

T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Al2O3 TABAN MALZEME ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN FARKLI OKSİT  
KAPLAMALARIN AŞINMA VE ADHEZYON ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Onur ÖZTABAK

ŞUBAT-2024  
GÜMÜŞHANE



T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AL2024 TABAN MALZEME ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN FARKLI OKSİT  
KAPLAMALARIN AŞINMA VE ADHEZYON ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF WEAR AND ADHESION PROPERTIES OF DIFFERENT  
OXIDE COATINGS GROWN ON AL2024 BASE MATERIAL

YÜKSEK LİSANS

Onur ÖZTABAK

ŞUBAT-2024  
GÜMÜŞHANE



T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AL2024 TABAN MALZEME ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN FARKLI OKSİT  
KAPLAMALARIN AŞINMA VE ADHEZYON ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF WEAR AND ADHESION PROPERTIES OF DIFFERENT  
OXIDE COATINGS GROWN ON AL2024 BASE MATERIAL

YÜKSEK LİSANS

Onur ÖZTABAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selahattin BUDAK

ŞUBAT-2024  
GÜMÜŞHANE



## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

**Yüksek Lisans Tezi** olarak hazırlamış olduğum “**Al2024 Taban Malzeme Üzerine Büyütülen Farklı Oksit Kaplamaların Aşınma ve Adhezyon Özelliklerinin İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

15/02/2024

.....  
Onur ÖZTABAK

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma, Gümüşhane Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiŐtir. Proje No:23.E0117.07.03.

Bu tez çalıŐmasının gerçekleŐtirilmesi süresince çalışmanın konusunun seçimi, deneysel çalışmaların yürütülmesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve yazım aŐamasında göstermiş olduğu ilgi, anlayış ve katkılarından dolayı değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selahattin BUDAK'a saygılarımı ve teŐekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleŐtirilmesinde değerli fikir ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞÜKÜROĞLU'na, saygılarımı ve teŐekkürlerimi sunarım.

**Onur ÖZTABAK**  
**GÜMÜŞHANE - 2024**

## ÖZET

Alüminyum alaşımları sahip oldukları düşük yoğunluk, korozyon dirençleri ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı günümüzde otomotiv, tıp, havacılık gibi birçok mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların sahip oldukları avantajların yanı sıra dezavantajlarından dolayı kullanımı sınırlanmaktadır. Bu dezavantajları avantaja çevirmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Aşınma ve korozyon dirençlerini arttırmak için yüzey modifikasyon işlemleri üzerinde çalışmalar ise son yıllarda artış göstermektedir. Bu çalışmada mikro ark oksidasyon (MAO) işlemi üzerinde yoğunlaşmıştır. MAO yöntemi elektrokimyasal bir yüzey kaplama işlemidir. Çevreci bir yöntem olmakla birlikte diğer yöntemlere göre nispeten düşük maliyetli oluşu MAO yöntemini daha cazip hale getirmektedir. Yapılan literatür taramalarında Al2024 alaşımının üzerinde MAO yöntemiyle büyütülmüş ZnO ve MoS<sub>2</sub> katkılı oksit kaplamaların aşınma ve adhezyon özellikleri üzerine etkisine yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında kaplanan numunelerin, kimyasal kompozisyonu, mikro yapısı ve faz yapısı sırasıyla, Enerji dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-ışını Difraksiyonu (XRD) ile tespit edilecektir. Bu kaplamaların Al2024 ile olan adhezyon direnci de Scratch Test cihazıyla tespit edilecektir. Tribolojik özellikleri TRD tribometre cihazı ile incelenecektir ve oluşturulan kaplamalar arasında ilişki kurulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Adhezyon, Al2024 alaşımı, Aşınma, Mikro ark oksidasyon

## SUMMARY

Aluminum alloys are widely used in many engineering fields such as automotive, medicine and aviation today due to their low density, corrosion resistance and high mechanical properties. The use of these alloys is limited due to their advantages and disadvantages. Many studies are being carried out to turn these disadvantages into advantages. Studies on surface modification processes to increase wear and corrosion resistance have increased in recent years. This study focused on the micro arc oxidation (MAO) process. MAO method is an electrochemical surface coating process. Although it is an environmentally friendly method, its relatively low cost compared to other methods makes the MAO method more attractive. In the literature review, it was seen that studies on the effect of ZnO and MoS<sub>2</sub> added oxide coatings grown by the MAO method on the wear and adhesion properties of Al2024 alloy are limited. In this thesis study, the chemical composition, microstructure and phase structure of the coated samples will be determined by Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray Diffraction (XRD), respectively. The adhesion resistance of these coatings with Al2024 will also be determined with the Scratch Test device. Tribological properties will be examined with the TRD tribometer device and a relationship will be established between the created coatings.

**Keywords:** Adhesion, Al2024 alloy, Wear, Micro arc oxidation

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY .....	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY .....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLolar DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1.GİRİŞ .....	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1.Alüminyum ve Alüminyum Alaşımaları .....	6
2.2.Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi .....	8
2.2.1.Mao İşleminde Akım-Voltaj Karakteristiği .....	10
2.2.2.Alüminyum Alaşımalarında MAO Yöntemi.....	13
2.3.Aşınma .....	13
2.3.1.Aşınma Türleri .....	14
2.3.1.1.Adhezif Aşınma.....	14
2.3.1.2.Abrazif Aşınma .....	15
2.3.1.3.Erozyon Aşınması .....	17
2.3.1.4.Korozyon aşınması.....	18
2.3.1.5.Yorulma Aşınması .....	18
2.4.Kaplama Adhezyonu .....	19
3.MATERYAL VE METOT .....	21
3.1.Taban Malzeme (Numune) Hazırlama .....	21
3.2.Elektrolit Hazırlama .....	21
3.3.MAO Yöntemiyle Kaplamaların Büyütülmesi .....	22
3.4.Kaplamaların Karakterizasyonunun İncelenmesi .....	23
3.4.1.Yapısal Analizler .....	23
3.4.2.SEM Analizleri.....	23
3.4.3.Adhezyon Analizi.....	24
3.4.4.Aşınma Analizi.....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	27

4.1.Kalınlık Ölçümü Sonuçları .....	27
4.2.Yapısal Analiz Sonuçları .....	28
4.3.Aşınma Test Sonuçları .....	30
4.4.Adhezyon Test Sonuçları .....	38
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....	39
KAYNAKÇA .....	40
ÖZGEÇMİŞ .....	45



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Alüminyumun genel özellikleri.....	6
Tablo 2. MAO işleminde kullanılan çözeltiler.....	21
Tablo 3. MAO işleminin parametreleri .....	22
Tablo 4. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları .....	26



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. MAO işlem basamakları .....	9
Şekil 2. MAO işleminde kullanılan araçlar.....	10
Şekil 3. MAO işleminde akım-voltaj değişim grafiği.....	10
Şekil 4. Alüminyum alaşımı üzerinde MAO yöntemiyle oksit kaplama üretmek için kullanılan elektrolitler.....	12
Şekil 5. Aşınmayı oluşturan unsurlar .....	14
Şekil 6. Adezif aşınmanın şematik gösterimi.....	15
Şekil 7. Abrazif aşınmanın şematik gösterimi .....	16
Şekil 8. İki cisimli Abrazif aşınma.....	16
Şekil 9. Üç cisimli Abrazif aşınma.....	17
Şekil 10. Erozyon aşınma mekanizmaları.....	17
Şekil 11. Korozyon aşınması.....	18
Şekil 12. Yorulma aşınması.....	18
Şekil 13. Scratch testinin şematik görüntüsü .....	20
Şekil 14. Mikro ark oksidasyon cihazı.....	22
Şekil 15. X-ışını difraktometresi (XRD).....	23
Şekil 16. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	24
Şekil 17. Scratch test cihazı .....	25
Şekil 18. Aşınma deney cihazı .....	25
Şekil 19. a) 0-Al2024, b) 1-Al2024, c) 2-Al2024 kodlu numunelerin kaplama kalınlık SEM görüntüleri .....	27
Şekil 20. (a) 0-Al2024, (b) 1-Al2024, (c) 2-Al2024 kodlu numunelerin XRD grafiği...	28
Şekil 21. 0-Al2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	29
Şekil 22. 1-Al2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	29
Şekil 23. 2-Al2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	30
Şekil 24. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği.....	31
Şekil 25. Oda şartlarında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği .....	32
Şekil 26. Yağ ortamında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği .....	33

Şekil 27. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde A12024 kaplamasız numunenin SEM görüntüsü .....	34
Şekil 28. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 0-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	34
Şekil 29. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 1-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	34
Şekil 30. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 2-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	35
Şekil 31. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde A12024 kaplamasız numunenin SEM görüntüsü .....	35
Şekil 32. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 0-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	36
Şekil 33. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 1-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	36
Şekil 34. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 2-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	36
Şekil 35. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde A12024 kaplamasız numunenin SEM görüntüsü .....	37
Şekil 36. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 0-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	37
Şekil 37. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 1-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	37
Şekil 38. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 2-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü .....	38
Şekil 39. 0-A12024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.....	39
Şekil 40. 1-A12024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.....	39
Şekil 41. 2-A12024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.....	40

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
AC	: Alternatif akım
Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
cm <sup>2</sup>	: Santimetre kare
EDS	: Enerji dağılım spektroskopisi
MAO	: Mikro ark oksidasyon
Mm	: Milimetre
MoS <sub>2</sub>	: Molibden disülfür
N	: Newton
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
T	: Sıcaklık
V	: Volt
XRD	: X-ışınları difraktometresi
ZnO	: Çinko oksit
°C	: Santigrat derece
µm	: Mikrometre

## 1. GİRİŞ

Günümüzde alüminyum alaşımları havacılık, tıp, otomotiv gibi genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlarla ilgili araştırmalar geliştirilerek devam etmektedir (Şüküroğlu, 2016).

Al2024 alaşımı, alüminyum alaşımları arasında öne çıkan bir malzemedir. Bu alaşım, yüksek sertlik, elastisite modülü ve mukavemet değerleri ile dikkat çeker. Spesifik mukavemet (akma gerilmesi/yoğunluk) ve spesifik elastisite modülünün (elastisite modülü/yoğunluk) önemli olduğu birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Özellikle otomotiv sanayisinde, vagon yapımında, mühimmat sanayisinde, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban üretiminde, perçin ve çekici tekerleklerinin yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde Al2024 alaşımı, dayanıklılığı ve hafifliği bir araya getirerek çeşitli endüstrilerde çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde, yüksek performans ve hafif yapı taleplerini karşılamak için ideal bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Pul, 2019). Ancak düşük yüzey sertliği, yüksek sürtünme katsayısı, zayıf aşınma ve korozyon direnci gibi özellikleri bu alaşımların kullanım alanlarını kısıtlamaktadır (Wang, 2015). Malzemenin ömrünü ve performansını arttırmak için aşınma direncini artırma yönünde çalışmalar yoğun biçimde sürmektedir. Aşınma basit olarak açıklanacak olursa hareket ve temas halinde olan yüzeylerde meydana gelen deformasyon sürecidir. Sürtünmenin var olduğu her ortamda aşınmanın varlığından söz edilebilir (Shizhu ve Ping, 2012).

Bu alaşımların yüzey özelliklerini değiştirerek sürtünme, aşınma ve korozyon davranışlarını kontrol altına almak veya azaltmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla termal, PVD, CVD, plazma nitrürleme, plazma sprey, plazma oksitleme gibi birçok yüzey modifikasyon teknikleri kullanılmaktadır (Şüküroğlu, 2016).

Bu yöntemler arasında popülerliğini gün geçtikçe arttıran mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi göze çarpmaktadır. Bu yöntem farklı fiziksel ve mekanik yapılara sahip kaplamaların özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi malzemelerin alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu metot, belirli alaşımların bir elektrolit içine batırılmasıyla gerçekleşir. Plazma kimyası ve elektrokimyasal reaksiyonların bir araya gelerek sinerjistik bir etki oluşturduğu bu süreç, yüzeyin aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanmasına olanak tanır.

Bu yöntemin bir diğer avantajı ise farklı geometrik şekilli malzemelerin yüzeylerinde homojen bir kaplama oluşturulabilmesidir (Çakmak, 2008; Malayoğlu, 2008).

MAO işlemi dört değişik basamakta gerçekleşmektedir: Bunlar, anodlama, anodik çözünme, oksijen çıkışı ve mikro ark oluşumudur. Kaplama işlemi yapılacak metal güç kaynağına anot olarak bağlanmaktadır. Paslanmaz çelikten imal edilen tank ise katot olarak görev yapmaktadır. Çözelti içerisindeki homojenliği sağlamak için karıştırıcı kullanılmaktadır. Çözeltinin sıcaklığının artmasını önlemek için soğutma suyu kullanılmaktadır. Bu şekilde sistem çalıştırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. MAO yöntemi çevreci oluşu, kullanıldığı malzemeye kazandırdığı yüksek aşınma ve korozyon direnci sayesinde hafif metallerin kullanımının yaygınlaşmasında önemli bir rol oynayan yöntemdir (Snizhko vd., 2004).

Son yıllarda MAO yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yüzey kaplama işlemleri ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Li ve Di (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırma, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımının MAO yöntemiyle elektrolit içinde farklı oranlarda bor nitrit (h-BN) partikülleri içeren kaplamalarla işlenmesini incelemiştir. Bu çalışmada, elde edilen kaplamaların mikroyapısı, yüzey pürüzlülüğü, faz bileşimi, sertlik ve aşınma davranışları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Gözlemlenen sonuçlara göre, kaplamalar temel olarak  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, müllit ve h-BN fazlarından oluşmaktadır. Elektrolitteki h-BN partikül içeriğinin artışıyla birlikte, kompozit kaplamaların yüzeyindeki gözeneklerin boyutu ve sayısı belirgin bir şekilde azalmıştır. Özellikle, 2.5 g/L h-BN partikül içeren elektrolitte üretilen kaplamalar, MAO kaplamalara kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sergilemiştir. Çalışmanın önemli bir bulgusu, kaplamaların aşınma oranının sadece %33.3'ü kadar olduğu ve kaplamaların daha iyi aşınma direnci gösterdiği yönündedir. Bu durum, h-BN partiküllerinin eklenmesinin kaplamaların tribolojik performansını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, h-BN partiküllerinin MAO kaplamaların mekanik özelliklerini geliştirme potansiyeline işaret etmektedir. Araştırma, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımının yüzey özelliklerini optimize etmek için h-BN partikülleri içeren MAO kaplamaların başarıyla kullanılabileceğini vurgulamaktadır.

Yapılan literatür taraması, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımı üzerine MAO yöntemi ile ZnO ve MoS<sub>2</sub> katkılı oksit kaplamaların aşınma ve adhezyon özelliklerine yönelik mevcut araştırmaların sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu belirlenen boşluğu doldurmak amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımı üzerine uygulanan ZnO ve MoS<sub>2</sub> içeren oksit kaplamaların detaylı analizini sunmaktadır. Öncelikle, kaplamaların kimyasal

kompozisyonu enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiş, mikro yapısı taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiş ve faz yapısı X-ışını difraksiyonu (XRD) ile analiz edilmiştir. Elde edilen bu karakterizasyon verileri, kaplamaların bileşimi, yüzey morfolojisi ve kristal yapıları hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır. Ardından, Scratch test cihazıyla yapılan adhezyon direnci ölçümleri ile kaplamaların yüzey tutunma özellikleri belirlenmiş, tribolojik özellikler ise TRD tribometre cihazı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen bu tribolojik veriler, kaplamaların aşınma direnci ve sürtünme özellikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Çalışmanın sonuçları, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımına üzerine uygulanan ZnO ve MoS<sub>2</sub> katkılı oksit kaplamaların özellikleri hakkında kapsamlı bir anlayış geliştirmektedir. Bu bilgiler, malzeme bilimi ve kaplama teknolojileri alanında ilerlemeye yönelik yeni fırsatlar sunabilir ve ilgili literatüre önemli bir katkı sağlayabilir.

Bir çalışma, 5754 kalitesindeki alüminyum alaşımının tribolojik performansını değerlendirmek amacıyla sert anodik oksidasyon ve MAO yöntemleriyle elde edilen kaplamalar arasındaki farkları incelemiştir. Bu bağlamda, kaplamaların mikro yapıları XRD ve SEM kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. MAO yöntemi uygulanan 5754 alüminyum alaşımında, yüzeyde sert ve kristalimsi bir alümina tabakası gözlemlenmiştir. Diğer yandan, sert anodik oksidasyon kaplamasında daha yumuşak ve amorf bir tabaka oluştuğu tespit edilmiştir. Bu kaplamaların tribolojik performansları, ileri geri hareket eden bir aşınma test cihazında kuru kayma koşullarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, MAO kaplamasının, sert anodik oksidasyon kaplamasına göre daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, 5754 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini geliştirmek ve dayanıklılığını artırmak için MAO yönteminin etkili bir seçenek olabileceğini vurgulamaktadır (Ovundur vd., 2015).

Shchedrina ve diğerleri (2014) tarafından yürütülen araştırma, 2024 alüminyum alaşımının MAO işlemi sırasında oksit tabakasının oluşumunu, özellikle alkalın-silikat elektrolit içinde sabit bir alternatif akım (AC) yoğunluğu koşulu altında detaylı bir şekilde araştırmıştır. Çalışmanın öne çıkan noktalarını vurgulayarak daha fazla farklılaştıralım: Araştırmanın başlıca bulgularından biri, mikro deşarjlarda salınan enerjinin artışıyla birlikte kaplama oluşum hızının arttığıdır. Özellikle % 35 yüksek sıcaklıklı alümina fazlarında, korozyona dayanıklı sert bir çalışma tabakasının oluşumunun, kaplamanın ve bitişik metalik alt tabaka tabakasının güçlü bir şekilde ısıtılmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Gözenekliliğin azalmasıyla birlikte, kaplamanın yüzeyindeki katman arayüzünün ısınma miktarında bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, gözeneksiz

kaplamaların daha yoğun bir ısınma sürecine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Numune kalınlığındaki artışın, mikro ark deşarjlarının gerçekleşmesinden sonra metalik tabanın oksidasyonunu ve yüksek sıcaklıkta alümina faz oluşumunu en aza indirdiği belirlenmiştir. Bu, işlem sırasında kontrol edilen AC akım yoğunluğu altında 2024 Alüminyum alaşımının oksidasyon sürecinin optimize edilmesinde önemli bir bulgudur. Bu kapsamlı analiz, MAO işleminin parametrelerinin alaşımın yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini anlamamıza ve kaplamanın özelliklerini optimize etmemize yönelik değerli bilgiler sunmaktadır.

Zhang ve Yu'nun (2020) araştırması, 7N01 alüminyum alaşımının yüzeyinde MAO yöntemiyle oluşturulan seramik kaplamaların detaylı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Elektrolit içindeki  $\text{NaAlO}_2$  yoğunluğunun MAO kaplamalarının fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma, kapsamlı bir mikro yapı analizi ve tribolojik performans değerlendirmesi sunmaktadır. Çalışma kapsamında,  $\text{NaAlO}_2$  yoğunluğunun artışının MAO kaplamalarının kalınlığı, pürüzlülüğü ve bağlanma mukavemeti üzerindeki etkileri özelinde detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda kullanılan SEM, EDS ve XRD teknikleri, kaplamaların morfolojisi, element dağılımı ve faz bileşimini açıklamak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar,  $\text{NaAlO}_2$  yoğunluğundaki artışın MAO kaplamalarının kalınlığını kademeli olarak arttırdığını, pürüzlülüğün ise önce azaldığını ve ardından arttığını göstermektedir. Bağlanma mukavemetindeki değişim, önce bir artışın ardından bir azalma eğilimi sergilemektedir. Ayrıca, tribolojik performans değerlendirmeleri, kaplamaların aşınma direnci açısından olumlu bir tablo çizmektedir. Kütle kaybı oranındaki düşüş ve aşınma izi genişliğindeki azalma, MAO kaplamalarının etkili bir aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Aşınma mekanizması, abrazif ve adeziv aşınmanın bir kombinasyonu olarak belirlenmiştir. Korozyon direnci açısından yapılan incelemeler de olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Daldırma testi ve potansiyostatik polarizasyon eğrisi ölçümleri, MAO kaplamalarının etkili bir korozyon koruması sağladığını desteklemektedir. Sonuç olarak, bu bulgular, 7N01 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek ve dayanıklılığını artırmak için MAO yönteminin etkili bir strateji olabileceğini ön plana çıkarmaktadır.

Shi-Gang ve ekibinin (2005) yaptığı çalışmada, 2024 alüminyum alaşımının MAO yöntemiyle 10 g/l  $\text{NaAlO}_2$  ve 2 g/l KOH çözeltisinde kaplanması üzerine detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın önemli bulgularını vurgulayarak daha fazla farklılaştıralım: Araştırma sonuçları, MAO ile kaplanan alüminyum alaşımının XRD sonuçlarında  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  fazlarının varlığını ortaya koymaktadır. Yapılan detaylı analizler, kaplamanın iç katmanının kompakt, dış katmanının ise gözenekli olduğunu

göstermiş ve gözenekliliğin %7-10 arasında değiştiğini ortaya çıkarmıştır. Kaplamaya ait fiziksel özellikler incelendiğinde, yoğunluğun  $3.47 \text{ g/cm}^3$ , en yüksek sertliğin 22 GPa, elastik modülün 279 GPa ve termal genleşme katsayısının  $7.38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  olduğu belirlenmiştir. Bu özellikler, kaplamanın yüksek sertlik, elastik modül ve termal genleşme katsayısı ile dikkat çektiğini göstermektedir. Araştırmacılar, alüminyum oksit kaplamanın alt tabakaya sağlam bir termal şok direnci ve yapışma gücü sunduğunu vurgulamışlardır. Bu sonuçlar, MAO yöntemiyle elde edilen kaplamanın, 2024 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini artırmak, termal direncini güçlendirmek ve dayanıklılığını artırmak açısından olumlu bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Zhang ve ekibinin (2020) araştırması, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımının MAO yöntemi kullanılarak SiC, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> ve CeO<sub>2</sub> nanoparçacıklarını içeren sodyum silikat bazlı elektrolitte kaplanmasını detaylı bir şekilde incelemektedir. Çalışma, kaplamalara eklenen nanoparçacıkların gözenek parametreleri, özellikleri, EDS ve XRD analizleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirerek önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Elektrolitlere nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşturulan mikro ark oksidasyon filmlerinde belirgin bir gözeneklilik artışı gözlemlenmiştir, bu artış %9.7'dan % 21.7'ya ulaşmıştır. Bununla birlikte, film yapıştırıcılığı 13.4 MPa'dan 23.9 MPa'ya yükselmiştir, ancak film mikrosertliği 786.8 HV'den 575.3 HV'ye düşmüştür. Özellikle SiC nanoparçacıkları içeren film, mikrosertliği 1074.6 HV'ye kadar artırmıştır. Nanoparçacıkların elektrolitlere eklenmesi, filmlerin termal çatlama direncini etkilememiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri, NaCl çözeltisine 1440 saat daldırıldıktan sonra, nanoparçacıklarla hazırlanan mikro ark oksidasyon filmlerinin direncinin orijinal filmde önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve film kapasitesinin zamanla arttığını göstermiştir. Korozyon direncini artırmada etkili nanoparçacıkların TiO<sub>2</sub> ve CeO<sub>2</sub> olduğu belirlenmiştir. Ağırlık kaybı test sonuçları, TiO<sub>2</sub> ve CeO<sub>2</sub> nanoparçacıkları içeren filmlerin korozyon hızının 8640 saat daldırma sonrasında orijinal filmin yaklaşık üçte biri kadar olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, mikro ark oksidasyon filmlerinin etkili korozyon direncinin, özellikle iç kompakt tabakanın güçlü koruma özelliklerine dayandığını vurgulamışlardır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum Humphry Davy tarafından 1807 yılında demir alaşımının bir bileşeni olarak keşfedilmiştir fakat Davy tarafından yapılan çalışmalar alüminyum demirden ayırmaya yetmemiştir. 1821 yılına gelindiğinde alüminyumun hammaddesi olan boksit madeni Fransa'nın Lex Baux kasabasında M. Pierre Berthier tarafından bulunmuştur ve adını da bulunduğu kasabadan almıştır. İlk metalik alüminyum 1825 yılında Christian Oersted tarafından potasyum amalgam ile birlikte alüminyum klorürü indirgeyerek bulunmuştur (Altıncıoğlu, 1995).

Alüminyum, özgül ağırlığı  $2.7 \text{ g/cm}^3$  olan ve hafif metaller (özgül ağırlığı  $3.8 \text{ g/m}^3$ 'ten küçük metaller) grubunda kullanım alanı en yüksek olan elementtir (Tablo 1). Alüminyum yüksek korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekillendirilebilmesi, bulunurluğunun yüksek olması ve endüstriyel talepleri karşılayacak özelliklere sahip alaşımlarda kullanılabilmesi diğer metallerden daha yaygın bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır (Shi-Gang X. ve Li-Xin S., 2006).

Tablo 1. Alüminyumun genel özellikleri (Nie X. ve Matthews X., 2000).

<b>Özgül Ağırlık</b>	2.7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Ergime Sıcaklığı</b>	660 °C
<b>Ergime Isısı</b>	386 kJ/kg
<b>Özgül Isı</b>	0.9 kJ/kg.K (18 °C)
<b>Isı İletim Katsayısı</b>	0.94kJ/kg.K (100 °C)
<b>Elektrik İletme Kabiliyeti</b>	39 m/Ω.mm <sup>2</sup>
<b>Elastiklik Modülü</b>	65 GPa
<b>Çekme Mukameti</b>	44.7 MPa
<b>Akma Sınırı</b>	17.3 MPa
<b>Kopma Uzaması</b>	% 31-39
<b>Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı</b>	251-301 °C
<b>Kristal Çeşidi</b>	YMK

Alüminyumun korozyon direncinin sebebi, hava ile temasının sonucunda yüzeyinde oluşan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) tabakasıdır. Bu tabaka alüminyumun korozyon direncini yükseltmektedir (Nie X. ve Matthews X., 2000).

Günümüzde alüminyum alaşımları havacılık, tıp, otomotiv gibi genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlarla ilgili araştırmalar geliştirilerek devam etmektedir (Şüküroğlu, 2016).

Alüminyum alaşımları, yoğunluğu alüminyum olan metal alaşımlardır. Bu alaşımların kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri alaşımda kullanılan diğer elementlere göre değişmektedir. Alüminyum alaşımlarında en çok kullanılan elementler sırasıyla; Bakır (Cu), magnezyum (Mg), mangan (Mn), silisyum (Si), çinko (Zn) ve kurşun (Pb)'dir. Alüminyum alaşımları dövme alüminyum alaşımlar ve döküm alüminyum alaşımlar olmak üzere iki sınıfta incelenir (Mondolfo, 2013).

Dövme alüminyum alaşımları üretim şekline göre plastik şekil verme ve dövme yöntemleri ile üretilir. Dökme alüminyum alaşımları döküm işlemi ile üretilir (Yetiştiren, 1994).

Dövme alüminyum alaşımları Alüminyum Birliğinin sınıflandırmasına göre dört rakamdan oluşan simgeler ile sınıflandırılmaktadır. Bunlar; 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX serileri olarak gösterilir (Nie X. ve Matthews X., 2000).

- 1XXX serisi alüminyum alaşımları %99 ve üzeri alüminyum içeren saf alüminyum alaşımlarıdır. 1175, 1050, 1350, 1100 serileri endüstride en çok kullanılan 1XXX serisi alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar çoğunlukla yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek korozyon dayanımı gerektiren alanlarda kullanılmaktadır.

- 2XXX serisi alüminyum alaşımları bakır (Cu) oranı en yüksek olan alaşımlardır. En yaygın kullanılan 2XXX serisi alaşımı Al2024'tür. Al2024 alaşımı, alüminyum alaşımları arasında en sert, elastisite modülü ve mukavemet değerleri en yüksek olanlarından biridir. Spesifik mukavemet (akma gerilmesi/yoğunluk) ve spesifik elastisite modülünün (elastisite modülü/yoğunluk) önemli olduğu yerlerde, otomotiv sanayinde, vagon yapımında, mühimmat sanayinde, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban, perçin ve çekici tekerlekleri yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların mekanik özellikleri ısı işlemi ile yükseltilebilmesi endüstride kullanım alanını arttırmaktadır. Otomotiv, tıp, havacılık gibi birçok mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

- 3XXX serisi alüminyum alaşımları mangan (Mn) oranı en yüksek olan alaşımlardır. Yaygın olarak kullanılan 3XXX serisi alaşımlar Al3570 ve Al3560'tır. Endüstride 3XXX alaşımları iyi derecede kaynak kabiliyetleri ve kolay şekil alabilmelerinden dolayı tercih edilir.

•4XXX serisi alüminyum alaşımları silisyum (Si) oranı en yüksek olan alaşımlardır. 4XXX alaşımlarının en önemli artıları yüksek korozyon ve aşınma direncine sahip olmalarıdır. Otomotiv sektöründe, kaynaklı imalatta ve levha üretimlerinde yoğunlukla kullanılırlar.

•5XXX serisi alüminyum alaşımları magnezyum (Mg) oranı en yüksek olan alaşımdır. İçeriğindeki magnezyumdan dolayı sertlik ve mukavemetleri yüksektir. Tuzlu suya karşı yüksek korozyon direnci sayesinde deniz makineleri sektöründe yoğunlukla kullanılmaktadır.

•6XXX serisi alüminyum alaşımları magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) oranı en yüksek olan alaşımlardır. Yüksek şekillenebilme kabiliyetlerinden dolayı tercih edilirler. İyi derecede korozyon direncine sahip alaşımlardır.

•7XXX serisi alüminyum alaşımları çinko (Zn) oranı en yüksek olan alaşımlardır. Bu alaşımlar çok yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler fakat korozyon dirençleri fazla değildir. Ev araç gereçleri ve yüksek mukavemet gerektiren alanlarda yoğunlukla kullanılan alaşımlardır.

•8XXX serisi alüminyum alaşımları lityum (Li) oranı en yüksek olan alaşımlardır. Mukavemet değerleri yüksektir. Üretim maliyetleri çok yüksektir bu nedenle endüstride fazla tercih edilmez. Havacılık ve uzay sanayisinde tercih edilir (Mondolfo, 2013; Deschamps, 2001; Durmuş, 2009; Pul, 2019).

## **2.2. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi**

Günümüzde alüminyum alaşımları havacılık, tıp, otomotiv gibi genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlarla ilgili araştırmalar geliştirilerek devam etmektedir (Şüküroğlu, 2016).

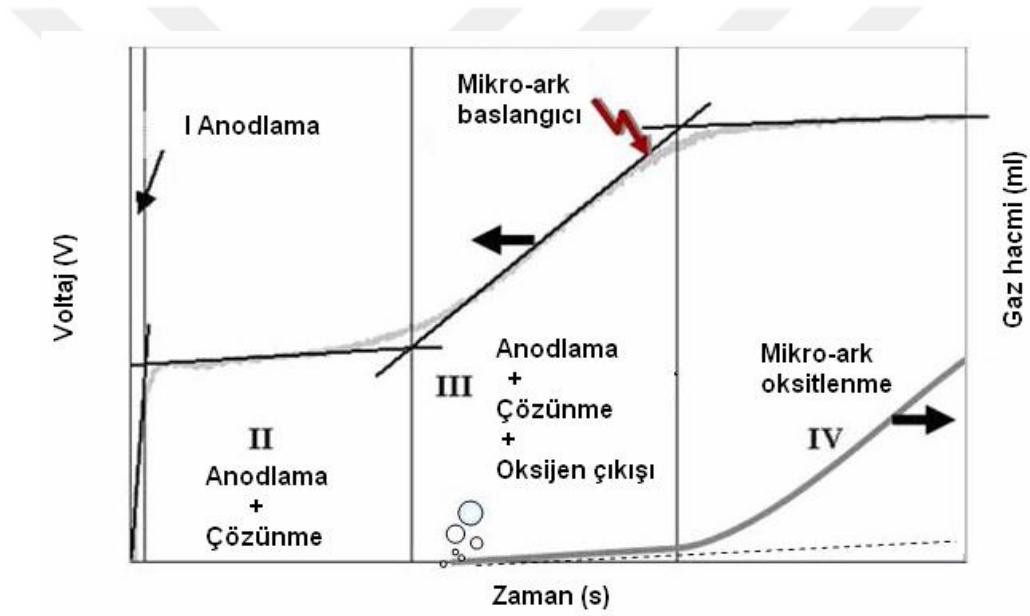
Ancak düşük yüzey sertliği, yüksek sürtünme katsayısı, zayıf aşınma ve korozyon direnci gibi özellikleri bu alaşımların kullanım alanlarını kısıtlamaktadır (Wang, 2015).

Bu alaşımların yüzey özelliklerini değiştirerek sürtünme, aşınma ve korozyonu davranışlarını kontrol altına almak veya azaltmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla termal, PVD, CVD, plazma nitrürleme, plazma sprey, plazma oksitleme gibi birçok yüzey modifikasyon teknikleri kullanılmaktadır (Şüküroğlu, 2016).

Bu yöntemler arasında popülerliğini gün geçtikçe arttıran MAO yöntemi göze çarpmaktadır. Bu yöntem farklı fiziksel ve mekanik yapılara sahip kaplamaların özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi malzemelerin alaşımlarının yüzeylerinde tabaka oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu prosedür, belirli alaşımların bir elektrolit içine batırılmasıyla başlar ve plazma kimyası ile elektrokimyasal reaksiyonların

etkileşiminden kaynaklanan sinerjistik bir etki kullanılarak yüzeyin kaplanması sağlanır. Bu süreçte, oluşan plazma boşalmaları, yüzeyin aşınma ve korozyona karşı dirençli bir tabaka ile kaplanmasını mümkün kılar. Bu yöntemin bir diğer avantajı ise farklı geometrik şekilli malzemelerin yüzeylerinde homojen bir kaplama oluşturulabilmesidir (Çakmak, 2008; Malayoğlu, 2008). MAO işlemi dört değişik basamakta gerçekleşmektedir (Şekil 1). Bu basamaklar;

- Anodlama,
  - Anodlama ve anodik çözünme,
  - Anodlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı,
  - Mikro ark oluşumu,
- Olarak görülür (Snizhko vd., 2004).



Şekil 1. MAO işlem basamakları (Snizhko vd., 2004).

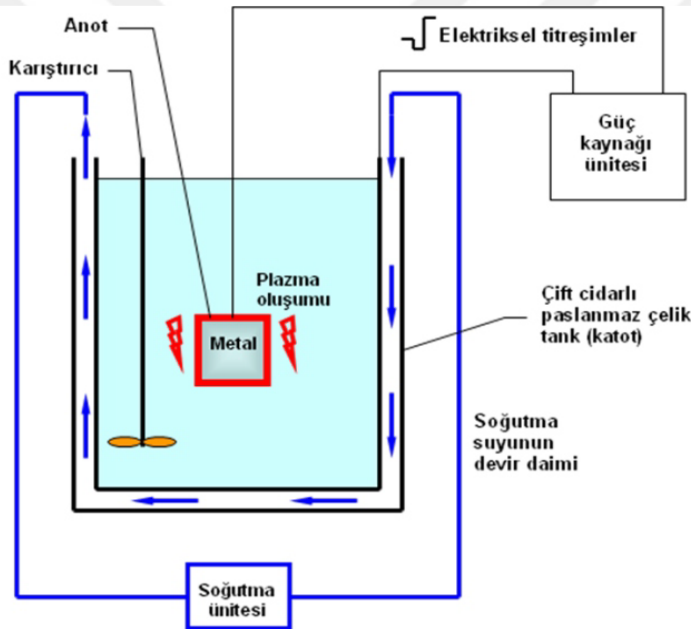
• **Anodlama;** işlemin ilk basamağıdır. Bu aşamada alüminyuma akım verilerek anodize edilir.

• **Anodlama ve anodik çözünme;** bu basamakta verilen akım düşer ve oksitlenme hızı yavaşlar. Oksijen kabarcıkları oluşur.

• **Anodlama, anodik çözünme ve oksijen çıkışı;** bu basamakta verilen akım hızı artar ve oksit oluşumu görülür.

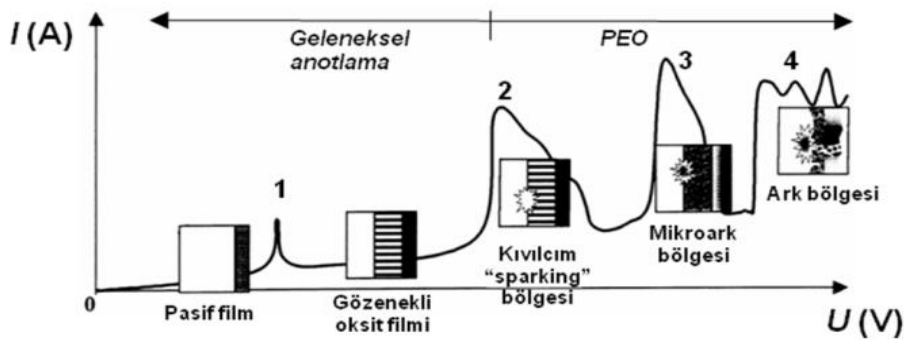
• **Mikro ark oluşumu;** oksijen çıkışı artar ve alüminyum yüzeyinde mikro arklar oluşur.

Kaplama işlemi, metal nesnenin yüzeyine bir kaplama malzemesi uygulamak için kullanılan bir süreçtir. Bu süreçte, metal nesne güç kaynağına anot olarak bağlanırken, paslanmaz çelik tank ise katot görevi görür. Elektrolit içindeki metal iyonları, anot üzerinden çözülerek çözeltiliye geçer ve katot üzerinde bir kaplama oluşturur. Homojen bir çözelti sağlamak amacıyla karıştırıcı kullanılır ve çözeltinin sıcaklığını kontrol etmek için soğutma suyu kullanılır. Bu adımların ardından sistem çalıştırılır ve elektrokimyasal reaksiyonlar başlar, böylece metal nesne üzerinde istenen kaplama oluşur. Bu yöntem, metal nesnelerin dayanıklılığını ve korozyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. MAO yöntemi çevreci oluşu, kullanıldığı malzemeye kazandırdığı yüksek aşınma ve korozyon direnci sayesinde hafif metallerin kullanımının yaygınlaşmasında önemli bir rol oynayan yöntemdir. MAO yönteminin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. MAO işleminde kullanılan araçlar (Çakmak ve Malayoğlu, 2008).

### 2.2.1. MAO İşleminde Akım-Voltaj Karakteristiği



Şekil 3. MAO işleminde akım-voltaj değişim grafiği.

Şekil 3. İncelenecek olursa;

- 0-1 aralığında, alüminyum üzerindeki pasif film tabakası ohm kanununa uyum sağlar ve çözünme 1 noktasından sonra başlar.

- 1-2 aralığında, voltaj düşüklüğü meydana gelerek gözenekli oksit film tabakası oluşur.

- 2 noktasında, elektrik alan kuvveti kritik değerlerin üzerine çıkarak darbe ve tünelleme iyonizasyonu sonucu oksit tabaka kırılır. Parlak kıvılcıklar bu bölgede görülür.

- 3 noktasında, darbe iyonizasyonu ve termal iyonizasyonla birlikte yavaş fakat daha büyük ark oluşumları gözlenir.

- 3-4 aralığında, giderek kalınlaşan oksit tabakası termal iyonlaşmayı engeller.

- 4 noktasında, mikro arkların şiddeti artar ve metal içerisinde ilerleyişini sürdürerek oluşan filmin kırılmasına sebep olur.

Bu grafik incelendiğinde oksidasyonun net bir şekilde anlaşılmasının metal-elektrolit üzerinde oluşacak olan oksit film tabakasının karakteristiği açısından önemli olduğu görülür (Yerokhin, 1999; Yerokhin, 2003).

MAO yönteminde farklı türde güç kaynakları kullanılır. Bu güç kaynakları doğru akım güç kaynağı, titreşimli doğru akım güç kaynakları, dengelenmemiş alternatif akım güç kaynakları ve değişken akım üreten güç kaynaklarıdır. Doğru akım güç kaynakları sabit akım ve sabit gerilim rejimlerinin uygulanmasını sağlar. Doğru akım güç kaynaklarında yüzey deşarj profillerinin düzenlenmesi zor olduğundan dolayı ince ve basit şekilli metallerde kullanılır (Snizhko, 2004; Yerokhin, 2002; Yerokhin, 2001).

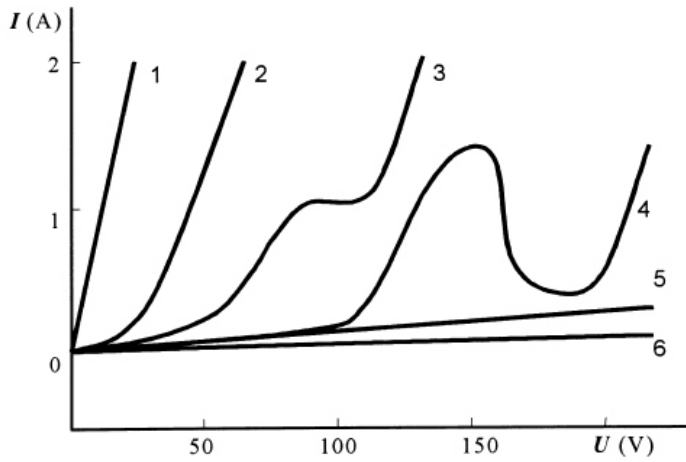
Yapılan çalışmalardan alınan sonuçlar sabit akımın işlem zamanı ve kontrolü açısından avantaj sağladığını göstermektedir (Yerokhin, 1999; Yerokhin, 2003; Yerokhin, 2002).

Sabit akımın avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi işlem sonucunda numune üzerinde oluşan gözenekli yapıdır. Bu gözenekli yapılar korozyon dayanımını düşürdüğü için işlem veriminde düşürür. Bundan dolayı farklı güç kaynakları ile çalışmalar yapılarak daha pürüzsüz, aşınma ve korozyon dayanımı yüksek numuneler elde edilmiştir (Guidong, 2007; Jin, 2006).

Bu güç kaynaklarından biri olan titreşimli doğru akım güç kaynakları işlemin kontrollü olarak durdurulmasına ve arkın metal yüzeyinde kalma süresinin belirlenmesine olanak tanır. Oluşan titreşim şeklide değiştirilebilir. Bu kontrollerin yapılması ısı değişimlerinin kontrolüne olanak sağlar ve oluşan kaplamanın yapısı değişir (Yerokhin, 1999).

Bir diğer güç kaynağı ise dengelenmemiş alternatif akım güç kaynaklarıdır. Bu güç kaynakları ile elektrodun ekstra kutuplaşması engellenir ve işlemin kontrollü bir şekilde devam etmesi sağlanır. Yapılan kaplamanın kontrol edilebilirliği için farklı genliklerde pozitif ve negatif alternatif akım uygulaması yapılır (Yerokhin, 1999).

MAO yönteminde kaplama özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biride elektrolit çözeltileridir. Elektrolit çözeltileri kaplamanın büyüme hızında, mikroyapılarında, faz bileşimlerinde ve element dağılımlarında farklılıklar görülmesine neden olur. İstenilen özelliklere göre; alüminat bazlı, sodyum hidroksit bazlı, fosfat bazlı ve silikat bazlı çözeltiler seçilerek işlem gerçekleştirilir (Li, 2013).



Şekil 4. Alüminyum alaşımı üzerinde MAO yöntemiyle oksit kaplama üretmek için kullanılan elektrolitler.

Alüminyumun çözünme davranışını etkileyen çeşitli elektrolitler incelendiğinde, farklı çözelti türlerinin metalin çözünme hızını belirgin şekilde etkilediği görülmektedir. Alüminyumun hızlı çözünmesini sağlayan elektrolitler arasında NaCl, NaClO<sub>3</sub>, NaOH, HCl ve NaNO<sub>3</sub> bulunmaktadır. Diğer yandan, alüminyumun daha yavaş çözünmesini sağlayan çözeltiler arasında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yer almaktadır. Öte yandan, metal pasifizasyonu için dar bir voltaj aralığı sağlayan elektrolitler arasında C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> öne çıkmaktadır. Grafik analizi, metal pasifizasyonunu azaltan elektrolitleri ve bunun yanı sıra metalin pasifizasyonunu güçlendiren elektrolitleri de içermektedir. Pasifizasyon güçlendiren elektrolitler arasında boric asit, fosforik asit, karbonik asit, inorganik polimerler (silikatlar, alüminatlar, tungstat, molibdat) ve alkali metal fosfatları bulunmaktadır. MAO yöntemiyle kaplama üretimi için en avantajlı elektrolitlerin 4-6 gruplarındaki elektrolitler olduğu görülmektedir (Şekil 4). Bu gruplar, kaplama yüzeyinde kırılcım oluşumunu hızlandırdığı için tercih edilmektedir. Elektrolitler, kaplama oluşumu

sırasında sadece oksijen ekleyenler, farklı elementler katan anyonik bileşenler içerenler, farklı elementler katan katyonik bileşenler içerenler ve makro parçacıkları kaplamaya katan heterojen bileşenler olmak üzere dört grupta incelenebilir. Grup 2 ve 3'teki elektrolitlerde kaplama oluşumu, altlığın oksitlenmesi ve çözelti içindeki maddelerin altlık yüzeyine çökmesi ile sağlanır. MAO yöntemiyle üretilen kaplamalar, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü yüksek korozyon direnci, aşınma direnci ve yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Ayrıca, asidik ve bazik ortamlara karşı direnç göstermeleri, kimyasal uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Isıl işlemlerde düşük ısı iletkenlik göstermeleri de bu kaplamaların geniş bir uygulama yelpazesi bulmasını destekler.

### **2.2.2. Alüminyum Alaşımlarında MAO Yöntemi**

MAO yöntemi ile alüminyum ve alaşımları istenilen özellikte ve kalınlıkta kaplanabilir. Al ve alaşımlarında oluşturulan kaplamaların altlık ve kaplama arasındaki bağ kuvvetli ve uyumludur (Wenbin, 2006; Krishna, 2006; Apelfeld, 2000; Hanhua, 2005).

Alüminyum ve alaşımlarının MAO prosesiyle kaplanması sürecinde ilk aşamada, yüksek voltaj ve dielektrik bozunum voltajının aşılmasıyla meydana gelen arklar, deşarj kanallarını oluşturur. Bu kanallardaki sıcaklık, 104 K seviyesine kadar çıkabilir. Ardından, bu bölgedeki güçlü elektrik alan etkisiyle iyonlar, oluşan ark deşarj kanallarına girer. Yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle alüminyum oksitlenir ve kaplama süreci başlar. Oluşan oksitler, daha soğuk elektrolit ile temas ederek kaplamanın kalınlaşmasını sağlar. Bu nedenle, kaplama profilini belirleyen en kritik faktörün mikro ark deşarj kanalları olduğu belirtilmektedir (Fanya, 2005; Guanglianga, 2002; Curran, 2006).

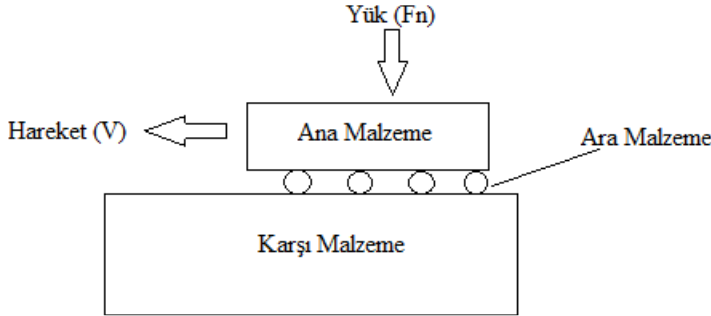
### **2.3. Aşınma**

Aşınma basit olarak açıklanacak olursa hareket ve temas halinde olan yüzeylerde meydana gelen deformasyon sürecidir. Sürtünmenin var olduğu her ortamda aşınmanın varlığından söz edilebilir (Shizhu ve Ping, 2012).

Aşınma olayının gerçekleşebilmesi için aşağıdaki şartların tümü oluşmalıdır.

- I. Fiziksel, mekanik veya kimyasal bir etki
- II. Sürtünme
- III. Süreklilik
- IV. Malzeme yüzeyinde deformasyon
- V. İstenilen şartların dışında oluşması (Gök, 2008).

Aşınma oluşumunu oluşturan iki malzemeye aşınma çifti adı verilir. Belli bir kuvvet altında birbirlerine zıt yönde hareket eden aşınma çiftinin arasında olan ara malzeme ile aşınma olayı gerçekleşir. Aşınma olayında aşınma çiftinden kopan parçacıklar ara malzeme olarak aşınmaya katılabilir ve bu durum Şekil 5'te görülmektedir (Özcan, 2014).



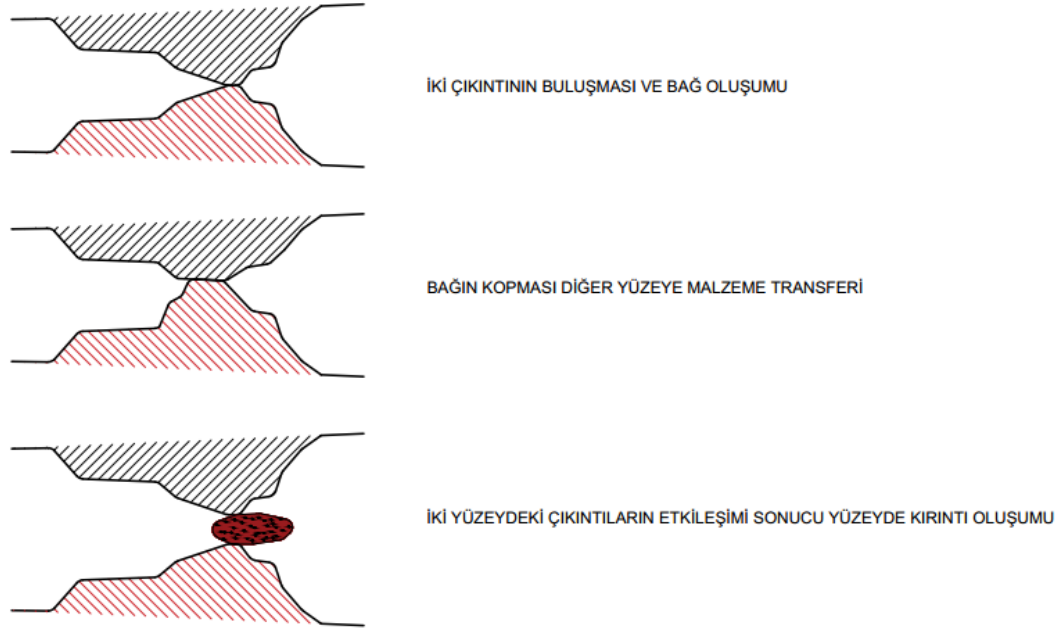
Şekil 5. Aşınmayı oluşturan unsurlar (Özcan, 2014).

### 2.3.1. Aşınma Türleri

#### 2.3.1.1. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma birbiriyle temas halindeki iki metalin yüzeylerinde yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle kaynama oluşumu gözlenir. Çalışma devam ederken bu kaynamalar kopar ve adhezif aşınma meydana gelir. Genellikle sertlik değerleri birbirine yakın metaller arasında gerçekleşir. En sık görülen aşınma türüdür (Toparlı, 1993).

Bu aşınma türü katı malzemelerin birbirleri üzerindeki zıt yönlü hareketlerle veya birbirleri üzerine yaptıkları basınçla ortaya çıkar. Bu nedenle malzemelerde kayıp ortaya çıkar. Birbirine temas halinde olan malzemelerin yapışma eğilimi göstermeleriyle ortaya çıkar. Temas halindeki iki malzemenin birbirinden ayrılması ile iki malzemenin kopan parçaları birbirine yapışıp kalır. Bu parçalara adhezif aşınma parçası denir. Temas halinde ortaya çıkan ısı yapışmayı kolaylaştırır ve çoğunlukla aynı kafes yapısına sahip metaller arasında görülen adhezif aşınma meydana gelir. Temas halindeki metallerin yüzeylerindeki gözle görülmeyen pürüzler ısı ve basınç yardımıyla etkileşime girerek plastik deformasyon oluşur. Malzemeler ne kadar kolay şekillenebilir ise oluşan plastik deformasyon tüm yüzeye yayılır. Bu durumda yüzeylerde bulunan hapsolmuş gaz, sıvı molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, moleküllerin direk temasına olanak sağlar (Şekil 6). Temas noktalarında oluşan kaynak bölgeleri zıt hareketler ile parçalanarak yüzeyler arasına taşınır (Okay, 2006).



Şekil 6. Adezif aşınmanın şematik gösterimi (Terkeşli, 2017).

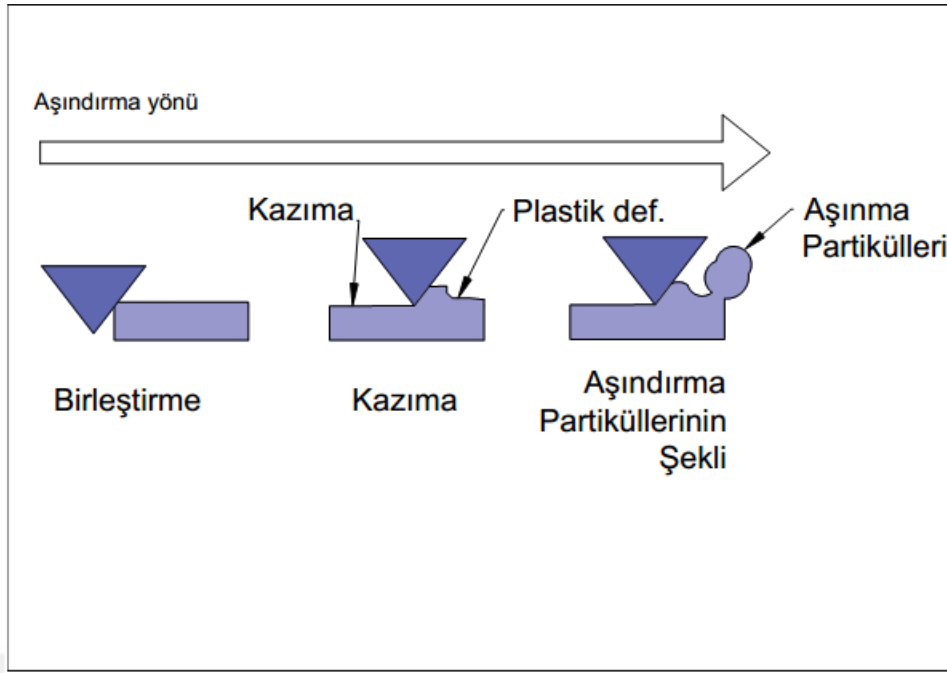
### 2.3.1.2. Abrazif Aşınma

Birbirine zıt yönlerle hareket eden iki malzemedен yüzeyi daha sert olanın diğer malzeme yüzeyinde oluşturduğu deformasyonla veya ortamdaki daha sert yabancı parçacıkların temas yüzeylerine katılmasıyla oluşan mikro talaş kaldırma olayına abrazif aşınma denir. Abrazif aşınma iki yüzey arasında gerçekleşiyorsa iki cisimli abrazif aşınma, yüzeyler arasına giren yabancı parçacıklar ile gerçekleşiyorsa üç cisimli abrazif aşınma olarak adlandırılır (Demirel, 2013).

Khruschov ve Babichev, yaptıkları çalışmalarda aşındırıcı parçacıklarla temas eden yüzeylerde iki prosesin meydana geldiğini bulmuşlardır (Çetin, 2005).

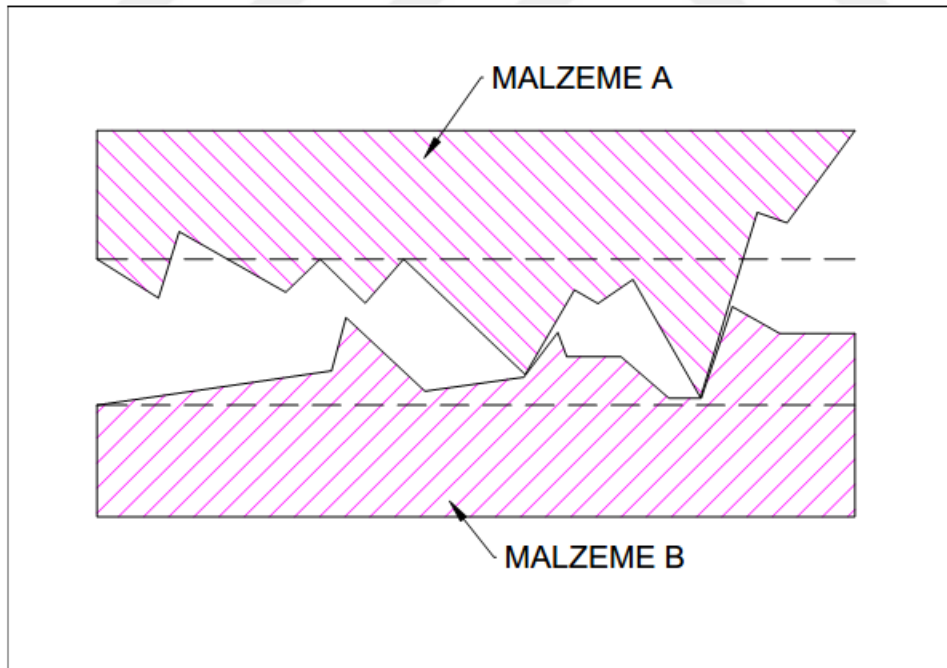
- Basınç nedeniyle oluşan yüzeysel plastik şekil değiştirmeler.
- Yüzeyden mikro talaş formunda parçacıkların ayrılması.

Abrazif aşınmanın oluşması için gereken en önemli şart iki malzemedен birinin daha sert olmasıdır (Şekil 7).

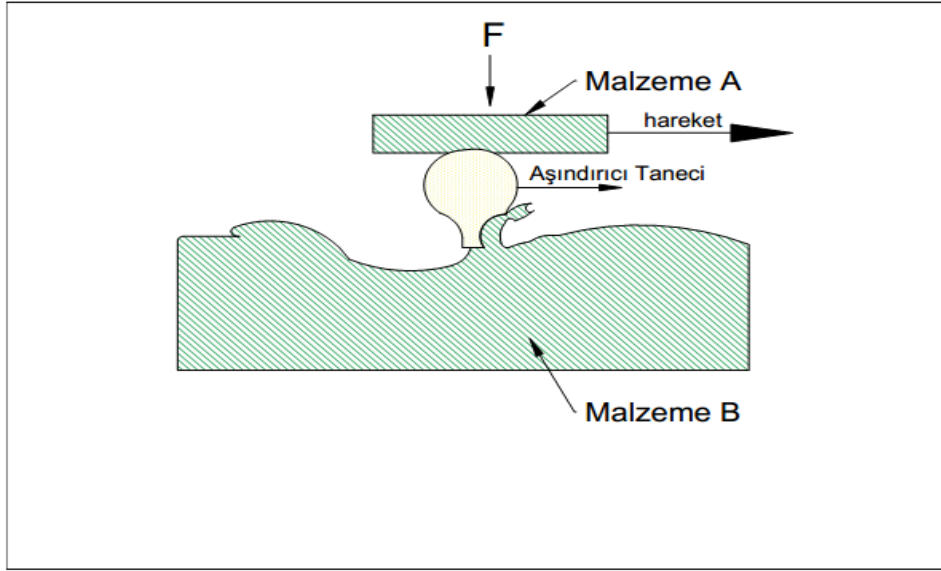


Şekil 7. Abrazif aşınmanın şematik gösterimi (Terkeşli, 2017).

Aşağıdaki şekillerde iki cisimli ve üç cisimli abrazif aşınmalar gösterilmektedir (Şekil 8-9).



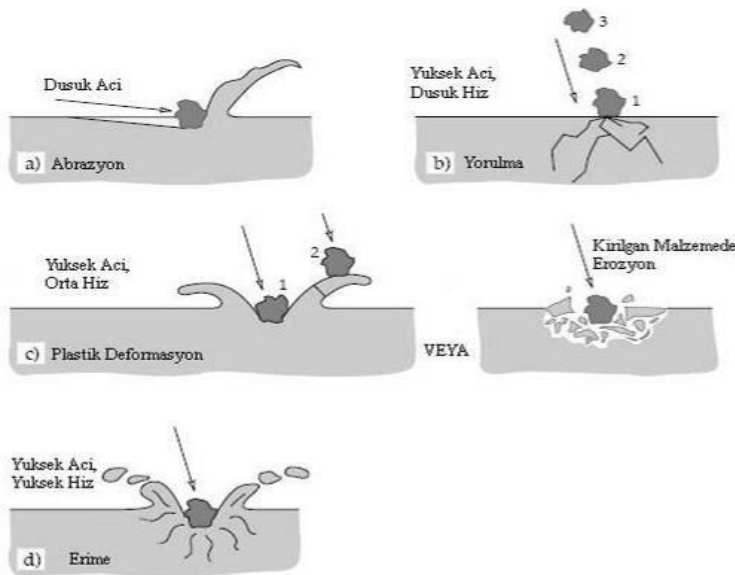
Şekil 8. İki cisimli Abrazif aşınma (Terkeşli 2017).



Şekil 9. Üç cisimli Abrazif aşınma (Terkeşli, 2017).

### 2.3.1.3. Erozyon Aşınması

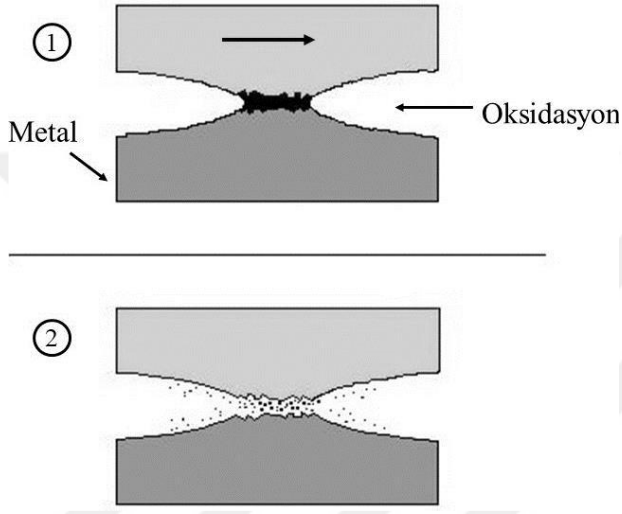
Bir cismin yüzeyine çarpan katı veya sıvı parçacıkların oluşturduğu aşınma türüne erozyon aşınması denir. Abrazif aşınmadan farkı sürtünmeden ziyade yüzeye çarpan parçacıklardan meydana gelmesidir. Parçacıkların hareketi temas yüzeyine paralel olduğunda abrazif erozyon aşınması olarak adlandırılır. Parçacıkların hareketi temas yüzeyine dik olduğunda çarpma erozyon aşınması olarak adlandırılır. Parçacık özellikleri (sertlik, boyut, şekil), aşınan parçanın özellikleri (sertlik ve yüzey kalitesi) ve ortam özellikleri erozyon aşınmasını etkileyen önemli faktörlerdendir. Erozyon aşınması farklı mekanizmalarla ortaya çıkar ve bu mekanizmalar Şekil 10’da gösterilmiştir (Stachowiak ve Batchelor, 2001).



Şekil 10. Erozyon aşınma mekanizmaları (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

#### 2.3.1.4. Korozyon aşınması

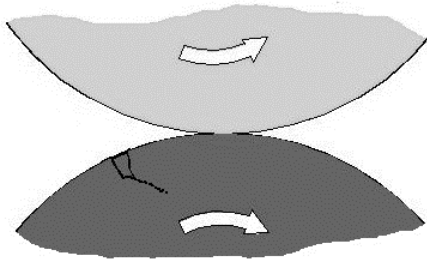
Metal yüzeyleri, buldukları ortamdaki hava ile reaksiyona girer ve yüzeylerinde oksit ve diğer tabakalar meydana gelir. Aynı zamanda kimyasal maddelerle etkileşim halinde çalışan metal malzemeler, etkileşim halinde oldukları kimyasallar ile reaksiyonlara girerek yüzeylerinde sert tabakalar oluşur. Farklı yükler altında zamanla bu tabakalar ana malzemedan ayrılır ve aşınma parçacıklarını oluşturur. Ayrılan aşınma parçacıklarının altında kalan yüzey tekrardan reaksiyona girerek ayrılır (Şekil 11). Bu aşınma türüne korozyon aşınması denir (Kılıçarslan, 2020).



Şekil 11. Korozyon aşınması (Kılıçarslan, 2020).

#### 2.3.1.5. Yorulma Aşınması

Birbirleriyle temas halinde uzun süre çalışan malzemelerde değişen ve tekrar eden yükler nedeniyle zamanla oluşan çatlakların ilerleyerek ana malzemelerden ayrılmasıyla meydana gelen olaya yorulma aşınması denir. Bu aşınmanın şematik gösterimi Şekil 12’de görülmektedir. Genellikle krank milleri ve rulmanlı yataklar, kam milleri, dişli çarklar gibi uzun süre temas halinde çalışan metallerde meydana gelir (Kılıçarslan, 2020).



Şekil 12. Yorulma aşınması (Kılıçarslan, 2020).

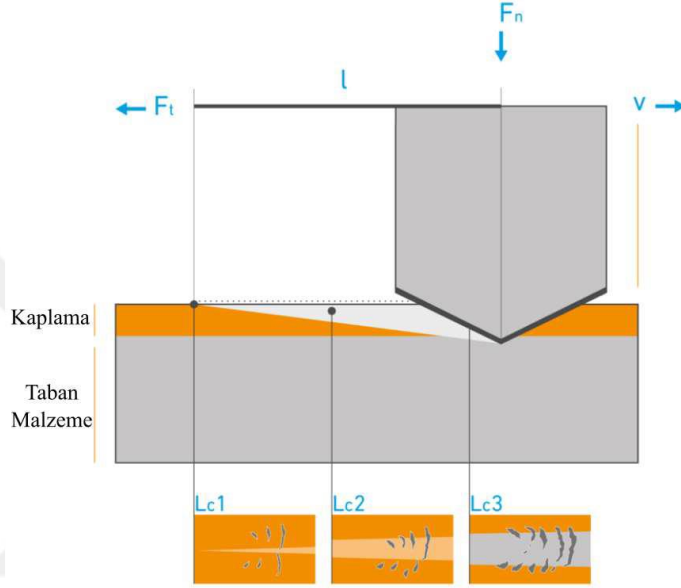
#### 2.4. Kaplama Adhezyonu

Adhezyon, kaplama işlemi yapılan malzemelerin taban malzeme ve kaplama arasındaki bağı performansının ve güvenilirliğinin belirlenmesindeki en önemli faktörlerden biridir. Kaplama yapılan taban malzeme ve oluşan kaplamanın birbirlerine bağlanmasını sağlayan kuvvete kaplama adhezyonu denir. Aynı zamanda, taban malzemedeki kaplamanın mekanik olarak çıkarılmasına karşı gösterdiği dirence adhezyon denir. Kaplama uygulamalarında adhezyon değeri çok önemlidir (Belet, 2022).

Kaplama adhezyonu, mekanik mukavemete, yüzey temizliğine, yüzey sertliğine, kimyasal bağlarına ve yüzey enerjisine bağlı kompleks bir olaydır. Bu nedenle oluşturulan kaplamalarda her zaman çok iyi adhezyon beklenir. Kaplama ve taban malzeme için gereken adhezyon kuvveti kaplamanın kalitesini belirler. Bu nedenle kaplama ve taban malzeme arasındaki adhezyon mukavemeti kaplama ve taban malzemenin ayrılmadan dayanabileceği maksimum kuvvete denir (Belet, 2022).

MAO yöntemiyle yapılan kaplamaların adhezyon dirençlerini ölçmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı Scratch testidir. Bunun dışında İndentation testi, Impact testi, Lazer testi, Pull-Off testi gibi yöntemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Scratch testi çizik ve çizilme olarak adlandırılır. Oluşturulan kaplamaların maruz kaldığı gerilmeler için kaplama karakterizasyon testidir. Bu test kaplamaların kohezif ve adhezif kuvvetlerini ölçmek için kullanılır. Taban malzeme ve kaplama arasında oluşan adhezyon direncinin ve oluşan hasarın türünün belirlenmesi prosesine dayanır. Scratch testleri çizici Rockwell-C konik batıcı elmas uç kullanılarak artan yük ve sabit kayma hızında gerçekleştirilir. Batıcı konik elmas uç artan doğrusal olarak artan kuvvetin etkisiyle kaplama yüzeyinde soyulma ve kazınmaya neden olmaktadır. Kaplama ve taban malzeme arasında oluşan adheziv veya kaplamanın içerisinde meydana gelen kohezif hasarlar için ölçülen en düşük yük, kritik yük değeri ( $L_c$ ) olarak ifade edilir. Meydana gelen bu hasarlar mikroskop yardımıyla incelenir. Kritik yükteki kaplamanın ayrılması için gereken kuvvet miktarı oluşturulan kaplamanın taban malzeme üzerindeki adhezyonu olarak belirtilir. Sürtünme grafiği ve kaplama üzerindeki mikroskobik incelemelerle kritik yük belirlenir. Normal yük, sürtünme kuvveti ve Rockwell-C batıcı konik elmas ucun iz derinliği de belirlenir. Sabit yük çizik testi, artan yük çizik testi ve çoklu yük çizik testi olarak üç farklı Scratch test yöntemi mevcuttur. Artan yük çizik test yönteminde oluşan çatlaklar genelde üç kademeyle incelenir. I. Test sırasında ilk yükleme yapıldığında scratch kenarlarında ilk çatlaklar oluşur. Buna karşılık gelen kuvvet  $L_{c1}$  kuvveti olarak ifade edilir. II. Yükleme yeterli büyüklüğe ulaştığında filmde ikinci tip çatlaklar meydana gelecektir. Bu tip çatlakların sebebi filmde meydana

gelen koheziv ayrılmalardır. Buna karşılık gelen kuvvet  $Lc_2$  kuvveti olarak ifade edilir. III. Test koheziv çatlaklardan sonra yüklemeye devam edildiğinde numunede adhezif ayrılmalar sonucu büyük çatlaklar oluşacak  $Lc_3$  ve film taban malzemedan ayrılmış olacaktır. Bu değer kaplama taban malzeme arasındaki adhezyon kuvveti olarak kabul edilecektir. Burada;  $F_n$  normal kuvveti,  $L$  çizik uzunluğunu,  $F_t$  sürtünme kuvvetini,  $V$  test hızını,  $L_c$  ise kritik yükleri ifade eder (Belet, 2022). Scratch testinin şematik görüntüsü Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 13. Scratch testinin şematik görüntüsü (Belet, 2022).

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Taban Malzeme (Numune) Hazırlama

Al2024 alaşımları, MAO işlemine tabi tutulmadan önce özenle seçilen 25 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarındaki anot atıklar olarak belirlenmiştir. MAO ünitesinde bulunan paslanmaz çelik katot malzemesi, numunelerin köşelerine sabitlenmek üzere özel olarak tasarlanan 3 mm çapında delikler açılarak monte edilmiştir. Numuneler, yüzey düzenlemesi için sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı SiC zımparalar kullanılarak özenle zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sonrasında numuneler, özel bir hazırlık aşamasından geçirilerek saf su ve etil alkol ile temizlenmiş ve özenle kurutulmuştur. Ardından, MAO işlemi için optimal bir duruma getirilmişlerdir. Bu adımlar, numunelerin MAO işlemine uygun hale getirilmesi için titiz bir önceden işleme sürecini temsil etmektedir. Bu dikkatli hazırlık aşamaları, sonraki MAO işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak adına önemli bir rol oynamaktadır.

#### 3.2. Elektrolit Hazırlama

Al2024 alaşımının MAO yöntemiyle kaplanma süreci, özel olarak tasarlanmış bir cihaz kullanılarak Şekil 14'te verilmiştir. Kaplama işlemi sırasında, numune anot olarak kullanıldı ve paslanmaz çelik hazne ise katot olarak görev aldı. Başlangıçta, MAO işlemi için alkali bir çözelti hazırlandı. MoS<sub>2</sub> ve ZnO katkı maddeleri eklenerek elektrolitik çözelti oluşturuldu. Hazırlanan elektrolit için, 4 litre saf su içine 16 g Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 8g KOH ve 6 g NaAlO<sub>2</sub> bileşenleri eklenerek çözelti hazırlandı. Ardından, her birinden 6 g kullanılarak katkısız (0-Al2024), MoS<sub>2</sub> katkılı (1-Al2024) ve ZnO katkılı (2-Al2024) olmak üzere üç farklı elektrolit çözeltisi oluşturuldu. Hazırlanan elektrolitik çözeltilerin kimyasal bileşenleri, Tablo 2'de ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Bu adımlar, özel elektrolit çözeltilerinin hazırlanması ve numunelerin MAO işlemine uygun hale getirilmesi için titiz bir laboratuvar sürecini temsil etmektedir.

Tablo 2. MAO işleminde kullanılan çözeltiler

Elektrolit Çözeltisi					
Kod	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/l)	KOH (g/l)	NaAlO <sub>2</sub> (g/l)	MoS <sub>2</sub> (g/l)	ZnO (g/l)
0-Al2024	4	2	6		

Tablo 2. (Devamı)

Elektrolit Çözeltisi				
1-Al2O3	4	2	6	1.5
2-Al2O3	4	2	6	1.5

### 3.3. MAO Yöntemiyle Kaplamaların Büyütülmesi

MAO cihazı, bünyesinde barındırdığı 30 kW kapasiteli AC güç kaynağı ile gerçekleştirilen kaplama işleminde, tüm numuneler için sabit bir voltaj ve diğer önemli parametreleri kontrol edebilen bir sistem olarak kullanılmıştır. Elektrolitik çözeltilere çinko oksit ve molibden disülfür partikülleri eklenerek, bu katkı maddelerinin kaplama üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Kaplama işlemleri, pozitif voltajın 451 V, negatif voltajın 101 V, frekansın 251 Hz, pozitif vuruş oranının %10, negatif vuruş oranının %10 ve sürenin 15 dakika olarak belirlendiği parametrelerle başlatılmıştır. Bu parametreler, Şekil 15'te görsel olarak sunulmuştur. Bu özel konfigürasyon, kaplama sürecinin kontrolü ve incelenen katkı maddelerinin etkilerinin sistemli bir şekilde değerlendirilmesi için tasarlanmıştır.



Şekil 14. Mikro ark oksidasyon cihazı.

Tablo 3. MAO işlemi parametreleri.

Parametreler	Deney Şartları
Pozitif voltaj (V)	460
Negatif voltaj (V)	110
Frekans (Hz)	260
Pozitif vuruş yüzdesi (%)	10
Negatif vuruş yüzdesi (%)	10
İşlem zamanı	15

MAO işlemi sonucunda oluşan kaplanmış numuneler, 110 °C'de kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında, kaplanmış numuneler deneyler için hazır hale getirilmiştir.

### 3.4. Kaplamaların Karakterizasyonunun İncelenmesi

MAO yöntemiyle yapılan kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra, kaplanan numunelerin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.1. Yapısal Analizler

XRD, kaplamasız ve kaplanmış numunelerin yapılarında meydana gelen farklı fazları belirlemek amacıyla kullanılmıştır. PANalytical model cihazı ile gerçekleştirilen XRD ölçümleri, 41 mA ve 47 kW güç değerlerinde Cu-K $\alpha$  ışınımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ışınının dalga boyu  $\lambda=1.5419 \text{ \AA}$  olarak belirlenmiştir. Ölçüm değerleri, oda sıcaklığında  $10 \leq 2\theta \leq 90$  tarama aralığında, 0.018 derece/s tarama hızında ve 0.1 derece tarama şartlarında elde edilmiştir. Bu ölçümler, numunelerin kristalin yapılarındaki değişiklikleri belirlemek ve kaplama işlemi sonrasında oluşan farklı fazları analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 15'de XRD cihazı gösterilmiştir.



Şekil 15. X-ışını difraktometresi (XRD).

#### 3.4.2. SEM Analizleri

0-AI2024, 1-AI2024 ve 2-AI2024 kodlu numunelerin gözenek boyutlarını ve morfoloji yapılarını belirlemek amacıyla SEM kullanılmıştır. Bu SEM incelemeleri, Zeiss marka elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, SEM cihazı üzerinde numunelerin belirli bölgelerinden kesit alınarak kaplama kalınlık ölçümleri yapılmıştır.

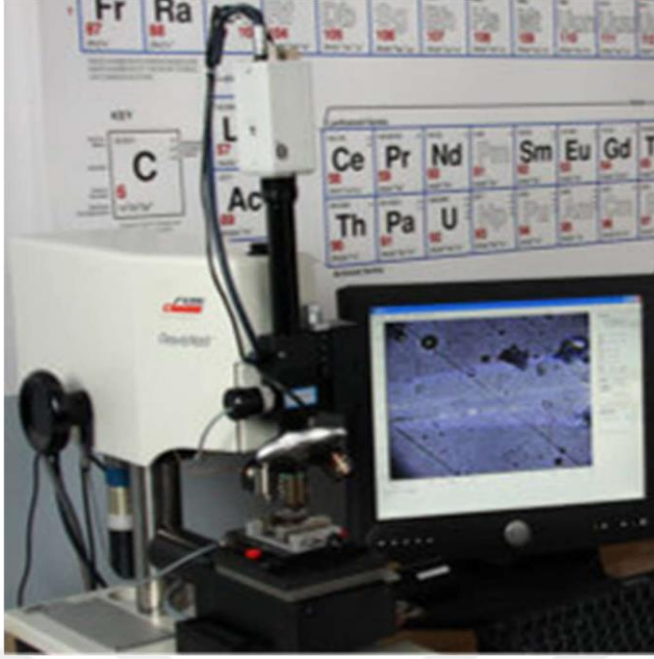
Bu ölçümler, kaplama işlemi sonrasında oluşan yapısal değişiklikleri ve katkı maddelerinin etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, numunelerin mikro yapılarını detaylı bir şekilde inceleyerek kaplama sürecinin etkinliğini değerlendirmeyi sağlamaktadır. Şekil 16’da SEM cihazı gösterilmektedir.



Şekil 16. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

### 3.4.3. Adhezyon Analizi

MAO işlemleri sonrasında kaplanan numunelerin kaplama taban malzeme arasındaki adhezyonun belirlenmesinde, CSM marka Scratch Test Cihazı kullanılmıştır. Numuneler, 201  $\mu\text{m}$  yarıçaplı Rockwell-C konik elmas uç kullanılarak 11 mm/dk bir kayma hızında ve 101 N/dk artan yük altında teste tabi tutulmuştur. Bu test, kaplamanın taban malzeme ile olan bağlanma direncini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 17’de Scratch Test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 17. Scratch test cihazı.

#### 3.4.4. Aşınma Analizi

MAO işlemiyle hazırlanan 0-AI2024, 1-AI2024 ve 2-AI2024 kodlu numunelerin aşınma özelliklerini incelemek amacıyla, Şekil 18’de gösterilen aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşınma deneyi deniz suyu, oda koşulları ve yağ ortamlarında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri, Tablo 4’te ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir.



Şekil 18. Aşınma deney cihazı.

Tablo 4. Aşınma deneyinde kullanılan parametreler ve deney şartları.

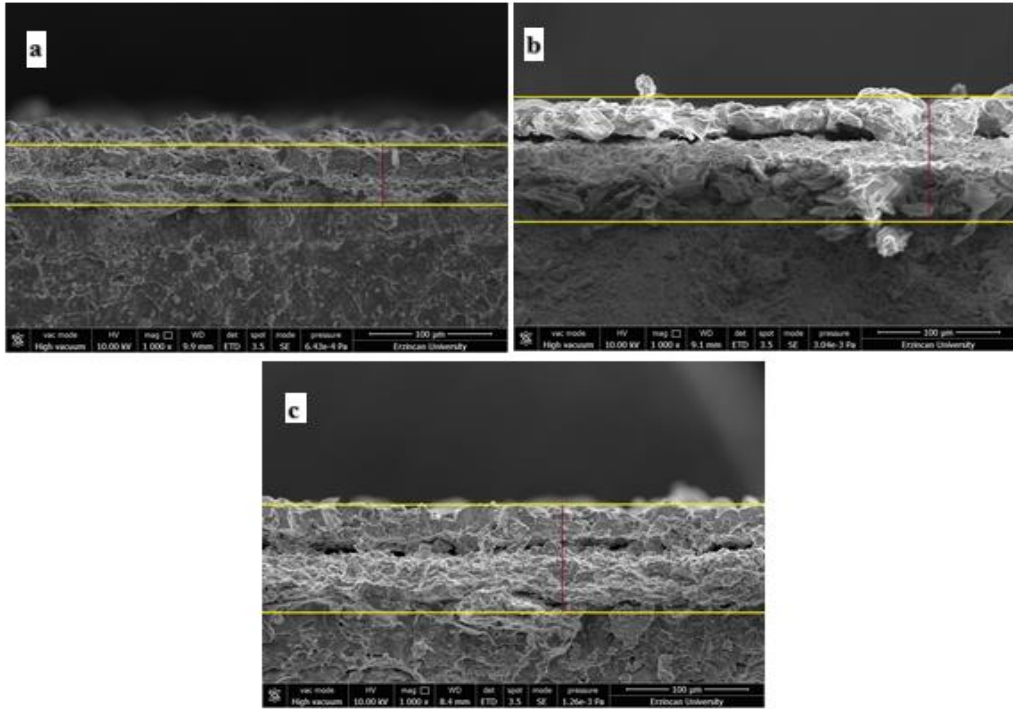
<b>Parametreler</b>	<b>Deney Şartları</b>
Uygulanan yük, (N)	2
Kayma hızı, (m/s)	0.19
İz çapı (mm)	5
Sıcaklık, (°C)	26
Süre, (s)	350
Bilye çapı (mm) ve türü	5, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ortam	Deniz Suyu, Oda Koşulları, Yağ

Aşınma deneyleri, 2 N sabit yük altında deniz suyu, oda koşulları ve yağ olmak üzere üç farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Farklı ortam şartlarında, katkısız kaplamalı (0-Al2024), molibden disülfür katkılı kaplama (1-Al2024) ve çinko oksit katkılı kaplamalı (2-Al2024) numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma değerleri incelenmiştir. Aşınma test cihazından elde edilen sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) – zaman değerleri otomatik olarak kaydedilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Kalınlık Ölçümü Sonuçları

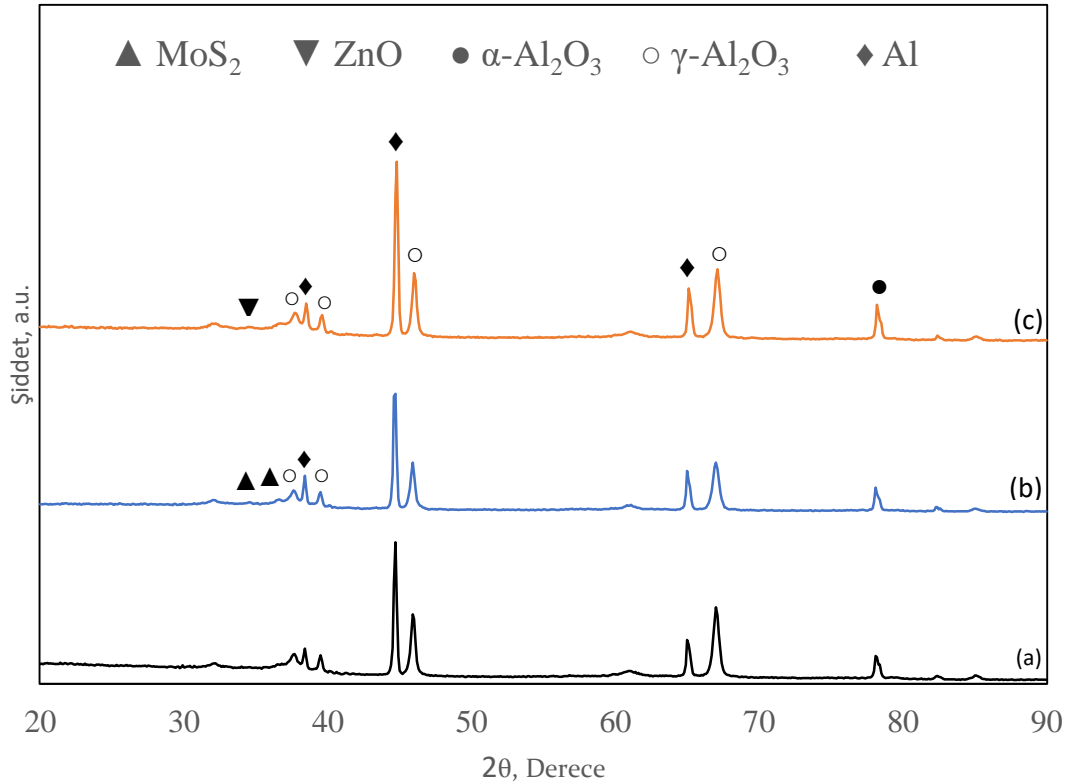
MAO yöntemiyle kaplama oluşturulurken ilk önce iletkenliği düşük olan oksit tabakasını parçalamak için boşaltma kanalları oluşturulur ve elementler kanallara eritilir, bu elementler elektolitik elementler ile reaksiyona girerek oksitlenir ve kaplama yüzeyine püskürtülür. Bu işlemler ile kaplama kesitinin artışı sağlanır. Şekil 19’da sırasıyla Al2024 kaplamanın, MoS<sub>2</sub> ilaveli kaplamanın ve ZnO ilaveli Al2024 kaplamanın kesit görüntüleri verilmiştir. Kesitler 1000x büyütmede SEM görüntülerinden alınmıştır. 0-Al2024 kaplamanın kalınlığı yaklaşık  $\approx 46\mu\text{m}$ , 1-Al2024 kaplamanın kalınlığı  $\approx 100\mu\text{m}$  ve 2-Al2024 kaplamanın kalınlığı  $\approx 89\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Bu değerler incelendiğinde 0-Al2024’ün en düşük kaplama kalınlığına ve 1-Al2024’ün de en yüksek kaplama kalınlığına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni elektrolit içerisine katılan katkı maddelerinin iletkenliği artırması olarak bilinmektedir (Zuo vd., 2019; Kaplan vd., 2021).



Şekil 19. a) 0-Al2024, b) 1-Al2024, c) 2-Al2024 kodlu numunelerin kaplama kalınlık SEM görüntüleri

## 4.2.Yapısal Analiz Sonuçları

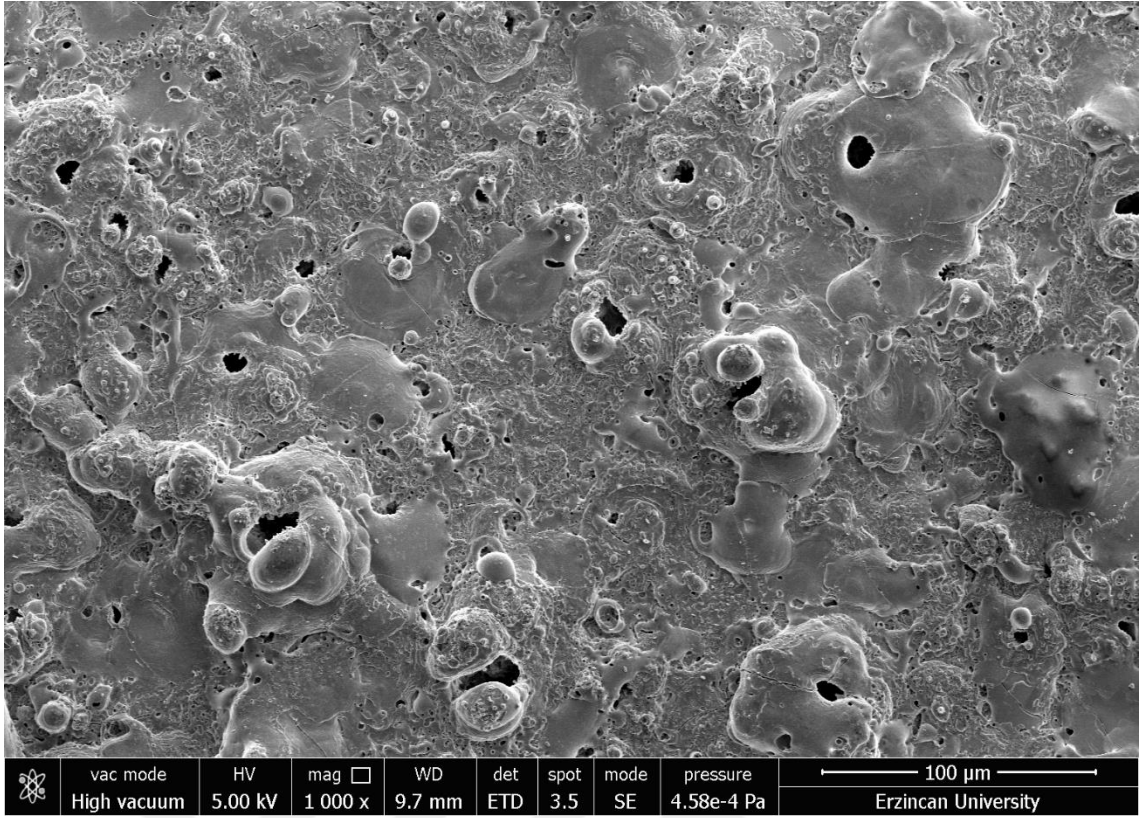
Literatür çalışmalarında Al alaşımlarının MAO yöntemiyle kaplanmasıyla oluşan temel fazın  $\text{Al}_2\text{O}_3$  olduğu belirtilmiştir (Yang ve Wu, 2010; Gu vd., 2012). 0-Al2024, 1-Al2024 ve 2-Al2024 kodlu malzemelerin XRD analiz sonuçları Şekil 20’de verilmiştir. Oluşan fazlar genellikle  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ’tür. Kaplamanın kalitesinin iyi olması  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  fazının yüksek olmasıyla doğru orantılıdır. Kaplamaya eklenen katkı maddeleri ile birlikte bu fazların oranlarında değişim göstermektedir.



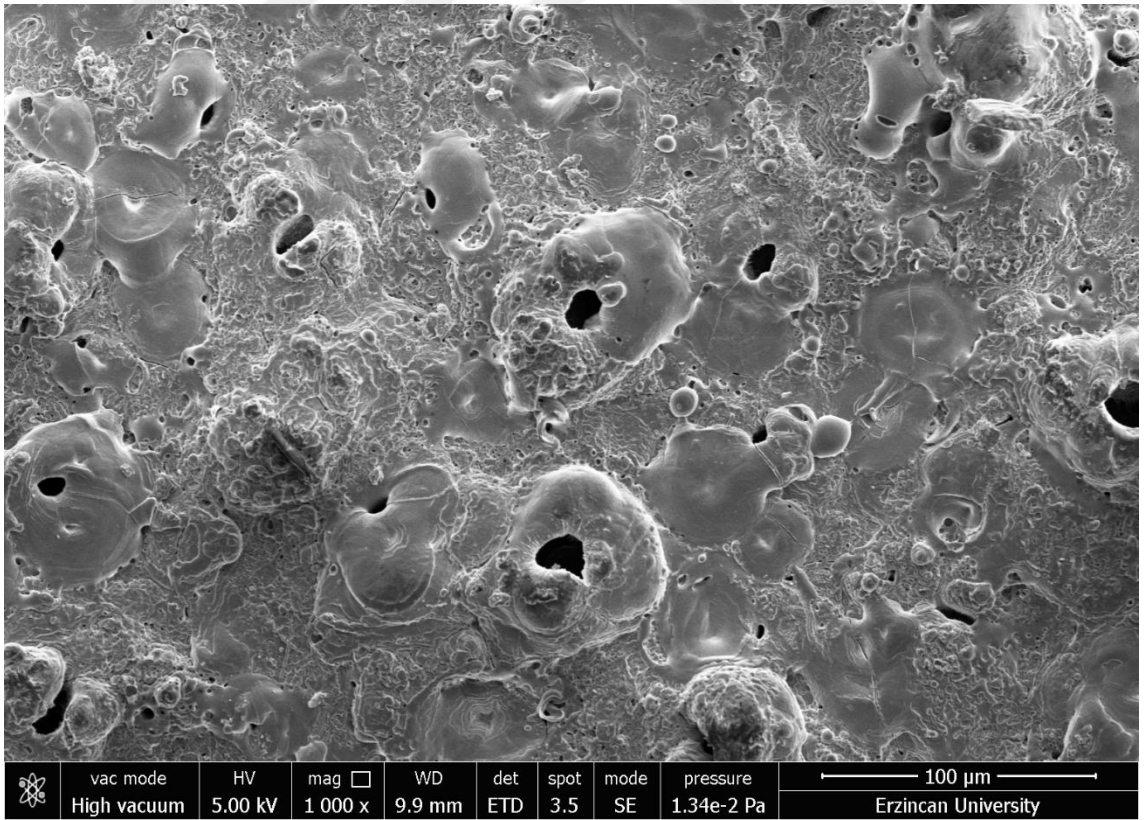
Şekil 20. (a) 0-Al2024, (b) 1-Al2024, (c) 2-Al2024 kodlu numunelerin XRD grafiği.

XRD grafiği incelendiğinde 1-Al2024 kodlu numude 30 ile 40 derece arasında MoS<sub>2</sub> fazı görülmüştür. 2-Al2024 kodlu numunede 30 ile 40 derecede ZnO fazı görülmüştür. Her iki numunede  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  fazları görülmektedir.

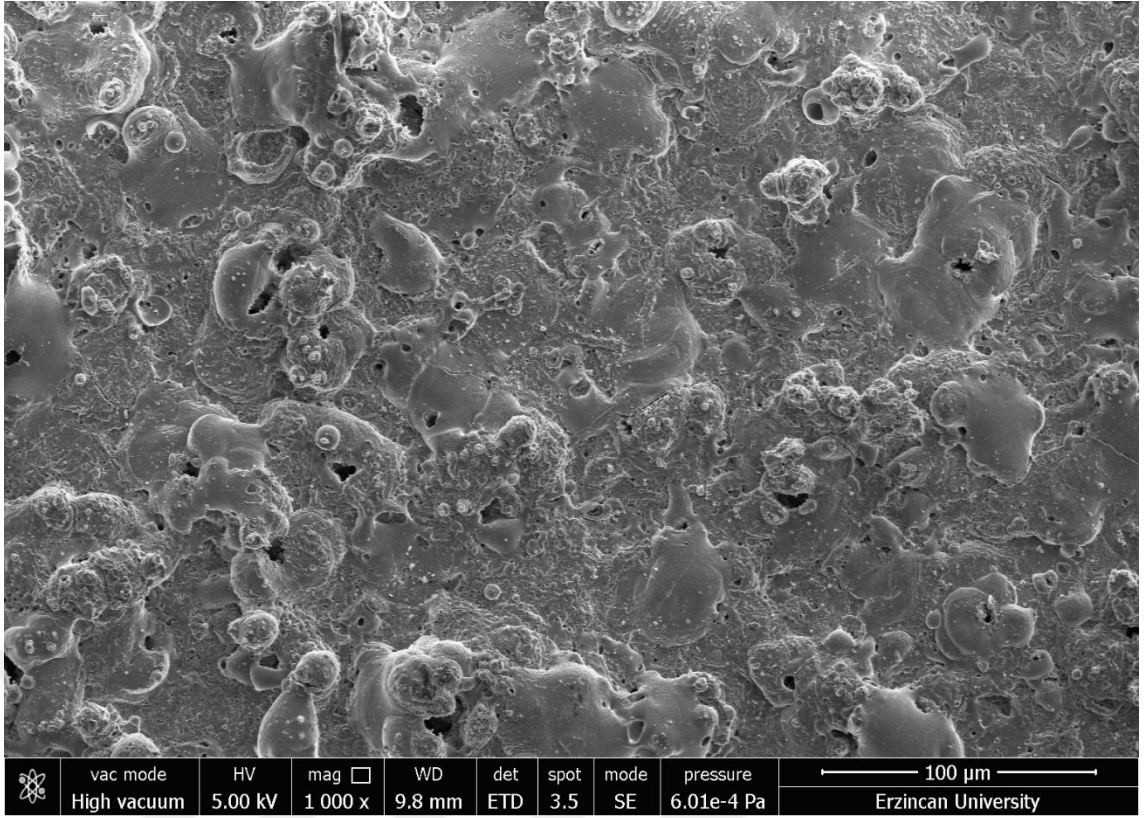
Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23’de 0-Al2024, 1-Al2024 ve 2-Al2024 kodlu numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında katkı maddelerinden kaynaklı krater benzeri gözenek oluşumları gözlenebilmektedir. Katkı maddeleri eklendiğinde oluşan gözeneklerin yoğunluklarında ve miktarındaki artışlar görülmektedir.



Şekil 21. 0-Al<sub>2024</sub> kodlu numunenin SEM görüntüsü.



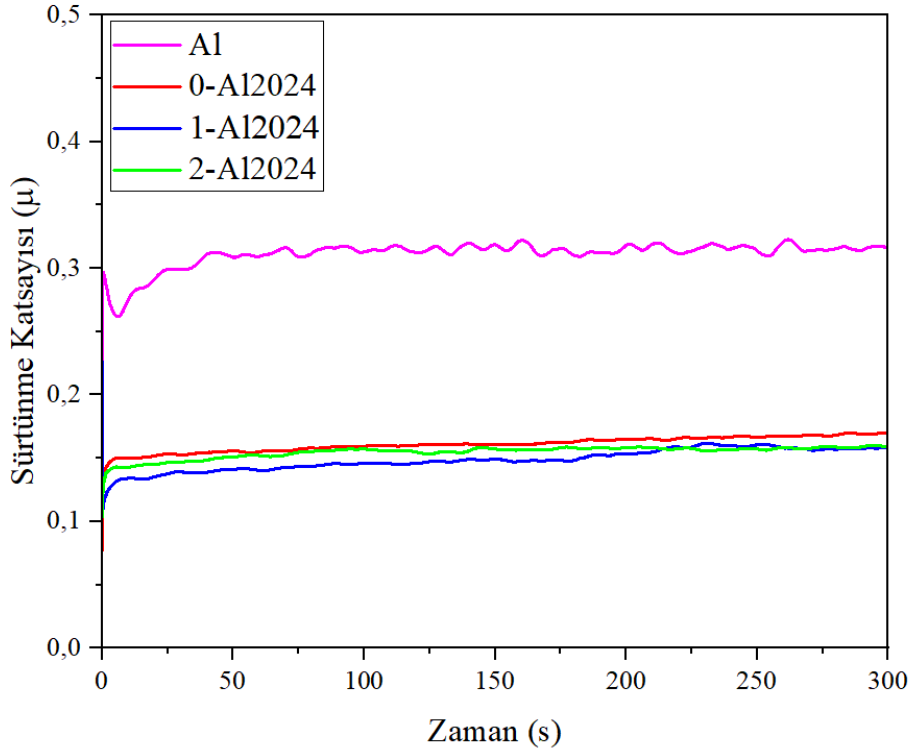
Şekil 22. 1-Al<sub>2024</sub> kodlu numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 23. 2-A12024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

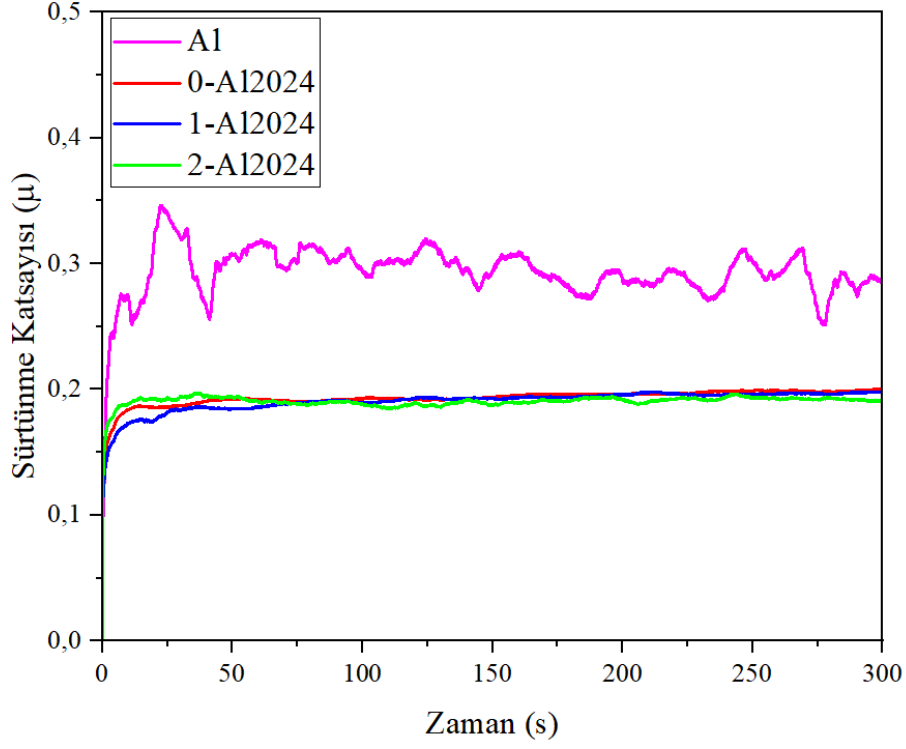
#### 4.3. Aşınma Test Sonuçları

0-A12024, 1-A12024 ve 2-A12024 kodlu numunelerin eşit parametrelerde deniz suyu, oda şartları ve yağ ortamlarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu ortamlarda yapılan testlerin sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafikleri Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26'da verilmiştir. Sürtünme katsayıları test başlangıçlarında düşük değerdedir. Bunun nedeni MAO kaplaması yapılan yüzeyler ile bilye arasındaki temas alanının çok düşük olmasıdır. Test ilerledikçe sürtünme katsayıları kaplama ve bilye arasındaki aşınmadan kaynaklı temas yüzey alanı büyüdüğü için artmaktadır. Aynı zamanda MAO kaplamalarının yüzeylerindeki tortunun varlığında testin ilk anlarında yüksek baskı altında sıkıştırıldığı için sürtünme katsayısının bir anda arttığı gözlemlenmiştir. Test ilerledikçe bilye ile kaplama arasındaki sürtünmeden kaynaklı aşınma ana tabakaya iner ve sürtünme katsayısı ortalama olarak sabit kalmıştır (Liu vd., 2018; Guo vd., 2021).



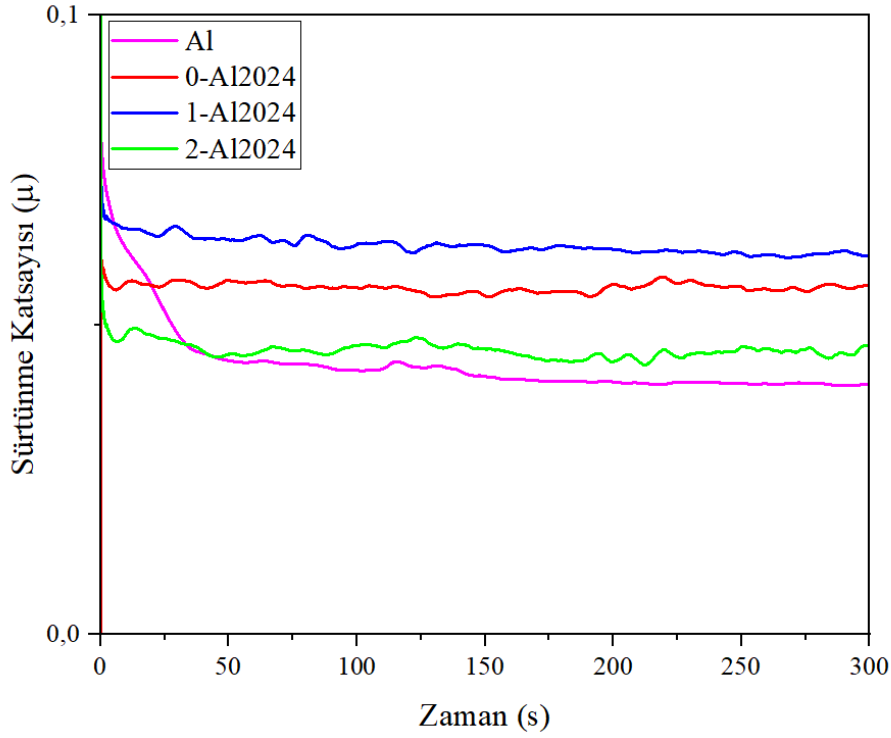
Şekil 24. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği.

Deniz suyu ortamında yapılan aşınmanın sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği incelendiğinde kaplamasız A12024'e göre katkılı numuneler çok iyi sonuçlar göstermiştir. Bunun nedeni katkı maddelerinin yağlayıcı özellik göstermeleridir. Katkı maddeli numunelerin sürtünme katsayıları birbirlerine çok yakın olmakla birlikte aralarında en iyi sonucu 1-A12024 kodlu numune vermiştir.



Şekil 25. Oda şartlarında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği.

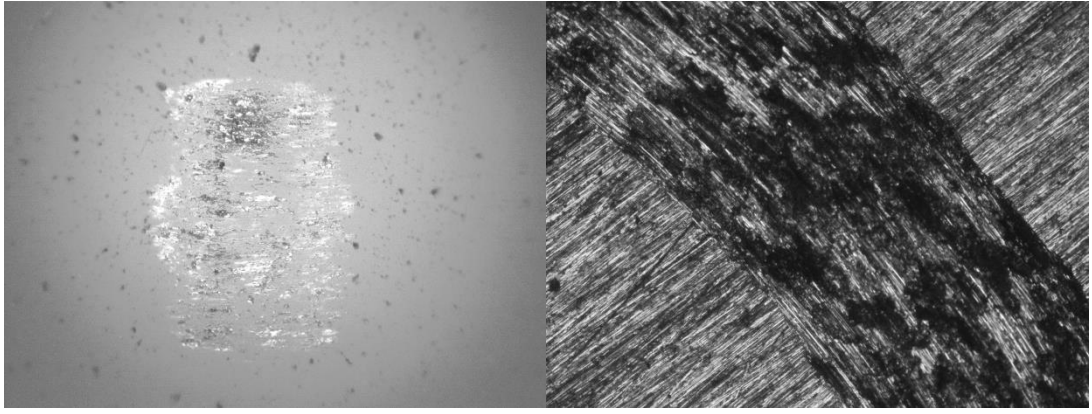
Oda şartlarında yapılan aşınmanın sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği incelendiğinde A12024 numunesinde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. 2-A12024 kodlu numunenin sürtünme katsayısı testin başlangıcında yükselmiş olsa da sonradan düşüşe geçtiği görülmektedir. Tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayıları birbirine çok yakın görünmektedir. Kullanılan katkıların oda şartlarında iyi bir yağlayıcı özellik sergilediği anlaşılmaktadır.



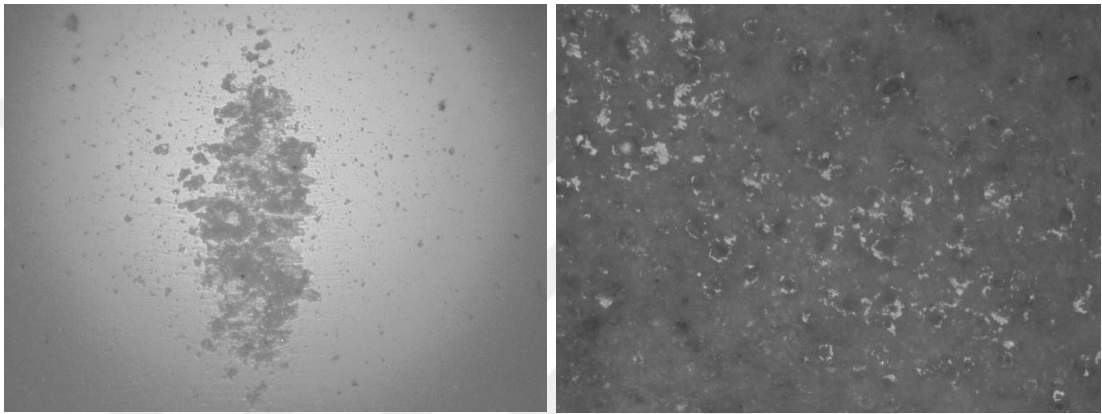
Şekil 26. Yağ ortamında yapılan aşınma deneyinde sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiği.

Yağ ortamında yapılan aşınmanın sürtünme katsayısı ( $\mu$ )-zaman grafiğinde en iyi sonucu yüzeyinde kaplama olmayan Al2024 numunesi vermiştir. Bunun nedeni yüzeyinde kaplama olmadığı için diğer numunelere göre çok daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olmasıdır.

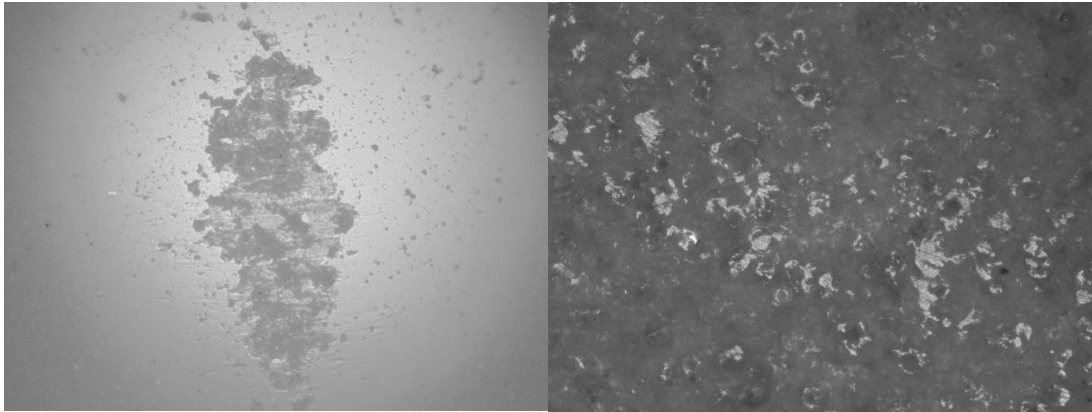
Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da deniz suyu ortamında yapılan aşınma deneyinde kaplamasız Al2024, 0-Al2024, 1-Al2024, 2-Al2024 kodlu numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde oluşan aşınma izlerinin geniş olduğu görülmektedir. 1-Al2024 kodlu numunenin görüntüsüne bakıldığında aşınma izleri diğer numunelere nazaran daha az belirgindir. 1-Al2024 kodlu numunenin içerisine katılan MoS<sub>2</sub> katkı maddesinin deniz suyu ortamında daha iyi bir yağlayıcı özellik gösterdiği söylenebilir. Al2024 kaplamasız numune görüntülerine bakıldığında aşınma izlerinin çok belirgin olduğu görülmektedir.



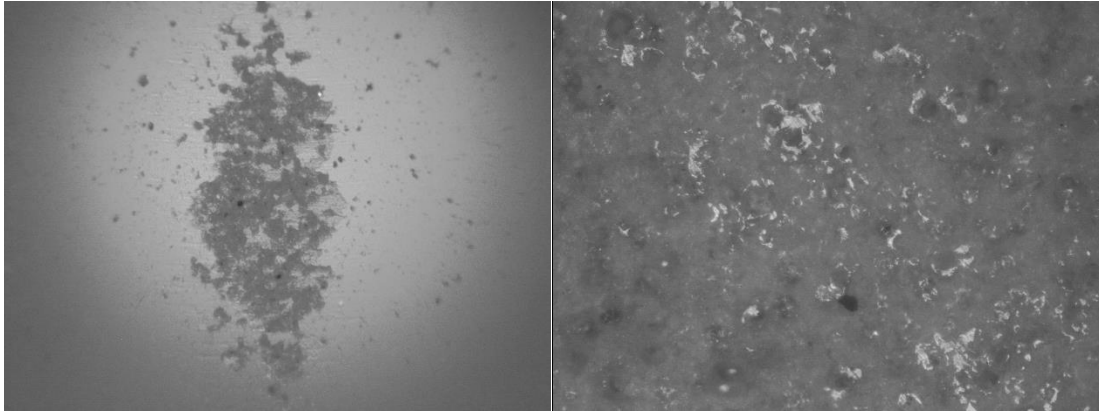
Şekil 27. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde Al2024 kaplamasız numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 28. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 0-Al2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

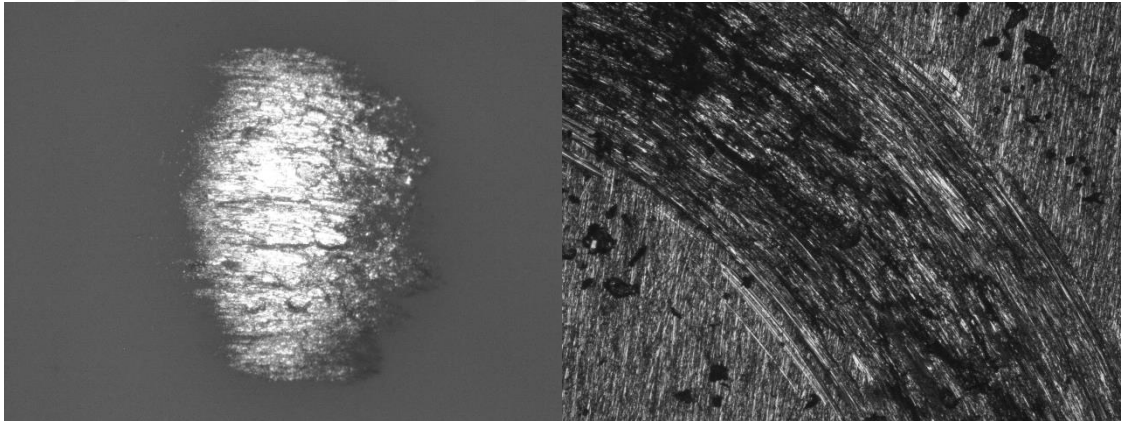


Şekil 29. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 1-Al2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

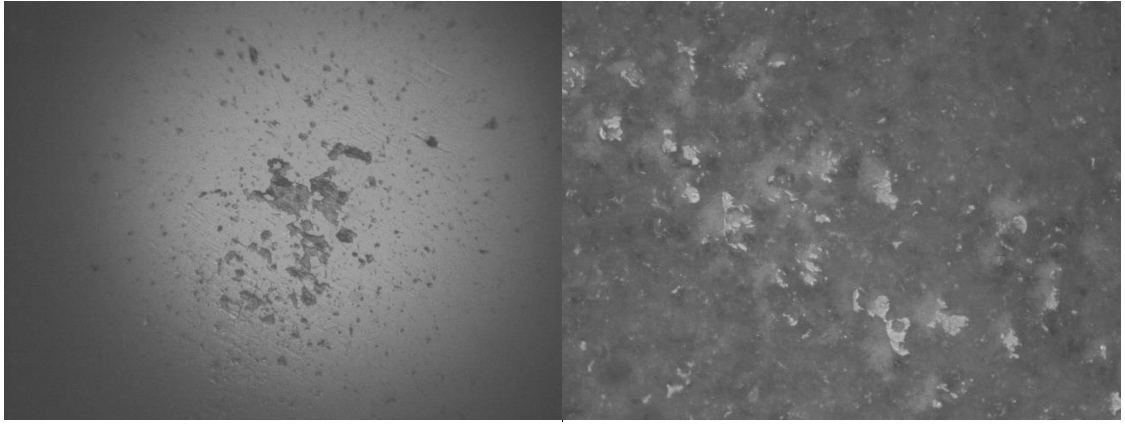


Şekil 30. Deniz suyu ortamında yapılan aşınma testinde 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numunenin SEM görüntüsü.

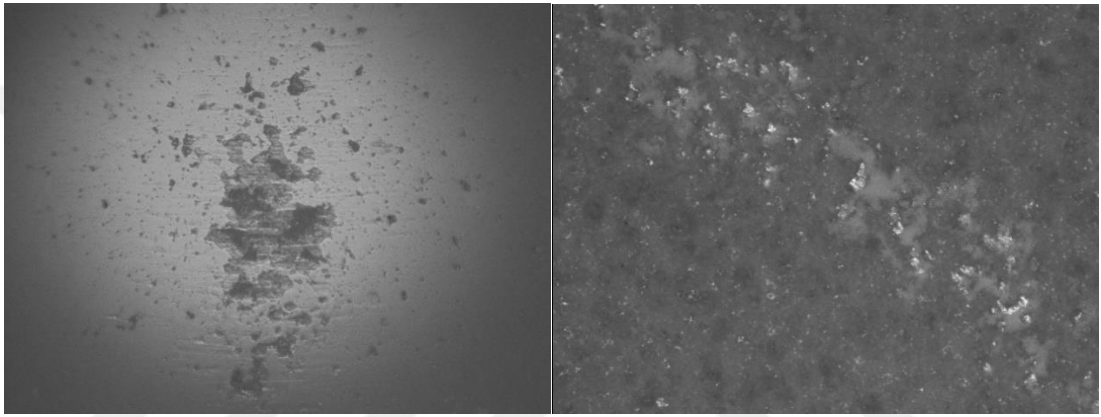
Oda şartlarında yapılan testlerin görüntüleri Şekil 31, Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34'te sırasıyla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamasız numune, 0-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numuneler gösterilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamasız numunenin görüntüsü incelendiğinde aşınma izlerinin en fazla olduğu görülmektedir. Buna nazaran katkı maddeli numunelere bakıldığında görülen daha az aşınma izleri katkı maddelerinin kuru ortamda iyi bir yağlayıcı özellik gösterdiği söylenebilir. 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numunenin aşınma izleri diğer numunelere göre daha az olduğu görülmektedir.



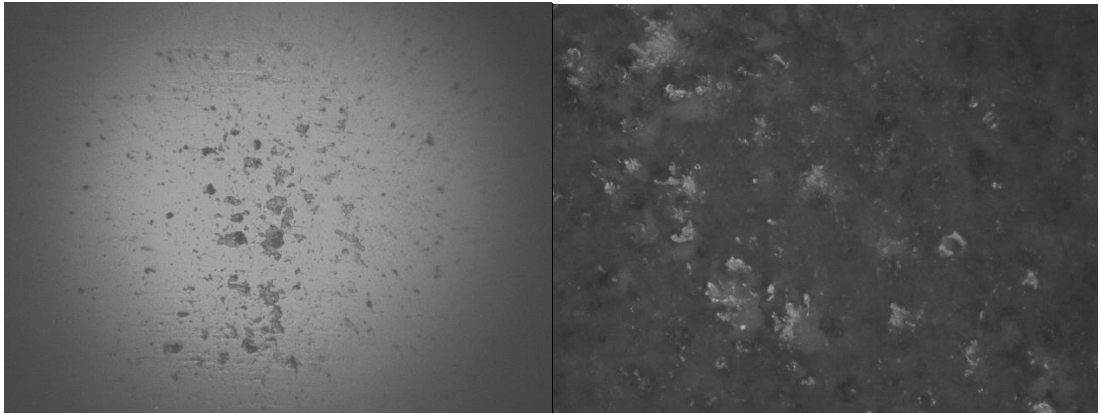
Şekil 31. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamasız numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 32. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 0-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



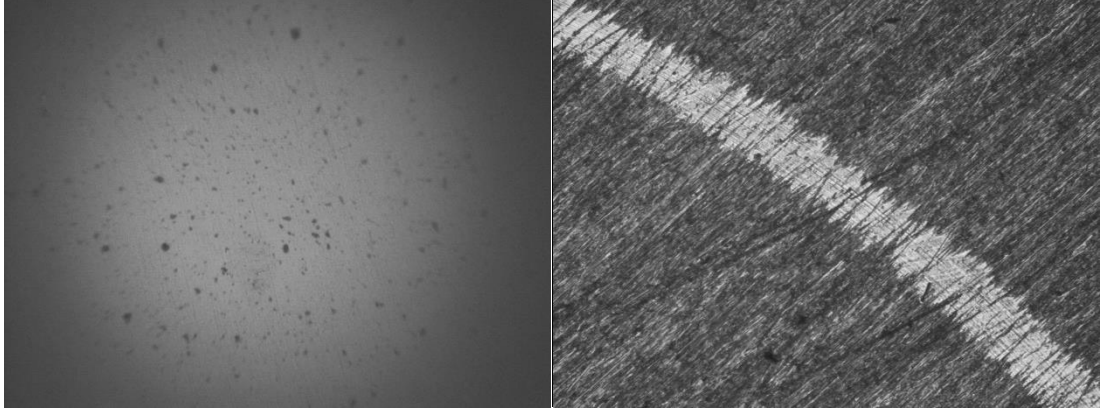
Şekil 33. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 1-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



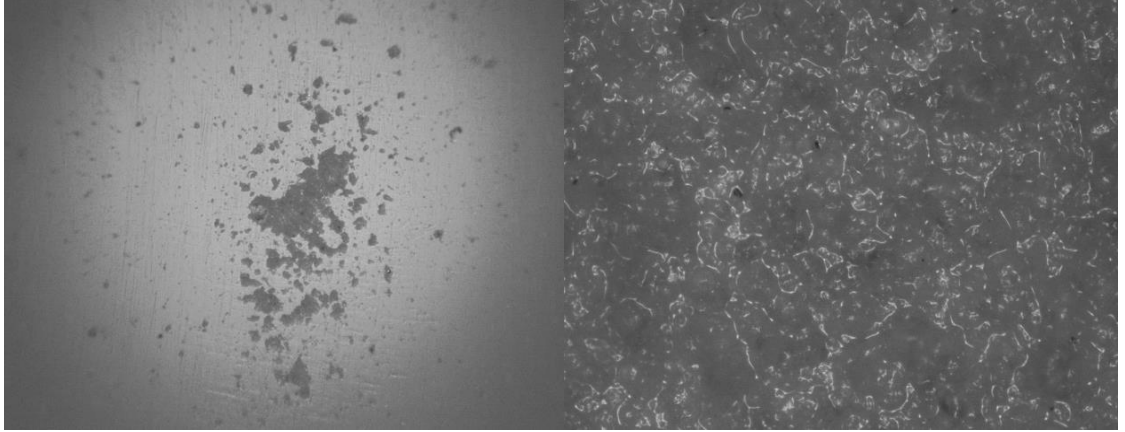
Şekil 34. Oda şartlarında yapılan aşınma testinde 2-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 35, Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38’de ki yağ ortamında yapılan aşınma testlerinin görüntüleri incelendiğinde diğer ortamlardan çok daha az aşınma izlerine rastlanmaktadır. AI2024 kaplamasız numunenin aşınma izinin azlığı açık bir şekilde görülmektedir. Hali hazırda kaplama yapılmadığı için diğer numunelere göre çok daha pürüzsüz olan yüzeyi ve ortamdaki yağ ile buluşunca ortaya çok düşük sürtünme

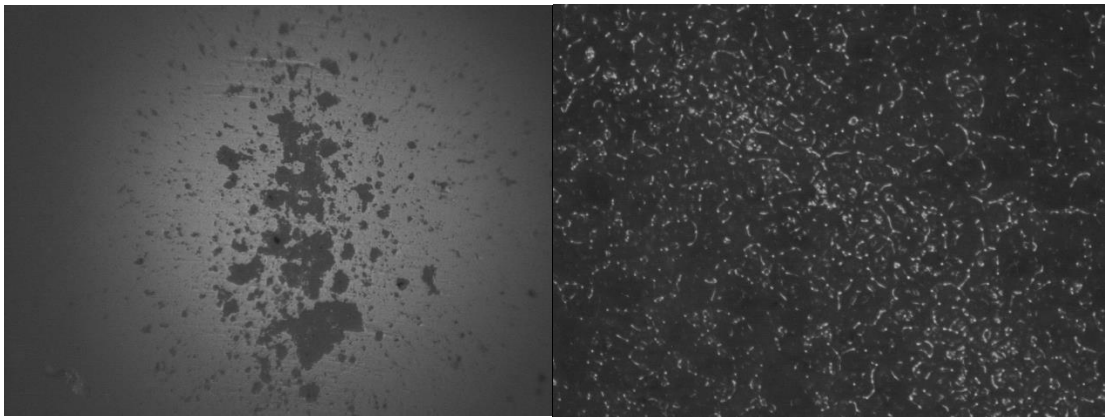
katsayısının çıkmasını sağlamıştır. Katkılı kaplamalı numunelerden 2-AI2024, diğer kaplamalı numunelere kıyasla aşınma izi daha azdır.



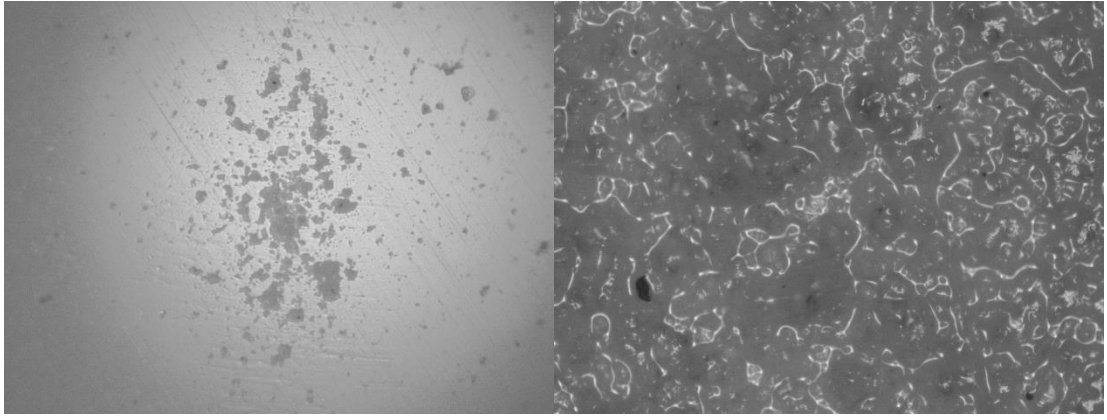
Şekil 35. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde AI2024 kaplamasız numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 36. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 0-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 37. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 1-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

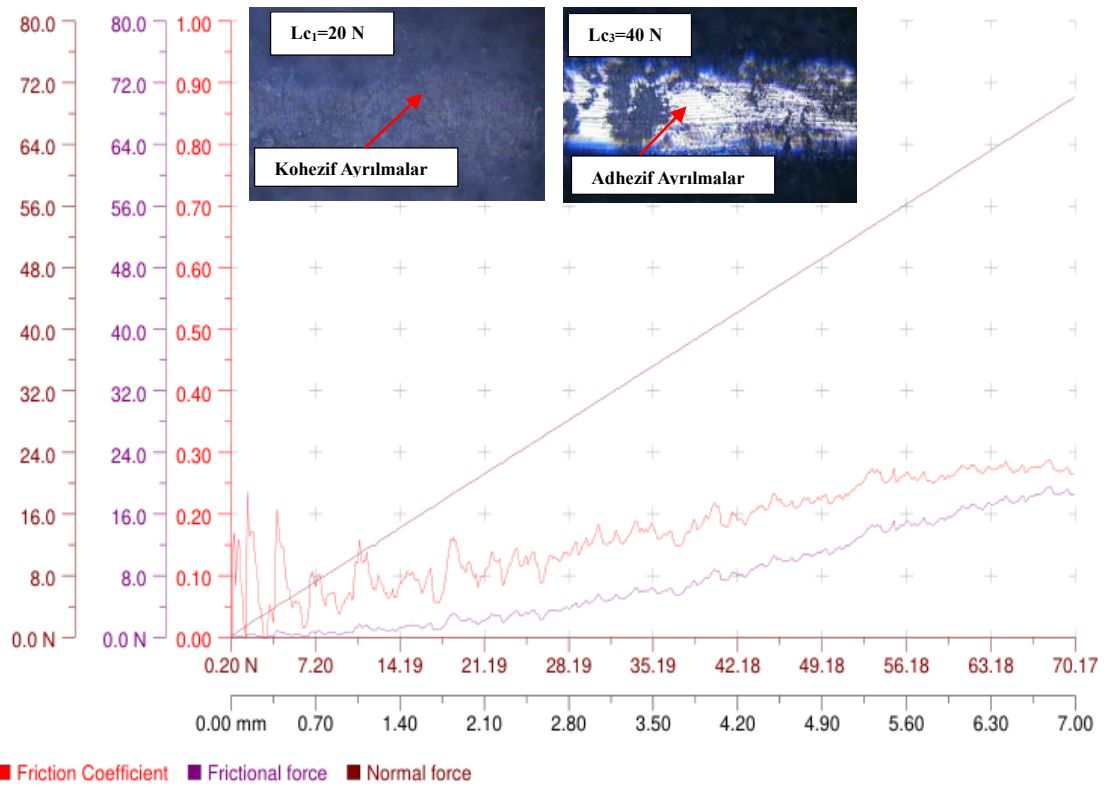


Şekil 38. Yağ ortamında yapılan aşınma testinde 2-AI2024 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

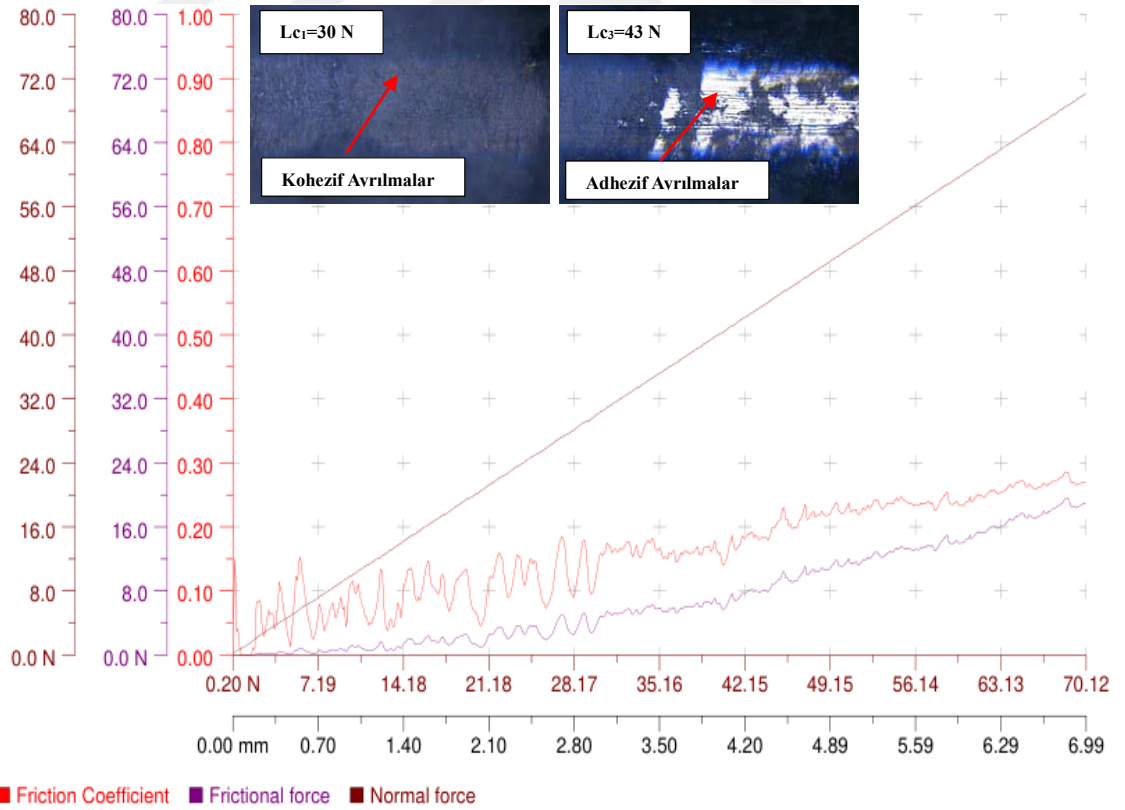
#### 4.4.Adhezyon Test Sonuçları

0-AI2024, 1-AI2024 ve 2-AI2024 kodlu numunelerin adhezyon özelliklerini belirlemek için yapılan Scratch testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, normal kuvvet yük grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 39, Şekil 40 ve Şekil 41’de verilmiştir. Numunelerin adhezyon test sonuçlarının değerlendirilebilmesi için aşağıdaki verilerin kesinlikle bilinmesi gerekmektedir. Numunelerdeki adhezyon hasarları basma gerilmelerinin kritik bir değeri aşması sonucunda meydana geldiği söylenebilir (Belet, 2022). Sctatch testinde oluşan çatlaklar üç grupta incelenir. İlk yükleme yapıldığında çizik yolu üzerinde oluşan çatlaklara karşılık gelen kuvvet  $L_{c1}$  kuvvetidir. İkinci aşamada baskı yükü yeterli seviyeye geldiğinde ikincil tip çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar kaplamada meydana gelen kohezif ayrılmaların sonucudur. Bu ayrılmalara karşılık gelen kuvvet  $L_{c2}$  kuvvetidir. Son aşamada artık bası yükü maksimum seviyelere çıktığından kaplamada büyük çatlaklar oluşmaya başlar ve kaplama taban malzemedan ayrılır. Buna karşılık gelen kuvvetede  $L_{c3}$  kuvveti denir. Bu kuvvet kaplama ile taban malzeme arasındaki adhezyon kuvveti olarak kabul edilir (Belet, 2022).

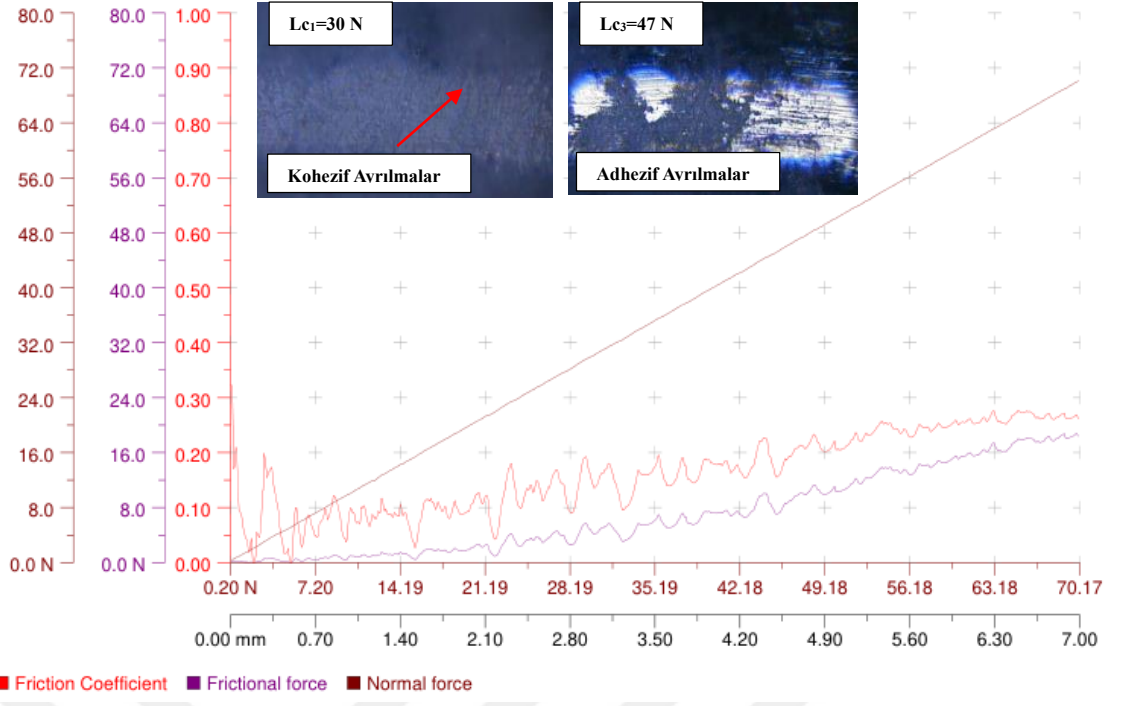
Bu çalışmada adhezyon testleri 200  $\mu$ m yarıçaplı Rockwell-C konik elmas batıcı uç kullanılarak sabit kayma hızında ve artan yük altında gerçekleştirilmiştir. 0-AI2024 kodlu numune için kritik yük değeri  $L_{c3}$  40 N, 1-AI2024 için  $L_{c3}$  43 N ve 2-AI2024 için  $L_{c3}$  47 N olarak bulunmuştur. Numuneler incelendiğinde en yüksek adhezyon direnci 2-AI2024 kodlu numune için elde edilmiştir. En düşük adhezyon direnci de 0-AI2024 kodlu numune için elde edilmiştir.



Şekil 39. 0-AI2024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.



Şekil 40. 1-AI2024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.



Şekil 41. 2-AI2024 kodlu numunenin adhezyon özelliklerinin analizi.

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada MAO yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alışı üzerine MoS<sub>2</sub> ve ZnO kaplanarak, aşınma ve adhezyon davranışları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Eklenen katkı maddelerinin ortalama kaplama kalınlıklarını arttırdığı görülmüştür. En yüksek kalınlık 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numunede ortalama 100 µm olarak bulunmuştur.

- XRD verileri incelendiğinde, tüm malzemelerde dış katman  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iç katmanda ise  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı olduğu görülmüştür. 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numunede MoS<sub>2</sub> pikleri, 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numunede ise ZnO pikleri görülmüştür.

- Deniz suyu, oda koşulları ve yağ ortamında yapılan sürtünme testlerinde en düşük sürtünme katsayısı yağ ortamında görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı oda şartlarında görülmüştür. Deniz suyu ortamında en iyi sonucu 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numune vermiştir. Oda şartlarında en iyi sonucu 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numune vermiştir. Yağ ortamında katkılı kaplamalardan en iyi sonucu veren 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numune olmuştur.

- Aşınma sonrası görüntüler ve sürtünme katsayıları incelendiğinde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamasız numunenin sadece yağ ortamında iyi sonuç verdiği görülmüştür. Deniz suyu ve oda koşullarındaki görüntüler ve sürtünme katsayıları incelendiğinde katkı maddelerinin aşınmaya karşı iyi bir yağlayıcı özellik sergilediği görülmektedir.

- Scratch testi sonuçları incelendiğinde kaplamalar arasında en yüksek kritik yük değeri 47 N olarak 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numuneden elde edilmiştir. 0-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numuneden 40 N ve 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numuneden de 43 N olarak kritik yük değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılacak olunursa en yüksek adhezyon mukavemeti ZnO katkılı 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kodlu numuneden elde edilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Altmışoğlu, A. (1995). Alaşımlar Ders Notları. *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi*. İstanbul.
- Apelfeld, A. V. ve Bepalova, O.V. (2000). Application of the particle backscattering methods for the study of new oxide protective coatings at the surface of Al and Mg alloys. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B, 161-163, 553-557.
- Belet, A. K. (2022). *Cp-Ti Alaşımı Üzerine Büyütölmüş ZnO ve h-BN İlaveli TiO<sub>2</sub> Kompozit Kaplamaların Yapısal ve Adhezyon Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.*
- Curran, J. A. ve Clyne, T. W. (2005). Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. *Surface & Coatings Technology*, 199 (2005) 168 – 176.
- Çetin, M. (2005). *Temperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Demirel, Ç. (2013). *AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma Ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.*
- Durmuş, S. S. Akgün ve S. şahin. (2009). Çökeltme Sertleştirilmesi uygulanmış AA7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikroyapı ile Değişiminin İncelenmesi. *IATS (09)*, Türkiye.
- Fanya, J. ve Honghui, T. (2005). Structure and microwave-absorbing properties of Fe-particle containing alumina prepared by micro-arc oxidation. *Surface & Coatings Technology*, 24-28.
- Gök, M. S. (2008). *Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.*
- 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.
- Guanglianga, Y. ve Xianya, L. (2002). The effects of current density on the phase composition and microstructure properties of micro-arc. *Journal of Alloys and Compounds*, 345, 196–200.
- Guidong, X., Liru, S. ve Jiong, L. I. (2007). Power Source Types Effects on the Properties of Oxide Ceramic Coatings on Magnesium Alloys. *Natural Science and Foundation of China*, 150-152.
- Hanhua, W. ve Jianbo, W. (2005). Ultra-hard ceramic coatings fabricated through microarc oxidation on aluminum alloy. *Applied Surface Science*, 252, 1545–1552.
- Jin, F., Chu, P. K., Xu, G., Zhao, J., Tang, D. ve Tong, H. (2006). Structure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy Treated by Micro-Arc Discharge Oxidation Using Direct Current and High-Frequency Bipolar Pulsing Modes. *Materials Science and Engineering*, 435-436, 123- 126.
- 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.
- Kılıçarslan, Y. S. (2020). *Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.*
- Krishna, L. R. (2006). A comparative study of tribological behavior of micro arc oxidation and hard-anodized coatings. *Wear*, 261, 1095–1101.
- Li, Q., Liang, J. ve Wang, Q. (2013). Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Lightweight Metals. *Modern Surface Engineering Treatments*. 2692-5397, England.
- 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, Y. F., Liskiewicz, T., Yerokhin, A., Korenyi-Both, A., Zabinski, J., Lin, M., . . . Voevodin, A. A. (2018). Fretting Wear Behavior of Duplex PEO/Chameleon Coating on Al Alloy. *Surface and Coatings Technology*, 352, 238-246.

- Mondolfo, L. F. (2013). Process modeling of age-hardening aluminum alloys from microstructure evolution to mechanical and fracture properties. *Proceedings of the James T. Staley honorary Symposium on Aluminum Alloys*.
- Nie, X. ve Matthew, A. (2000). Deposition of duplex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DLC coatings on Alloys for tribological applications using a combined micro arc oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 131(1-3), 506-513.
- Okay, F. (2006). *PVD Yöntemi ile Tin Kaplı Temperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Adeziv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- 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.
- Özcan, M. E. (2014). *Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.*
- Pul, M. (2019). Karbon nanotüp (CNT) ve nano grafen (G) takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretilerek aşınma ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi. *UMAGD*, 11(1), 370-382.
- 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., ve Li-Xin, S. (2006). Microstructure and Adhesion Strength of Al-Si-O Microarc Oxidation Coating. *Surface and Coatings Technology*, 24-25.
- 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.
- Shizhu, W. ve Ping, H. (2012). Characteristics and Mechanisms of Wear. *Principles of Tribology*, 272-295.
- Snizhko, L. O., Yerokhin, A. L., Pilkington, A., Gurevina, N. L., Misnyankin, D. O., Leyland, A., Matthews, A. (2004). Anodic Processes in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium in Alkaline Solutions, *Electrochim. Acta*, 49, 2085-2095.
- Stachowiak, G. W. ve Batchelor, A. W. (2001). *Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, Australia.*

- Sun, X. (2005). Composition and mechanical properties of hard ceramic coating containing  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produced by micro arc oxidation on Ti-6Al-4V alloy. *Thin Solid Films*, 471, 1-2, 194-199.
- Şüküroğlu, E. E. (2016). Mikro Ark Oksidasyon MAO Yöntemi ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Alaşımı Üzerine Büyütülmüş Oksit Kaplamanın Adhezyon Özelliklerinin İncelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6-2, 232-242.
- Tekin, K. C., Çakmak, E., Malayoğlu, U. (2008). Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması. *Mühendis ve Makina Dergisi*, Cilt 49, sayı 582.
- Terkeşli, M.H. (2017). APS Yöntemi İle Üretilen WC ve Mo Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi*, Bartın, 74 s.
- Toparlı, M. Ş. (1993). Karbonlu Çeliklerde Aşınma 5. *Denizli Malzeme Sempozyumu*.
- Wang, S., Zhao, Q., Liu, D. ve Du, N. (2015). Microstructure and elevated temperature tribological behavior of TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramic coatings formed by microarc oxidation of Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 272, 343-349.
- Wenbin, X. ve Hua, T. (2006). Anti-corrosion film on 2024-SiC aluminum matrix composite fabricated. *Journal of Alloys and Compounds*, 425, 302-306.
- 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 and Technology*, 26, 10, 865-871.
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowey S. J. (1999). Plasma Electrolysis for Surface Engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122, 73-93.
- Yerokhin, A. L., Snizhko, L. O., Gurevina, N. L., Leyland, A., Pilkington, A., Matthews, A. (2003). Discharge Characterization in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium. *J. Phys. D: Appl. Phys* 36, 2110-2120, 2003
- Yerokhin, A. L., Leyland, A., Dowey, S. J., Matthews, A. (2002). An Investigation of Voltage and Current Fluctuations during Plasma Electrolytic Diffusion Treatment of Metals. *Abstracts of Int Conf. PSE 2002, Abstracts of 8th Int. Conf. PSE 2002*, Garmisch-Partenkirchen, Almanya, 303.

- Yerokhin, A. L., Leyland, A., Matthews, A. (2002). Kinetics of Plasma Electrolytic Oxidation of Ti-6Al-4V Alloy in Aluminatebased Electrolytes. *Abstracts of Int. Conf. ICMCTF 2002*, San-Diego, USA, 65.
- Yerokhin, A. L., Leyland, A., Tsotsos, C., Wilson, A.D., Nie, X. ve Matthews, A. (2001). Duplex Surface Treatments Combining Plasma Electrolytic Nitrocarburising and Plasma-Immersion Ion-Assisted Deposition. *Surface and Coatings Technology*, 142-144, 1129-1136.
- Zhang, K. ve 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.
- 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

İlk,orta ve lise öğrenimini Arhavi'de tamamladı. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans programına halen devam etmektedir. Özel bir şirkette Makine mühendisi olarak çalışmaktadır.

