (Popov, 2015).

1.6.1.7. Erozyonlu Korozyon

Erozyonlu korozyon, yüksek akış hızına sahip aşındırıcı bir sıvı metal yüzeyine çarpması sonucunda oluşmaktadır. Aşındırıcı sıvının hızlı hareketi, koruyucu film tabakasını aşındırır ve korozyonu hızlandırır (Durna, 2022).

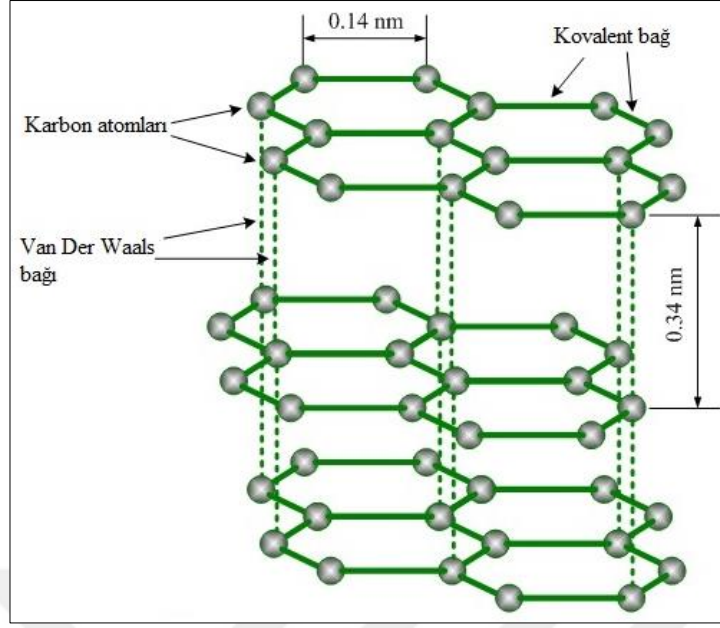
1.6.1.8. Hidrojen Bozunması

Malzeme içerisinde hidrojen bulunması sonucunda, malzemede istenmeyen bir kırılabilirliğe neden olan bozunma olayı olarak adlandırılır. Metalik malzemelere hidrojen nüfuz edebilirse, bu metaller hidrojen bozunmasına uğrayabilirler (Durna, 2022).

1.7. Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Kullanılan Katkı Maddeleri

1.7.1. Grafit

Grafit bir karbon allotropu olup ve düzlemler arası mesafe oranının 2,403 olduğu açık hegzagonal bir kristal yapıya sahiptir. Yoğunluğu yaklaşık 2 g/cm^3 olan grafit, yağsı dokunumlu, yumuşak ve ince levhalar halinde bükülme özelliğine sahip bir yapıdadır. Erime derecesi $3927 \text{ }^\circ\text{C}$ olup, oksijenli ortamda $600\text{-}670 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de yanma sıcaklığına sahiptir. Erime sıcaklığına ulaştığında sıvı haline değil direk olarak gaz haline dönüşür. Normal sıcaklıklarında ise karalı ve kimyasal bozunmaya dayanıklılık göstermektedir. Kimyasal reaksiyonlara karşı duyarsız olup asit, baz ve tuzlara karşı dayanıklıdır. Grafit iki boyutlu bir düzlemde karbon atomlarının düzgün altıgen şeklinde üst üste katman oluşturarak bağlanması ile meydana gelmektedir (Cuhadaroğlu ve Kara, 2018). Şekil 1.15'de grafitin kristal yapısı görülmektedir.



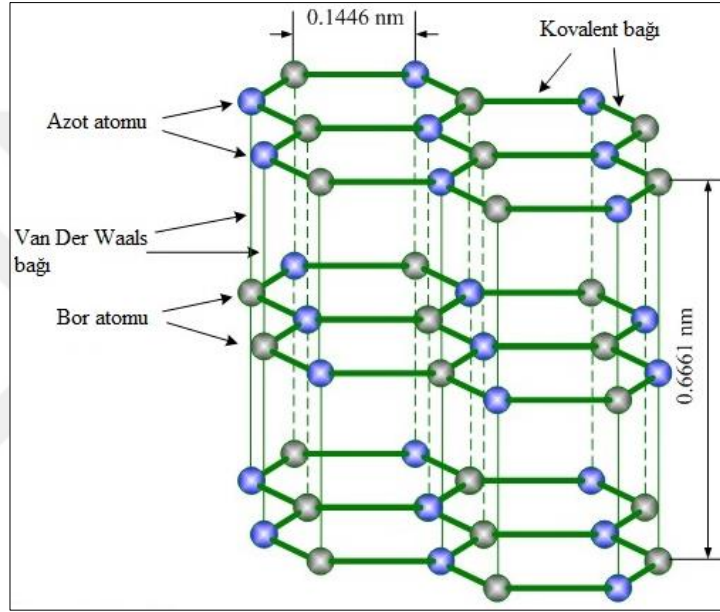
Şekil 1.15. Grafitin kristal yapısı (Kopeliovich, 2021)

Grafit karbon atomlarının meydana getirdiği düzlemler arasında güçlü kovalent bağlarla bağlıdır. Katmanlar arasında ise zayıf Van der Waals kuvvetleri etkilidir. Grafitte aynı zamanda Sigma (σ) ve Pi (π) bağları olmak üzere iki tip bağa sahiptir. Bu nedenle grafit ise çok iyi bir yağlayıcı maddedir (Uysal, 2019). Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından anizotropik yapıya sahiptir. Bazal düzlemde kayma deformasyonuna karşı direnci diğer yönlere göre yüksek değildir. Bu tabakalar yüklerle karşılaştığında yağlayıcı özelliğini arttırmakta ve kırılmaktadırlar. Yüksek sıcaklık uygulamaları ve nemli ortamlar için iyi yağlayıcı özelliğine sahip olan grafit, yüksek vakum uygulamalarında veya soygaz atmosferinde bu özelliğe sahip değildir. Oksijen ve su buharının varlığına bağlı olarak grafitte düşük sürtünme ve aşınmanın olduğu ortaya çıkmıştır. Grafitin katı yağlayıcı özelliğini, kristal köşeleri üzerine adsorbe olan gazlarla ve su buharı ile güçlü kimyasal bağlar oluşturabilmesi arttırmaktadır (Ünlüoğlu ve Çelik, 2012).

1.7.2. Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN)

Bor nitrür (BN), ısı şok direnci, ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, kimyasal kararlılık ve yağlayıcılık gibi özellikleri yüksek olan sentetik bir malzemedir (Angın ve Aydın, 2003). Bor nitrür hegzagonal (h-BN), würstitik (w-BN) ve kübik (c-BN) gibi üç

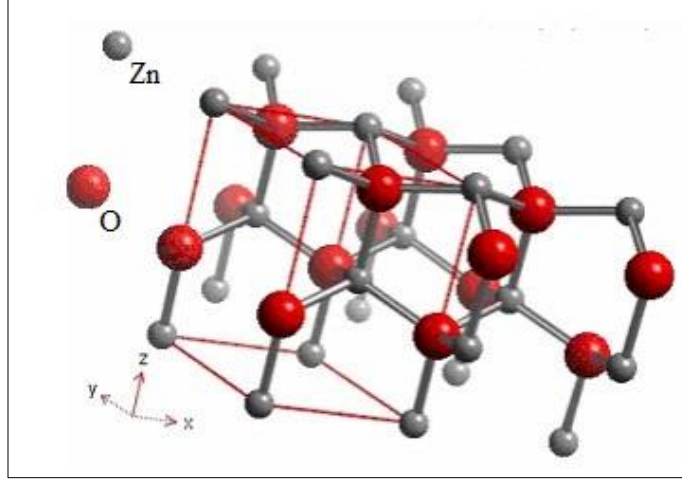
kristal formu mevcuttur. Kristal yapısı bor nitrürün karbona benzemektedir. h-BN benzerlik olarak grafitte, kübik bor nitrür elmasa, wüstitik bor nitrür ise kristal yapısı olarak karbonun içi boş bir küreyi andıran yapısına benzemektedir. h-BN bu nedenle genellikle beyaz grafit veya beyaz karbon olarak da adlandırılır (Aydın, 2018). h-BN, bor ve azotun bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. h-BN, basınç ve sıcaklık etkisiyle kübik bor nitrüre dönüştüğünde, elmasın tipik özelliklerine sahip olabilmektedir. h-BN kristal yapısı Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16. h-BN kristal yapısı (Kopeliovich, 2021)

1.7.3. Çinko Oksit (ZnO)

Çinko oksit (ZnO), çinko bileşenlerinin en önemlisidir ve genel olarak çinko buharının yanmasıyla elde edilmektedir. ZnO suda çözünmez, asit ve alkalilerde çözünür ve çinko beyazı olarak da bilinmektedir. ZnO yarı iletken özellikte olup, kristal yapısında her bir çinko atomunun etrafını dört tane oksijen atomunun sarması ile meydana gelen tetrahedral yapısına sahiptir. Bu yapıyı oluşturan bağlar kovalent bağlarıdır. ZnO'nun iki ana formda wurtzite ve zinc-blende halinde kristalleşir. Wurtzite fazı normal şartlar altında dayanaklı olan fazıdır. Zinc-blende ise kübik yapıların büyümesi ile dayanaklı hale gelmektedir.



Şekil 1.17. ZnO kristal yapısı (Konak Tuncel, 2007)

Oda sıcaklığında saf ZnO beyaz renktedir. Fakat ısıtıldığında sarı rengi almaktadır. Farklı sıcaklıklarda ısıtılırsa eğer sarı, yeşil, kahverengi ve kırmızı olmak üzere başka renkleri de alabilir. Bu renk farklılıklarının nedeni kristal yapıdaki % 0,02-0,03 oranındaki boşluklar sonucu oluşmaktadır (Yang vd., 2004; Konak Tuncel, 2007; Akın, 2011; Moezzi vd., 2012).

1.8. Literatür Çalışması

MAO yöntemiyle kaplama işlemi yapılan valf metalleri ve alaşımları üzerine literatürde çalışmalar mevcuttur. Kullanılan malzemelerin özelliklerini daha iyi geliştirmek amacıyla elektrolit çözeltisi içerisine katkı maddeleri ilave edilerek MAO yöntemiyle kaplama işlemleri çalışmaları da yapılmaktadır. MAO yöntemiyle kaplama yapılmış çalışmaları kapsayan literatür özeti sırayla verilmiştir.

Shi-Gang ve diğerleri (2005), MAO yöntemiyle 2024 Al alaşımının 10 g/l NaAlO₂ ve 2 g/l KOH çözeltisinde kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oluşan kaplamanın XRD sonuçlarında α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazı yer aldığını belirlemiştir. Kaplama, kompakt bir iç katman ve gözenekli bir dış katmandan oluştuğunu ve gözenekliliği %7-10 olduğunu açıklamışlardır. Kaplamanın yoğunluğu 3,47g/cm³, en yüksek sertliği 22 GPa, elastik modülü 279 GPa ve termal genleşme katsayısı 7,38x10⁻⁶ K⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Alüminyum oksit kaplamanın alt tabakaya iyi bir termal şok direncine ve yapışma gücüne sahip olduğunu açıklamışlardır.

Shchedrina ve diğeri (2014), 2024 Al alaşımının MAO işlemi sırasında oksit tabakası oluşumu, bir alkalın-silikat elektrolit içinde sabit AC akım yoğunluğu koşulu altında araştırmışlardır. Mikro deşarjlarda salınan enerjideki artış nedeniyle kaplama oluşum hızı artmıştır. %35 yüksek sıcaklıklı alümina fazlarında, korozyona dayanıklı sert bir çalışma tabakasının oluşumu, hem kaplamanın hem de bitişik metalik alt tabaka tabakasının güçlü bir Şekilde ısıtılmasından kaynaklanmıştır. Kaplamanın gözenekliliği ne kadar azsa, katman arayüzünün ısınması o kadar fazla olmuştur. Numune boyutlarındaki kalınlık gözeneklerde mikro ark deşarjı gerçekleştikten sonra metalik tabanın oksidasyonu ve yüksek sıcaklıkta alümina faz oluşumu ile en az olduğu tespit etmişlerdir.

Tian ve diğeri (2002), 2024 Al alaşımlarının MAO yöntemiyle kaplamaların faz bileşimi, X ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve X ışını fotoelektron spektroskopisi kullanılarak incelemişlerdir. Kaplamaların aşınma direnci davranışı bir çizik test cihazı, pistonlu test cihazı ve Timken test cihazı ile belirlenmiştir. Sonuçlar, Al alaşımları üzerindeki mikro ark oksitlenmiş kaplamaların iki farklı bölge gösterdiğini, yani ağırlıklı olarak daha yüksek soğutma hızında üretilen γ -Al₂O₃'ten oluşan gözenekli bir st tabaka bölgesi ve ağırlıklı olarak α -Al₂O₃'ten oluşan yoğun bir i bölge olduğu gözlenmiştir. Aşınma test cihazında cilalı kaplamanın aşınma nleme ömrü 2500 m, 1,25 m/s hıza ve 300 N yüke ulaştı ve elik halkaya karşı sürtünme katsayısı 0,45'ten fazla bulunmuştur. Bu nedenle, α -Al₂O₃'ten oluşan mikro ark oksidasyon kaplaması, aşınma direnci açısından Al alaşımı bileşenlerin koruyucu bir kaplaması olarak olumlu sonuçlandırmışlardır.

Yapılan bir çalışmada, 5754 kalite bir Al alaşımının sert anodik oksidasyon ve MAO yöntemi ile tribolojik performansları karşılaştırılmasını amaçlamışlardır. Kaplamaların yapısal analizleri XRD ve SEM teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Sert anotlanmış ve mikro ark oksitlenmiş numunelerin tribolojik performansları, kuru kayma koşulları altında ileri geri hareket eden bir aşınma test cihazında karşılaştırılmıştır. MAO yöntemiyle, işlenmiş 5754 Al alaşımı üzerinde sert ve kristalimsi alümina tabakası oluşurken, sert anotlama ile nispeten yumuşak ve amorf tabaka oluştuğu gözlenmiştir. Kuru kayma koşullarında MAO kaplama, daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı açısından sert anodik oksidasyon kaplamadan daha üstün tribolojik performans sergilediği belirtilmiştir (Ovundur vd., 2015).

Godja ve diğeri (2010) yaptıkları bir çalışmada, farklı Al alaşımlarının numuneleri, silikat ve fosfat zeltelerinde MAO işlemiyle kaplamaların faz bileşimi, mikro sertlik, korozyon ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Altlık malzemenin ve seramik

kaplamaların tipik aşınmış yüzeyleri, bir taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlenmiştir. Aynı aşınma koşulları uygulandığında, kaplamaların farklı derinliklerdeki aşınma oranları hemen hemen benzer bulunmuştur. Bununla birlikte, kaplamaların belirli bir derinliğinde, aşınma hızının, aşınma süresi ile kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir. Sürtünme işlemi sırasında kaplamaların tribo-temas alanında oksitlerden oluşan kararlı bir transfer tabakası oluşmuştur. Sabit bir sürtünme durumunda sürtünme katsayısı $0,8 \mu$ olduğu bulunmuştur.

Yapılan başka bir çalışmada, MAO yöntemiyle TiAl alaşımının silikat elektrolit çözeltisi hazırlanarak kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kaplanan numuneleri faz bileşimi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), korozyon ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yoğun kaplama tabakasının esas olarak Al_2TiO_5 ve TiO_2 rutil fazlarından oluştuğunu, gevşek tabakanın ise Al_2TiO_5 ve TiO_2 rutil fazlarının yanı sıra büyük miktarda amorf SiO_2 içerdiğini göstermiştir. Kaplamadaki maksimum mikrosertlik değeri, TiAl substratından yaklaşık üç kat daha yüksek bulunmuştur. Kaplamanın aşınma oranı, TiAl substratın sadece 1/10'u kadar olduğu tespit edilmiştir. Kaplanmış TiAl alaşımının korozyon akımı yoğunluğu büyük ölçüde azaltılmıştır. MAO'nu, TiAl alaşımının aşınma direncini ve korozyon direncini geliştirdiğini belirlemişlerdir (Li vd., 2008).

Li ve diğerleri (2017), farklı elektrolitler kullanılarak titanyum (Ti) alaşımı üzerindeki mikro ark oksidasyon kaplamalarının büyüme mekanizması ve özellikleri arasındaki etkilerini incelemişlerdir. MAO kaplamalarının yapışma ve tribolojik özellikleri sırasıyla termal şok testleri ve disk üzerinde top sürtünme testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, MAO kaplamalarının büyüme mekanizmasının yanı sıra yapışma ve tribolojik özelliklerinin elektrolitlerden büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Silikat elektrolitte, MAO kaplamalarının büyümesine silikat oksitlerin birikmesi olmuştur ve çoğunlukla dışa doğru büyüme ile karakterize edildiği görünmüştür. Sonuç olarak, kaplamalar zayıf yapışma sergilemişler, ancak kaplamalarda silikat oksitlerin aşınma direncini geliştirmek için iyileştirdiği belirlenmiştir. Fosfat elektrolitte, kaplama büyümesi esas olarak alt tabakanın oksidasyonundan kaynaklanmış ve daha çok içe doğru büyüme ile karakterize edilmiştir, bu da yüksek yapışma özelliğine ancak düşük aşınma direncine yol açtığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, karışık silikat ve fosfat elektrolitinin kullanılması, nispeten hem yüksek yapışma hem de iyileştirilmiş aşınma direnci elde etmek için uygun olduğu sonuçlanmıştır.

Zhang ve Yu (2020), 7N01 Al alaşımının yüzeyinde MAO yöntemiyle seramik kaplamalar hazırlamışlardır. Elektrolitteki $NaAlO_2$ yoğunlaşmasının MAO kaplamalarının kalınlığı, pürüzlülüğü ve bağlanma mukavemeti üzerindeki etkileri incelemişlerdir. MAO

kaplamalarının morfolojisi, element dağılımı ve faz bileşimi SEM, EDS, XRD, aşınma ve korozyon davranışları üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, NaAlO_2 yoğunlaşmasının artmasıyla kaplama kalınlığının kademeli olarak arttığını, pürüzlülüğün önce azaldığını ve sonra arttığını ve bağlanma mukavemetinin önce yükseldiğini sonra azaldığını göstermiştir. Kütle kaybı ve aşınma izi genişliğindeki keskin düşüş, kaplamanın iyi bir aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Aşınma mekanizması, abrazif aşınma ve adeziv aşınmanın bir karışımı olarak belirlenmiştir. Hem daldırma testi hem de potansiyostatik polarizasyon eğrisinin ölçüm sonuçları, kaplamanın iyi bir korozyon direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Cheng ve diğerleri (2018), Ti-45Al-8,5Nb alaşımının farklı sıcaklıklarda MAO yöntemiyle kaplama işlemi yapmışlardır. Yüksek sıcaklıkta oksidasyondan önce ve sonra yüzey ve enine kesit morfolojileri, kimyasal bileşim ve kaplamaların faz tanımlaması, taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron probu mikroanalizleri (EPMA) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, Ti-45Al-8,5Nb alaşımları üzerinde MAO ile 600 s'de yaklaşık 8 μm kalınlığında Al_2O_3 kaplamalarının elde edilebildiği bulunmuştur. Al_2O_3 kaplamalı numuneler daha iyi yüksek sıcaklık oksidasyon direnci sergilemiştir. 900 °C'de 100 saatlik oksidasyondan sonra 400 V biriktirme voltajı ve %3 görev döngüsü kullanılarak oluşturulan kaplamalar için sadece 0,396 g/m^2 'lik minimum bir ağırlık artışı gözlenmiştir. Bu sonuçların daha yüksek sıcaklık uygulamaları için iyi bir potansiyel olduğunu göstermişlerdir.

Qiu ve diğerleri (2015) yaptıkları bir çalışmada, 2A12 Al alaşımı üzerine MAO ile nano partikül takviyeli kompozit kaplamalar hazırlanmış ve nano partiküllerin kaplamanın aşınma performansına etkisi incelemişlerdir. Yüzey morfolojisi, sürtünme ve aşınma özelliği test edilmiştir. Nano partikül ilavesi yapılmayan kaplamaya kıyasla, kaplamalardaki gözeneklerin boyutunun ve miktarının, 20 nm nano- SiO_2 partikülleri, 80 nm nano- SiO_2 partikülleri ve 80 nm nano- TiO_2 partikülleri ile ilave edildikten azaldığını ve aşınma direncinin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir.

Yang ve diğerleri (2020), MAO yöntemiyle 420 ve 450V voltajlarında Ti6Al4V (TC4) alaşımının korozyon ve aşınma üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, metastabil anataz fazının oksidasyon süresi ve sıcaklık artışı ile kademeli olarak rutil faza dönüştüğü tespit edilmiştir. Kaplamanın yüzey morfolojisi, düzgün boyut dağılımına sahip çok sayıda mikro gözenek içermiştir. 450 V uygulanan voltaj ile MAO-TC4 numunesinde 10 μm 'nin üzerinde çatlaklar ve gözenekler bulunmuştur. MAO kaplamanın kalınlığı, voltaj ile pozitif

olarak ilişkilendirilmiştir. Korozyon direnci ve aşınma direnci, faz bileşimi, yüzeydeki mikro gözenek boyutu dağılımı ve film kalınlığı ile ilgili olduğu görünmüştür. Voltaj 420 V olduğunda, kaplama en küçük korozyon akımı yoğunluğunu ($0,960 \times 10^{-7}$ A/cm² ve en büyük direnci ($7,17 \times 10^5$ Ω• cm²) göstermiştir. Aynı yük koşulu altında kaplama, TC4 alt tabakasından daha büyük sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı sergilemiştir. Voltajın artmasıyla, kaplamanın 0,821 sürtünme katsayısı ile 450 V uygulanan voltajda olduğu belirlenmiştir.

Zhang ve diğerleri (2020)'nin yapmış oldukları bir çalışmada, 2024 Al alaşımı üzerine MAO yöntemiyle SiC, TiO₂, ZrO₂ ve CeO₂ nanoparçacıkları ile sodyum silikat bazlı elektrolitte hazırlanmışlardır. Oksit nanopartiküllerin gözenek parametreleri, özellikleri, EDS ve XRD analizleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Elektrolitlerde nanopartiküller ile hazırlanan mikro ark oksidasyon filmlerinin gözenekliliği bir miktar artmıştır. Farklı nanoparçacıkların eklenmesiyle film gözenekliliği %9,6'dan %21,6'ya, filmlerin yapıştırıcılara bağlanma mukavemeti 12,3 MPa'dan 22,8 MPa'ya ve film mikrosertliği 785,7 HV'den 564,2 HV'ye düşmüştür. Özellikle SiC nanoparçacıkları ile hazırlanan filmin mikrosertliği 1063,5 HV'ye kadar çıkmıştır. Tüm nanoparçacıkların elektrolitlere eklenmesi, filmlerin termal çatlama direncini etkilememiştir. EIS ölçümleri, NaCl çözeltisine 1440 saat daldırıldıktan sonra, elektrolit içinde nanopartiküller ile hazırlanan mikro ark oksidasyon filmlerinin direncinin orijinal filmde çok daha yüksek olduğunu ve film kapasitesinin yavaş yavaş arttığını göstermiştir. Nanopartiküller arasında korozyon direncini artırmada en iyi etkiyi TiO₂ ve CeO₂ göstermiştir. Ağırlık kaybı testi sonuçları, TiO₂ ve CeO₂ nanoparçacıkları ile hazırlanan filmlerin korozyon hızının 8640 saat daldırmadan sonra orijinal filmin yaklaşık üçte biri kadar olduğunu göstermiştir. Mikro ark oksidasyon filmlerinin iyi korozyon direnci, esas olarak iç kompakt tabakanın iyi koruma özelliğine bağlı olduğunu bulmuşlardır.

D. Zhang ve diğerleri (2018), Mg alaşımının aşınma direncini arttırmak için 2, 3 ve 4 A akımlar altında silikat elektrolit içerisinde MAO yöntemiyle kaplama işlemi yapmışlardır. Elde edilen kaplamanın yüzey pürüzlülüğü ve kalınlığı akımın artmasıyla arttığı bulunmuştur. Kuru tribolojik testler, daha kalın kaplamaların sürtünme katsayısının ve aşınma direncinin 3 A ve 4 A akımları altında elde edilen Mg alaşımından ve 2 A akımının da oluşan ince kaplamanınkinden çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İnce MAO kaplamanın aşınma türü, düşük yük altında hafif abrazif aşınma, yüksek yük altında ciddi adhezif aşınmasına görünmüştür. Tribolojik çalışma, 4 A akım altında elde edilen MAO

kaplamanın, kompakt mikro yapısı ve kalınlığı nedeniyle daha iyi aşınma direncine ve kullanım ömrüne sahip olduğunu göstermişlerdir.

Zhuang ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada, elektrolit çözeltisi olarak alkali fosfat kullanılarak ve katkı maddesi olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum alüminat (NaAlO_2) ve potasyum florozirkonat (K_2ZrF_6) ilavesi ile MAO yöntemiyle AZ31 Mg alaşımı üzerinde kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. MAO kaplamaların mikro yapısı, faz bileşimi ve element bileşimi ile yüzey profili, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X ışını kırınımı (XRD) analizleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Korozyon ve aşınma özellikleri, sırasıyla ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon ve disk üzerinde top aşınma testleri ile değerlendirmişlerdir. Katkı maddelerinin anyonlarının mikroyapısal özelliklerini, kimyasal bileşimini, korozyon direncini ve tribolojik davranışını etkileyen kaplama oluşumuna etkili bir şekilde katıldığını göstermiştir. Katkı maddesi olarak K_2ZrF_6 içeren elektrolit solüsyonunda MAO ile muamele edilen numunenin daha iyi korozyon ve aşınma direnci gösterdiği gözlenmiştir.

Ding ve diğerleri (2010)'nin yapmış oldukları çalışmada, 2024 Al alaşımının MAO yöntemiyle yapay deniz suyu, yapay yağmur suyu ve damıtılmış suda aşınma ve korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan üç sulu çözeltisinde bütün numunelerin frekansın artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. Sulu ortam sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilemiştir; sürtünme katsayısı, damıtılmış suda aşınma meydana geldiğinde en yüksek, yağmur suyunda meydana geldiğinde daha düşük ve deniz suyunda aşınma meydana geldiğinde en düşük olarak belirlenmiştir. Özellikle deniz suyunun sürtünme davranışının olumlu yönde daha etkin olduğu belirlenmiştir. Damıtılmış sudaki MAO kaplamasının aşınma kaybı, düşük frekansta en fazla bulunmuştur. Yüksek frekansta yağmur suyu ve deniz suyunda hızla artmış ve damıtılmış suya göre daha büyük aşınma kaybı ile sonuçlanmıştır. Her üç sulu çözeltideki aşındırma, gözenekli MAO Al_2O_3 yüzeylerindeki pürüzleri yumuşatarak yüzeyin "düzleştirilmesine" neden olmuştur. MAO yöntemiyle Al_2O_3 kaplamalarının baskın aşınma mekanizması, yağmur suyunda abrasif aşınma olduğunu belirlemişlerdir.

Ma ve diğerleri (2014), MAO yöntemiyle 6061 Al alaşımı için alkali sodyum silikat elektrolit çözeltisi içerisine grafit partikülleri eklenerek sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. XRD analizlerinde Al_2O_3 , Al_2OC , Al_4C_3 , $\text{Al}_4\text{O}_4\text{C}$ ve grafit fazları görünmüştür. Grafit katkı eklenen numunede volkan benzeri mikroyapılarında azalma belirlenmiştir. Grafit katkısız numunede 1200 devir sonunda kaplama hatası meydana

gelmiştir. Grafit katkılı numunede ise sürtünme katsayısı 0,1 değerlerinde görülmüştür. 1500 devir aşınma testinden sonra ise 0,12 değerine ulaştığını tespit etmişlerdir. Eklenen grafit partikülleri yağlama görevi görerek gözeneklere nifüz etmiş ve düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncine neden olmuştur. Karbon içeren kaplamanın aşınma direnci, grafit katkı maddesi içermeyen MAO kaplamaya kıyasla iyileşmiştir.

Pezzato ve diğerleri (2018)'nin yapıları çalışmada, AZ91 ve AZ80 Mg alaşımları üzerinde MAO yöntemiyle üretilen kaplamalar için kullanılan fosfat ve silikat içeren elektrolite grafit partiküllerinin eklenmesinin etkisini incelemişlerdir. Elde edilen kaplamaların korozyon ve aşınma davranışları incelenmiştir. Eklenen grafit partikülleri gözenekleri grafit ile doldurmuş ve grafit katkısız numunelere göre daha yoğun ve sert yapısına sahip olmuştur. Grafit partiküllerin varlığı kalınlığı arttırmıştır ve böylece hem korozyon hem de aşınma direncini iyileştirmiştir. Korozyon ve aşınma direncindeki artış, daha yüksek alüminyum içeriği nedeniyle AZ91'de AZ80'e göre daha belirgin hale gelmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada, MAO yöntemiyle Ti-6Al-4V alaşımının kaplaması için elektrolit çözeltisi içerisine hegzagonal bor nitür (h-BN) partikülleri eklenerek oluşan kaplamaların mikro yapısı, bileşimi ve aşınma davranışları üzerindeki etkisi incelemişlerdir. XRD analiz sonuçlarında rutil TiO_2 , anataz TiO_2 ve bir h-BN fazından oluşan $TiO_2/h-BN$ kompozit kaplamanın, parçacık içermeyen kaplamaya göre daha az gözenekli olduğu belirlenmiştir. MAO kaplamasında h-BN partiküllerinin varlığı, gelişmiş bir sürtünme önleme özelliği üretmiştir. 2 g/L h-BN partikül içeren elektrolitte üretilen kompozit kaplama en iyi aşınma direncini sergilemiştir. MAO kaplamanın parlatılması, kaplamanın aşınma direncinde ve sürtünme önleme özelliklerinde önemli bir gelişme ile sonuçlanmıştır. 2 g/L h-BN parçacıkları içeren kompozit kaplama, cilalamadan sonra en iyi aşınma direnci sergilemiştir ve parlatmadan sonra elde edilen aşınma oranı, ön parlatma değerinden bir kat daha düşük sonuçlanmıştır (Ao vd., 2016).

Bir çalışmada, 2024 Al alaşımının farklı oranlarda h-BN partikülleri içeren elektrolit içerisinde MAO yöntemiyle kaplanması incelenmiştir. Hazırlanan kaplamaların mikroyapısı, yüzey pürüzlülüğü, faz bileşimi, sertliği ve aşınma davranışları analiz edilmiştir. Kaplamaların esas olarak $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$, müllit ve h-BN fazlarından oluştuğu görülmüştür. Elektrolitteki h-BN partiküllerinin içeriği arttıkça, kompozit kaplamaların yüzeyindeki gözeneklerin boyutu ve sayısı önemli ölçüde azalmıştır. MAO kaplamalara göre 2,5 g/L h-BN partiküllü elektrolitte oluşturulan kaplamalar en düşük sürtünme katsayısını ve en düşük aşınma oranını göstermiştir. MAO kaplamaların aşınma oranı, diğer

kaplamalara göre sadece %33,3'ü kadar olmuş ve kaplamalar daha iyi aşınma direnci sergilemiştir (Li ve Di, 2017).

Yapılan bir çalışmada, AZ91 Mg alaşımının MAO yöntemiyle elektrolit içerisinde farklı oranlarda ZnO partikülleri eklenerek mikroyapısı, faz bileşimi ve korozyon davranışları üzerindeki etkisi incelemiştir. ZnO katkı maddesinin krater benzeri morfolojiye sahip olduğunu ve çoğunlukla gözeneklerin yakınında biriktikleri gözlenmiştir. ZnO partiküllerinin oranları arttıkça, kaplamaya daha fazla parçacık dahil edildiği ve gözeneklilik, kalınlık ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin polarizasyon direncinin $4,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ZnO eklenmesiyle 9,26'dan 683,2 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 'ye yükseldiğini ortaya koymuştur. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) kullanılarak kaplama özelliklerinin ve korozyon mekanizması incelenmiştir. Bunun sonucunda, kaplamanın sıkıştırılmasının ve ZnO partiküllerinin varlığı nedeniyle kaplama katmanları arasında aşındırıcı iyonların nüfuz etme yolunun zorluğunun arttığı gösterilmiştir (Bordbar-Khiabani vd., 2019).

Roknian ve diğerleri (2018) yaptıkları bu çalışmada, farklı oranlarda ZnO partikülleri içeren fosfat bazlı bir elektrolit, MAO yöntemi kullanılarak saf Ti üzerinde kaplamalar elde etmişlerdir. Kaplamaların mikro yapısı, fazları, kimyasal bileşimleri ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) kullanılarak incelenmiştir. Yüzeyde ve kesitte EDS haritalama analizinden elde edilen sonuçlar, kaplamanın P ve Zn elementlerinin kaplama içindeki üniform dağılımlarının elde edildiğini göstermiştir. Korozyon davranışını incelemek için örnekler çözeltilere daldırıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon testi ve elektrokimyasal empedans spektrometrisi (EIS) yapılmıştır. ZnO partiküllerinin kaplamalara dahil edilmesi, gözenek sayısında azalmaya ve kaplama mikro yapısının ve korozyon direncinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, ZnO nanoparçacıklarının eklenmesi, kaplanmamış titanyum substrat ile karşılaştırıldığında korozyon akımı yoğunluğunda bir düşüşe (15 g/L ZnO partikülleri içeren numune için %93 azalma) neden olmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında elektrolit içerisinde hegzagonal bor nitrür (h-BN), çinko oksit (ZnO) ve grafit partikülleri eklenerek Al 2024 alaşımının MAO yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. MAO yöntemi ile kaplama işlemi; pozitif voltaj, negatif voltaj, pozitif vuruş oranı (%), negatif vuruş oranı (%), frekans, işlem süresi gibi parametreler bütün numuneler için aynı olacak şekilde yapılarak, malzemenin tribolojik özelliklerine ve korozyon davranışlarına etkileri incelenmiştir.

2.1. Altlık Malzemenin Hazırlanması

25 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarında Al 2024 alaşımları anot altlık malzemesi olarak kullanılmıştır. MAO ünitesi içerisinde, paslanmaz çelik katot malzemesi olarak bulunmaktadır. Mikro ark kaplama cihazında numunelerin sabitlenebilmesi için, numunelerin üst köşelerinden 3 mm çapında delikler açılmıştır. Numuneler sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 nolu SiC zımparalar ile yüzeyi zımparalanmıştır. Zımparalanmış numuneler saf su ve etil alkol ile yıkandıktan sonra kurutularak MAO işlemi için hazırlanmıştır.

MAO yöntemi ile Al 2024 alaşımının kaplama işlemi Şekil 2.1’de gösterilen cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaplama işlemi süresince numune anot, paslanmaz çelik hazne ise katot olarak kullanılmıştır. MAO işlemi gerçekleştirilmeden önce alkali bir çözelti hazırlanmıştır. Çözelti içerisinde, 4 g/l Na_2SiO_3 , 2 g/l KOH ve 3 g/l NaAlO_2 bileşenleri eklenerek hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiye her birinden 1,5 g/l katkı maddeleri ilave edilerek, katkısız (AFC), grafit katkılı (GAC), ZnO katkılı (ZAC) ve h-BN katkılı (BAC) olmak üzere dört farklı elektrolit çözeltisi yapılmıştır. Elektrolitik çözeltilerin kimyasal bileşenleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. MAO işleminde kullanılan çözeltilerin kimyasal bileşimi

Numune Kodu	Elektrolit Çözeltisi					
	Na ₂ SiO ₃ (g/l)	KOH (g/l)	NaAlO ₂ (g/l)	Grafit (g/l)	h-BN (g/l)	ZnO (g/l)
AFC	4	2	6	-	-	-
GAC	4	2	6	1,5	-	-
BAC	4	2	6	-	1,5	-
ZAC	4	2	6	-	-	1,5

MAO cihazı 30 kW kapasiteli ve AC güç kaynağına sahip olan bir cihazdır. MAO yöntemi ile yapılan kaplamada bütün numuneler için pozitif voltaj, negatif voltaj, pozitif vuruş oranı (%), negatif vuruş oranı (%), frekans ve süre bütün numunelerde aynı değerde tutulmuştur. Hazırlanan elektrolitik çözelti içerisinde çinko oksit, hekzagonal bor nitrür ve grafit partikülleri ilave edilerek oluşan kaplamanın katkı maddelerine etkisi incelenmiştir. Tablo 2.2’de gösterildiği gibi pozitif voltaj 450 V, negatif voltaj 100 V, frekans 250 Hz, pozitif vuruş oranı % 10, negatif vuruş oranı % 10 ve süresi 15 dakika olarak kaplama işlemi başlatılmıştır.

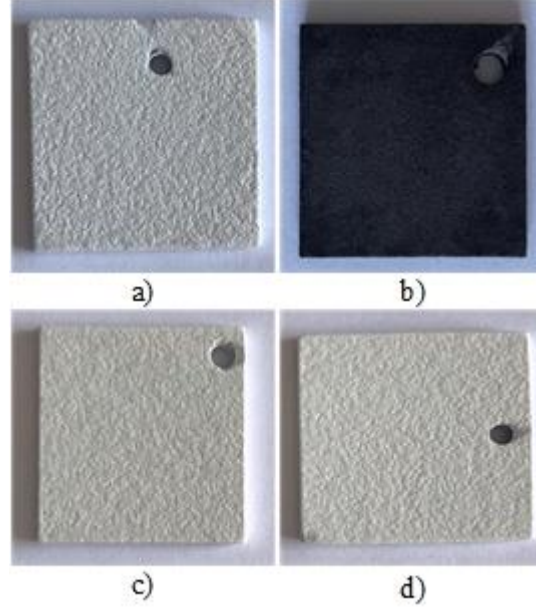


Şekil 2.1. Mikro ark oksidasyon cihazı

Tablo 2.2. MAO işlemi için uygulanan kaplama parametreleri

Parametreler	Deney Şartları
Pozitif voltaj (V)	450
Negatif voltaj (V)	100
Frekans (Hz)	250
Pozitif vuruş oranı (%)	10
Negatif vuruş oranı (%)	10
İşlem süresi	15

MAO işlemi sonrasında oluşan kaplanmış numuneler 100°C'de etüve fırına konularak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sonrasında kaplanmış numuneler mekanik ve karakterizasyon deneyleri uygulanması için hazır hale getirilmiştir. Şekil 2.2'de MAO işlemi sonrası numune görüntüleri verilmiştir.



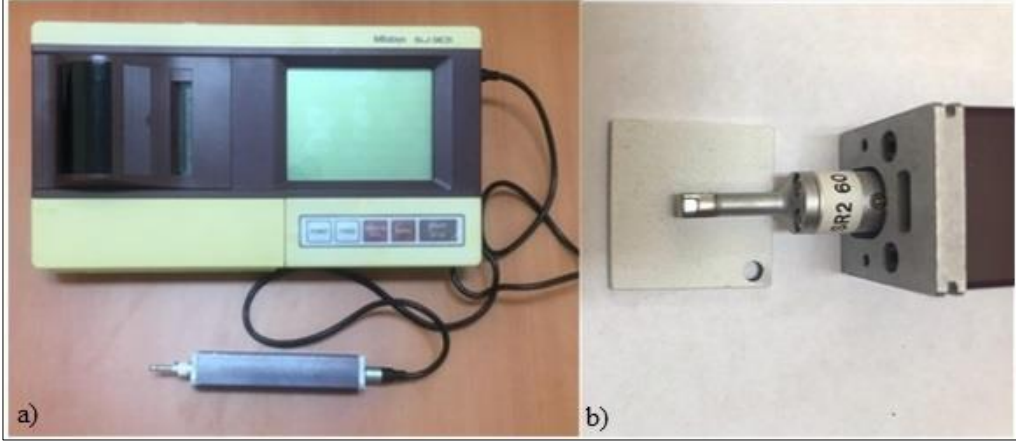
Şekil 2.2. MAO işlemi sonrası numunelerin yüzey görüntüleri a) AFC, b) GAC, c) BAC ve d) ZAC

2.2. Karakterizasyon Çalışmaları

Bu çalışmada, gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları bütün numuneler için aynı proseslerde uygulanmıştır ve üretim basamaklarına ait test ve analizler alt başlıklarda açıklanmıştır.

2.2.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Numunelerin yüzey pürüzlülükleri, DIN EN ISO 4287 standardında, ölçme kuvveti 0,75 mN, ölçme uzunluğu 12,5 mm, ölçme hızı 0,25 mm/s ve 2 µm elmas çapa sahip Mitutoyo SJ-301 marka profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'te yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı fotoğrafı ve numune üzerindeki görüntüsü verilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçer test cihazı ile R_a değeri y koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması, R_q değeri kuadratik ortalaması ve R_z değeri en yüksek profil tepesi ile en derin nokta arasındaki dikey mesafeyi veren değerleri bulunmuştur. Yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek için her numunenin dört farklı bölgesinden R_a , R_q ve R_z değerleri alınarak aritmetik ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 2.3. a) Yüzey pürüzlülüğü ölçer test cihazı b) Numune üzerindeki görüntüsü

2.2.2. Morfolojik Analizler

AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin gözenek boyutlarını ve morfolojik yapılarını incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Zeiss Marka Evo LS 10 model elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. SEM cihazında aynı zamanda numunelerin belirli bölgelerinden kesit alınarak kaplama kalınlık ölçümü yapılmıştır. Kullanılan SEM cihazı görüntüsü Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.2.3. Yapısal Analizler

Kaplamasız ve kaplanmış numunelerin yapılarında meydana gelen fazları belirlemek için X-Ray difraktometresi kullanılmıştır. Numunelerin XRD ölçümleri Şekil 2.5'te gösterilen Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan PANalytical X'pert3 Powder model cihazı kullanılmıştır. XRD ölçümleri için $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip 40 mA ve 46 kW güç değerlerinde Cu-K α ışınımı ile belirlenmiş ve ölçüm değerleri oda sıcaklığında $10 \leq 2\theta \leq 90$ tarama aralığında, 0,017 derece/s tarama hızında ve 0,1 derece tarama şartlarında bulunmuştur.



Şekil 2.5. X-ışınları diffraktometresi (XRD)

2.2.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

MAO işlemiyle AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin tribolojik özelliklerini incelemek için Şekil 2.6'da gösterilen ball-on disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Hava ortamı, deniz suyu ortamı ve azot ortamında oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyi için gerekli olan deney parametreleri Tablo 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.6. Sürtünme ve aşınma test cihazı

Tablo 2.3. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları

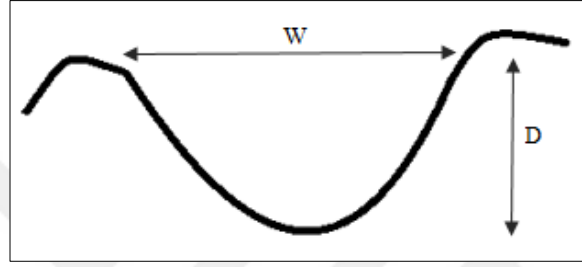
Parametreler	Deney Şartları
Uygulanan yük, (N)	2
Kayma hızı, (m/s)	0,18
İz çapı (mm)	5
Sıcaklık, (°C)	25
Süre, (s)	350
Bilye çapı (mm) ve türü	5, Al ₂ O ₃
Ortam	Hava, Deniz suyu, Azot

Aşınma deneyleri 2 N sabit yük altında hava ortamı, deniz suyu ortamı ve azot ortamı olmak üzere 3 farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Farklı ortam şartlarında katkısız kaplamalı (AFC), grafit katkılı kaplama (GAC), hegzagonal bor nitrür katkılı kaplamalı (BAC) ve çinko oksit katkılı kaplamalı (ZAC) numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma değerleri incelenmiştir. Numunelerin sürtünme katsayıları Denklem 2.1’de verilen formül ile hesaplanmıştır. Aşınma test cihazından sürtünme katsayısı (μ) – süre değerleri otomatik olarak verilmiştir.

$$\mu = F_S / F_N \quad (2.1)$$

μ : Sürtünme katsayısı, F_S : Sürtünme kuvveti, F_N : Uygulanan kuvvet

Deney sonrasında numuneler üzerinde oluşan aşınma izlerinin görüntüleri SEM ile incelenmiş olup aşınma iz derinliği ve genişliği değerlerini ölçmek için de 3 boyutlu yüzey profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma iz hacimleri (mm^3) ve aşınma oranları Denklem 2.2 ve Denklem 2.3 ile hesaplanmıştır. Şekil 2.7’de aşınma iz genişliği ile derinliğinin şematik gösterimi verilmiştir. Aşınma iz hacimleri (mm^3) 3 boyutlu yüzey profilometri cihazından hesaplanmıştır. Şekil 2.8’de 3 boyutlu yüzey profilometri cihazı verilmiştir.



Şekil 2.7. Aşınma iz genişliği ve derinliğinin şematik gösterimi

$$V = (\pi/4).L.D.W \quad (2.2)$$

V: Aşınma iz hacmi (mm^3), L: Aşınma iz uzunluğu (mm), D: Aşınma iz derinliği (mm), W: Aşınma iz genişliği (mm)

$$\text{Aşınma Oranı} = V/(F.S) \quad (2.3)$$

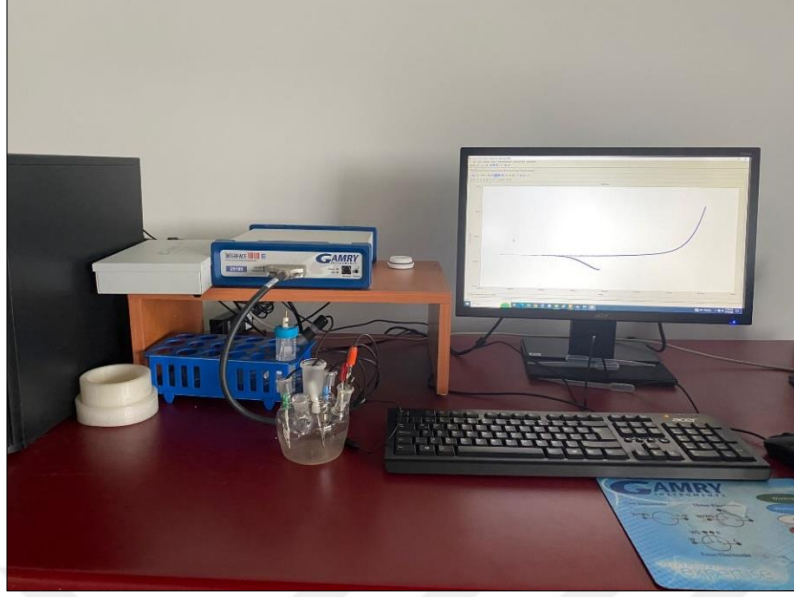
F: Uygulanan yük (N), S: Toplam kayma mesafesi (m), V: Aşınma iz hacmi (mm^3)



Şekil 2.8. 3 boyutlu yüzey profilometri cihazı

2.2.5. Korozyon Deneyi

Al 2024 alaşımı malzemesinin katkı maddeleri ilave edilmesiyle MAO işlemi uygulanarak yapılan kaplamanın korozyon davranışını belirlemek için potansiyodinamik polarizasyon yöntemi yapılmıştır. Şekil 2.9'da gösterilen Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Gamry Interface 1010E model cihazda ve analizler ise Gamry Echem Analyst yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Korozyon testinde Referans Elektrot olarak Ag/AgCl, Karşıt Elektrot olarak platin tel ve çalışma elektrotu olarak kaplanan numuneler kullanılmıştır. Korozyon testi oda sıcaklığında ağırlıkça % 3,5 NaCl çözeltisinde yapılmıştır. Başlangıç voltaj -0,5 mV, bitiş voltajı +2,5 mV, tarama hızı 1 mVs^{-1} ve yüzey alanı ise $0,25 \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) Tafel eğrilerinden belirlenmiş ve korozyon hızı hesaplanmıştır.



Şekil 2.9. Elektrokimyasal korozyon deney cihazı

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü ve Kalınlık Ölçümü Sonuçları

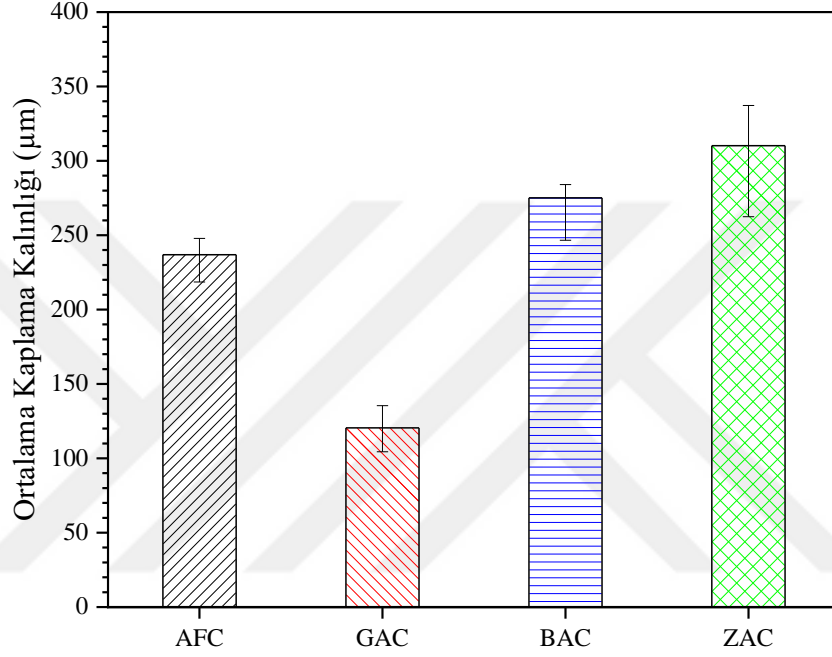
MAO işleminde yüzey pürüzlülüğü, alt tabaka yüzey pürüzlülüğüne ve işleme sırasında eritme malzemesinin taşmasıyla oluşan kaplama yüzeyi mikro yapısına ve mikro şekline bağlıdır. Alt tabaka yüzey pürüzlülüğü sabit olduğunda, kaplama yüzey pürüzlülüğüne, mikro yapısı ve mikro şekli tarafından karar verilir (Pan vd., 2009). AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (R_a , R_q ve R_z) Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Numune Kodu	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
AFC	11,79	14,36	56,68
GAC	11,96	14,42	63,38
BAC	18,79	22,08	91,22
ZAC	10,16	12,54	54,94

MAO yöntemiyle kaplama işlemi sonucunda yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. GAC ve BAC kodlu numunenin R_a , R_q ve R_z değerleri daha yüksektir. Yüzey pürüzlülüğündeki artışın nedeni, kaplamadaki büyüme hızının artan konsantrasyonla birlikte yükselmesidir. Bu durum, parçacıkların oluşum sürecine daha fazla katıldığını göstermektedir. Bu işlem sırasında, parçacıklar fiziksel olarak kaplama yüzeyine hapsedilmiştir. Erimiş malzeme boşaltma kanalından salındığında bu parçacıkları yakalamış ve daha sonra çevresini saran elektrolit içinde hızla katılaşmaya neden olmuştur. Kapsama yüzeyine yapışan parçacıkların topaklaşması, parçacık boyutunun artmasına neden olmuş ve dolayısıyla kaplamaların yüzey pürüzlülüğü artmıştır (Ao vd., 2016). ZAC kodlu numune diğer numunelere kıyasla yüzey pürüzlülük değerleri daha düşüktür. ZAC kodlu numunenin R_a , R_q ve R_z değeri sırasıyla 10,16 μm , 12,54 μm ve 54,94 μm olarak ölçülmüştür. ZAC kodlu numunenin yüzey pürüzlülüğünün diğer katkı maddelerine oranla düşük olması mikro deşarj yoğunluğundaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Bu durum, elektrolit içerisindeki

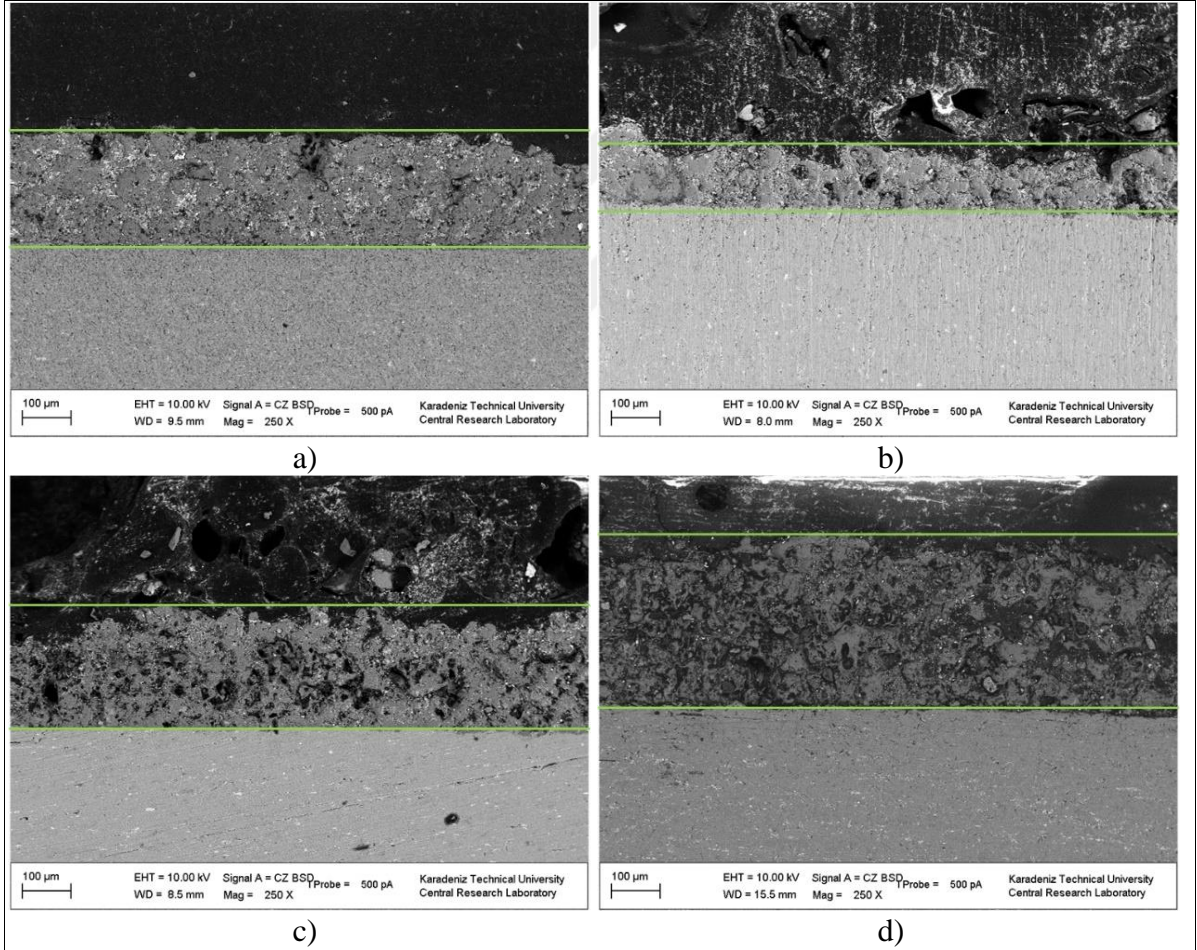
ZnO katkı maddesinin varlığından oluşmaktadır. Bu nedenle, kıvılcım şiddetinin azalmasıyla boşaltma kanallarında oluşan gözenekler küçülmekte ve dolayısıyla kaplama pürüz yüzeyleri arasındaki ortalama yükseklik azalmaktadır. Elektrolite ZnO parçacıklarının eklenmesinin yüzey pürüzlülüğünde azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Bordbar-Khiabani vd., 2019).



Şekil 3.1. AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama kaplama kalınlığı (µm) değerleri

MAO kaplamaların oluşumun da üç temel adım bulunmaktadır. İlk adım da, alt tabakanın yüzeyinde bulunan düşük iletken oksit tabakasının parçalanması için bir dizi boşaltma kanalı oluşturulur ve alaşım elementleri alt tabakadan kanallara eritilir; daha sonra alaşım elementleri çevresini saran elektrolitin içerisindeki elementlerle uygulanan elektriksel parametreler etkisiyle reaksiyona girer; son olarak da, ikinci adımdaki proses alt tabakanın tamamında gerçekleşerek alt tabaka oksitlenmiş olur. Yukarıda verilen adımlar, kaplama kalınlığının artmasına neden olarak, MAO işlemi boyunca tekrarlanmaktadır. AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama kaplama kalınlığı (µm) değerleri Şekil 3.1’de, SEM görüntüleri de Şekil 3.2’de verilmiştir. MAO işlemi sonucunda numuneler üzerinde oluşan oksit tabakasına bakıldığında, ZAC kodlu numunenin ortalama kaplama kalınlığı daha yüksektir. Ancak GAC kodlu numunenin ortalama kaplama kalınlığı, AFC

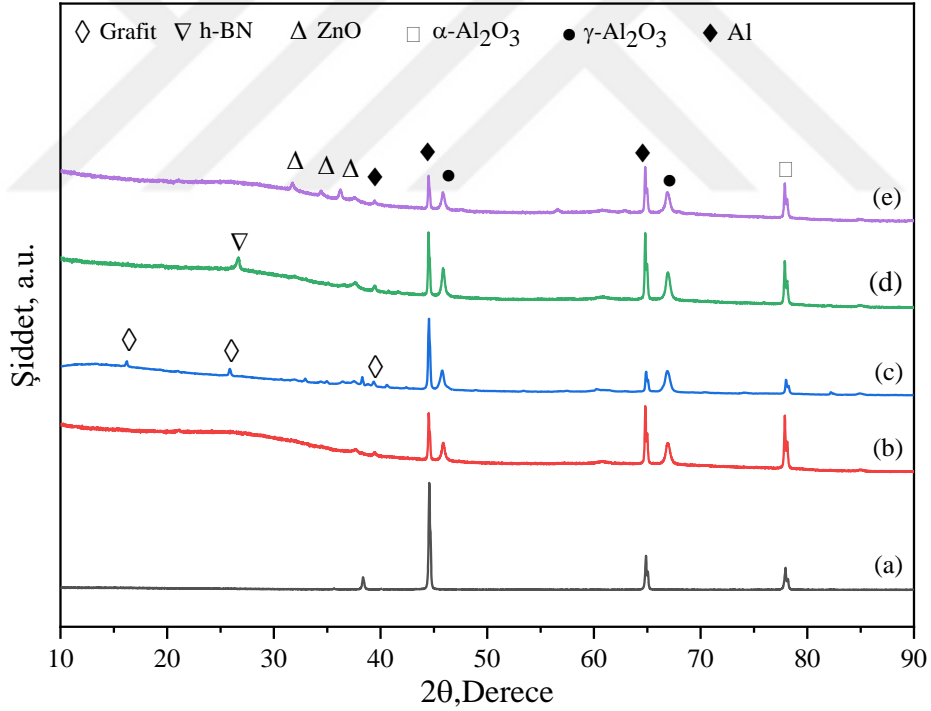
kodlu numuneden biraz daha düşüktür. ZAC kodlu numunede elde edilen ortalama kaplama kalınlığı 334,71 μm iken GAC kodlu numuneden elde edilen ortalama kaplama kalınlığı 105,24 μm 'dir. Kesit görüntüleri de verilen ZAC kodlu ve BAC kodlu numunelerin AFC kodlu numunelerden ortalama kaplama kalınlığının yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni elektrolit içerisine eklenen katkı maddelerinin elektrolit iletkenliğini arttırması olarak bilinmektedir. Bu durum numune yüzeylerinde gaz kabarcıklarının oluşumunu hızlandırmıştır (Zuo vd., 2019; Kaplan vd., 2021). GAC kodlu numune en düşük kaplama kalınlığına sahiptir. Kaplama kalınlığında elektrolitin iletkenliğinin yanı sıra katkı maddelerinin parçacık boyutunun artmasıyla arttığı literatürde yer almaktadır (Kaplan vd., 2021).



Şekil 3.2. (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunelerin kesit SEM görüntüleri

3.2. Yapısal Analiz Sonuçları

AFC, GAC, ZAC, BAC kodlu ve altlık malzeme numunelerin XRD analiz sonuçları Şekil 3.3'te verilmiştir. MAO yöntemiyle kaplanan Al alaşımlarının oluşan temel fazın Al_2O_3 olduğu belirtilmiştir. Oluşan oksit tabakasındaki fazlar genel olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'tür. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının yüksek olması kaplamanın yapısal özelliklerini iyileştirmektedir. Kaplamada katkı maddelerinin eklenmesiyle faz oranlarının oksit tabakasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Katkı maddelerinin varlığı yüzeyde oluşan oksit tabakasındaki kalınlık değişimine, fazların oluşmasına veya fazların miktarının değişmesine sebep olmuştur (Yang ve Wu, 2010; Gu vd., 2012). $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının kaplama kalınlığı arttıkça daha yüksek oranda olduğu ve kaplamanın yüzeyine yakın yerlerinde $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının baskın bulunduğu literatürde yer almaktadır.



Şekil 3.3. (a) Altlık malzeme, (b) AFC, (c) GAC, (d) BAC, (e) ZAC kodlu numunelerin XRD paterni

XRD verilerine bakıldığında AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde oluşan fazların $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ olduğu görülmektedir. Oluşan bu fazların yanı sıra GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde sırasıyla, grafit, h-BN ve ZnO fazları oluşmuştur. ZAC kodlu

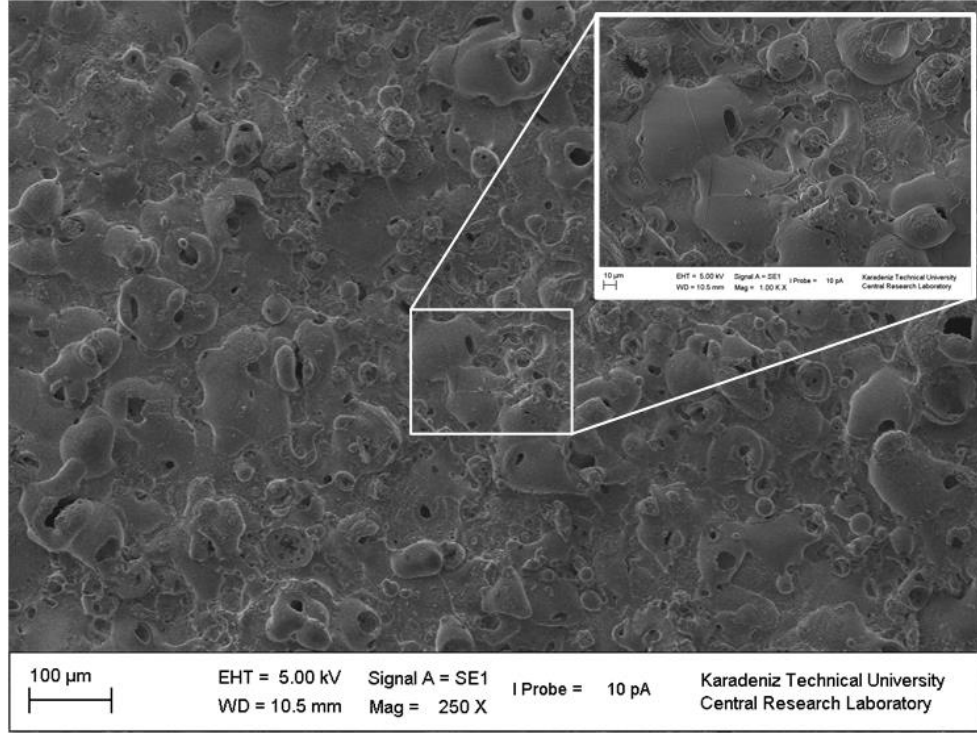
numunenin kaplama kalınlığının en yüksek olmasından dolayı α -Al₂O₃ fazının pik şiddeti diğer numunelere oranla daha yüksektir. Yin ve arkadaşları (2015)'nin yaptıkları bir çalışmada, Al alaşımına, grafit katkı ve katkısız MAO işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan kaplama sonucunda grafit katkı numunede α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazlarının yanı sıra grafit fazının yer aldığını belirtmişlerdir. Li ve Di (2017)'nin yaptıkları bir çalışmada, 2024 Al alaşımına, farklı oranlarda h-BN partikülleri eklenerek yapılan mikro ark oksidasyon yöntemiyle yapılan kaplamada h-BN fazlarının olduğunu tespit etmişlerdir. Zhao vd. (2015)'nin yaptıkları bir çalışmada, Ti alaşımına, ZnO katkı maddesi ilave edilerek gerçekleşen kaplama işleminde ZnO fazlarının yer aldığını tespit etmişlerdir.

3.3. Morfolojik Analiz Sonuçları

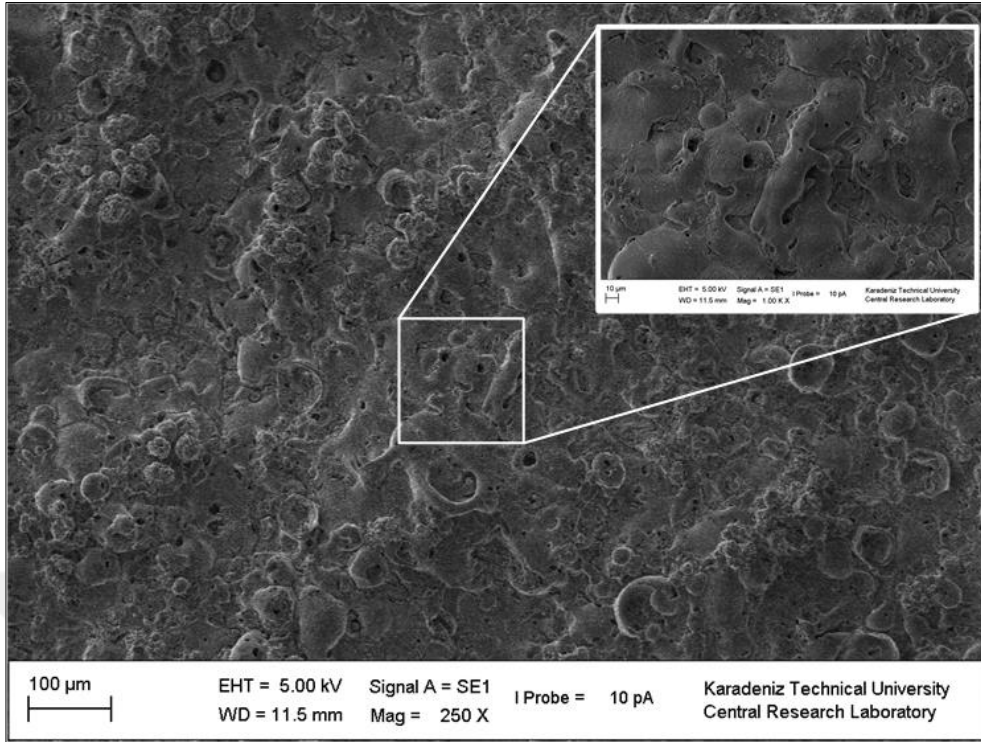
Tüm numune yüzeylerinde, mikro ark oksidasyon kaplama oluşumu sırasında yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle meydana gelen mikro deşarj olaylarından kaynaklanan krater benzeri morfoloji gözlenmiştir. Bu morfoloji, kıvılcımlanma sırasında mikro deşarj kanalı boyunca erimiş malzemenin dışarı akışı nedeniyle oluşmaktadır. Erimiş malzeme yüzeye yayılmış ve elektrolit ile çarpışması nedeniyle hızla katılaşmaktadır. Reaksiyon sırasında açığa çıkan ve dışarıya atılmak istenen gaz kabarcıkları ise mikro gözeneklere, açığa çıkan sıcaklık ise termal strese sebep olduğu için mikro çatlaklara sebep olarak yüzeyde pürüzlülük meydana getirmektedir (Bordbar-Khiabani vd., 2019).

Şekil 3.5-3.7'de AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzey morfolojileri incelendiğinde, katkı maddeleri eklenmiş numunelerde daha yoğun gözenek ve gözenek boyutunun da büyük olduğu görülmektedir. Katkı maddelerinin tane boyutunun MAO kaplamalarının morfoloji üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Ma ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (Ma vd., 2014), Al 6061 alaşımının MAO işlemiyle grafit partiküllerinin eklenmesi sonucunda boşaltma kanallarının üzerinde, çevresinde mikro çatlaklar, biriken partiküller olduğu ve biriken partiküllerin grafit katkısız hazırlanan numunede daha yoğun ve daha küçük olduğunu tespit etmişlerdir. Elektrolite parçacıkların eklenmesi, MAO işlemi sırasında akımın bölgesel yoğunlaşmasını azaltarak yüzeysel yayılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, güçlü bir elektrik alanı etkisi altında, elektrolit içindeki parçacıklar elektrolit alanından difüzyon tabakasına doğru hareket etmiş ve son aşamada kaplama/elektrolit ara yüzüne ulaşmıştır. Yüksek sıcaklık oluşumu, doğrudan alt malzemeyi saran elektrolit

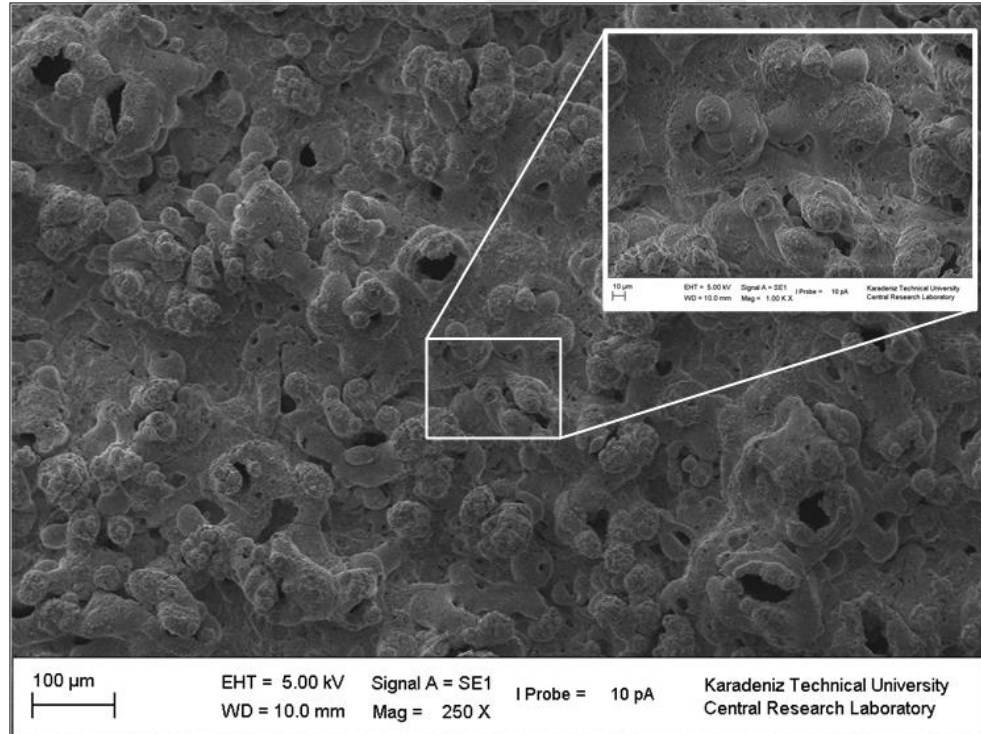
etrafında buharlaşmaya ve katı parçacıkların erimesine neden olan, kanallar içindeki plazma deşarjının bir sonucudur. Elektrolitteki buharlaşma ile birlikte o bölgede yaşanan basınç düşüşü, erimiş oksidin vakumlanmasına neden olur. Bu vakumlama, elektrolit içindeki katı katkı parçacıklarının erimiş okside yapışmasına yol açar. Böylece kaplama/elektrolit ara yüzeyindeki parçacıklar kaplama yüzeyine emilir. Eklenen katkı maddelerinin kaplama üzerine gömülmesi, uygulanan potansiyelden kaynaklanan güçlü elektrik alanının etkisi altında anoda doğru göç etmelerine neden olan negatif yüzey yüklerinden kaynaklanır. Katkı maddelerinin eklenmesiyle boşaltma kanallarının çapının ve yoğunluğunun değiştiği gözlenmiştir (Huan vd., 2009; Bordbar-Khiabani vd., 2019; Liu vd., 2020; Kaplan vd., 2021).



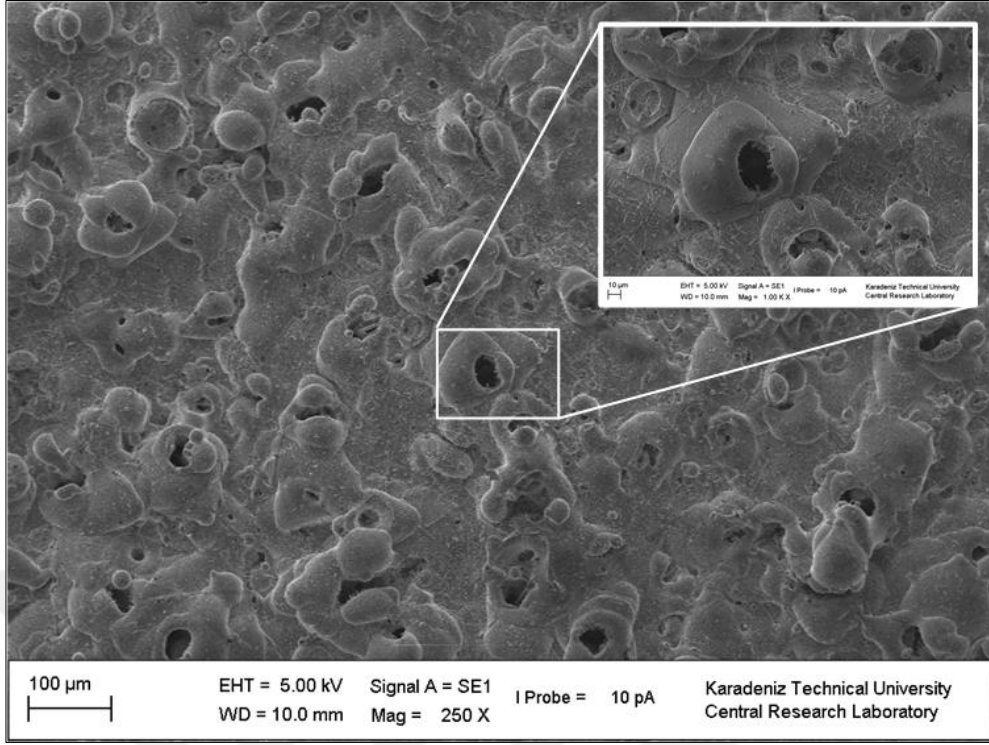
Şekil 3.4. AFC kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri



Şekil 3.5. GAC kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

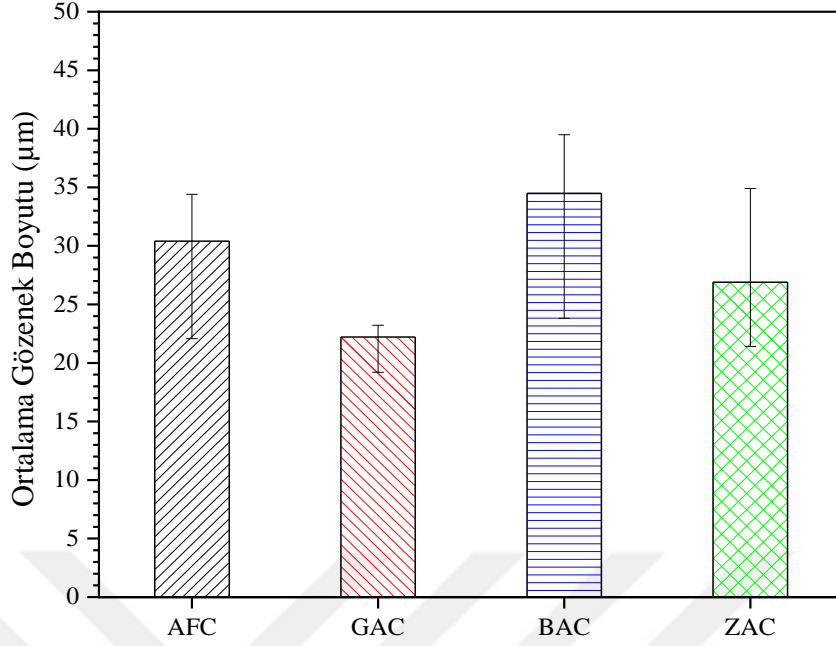


Şekil 3.6. BAC kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri



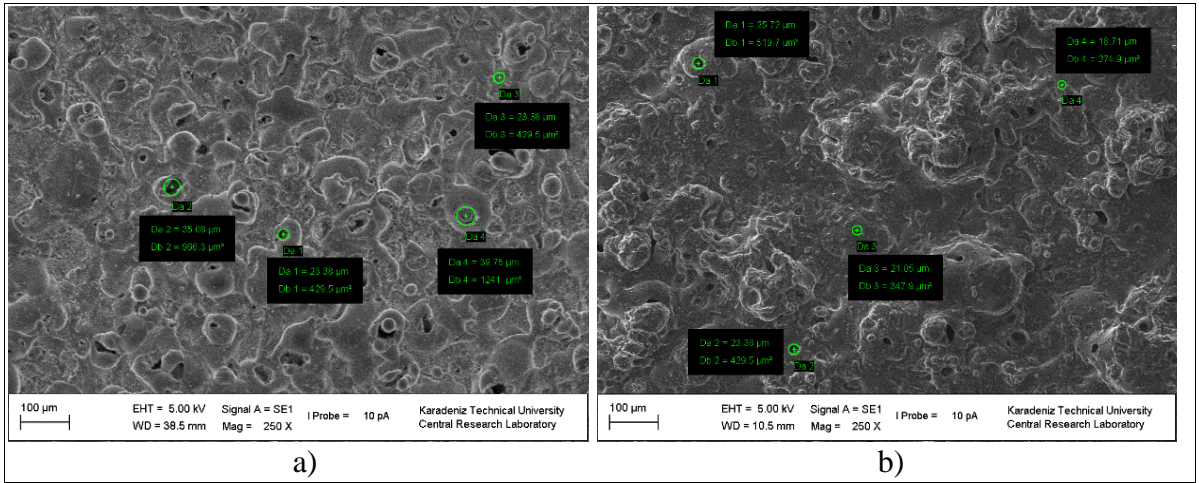
Şekil 3.7. ZAC kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Yüzeyde çeşitli boyut ve şekillerde çok sayıda gözenekler oluşmuştur. Şekil 3.8’de kaplamalı numunelerin ortalama gözenek boyutları verilmiştir. MAO işleminde deşarj kanallarının birden fazla tekrarlanması sonucunda gözenekler genişlemiştir. Katkı maddesi eklenmeyen AFC kodlu numunede ortalama gözenek boyutu 30,39 μm 'dir. Elektrolite farklı katkı maddeleri eklenmesiyle gözenek boyutları değişmiştir. GAC kodlu numunede gözenek boyutu 22,21 μm ve bu değer diğer kaplamalardan daha küçük olarak bulunmuştur. BAC ve ZAC kodlu numune de ise ortalama gözenek boyutu sırasıyla 34,49 μm , 26,80 μm olarak tespit edilmiş ve bu numunenin daha büyük gözenekler içerdiği belirlenmiştir (Liu vd., 2020).

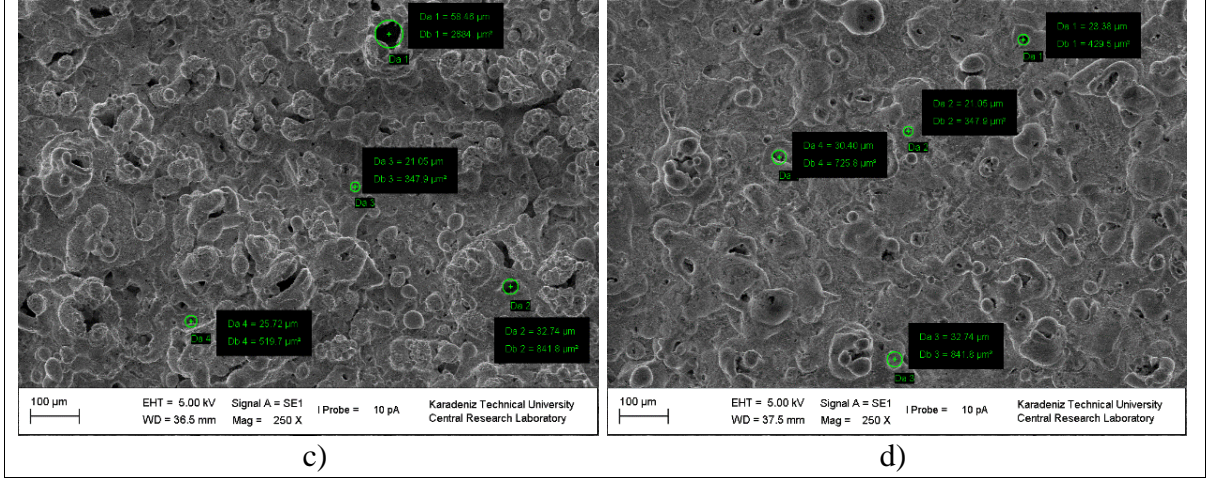


Şekil 3.8. AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin ortalama gözenek boyutu

Kaplama yüzeyinde, deşarjlardan kaynaklanan çok sayıda ince ve küçük gözenekler bulunmaktadır. BAC ve ZAC kodlu numunelerinde ilave edilen h-BN ve ZnO parçacıkları yüzeyde birikmesi sonucu büyük boyutlu gözenekler oluşmuştur (Lu vd., 2016). Şekil 3.9'da kaplanmış numunelerin gözenek boyutunu gösteren SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.9. (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunenin gözenek boyutu SEM görüntüsü

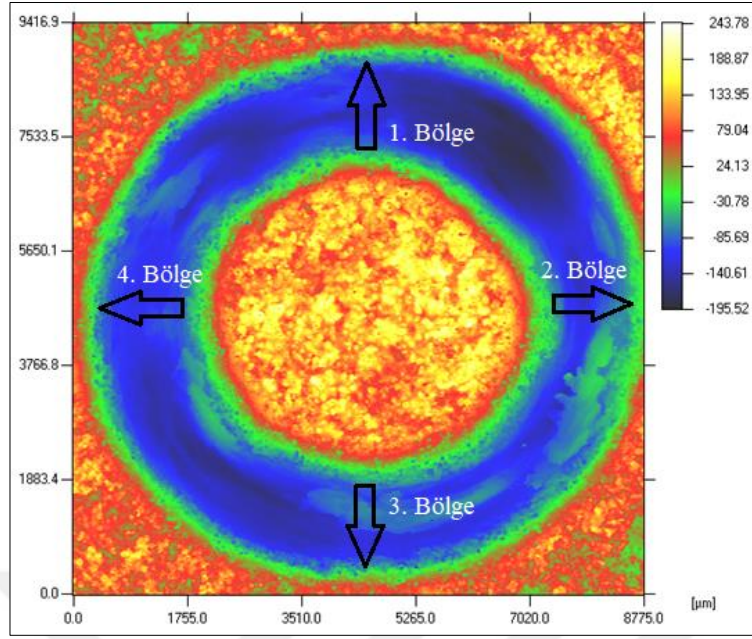


Şekil 3.9'un devamı. (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC kodlu numunenin gözenek boyutu SEM görüntüsü

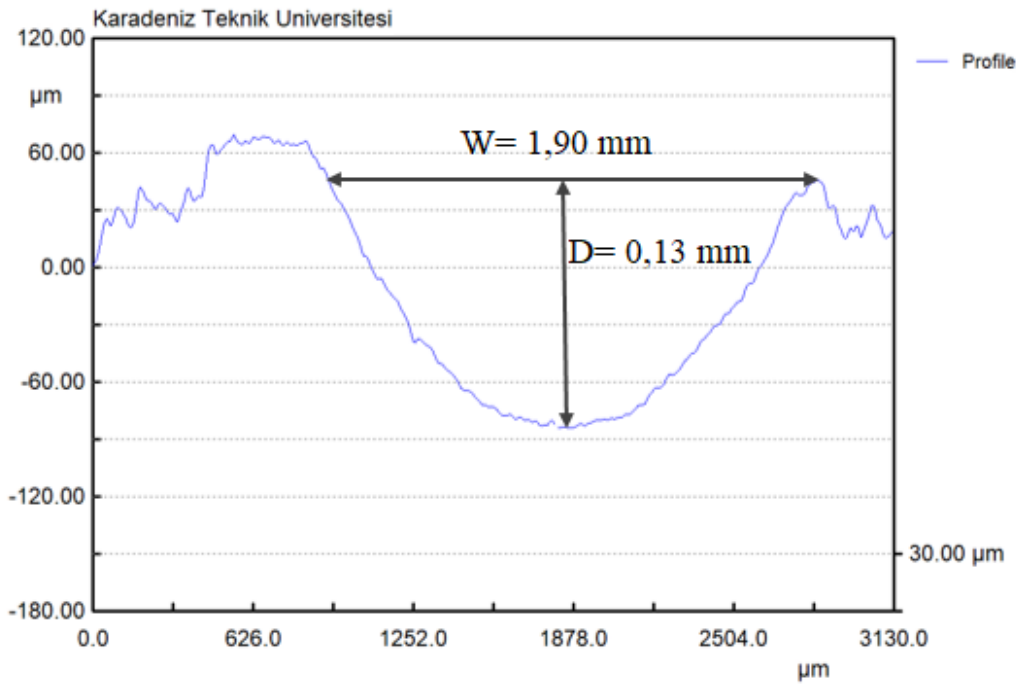
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deney Sonuçları

AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numuneler aynı deneysel şartlarda hava, azot ve deniz suyu ortamında oda sıcaklığında sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma iz derinliği (D) ve aşınma iz genişliği (W) aşınma izi çevresinin 4 farklı noktasından alınan değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Ortalama iz derinliğinin ve genişliğinin hangi bölgelerden alınarak hesaplandığı örnek olarak numune Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

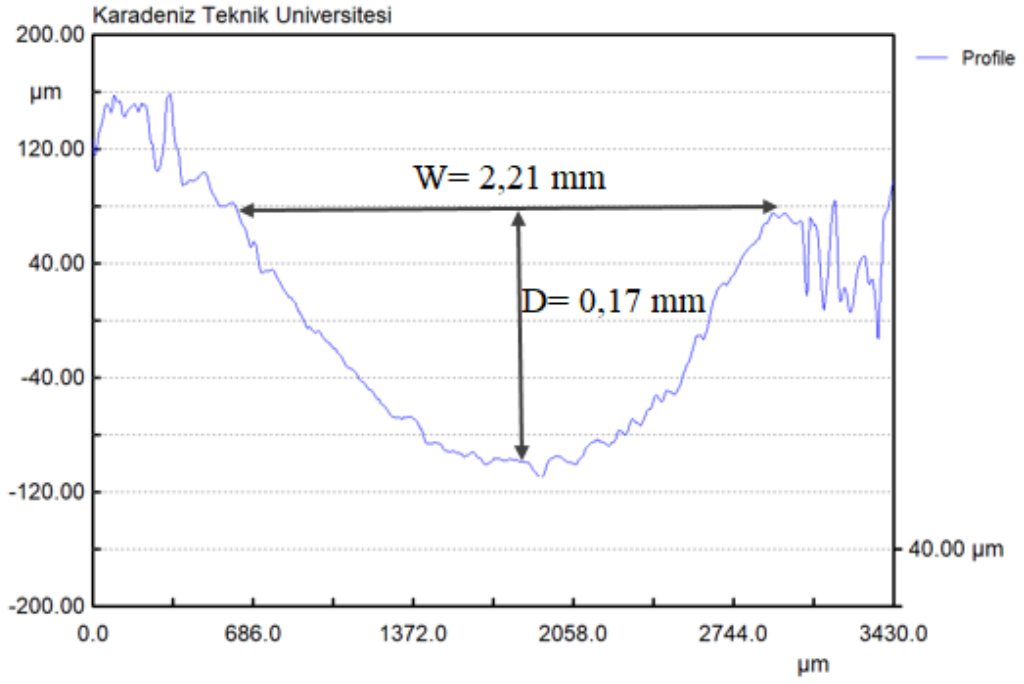
Profilometri cihazından hesaplanan bölgelerin örnek numune için iz derinlikleri ve genişlikleri Şekil 3.11-3.14'te verilmiştir. Numunelerin aşınma iz hacimleri profilometri cihazından, aşınma oranları ise yapılan çalışmalarda verilen formül ile hesaplanarak bulunmuştur.



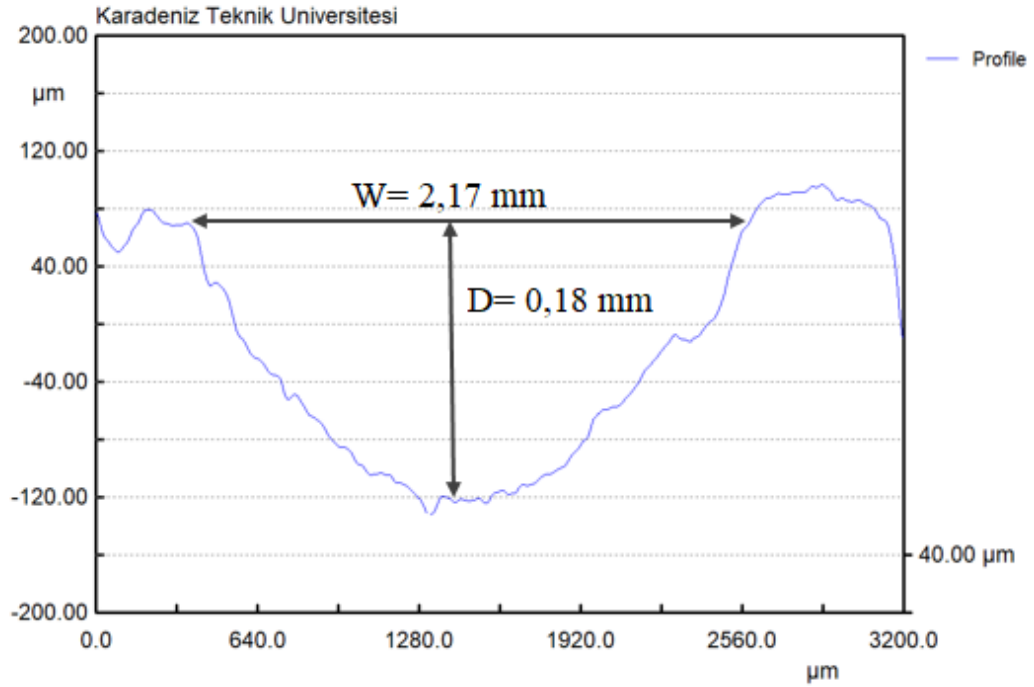
Şekil 3.10. Numune yüzeyinde aşınan bölgelerin iz derinliğinin ve genişliğinin ölçüldüğü kısımlar



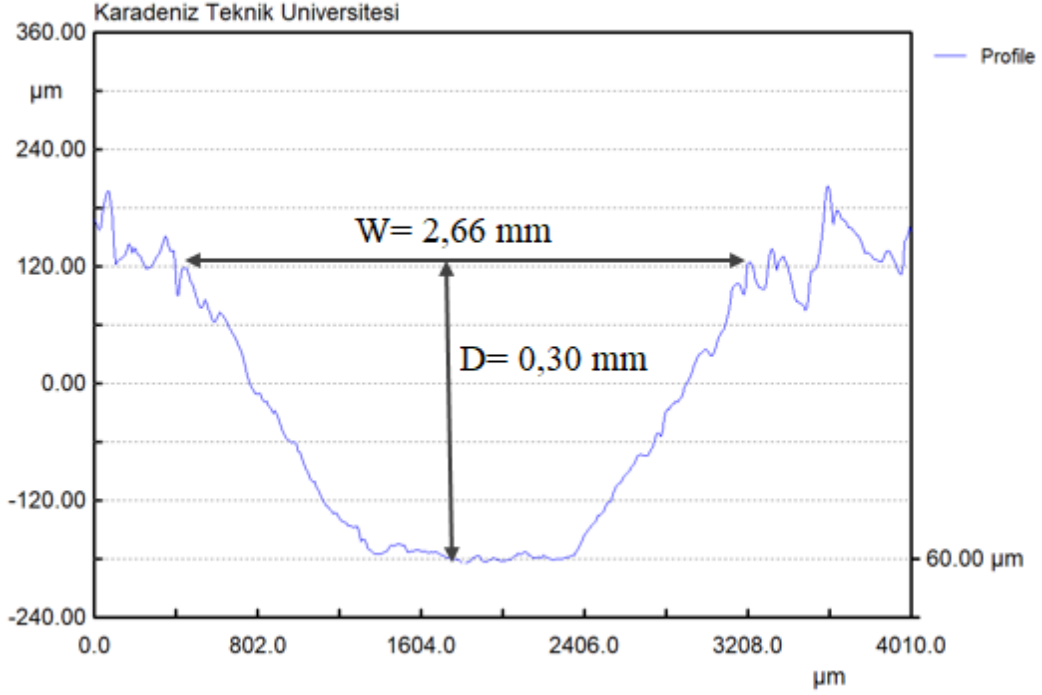
Şekil 3.11. 1. bölgenin iz derinliği ve genişliği



Şekil 3.12. 2. bölgenin iz derinliği ve genişliği

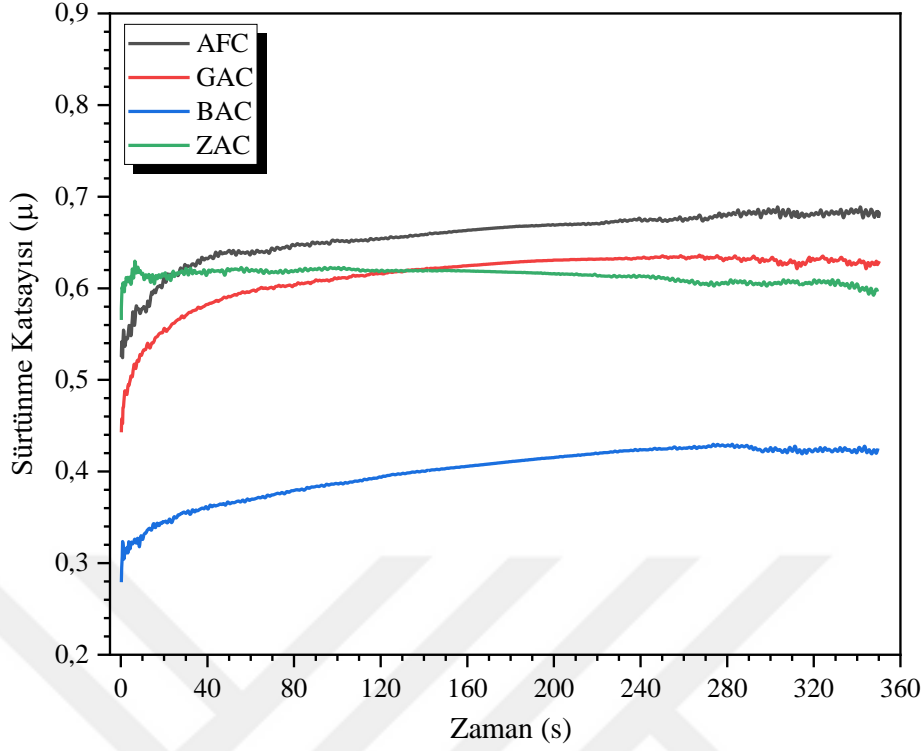


Şekil 3.13. 3. bölgenin iz derinliği ve genişliği



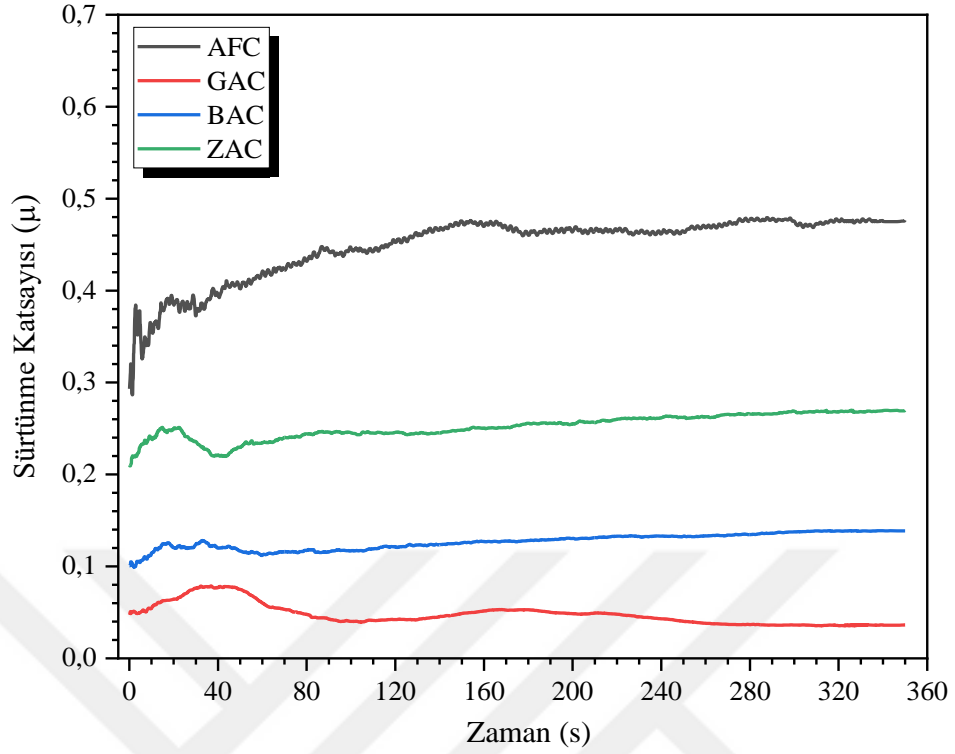
Şekil 3.14. 4. bölgenin iz derinliği ve genişliği

Farklı ortamlarda yapılan sürtünme katsayı (μ)-zaman grafikleri Şekil 3.15-3.17’de verilmiştir. Sürtünme katsayısının ilk aşamada düşük bir değerde olduğu, daha sonra kısa sürede hızla yüksek bir değere çıktığı ve sürtünme süreci boyunca nispeten sabit kaldığı görülmüştür. Bu değişiminin temel iki nedeni vardı: MAO seramik tabakası pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Sürtünmenin ilk aşamasında, bilye ve kaplanan malzeme noktasal temas halindedir ve sürtünme katsayısı nispeten küçüktür. Sürtünme süresinin uzamasıyla, bilye ile kaplanan malzeme arasındaki karşılıklı aşınma, ikisinin nokta temasından küçük düzlem temasına geçmesine neden olur. Bu arada, sürtünme katsayısı yavaş yavaş artar ve sonra kararlı hale gelir. Ayrıca, MAO kaplamanın özel yapısı nedeniyle, sürtünme başlangıcında bilye numune yüzeyinin gözenekli ve gevşek tabakasını sıkıştırmıştır. Bununla birlikte, yüksek basınç altında, gevşek tabaka kolayca aşınmış ve sürtünme katsayısını artırmıştır. Sürtünme zamanla arttıkça, bilye kademeli olarak yoğun iç tabakaya ilerlemektedir, bu nedenle sürtünme katsayısı yavaşça dalgalanmış ve nispeten sabit kalmıştır (Liu vd., 2018; Guo vd., 2021).



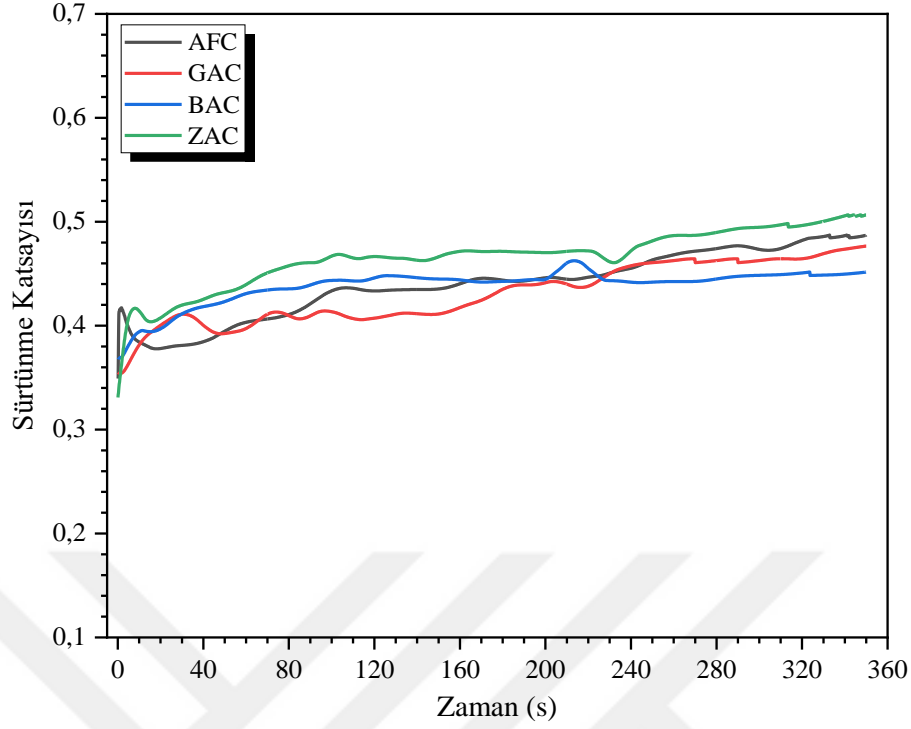
Şekil 3.15. Hava ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi

Hava ortamında yapılan sürtünme katsayısı (μ)-zaman grafiği Şekil 3.15 incelendiğinde, eklenen katkı maddelerinin yağlayıcı özelliği göstererek sürtünme katsayılarına olumlu etki etmiştir. Katkı maddelerine bakıldığı zaman en düşük sürtünme katsayısını BAC kodlu numunede sonuçlanmıştır. BAC kodlu numune yüzey pürüzlülüğü ve gözenek boyutunun diğer numunelere göre en yüksektir. Hava ortamında yapılan aşınma testinde yüksek yüzey pürüzlülüğünün sürtünme üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Li ve Di (2017)'nin yaptıkları bir çalışmada, 2024 Al alaşımına, farklı oranlarda h-BN partikülleri eklenerek yapılan mikro ark oksidasyon işlemi ile en düşük sürtünme katsayısı elde edilebileceklerini belirlemişlerdir. Ma ve diğerleri (2014)'nin yaptıkları başka bir çalışmada, 6061 Al alaşımına grafit katkılı ve katkısız mikro ark oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Grafit katkılı numunenin yüzey pürüzlülük değeri yüksek olmasına rağmen, sürtünme katsayısı değeri grafit katkısız numuneye göre düşük bulunmuştur.



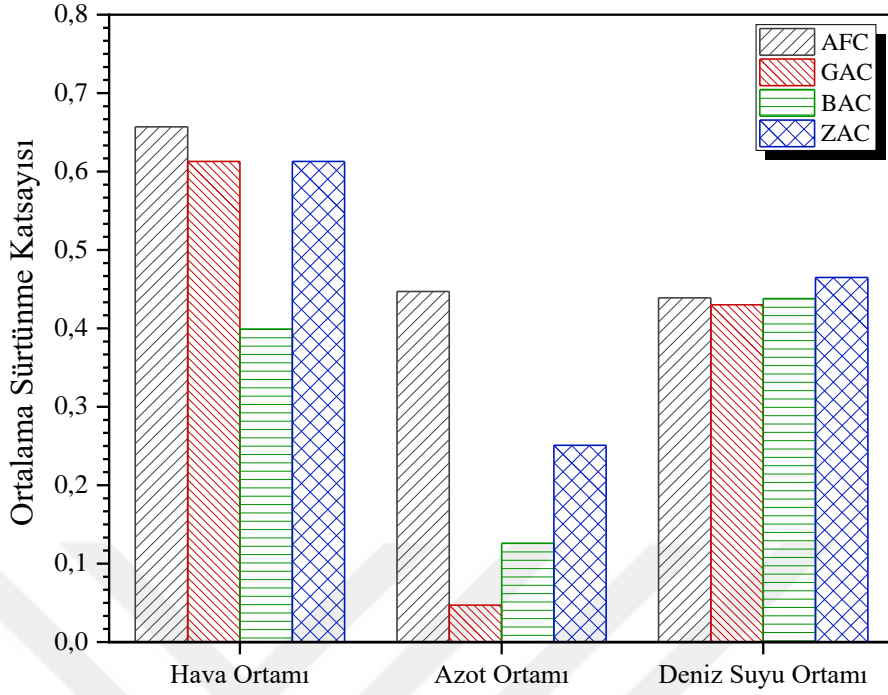
Şekil 3.16. Azot ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi

Şekil 3.16’da verilen azot ortamında sürtünme katsayısı (μ)-zaman grafiğinde, katkı maddelerinin düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. İlk başta bütün numunelerin sürtünme katsayıları artmış daha sonra düşüş göstermiştir. Ancak AFC kodlu ve GAC kodlu numunenin sürtünme katsayıları birbirini tekrarlayan dalgalanmalar gözlenmiştir. Azot ortamında yapılan aşınma testinde GAC kodlu numunenin en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunenin içerisine eklenen grafit katkı parçacıkların diğer ortamlara kıyasla azot ortamında yağlayıcı özelliğinin daha iyi olması sürtünme üzerinde en iyi sonucu vermiştir. Liu ve diğerleri (2018)’nin yaptıkları bir çalışmada, Al alaşımına, grafit ve MoS₂ katkı maddeleri ilave ederek yapılan mikro ark oksidasyon işlemi sonucunda hem hava hem de azot ortamında aşınma testi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan işlem sonucunda, katkılı numunelerin katkısız numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı bulmuşlardır. Aynı zamanda, katkılı numuneler azot ortamında sürtünme katsayısının, hava ortamına göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.



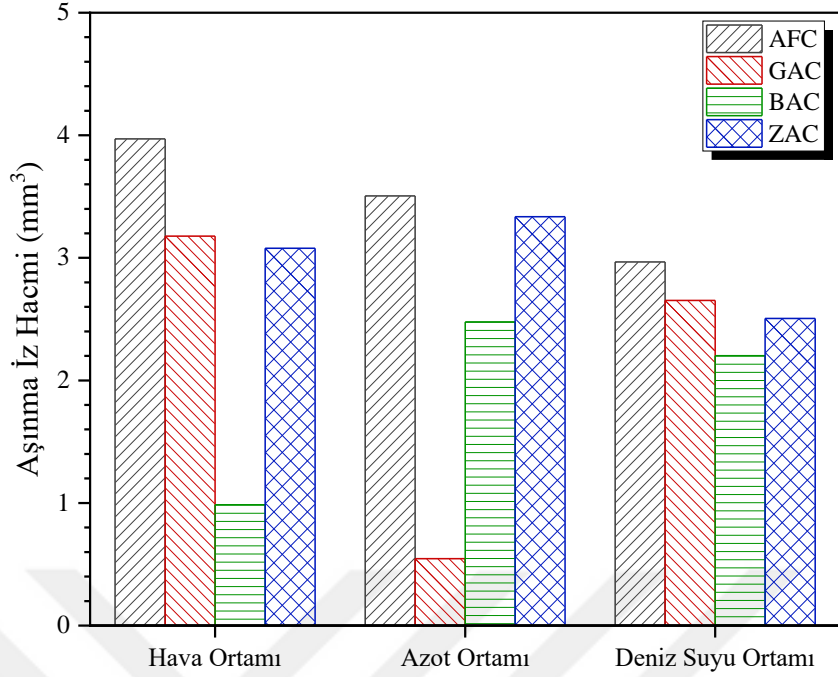
Şekil 3.17. Deniz suyu ortamında sürtünme katsayısının zamanla değişim eğrisi

Şekil 3.17’de verilen deniz suyu ortamındaki sürtünme katsayısı (μ)–zaman grafiğinde ise, diğer ortamlarda olduğu gibi ilk başta bütün numunelerde artış olduğu belirlenmiştir. Numunelerdeki kaplamanın pürüzlü yüzeyi, sürtünme işlemi sırasında sürtünme katsayısının üç ortamda da dalgalanmasına neden olmuştur. Diğer ortamlardan farklı olarak deniz suyu ortamında sürtünme katsayısına katkı maddelerinin etkisi olmamıştır. ZAC kodlu numune, AFC kodlu numuneden daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. MAO işlemiyle kaplanan numunelerin deniz suyunda sürtünme katsayısının, ortam havasında olanlardan belirgin bir şekilde daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, kayganlaştırıcı ortam tarafından sarılan parçaların, akışkan sulu çözeltinin yardımıyla hareket ederek ortamdaki uzaklaştırılmasıdır. Bu nedenle, deniz suyundaki sürtünme katsayısı, hava ortamındaki numunelere göre düşük çıkmıştır. Guo ve diğerleri (2021) MAO işlemiyle kaplanan Ti alaşımının hava ortamı ve deniz suyu ortamında yapmış oldukları bir çalışmada, deniz suyu ortamında sürtünme katsayısının, hava ortamından daha düşük olduğunu vurgulamışlardır.



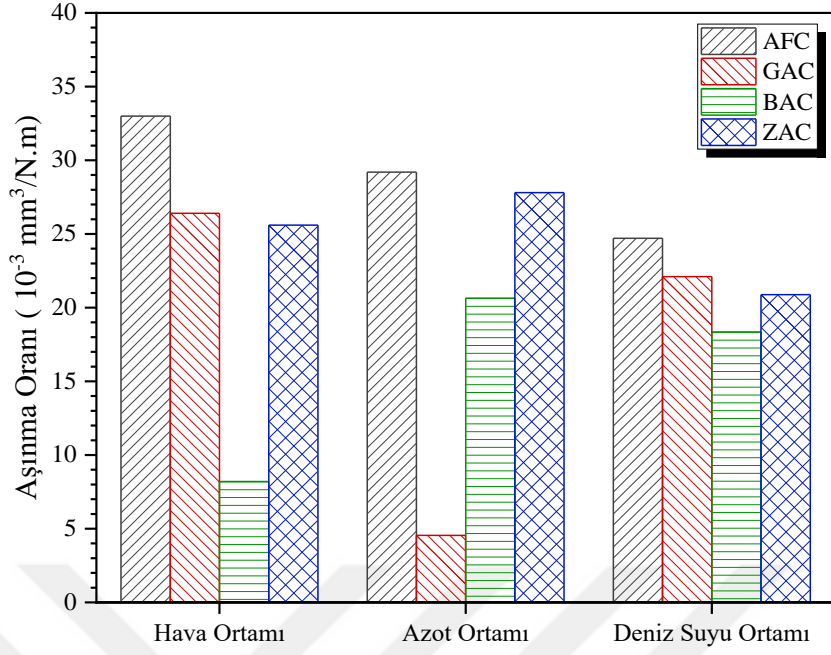
Şekil 3.18. Ortamlara göre numunelerin ortalamalama sürtünme katsayısı

Farklı ortamlara bağlı olarak değişen ortalama sürtünme katsayısı grafiği Şekil 3.18’de verilmiştir. Hava ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,657, 0,613, 0,399 ve 0,613’dir. AFC kodlu numune hava ortamında yapılan aşınmada ortalama sürtünme katsayısı diğer katkı maddeleri eklenmiş numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Ortalama sürtünme katsayısı genel olarak en düşük olan azot ortamında yapılan GAC kodlu numunedir. Azot ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,447, 0,047, 0,126 ve 0,251’dir. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,439, 0,430, 0,438 ve 0,465’dir. Genel olarak üç ortama bakıldığı zaman en düşük ortalama sürtünme katsayısının azot ortamında olduğu görülmüştür. Deniz suyu ortamında yapılan aşınmada GAC kodlu, BAC kodlu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları değerleri birbirine yakın ancak AFC kodlu numuneden düşük çıkmıştır. Katkı maddelerinin eklenmesiyle kaplanan numune üzerindeki kaplama yüzeyi daha pürüzsüz hale gelmektedir. Bunun nedeni, katkı maddelerinin yapışma eğilimine sahip olması ve gözeneklerin eklenen parçacıklar tarafından doldurulmasıdır. Bunun sonucunda, sürtünme katsayısı etkilenmektedir (Zhao vd., 2016).



Şekil 3.19. Ortamlara göre numunelerin aşınma iz hacmi

Farklı ortamlara bağlı olarak değişen aşınma iz hacmi (mm^3) grafiği Şekil 3.19'da verilmiştir. Hava ortamı, azot ortamı ve deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde en düşük aşınma iz hacmi (mm^3) azot ortamında meydana gelmiştir. Azot ortamında numunelere bakıldığında en düşük aşınma iz hacmi GAC kodlu numunede görülmüştür. Hava ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma iz hacmi sırasıyla $3,970 \text{ mm}^3$, $3,177 \text{ mm}^3$, $0,985 \text{ mm}^3$ ve $3,079 \text{ mm}^3$ ' tür. Azot ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma iz hacmi sırasıyla $3,506 \text{ mm}^3$, $0,546 \text{ mm}^3$, $2,478 \text{ mm}^3$ ve $3,336 \text{ mm}^3$ 'tür. Azot ortamında, BAC kodlu numunenin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması iz hacminin daha yüksek olmasına yol açmıştır. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma iz hacmi sırasıyla $2,966 \text{ mm}^3$, $2,653 \text{ mm}^3$, $2,201 \text{ mm}^3$ ve $2,506 \text{ mm}^3$ 'tür.



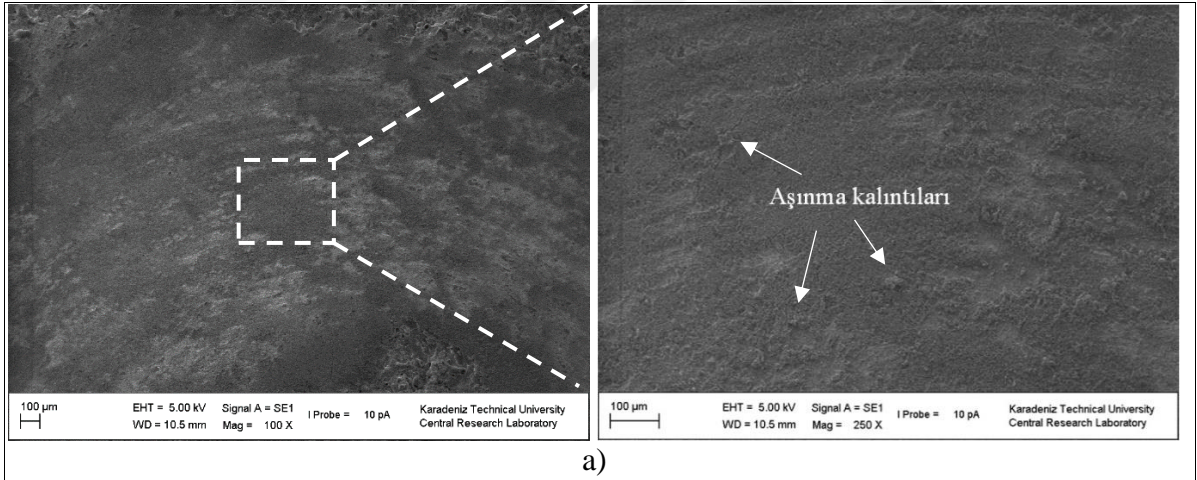
Şekil 3.20. Ortamlara göre aşınma oranları

Farklı ortamlara bağlı olarak değişen aşınma oranı grafiği Şekil 3.21’de verilmiştir. Genel ortamlara ve numunelere bakıldığı zaman en düşük aşınma oranı azot ortamında yapılan GAC kodlu numunede meydana gelmiştir. En düşük aşınma oranı ise azot ortamında BAC kodlu numunede görülmüştür. Hava ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sırasıyla aşınma oranları 33×10^{-3} , $26,4 \times 10^{-3}$, $8,20 \times 10^{-3}$ ve $25,6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak bulunmuştur. Azot ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sırasıyla aşınma oranları $29,2 \times 10^{-3}$, $4,55 \times 10^{-3}$, $20,65 \times 10^{-3}$ ve $27,8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak hesaplanmıştır. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin sırasıyla aşınma oranları $24,71 \times 10^{-3}$, $22,10 \times 10^{-3}$, $18,35 \times 10^{-3}$ ve $20,88 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N.m})$ olarak elde edilmiştir.

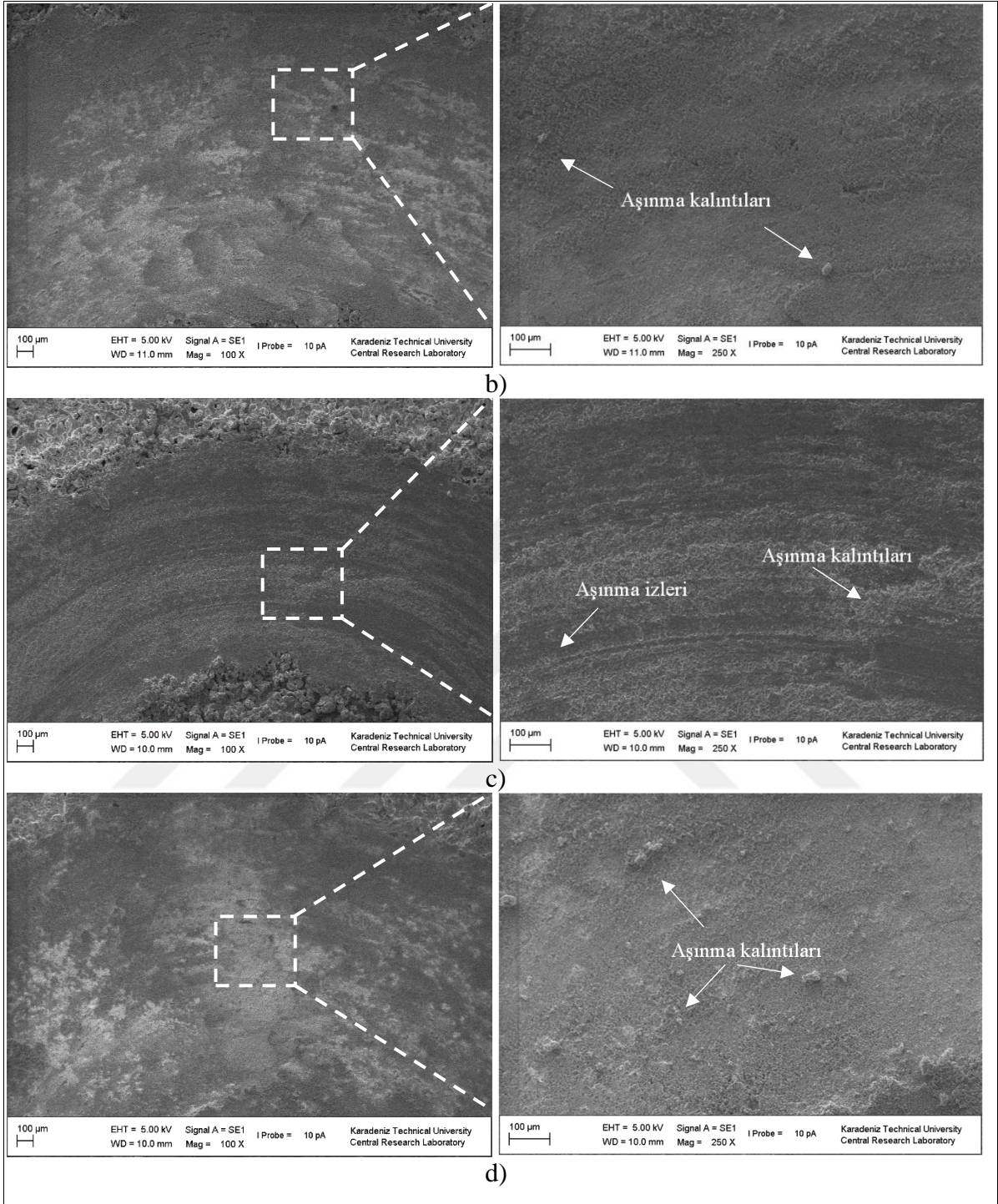
Şekil 3.21, 3.23, 3.25’te hava ortamı, azot ortamı ve deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve Şekil 3.22, 3.24, 3.26’da aşınma iz profilleri verilmiştir.

Şekil 3.22’de hava ortamında numunelerin SEM görüntüsüne bakıldığında, aşınma izinin geniş olduğu ve iz boyunca aşınma kalıntılarının olduğu görülmüştür. Şekil 3.22(c)’de BAC kodlu numunenin aşınma izi daha az derin ve aşınmış alan nispeten daha pürüzsüz yüzeye sahiptir. BAC kodlu numune diğer numunelere kıyasla düşük sürtünme katsayısı göstererek, kaplama yüzeyinde daha az aşınma ve yıpranma sağlamıştır. Kaplama

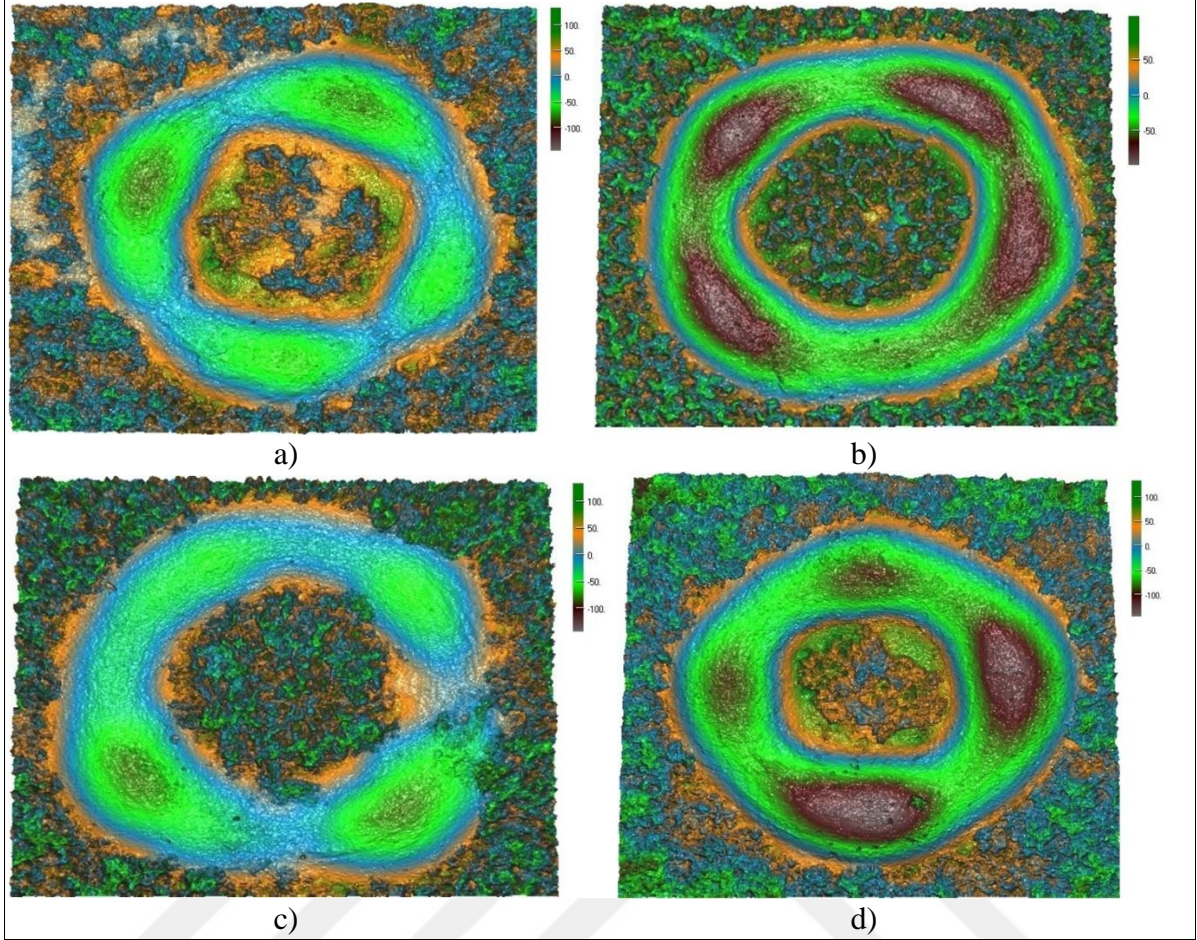
yüzeyindeki mikro gözenekler, kayma işlemi sırasında oluşan ince birikintiler sürtünme katsayısını azaltan etken olmuştur. MAO alümina tabakası, taneler arasında nispeten zayıf arayüzlere sahip gözenekli bir yapı sergilemektedir. Bu durum AFC, GAC ve ZAC kodlu numunelerinde kaplamanın gözeneklerinin genişlemesine ve aşınma izlerinin yüzeyinde aşınmayı hızlandırmak için sert aşındırıcılar gibi davranan birçok kopan parçalar ve aşınma kalıntıları bırakmıştır. Ayrıca, numune yüzeyinde pul pul dökülmeler oluşturmuş ve sürtünme yüzeyini aşındırarak sürtünme katsayısını ve kaplamaların aşınma izlerini arttırmıştır. Aşınma testi sırasında bütün numuneler de abrasif aşınma gözlenmiştir. h-BN katkı maddesi eklenen BAC kodlu numune diğer numunelerle karşılaştırıldığında abrasif aşınma etkilerini azaltmaktadır. Ao ve diğerleri (2016)'nin yaptıkları bir çalışmada, h-BN katkı maddesi eklenen numunelerin diğer numunelere göre daha fazla aşınma sergilediğini bulmuşlardır. Li ve Di (2017)'nin yaptıkları başka bir çalışmada, Al alaşımına h-BN katkı maddesi eklenerek MAO ile kaplama işlemi yapmışlardır. Katkı maddesi eklenen numuneler daha az aşınma izleri göstermiş ve aşınma dirençleri iyi sonuçlanmıştır.



Şekil 3.21. Hava ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC



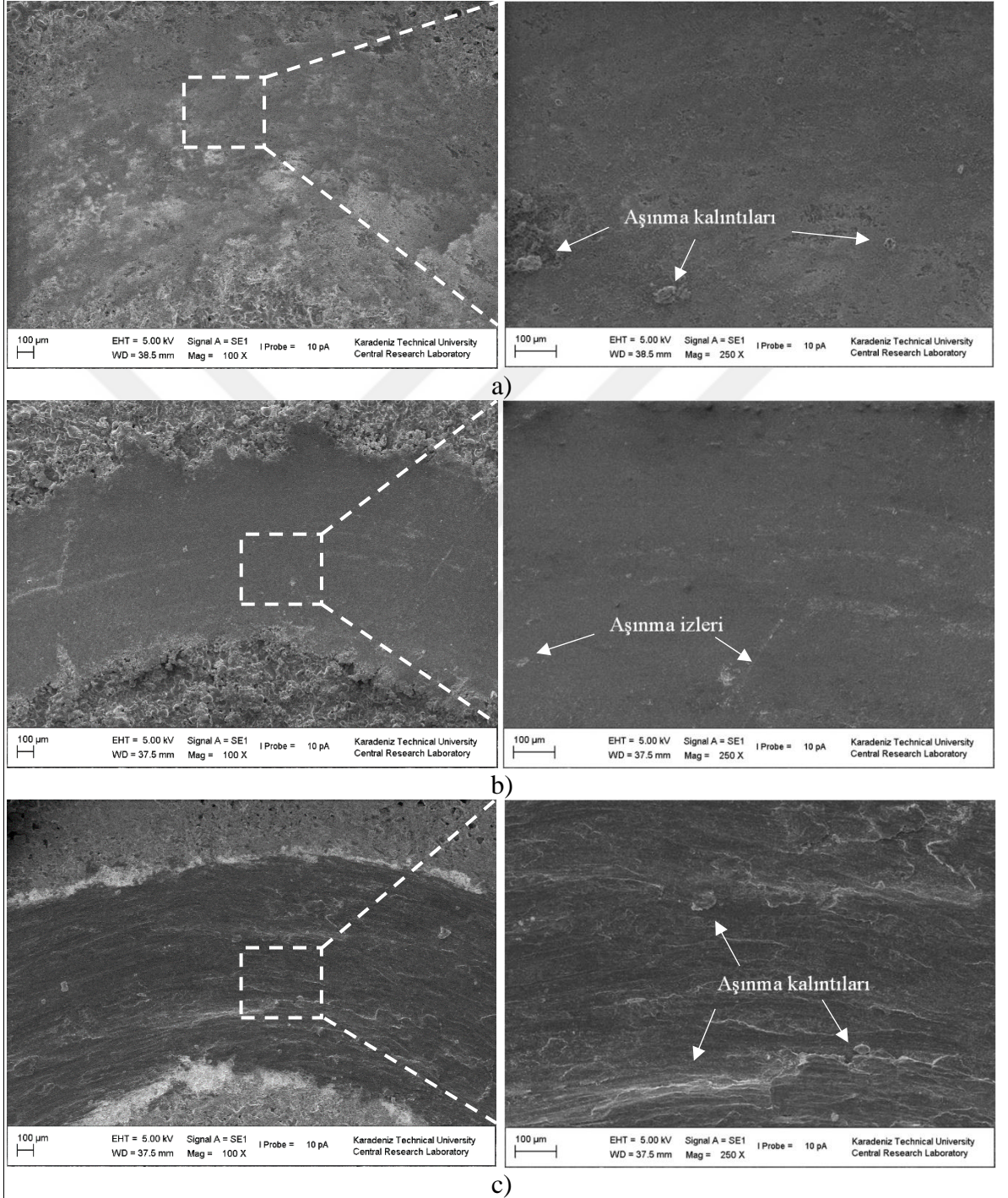
Şekil 3.21'in devamı. Hava ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC



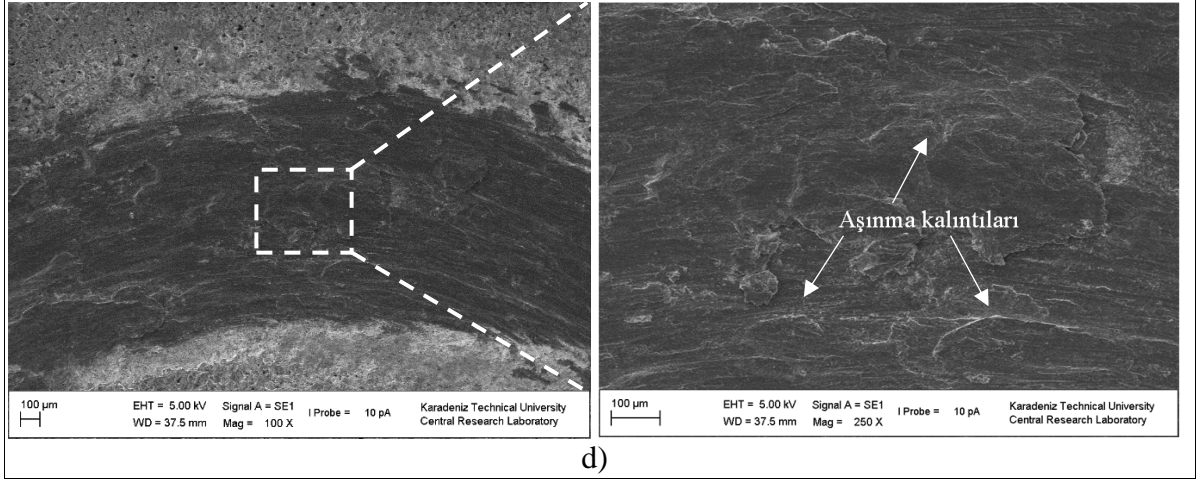
Şekil 3.22. Hava ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC

Şekil 3.23'te azot ortamında numunelerin SEM görüntüsün de aşınma izlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Hava ortamında olduğu gibi azot ortamında da aşınan bölgelerde bilyenin sürtünmesi sonucu aşınan kalıntılar tespit edilmiş ve abrazif aşınma görülmektedir. BAC ve ZAC kodlu numunelerin aşınma kayma yönü boyunca pul görünümünün diğer ortamlardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Grafit içeren GAC kodlu numunenin aşınma izi boyutu küçüktür, aşınma izi belirgin değildir ve aşınma yüzeyi pürüzsüzdür. Aşınma işlemi sırasında oluşan aşındırıcı parçacıklar gözenekleri ve çatlakları doldurmuştur. BAC ve ZAC kodlu numunenin aşınma yüzeyinin daha katmanlı ve aşınma kalıntılarının fazla olduğu görülmüştür. Bu duruma, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığının etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kaplama yüzeyinde, bilye yük altında iç yoğun tabakaya sıkıştırılmakta zorlanır ve gözenekli dış tabakadaki pürüzler kırılır ve aşınma kalıntıları oluşur. Bu nedenle, aşınan yüzey aşınma tabakası ile kaplanır. Aşınma kalıntıları

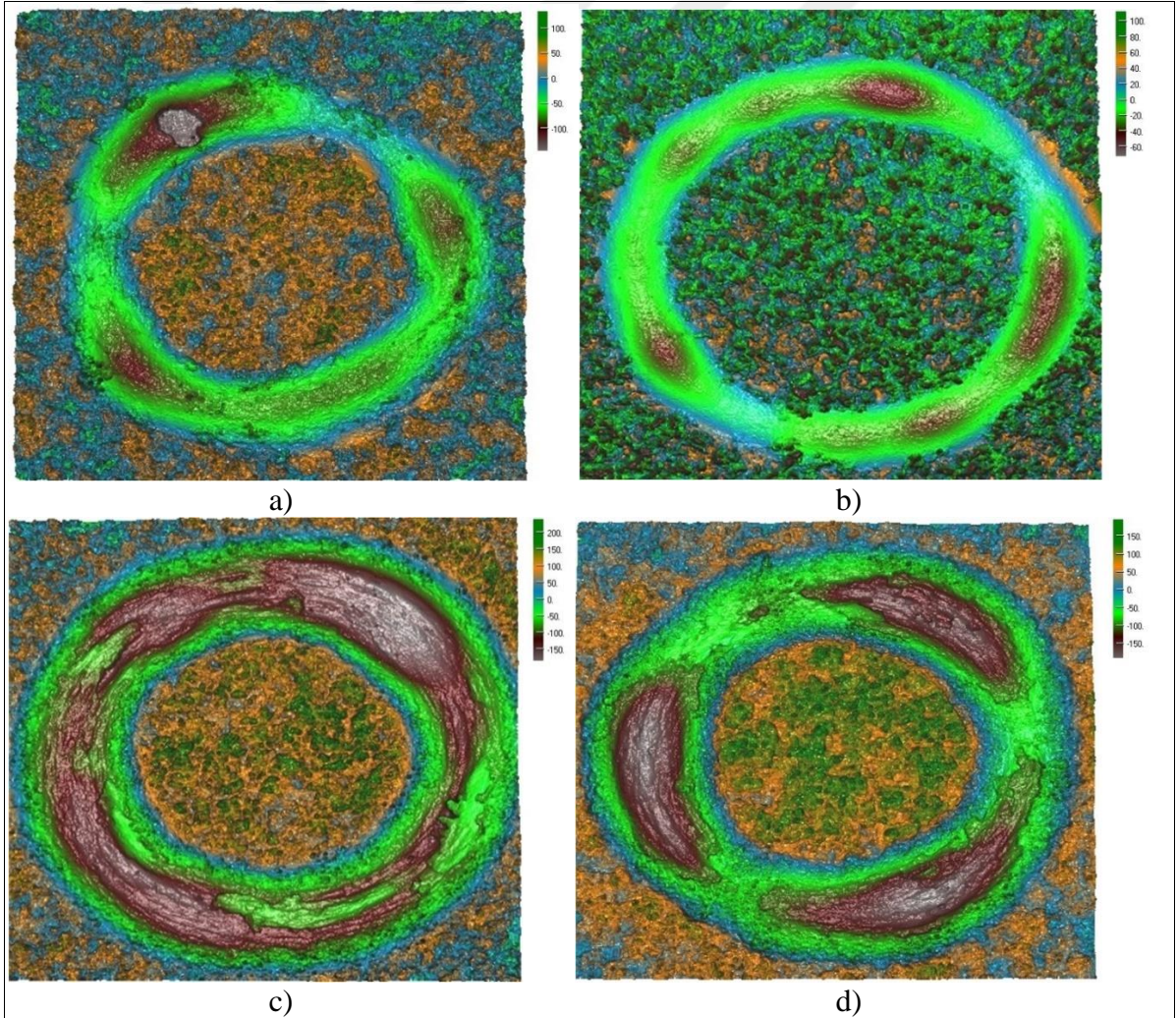
sert aşındırıcılar olarak işlem görmüş ve aşınma direncine olumsuz etkilere yol açmıştır (D. Zhang vd., 2018).



Şekil 3.23. Azot ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC

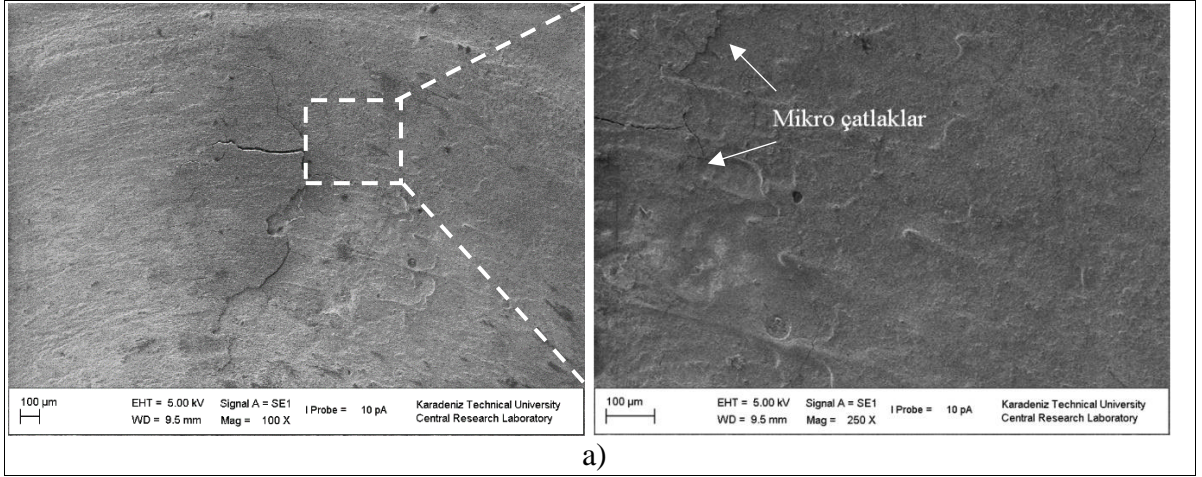


Şekil 3.23'ün devamı. Azot ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC

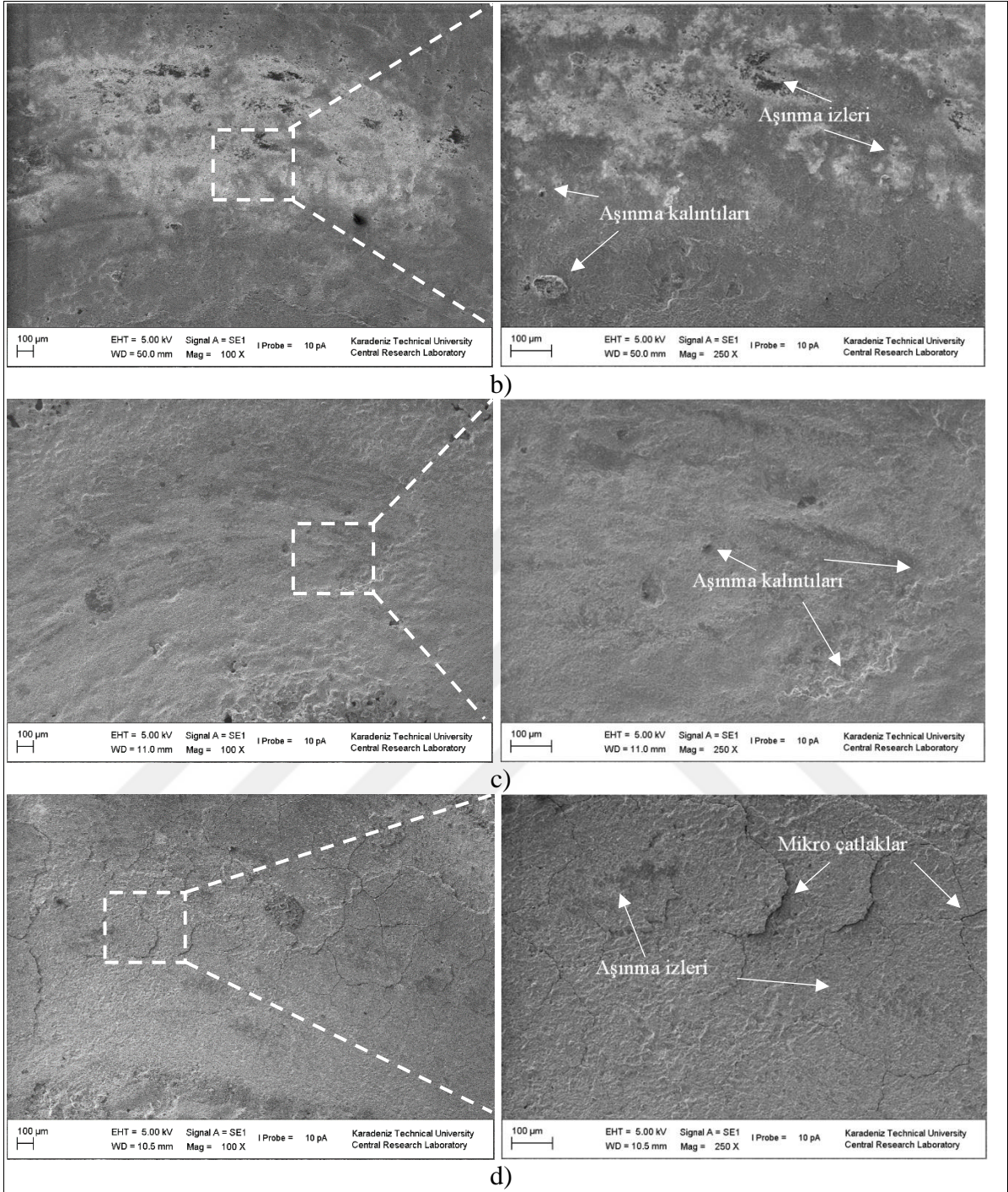


Şekil 3.24. Azot ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC

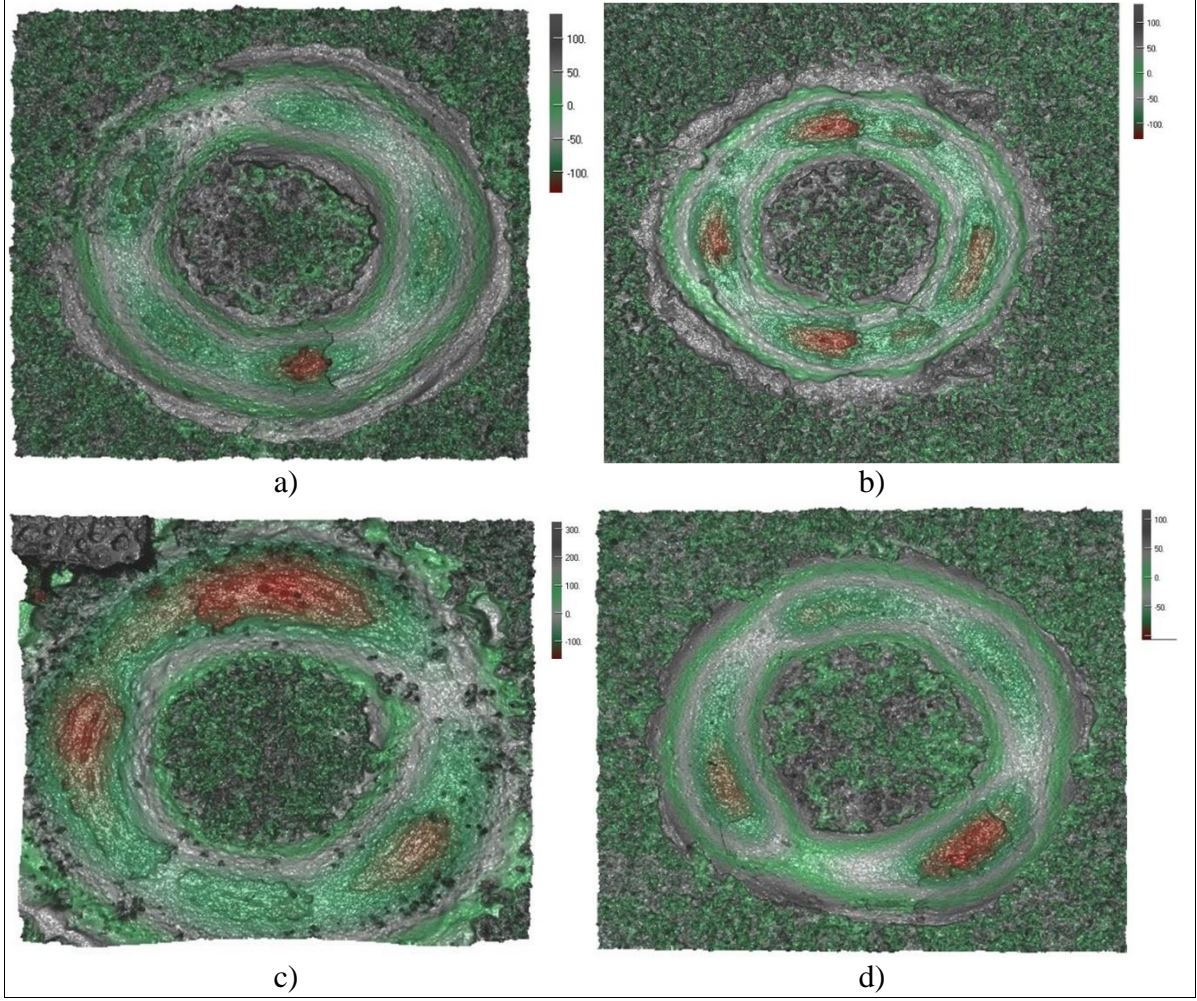
Şekil 3.25'te deniz suyu ortamında numunelerin SEM görüntülerinde ise, aşınma izinin fazla olmasından dolayı kaplama yüzeyine ulaşmıştır. Kaplama yüzeyinin zayıf bölgeleri aşınmış ve kolayca kırılmıştır. Oluşan birikintiler, aşınma izinde çiziklere, büyük mikro çatlaklara ve kırıklara neden olmuştur. Aynı zamanda, gözenekli ve pürüzlü yüzey düz hale gelmiştir. Düz aşınan yüzey, deniz suyunun iyi sürtünme önleyici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. ZAC ve AFC kodlu numunelerde, kaplamanın aşınma izleri ve mikro çatlakların açıkça görülebilmektedir. GAC ve BAC kodlu numunede ise aşınma kalıntılarının olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, GAC kodlu numune daha belirgin aşınma izlerine sahiptir. Deniz suyu ortamında en iyi sonucu BAC kodlu numunede meydana gelmiştir. Yüzeyde aşınma kalıntılarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aşınma kalıntıları kaplama yüzeyindeki gözenekleri kapatarak daha düz bir aşınma yüzeyi elde edilmiştir, böylece daha fazla kalıntı oluşumunu azaltmıştır ve aşınma direncini artırmaya yardımcı olmuştur. Guo ve diğerleri (2021)'nin, Ti alaşımının MAO işlemi ile kaplanması sonucunda deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde, aşınan yüzeylerin pürüzsüz ve mikro çatlakların olduğu bulunmuştur. W. Chen ve diğerleri (2021)'nin deniz suyu ortamında, aşınan yüzeyin pürüzsüz olduğunu fakat birçok çatlaklar, kırılmalar ve aşınma kalıntılarının olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 3.25. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC



Şekil 3.25'in devamı. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyi numunelerinin SEM görüntüleri (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC



Şekil 3.26. Deniz suyu ortamında numunelerin aşınma iz profili (a) AFC, (b) GAC, (c) BAC ve (d) ZAC

3.5. Korozyon Sonuçları

AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri anodik ve katodik bölgeleri içermektedir ve bu bölgelerin eğrilerinden çizilen iki doğrusal teğetin kesişim noktası korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerini vermektedir. Korozyon akım yoğunluğu genellikle korozyon reaksiyonunun kinetiğini değerlendirmek için kullanılır ve i_{corr} ne kadar küçükse korozyon hızı o kadar yavaş olur.

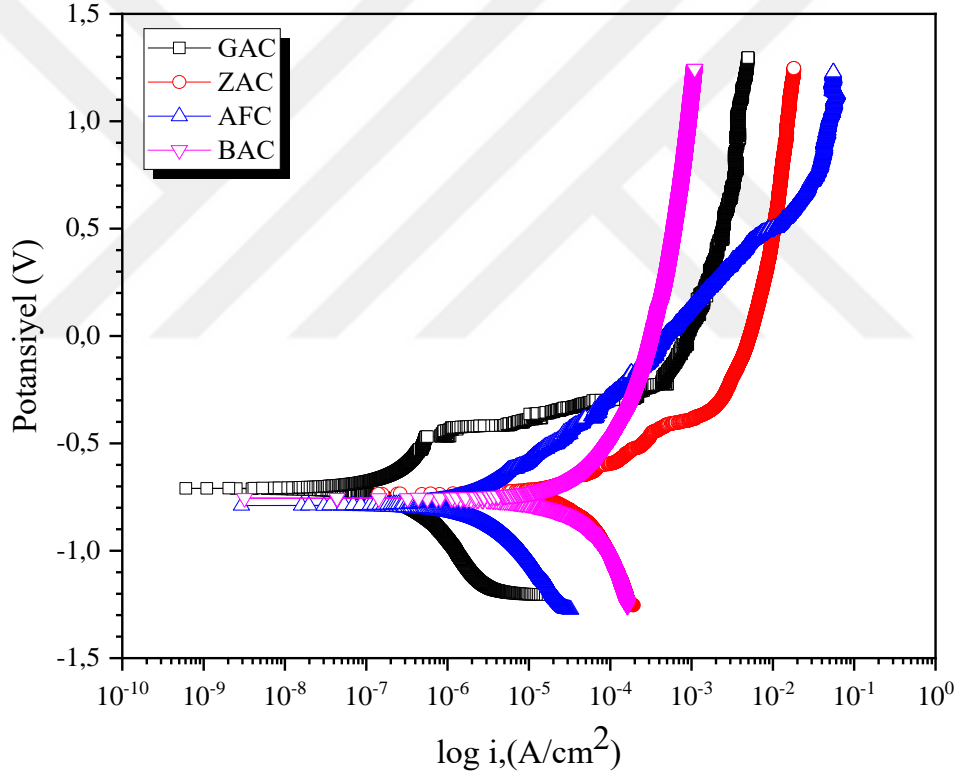
Numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 3.27’de verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığı zaman numunelerin anodizasyon bölgesindeki değişimler meydana

gelmiştir. Bu değişimin temel sebebi numunenin korozyona başlaması için gerekli olan potansiyel değere ulaşması ve bunun sonucu olarak yüzeydeki koruyucu oksit filmin parçalanarak yapıdan uzaklaşmasıdır. Koruyucu oksit tabakası yapıdan uzaklaştıktan sonra kaplama yüzeyinde korozyon oluşumu başlamaktadır ve kaplama yüzeyinde çukurcuk oluşumu meydana gelmektedir (Bordbar-Khiabani vd., 2019). AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin Tafel eğrilerinden elde edilen potansiyel değerleri (E_{corr}) sırasıyla -789,1, -709,5, -735,7, -735,6 mV olarak elde edilmiştir. Korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ise sırasıyla $8,74 \times 10^{-5}$, $6,35 \times 10^{-7}$, $1,73 \times 10^{-7}$, $7,51 \times 10^{-5}$, $9,88 \times 10^{-6}$ A/cm² olarak bulunmuştur. Elde edilen korozyon potansiyelleri (E_{corr}), korozyon akım yoğunlukları (i_{corr}) ve korozyon hızları Tablo 3.2’de verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere, en iyi korozyon direncinin i_{corr} değeri sıfıra yakın olan GAC kodlu grafit katkılı numunedir. En düşük korozyon direnci ise AFC kodlu kaplamasız numune sergilemiştir. GAC kodlu numunede diğer kodlu numunelere göre i_{corr} değerinin sıfıra yakın olması ve korozyonun hızının küçük olması daha iyi sonuç olduğunu göstermektedir. Y. Chen ve diğerleri (2021, 2023)’nin yaptığı birkaç çalışmada, AZ31 Mg-esaslı alaşımına, grafen oksit katkılı yapılan mikro ark oksidasyon işlemi ile belirgin bir şekilde korozyon direncinde artış görülmüştür. Wu ve diğerleri (2010), TiAl alaşımına katkılı ve katkısız mikro ark oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Katkısız mikro ark oksidasyon yapılan numunenin, TiAl alaşımına göre korozyon direnci yüksek iken, grafen oksit katkılı mikro ark oksidasyon yapılan numunenin hem katkısız hem de TiAl alaşımına göre korozyon direnci yüksek bulunmuştur.

Kaplamanın varlığı, kaplamanın bileşimi, katkı maddeleri, kalınlığı, gözenekliliği ve mikro çatlaklar, numunelerin elektrokimyasal korozyon davranışını etkilemektedir. BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin AFC kodlu numuneye göre korozyon direncinin düşük olması kaplama üzerinde oluşan gözenek çaplarının boyutuna ve aynı zamanda kaplama kalınlığına bağlanmaktadır (Y. Zhang vd., 2018; Bordbar-Khiabani vd., 2019; Famiyeh ve Huang, 2019). Farklı miktarlarda Cu içeren Al alaşımları üzerinde yapılan bir çalışmada, mikro ark oksidasyon ile kaplanmış numunelerin belirgin bir şekilde korozyon dirençlerinin yüksek olduğu, yani i_{corr} değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir (Dai vd., 2022). Cui ve diğerleri (2017), kaplamanın gözenekliliği korozyon direncini etkilerken, kaplama kalınlığının önemsiz bir etkiye sahip olduklarını vurgulamışlardır.

Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakıldığında, BAC kodlu numunenin korozyon direnci düşük olması, yüzey pürüzlülüğünün yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Li ve diğerleri (2022)’nin yüzey pürüzlülükleri üzerine yapmış oldukları bir çalışmada, yüzey

pürüzlülüğü yüksek MAO yöntemiyle yapılmış bir Mg alaşımının korozyon direncinin düşük, yüzey pürüzlülüğü düşük olanın ise korozyon direnci yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca Yang ve diğerleri (2022), daha düşük pürüzlülüğün daha iyi bir korozyon direnci olduğu ifade etmişlerdir. Diğer bir çalışmada da, yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir şekilde korozyon direncini etkilediği gösterilmiştir (Nashrah vd., 2019). Mikro gözeneklerin belirgin büyümesi AFC kodlu numunede gerçekleşmiştir. MAO ile üretilmiş, korozyon sonrası bölgesel küçük mikro gözeneklerden daha önce literatürde bahsedilmiştir (Chen vd., 2017). Nitekim bu durum, daldırma testlerinde çatlak, kırılma, çatlama ve oyuk olarak daha belirgin şekilde gözlemlenebilmektedir (Gu vd., 2012).



Şekil 3.27. MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrisi

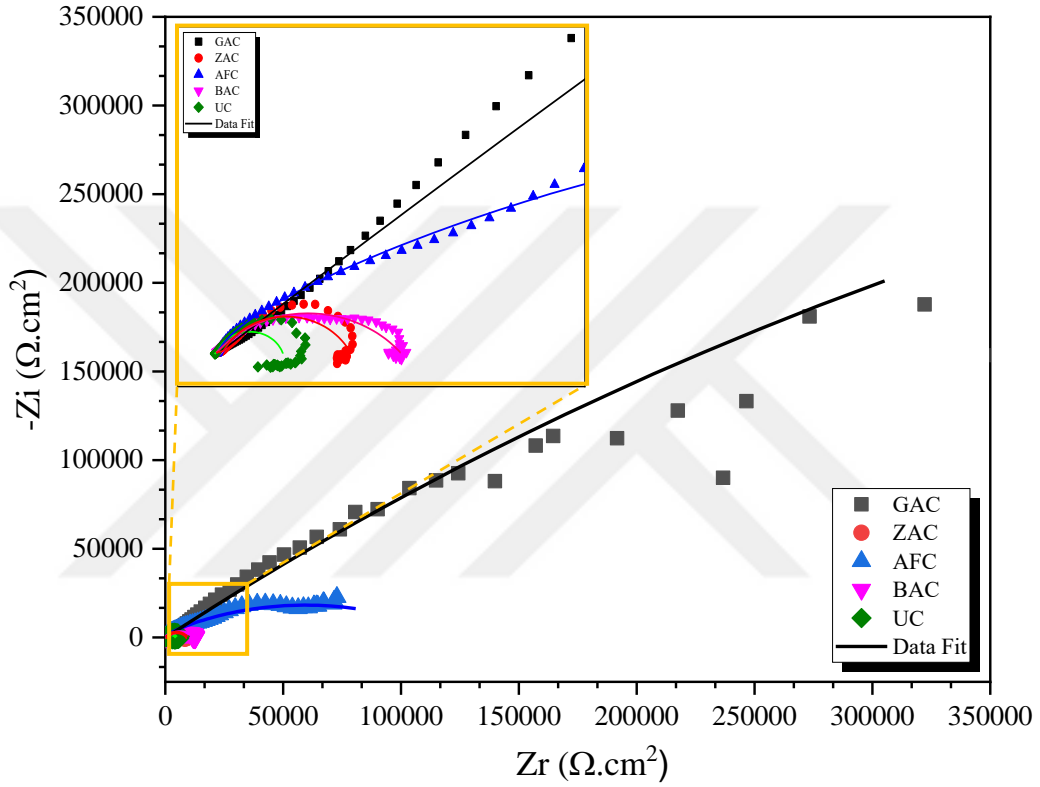
Tablo 3.2. Tafel ölçümleri sonucunda elde edilen potansiyel (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon hızı değerleri

Numune Kodu	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	Korozyon Hızı
AFC	-789,1	$6,35 \times 10^{-7}$	0,040
GAC	-709,5	$1,73 \times 10^{-7}$	0,011
BAC	-735,7	$7,51 \times 10^{-5}$	4,843
ZAC	-735,6	$9,88 \times 10^{-6}$	0,637

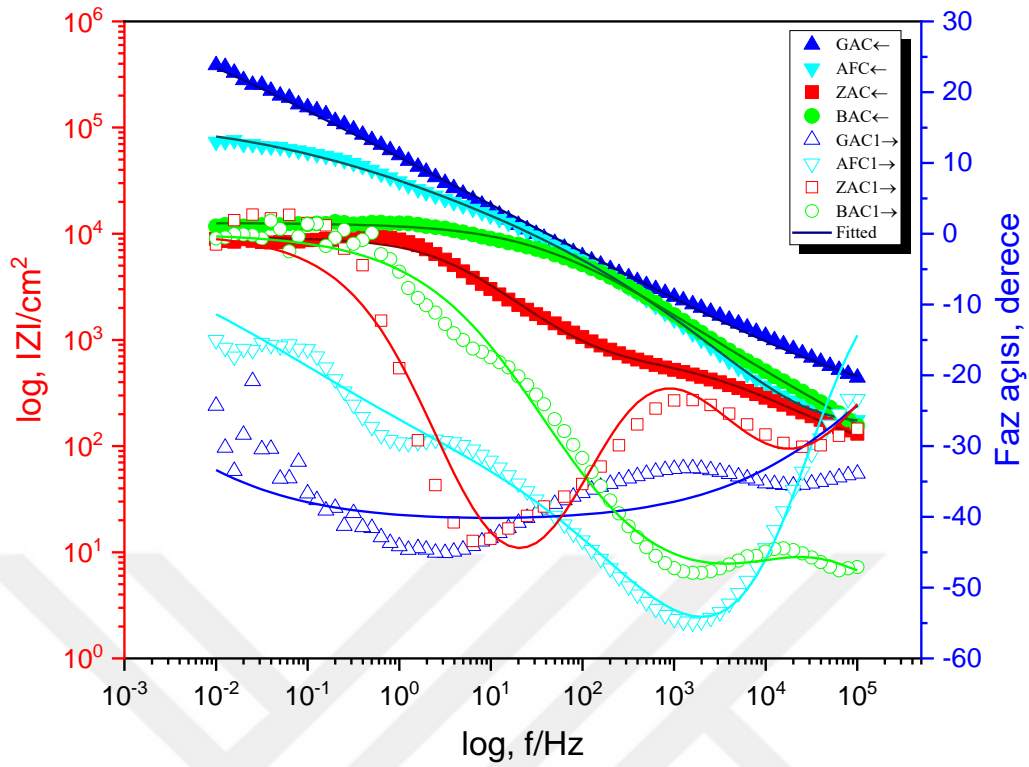
MAO işlemi ile kaplanan AFC kodlu, GAC kodlu, BAC kodlu ve ZAC kodlu numunelerin elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ile belirlenen Nyquist, Bode ve Faz açısı grafikleri Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da gösterilmiştir. Nyquist eğrileri, akımın geçiş yolundaki direnci temsil eden reel direnç (Z_r) ve kapasitörün yük biriktirmesi karşılığı oluşan ve alternatif akım frekansına bağlı olan sanal direnç ($-Z_i$) değerlerinden elde edilmektedir.

Nyquist grafiğinde (Şekil 3.28) literatürde de yer aldığı üzere, yarım daire eğrileri oluşmaktadır ve bu eğrilerin çapları elektron transfer direncini vermektedir. Grafikte bulunan yarım dairelerin çaplarının büyük ya da küçük olması elektron transfer direncinin arttığını ve azaldığını göstermektedir. Bu nedenle yarım dairenin çapı korozyon direnci ile doğru orantılıdır. Yüksek korozyon direnci büyük çaplı yarım daireler anlamına gelmektedir. Yarım dairenin daha küçük boyutu, gözenekliliğin varlığına ve dış tabaka direncinin düşük olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, daha büyük yarım daire, daha düşük frekanslarda görünen iç katmandan kaynaklanır. Bu, dış tabaka ve metal yüzey üzerinde oluşan pasif tabaka ile karşılaştırıldığında bu tabakanın iyi bir korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Elektrokimyasal reaksiyonlarda bir bozulma meydana gelirse ve gözenekleri doldurarak kaplamaya daha az iyon nüfuz ederse, iç tabakanın da yıkılacağı ve iç tabakanın korozyon direncinin de artacağı ve bu durumda çapın artmasına neden olacağı açıktır. Şekil 3.28'de Nyquist eğrileri ve yakınlaştırılmış grafiği verilmiştir. Şekil 3.28'de görüldüğü gibi, Nyquist eğrilerinde GAC kodlu numunenin diğer kodlu kaplamalara kıyasla daha büyük çaplı yarım daireye sahip olduğu ve bu durumda korozyon direncinin daha iyi olduğu söylenmektedir. Benzer şekilde AFC kodlu numune de diğer numunelere kıyasla yüksek korozyon direnci oluşmuştur. Bu sonuçlar potansiyodinamik polarizasyon eğrisindeki sonuçları da desteklemektedir. Diğer taraftan BAC kodlu mikro ark oksidasyonu yapılmamış numune en düşük yarım daire çapına sahiptir. Benzer şekilde Bode ve faz açısı

grafiğinde de (Şekil 3.29), düşük frekans değerlerinde belirgin bir şekilde en yüksek değer GAC ve ardında AFC kodlu numunelerdir. Düşük frekans değerleri korozyon eğilimi ile ilgilidir. Aynı şeklin faz açısı kısmında bakıldığında ise (sağdaki y eksenini) iki tepeli bir eğri gözlenmektedir. Genel olarak incelendiğinde frekans arttıkça faz açısında da azalma görülmektedir.



Şekil 3.28. MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin Nyquist eğrisi

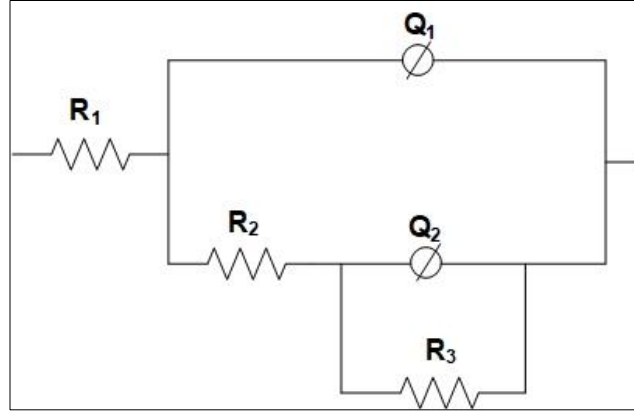


Şekil 3.29. MAO yöntemiyle kaplanan numunelerin Bode ve Faz açısı grafiği

Tablo 3.3. Devre ile elde edilen EIS verileri

Numune Kodu	R_1	R_2	R_3	Q_1	Q_2	m	n
AFC	156,4	$120,7 \times 10^{-3}$	$56,95 \times 10^{-6}$	$12,08 \times 10^{-6}$	$219,4 \times 10^{-9}$	$859,4 \times 10^{-3}$	$369,4 \times 10^{-3}$
GAC	198,8	$23,79 \times 10^{-6}$	$1,828 \times 10^6$	$251,1 \times 10^{-9}$	$8,094 \times 10^{-6}$	$454,7 \times 10^{-3}$	$8,076 \times 10^{-6}$
BAC	33,50	$12,42 \times 10^3$	174,4	$3,417 \times 10^{-6}$	$18,34 \times 10^{-9}$	$934,5 \times 10^{-3}$	$576,7 \times 10^{-3}$
ZAC	33,50	$12,42 \times 10^3$	174,4	$3,417 \times 10^{-6}$	$18,34 \times 10^{-9}$	$624,7 \times 10^{-3}$	$766,4 \times 10^{-3}$

Empedans değerini kantitatif olarak analiz etmek için, Şekil 3.30'daki gibi elektriksel eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Tüm katkılı numuneler için sadece bir tane elektriksel eşdeğer devre modeli yeterli gelmiştir. Devre ile elde edilen EIS verileri ve sonuçları Tablo 3.3'te gösterilmiştir. MAO ile kaplanan numunelerin eşdeğer devresi elektriksel elemanlarından R_1 , çözültü R_2 , gözenekli tabaka R_3 ise bariyer/korozyon tabakası için kullanılmıştır. Q_1 ve Q_2 sabit elemanları ise sırasıyla elektrolit/kaplama ara yüzeyi ve kaplama/altlık ara yüzeyi için eklenmiştir. Özellikle R_1 değerleri incelendiğinde, GAC ve AFC kodlu numunelerin korozyon üstünlükleri belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.30. Elektiksel eşdeğer devre modeli



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, grafit, h-BN ve ZnO katkı maddeleri ilave edilen elektrolitler ile 2024 Al alaşımı MAO yöntemiyle kaplanarak, yüzey modifikasyonu, aşınma ve korozyon davranışlarına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- MAO yöntemiyle kaplanan Al 2024 alaşımının yüzey pürüzlülüğü artmıştır. ZAC kodlu numunenin yüzey pürüzlülük değeri AFC, GAC ve BAC kodlu numunelerine oranla daha düşüktür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri h-BN katkılı BAC kodlu numunede belirlenmiştir.
- Eklenen katkı maddelerinin ortalama kaplama kalınlık değerlerine etki ettiği görülmüştür. En yüksek ortalama kaplama kalınlığı (334,71 μm) ZAC kodlu numunedir.
- XRD verileri incelendiğinde, elektrolit çözeltiler sonucu hazırlanan bütün numunelerde dış katman $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ iç katmanda ise $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı oluşmuştur. Bunların yanı sıra GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde sırasıyla grafit, h-BN ve ZnO piklerine rastlanmıştır.
- MAO yöntemiyle kaplama sonrasında AFC, GAC, BAC ve ZAC kodlu numunelerde gözenekli bir yapı meydana gelmiştir. GAC kodlu numunenin diğer numunelere kıyasla gözenek sayısı ve por boyutu daha düşüktür. BAC kodlu numune ise en yüksek gözenek sayısına ve por boyutuna sahiptir.
- Farklı ortamlarda numunelerin, azot ortamında en düşük sürtünme katsayısı değeri bulunmuştur. Genel olarak azot ortamı ve deniz suyu ortamında bulunan sürtünme katsayısı değeri hava ortamına göre daha düşük çıkmıştır.
- Hava ortamında, en düşük ortalama sürtünme katsayısı h-BN katkılı BAC kodlu numunede tespit edilmiştir. Azot ortamında, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerleri grafit katkılı GAC kodlu numunede sonuçlanmıştır. Deniz suyunda yapılan ortalama sürtünme katsayısında ise numunelerin değerleri birbirine yakın ve katkı maddelerin belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- Farklı ortamlarda yapılan aşınma deneylerinde, en düşük aşınma iz hacmi ve aşınma oranı genel olarak hava ortamı ve deniz suyu ortamına kıyasla azot ortamında meydana gelmiştir.

- Hava ortamında en yüksek aşınma iz hacmi ve aşınma oranı katkısız AFC kodlu numunede bulunmuştur. h-BN katkılı BAC kodlu numune diğer katkılı numunelere kıyasla daha düşük aşınma iz hacmi ve aşınma oranı görülmüştür. Azot ortamında, en düşük aşınma iz hacmi ve aşınma oranı GAC kodlu numunede meydana gelmiştir. Deniz suyu ortamında ise, en düşük aşınma iz hacmi ve aşınma oranı BAC kodlu numunede meydana gelmiştir.
- Aşınma sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde, hava ortamında bütün numunelerin aşınma yüzeylerinde kalıntılar görülmüştür. BAC kodlu numunenin diğer numunelere oranla daha az aşınma kalıntıları olduğu fakat aşınma izlerinin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Azot ortamında, hava ortamında olduğu gibi aşınma kalıntıları, izleri mevcuttur. GAC kodlu numune daha az aşınma kalıntıları olduğu sonuçlanmıştır. Deniz suyu ortamında ise, azot ve hava ortamına oranla daha çok kırılmalar ve çatlaklar oluşmuştur. Bu durum en çok ZnO partikülleri eklenen ZAC kodlu numune de tespit edilmiştir.
- Korozyon deneyinde, en iyi korozyon direncinin i_{corr} değeri sıfıra yakın olan grafit katkılı GAC kodlu numunede görülmüştür. GAC kodlu numunenin E_{corr} ve i_{corr} değerleri sırasıyla $-709,5$ V ve $1,73 \times 10^{-7}$ A/cm²'dir. En düşük korozyon direnci ise BAC kodlu numunede tespit edilmiştir. BAC kodlu numunenin E_{corr} ve i_{corr} değerleri $-735,7$ V ve $7,51 \times 10^{-5}$ A/cm²'dir. Korozyon sonrası, numunelerin yüzeylerinde küçük çukurcukların oluşması sonucunda çukurcuk korozyonu meydana gelmiştir.

5. ÖNERİLER

- Temel elektrolitlere farklı konsantrasyonlarda katkı maddeleri ekleyerek MAO yöntemiyle kaplama gerçekleştirilerek karakterize edilebilir.
- Farklı altlık malzemeler MAO yöntemiyle kaplanarak kaplama performansları araştırılabilir.
- Farklı yük, hız ve sıcaklıklarda numunelerin tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Farklı ortamlarında korozyon testleri gerçekleştirilerek korozyon davranışları incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Akın, M. B., 2011. Çinko Oksit Kristalizasyonunun Polielektrolitlerle Kontrolü, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Altun, H., 2004. Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamalarının Korozyon Davranışlarına Etkisi, Doktora Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Angın, M. H. ve Aydın, S., 2003. Bor Nitrür Ön Fizibilite Etüdü, Eti Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü, Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Ao, N., Liu, D., Wang, S., Zhao, Q., Zhang, X. ve Zhang, M., 2016. Microstructure and Tribological Behavior of a TiO₂/hBN Composite Ceramic Coating Formed via Micro-arc Oxidation of Ti-6Al-4V Alloy, Journal of Materials Science & Technology, 32, 10, 1071-1076.
- Aydın, H., 2018. Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30, 2, 269-275.
- Bağcı, M., 2010. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Başoğul, Y., 2014. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış AA6082 Alaşımının Farklı Yağlama Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bayram, T., 2022. Plazma Püskürtme Tekniği ile Magnezyum ve Alaşımlarının TiO₂ ve Al₂O₃ Kaplanması ve Korozyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Bordbar-Khiabani, A., Yarmand, B. ve Mozafari, M., 2019. Enhanced Corrosion Resistance and in-Vitro Biodegradation of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Prepared on AZ91 Mg Alloy Using ZnO Nanoparticles-Incorporated Electrolyte, Surface and Coatings Technology, 360, 153-171.
- Ceviz, M., 2021. AA7075-T6 Alaşımı ve AA7075-T6 Alaşımı Alt Tabaka Üzerine HVOF Termal Sprey ile Kaplanmış WC-10Co-4Cr Kaplamanın Farklı Sıcaklıklardaki Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Chen, S., Tu, J., Hu, Q., Xiong, X., Wu, J., Zou, J. ve Zeng, X., 2017. Corrosion Resistance and in Vitro Bioactivity of Si-Containing Coating Prepared on a Biodegradable Mg-Zn-Ca Bulk Metallic Glass by Micro-Arc Oxidation, Journal of Non-Crystalline Solids, 456, 125-131.

- Chen, W., Wenhui, H., Zhao, Z., He, N., Xiuqing, L. ve Li, H., 2021. Mechanical Properties and Tribological Characteristics of B₄C-SiC Ceramic Composite in Artificial Seawater, Journal of Asian Ceramic Societies, 9, 4, 1495-1505.
- Chen, Y., Wu, L., Yao, W., Wu, J., Yuan, Y., Jiang, B. ve Pan, F., 2023. Growth Behavior and Corrosion Resistance of Graphene Oxide/MgAl Layered Double Hydroxide Coating Grown on Micro-Arc Oxidation Film of Magnesium Alloys, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 117, 319-332.
- Chen, Y., Wu, L., Yao, W., Zhong, Z., Chen, Y., Wu, J. ve Pan, F., 2021. One-Step in Situ Synthesis of Graphene Oxide/MgAl-Layered Double Hydroxide Coating on a Micro-Arc Oxidation Coating for Enhanced Corrosion Protection of Magnesium Alloys, Surface and Coatings Technology, 413, 127083.
- Cheng, F., Li, S., Gui, W. ve Lin, J., 2018. Surface Modification of Ti-45Al-8.5 Nb Alloys by Microarc Oxidation to Improve High-Temperature Oxidation Resistance, Progress in Natural Science: Materials International, 28, 3, 386-390.
- Cuhadaroğlu, A. D. ve Kara, E., 2018. Grafit: Bir Genel Değerlendirme, Teknik Bilimler Dergisi, 8, 1, 14-33.
- Cui, L.-Y., Zeng, R.-C., Guan, S.-K., Qi, W.-C., Zhang, F., Li, S.-Q. ve Han, E.-H., 2017. Degradation Mechanism of Micro-Arc Oxidation Coatings on Biodegradable Mg-Ca Alloys: The Influence of Porosity, Journal of Alloys and Compounds, 695, 2464-2476.
- Çakıcı, S., 2009. 6082 Kalite Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakır, O., 2023. Borlama ile Yüzeyi Sertleştirilmiş A1sı 420 Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Eroziyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Ü., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Çetin, O., 2019. Alüminyum Plaka Yüzeyinin Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Nano Boyutlu ZrO₂ Tanecik Hapsedilmiş Al₂O₃ Kaplanması Ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dai, W., Zhang, C., Zhao, L. ve Li, C., 2022. Effects of Cu Content in Al-Cu Alloys on Microstructure, Adhesive Strength, and Corrosion Resistance of Thick Micro-Arc Oxidation Coatings, Materials Today Communications, 33, 104195.
- Davis, J. R. (Ed.), 1993. Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International Handbook Committee, Materials Park, Ohio.
- Demirbaş, Ç., 2019. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış T16AL4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Ding, H. Y., Dai, Z. D., Skuiry, S. C. ve Hui, D., 2010. Corrosion Wear Behaviors of Micro-Arc Oxidation Coating of Al₂O₃ on 2024Al in Different Aqueous Environments at Fretting Contact, Tribology International, 43, 5-6, 868-875.
- Doğan, E., 2006. 1050 ve 8006 Alüminyum Alaşımlarının Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Durna, İ., 2022. Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi ve Anotlama İşlemlerinin Alüminyum ve Çinko Esaslı Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Dursun, T. ve Soutis, C., 2014. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys, Materials & Design (1980-2015), 56, 862-871.
- Erge, H., 2021. Kaynaklı 5086-H32 Alüminyum Alaşımının Korozyon ve Korozyonlu Yorulma Davranışlarına Ultrasonik Darbe İşleminin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Erk, N., 2019. 7075 Alüminyum Alaşımı Üzerinde Oluşturulan Mikro Ark Oksidasyon Kaplamaların Aşınma ve Korozyon Dayanımına Zirkonya Partikül Takviyesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Famiyeh, L. ve Huang, X., 2019. Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Aluminum Alloys: Microstructures, Properties, and Applications, Mod. Concepts Mater. Sci., 2, 1, 000526.
- Godja, N., Kiss, N., Löcker, C., Schindel, A., Gavrilovic, A., Wosik, J., Mann, R., Wendrinsky, J., Merstallinger, A. ve Nauer, G. E., 2010. Preparation and Characterization of Spark-Anodized Al-Alloys: Physical, Chemical and Tribological Properties, Tribology International, 43, 7, 1253-1261.
- Gökşahin, E., 2007. Sert Eloksal ile Kaplanmış 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gu, Y., Bandopadhyay, S., Chen, C.-f., Guo, Y. ve Ning, C., 2012. 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.
- Guo, H., Liu, Z., Wang, Y. ve Li, J., 2021. Tribological Mechanism of Micro-Arc Oxidation Coatings Prepared by Different Electrolyte Systems in Artificial Seawater, Ceramics International, 47, 6, 7344-7352.
- Huan, C., Guo-Hua, L., Gu-Ling, Z., Hua, P., Xing-Quan, W., You-Wei, Z., Lee, H.-J. ve Yang, S.-Z., 2009. Effect of the Pulse Duty Cycle on Characteristics of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ31 Magnesium Alloy, Chinese Physics Letters, 26, 096802.

- Hussein, R., Northwood, D. O. ve Nie, X., 2010. Coating Growth Behavior During the Plasma Electrolytic Oxidation Process, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 28, 4, 766-773.
- Kalkancı, N. H., 2004. Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alaşım Malzemelere Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kaplan, E., Sukuroglu, E. E. ve Cuvalci, O., 2021. Investigation of Characterization and Tribological Behavior of Composite Oxide Coatings Doped with h-BN and Graphite Particles on ZA-27 Alloy by Micro-Arc Oxidation, Journal of Adhesion Science and Technology, 35, 12, 1305-1319.
- Konak Tuncel, B., 2007. Çinko Oksit (ZnO)'in Mikroyapısal Özelliklerine Nikel Oksit (NiO)'in Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kopeliovich, D., 2021. Mechanisms of Wear. https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear 12 Kasım 2022.
- Li, J., Bian, Y., Tu, X., Li, W. ve Song, D., 2022. Influence of Surface Roughness of Substrate on Corrosion Behavior of MAO Coated ZM5 Mg Alloy, Journal of Electroanalytical Chemistry, 910, 116206.
- Li, Q., Liang, J. ve Wang, Q., 2013. Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Lightweight Metals, Modern Surface Engineering Treatments, 4, 75-99.
- Li, Q., Yang, W., Liu, C., Wang, D., Liang, J., 2017. Correlations Between the Growth Mechanism and Properties of Micro-Arc Oxidation Coatings on Titanium Alloy: Effects of Electrolytes, Surface and Coatings Technology, 316, 162-170.
- Li, X. J., Cheng, G. A., Xue, W. B., Zheng, R. T., Cheng, Y. J., 2008. Wear and Corrosion Resistant Coatings Formed by Microarc Oxidation on TiAl Alloy, Materials Chemistry and Physics, 107, 1, 148-152.
- Li, Z. ve Di, S., 2017. The Microstructure and Wear Resistance of Microarc Oxidation Composite Coatings Containing Nano-Hexagonal Boron Nitride (HBN) Particles, Journal of Materials Engineering and Performance, 26, 1551-1561.
- Liu, W., Pu, Y., Liao, H., Lin, Y. ve He, W., 2020. Corrosion and Wear Behavior of PEO Coatings on D16T Aluminum Alloy with Different Concentrations of Graphene, Coatings, 10, 3, 249.
- Liu, Y.-F., Liskiewicz, T., Yerokhin, A., Korenyi-Both, A., Zabinski, J., Lin, M., Matthews, A. ve Voevodin, A. A., 2018. Fretting Wear Behavior of Duplex PEO/Chameleon Coating on Al Alloy, Surface and Coatings Technology, 352, 238-246.

- Lu, X., Blawert, C., Kainer, K. U. ve Zheludkevich, M. L., 2016. Investigation of the Formation Mechanisms of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Mg Alloy AM50 Using Particles, Electrochimica Acta, 196, 680-691.
- Ma, K. J., Al Bosta, M. M., Wu, W. T., 2014. Preparation of Self-Lubricating Composite Coatings Through a Micro-Arc Plasma Oxidation with Graphite in Electrolyte Solution, Surface and Coatings Technology, 259, 318-324.
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A. ve Vieregge, A., 2000. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry, Materials Science and Engineering: A, 280, 1, 37-49.
- Moezzi, A., McDonagh, A. M. ve Cortie, M. B., 2012. Zinc Oxide Particles: Synthesis, Properties and Applications, Chemical Engineering Journal, 185, 1-22.
- Nashrah, N., Kamil, M. P., Yoon, D. K., Kim, Y. G. ve Ko, Y. G., 2019. Formation Mechanism of Oxide Layer on AZ31 Mg Alloy Subjected to Micro-Arc Oxidation Considering Surface Roughness, Applied Surface Science, 497, 143772.
- Obuz, S., 2022. ZM21 Magnezyum Alaşımının Haddelme Öncesi ve Sonrası Aşınma ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Ü., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Ovundur, M., Muhaffel, F. ve Cimenoglu, H., 2015. Characterization and Tribological Properties of Hard Anodized and Micro Arc Oxidized 5754 Quality Aluminum Alloy, Tribology in Industry, 37, 1, 55-59.
- Ölmez, S. ve Keleşoğlu, E., 2016. Alüminyum Silisyum Alaşımların Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4, 1, 31-39.
- Özcan, M., 2014. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Özer, N., 2021. Yapı Malzemelerinde Korozyon ve Korozyondan Korunma Yöntemleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26, 3, 1159-1178.
- Özkara, İ. M., 2009. 2024 Alüminyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Kaplanması ve Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pan, M. Q., Chi, G. X., Wei, D. B. ve Di, S. C., 2009. Influence of Processing Parameters on Coating Surface Roughness of Aluminum Alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19, 392-397.

- Pezzato, L., Angelini, V., Brunelli, K., Martini, C. ve Dabalà, M., 2018. Tribological and Corrosion Behavior of PEO Coatings with Graphite Nanoparticles on AZ91 and AZ80 Magnesium Alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 28, 2, 259-272.
- Popov, B. N., 2015. Corrosion Engineering, Chapter 3 - Electrochemical Kinetics of Corrosion, B. N. Popov (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 93-142.
- Qiu, J., Suo, X. B., Ma, S. N., Shuai, G. ve Wang, H. M., 2015. A Effects of Nano-Particles Additives on Wear Performance of Micro-Arc Oxidation Coating Prepared on 2A12 Aluminum Alloy, Advanced Materials Research içinde (1120, 735-739), Trans Tech Publications Ltd.
- Roknian, M., Fattah-alhosseini, A., Gashti, S. O. ve Keshavarz, M. K., 2018. Study of the Effect of ZnO Nanoparticles Addition to PEO Coatings on Pure Titanium Substrate: Microstructural Analysis, Antibacterial Effect and Corrosion Behavior of Coatings in Ringer's Physiological Solution, Journal of Alloys and Compounds, 740, 330-345.
- Shchedrina, I., Rakoch, A., Henrion, G. ve Martin, J., 2014. Non-Destructive Methods to Control the Properties of MAO Coatings on the Surface of 2024 Aluminium Alloy, Surface and Coatings Technology, 238, 27-44.
- Shi-Gang, X., Li-Xin, S., Rong-Gen, Z. ve Xing-Fang, H., 2005. Properties of Aluminium Oxide Coating on Aluminium Alloy Produced by Micro-Arc Oxidation, Surface and Coatings Technology, 199, 2-3, 184-188.
- Shokouhfar, M. ve Allahkaram, S. R., 2016. Formation Mechanism and Surface Characterization of Ceramic Composite Coatings on Pure Titanium Prepared by Micro-Arc Oxidation in Electrolytes Containing Nanoparticles, Surface and Coatings Technology, 291, 396-405.
- Sundararajan, G. ve Rama Krishna, L., 2003. Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings Through the MAO Coating Technology, Surface and Coatings Technology, 167, 2, 269-277.
- Şimşek, M., 2014. Mikro Ark Oksidasyon ile Al₂O₃ Kaplanmış AA7075 Alaşımının Kuru ve Yağlı Şartlarda Sürtünme ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şüküroğlu, S., Totik, Y., Şüküroğlu, E. ve Kucukosman, R., 2021. Investigation of In-Vitro Properties of NiTi Alloy After Micro Arc Oxidation, Journal of Polytechnic, 24, 2, 373-382.
- Taşkent, B., 2021. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) ve Sol-Jel Daldırma Yöntemleri Kullanılarak Dupleks Kaplanmış Al₂O₃ Alüminyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Tian, J., Luo, Z., Qi, S. ve Sun, X., 2002. Structure and Antiwear Behavior of Micro-Arc Oxidized Coatings on Aluminum Alloy, Surface and Coatings Technology, 154, 1, 1-7.
- Uysal, N., 2019. Grafit Esaslı Karbon Nanoakışkan Eldesi ve Isı Değiştirici Sistemlerinde Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, E.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ünlüoğlu, O. ve Çelik, O. N., 2012. Grafit Partiküllerinin Yağ Katkısı Olarak AISI H11 Çeliğinin Sürtünme ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi, Politeknik Dergisi, 1, 1.
- Varol, S., 2012. Alüminyum-Bakır Alaşımlarının Korozyon Davranışına Tane Boyutunun Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Wu, X. Q., Xie, F. Q., Hu, Z. C. ve Wang, L., 2010. Effects of Additives on Corrosion and Wear Resistance of Micro-Arc Oxidation Coatings on TiAl Alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20, 6, 1032-1036.
- Xin, S. G., Song, L. X., Zhao, R. G. ve Hu, X. F., 2006. Composition and Thermal Properties of the Coating Containing Mullite and Alumina, Materials Chemistry and Physics, 97, 1, 132-136.
- Yang, X., Wang, F. H., Wang, W. L., Liu, S. F., Chen, Y. Q. ve Tang, H.-P., 2022. Comparison of Two-Step Surface Treatment on Surface Roughness and Corrosion Resistance of TC4 Alloy Parts Prepared by SLM and SEBM, Journal of Alloys and Compounds, 921, 165929.
- Yang, X. Wang, W. L., Ma, W. J., Wang, Y., Yang, J. G., Liu, S. F. ve Tang, H. P., 2020. Corrosion and Wear Properties of Micro-Arc Oxidation Treated Ti6Al4V Alloy Prepared by Selective Electron Beam Melting, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 30, 8, 2132-2142.
- Yang, Y., Chen, H., Zhao, B. ve Bao, X., 2004. Size Control of ZnO Nanoparticles Via Thermal Decomposition of Zinc Acetate Coated on Organic Additives, Journal of Crystal Growth, 263, 1-4, 447-453.
- Yang, Y. ve Wu, H., 2010. Effects of Current Frequency on the Microstructure and Wear Resistance of Ceramic Coatings Embedded with SiC Nano-particles Produced by Micro-arc Oxidation on AZ91D Magnesium Alloy, Journal of Materials Science & Technology, 26, 10, 865-871.
- Yerokhin, A., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowey, S. J., 1999. Plasma Electrolysis for Surface Engineering, Surface and Coatings Technology, 122, 2-3, 73-93.
- Yin, B., Peng, Z., Liang, J., Jin, K., Zhu, S., Yang, J. ve Qiao, Z., 2016. Tribological Behavior and Mechanism of Self-lubricating Wear-resistant Composite Coatings Fabricated by One-step Plasma Electrolytic Oxidation, Tribology International, 97, 97-107.

- Zhang, D., Ge, Y., Liu, G., Gao, F. ve Li, P., 2018. Investigation of Tribological Properties of Micro-Arc Oxidation Ceramic Coating on Mg Alloy Under Dry Sliding Condition, Ceramics International, 44, 14, 16164-16172.
- Zhang, K., Yu, S., 2020. Preparation of Wear and Corrosion Resistant Micro-Arc Oxidation Coating on 7N01 Aluminum Alloy, Surface and Coatings Technology, 388, 125453.
- Zhang, P., Zuo, Y. ve Nie, G., 2020. The Pore Structure and Properties of Microarc Oxidation Films on 2024 Aluminum Alloy Prepared in Electrolytes with Oxide Nanoparticles, Journal of Alloys and Compounds, 816, 152520.
- Zhang, Y., Chen, Y., Du, H. Q. ve Zhao, Y. W., 2018. Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coatings Formed on Aluminum Alloy with Addition of Al₂O₃, Materials Research Express, 5, 3, 036527.
- Zhao, D., Lu, Y., Wang, Z., Zeng, X., Liu, S. ve Wang, T., 2015. Antifouling Properties of Micro Arc Oxidation Coatings Containing Cu₂O/ZnO Nanoparticles on Ti6Al4V, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 54, 417-421.
- Zhuang, J., Song, R., Li, H. ve Xiang, N., 2018. Effect of Various Additives on Performance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ31 Magnesium Alloy in the Phosphate Electrolytes, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 33, 3, 703-709.
- Zuo, Y., Li, T., Yu, P., Zhao, Z., Chen, X., Zhang, Y. ve Chen, F., 2019. Effect of Graphene Oxide Additive on Tribocorrosion Behavior of MAO Coatings Prepared on Ti6Al4V Alloy, Applied Surface Science, 480, 26-34.

ÖZGEÇMİŞ

Aysu KILIÇ, ilk, orta ve lise öğrenimini Çorum'da tamamlamıştır. 2012 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2016 yılında mezun olmuştur. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans programına başlamıştır. 2021 yılında 3 aylık süre ile 'Erasmus Staj Hareketliliği Programı' kapsamında Prag-Çek Teknik Üniversitesi (Czech Technical University in Prague, Department of Materials Engineering)'nde Prof. Dr. Petr Spatenka danışmanlığında staj yapmıştır.