

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN B4C, h-BN VE
B5H10NAO13 KATKILI KOMPOZİT KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK VE
KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Yılmaz Erhan KARACA

EKİM-2025
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN B4C, h-BN VE
B5H10NAO13 KATKILI KOMPOZİT KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK VE
KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**STUDY OF THE TRIBOLOGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF B4C,
h-BN, AND B5H10NAO13-DOPED COMPOSITE COATINGS GROWN ON
ALUMINUM ALLOY**

YÜKSEK LİSANS

Yılmaz Erhan KARACA

**EKİM-2025
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN B4C, h-BN VE
B5H10NAO13 KATKILI KOMPOZİT KAPLAMALARIN TRİBOLOJİK VE
KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**STUDY OF THE TRIBOLOGICAL AND CORROSION PROPERTIES OF B4C,
h-BN, AND B5H10NAO13-DOPED COMPOSITE COATINGS GROWN ON
ALUMINUM ALLOY**

YÜKSEK LİSANS

Yılmaz Erhan KARACA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞÜKÜROĞLU

**EKİM-2025
GÜMÜŞHANE**

KABUL VE ONAY



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Alüminyum Alaşımı Üzerine Büyütülen B4C, h-Bn ve B5H10NaO13 Katkılı Kompozit Kaplamaların Tribolojik ve Korozyon 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.

13/10/2025

.....
Yılmaz Erhan KARACA

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Tez çalışmam boyunca bilgilerini, deneyimlerini ve akademik tecrübelerini benden esirgemeyen sayın danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Şüküroğlu' na, tez çalışması sürecimde bilgi ve birikimlerini benimle paylaşarak katkı sağlayan sayın Prof.Dr. Ebru Emine Şüküroğlu'na en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmamızın analiz kısmında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi AR-GE laboratuvarında desteğini sağlayan Dr.Öğr. Üyesi Gökhan GÜLTEN' e bilgi ve desteklerini esirgemeyen Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü öğretim elemanlarına, GÜBAP2907: Lisansüstü Öğrenci Destek Programı kapsamında 24.E0117.07.01 numaralı proje kodu ile yürütülen tez çalışmamıza sağlamış oldukları destekten dolayı Gümüşhane Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımın her döneminde zor anlarımda yanımda olan ve yardımına koşan, Anneme, Babama, Eşime ve Çocuklarıma göstermiş oldukları destek ve sabır için sonsuz teşekkür ediyorum.

Yılmaz Erhan KARACA
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Al 7075 alaşımı; düşük yoğunluğu, yüksek özgül mukavemeti, üstün işlenebilirliği, sünekliği, yüksek tokluğu ve yorulma dayanımı sayesinde havacılık ve uzay endüstrisinin yanı sıra savunma ve otomotiv sektörlerinde de yaygın olarak kullanılan stratejik bir mühendislik malzemesidir. Ancak sahip olduğu bu üstün mekanik özelliklere rağmen, düşük kırılma tokluğu, sınırlı hasar toleransı ve ortam koşullarına bağlı korozyon hassasiyeti, bu alaşımın bazı ileri düzey yapısal uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Özellikle hava aracı bileşenlerinde uzun süreli servis koşullarında karşılaşılan bu zayıf yönler, yüzey iyileştirme yöntemlerine olan gereksinimi artırmaktadır.

Alüminyum ve alaşımlarında yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için uygulanan seramik esaslı kaplama yöntemleri, yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı sağlamaları nedeniyle önemli bir çözüm alanı sunmaktadır. Bu doğrultuda, Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemi ile elde edilen seramik kaplamalar, yüzey mühendisliğinde sıkça tercih edilen etkili bir modifikasyon yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, 7075 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla üç farklı bor esaslı katkı maddesi ($B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN) kullanılarak kompozit kaplamalar Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemiyle üretilmiştir. Çalışma üç aşamada yürütülmüştür: İlk aşamada referans Al_2O_3 kaplamalar büyütülmüş; ikinci aşamada üç farklı bor katkısı ayrı ayrı ilave edilerek kompozit kaplamalar sentezlenmiş; üçüncü aşamada ise elde edilen kaplamaların mikroyapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, bor katkılı kompozit kaplamaların Al 7075 alaşımının yüzey özelliklerini anlamlı ölçüde geliştirdiğini ve özellikle aşınma ile korozyon dayanımında belirgin iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, hafif metal alaşımlarında yüzey mühendisliği uygulamaları açısından hem akademik araştırmalara hem de endüstriyel üretim süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Al 7075 alaşımı, Aşınma, B_4C , $B_5H_{10}NaO_{13}$, h-BN, Korozyon, Mikro ark oksidasyon (MAO),

SUMMARY

The Al 7075 alloy is a strategic engineering material widely used in the aerospace, defense, and automotive industries due to its low density, high specific strength, excellent machinability, ductility, high toughness, and fatigue resistance. However, despite these outstanding mechanical properties, its relatively low fracture toughness, limited damage tolerance, and susceptibility to corrosion under environmental conditions restrict its use in certain advanced structural applications. These shortcomings, particularly critical for long-term service conditions of aircraft components, emphasize the necessity of surface enhancement techniques.

Ceramic-based coating methods applied to aluminum and its alloys offer an effective solution for improving surface characteristics by providing high hardness, superior wear resistance, and enhanced corrosion protection. In this context, ceramic coatings produced by the Micro Arc Oxidation (MAO) process have emerged as a widely preferred and efficient surface modification technique in surface engineering applications.

In the present study, composite coatings were fabricated on 7075 aluminum alloy via the MAO method using three different boron-based additives ($B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C , and h-BN) to improve the surface properties of the alloy. The study was conducted in three stages: in the first stage, reference Al_2O_3 coatings were produced; in the second stage, composite coatings were synthesized by individually incorporating the three boron-based additives; and in the third stage, the microstructural, mechanical, tribological, and corrosion properties of the resulting coatings were comprehensively characterized.

The findings demonstrate that the boron-doped composite coatings significantly improved the surface properties of the Al 7075 alloy, providing notable enhancements in both wear and corrosion resistance. These results indicate that boron-containing composite coatings have strong potential for contributing to both academic research and industrial applications in the field of surface engineering for lightweight metal alloys.

Keywords: Aluminum alloy 7075, Wear, B_4C , $B_5H_{10}NaO_{13}$, h-BN, Corrosion, Micro arc oxidation (MAO),

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	10
2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	10
2.2. Alüminyum alaşımları kullanım alanları	16
2.3. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi (MAO).....	22
2.4 Aşınma Mekanizması.....	30
2.5. Aşınma Test Yöntemleri	36
2.5.1. Pin-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi).....	36
2.5.2. Ball-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi)	37
2.6. Korozyon Mekanizması	38
3. MATERYAL VE METOT	46
3.1. Taban Malzemesinin Metalografik Olarak Hazırlanması	46
3.2. MAO Yöntemi ile Oksit Tabakaların Büyütülmesi	47
3.3. Yapısal Karakterizasyonlar	49
3.4. Mekanik Testler	50
3.4.1. Yüzey Profilometresi	50
3.4.2. Sertlik Deneyleri	50
3.4.3. Aşınma Deneyleri.....	51
3.4.4. Korozyon Deneyleri	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
4.1 Al 7075 Alaşımı Üzerine Büyütülen Kaplamaların Yapısal Karakterizasyonu.....	54
4.2. Sertlik ve Aşınma Test Sonuçları.....	62
4.3. Korozyon Test Sonuçları	65

5. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKÇA.....	71
ÖZGEÇMİŞ	84



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Kaufman vd., 2003; Ma, 2023)	10
Tablo 2. Amerikan Standartlar Birliği'ne göre Alüminyum dövme alaşımlarının ticari sınıflandırması (Zhang vd., 2019; Rams, 2022)	12
Tablo 3. Hadde Alüminyum alaşım serilerine ait bazı mekanik ve fiziksel özellikler ile kullanım alanları (Polmear vd., 2017; Vargel, 2020).	16
Tablo 4. Alüminyum 7075 alaşımı kimyasal bileşimi (Zhou vd., 2021)	20
Tablo 5. Alüminyum 7075 alaşımı fiziksel özellikleri (ASM Int., 2019).....	21
Tablo 6. MAO prosesi sırasında gözlemlenen voltaj evreleri ve mikro ark tipleri.....	26
Tablo 7. MAO kaplamalarda farklı elektrolit tipinin başlıca etkileri.....	28
Tablo 8. MAO elektrolitik çözeltisine ilave edilen örnek katkı partikülleri ve başlıca etkileri (Fattah-Alhosseini vd., 2020; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024)	29
Tablo 9. MAO kaplamalara ait çözelti içerikleri	48
Tablo 10. MAO işlemi kaplama parametreleri	48
Tablo 11. Aşınma Deney Şartları.....	52
Tablo 12. MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri	58
Tablo 13. Al 77075 taban malzeme ve MAO kaplamalara ait Ecorr ve Icorr Değerleri	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Al alaşımlarının sayısal kodları (Coşkun, 2002).....	15
Şekil 2. Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum parça örnekleri a) Audi A8 model otomobilin alüminyum parçaları, b) Alüminyum motor blokları, c) Alüminyum pistonlar (Başer, 2012).	16
Şekil 3. Askeri uygulamalarda kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-1, 2025)..	17
Şekil 4. Havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan alüminyum parça örnekleri (Khalid vd., 2023; URL-2, 2025).....	17
Şekil 5. Denizcilik ve su altı teknolojilerinde kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-3, 2025).....	18
Şekil 6. İnşaat sektöründe kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-4, 2025)	18
Şekil 7. Ambalaj endüstrisinde kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-5, 2025) .	19
Şekil 8. Elektrik ve elektronik sektöründe kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-6).....	19
Şekil 9. Mikro ark oksidasyon (MAO) ünitesinin şematik görünümü (Sukuroglu, 2025)	23
Şekil 10. MAO sistemi elektroliz prosesi (Demirci, 2014).....	24
Şekil 11. MAO prosesi akım-voltaj değişim eğrisi (Yerokhin vd., 1999; Tekin vd., 2008)	25
Şekil 12. MAO prosesinde oksidasyon süresine bağlı olarak arkların aydınlanma yoğunluğu (Li vd., 2023; Gamba vd., 2025).....	26
Şekil 13. MAO kaplanmış numunelere ait örnek yüzey ve kesit SEM görüntüsü.....	27
Şekil 14. Aşınma türleri	31
Şekil 15. Tribolojik sistem	31
Şekil 16. Aşın mekanizmaları ve hasar görüntüleri (URL-7, 2025)	32
Şekil 17. Pin-On Disk test cihazı şematik gösterimi (Lepicka vd., 2019)	37
Şekil 18. Ball-on-Disk test cihazı şematik gösterimi (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2021) ...	38
Şekil 19. Korozyon mekanizması şematik gösterimi (URL-8).....	39
Şekil 20. Uniform Korozyon Örnekleri; a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli. (Rashad vd., 2017)	41
Şekil 21. Galvanik Korozyon Örnekleri; a) korozyon mekanizması oluşumu, b) korozyonun şematik gösterimi, c) uygulamada oluşan korozyon görseli (URL-9, 2025).	42

Şekil 22. Çukurcuk korozyonu görselleri a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli (Khalid Mohammed Ridha vd., 2023) ..	43
Şekil 23. Filiform korozyonu görselleri a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli (URL-10, 2025).....	44
Şekil 24. Yüzey Profilometresi	46
Şekil 25. MAO işlem numuneleri, a) Kaplama işlemine hazır Al7075 örnekler, b) MAO kaplama işlemi uygulanmış Al7075 örnekler, c) Nanopartikül ilaveli MAO kaplama işlemi uygulanmış Al7075 örnekler	46
Şekil 26. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) kaplama ünitesi	47
Şekil 27. MAO kaplama işlemlerine ait grafiksel görüntü	49
Şekil 28. Yapısal karakterizasyon cihazları, a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDXS), b) X Işını difraktometre cihazı	50
Şekil 29. Sertlik ölçme cihazı (Buehler micromet 2001).....	51
Şekil 30. a) CSM Tribo-test cihazı, b) Tribo-test sonrası aşınmış bölge yüzey profili...	52
Şekil 31. Polarizasyon test cihazı (Ametek Par VersaSTAT-3)	53
Şekil 32. MAO işlemi sonrası Al7075 alaşımı üzerinde büyütülen kaplamaların yüzey SEM görüntüleri.....	55
Şekil 33. MAO kaplamalara ait kesit SEM görüntüleri	59
Şekil 34. Al 7075 ve büyütülen MAO kaplamalara ait XRD grafiği.....	61
Şekil 35. Al 7075 alaşımı ve MAO yöntemi ile büyütülen kaplamalara ait sertlik değerleri	62
Şekil 36. Al 7075 alaşımı ve Al 7075 üzerine MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların sürtünme katsayısı (μ)-zaman grafiği	63
Şekil 37. Al 7075 alaşımı ve Al 7075 üzerine MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların aşınma izleri ve karşı yüzey görüntüleri	64
Şekil 38. Al 7075 taban malzeme ve MAO kaplamalara ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternatif akım
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
B ₄ C	: Bor karbür
B ₅ H ₁₀ NaO ₁₃	: Sodyum pentaborate
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
EDS	: Enerji dağılım spektroskopisi
EDXS	: Enerji dağılımı x-ışını spektrometresi
h-BN	: Hekzagonal bor nitrür
JCPDS	: Toz Kırınım Standartları Komitesi Birliği
KOH	: Potasyum hidroksit
MAO	: Mikro ark oksidasyon
Na ₂ HPO ₄	: Disodyum hidrojen fosfat
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
NaAlO ₂	: Sodyum alüminat
O	: Oksijen
P	: Fosfor
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
SiC	: Silisyum karbür
SiO ₂	: Silikon dioksit
Ti	: Titanyum
TiO ₂	: Titanyum oksit
XRD	: X-ışını difraktometresi
ZnO	: Çinko oksit

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi, mühendislik uygulamalarının odak noktasını sistemlerin performans ve verimliliğinin artırılmasına yöneltmiştir. Özellikle otomotiv, havacılık, uzay ve savunma sanayii gibi stratejik öneme sahip sektörlerde, daha hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Bu bağlamda, hafif metal alaşımları endüstriyel üretim süreçlerinde ön plana çıkmakta ve yapısal malzemeler arasında tercih edilmektedir. Özellikle alüminyum, titanyum ve magnezyum esaslı alaşımlar, düşük yoğunlukları sayesinde taşıtların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliği ve enerji tasarrufu sağlamalarıyla kritik bir rol üstlenmektedir. Bu malzemeler arasında alüminyum, sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum, düşük yoğunluğuna karşın yüksek mukavemet değerleri sergilemesi, sünek yapısı sayesinde düşük sıcaklıklarda dahi kolayca şekillendirilebilmesi ve doğal oksit tabakasının sağladığı korozyon direnci ile dikkat çekmektedir. Bu avantajlar, alüminyumun yalnızca hafiflik ve işlenebilirlik açısından değil, aynı zamanda yapısal dayanıklılık ve uzun ömürlü kullanım gerektiren mühendislik uygulamalarında da kritik bir malzeme olarak tercih edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle ulaşım, havacılık, uzay, otomotiv ve savunma sanayisi gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde, alüminyumun bu özellikleri hem enerji verimliliği hem de güvenilirlik açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Alüminyum alaşımları, modern mühendislik uygulamalarında büyük önem taşıyan hafif yapısal metalik malzemeler arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2019; Georgantzia vd., 2021). Özellikle otomotiv, uzay, havacılık, mimarlık ve elektrik-elektronik sektörlerinde, sistemlerin toplam kütesini azaltmak amacıyla demir dışı metalik malzemeler içinde ön plana çıkmaktadır (Zhang vd., 2019; Dada vd., 2024). Alüminyum (Al) elementi $2,70 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip olup, bu değer titanyumun (Ti) yoğunluğundan yaklaşık 1,67 kat, çeliğin yoğunluğundan ise 2,9 kat daha düşük seviyededir (Polmear vd., 2017). Bu düşük yoğunluk özelliği, alüminyum ve alaşımlarının birçok endüstriyel alanda yapı malzemesi olarak tercih edilmesini sağlamaktadır. Alüminyumun en belirgin özelliği olan hafiflik, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yakıt verimliliği ve performans artışı açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Dada vd., 2024). Bunun yanı sıra, yüksek ısıl ve elektriksel

iletkenliği, alüminyum elektrik-elektronik mühendisliği uygulamalarında stratejik bir malzeme haline getirmektedir (Jayakumar vd., 2023; Czerwinski, 2024).

Mekanik dayanım özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla alüminyuma çeşitli alaşım elementleri eklenebilmekte, bu sayede daha zorlu çevresel koşullarda dahi üstün performans sergileyebilen alaşımlar elde edilmektedir (Zhang vd., 2019; Rams, 2022). Ayrıca alüminyum alaşımlarının doğal korozyon direnci, malzemeyi agresif ortamlara karşı koruyarak uzun ömürlü kullanım sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle denizcilik, savunma sanayisi, kimya ve enerji endüstrisi gibi yüksek korozyon riskine sahip alanlarda kullanım açısından büyük bir avantaj oluşturmaktadır (Pasha ve Mohamed, 2017; Dada vd., 2024).

Mühendislik uygulamalarında çelikten sonra en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olan alüminyum, farklı kullanım alanlarına hitap eden çok sayıda alaşım sistemine sahiptir. Bu alaşım sistemleri içerisinde, Al-Zn-Mg-Cu esaslı yüksek mukavemetli 7XXX serisi alüminyum alaşımları sahip oldukları üstün mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Bu alaşımlar; yüksek spesifik mukavemet (akma gerilmesi/yoğunluk), yüksek spesifik elastisite modülü (elastisite modülü/yoğunluk), yüksek tokluk, üstün yorulma direnci, süneklik, kaynaklanabilirlik ve iyi işlenebilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır (Choi vd., 2020; Luo vd., 2020; Patel vd., 2020; Zhou vd., 2021; Khalid vd., 2023). Bu avantajları sayesinde, 7XXX serisi alüminyum alaşımları savunma sanayisi, havacılık ve uzay teknolojileri, otomotiv endüstrisi, ulaşım ve taşımacılık uygulamaları başta olmak üzere denizcilik, elektronik ve telekomünikasyon ekipmanları ile genel mühendislik ve imalat sektörlerinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu seri içerisinde ise çinko (Zn) esaslı alaşım elementleriyle güçlendirilmiş 7075 alüminyum alaşımları, yüksek performans gerektiren uygulamalarda en çok tercih edilen 7XXX serisi alüminyum alaşımı olarak öne çıkmaktadır (Dursun ve Soutis, 2014; Patel vd., 2020; Khalid vd., 2023).

Al 7075 alaşımı, sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, üstün işlenebilirlik, süneklik, yüksek tokluk ve yorulma direnci nedeniyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde stratejik bir mühendislik malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, savunma sanayisi ve otomotiv endüstrisinde de yapısal uygulamalarda tercih edilen en kritik alüminyum alaşımlarından biri konumundadır (Dursun ve Soutis, 2014; Luo vd., 2020; Patel vd., 2020; Zhou vd., 2021; Khalid vd., 2023). Ancak bu üstün özelliklerine karşın, Al 7075 alaşımı bazı dezavantajları nedeniyle uygulama alanlarında sınırlamalarla karşı karşıya kalmaktadır. Özellikle düşük kırılma tokluğu ve yetersiz hasar toleransı, hava aracı yapılarında

kullanımını kısıtlayan temel zayıf noktalar arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2018; Zhou vd., 2021). Ayrıca bu alaşım, ortam koşullarına bağlı olarak yüksek düzeyde korozyon direnci sergileyememekte ve çeşitli korozyon mekanizmalarına karşı hassasiyet göstermektedir. Özellikle pasif film tabakasının mekanik zorlamalar altında kopması, hidrojen kaynaklı çatlama ve anodik çözünme destekli çatlama mekanizmaları, gerilimli korozyon çatlamasının (SCC) başlıca sebeplerini oluşturmaktadır (Zhou vd., 2021). Bunun yanı sıra, alüminyum alaşımlarının genel bir özelliği olan yüksek termal genleşme katsayısı, bu malzemelerin yüksek sıcaklık uygulamalarındaki performansını da sınırlandırmaktadır. Havacılık ve uzay teknolojilerinde kullanılan mühendislik malzemelerinden, yalnızca mekanik dayanım değil, aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda etkili ısı iletkenlik sergilemeleri de beklenmektedir. Yüksek hızlarda hareket eden hava araçları, atmosfer koşullarında -30 °C ile 370 °C arasında değişen sıcaklık dalgalanmalarına, ultraviyole ışınlarına, yüksek neme ve sürtünme kaynaklı ısınmaya maruz kalmaktadır. Bu koşullar, malzemelerde aşınma, oksidasyon ve korozyon temelli hasar mekanizmalarını hızlandırmakta ve uzun süreli kullanım ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir (Huda and Edi, 2013; Khalid vd., 2023).

Alüminyumun sahip olduğu mekanik ve çevresel sınırlılıkları gidermek amacıyla, yüzey iyileştirme ve geliştirme prosesleri en basit ve ekonomik çözümler arasında öne çıkmaktadır (Cheng vd., 2013; Palanivelu vd., 2014; Zhang vd., 2023). Bu kapsamda alüminyum üzerinde oluşturulan seramik kaplamalar, yüksek sertlik, üstün aşınma ve korozyon direnci gibi endüstriyel uygulamalarda arzu edilen özellikleri kazandırmaktadır (Sukuroglu, 2018; Nadimi vd., 2022; Wu vd., 2023). Seramik kaplamaların uygulanabilmesi için termal püskürtme, fiziksel buhar biriktirme, lazer ışınımı ve sol-jel yöntemleri gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Zhu and Li, 2024; Wang vd., 2024; Gamba vd., 2025). Eloksal işlemi, yoğun bir oksit tabakası oluşturarak alüminyumun yüzey özelliklerini iyileştiren yaygın bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Ancak bu yöntemde elde edilen kaplamaların ince yapısı, kullanımını genellikle dekoratif uygulamalarla sınırlamaktadır. Ayrıca, eloksal işlemi sırasında kullanılan asidik elektrolitler çevre açısından olumsuz etkiler yaratabilmektedir (Dervishi vd., 2022; Pham vd., 2024). Eloksal yöntemine alternatif olarak öne çıkan bir diğer teknik ise Mikro ark oksidasyonu (MAO) işlemidir. Bu işlem, metalik malzemelerin hem yüzey sertliğini artırmak hem de aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Zhang vd., 2023; Li vd., 2025; Sukuroglu 2025).

Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) olarak da bilinen MAO yöntemi, alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve bunların alaşımları gibi hafif metaller üzerinde seramik kaplamaların elde edilmesinde kullanılan ve son yıllarda sürekli gelişim gösteren çevre dostu bir yüzey modifikasyon teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, temelde elektrot yüzeyinde plazma mikro deşarjlarının meydana geldiği voltaj seviyelerinde metalin elektrolit ortamında anodik oksidasyonuna dayanmaktadır (Yerokhin vd., 2003; Hussein vd., 2013; Qi vd., 2023). İşlem sırasında iki elektrot arasına bir potansiyel farkı uygulanmakta ve bu sayede metal ya da alaşım, sulu bir elektrolit çözeltisi içinde anodik polarizasyona uğramaktadır. Uygulanan voltaj değeri elektrolitin kırılma voltajını aştığında, taban malzeme yüzeyinde kıvılcım oluşumu, iyonizasyon ve mikro ark boşalması gerçekleşmekte; bu süreç, kaplama tabakasının büyümesiyle sonuçlanmaktadır (Yerokhin vd., 2003). Proses sonunda elde edilen seramik tabaka, hem elektrolit bileşiminde yer alan kimyasal elementlerin oksitlerinden hem de taban malzemeden kaynaklanan oksitlerin kombinasyonundan oluşmaktadır. MAO yöntemini diğer yüzey kaplama tekniklerinden ayıran en önemli özellikler ise taban malzeme ile kaplama arasındaki yüksek adhezyon direnci, kaplamanın yüksek sertliği ve korozyon ile aşınmaya karşı sergilediği üstün dayanımdır (Sukuroglu, 2018; Wu vd., 2023).

MAO yöntemi ile büyütülen kaplamalar; elektrolit çözeltinin konsantrasyonuna ve kimyasal bileşimine, uygulanan voltaj, frekans, çalışma döngüsü ve akım türü gibi çok sayıda işlem parametresine bağlı olarak şekillenmektedir (Yerokhin vd., 2003; Whang vd., 2004). Bu parametrelerin kontrollü seçimi ve kapsamlı biçimde anlaşılması, kaplamanın istenilen performans düzeyine ulaşmasını sağlamaktadır.

MAO yöntemi ile alüminyum ve alaşımları üzerine gerçekleştirilen çok sayıda araştırma, MAO kaplamalarının söz konusu malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmede oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmaların önemli bir kısmı, MAO kaplamalarının alüminyum alaşımlarının aşınma ve korozyon direncini kayda değer düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır (Whang vd., 2004; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024). Bu iyileşme, kaplamaların yoğun, sert ve kararlı oksit tabakaları oluşturarak taban malzemeyi dış etkilere karşı koruması ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, MAO işleminde kullanılan temel elektrolit çözeltileri çoğunlukla alüminat ve silikat esaslı katkıları içermektedir. Ancak bu katkıları her durumda hedeflenen mekanik dayanımı, tribolojik performansı ve korozyon direncini sağlamakta yeterli olmayabilmektedir. Özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda, bu tür standart elektrolitlerin sınırlı etkisi kaplamaların fonksiyonel

özelliklerinde istenilen düzeye ulaşamamasına yol açmaktadır. Bu nedenle, taban malzemenin kullanım ömrünü uzatmak ve performansını artırmak amacıyla elektrolit ortamına farklı türde katkı maddeleri eklenmesine duyulan ihtiyaç giderek artmıştır (Zhang vd., 2013; Wu vd., 2014; Fattah-Alhosseini vd., 2020; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, MAO kaplamaların özelliklerini iyileştirmek üzere çeşitli seramik ve metal oksit partiküllerinin elektrolite ilave edilmesine odaklanmıştır (Fattah-Alhosseini vd., 2020; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024; Qi vd., 2025; Sukuroglu 2025). Bu katkılar arasında TiO_2 , SiC , ZrO_2 , $h-Bn$, B_4C , AlN , $SrTiO_3$, TiB_2 gibi farklı bileşikler yer almakta olup, her bir katkının kaplama yapısı üzerinde özgün etkiler yarattığı bildirilmiştir (Ma vd., 2022; Qi vd., 2023; Gao vd., 2023; Qi vd., 2025; Sukuroglu, 2025). Örneğin, TiO_2 ve ZrO_2 gibi oksit katkılar, kaplama sertliğini ve termal kararlılığını artırırken (Qi vd., 2023; Qi vd., 2025), TiB_2 , SiC ve B_4C gibi seramik partiküller kaplama yoğunluğunu, mikrosertliği ve aşınma direncini geliştirmektedir (Ma vd., 2022; Sukuroglu 2025).

Fattah-Alhosseini ve arkadaşları (2020), alüminyum ve alaşımları üzerinde büyütülen mikro ve nano partikül katkılı MAO kaplamalar üzerine kapsamlı bir derleme çalışması yayımlamışlardır. Araştırmada, TiO_2 , SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiN , MoS_2 , Ag , CeO_2 , SiC , grafit, grafen, grafen oksit (GO), hidroksiapatit (HA) ve WC gibi çok çeşitli partiküllerin kaplamalara ilave edilmesi durumunda ortaya çıkan etkiler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Bu katkılarının yalnızca kaplamaların korozyon özellikleri üzerindeki performansı değil, aynı zamanda kaplama oluşum mekanizması, faz bileşimi, mikro yapı karakteristikleri, yüzey pürüzlülüğü, adhezyon mukavemeti ve kaplama kalınlığı gibi temel parametreler üzerindeki etkilerini de sistematik biçimde açıklamışlardır. Çalışmalarında, özellikle nanopartikül katkısının kaplamaların mekanik dayanımını, tribolojik performansını ve korozyon direncini belirgin ölçüde iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Nano boyuttaki katkı partiküllerinin, kaplama matrisine daha homojen bir şekilde dağılması sayesinde gözenekliliğin azalmasına, yüzeyin daha kompakt bir yapıya kavuşmasına ve buna bağlı olarak aşınma ile korozyon süreçlerine karşı daha dirençli kaplamaların elde edilmesine etki ettiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, farklı partiküllerin kaplamalara dâhil olma mekanizmasının (örneğin elektroforetik taşınım, eriyik oksit fazına gömülme ya da mikro ark boşalması sırasında kinetik enerji ile yerleşme gibi) kaplamanın nihai özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını vurgulamışlardır. Sonuç olarak, Fattah-Alhosseini ve arkadaşları (2020), partikül katkılı MAO kaplamaların performansını artırmaya yönelik stratejiler konusunda literatüre

kapsamlı bir katkı sunmuş ve özellikle nanopartikül takviyesinin yüksek performanslı kaplamaların geliştirilmesinde etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Ma ve arkadaşları (2022) yaptıkları çalışmada Mg–Li alaşımı üzerinde bor karbür (B_4C) ve karbon (C) parçacıkları içeren kompozit MAO kaplamalar üretmiş ve bu parçacıkların kaplamaların mikro yapısı ile fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Araştırma bulguları, B_4C ve C parçacıklarının kaplama yapısına başarılı bir şekilde entegre olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle B_4C parçacıklarının kaplama içerisindeki mikro gözenekleri kısmen doldurduğu ve bu sayede daha yoğun bir yapı oluşmasına katkı sağladığı, C parçacıklarının ise yüzeyde belirgin şişkinlikler meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, B_4C/C kompozit parçacıklarının birlikte kullanılması, kaplama kalınlığında artışa ve gözeneklilik oranında azalmaya yol açarak kaplamaların yapısal bütünlüğünü güçlendirmiştir. Mekanik ve tribolojik açıdan değerlendirildiğinde, bu iyileşmelerin kaplamanın aşınma direncinde kayda değer bir artış sağladığı ve aynı zamanda korozyon direncinin de büyük ölçüde korunmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kaplama performansındaki bu gelişmelerin temel nedeni, B_4C parçacıklarının yüksek sertlik değerleri ile C parçacıklarının yağlayıcı özelliklerinin sinerjik etkisine bağlanmaktadır. Araştırmacılar, mikro ark oksidasyon elektrolitine parçacıkların kompozit olarak eklenmesinin, kaplama özelliklerini optimize etmede etkili ve uygulanabilir bir strateji olduğunu vurgulamışlardır. Qi ve arkadaşları (2023), MAO yöntemi ile 7075 alüminyum alaşımı üzerine zirkonyum oksit (ZrO_2) nanopartikül katkılı kompozit kaplamalar üretmiş ve bu kaplamaların yapısal, aşınma ve korozyon davranışlarını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, ZrO_2 nanopartiküllerinin elektrolite ilavesinin kaplama oluşum sürecine önemli katkılar sunduğunu ortaya koymuşlardır. Özellikle ZrO_2 'nin varlığı, kaplama tabakasının daha kalın ve yoğun bir şekilde büyümesine, yüzeyin daha homojen bir morfolojiye ulaşmasına ve pürüzlülük değerlerinin iyileşmesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Bunun yanı sıra, kaplamanın korozyon ve aşınma direncinde de dikkate değer bir artış gözlemlenmiştir. ZrO_2 nanopartiküllerinin kaplama matrisine entegre olması hem gözenekliliğin azalmasına hem de kaplamanın daha kompakt ve homojen bir yapıya ulaşmasına etki ettiğini ifade etmişlerdir. Bu durumun ise özellikle agresif ortamlarda kaplamanın koruyucu etkisinin artmasına ve tribolojik yükler altında daha iyi performans göstermesine etki ettiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak ZrO_2 katkısının MAO kaplamaların performansını artırmada etkili bir yaklaşım olduğunu vurgulamışlardır. Gao ve arkadaşları (2023), MAO yöntemi kullanarak Al 2024 alaşımı

üzerinde hekzagonal bor nitrür (h-BN) nanopartikülleri içeren kompozit kaplamalar üretmiş ve bu kaplamaların tribolojik ile elektrokimyasal korozyon davranışlarını detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, h-BN katkısının kaplama mikroyapısı üzerinde dikkate değer iyileştirmeler sağladığı belirlemişlerdir. Özellikle nanopartikül ilavesi ile kaplama yüzeyinde oluşan gözeneklilik oranının ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, bunun sonucunda daha yoğun ve homojen bir yapının elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, h-BN nanopartiküllerinin ilavesiyle kaplamaların mikrosertliğinde ve taban malzeme ile olan adhezyon direncinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Çalışmalarındaki elektrokimyasal test sonuçları, h-BN katkılı kaplamaların korozyon potansiyelini yükselttiğini, korozyon akım yoğunluğunu ise düşürdüğünü, dolayısıyla korozyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Tribolojik değerlendirmelerinde ise h-BN ilavesi sayesinde kaplamaların aşınma oranının azaldığı, sürtünme katsayısının düştüğü ve yüzeyde daha stabil bir aşınma mekanizmasının geliştiğini ifade etmişlerdir. Bu sonuçlar, h-BN katkısının MAO kaplamaların yalnızca koruyucu özelliklerini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tribolojik performansını da iyileştirdiğini ve bu tür katkıların yüksek performans gerektiren uygulamalarda potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Qi ve arkadaşları (2025), 6063 alüminyum alaşımı üzerinde MAO yöntemi elektrolite TiO_2 parçacıkları ve/veya politetrafloroetilen (PTFE) emülsiyonları ilave ederek, bu katkıların kaplama özelliklerine etkilerini sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında hem TiO_2 hem de PTFE katkılarının elektroforetik etkiyle kaplama yüzeyinde oluşan mikro gözenekleri ve çatlakları etkin şekilde doldurduğunu gözlemlenmiştir. Bu durumun, kaplamanın daha kompakt ve yoğun bir yapıya sahip olmasını sağlayarak sürtünme katsayısını (CoF) düşürdüğünü ve aynı zamanda saf MAO kaplamalara kıyasla korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını belirlemişlerdir. Özellikle TiO_2 ve PTFE'nin eş zamanlı olarak elektrolite eklenmesiyle elde edilen hibrit MAO/ TiO_2 /PTFE kompozit kaplamasının en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve korozyon performansı bakımından ise en iyi dirence sahip olduğunu gözlemlenmiştir. MAO/ TiO_2 /PTFE kompozit kaplamasının ölçülen korozyon akım yoğunluğunun, saf MAO kaplamalara kıyasla yaklaşık üç kat daha düşük değere sahip olduğunu belirtmişlerdir. TiO_2 ve PTFE katkılarının birlikte kullanılması, MAO kaplamaların tribolojik performansını ve uzun dönemli dayanıklılığını geliştirmek açısından etkili bir yöntem olarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak nanopartikül ilavesinin kaplamanın hem aşınma hem de korozyon direncinde önemli bir sinerjik etki yarattığını ifade etmişlerdir. Sukuroglu (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada,

7075 alüminyum alaşımının yüksek sıcaklık koşullarındaki performansını artırmak, farklı ortamlarda aşınma direncini iyileştirmek ve agresif ortamlardaki korozyon dayanımını geliştirmek amacıyla MAO yöntemi kullanılarak Al_2O_3 ve TiB_2 katkı Al_2O_3 kompozit kaplamalar ($Al_2O_3:TiB_2$) büyütülmüştür. Çalışmasında, Al_2O_3 ve $Al_2O_3:TiB_2$ kompozit kaplamaların 7075 alüminyum alaşımı yüzeyi üzerine MAO yöntemiyle büyütülmesi ve bu kaplamaların üç farklı ortamda (atmosferik koşullar, %3,5 NaCl içeren tuzlu su çözeltisi ve yağ ortamı) incelenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda kaplamaların yapısal, morfolojik, korozyon, yapışma ve aşınma özelliklerini ayrıntılı olarak değerlendirmiştir. Sonuç olarak TiB_2 nanopartikülü katkı $Al_2O_3:TiB_2$ kompozit kaplamaların, saf Al_2O_3 kaplamalara kıyasla daha yoğun ve homojen bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu belirlemiştir. Ayrıca bu kaplamaların yüzeyinde gözenekliliğin ve gözenek boyutlarının belirgin biçimde azaldığı, mikro çatlakların ise büyük ölçüde sınırlı kaldığını tespit etmiştir. Bunun yanı sıra, TiB_2 nanopartiküllerinin kaplamaya ilave edilmesiyle elde edilen $Al_2O_3:TiB_2$ kompozit kaplamaların hem korozyon direncinde hem de aşınma dayanımında anlamlı bir artış sağlandığını gözlemlemiştir. Çalışmasında ayrıca, bu kaplamaların taban malzeme ile yüksek bağ mukavemeti sergilediğini, dolayısıyla mühendislik uygulamalarında uzun süreli performans için önemli bir avantaj sunduğunu ifade etmiştir.

Mevcut literatür incelendiğinde alüminyum ve alaşımları yüzeyinde büyütülen MAO kaplamalara farklı partiküllerin ilavesiyle kaplamaların mikroyapısal, mekanik, tribolojik, elektro-kimyasal ve biyolojik özelliklerinin kontrol edilebilir şekilde geliştirilebildiği görülmektedir. Bu durum, MAO kaplama teknolojisinin yalnızca koruyucu yüzey kaplama yöntemi olmaktan çıkıp, çok işlevli ve uygulama alanına özgü performans kazandırabilecek bir yüzey mühendisliği tekniği haline geldiğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, 7075 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla üç farklı bor içerikli katkı ($B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN) kullanılarak kompozit kaplamaların büyütülmesi ve büyütülen kaplamaların yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon davranışları üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır:

- Birinci aşamada, 7075 alüminyum alaşımı yüzeyi üzerine referans kaplama olarak Al_2O_3 tabakaları Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemiyle büyütülmüştür.

- İkinci aşamada, aynı alaşım yüzeyi üzerine üç farklı bor esaslı katkı maddesi ($B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN) ayrı ayrı ilave edilerek kompozit kaplamalar büyütülmüştür.

- Üçüncü aşamada ise elde edilen bu kaplamaların yapısal özellikleri, mekanik dayanımları, tribolojik performansları ve korozyon dirençleri kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir.

Çalışmanın genel amacı, Al 7075 alaşımının özellikle aşınma direnci, tribolojik performansı ve korozyon dayanımını artırmaya yönelik olarak bor katkılı kompozit kaplamaların potansiyelini ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçların, hafif alaşımların yüzey mühendisliği alanında hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlaması beklenmektedir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum (Al), 2,70 g/cm³ yoğunluğu ile titanyumdan yaklaşık 1,67 kat ve çelikten yaklaşık 2,9 kat daha hafif bir elementtir (Polmear vd., 2017). Sahip olduğu düşük yoğunluk, endüstrinin pek çok alanında milyonlarca farklı ürünün üretiminde tercih edilmesini sağlamakta ve bu nedenle küresel ekonomi açısından stratejik bir konuma taşımaktadır. Hafiflik ve yüksek dayanım özelliklerini bir arada sunması, alüminyumdan üretilen yapısal bileşenleri özellikle uzay ve havacılık endüstrisi için vazgeçilmez hale getirmektedir. Benzer şekilde, taşımacılık ve inşaat sektörlerinde de aynı avantajları sayesinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Kaufman vd., 2003; Ma, 2023)

Kimyasal Sembol	Al	Atom Ağırlığı	28,6
Atom Numarası	13	Ergime Sıcaklığı	660,24 °C
Çekme Mukavemeti	4-9 kPa/mm ²	Kaynama Sıcaklığı	2300 °C
Akma Mukavemeti	1-3 kPa/mm ²	Isıl Genleşme Katsayısı	23,8x10 ⁻⁶ /°C
Kopma Uzaması	30-50%	Sertlik	15-30 HB30
Yoğunluğu (20 °C)	2,70 g/cm ³	Elektrik Direnci	2,63 µΩ ^{cm}

Alüminyum ve alaşımları, çelikten sonra en fazla kullanılan mühendislik malzemeleri arasında yer almakta ve demir dışı metaller içerisinde öncelikli tercih edilmektedir. Doğada bol miktarda bulunmaları, tasarım kolaylıkları, gelişmiş üretim süreçleri ve ilk üretim maliyetlerinin düşük olması bu malzemelerin kullanımını cazip hale getirmektedir. Yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk, geri dönüştürülebilirlik, yanıcı ve parlayıcı olmama özelliği, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek spesifik dayanım gibi üstün özellikler, alüminyum alaşımlarını mühendislik uygulamalarında önemli bir konuma taşımaktadır (Dursun ve Soutis, 2014; Zhang vd., 2019; Georgantzia vd., 2021; Zhang vd., 2019; Jayakumar vd., 2023; Czerwinski, 2024). Özellikle otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde hafiflik ve yüksek performans gereksinimleri nedeniyle yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Ayrıca yüksek mukavemet değerleri, yorulma dayanımı, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği sayesinde yalnızca otomotiv sektöründe değil, aynı zamanda uçak endüstrisinde de yoğun biçimde tercih edilmektedir (Zhang vd., 2019; Dada vd., 2024). Bunun yanı sıra uygun ergime sıcaklığı ve diğer metal alaşımlarına kıyasla düşük maliyeti, alüminyumun kompozit üretiminde önemli avantajlar sağlamasına katkıda bulunmaktadır (Jayakumar vd., 2023; Czerwinski, 2024).

Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki davranışı, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde kritik bir öneme sahiptir. Bu önem, yapı malzemelerinin termal stres altında stabil kalma zorunluluğu ve alaşımların mikro yapısal değişimlere karşı hassasiyeti ile ilgilidir. Termal iletkenlik, düşük sıcaklıklarda (70–100 °C) aşırı doymuş katı çözeltilerin stabilitesi, katı çözeltilerin tükenme eğilimi ve yeni oluşan fazların mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklık performansını doğrudan belirleyen faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle havacılık uygulamalarında, malzemelerin termal kararlılık gereksinimleri oldukça katıdır. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarındaki katı çözeltiler sabit kalmamakta ve zamanla sertleşme veya yapay yaşlanma süreçleri sonucunda düşük aşırı doymuluk seviyelerinde bile ayrışmaya eğilim göstermektedir (Rams, 2022). Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında alaşımların termal kararlılığını, aşınma ve korozyon dirençlerini artırmak amacıyla alaşım bileşimleri, ısıl işlemler ve yüzey modifikasyon yöntemleri üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Alüminyum, hafifliği, yüksek mekanik dayanımı ve uzun ömürlülüğü nedeniyle otomotiv, havacılık, savunma sanayisi, denizcilik ve kimya endüstrisi gibi farklı endüstriyel uygulamalarda kritik bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Dada vd., 2024). Alüminyumun sahip olduğu temel özelliklerini geliştirmek ve özel performans gereksinimlerini karşılamak amacıyla farklı alaşım sistemleri geliştirilmiştir. Amerikan Standartlar Birliği (American Standards Association) tarafından belirlenen ve dünya genelinde en yaygın biçimde kullanılan alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırma sistemi Tablo 2 'de verilmiştir. Bu simgeleme sistemi, sekiz ana grup ve dört basamaklı rakam dizilerinden oluşmaktadır. Örneğin endüstride 1000 (1xxx) ve 2000 (2xxx) serisi gibi tanımlamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı dövme alaşımları ısıl işlem uygulanabilir özellikte olup yaşlandırma kapasitesine sahiptir; bu sayede plakalar veya profiller, tasarlanan mukavemet değerlerine ulaşacak şekilde güçlendirilebilmektedir.

Tablo 2. Amerikan Standartlar Birliği'ne göre Alüminyum dövme alaşımlarının ticari sınıflandırması (Zhang vd., 2019; Rams, 2022)

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi	Isıl İşleme Uygunluk
1XXX	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2XXX	Al – Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX	Al – Mn	Yaşlandırılmaz
4XXX	Al-Si	Yaşlandırılabilir
5XXX	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX	Al-Mg-Zn – (Cu)	Yaşlandırılabilir
8XXX	Al-Li , Sn , Zr veya B	Yaşlandırılabilir
9XXX	Kullanılmayan seri	

1XXX Serisi: Yüksek saflıkta alüminyum alaşımlarından oluşur. Elektriksel iletkenlik ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle genellikle kimya ve elektrik endüstrisinde tercih edilmektedir.

2XXX Serisi: Bu seride temel alaşım elementi bakır olup, farklı oranlarda magnezyum ve diğer alaşım elementleri ile desteklenmektedir. Yüksek mukavemet özellikleri sayesinde özellikle havacılık endüstrisinde kritik bir rol oynamaktadır. Seri içerisinde en yaygın kullanılan alaşım AA2024 (Al 2024)'tür. Bu alaşım, hafiflik ile yüksek mukavemet arasındaki optimum dengeyi sağlaması nedeniyle havacılık uygulamalarında tercih edilmektedir. Bakır katkısı, alaşıma yüksek dayanım ve yorulma direnci kazandırırken, korozyon direncinin düşük olmasına yol açmaktadır. Bu dezavantaj, genellikle koruyucu kaplamalar veya anodizasyon işlemleri ile giderilmektedir. AA2024, özellikle uçak kanatları, gövdeleri ve yüksek mukavemet gerektiren diğer yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

3XXX Serisi: Bu serinin ana alaşım elementi mangan olup, özellikle korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Mimari yapılar, sıvı depolama tankları ve boru sistemleri bu alaşım grubunun ne çıkan kullanım alanlarıdır. Seri içerisinde en yaygın kullanılan alaşım ise AA3003 (Al 3003)'tür. Düşük mukavemet değerine rağmen, üstün korozyon dayanımı ve iyi işlenebilirliği ile öne çıkmaktadır. Mangan katkısı, alaşımın mekanik özelliklerini geliştirmekte ve yüksek kaynaklanabilirlik sağlamaktadır. Bu zellikleri sayesinde yiyecek-içecek ambalajları, mutfak gereçleri, çatı kaplamaları, soğutma ekipmanları ve kimya endüstrisi bileşenleri gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

4XXX Serisi: Bu seride temel alaşım elementi silisyumdur. Silisyum katkısı sayesinde alaşımlar, dūřuk ısıl genleşme katsayısına, yūksək aşınma direncine ve iyi boyutsal kararlılığa sahiptir. Bu özellikler, 4XXX serisini özellikle otomotiv, motor ve ısıl gerilme altında çalışan parçalar için uygun hale getirmektedir. Ayrıca, kaynak malzemeleri ve levha üretiminde de sıklıkla tercih edilmektedir. Seri içerisinde en yaygın kullanılan alaşımlarından biri olan AA4032 (Al 4030), yūksək silisyum içeriği (%12 civarı) ile one çıkar. Bu alaşım, yūksək aşınma direnci, dūřuk ısıl genleşme katsayısı ve iyi yūksək sıcaklık mukavemeti özellikleri sunmaktadır. Bu nedenle otomotiv sektöründe motor pistonları, silindir kapakları ve fren parçaları gibi yūksək sıcaklık ve mekanik yūklere maruz kalan bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

5XXX Serisi: Bu serinin temel alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum içeriği arttıkça alaşımın mukavemeti ve sertliği artarken, sūneklik özelliklerinde belirgin bir azalma görülür. Bu nedenle 5XXX serisi, özellikle yūksək korozyon direnci ve iyi kaynaklanabilirlik özellikleri sayesinde denizcilik, basına dayanıklı yapılar ve depolama sistemleri gibi alanlarda geniş kullanım bulmaktadır. AA5052 (Al 5052) Alaşımı, 5XXX serisinin en çok kullanılan alaşımlarından birisidir. Yūksək korozyon direnci, üstün kaynak kabiliyeti ve şekillendirilebilirliği ile dikkat çeker. Özellikle deniz suyu ve agresif kimyasal ortamlara karşı dayanıklılığı nedeniyle gemi gövdeleri, deniz araçları ve yakıt tankları gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, basınçlı kaplar, depolama kapları ve otomotiv yakıt sistemleri için de uygun bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

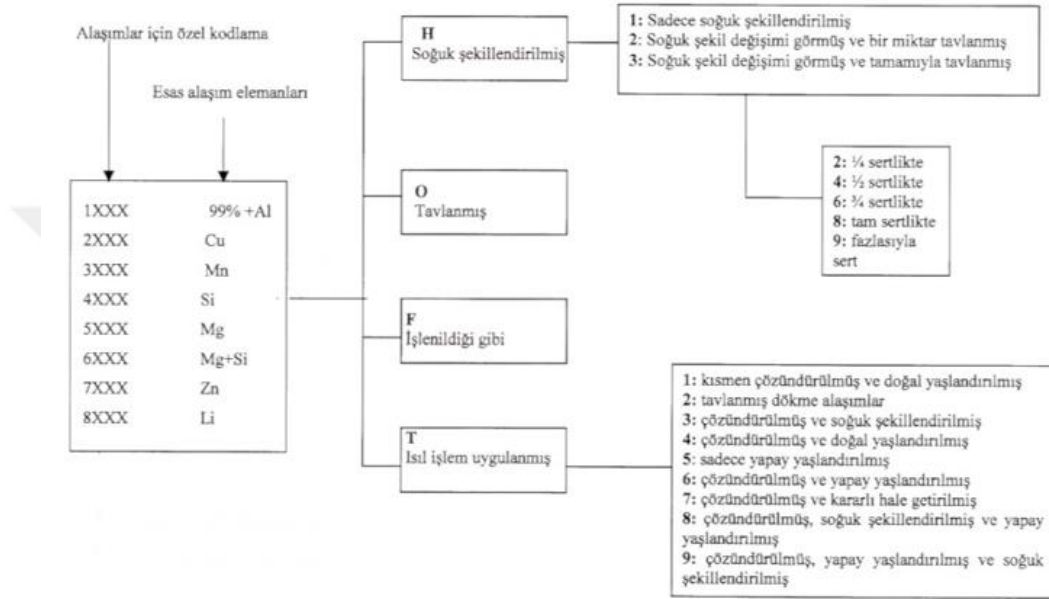
6XXX Serisi: Bu seri, temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alaşımlardan oluşmaktadır. İyi mekanik özellikler, yūksək korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik sağlamaları nedeniyle özellikle ekstrüzyon işlemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. 6XXX serisi, hafiflik ile mukavemet arasında dengeli özellikler sunması sebebiyle otomotiv, havacılık ve inşaat sektörlerinde önemli bir yer edinmiştir. AA6061 (Al 6061) Alaşımı: Bu seri içerisinde en çok kullanılan alaşım türüdür. Yūksək mukavemet, mkemmek kaynak kabiliyeti ve iyi korozyon direnci özellikleriyle ne çıkan çok yönlü bir malzemedir. Otomotiv, havacılık ve inşaat mühendisliği gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle bisiklet çerçeveleri, uçak gövdeleri, gemi yapıları, yapı elemanları ve teknik ekipmanlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, iyi işlenebilirlik özellikleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

7XXX Serisi: Bu serinin temel alaşım elementi çinkodur. Çinko, magnezyum, bakır ve krom gibi elementlerle birleştirilerek alaşımların yüksek mukavemet özellikleri kazanmaları sağlanır. 7XXX serisi, alüminyum alaşımları arasında en yüksek dayanım seviyesine sahip grup olarak bilinmekte ve bu nedenle havacılık ve savunma sanayiinde stratejik bir öneme sahiptir. Bu seri içinde en yaygın kullanılan alaşım AA7075 (Al 7075) alaşımıdır. Bu alaşım yüksek mukavemet ve mükemmel dayanıklılık özellikleri ile öne çıkar. Özellikle uçak yapıları, askeri araçlar, yüksek dayanım gerektiren mühendislik bileşenleri ve savunma sanayiinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, titanyuma kıyasla daha ekonomik bir seçenek sunması nedeniyle tercih edilmektedir (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

8XXX Serisi: 8XXX serisi alaşımlar, genellikle lityum, zirkonyum, demir ve kalay gibi elementlerle zenginleştirilmiş özel alaşımlardan oluşur. Bu seri, özellikle mükemmel şekillendirilebilirlik, iyi korozyon direnci ve hafiflik özellikleriyle dikkat çeker. 8XXX serisinin en önemli özelliği, yüksek yorulma direnci ve tokluk göstermesidir. Bu nedenle hem paketleme ve ambalaj endüstrisinde hem de havacılık uygulamalarında yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. 8XXX serisinin en yaygın kullanılan alaşımlarından biri AA8011 alaşımıdır. Bu alaşım, iyi şekillendirilebilirlik, yüksek korozyon direnci ve düşük maliyetli üretim avantajı ile bilinmektedir. AA8011 (Al 8011) özellikle alüminyum folyo üretiminde, yani gıda ambalajları, içecek kutuları ve ev tipi mutfak folyoları gibi ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, elektrik kabloları ve ısı değiştiricilerde de tercih edilmektedir. Ambalaj sektöründe geniş kullanım bulmasının temel nedeni, bu alaşımın yüksek esneklik ve ince levha formunda mükemmel performans sergilemesidir (Zhang vd., 2019; Rams, 2022).

Alüminyum dövme alaşımları, ısıl işleme uygunluk açısından iki temel gruba ayrılmaktadır. 2XXX, 4XXX, 6XXX ve 7XXX serileri, çözeltiyeye alma ve yaşlandırma gibi ısıl işlem süreçlerine tabi tutularak yüksek mekanik dayanım kazanabilmektedir. Buna karşılık, sertlik değeri H harfi ile kısaca gösterilen 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileri ısıl işleme mukavemet artışı göstermeyen alaşımlar olup, dirençlerini esas olarak mangan (Mn) ve magnezyum (Mg) elementlerinin varlığından elde etmektedirler. Bu serilerde dayanım artışı, genellikle soğuk deformasyon işlemleri sonucu meydana gelen gerilim sertleşmesi mekanizmasıyla sağlanmaktadır (Zhang vd., 2019). Haddeme yöntemiyle üretilmiş alüminyum alaşımlarının kısa gösterim sisteminde kullanılan sayısal kodların açıklamaları şekil 1' de verilmiştir. Alaşımların mekanik dayanım seviyeleri, uygulanan işlemlere bağlı olarak değişmekte olup bu durum genellikle temper sembolleri ile ifade edilir. Isıl işleme dayanım kazanmış alaşımlar T

temper, soğuk şekil değiştirme sonucu sertleşmiş olanlar ise H temper sembolleriyle gösterilmektedir. Bunun dışında, farklı işlem durumlarını ifade eden ek gösterimler de mevcuttur. O temper, alaşımın tavlanmış olduğunu; W temper, çözündürme ısı işlemi uygulanmış halini; F temper ise malzemenin herhangi bir ek işlem görmeden, üretildiği haliyle kullanıldığını belirtir. T ve H sembollerini izleyen sayısal ifadeler, uygulanan şekil değiştirme miktarını, kullanılan belirli bir ısı işlem tipini ya da malzemenin geçirdiği özel işlem koşullarını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1. Al alaşımlarının sayısal kodları (Coşkun, 2002)

Hadde Alüminyum alaşım serilerinin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri ile kullanım alanları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te de belirtildiği gibi alüminyum alaşımları, çekme mukavemeti değerlerine göre genellikle üç ana grupta değerlendirilmektedir. Düşük mukavemetli alaşımlar, çekme mukavemeti yaklaşık 200–250 MPa'ın altında kalan malzemeleri kapsamakta olup, bu sınıfa çoğunlukla 1XXX ve 3XXX serisi alaşımlar girmektedir. Orta mukavemetli alaşımlar ise yaklaşık 200–400 MPa aralığında çekme dayanımına sahip olup, tipik olarak bazı 5XXX, 6XXX ve 8XXX serileri bu grupta yer almaktadır. Buna karşın, 400 MPa ve üzeri çekme mukavemetine ulaşabilen alaşımlar yüksek mukavemetli olarak sınıflandırılmakta ve özellikle 2XXX ile 7XXX serisi alaşımlar bu grupta öne çıkmaktadır.

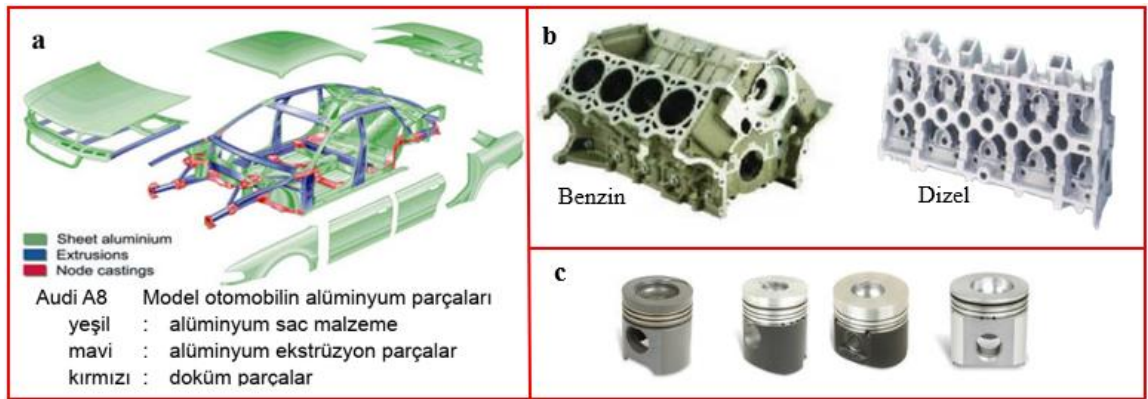
Tablo 3. Hadde Alüminyum alaşım serilerine ait bazı mekanik ve fiziksel özellikler ile kullanım alanları (Polmear vd., 2017; Vargel, 2020).

Alaşım Serisi	Bileşim	Akma Gerilmesi (MPa)	Maks. Çekma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Young Modülü (GPa)	Kullanım Alanı
1000	Saf Alüminyum	~40-120	~70-200	~30-60	~62-69	Elektrik iletkenleri, Kimyasal proses ekipmanları, Isı Eşanjörleri vb.
2000	Al-Cu	~290-400	~420-520	~5-20	~70-73	Havacılık yapısal elemanları, Dişli kutuları, Otomobil parçaları bağlantı elemanları vb.
3000	Al-Mn	~90-150	~90-250	~20-40	~68-71	Çatı-cephe kaplamaları, Isı eşanjörleri, borular vb.
4000	Al-Si	~150-300	~110-400	~3-15	~70-72	Silindir kapakları, Piston gövdeleri vb.
5000	Al-Mg	~40-540	~110-590	~0,5-35	~68-71	Gemi gövdeleri, Deniz taşıtları, Basıncılı kaplar, Tanklar, taşıma aracı yapısal elemanları vb.
6000	Al-Mg-Si	~40-517	~89,5-565	~1-35	~69-71	Otomotiv gövde parçaları, Yapı profilleri, Köprü elemanları
7000	Al-Mg-Zn-(Cu)	~530-730	~570-750	~8-10	~71-74	Havacılık yapısal parçaları, Spor ekipmanları, Uzay sistemleri, Askeri araçlar vb.
8000	Özel alaşımlar (Örn: Li, Zn)	~110-290	~150-350	~5-25	~68-76	Uzay ve havacılık uygulamaları, Otomotiv sektörü, Kimyasal ve denizcilik uygulamaları vb.

2.2. Alüminyum alaşımları kullanım alanları

Alüminyum, düşük yoğunluğu, yüksek dayanımı ve korozyon direncinden kaynaklanan üstün performans özellikleriyle günümüz endüstrilerinde en çok tercih edilen mühendislik malzemelerinden biridir. Bu nitelikler, alüminyum ve türev alaşımlarını farklı sektörlerde vazgeçilmez kılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde, alüminyumun hafifliği yakıt ekonomisine doğrudan katkı sağlamakta, aynı zamanda emisyonların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Yakıt tankları, jantlar, motor bileşenleri ve şasi elemanları, alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı temel otomotiv parçaları arasında yer almaktadır (Başer, 2012; Taub vd., 2019). Bu özellikleriyle, sürdürülebilir ve yüksek performanslı araç tasarımlarında kritik bir malzeme konumundadır. Şekil 2’ de Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum parça örnekleri verilmiştir.



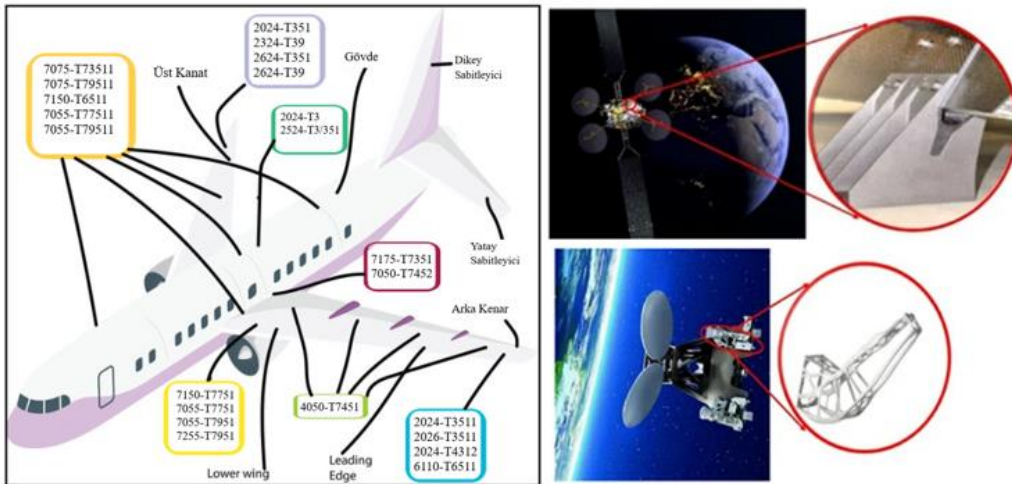
Şekil 2. Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum parça örnekleri a) Audi A8 model otomobilin alüminyum parçaları, b) Alüminyum motor blokları, c) Alüminyum pistonlar (Başer, 2012).

Askeri uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, alüminyum alaşımlarının yüksek mukavemet/ağırlık oranı büyük bir avantaj sağlamaktadır. Zırh sistemleri, askeri araç gövdeleri, silah parçaları ve hava platformları gibi kritik ekipmanlarda kullanımı hem hareket kabiliyetini hem de operasyonel verimliliği artırmaktadır (Jones vd., 2017).



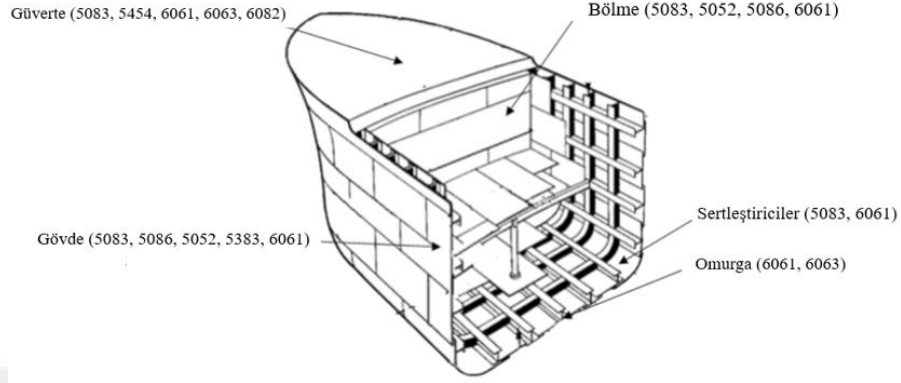
Şekil 3. Askeri uygulamalarda kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-1, 2025)

Havacılık ve uzay uygulamaları açısından bakıldığında, alüminyum alaşımlarının sağladığı düşük özgül ağırlık ve yüksek mekanik mukavemet, uçak gövdeleri, kanat sistemleri ve uzay araçlarının üretiminde kritik bir rol oynamaktadır (Duan vd., 2023; Khalid vd., 2023). Bu sayede, yapısal bütünlük korunurken taşıma kapasitesi artırılmakta ve enerji verimliliği sağlanmaktadır.



Şekil 4. Havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan alüminyum parça örnekleri (Khalid vd., 2023; URL-2, 2025)

Denizcilik ve su altı teknolojileri açısından alüminyum alaşımları, tuzlu suyun neden olduğu korozyona karşı sunduğu yüksek dirençle öne çıkmaktadır. Yüzeyde doğal olarak oluşan pasif oksit tabakası, bu malzemeyi gemi yapımında, deniz altı cihazlarında ve diğer denizcilik sistemlerinde güvenilir kılmaktadır (Deyab at al., 2020).



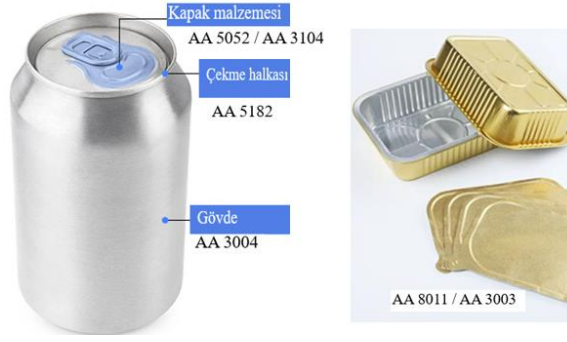
Şekil 5. Denizcilik ve su altı teknolojilerinde kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-3, 2025)

İnşaat sektöründe ise alüminyum; hafifliği, kolay işlenebilirliği ve uzun ömürlü yapısıyla dikkat çekmektedir. Pencere çerçeveleri, kapı sistemleri, çatı kaplamaları ve yapısal elemanlar, bu alaşımın yaygın uygulama alanları arasında yer almaktadır (Sun 2023).



Şekil 6. İnşaat sektöründe kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-4, 2025)

Ambalaj endüstrisinde ise alüminyum, gıda ve içeceklerin korunmasında stratejik bir malzemedir. Alüminyum folyo, içecek kutuları ve konserve kapaklarında yaygın kullanımı; hafifliği, tam geri dönüştürülebilirliği ve gıdayı çevresel etkilerden izole edebilme yeteneği ile ilişkilidir (Kores vd., 2023).



Şekil 7. Ambalaj endüstrisinde kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-5, 2025)

Elektrik ve elektronik sektöründe alüminyum; yüksek termal ve iyi elektriksel iletkenliği sayesinde kablolar, enerji iletim hatları, soğutucu sistemler ve elektronik cihaz kasalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca düşük yoğunluğu sayesinde, geleneksel olarak kullanılan ağır bakır iletkenlerin yerine ekonomik ve hafif bir alternatif olarak kullanılabilir (Czerwinski, 2024).



Şekil 8. Elektrik ve elektronik sektöründe kullanılan alüminyum parça örnekleri (URL-6)

Alüminyum alaşımları içerisinde özellikle havacılık, otomotiv ve çeşitli mühendislik uygulamalarında sağladıkları üstün mekanik ve teknolojik avantajlar nedeniyle 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar çoğunlukla kullanılmaktadır. Bu alaşımlara uygulanan yaşlandırma temelli ısıl işlem süreçleri, malzemelerin hem mukavemetini hem de sertleşebilirlik düzeyini önemli ölçüde artırmaktadır (Yamada vd., 2014; Dursun ve Soutis 2014).

Alüminyum alaşımları, farklı mekanik ve fiziksel özellikler sunan çeşitli alaşım sistemlerine ayrılmaktadır. Bu sistemler arasında, özellikle Al-Zn-Mg-Cu temelli 7XXX serisi alaşımlar (örneğin 7075, 7050, 7085, 7475), ultra yüksek spesifik mukavemet (akma gerilmesi/yoğunluk) ve spesifik elastisite modülü (elastisite modülü/yoğunluk)

gibi gelişmiş mekanik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu alaşımlar aynı zamanda yüksek tokluk, mükemmel yorulma dayanımı, iyi süneklik, kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik gibi çok yönlü performans avantajları sunmaktadır. Bu özellikler, onları başta havacılık, uzay ve savunma sanayii olmak üzere, otomotiv, denizcilik, elektronik, telekomünikasyon ve genel mühendislik uygulamaları için son derece uygun hale getirmektedir (Choi vd., 2020; Luo vd., 2020; Zhou vd., 2021; Patel vd., 2022; Khalid vd., 2023). 7XXX serisi içinde ise, çinko (Zn) içeriği ile dikkat çeken 7075 numaralı alaşım, sahip olduğu dengeli mekanik özellikler ve yaygın bulunabilirliği nedeniyle en çok tercih edilen türler arasında yer almaktadır (Dursun ve Soutis, 2014; Patel vd., 2022; Khalid vd., 2023).

Kimyasal bileşimi Tablo 4’ de fiziksel özellikleri Tablo 5’ de verilen Al 7075 alüminyum alaşımı, düşük yoğunluğuna rağmen sunduğu yüksek mekanik dayanım, sertlik ve ısıl direnç özellikleri sayesinde başta havacılık ve savunma sanayii olmak üzere, otomotiv ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Aynı gruptaki diğer yüksek dayanımlı alaşımlarla kıyaslandığında, işlenebilirliğinin daha iyi ve üretim maliyetlerinin daha düşük olduğu bilinmektedir (Çaydaş & Çelik, 2017). İlk kez 1943 yılında geliştirilen ve uygulama alanı bulan bu alaşım, özellikle T6 ısıl işlem koşulları altında ulaştığı yüksek mukavemet nedeniyle, uçak yapısal bileşenlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Al 7075 alaşımı çoğunlukla plaka formunda üretilmekle birlikte, yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilen kalın kesitli parçaların üretiminde de kullanılmaktadır (Zhang vd., 2019). Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde, sadece havacılık ve savunma sektöründe değil, aynı zamanda uzay sanayii, otomotiv mühendisliği ve spor ekipmanları gibi farklı alanlarda da etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Titanyuma kıyasla daha ekonomik bir alternatif sunması, bu alaşımı maliyet ve etkin çözümler arayan endüstriler için cazip hale getirmektedir (Dursun ve Soutis, 2014; Patel vd., 2022; Khalid vd., 2023).

Tablo 4. Alüminyum 7075 alaşımı kimyasal bileşimi (Zhou vd., 2021)

Bileşenler	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Diğer	Al
Ortalama Miktar (%)	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	≤0.50	≤0.40	≤0.30	0.18~0.28	≤0.15	Kalan

Tablo 5. Alüminyum 7075 alaşımı fiziksel özellikleri (ASM Int., 2019)

Fiziksel Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	2,81 g/cm ³
Elastik Modülü	7300 kg / mm ²
Rijitlik Modülü	2750 kg / mm ²
Ergitme Aralığı	477 – 635°C
Özgül Isı (0-100°C arasında)	0,23 cal/g °C
Lineer Genleşme Katsayısı (20-100°C, T6 için)	24-10-6 mm /°C
Özgül Elektrik Direnci (20°C, T6 için)	0,058 Ohm.mm ² /m

Alüminyum 7075 alaşımı, sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle endüstride geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Yüksek çekme ve akma dayanımının yanı sıra, belirli bir süneklik düzeyi de sergilemektedir. Özellikle T6 temper koşulunda yaklaşık %11’lik uzama değerine ulaşabilmesi, bu alaşımı şekillendirme süreçlerinde kullanılabilir kılmaktadır (Zhang vd., 2019; Rams vd., 2022; Dada vd., 2024). Yorulma dayanımı genel anlamda tatmin edici olsa da Al 2024 alaşımı gibi yüksek mukavemetli diğer alüminyum sistemleriyle kıyaslandığında nispeten daha düşük seviyede kalmaktadır. İşlenebilirlik yönünden değerlendirildiğinde, frezeleme, tornalama, dövme ve ekstrüzyon gibi yaygın talaşlı imalat yöntemleriyle etkin bir şekilde işlenebilmektedir (Medina vd., 2025). Buna karşılık, kaynaklanabilirlik açısından bazı sınırlamalar söz konusudur. Direnç kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı gibi yöntemler uygulanabilmekle birlikte, kaynak sırasında mukavemet kaybı meydana gelebilmektedir; bu durum genellikle ilave bir ısıl işlemle telafi edilmektedir (El-Batahgy vd., 2021; Çubuk vd., 2022). Bu nedenle, mühendislik tasarımlarında çoğunlukla kaynak işlemi gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilmektedir. Al 7075 alaşımı, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları arasında en yüksek mekanik dayanım seviyesine sahip olan alaşım türüdür (ASM Int., 2019). Alaşım bünyesinde yer alan magnezyum (Mg) elementi, bu yüksek dayanımın yanı sıra yüksek sıcaklıklara karşı dirençli malzeme üretimini de mümkün kılmaktadır. Ancak, sahip olduğu üstün mekanik özelliklere rağmen Al 7075 alaşımının korozyon direnci, bazı diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla göreceli olarak düşük olmaktadır.

Alüminyum ve alaşımları, yüksek mekanik ve fiziksel performansına rağmen, yüzeylerindeki doğal oksit tabakası agresif ortamlarda kararlılığını yitirebilmektedir. Bu durum ise malzeme yüzeyinin korozyon ve aşınmaya karşı dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle agresif çevre koşulları ve yüksek mekanik yükler altında kullanım alanları sınırlı kalmaktadır (Şüküroğlu, 2016). Bu sınırlamalara rağmen, alüminyumun avantajlarını kaybetmek istemeyen araştırmacılar, malzemenin yüzey dayanımını artırmak için mekanik işlemler (örneğin bilyeli dövme, soğuk haddeleme), ısıl işlemler, vakum kaplama, toz boya uygulamaları, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme (PVD ve CVD), elektrolitik kaplama (MAO) ile darbeli elektrot kaplama gibi farklı prosesler geliştirmişlerdir (Cheng vd., 2013; Palanivelu vd., 2014; Şüküroğlu, 2016). Bu prosesler arasında ise hafif metalik malzemelerin (Al, Ti, Mg, vb.) yüzeyine seramik yapıda kompozit kaplamaların büyütülmesine olanak sağlayan ve çevre dostu bir teknoloji olan Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemi ön plana çıkmaktadır (Yerokhin vd., 2003; Hussein vd., 2013; Qi vd., 2023). Bu yöntemi diğer yöntemlere göre benzersiz kılan özellikler; taban malzeme ile kaplama arasındaki yüksek adhezyon direnci, yüksek sertlik, korozyon ve aşınmaya karşı dayanıklılıktır (Sukuroglu, 2018; Wu vvd., 2023).

2.3. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi (MAO)

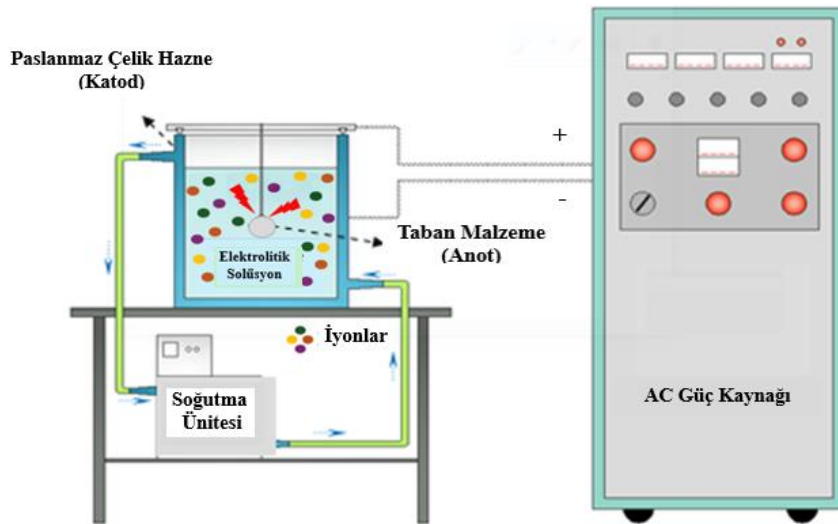
Alüminyum ve alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, onları birçok uygulamada tercih edilen malzemeler haline getirdiğinde kullanım koşullarına bağlı olarak yüzeylerinde aşınma ve korozyon gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Bu tür hasarlar, malzemenin öngörülen hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltmakta ve sıklıkla yenisi ile değiştirilmesini gerektirmektedir. Bu durum hem ekonomik kayıplara hem de zaman maliyetine yol açtığından, yüzey modifikasyonlarının gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda, iyon sıçratma, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, sol-jel ve plazma püskürtme gibi çeşitli oksit kaplama teknikleri kullanılmaktadır. Son yıllarda ise mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi, geleneksel kaplama tekniklerine kıyasla sağladığı avantajlar sayesinde ön plana çıkmış ve yüzey iyileştirme uygulamalarında etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Zhu and Li, 2024; Wang vd., 2024; Gamba vd., 2025).

Mikro ark oksidasyon (MAO) prosesi, hafif metal ve alaşımlar üzerinde uygulanabilen ileri düzey bir yüzey modifikasyon tekniği olarak tanımlanabilir. Yöntem, taban malzemenin yüzeyinde kalın ve homojen bir oksit tabakasının oluşmasını sağlayan elektrokimyasal bir süreç üzerine inşa edilmiştir. İşlem, genellikle

seyreltik alkali veya silikat bazlı elektrolitler içinde, yüksek voltaj (200–1000 V) ve kısa süreli darbe akımlarının uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu parametrelerin kontrolü, kaplama kalınlığı, mikrosertlik ve yüzey morfolojisi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Li vd., 2023; Wang vd., 2024; Gamba vd., 2025; Sukuroglu 2025).

MAO ile üretilen oksit tabakalar, yüksek sertlik (200–1200 HV), üstün aşınma direnci ve korozyon dayanımı ile karakterizedir. Tabakaların taban malzemeye sağladığı güçlü adezyon, kaplamaların mekanik bütünlüğünü uzun süre korumasını sağlar. Literatürde, alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımları üzerinde uygulanan MAO kaplamalarının tribolojik ve korozyon performansının, geleneksel anodizasyon veya plazma püskürtme yöntemlerine kıyasla anlamlı şekilde arttığı bildirilmiştir (Wang et al. 2024; Chi vd., 2025; Gamba vd., 2025).

Prosesin bir diğer avantajı, karmaşık geometrilere sahip numunelerde bile tüm yüzeylerin eşit kalınlık ve özelliklerde kaplanabilmesidir. Bu, yalnızca belirli bölgeleri hedef alan kaplama yöntemlerine kıyasla MAO' ya belirgin bir üstünlük kazandırmaktadır. Ayrıca, kullanılan elektrolitlerin düşük toksisiteye sahip olması ve prosesin çevresel etkisinin minimal düzeyde olması, yöntemin hem laboratuvar hem de endüstriyel uygulamalarda güvenli bir seçenek olmasını sağlamaktadır. Kaplama öncesi hazırlık süreçlerinin basitliği ve işlem süresinin kısa olması, üretim verimliliğini artıran diğer faktörlerdir (Wang vd., 2024; Gamba vd., 2025).

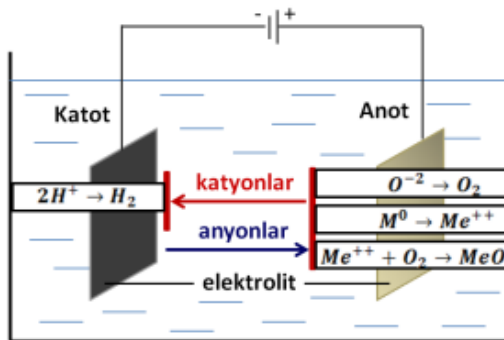


Şekil 9. Mikro ark oksidasyon (MAO) ünitesinin şematik görünümü (Sukuroglu, 2025)

Şekil 9' da mikro ark oksidasyon (MAO) ünitesinin şematik görünümü gösterilmektedir. Bu sistemde, metal yüzeyi atmosfer koşullarında kararlı bir oksit

tabakası oluşturacak şekilde hazırlanır ve güç kaynağına anot olarak bağlanır. Devreyi tamamlayan katot görevi, genellikle paslanmaz çelikten imal edilmiş elektrolit tankı tarafından sağlanır. Elektrolit çözeltisinin homojenliği, sistemde kullanılan karıştırıcı ile temin edilir. Plazma etkisi sırasında meydana gelen ısının kontrolü için bir soğutma ünitesi kullanılır; bu sayede elektrolit sıcaklığı optimal seviyede tutulur ve işlem sırasında sistem stabil kalır. Elektrolitin etkin biçimde soğutulması, uzun süreli ve güvenli operasyon açısından kritik bir öneme sahiptir.

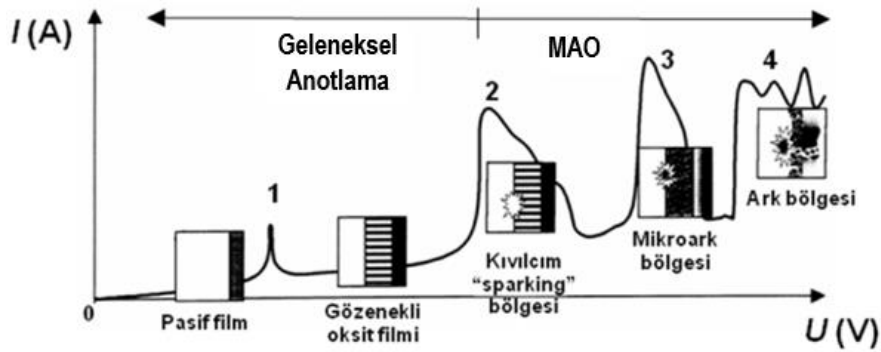
MAO sürecinin oluşum mekanizması incelendiğinde, işlemin temel olarak iki aşamadan meydana geldiği görülmektedir. İlk aşamada, sıvı elektrolit içerisinde iş parçası ile karşı elektrot arasında uygulanan potansiyel farkı, elektrolitik reaksiyonları başlatır. İkinci aşama ise iş parçası yüzeyi civarında meydana gelen elektriksel deşarjlarla karakterizedir (Sukuroglu, 2025). Uygulanan gerilim, belirli bir kritik eşik değerini aşarsa, bu deşarjlar metal-elektrolit ara yüzeyinde ortaya çıkar. Elektrolit çözeltisine batırılan iki elektrot arasında oluşan potansiyel fark, çözeltideki pozitif iyonları elektrik alan yönünde, negatif iyonları ise ters yönde hareket ettirir. Bu süreç sonucunda, gaz fazında serbest kalan oksijen anodik yüzeyde metal oksidasyonunu başlatır (Şekil 10). Elektrolitin kimyasal özellikleri, yüzeyde çözünmeler veya oksit film tabakalarının oluşumunu etkilerken, serbest kalan hidrojen gazı ve katyonların redüksiyonu katodik yüzeyde gözlemlenir. Elektrolit ve elektrot kombinasyonları ile uygulanan polarizasyon parametrelerine bağlı olarak, iş parçalarının etrafında çözeltide sürekli ve homojen bir parıltı oluşur. Bu parıltı, zamanla kısa süreli mikro deşarjlara dönüşerek, MAO kaplamasının taban malzeme yüzeyinde büyümesini ve oksit tabaka oluşumunu sağlar.



Şekil 10. MAO sistemi elektroliz prosesi (Demirci, 2014)

Şekil 11' de belirtilen akım-voltaj eğrisi, MAO prosesi sırasında oksit film tabakasının oluşum evrelerini detaylı olarak göstermektedir. İşlem başlangıcında (1

noktası), metal yüzeyinde önceden var olan pasif oksit tabakası çözülmeye başlar ve yüzey enerjisi, elektrolit içerisindeki iyonlarla etkileşime girer. 1-2 aralığında, gözenekli yapıya sahip yeni oksit tabakası oluşur; bu evrede pozitif iyonlar anod yüzeye doğru hareket ederken, negatif iyonlar katodik bölgede birikir. 2 noktasında, oksit film içindeki elektrik alan yoğunluğu kritik değere ulaşır ve film tabakasında lokal bozulmalar meydana gelir. Bu durum, küçük ve parlak mikro kıvılcımların oluşmasına neden olur. 3 noktasında, ısı iyonizasyonu etkisiyle daha büyük ve yavaş parlayan kıvılcımlar ortaya çıkar. 3-4 aralığında, negatif yük birikimi ısı iyonizasyonu kısmen sınırlandırır ve boşalmaların gecikmesine yol açar; bu mekanizma mikro arkların sürekliliğini ve enerji dağılımını belirler. Mikro arkların etkisiyle, oksit tabakası kademeli olarak erir ve elektrolit içerisindeki elementlerle alaşımlanır. 4 noktasının ötesinde ise mikro ark boşalmaları metal yüzeyine kadar nüfuz eder ve yoğun enerji transferi ile güçlü kıvılcımlar meydana gelir. Bu süreç, tabaka kalınlığı, gözeneklilik ve film homojenliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Yerokhin vd., 1999; Yao vd., 2022; Li vd., 2023; Chi vd., 2025). Bunun sonucunda elektriksel, iyonik ve ısı etkileşimlerinin kombinasyonu sayesinde yüzeyde yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci sağlayan bir oksit tabakası oluşturulmuş olur.

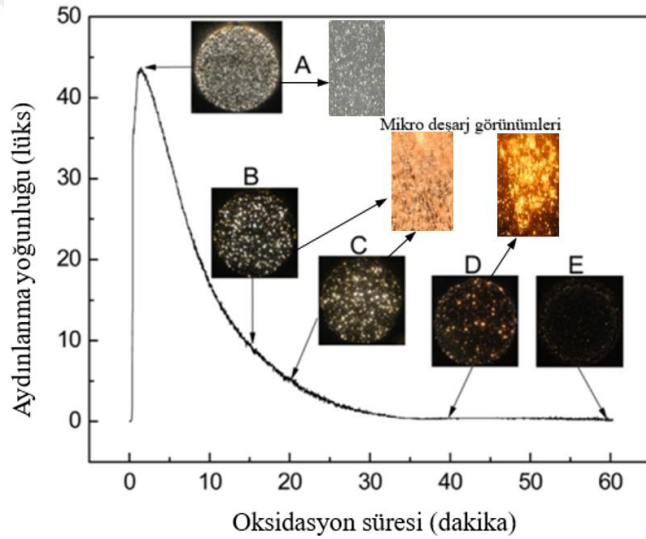


Şekil 11. MAO prosesi akım-voltaj değişim eğrisi (Yerokhin vd., 1999; Tekin vd., 2008)

MAO işleminde, uygun elektrolit seçimi ve akım yoğunluğunun belirlenmesinin ardından, kaplama taban metal yüzeyinde oluşmaya başlar. Başlangıçta voltaj hızlı bir şekilde yükselir, ancak kaplamanın ilerlemesiyle birlikte voltaj artış hızı azalır ve belirli bir kritik seviyede sabitlenir. Kritik voltaj, elektrot yüzeyinde meydana gelen mikro ark boşalmalarının yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve metal-elektrolit kombinasyonuna göre farklılık gösterir (Chi vd., 2025; Li, 2023). Tablo 6' da MAO prosesi sırasında gözlemlenen voltaj evreleri ve mikro ark tipleri, Şekil 12 de ise oksidasyon süresine bağlı olarak arkların aydınlanma yoğunluğu verilmiştir.

Tablo 6. MAO prosesi sırasında gözlemlenen voltaj evreleri ve mikro ark tipleri

Evre	Voltaj Noktası	Ark Şekli	Açıklama
Başlangıç	A	Homojen beyaz ışık halkası	Elektrot çevresinde sabit ışık, film tabakası oluşumunun ilk aşaması
Orta	B-C	Parçalı sarı kıvılcımlar	Beyaz ışık hızlı hareket eden, küçük ve parçalı kıvılcımlara dönüşür; mikro arklar aktif hale gelir
Son	D-E	Kırmızı renkli arklar	Mikro arklar yüzeyde yavaş ve yoğun enerji transferi ile hareket eder; film tabakasının kalınlaşması ve alaşımlanması gerçekleşir

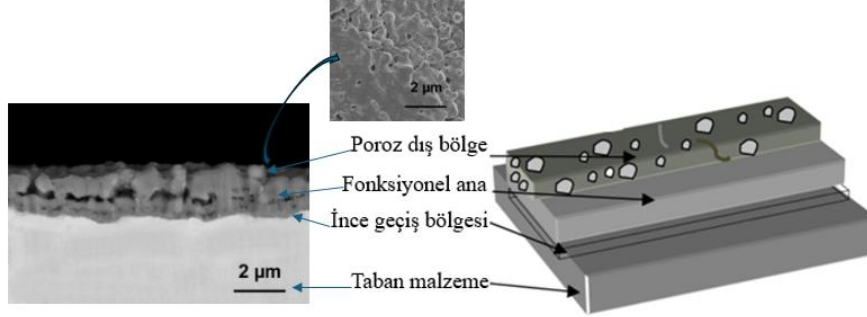


Şekil 12. MAO prosesinde oksidasyon süresine bağlı olarak arkların aydınlanma yoğunluğu (Li vd., 2023; Gamba vd., 2025)

Şekil 12’de görüldüğü gibi, mikro arkların renk değişimi ve hareket hızı, kaplama sırasında enerji dağılımını ve oksit tabaka oluşumunu göstermektedir. Bu evreler, MAO prosesi sırasında oksit filminin homojenliğini, gözenekliliğini ve sertliğini belirleyen kritik faktörlerdir. Mikro arkların sürekliliği ve yoğunluğu, tabaka kalınlığı ve yüzey özelliklerinin kontrolünde belirleyici rol oynamaktadır (Yao vd., 2022; Li vd., 2023; Gamba vd., 2025). Sonuç olarak, voltaj-akım eğrisi ve mikro ark evrelerinin analizi, MAO prosesi sırasında optimal parametrelerin belirlenmesi ve kaplama kalitesinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Şekil 13’ten de görüldüğü gibi MAO işlemi sonucunda taban malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakası Poroz dış bölge, Fonksiyonel ana bölge ve İnce geçiş bölgesi

olmak üzere üç farklı bölgeden meydana gelmektedir (Yerokhin vd., 1999; Demirci, 2014). Şekil 13 de MAO kaplanmış numunelerin yüzeyinde oluşan oksit tabakasına ait şematik görünüşler verilmiştir.



Şekil 13. MAO kaplanmış numunelere ait örnek yüzey ve kesit SEM görüntüsü

Poroz dış bölge: Bu tabaka, düşük sıcaklıklarda gerçekleşen reaksiyon ürünlerinden oluşmakta olup, elektriksel boşalımların büyük çoğunluğu bu bölgede meydana gelir. Bu nedenle oldukça poroz ve gevrek bir yapı sergiler. Sertliği iç kısımlara göre düşüktür ve yüzeyden zımparalama veya parlatma işlemleriyle kolaylıkla ayrılabilir.

Fonksiyonel ana bölge: Poroz tabakanın hemen altında yer alır ve toplam kaplama kalınlığının büyük bölümünü oluşturur. Kristalin yapıdadır ve düşük poroziteye sahiptir. Kaplamanın mekanik, kimyasal ve tribolojik özelliklerini belirleyen ana kısım bu bölgedir. Bu bölgenin yoğunluğu ve sertliği oldukça yüksektir.

İnce geçiş bölgesi: Fonksiyonel ana bölgenin altında, taban metal ile kaplama arasında yer alan ince bir tabakadır. Bu bölge genellikle amorf yapıya sahiptir ve kaplamanın taban metale bağlanmasını sağlar.

Bu üç tabakalı yapı, MAO kaplamalarının karakteristik bir özelliğidir ve kaplamanın performansı büyük ölçüde fonksiyonel ana bölgenin yoğunluğu ve bütünlüğü belirlemektedir. Poroz dış tabaka estetik ve yüzey özellikleri açısından belirleyici olurken, ince geçiş bölgesi ise taban metal ile güçlü bir yapışma sağlamaktadır.

MAO kaplamalarda tabakaların yapısı ve özellikleri, kaplama sürecinde kullanılan işlem parametrelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Elektrolit bileşimi, uygulanan voltaj, akım yoğunluğu, frekans ve işlem süresi gibi faktörler, kaplamanın nihai fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen temel unsurlar arasında yer alır. Bu parametreler arasında özellikle elektrolit bileşimi, kaplamanın fiziksel özelliklerini

doğrudan etkileyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Elektrolitin pH seviyesi, kaplamanın porozitesini, bileşim dağılımını ve korozyon direncini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Kaplama işlemlerinde genellikle alümina, silikat, fosfat ve hidroksit bazlı bileşenler tercih edilmektedir. Tablo 7’ de farklı elektrolit tiplerinin MAO kaplamalar üzerindeki başlıca etkileri verilmiştir.

Tablo 7. MAO kaplamalarda farklı elektrolit tipinin başlıca etkileri

Elektrolit Tipi	Kaplama Özelliğine Etkisi
Alümina bazlı	Sertliği ve aşınma direncini artırır; yoğun ve homojen tabaka oluşumunu sağlar.
Silikat bazlı	Korozyon direncini geliştirir; poroziteyi azaltır.
Fosfat bazlı	Biyouyumluluğu artırır; implant uygulamalarında kemik-implant bağına güçlendirir.
Hidroksit bazlı	Kaplama kalınlığını artırır; yüzeyde daha yoğun oksit tabakası oluşumunu hızlandırır.

Akım–voltaj davranışları, MAO kaplamalarının mikro yapısını ve performansını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Uygulanan akım yoğunluğu ile voltaj değerlerinin doğru biçimde seçilmesi, kaplamanın yoğunluğu, homojenliği ve genel kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu parametrelerin optimum düzeyde ayarlanması, düşük gözeneklilik oranına sahip, uzun süreli kullanımda dayanıklılığını koruyan ve yüksek performans gösteren kaplamaların elde edilmesine olanak tanır (Yerokhin vd., 2003; Friedrich & Mordike, 2006).

MAO kaplamalarda yapısal özellikler arasında en dikkat çekici olanlardan biri de gözeneklilik düzeyidir. Kaplama süresince ortaya çıkan gözeneklerin yoğunluğu ve boyut dağılımı; elektrolit bileşimi, işlem süresi, uygulanan voltaj ve akım yoğunluğu, gibi işlem değişkenleri ile elektrolit içerisine ilave edilen partiküllere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Darbant et al. 2017; Fattah-Alhosseini vd., 2020; Gamba vd., 2025). Özellikle yüksek voltaj değerleri ve uzun süreli işlemler, kaplama yüzeyinde daha yoğun ve geniş çaplı gözeneklerin oluşmasına yol açmaktadır. Gözeneklerin morfolojisi ve dağılımı, kaplamanın mekanik özelliklerini, aşınma davranışını ve korozyon direncini doğrudan etkilemektedir (Darbant et al. 2017; Fattah-Alhosseini vd., 2020; Gamba vd., 2025; Niedźwiedź, vd., 2025). Düşük poroziteye sahip kaplamalar genellikle yüksek dayanım ve korozyon direnci gösterirken, daha gözenekli yapılar bazı özel uygulamalarda (örneğin yağ tutma kapasitesinin artırılması veya infiltrasyon

işlemlerinde) avantaj sağlayabilmektedir. Bu nedenle, MAO kaplamalarda gözeneklilik düzeyinin kontrolü, hedeflenen uygulamaya uygun fonksiyonel özelliklerin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Darbant et al. 2017; Fattah-Alhosseini vd., 2020).

MAO işleminde temel elektrolitik çözelti içerisinde kullanılan fosfat, alüminat ve silikat içerikli katkı maddeleri taban malzemeye istenilen özelliklerde mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri kazandırmada yeterli olamayabilmektedir. Bu nedenle taban malzemeden istenilen özellikleri elde edebilmek, kullanım alanlarını geliştirebilmek için kaplama elektrolitine farklı türde katkı maddesi eklenmesi ihtiyacı doğmuştur (Zhang vd., 2013; Wu vd., 2014; Fattah-Alhosseini vd., 2020; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024). İlave edilen katkı maddeleri kullanım amacına göre farklı özelliklerde olabilmektedir. Tablo 8’ de MAO işleminde elektrolitik çözelti içerisine ilave edilen katkı maddelerine örnekler ve etkileri verilmiştir.

Tablo 8. MAO elektrolitik çözeltisine ilave edilen örnek katkı partikülleri ve başlıca etkileri (Fattah-Alhosseini vd., 2020; Qi vd., 2023; Zuo vd., 2024)

Partikül Tipi	Kaplama Özelliğine Etkisi
B ₄ C	Sertlik ve aşınma direncinde belirgin artış sağlar; ayrıca kaplama kalınlığını artırıcı etki gösterir.
h-BN	Katı yağlayıcı özellik kazandırır; sürtünme katsayısını düşürür, tribolojik performansı iyileştirir.
Sodyum Pentaborat	Bor elementinin difüzyonunu kolaylaştırarak kaplamanın homojenliğini artırır; korozyon direncini iyileştirir.
TiO ₂	Fotokatalitik özellik kazandırır; korozyon direncini ve biyouyumluluğu artırır.
ZnO	Antibakteriyel özellik sağlar; biyomedikal uygulamalarda enfeksiyon riskini azaltır, ayrıca korozyon direncini artırır.

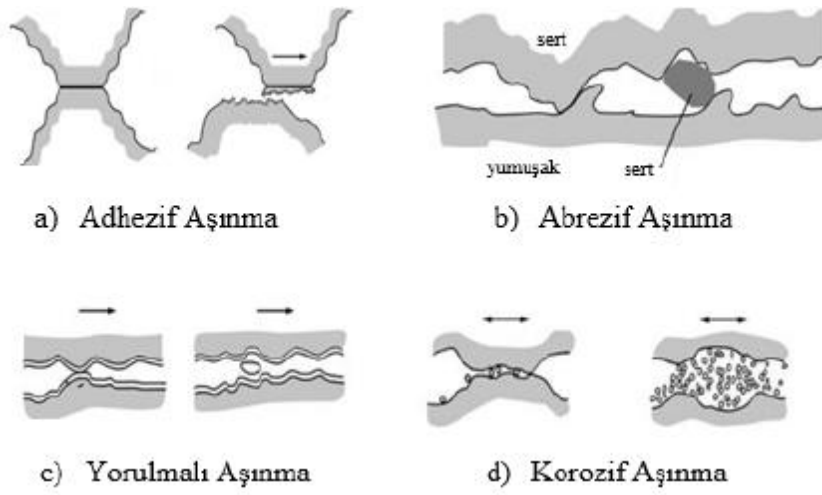
MAO kaplamalar, sahip oldukları yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci ile hafif metallerin mühendislik uygulamalarındaki kullanım potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır. Geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla daha çevreci ve düşük maliyetli bir alternatif sunmasının yanı sıra, karmaşık geometrilere sahip yüzeylerde dahi homojen ve güçlü adezyona sahip tabakalar oluşturabilmesi bu tekniğin öne çıkan avantajları arasındadır. Ayrıca, işlem sırasında toksik olmayan ve seyreltik elektrolit çözeltilerinin kullanılabilmesi, hem endüstriyel ölçekte güvenli uygulamaları mümkün

kılmakta hem de sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu özellikleriyle MAO prosesi, hafif alaşımların performansını iyileştirmede yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel açıdan da güçlü bir seçenek olmaktadır.

2.4 Aşınma Mekanizması

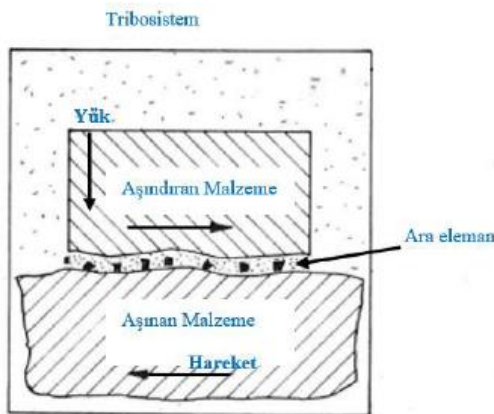
Aşınma kaynaklı hasar, endüstriyel sistemlerin performansını ve verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir mühendislik problemidir. Yüksek sıcaklık, sürtünme, kimyasal reaksiyonlar ve darbe gibi zorlayıcı çalışma koşullarında yüzeyde meydana gelen malzeme kayıpları, üretim süreçlerinde ciddi verimlilik kayıplarına, bakım maliyetlerinin artmasına ve ekipman ömrünün kısalmasına neden olur. Bu durum özellikle metal işleme, madencilik, otomotiv, havacılık ve enerji endüstrilerinde kritik önem taşır. Söz konusu sektörlerde, aşınma direncini artıran gelişmiş malzemelerin ve yüzey kaplama teknolojilerinin kullanımı hem operasyonel güvenliğin sağlanması hem de ekonomik sürdürülebilirliğin korunması açısından vazgeçilmezdir. Bu nedenle uygun malzeme seçimi, yüzey mühendisliği uygulamaları ve yenilikçi kaplama yöntemlerinin entegrasyonu, aşınma kaynaklı hasarların minimize edilmesinde etkili bir strateji sunmaktadır (Kato and Adachi, 2000; Stachowiak, 2006).

Aşınma, temas halindeki yüzeylerin relatif hareketi sonucunda malzeme yüzeyinde meydana gelen kademeli bozulma ve malzeme kaybı olarak tanımlanır. Bu olgu, endüstriyel ekipmanlardan makine parçalarına, taşıma sistemlerinden üretim hatlarına kadar birçok alanda karşılaşılan yaygın bir yüzey hasarı mekanizmasıdır. Aşınma süreci, esasen sürtünme kuvvetleri ile yüzeyler arasındaki mekanik etkileşimlerin bir sonucudur. Yüzeylerin birbirine temas etmesi ve hareket etmesi sırasında oluşan sürtünme, enerjinin yüzeylere aktarılmasına neden olur; bu enerji birikimi, yüzeyden malzeme parçacıklarının kopmasına ve zamanla yüzeyin aşamalı olarak yıpranmasına yol açar. Farklı mekanizmalara göre sınıflandırılan başlıca aşınma türleri Şekil 14' de gösterilmektedir.



Şekil 14. Aşınma türleri

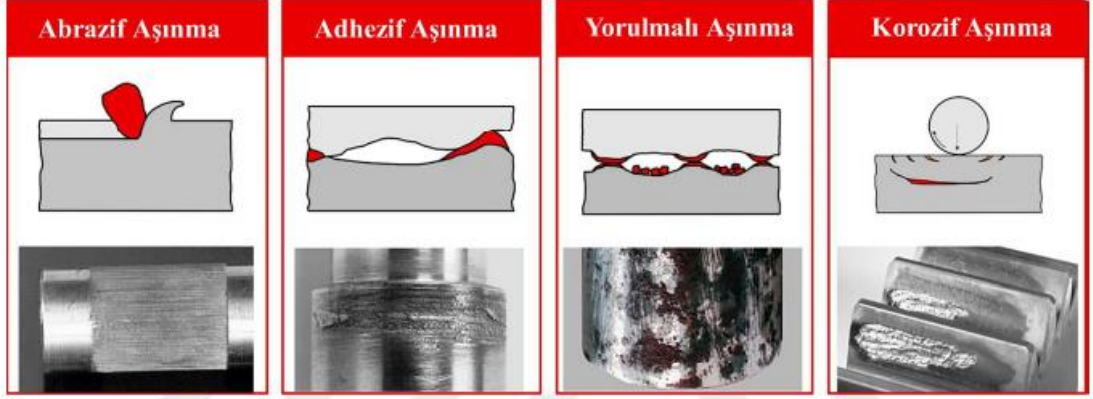
Bir malzeme yüzeyinde gerçekleşen deformasyon aşınma olarak nitelendirilemez. Şekil 15’ de gösterildiği gibi, aşınma mekanizmasının ortaya çıkabilmesi için belirli temel koşulların sağlanması gerekir. Bu mekanizma genel olarak beş ana parametreye dayanır: temas halindeki aşınan ve aşındırıcı yüzeyler, bu yüzeyler arasında yer alan ve mekanik etkilerle ya da yüzeyden kopan parçacıklar sonucu oluşan ara elemanlar, uygulanan yük ve yüzeyler arasındaki göreceli hareket. Ara elemanlar; katı, sıvı, gaz ya da bunların karışımı formunda bulunabilir ve çoğu durumda aşınma hızını artırıcı etki gösterir. Buna ek olarak sıcaklık, aşınma sürecini doğrudan etkileyen tamamlayıcı bir parametre olarak beş temel etmenin dışında altıncı faktör olarak da değerlendirilmektedir (Silva vd., 2011; Şimşek vd., 2020).



Şekil 15. Tribolojik sistem

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört ana kategori altında değerlendirilmektedir. Bunlar, adeziv (yapışma) aşınma, abrazif (çizilme) aşınma,

yorulma kaynaklı aşınma ve korozyon aşınmadır. Bu sınıflandırma, yüzeyde meydana gelen malzeme kaybının nedenine ve gerçekleşme biçimine dayanmaktadır. Söz konusu aşınma türlerine ilişkin örnek görseller Şekil 16’ de sunulmaktadır.



Şekil 16. Aşın mekanizmaları ve hasar görüntüleri (URL-7, 2025)

Adhezyon (yapışma) aşınma: Mühendislik uygulamalarında en sık karşılaşılan aşınma türlerinden biridir. Gerçekte en düzgün görünen yüzeyler bile mikroskobik ölçekte pürüzlülükler içerir. Temas halindeki bu mikro tepecikler, oldukça düşük yük seviyelerinde dahi plastik deformasyona uğrayarak aralarında mikro kaynak bağları (soğuk kaynaklanma) oluşturur. Adhezyon aşınma, bu mikro kaynak noktalarının bağlı hareket, yük veya titreşim etkisiyle kopması sonucunda ortaya çıkar. Kopma olayı sırasında yumuşak malzemeden sert yüzeye malzeme transferi gerçekleşir; bunun sonucu olarak yumuşak yüzeyde çukurlar, sert yüzeyde ise çıkıntılar meydana gelir (Bruce, 2012; Shizhu & Ping, 2012; Devlin, 2022).

Bu aşınma türü, özellikle yüksek yük altında çalışan makine parçalarında önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 16’ da görüldüğü üzere, temas eden yüzeylerdeki mikro ölçekteki yapışmalar, hareket sırasında koparak malzeme kaybına neden olmaktadır. Yüksek basınç ve kayma hareketi, yüzey mikro çıkıntılarının birbirine geçici bağlarla tutunmasına yol açar. Bu bağlar, hareketin devamında kırılarak yüzeyde malzeme transferine ve yırtılma izlerine neden olur. Sonuç olarak temas yüzeyinin pürüzlülüğü artar ve sistem performansı düşer. Bu süreç genellikle yetersiz yağlama, yüksek sürtünme katsayısı veya sıcaklık artışıyla hızlanır. Adhezyon aşınmanın önlenmesi için uygun yağlama koşullarının sağlanması, yüzey sertleştirme veya kaplama yöntemlerinin uygulanması ve doğru malzeme çiftlerinin seçilmesi kritik öneme sahiptir (Stachowiak and Batchelor, 2014; Hutchings and Shipway, 2017).

Abrazif (çizilme) aşınma: Adezif aşınmaya kıyasla daha seyrek gözlenen ilerleme hızı yüksek olduğundan oldukça yıkıcı sonuçlar doğurabilen bir aşınma türüdür. Şekil 16’ da gösterildiği üzere bu mekanizma, birbirine göre hareket eden iki yüzey arasına sert yapıları partiküllerin girmesi ve bu partiküllerin yumuşak olan yüzeyi çizmesi, kesmesi veya malzeme koparması sonucunda gerçekleşir. Sert partiküller, dış ortamdan mekanik yollarla sisteme girebileceği gibi, temas yüzeylerinden kopan malzeme parçalarının uzaklaştırılmaması nedeniyle de oluşabilir. Bu partiküller, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle yumuşak yüzeye gömülür ve tıpkı bir zımpara gibi yüzeyi aşındırarak malzeme kaybına yol açar. Böylece abrazif aşınma süreci tamamlanmış olur (Bruce, 2012; Shizhu and Ping, 2012; Lofaj and Mikula, 2021; Devlin, 2022). Abrazif aşınmanın şiddeti ve ilerleme hızı; temas eden yüzeylerin mikro yapısal özelliklerine, arada bulunan aşındırıcı partiküllerin türü ve sertliğine, yüzeyler arasındaki bağıl hareket hızına ve çalışma ortamının koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterir. Bu parametrelerdeki küçük farklılıklar bile aşınma mekanizmasının karakterini değiştirebilir ve malzeme kaybının hızını belirleyebilir.

Endüstriyel uygulamalarda abrazif aşınma, özellikle madencilik, tarım makineleri, inşaat ekipmanları ve aşındırıcı ortamlarda çalışan sistemlerde yaygın biçimde görülmektedir. Relatif hareket sırasında kum, toz veya çakıl gibi sert partiküller yüzeye temas ederek malzeme kaybına neden olmaktadır. Abrazif aşınma, etki mekanizmasına bağlı olarak farklı biçimlerde ortaya çıkabilmektedir. Bu mekanizmalardan ilki iki gövdeli abrazif aşınmadır. Bu tür aşınmada, iki yüzey doğrudan temas halindedir ve sert yüzeyin pürüz tepeleri, yumuşak yüzey üzerinde çizik veya oluk şeklinde deformasyonlara yol açar. Genellikle düşük gerilme koşullarında gerçekleşen bu süreçte, malzeme yüzeyinde sürekli bir kazıma etkisi oluşur. Üç gövdeli abrazif aşınma, sistem dışından gelen veya temas yüzeylerinden kopan sert partiküllerin iki yüzey arasında sıkışarak deformasyona neden olmasıyla meydana gelmektedir. Bu partiküller, her iki yüzeyi de etkileyerek malzeme kaybını hızlandırır. Bir diğer form olan darbe (impact) aşınması, aşındırıcı partiküllerin yüzeye dik yönde çarpması sonucu oluşur. Bu durumda yüzeyde tekrarlayan darbelerle lokal deformasyonlar ve çukurlaşmalar meydana gelmektedir. Son olarak, literatürde bazen yeniden iki gövdeli mekanizmanın bir varyasyonu olarak da değerlendirilen yüzey boyunca kayan partikül aşınması formu bulunmaktadır. Bu mekanizmada aşındırıcı partikül, yumuşak yüzey üzerinde hareket ederek çizme, oyma veya kesme etkisiyle yüzeyde kalıcı deformasyon oluşturmaktadır (Shizhu and Ping, 2012; Bruce, 2012; Lofaj and Mikula, 2021; Devlin, 2022).

Yorulmalı aşınma: Temas halindeki iki parça üzerinde tekrarlayan değişken dinamik yüklerin etkisiyle yüzeylerde mikro çatlaklar oluşması ve/veya malzeme kopması sonucunda çukurlaşmaların meydana gelmesiyle tanımlanır. Bu aşınma türünde yüzey pürüzlülüğü kritik bir rol oynar; temas noktalarındaki mikro tepecikler, tekrarlayan yükler altında çatlak oluşumuna zemin hazırlar ve zamanla bu çatlakların ilerlemesi yüzeyden parça kopmalarına veya kırılmalara yol açar. Genellikle elastik deformasyon bölgesinde gerçekleştiği için, yorulmalı aşınma süreci görece yavaş ilerler (Bruce, 2012; Shizhu and Ping, 2012; Lofaj and Mikula, 2021). Mekanik sistemlerde görülmesi neredeyse kaçınılmazdır ve önlenmesi için temas yüzeyleri arasında etkili bir yağ tabakasının oluşturulması gerekmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda, yorulmalı aşınma özellikle rulmanlar, dişliler, raylar ve dönen ya da kayma hareketine maruz kalan diğer makine parçalarında yaygın bir şekilde görülmektedir. Şekil 16' da görüldüğü gibi, tekrarlayan mekanik gerilimler veya döngüsel yüklemeler yüzeyde mikro çatlakların oluşmasına ve ilerleyen süreçte malzeme kaybına neden olmaktadır. Sürekli basınç, kayma gerilimi veya tekrarlayan yükler altında oluşan çatlaklar zamanla birleşerek daha büyük kırılmalara yol açabilmektedir. Yorulmalı aşınmayı azaltmak veya geciktirmek için; yüzey sertleştirme yöntemleri (indüksiyon sertleştirme, nitrürleme), uygun malzeme seçimi ve ısı işlemler, etkin yağlama, yüzey pürüzlülüğünü azaltan kaplamalar ve aşırı yük ile titreşimlerin kontrolü gibi önlemler uygulanabilir. Bu stratejiler, ekipman arızalarını önleyerek makine bileşenlerinin ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır (Stachowiak and Batchelor, 2014; Hutchings and Shipway, 2017; Lofaj and Mikula, 2021; Devlin, 2022).

Korozif aşınma: kimyasal veya elektrokimyasal tepkimelerin mekanik aşınma ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan karmaşık bir yüzey bozulma mekanizmasıdır. Şekil 16' da görüldüğü üzere, bu tür aşınma genellikle agresif çevresel koşullarında, yüksek nem, asidik veya bazik ortamlarda, tuzlu su ve yüksek sıcaklığın bulunduğu ortamlarda metal yüzeylerin korozyona uğramasıyla başlar. Ortaya çıkan korozyon ürünleri (örneğin oksit tabakaları), sürtünme veya mekanik yüklemeye etkisiyle yüzeyden uzaklaşır ve altındaki taze metal tekrar korozyona maruz kalır. Bu döngü, malzeme kaybını hızlandırarak ekipman ömrünü ciddi ölçüde kısaltmaktadır (Stachowiak and Batchelor, 2014).

Korozif aşınma özellikle denizcilik, kimya endüstrisi, enerji santralleri ve otomotiv sektöründe sık görülür. Yüksek sıcaklığa maruz kalan motor parçaları, su buharı içeren sistemler ve kimyasal tesis boruları bu tür aşınmaya karşı hassastır. Korozif aşınmayı azaltmak için korozyona dayanıklı malzemelerin seçilmesi (paslanmaz çelik, titanyum, nikel alaşımları), koruyucu kaplamaların uygulanması

(PVD, CVD, anodizasyon, seramik kaplamalar), etkin yağlama ve kapalı sistemler ile çevresel etkileşimin sınırlandırılması, katodik koruma (örneğin çinko anotlar) ve pH ile inhibitör kontrolü gibi önlemler uygulanabilmektedir. Bu yaklaşımlar hem korozyon hem de mekanik aşınmayı kontrol altına alarak ekipman ve yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır (Sukuroglu, 2018; Nadimi vd., 2022; Wu vd., 2023; Sukuroglu, 2025).

Korozif aşınma aynı zamanda, birbirine temas eden metal yüzeylerin çevresel koşullara bağlı olarak kimyasal veya elektrokimyasal tepkimelere girmesiyle de tanımlanabilir. Atmosferdeki oksijen, metal yüzeylerde tribo-kimyasal reaksiyonlar oluşturarak oksidatif aşınmaya neden olur. Yüzeyde oluşan oksit tabakası başlangıçta sürtünme ve korozyon hızını yavaşlatır; ancak hareketin devam etmesiyle bu tabaka kırılır ve ortaya çıkan oksit parçacıkları, mekanik aşınma sürecini hızlandırır. Böylece korozif aşınma hem mekanik hem de oksidasyon kaynaklı aşınmanın birleşimi olarak değerlendirilir. Ayrıca tuz, alkali veya asit içeren ortamlarda metalik malzeme çiftlerinin reaksiyona girmesi sonucu da korozif aşınma meydana gelebilmektedir. Bu durumda oluşan aşınma, saf oksidasyon aşınmasına benzer farkı ise izlerin daha derin olması ve malzeme kaybının daha yüksek seviyelerde gerçekleşmesidir (Bruce, 2012; Shizhu and Ping, 2012).

Aşınmanın meydana gelmesi, kullanılan malzeme, makine ve ekipmanların performansında azalmaya, servis ömürlerinin kısalmasına ve bakım-onarım maliyetlerinde artışa yol açmaktadır. Bu sebeple, aşınmadan kaynaklanan yüzey hasarlarının oluşumunu engellemek ve malzemelerin aşınma dayanımını iyileştirmek amacıyla yürütülen araştırmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Aşınmanın zararlı etkilerini azaltabilmek için uygun malzeme seçimi, tasarımın optimize edilmesi, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve etkili yağlama yöntemlerinin uygulanması temel mühendislik yaklaşımları arasında yer almaktadır.

Malzeme Seçimi: Aşınma direncini artırmak için yüksek sertlik ve tokluk özelliklerine sahip malzemelerin kullanılması büyük önem taşır. Seramik esaslı malzemeler, karbürler, sert metal alaşımları ve yüzeyi sertleştirilmiş çelikler; temas ve sürtünme koşullarında yüzey bozulmalarına karşı daha üstün performans gösterir.

Tasarımın İyileştirilmesi: Parçaların geometrik biçimlerinin ve yüzey pürüzlülüklerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, aşınma yükünü azaltır. Özellikle temas alanının artırılması ve yükün yüzey boyunca homojen dağıtılması, belirli noktalarda gerilme birikimini önleyerek yüzey hasarını geciktirir.

Yüzey Mühendisliği Uygulamaları: Yüzey sertleştirme işlemleri (örneğin, nitrüleme, karbürleme, iyon implantasyonu) ve ince film kaplama teknikleri (PVD, CVD, anodizasyon, mikro ark okidasyon vb.) yüzeyin mekanik mukavemetini ve kimyasal kararlılığını artırır. Bu işlemler, yüzeyde koruyucu bir bariyer oluşturarak hem aşınma hem de korozyon süreçlerini yavaşlatır.

Yağlama Teknikleri: Yağlayıcılar, sürtünme katsayısını düşürerek yüzeyler arasındaki doğrudan teması engeller. Katı yağlayıcılar (örneğin, MoS₂, h-BN, ZnO vb.) ve sıvı yağlayıcılar, ince bir film tabakası oluşturarak malzeme kaybını azaltır ve enerji verimliliğini artırır.

Bu önlemlerin bütüncül olarak uygulanması, özellikle makine parçaları, taşıt sistemleri ve endüstriyel donanımların servis ömrünü uzatmakta; aynı zamanda bakım maliyetlerini düşürerek operasyonel güvenilirliği artırmaktadır (Stachowiak and Batchelor, 2014).

2.5. Aşınma Test Yöntemleri

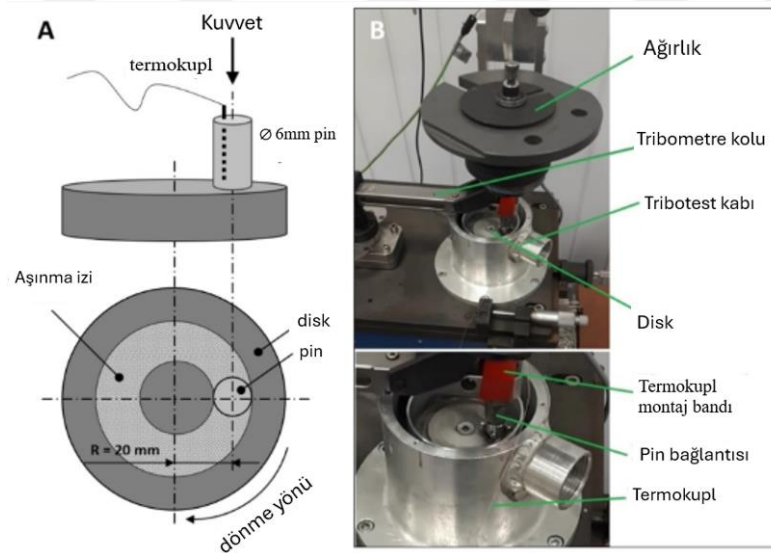
Aşınma testleri, malzemelerin sürtünme davranışlarını ve aşınma direncini deneysel olarak ölçmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu deneyler, farklı aşınma mekanizmalarını taklit ederek malzemenin performansını objektif olarak ortaya koyar ve doğru malzeme seçimi ile tasarım kararlarını destekler.

Sık tercih edilen test yöntemleri arasında Pin-on-Disk (Pim-Disk), Taber Aşınma, Blok-on-Ring (Blok-Halka), Ball-on-Flat (Bilya-Düzlem), Erichsen Aşınma, Kavitatif Aşınma ve Dry Sand-Rubber Wheel (Kuru Kum-Kauçuk Tekerlek) bulunmaktadır. Her yöntem, belirli çalışma koşullarını ve aşınma tiplerini simüle ederek malzemenin farklı senaryolardaki dayanıklılığını ölçmeye olanak sağlar. Bu testler, otomotiv, havacılık, madencilik ve genel makine mühendisliği alanlarında, malzemelerin aşınmaya karşı performansını belirlemede ve yeni, dayanıklı malzemelerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Aynı zamanda tasarım sürecinde güvenilir veriler sunarak ekipmanların ömrünü uzatma ve bakım maliyetlerini azaltma konusunda önemli katkı sağlar.

2.5.1. Pin-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi)

Pin-on-Disk testi, malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir tribolojik deney yöntemidir. Bu testte, belirli bir normal yük altında bulunan bilye veya silindirik uçlu bir pin, sabit bir hızla dönen disk yüzeyine temas ettirilir. Temas sırasında bilye ile disk arasındaki sürtünme kuvveti ve aşınma davranışı ölçülerek malzemenin tribolojik performansı değerlendirilir. Test

parametreleri arasında uygulanan yük, disk hızı ve çevresel koşullar yer alır. Ölçümler sonucunda sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranı belirlenir. ASTM G99 ve ISO 20808 gibi uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilen Pin-on-Disk testi, otomotiv, havacılık, biyomalzeme ve kaplama teknolojileri gibi farklı endüstrilerde kritik bir rol oynar. Özellikle kaplama uygulamalarında (örneğin TiN, DLC veya oksit bazlı kaplamalar), malzemelerin aşınma direncini karşılaştırmak ve tribolojik performanslarını analiz etmek için tercih edilir. Test sonrası, aşınma izleri genellikle optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya profilometre kullanılarak incelenir. Kuru veya yağlı ortamda uygulanabilmesi, malzeme seçiminde farklı çalışma koşullarına uygun kararlar alınmasına imkân tanır ve mühendislik uygulamalarında daha yüksek aşınma dayanımına sahip malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunur. Şekil 17’ de Pin-on-Disk testine ait şematik gösterim verilmektedir.

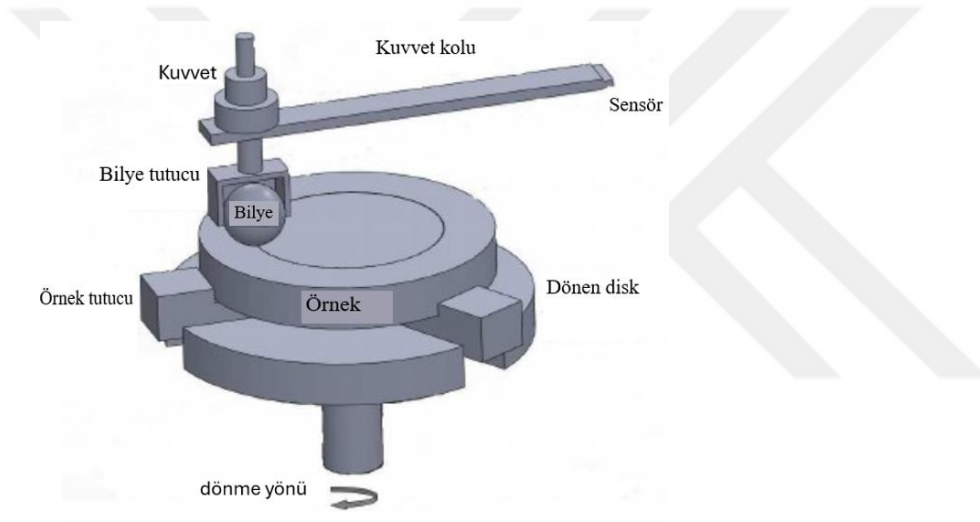


Şekil 17. Pin-On Disk test cihazı şematik gösterimi (Lepicka vd., 2019)

2.5.2. Ball-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi)

Ball-on-Disk testi, malzemelerin yüzey aşınma davranışlarını ve sürtünme performansını incelemek amacıyla geliştirilen temel tribolojik karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Deney düzeneğinde, çoğunlukla çelik veya seramikten üretilmiş yüksek sertlikte bir bilye, belirli bir normal yük altında dönen disk yüzeyiyle temasa geçirilir. Disk numunesi test edilecek malzemeden hazırlanır ve sistem, mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan kayma ve yuvarlanma hareketlerinin laboratuvar ortamında kontrollü biçimde modellenmesini sağlar. Deney sırasında uygulanan yük, kayma hızı, test süresi ve ortam koşulları (örneğin sıcaklık, bağıl nem veya yağlayıcı varlığı) gibi parametreler, yüzey etkileşimlerinin karakterini belirleyen temel

değişkenlerdir. Sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi sürekli olarak kaydedilir ve bu veriler malzemenin tribolojik kararlılığının değerlendirilmesinde kullanılır. Test tamamlandıktan sonra, disk yüzeyinde oluşan aşınma izi ve bilye üzerindeki deformasyon alanı; profilometri, optik mikroskopi veya taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ayrıntılı biçimde incelenir. Bu analizler sonucunda yüzeyde etkin olan aşınma mekanizmaları (örneğin çizilme, yapışma ya da yorulmalı aşınma) belirlenir ve malzemenin aşınma oranı hesaplanır. Ball-on-Disk yöntemi, özellikle kaplama teknolojileri, biyomalzeme araştırmaları ve mekanik bileşen tasarımlarında, farklı yüzeylerin sürtünme direncini nesnel olarak karşılaştırmaya olanak tanıyan güvenilir bir test tekniği olarak kabul edilmektedir. Şekil 18’ de Ball-on-Disk testine ait şematik gösterim verilmektedir.

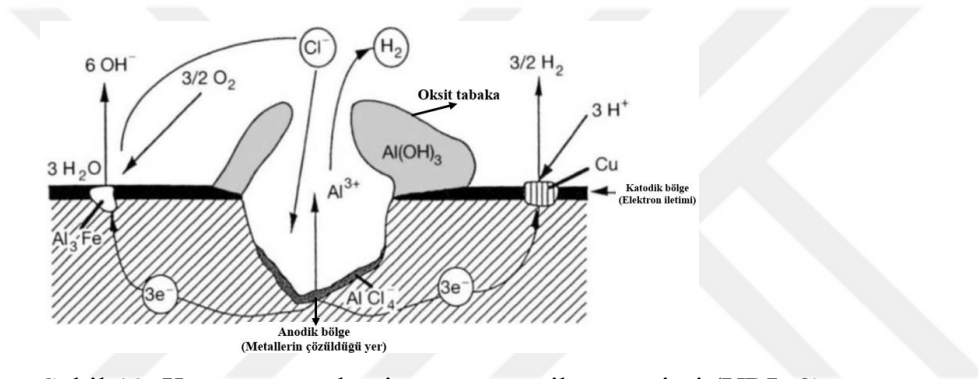


Şekil 18. Ball-on-Disk test cihazı şematik gösterimi (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2021)

2.6. Korozyon Mekanizması

Korozyon, metalik malzemelerin çevresel koşullar altında kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bozularak özelliklerini yitirmesine neden olan doğal bir döngüdür (Stachowiak and Batchelor, 2014; Guan vd., 2020). Termodinamik açıdan değerlendirildiğinde, bu süreç metallerin oksitler, hidroksitler veya tuzlar gibi ürünler oluşturma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Metal yüzeylerinin oksijen, su veya diğer reaktif bileşenlerle etkileşime girmesi sonucu ortaya çıkan bu bozunma, zamanla malzemenin mekanik dayanımını, yapısal bütünlüğünü ve işlevselliğini kaybetmesine neden olur. Korozyon yalnızca ekonomik kayıplara değil, aynı zamanda güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından da ciddi mühendislik sorunlarına yol açar. Dış etkiler olmaksızın kendiliğinden gelişebilen bu doğal süreç, özellikle endüstriyel ekipman ve sistemlerde güvenlik riskleri doğurabilir. Korozyonun ilerleme hızı ve mekanizması,

metalın kimyasal bileşimi, mikro yapısı ve bulunduğu ortamın fiziksel-kimyasal özellikleriyle yakından ilişkilidir. Oksijen açısından zengin, nemli, asidik ya da klor iyonu içeren ortamlarda metal yüzeylerinde oksitlenme ve iyonik çözünme süreçleri hızlanarak korozyon kaçınılmaz hale gelir. Sonuç olarak korozyon, metalik malzemelerin buldukları ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girmesiyle gerçekleşen, yüzeyde oksit, hidroksit, sülfür, tuz veya karbonat gibi bileşiklerin oluşumuna neden olan bir bozunma olayıdır (Popova, 2015; Pedferri, 2018). Bir korozyon sürecinin meydana gelebilmesi için sistemde elektron veren bir anot, elektron alan bir katot, iyon iletimini sağlayan elektrolit içeren bir çözelti ve anot ile katot arasında elektron akışını mümkün kılan bir iletim yolu bulunması gerekmektedir. Şekil 19’ da korozyon mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 19. Korozyon mekanizması şematik gösterimi (URL-8)

Korozyonun etkin bir biçimde yönetilmesi, özellikle altyapı, ulaşım, enerji üretimi ve havacılık gibi güvenliğin ön planda olduğu sektörlerde, kullanılan malzemelerin dayanıklılığını koruyarak sistemlerin uzun süreli ve güvenli şekilde çalışmasını sağlamak açısından büyük bir önem taşımaktadır (Deyab vd., 2020). Temel olarak korozyon mekanizması, gerçekleşen tepkimenin doğasına bağlı olarak kimyasal (kuru) ve elektrokimyasal (ıslak) süreçler şeklinde iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kimyasal korozyon, metal yüzeyinin oksijen, sülfür veya karbon gibi reaktif gazlarla doğrudan tepkimeye girmesiyle ortaya çıkar ve elektrokimyasal hücre oluşumu gerektirmez. Bu tür bozunma genellikle yüksek sıcaklık koşullarında, örneğin türbin kanatlarında, sanayi fırınlarında veya yanma odalarında meydana gelir. En yaygın mekanizmalardan biri olan oksidasyon korozyonu, metalin oksijenle reaksiyona girmesi sonucu metal oksitlerin (örneğin Fe_2O_3) oluşmasıyla ilerler. Sülfürizasyon ise sülfür içeren ortamlarda metal sülfür bileşiklerinin meydana gelmesine neden olur ve petrokimya sektöründe sıklıkla gözlenir. Karburizasyon süreci, karbon açısından zengin gazlarla gerçekleşen bir etkileşim olup metalin sertliğini artırırken kırılgenliğini de yükseltebilir. Kimyasal

korozyon, çoğunlukla nemsiz veya gaz ortamında, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında gelişir; atmosferde bulunan oksijen, hidrojen sülfür (H₂S) ve halojenler bu süreci hızlandıran başlıca ajanlardır (Quadri vd., 2022). Bu etkileşimler sonucunda metal yüzeylerinde oksit, sülfür veya karbon tabakaları oluşur. Dolayısıyla kimyasal korozyon; metal veya alaşımın kuru gaz ortamında kimyasal reaksiyona girerek yapısal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde geri dönüşü olmayan bozulmalar meydana getirmesiyle tanımlanabilir. Sıcaklık değişimleri, endüstriyel gazlar, duman, sürtünme etkileri ve atmosferik koşullar gibi faktörler de bu sürecin hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Kimyasal korozyonu sınırlamak amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı oksit tabakaları (örneğin Al₂O₃, Cr₂O₃), seramik kaplamalar ve gaz ortamının kimyasal bileşiminin kontrol edilmesi gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Covino, 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; Quadri vd., 2022).

Elektrokimyasal (ıslak) korozyon, metal ve alaşımlarının nemli ya da sıvı ortamda kimyasal tepkimelere girerek malzemelerin mekanik, fiziksel ya da kimyasal özelliklerinde bozulmalara ve malzeme kaybına neden olan kimyasal süreçtir (Covino, 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; Quadri vd., 2022). Bu mekanizmanın işleyebilmesi için dört temel bileşen gerekir. Bunlar; elektron veren anot, elektron alan katot, iyon iletimi sağlayan elektrolit çözeltisi ve anot ile katot arasında elektron akışı sağlayan iletim yoludur. Bu unsurlardan herhangi birinin yokluğu, korozyon sürecinin başlamasını engeller. İki metalin elektrolitik çözeltiliye daldırılması durumunda, potansiyel farkı nedeniyle elektron akışı gerçekleşir; anodun metal iyonları çözeltiliye geçerek malzeme kaybına neden olurken, açığa çıkan elektronlar iletken yol aracılığıyla katoda ulaşır. Korozyon sonucu malzeme kaybı yalnızca anotta meydana gelir, katot ise görece inert kalır. Nem veya sıvı ortam bulunmadığında ise elektron transferi gerçekleşmeyeceği için elektrokimyasal korozyon devreye girmemektedir.

Korozyon hızı hem malzemenin mikro yapısal özelliklerine hem de maruz kaldığı çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu bağlamda, korozyonu etkileyen etmenler iki ana grupta incelenebilir;

1. Malzeme Kaynaklı Faktörler:

- Malzeme ve alaşımlarının elektro-potansiyel farkları,
- Anot ve katot bölgelerinin yüzey alanı oranı,
- Malzemenin saflık düzeyi ve homojenliği,
- Oluşan korozyon ürünlerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri,
- Malzemenin pasifleşme kapasitesi ve davranışı,
- Gerilim ve mekanik yüklerden kaynaklanan etkiler.

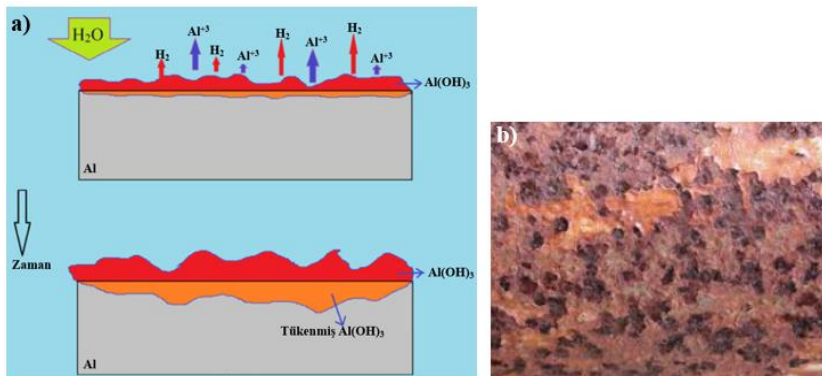
2. Çevresel Faktörler:

- Ortamın pH değeri ve elektriksel iletkenliği,
- Nem oranı ve oksijen varlığı,
- Korozyona yol açan iyonların (örneğin klorür iyonları) konsantrasyonu,
- Sıcaklık, akış hızı ve oksidatif ortamın varlığı,
- Polarizasyon ve elektrokimyasal etkileşimler.

Bu faktörler birlikte değerlendirildiğinde, korozyon hızının malzeme seçiminden tasarım ve ortam kontrolüne kadar birçok parametre ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Klor içeren çözeltiler, alüminyumun korozyona karşı direncini önemli ölçüde azaltabilir; buna karşın, saf alüminyum belirli çevresel koşullar altında yüksek kimyasal kararlılık sergileyebilmektedir (Deyab vd., 2020).

Korozyonun temel oluşum mekanizması kimyasal veya elektrokimyasal niteliktedir ve metalik malzemeler ile alaşımlar üzerinde farklı türlerde etkiler ortaya çıkar. Bu kapsamda yaygın olarak karşılaşılan korozyon türlerinden bazıları şunlardır;

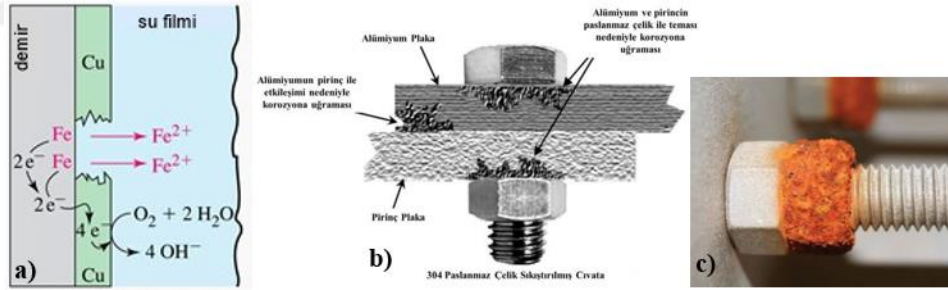
Uniform (Yüzeysel) Korozyon, diğer bir deyişle genel korozyon, metal ve alaşımlarda en sık rastlanan korozyon türlerinden biridir. Bu korozyon biçiminde anodik ve katodik tepkimeler belirli bir noktada yoğunlaşmadığından, malzeme yüzeyi boyunca homojen bir şekilde ilerler. Nemli veya kirli ortamlarda ortaya çıkan bu süreç, korozyonun en temel ve basit formunu temsil eder. Örneğin, demirin oksitlenerek paslanması veya gümüşün atmosferik etkiler sonucu kararması uniform korozyona örnek olarak verilebilir. Bu tür korozyonun hızı, ağırlık kaybı ölçümleri ve elektrokimyasal analiz yöntemleri kullanılarak belirlenebilir (Covino vd., 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018; Quadri vd., 2022). Şekil 20’ de uniform korozyona ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 20. Uniform Korozyon Örnekleri; a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli. (Rashad vd., 2017)

Galvanik Korozyon, diğ er bir adıyla bimetallik korozyon, farklı türde ve özellikteki metalik malzemeler ile alaşımların veya katot görevi gören metalik olmayan bir malzemenin aynı korozif ortamda (örneğin nem, sıcaklık, pH veya akışkan hızı) birbirleriyle elektriksel ya da fiziksel temas etmesi sonucu ortaya çıkan korozyon türüdür. Bu süreç elektrokimyasal karakter taşır; dolayısıyla malzemeler arasındaki elektrik potansiyel farkı arttıkça korozyon hızı da yükselir. Korozyon sırasında daha aktif olan malzeme anot olarak görev yapar ve malzeme kaybına uğ rar, daha az aktif olan malzeme ise katot görevinde kalarak korunur (Covino vd., 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018; Quadri vd., 2022).

Ş ekil 21’de gösterildiğ i üzere, bir cıvata-somun sistemi ile alüminyum ve pirinç plakaların sabitlenmesi sonucunda galvanik korozyon mekanizması net bir şekilde gözlemlenebilir. Eğ er cıvata ve somun paslanmaz ç elikten seçilmiş se, bu elemanlar katot olarak iş lev görür ve korozyona uğ ramaz. Buna karş ılık, anot görevi üstlenen alüminyum ve pirinç plakaların temas bölgelerinde malzeme kaybı meydana gelir. Ayrıca alüminyum, pirinçten daha aktif bir metal olduğ undan, temas bölgelerinde alüminyum anot olarak korozyona uğ rar; pirinç ise katot olarak korunur ve malzeme kaybı yaşamaz.

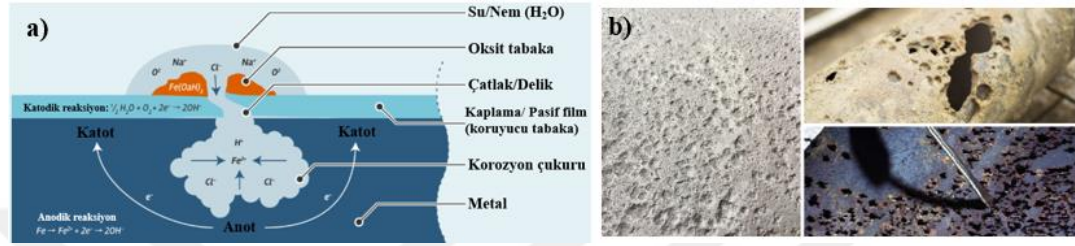


Ş ekil 21. Galvanik Korozyon Örnekleri; a) korozyon mekanizması oluşumu, b) korozyonun ş ematik gösterimi, c) uygulamada oluş an korozyon görseli (URL-9, 2025).

Ç ukurcuk Korozyonu ya da Pitting Korozyonu, metal ve alaşımlarda karşılaşılan en yaygın ve potansiyel olarak en zararlı korozyon türlerinden biridir. Bu korozyon türü, yüzeyde çok küçük bir noktada, toplu iğ ne ucu büyüklüğünde başlamasına rağmen, malzeme içinde ilerleyerek oyuklar ve boşluklar oluşturabilir. Yüzeyden gözle görülme de iç kısımlarda ilerleyen bu süreç, malzemenin mukavemetinde ciddi düşüşler ve kırılma riskinin artmasına yol açar.

Ç ukurcuk korozyonu, özellikle nemli ve/veya yüksek derecede agresif ortamlar (asidik, yüksek sıcaklık, kirli) altında gerçekleşir. Süreç, metalin yüzeyinde lokal olarak

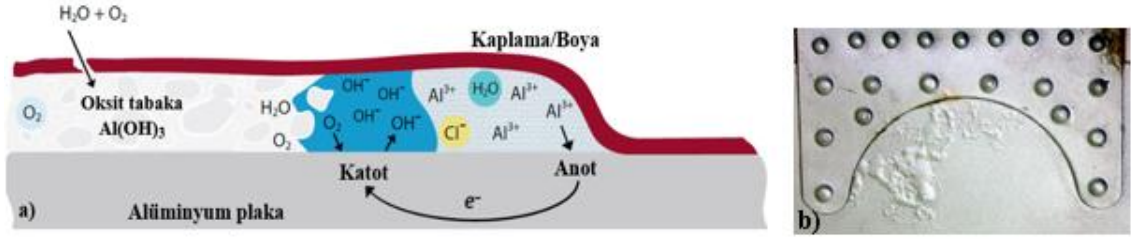
oluşan anodik ve katodik bölgeler nedeniyle meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlarla ilerler. Pasif tabaka oluşturan metallerde daha belirgin görülür, çünkü bu tabakanın belirli noktalarda bozulması, korozyonun küçük bölgelerde başlamasına olanak sağlar. Malzemenin çalışma ortamına bağlı olarak çukurcuklar hızla büyüyebilir ve yüzeyden bağımsız olarak malzeme kaybı oluşturabilir (Covino vd., 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018; Quadri vd., 2022). Şekil 22’ de, çukurcuk korozyonunun oluşum mekanizmasını verilmektedir.



Şekil 22. Çukurcuk korozyonu görselleri a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli (Khalid Mohammed Ridha vd., 2023)

Yorulmalı Korozyonu, metal ve alaşımların tekrarlayan değişken yükler altında bulunduğu korozif ortamlarda meydana gelen bir hasar türüdür. Bu süreçte, malzemenin yüzeyinde başlangıçta küçük çatlaklar oluşur; zamanla bu çatlaklar, sürekli uygulanan dinamik yüklerin etkisiyle ilerler ve nihayetinde malzemenin kopmasına veya kırılmasına yol açar (During, 2018).

Filiform Korozyon ise, kaplama altı korozyonu olarak da adlandırılan elektrokimyasal bir mekanizmadır. Bu tür korozyon, metal veya alaşım yüzeyindeki kaplama ya da boya tabakasının zayıf bir noktasından başlar ve yüzey boyunca ipliksi bir desen oluşturarak ilerler; bu hareket, solucan benzeri bir yayılma paterni gösterir (During, 2018; Kousis, 2022). Filiform korozyon, kaplamanın altındaki metalin elektrokimyasal olarak çözünmesi ile karakterize edilir ve özellikle kaplamalı yüzeylerde lokal hasara neden olarak malzemenin bütünlüğünü zayıflatır. Şekil 23, filiform korozyonun oluşum mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 23. Filiform korozyonu görselleri a) korozyon mekanizması oluşumu, b) uygulamada oluşan korozyon görseli (URL-10, 2025)

Yukarda belirtilen korozyon türlerinden başka, metalik yüzeylerde çatlama yol açan çatlak korozyonu, gözenekli yapıda malzemelerde meydana gelen intergranüler korozyon ve mikro-galvanik bölgelerde oluşan lokal korozyon gibi özel mekanizmalar da bulunmaktadır. Bu türler, malzeme özellikleri ve ortam koşullarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. (Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018; Kousis, 2022; Quadri vd., 2022). Korozyon mekanizmalarının önlenmesine yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları;

Saf Metal Kullanımı: Malzemelerin korozyon direncini artırmak amacıyla, parça veya bileşenlerde homojen olmayan bölgelerin sayısını minimize etmek için saf metal tercih edilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle çukurcuk korozyonunun başlangıcını ve ilerlemesini önemli ölçüde engelleyerek yüzeydeki malzeme kaybını azaltır (Covino vd., 2003; During, 2018).

Alaşımlama: Saf metallere veya alaşımlarına eklenen ikinci veya üçüncü alaşım elementleri, korozyona karşı direnç sağlamakta kritik rol oynar. Örneğin, paslanmaz çeliğe molibden (Mo) eklenmesi, magnezyumda çinko (Zn) veya mangan (Mn) ilavesi malzemelerin çevresel saldırılara karşı dayanıklılığını artırmaktadır (Covino vd., 2003; Popova, 2015).

Uygun Tasarım: Korozyif ortamlarda kullanılan bileşenlerin teması ve reaksiyona girme olasılığı, tasarım aşamasında minimize edilmelidir. Galvanik seri içerisindeki farklı metallerin doğrudan temasından kaçınmak veya temasın kaçınılmaz olduğu durumlarda yüzeyler arasına plastik, kauçuk veya benzeri yalıtkan malzemeler yerleştirmek, galvanik korozyonun önlenmesine katkı sağlar (Covino vd., 2003; Pedferri, 2018).

Katodik Koruma: Metallerin ve alaşımlarının korozyona karşı korunmasında en etkili yöntemlerden biri katodik korumadır. Bu yöntemde, korunacak metalin daha aktif bir metal ile galvanik temas kurması sağlanır; böylece korunan metal katot, daha aktif olan metal ise anot olarak davranır ve korozyon yalnızca anot üzerinde gerçekleşir.

Katodik korumada yaygın olarak çinko (Zn) ve magnezyum (Mg) kullanılmaktadır (Covino vd., 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018).

Korozyon Önleyicileri (İnhibitörler) ve Yüzey Kaplamaları: Korozyon önleyicileri, çalışma ortamındaki korozif etkileri azaltmak veya korozyon sürecini durdurmak amacıyla ortam koşullarına eklenen kimyasal maddelerdir. Bu maddeler, metalik malzemelerin yüzeyinde koruyucu bir bariyer oluşturarak malzemeyi çevresel etkilere karşı korur. En yaygın kullanılan korozyon kontrol yöntemlerinden biri yüzey kaplamasıdır. Farklı kaplama teknikleri sayesinde malzemelerin yüzeylerinde çeşitli film tabakaları oluşturulmakta ve bu tabakalar malzemenin korozyon direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Yüzey kaplamaları, metalik ve metalik olmayan kaplamalar olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Metalik kaplamalar arasında en yaygın yöntem galvanizasyondur. Bu yöntemde malzeme yüksek sıcaklıkta çinko banyosuna daldırılarak yüzeyinde koruyucu bir çinko tabakası oluşturulur. Ayrıca krom, alüminyum ve nikel kaplamaları da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Metalik olmayan kaplamalar ise boya veya organik bileşikler içeren yüzey filmleri olarak uygulanır ve tabaka bütünlüğü (yırılma, çatlama gibi mekanik hasarlara karşı) korunduğu sürece malzeme yüzeyini korozyona karşı etkili biçimde korumaktadır (Covino vd., 2003; Popova, 2015; Pedferri, 2018; During, 2018).

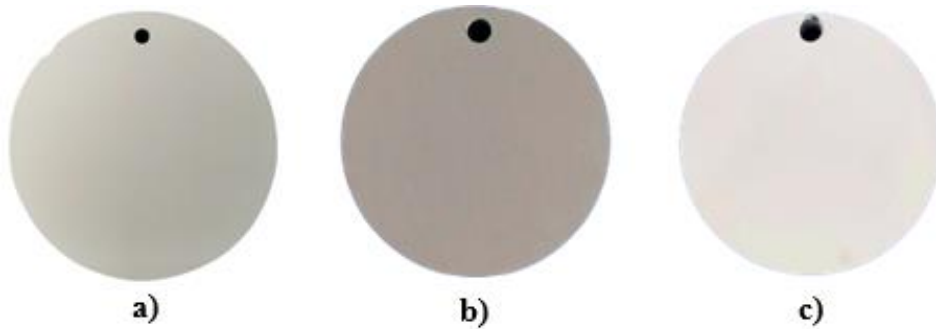
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Taban Malzemesinin Metalografik Olarak Hazırlanması

Taban malzemesi olarak, kimyasal bileşimi Tablo 4’ de verilen ticari Al 7075 alüminyum alaşımı, D30×3 mm boyutlarında örnekler halinde temin edilmiştir. Her bir numunenin yüzeyi, sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grit boyutlu SiC zımparalar kullanılarak, $R_a \approx 0,15-0,25 \mu\text{m}$ aralığında pürüzlülüğe ulaşana kadar parlatılmıştır. Parlatma işleminin tamamlanmasının ardından, Şekil 24’ de şematik olarak gösterilen Mahr marka yüzey profilometresi kullanılarak yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. İstenilen pürüzlülük değerine erişen örnekler, sırasıyla saf su ve etanol ile yıkanıp kurularak kaplama uygulamasına hazır hale getirilmiştir. Şekil 25, kaplama işlemine hazırlanan alüminyum örneklerin görünümünü sunmaktadır.



Şekil 24. Yüzey Profilometresi



Şekil 25. MAO işlem numuneleri, a) Kaplama işlemine hazır Al7075 örnekler, b) MAO kaplama işlemi uygulanmış Al7075 örnekler, c) Nanopartikül ilaveli MAO kaplama işlemi uygulanmış Al7075 örnekler

3.2. MAO Yöntemi ile Oksit Tabakaların Büyütülmesi

Al 7075 alüminyum alaşımı yüzeyinde ayrı ayrı dört farklı elektrolitik çözelti içerisinde büyütülen oksit kaplamalar, Faraday Elektrik Elektronik Ltd. Şti. tarafından üretilen MAO kaplama ünitesi kullanılarak alternatif akım (AC) ile bipolar modda gerçekleştirilmiştir. Şekil 26’da Gümüşhane Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüzey İşlemleri Laboratuvarı’nda bulunan MAO kaplama ünitesine ait görsel sunulmaktadır. Görsel incelendiğinde, güç kaynağı, anot, katot, elektrolit banyosu ve soğutma ünitesi olmak üzere sistemin beş temel bileşenden oluştuğu görülmektedir. MAO sisteminde, kaplama numunesi tutucuya bağlanarak anot görevi görürken, paslanmaz çelikten üretilen çözelti haznesi ise katot görevini üstlenmektedir.



Şekil 26. Mikro Ark Oksidasyon (MAO) kaplama ünitesi

Taban malzemelerin yüzeyine oksit kaplamaların büyütülmesi için pH değeri 11–12 olan elektrolitik çözeltiler hazırlanmıştır. Başlangıç olarak temel bir elektrolitik çözelti hazırlanmış ve “Deney-1 çözeltisi” olarak tanımlanmıştır. Bu temel çözelti, farklı nano katkı maddelerinin ilavesiyle çeşitlendirilmiştir. Sırasıyla, $B_5H_{10}NaO_{13}$ eklenerek elde edilen çözelti “Deney-2 çözeltisi”, B_4C ilavesiyle hazırlanan çözelti “Deney-3 çözeltisi” ve h-BN içeren çözelti ise “Deney-4 çözeltisi” olarak adlandırılmıştır. Bu yaklaşım, temel çözeltilere eklenen nanopartiküllerin kaplama özellikleri üzerindeki etkisinin sistematik olarak incelenmesini sağlamaktadır. Kaplama öncesinde, çözeltilerin homojen bir dağılım göstermesi için manyetik karıştırıcı yardımıyla düşük devirde 1 saat karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözelti

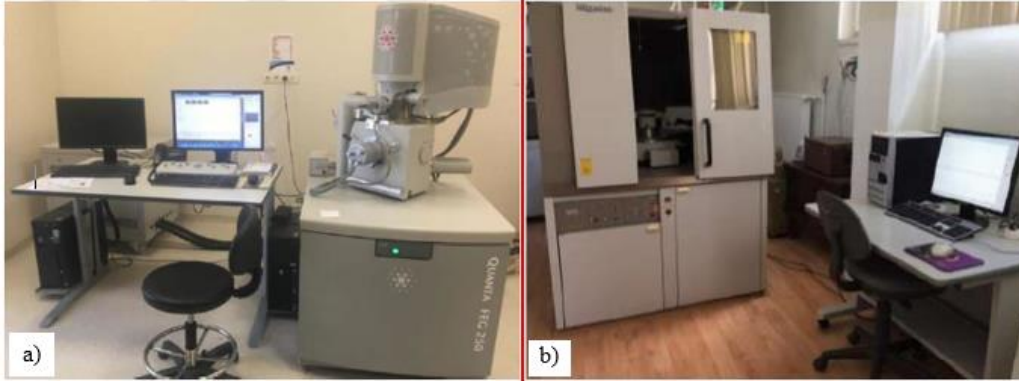
sıcaklığının 30 °C'nin üzerine çıkmaması için, paslanmaz çelikten imal edilmiş çözelti haznesinin duvarlarından şebeke suyu geçirilerek etkin bir soğutma sağlanmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra ise örnekler etanol ile durulanmış ve kurutularak bir sonraki aşamaya hazırlanmıştır. Tablo 9' da MAO kaplamalara ait çözelti içerikleri, Tablo 10' da ise MAO kaplama işlem parametreleri, Şekil 27' de ise MAO kaplama işlemlerine ait grafiksel görüntü verilmektedir.

Tablo 9. MAO kaplamalara ait çözelti içerikleri

Kimyasal Bileşikler	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4
Potasyum Hidroksit (KOH)	2 gr/lt	2 gr/lt	2 gr/lt	2 gr/lt
Sodyum Metasilikat (Na ₂ SiO ₃)	4 gr/lt	4 gr/lt	4 gr/lt	4 gr/lt
Sodyum Hidrojen Fosfat (Na ₂ HPO ₄)	4 gr/lt	4 gr/lt	4 gr/lt	4 gr/lt
Sodyum Alüminat (NaAlO ₂)	3 gr/lt	3 gr/lt	3 gr/lt	3 gr/lt
B ₅ H ₁₀ NaO ₁₃	-	2 gr/lt	-	-
B ₄ C	-	-	2 gr/lt	-
h-BN	-	-	-	2 gr/lt

Tablo 10. MAO işlemi kaplama parametreleri

Parametreler	
Frekans (Hz)	300
Voltaj (V)	550/-150
Kaplama Süresi (dk)	15



Şekil 28. Yapısal karakterizasyon cihazları, a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDXS), b) X Işını difraktometre cihazı

3.4. Mekanik Testler

3.4.1. Yüzey Profilometresi

Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri, Şekil 24' de görseli verilen Mahr Perthometer M2 profilometre ile gerçekleştirilmiştir; cihazın sunduğu standart uyumlu filtreleme ve örnekleme uzunluğu seçenekleri kullanılarak Ra (aritmetik ortalama) ve Rz (ortalama maksimum tepe-dip yüksekliği) parametreleri belirlenmiştir. Ölçümler sırasında her bir numunenin yüzeyinden üç ayrı konum seçilmiş; bu üç ölçümün aritmetik ortalaması raporlanan Ra ve Rz değeri olarak alınmıştır böylece tek bir noktadaki lokal varyasyonların etkisi azaltılmıştır. Ölçümlerde kullanılan değerlendirme uzunlukları, filtreleme ve örnekleme ilkeleri uluslararası yüzey metrologisi standartlarına uygun olacak şekilde seçilmiştir (ISO 4287 / ISO 4288). Cihazın teknik özellikleri ve parametrik işlevleri Mahr dokümantasyonu ile tutarlı kullanılmıştır.

3.4.2. Sertlik Deneyle

İşlem görmemiş Al 7075 taban malzeme ile Deney-1, Deney-2, Deney-3 ve Deney-4, şartlarında büyütülen katkılı oksit kaplamaların mikrosertlik değerleri, Şekil 29' da görseli verilen mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçüm sırasında örnek yüzeyine 136° Vickers uçla 10 mN yük uygulanmış ve yük 15 saniye boyunca muhafaza edilmiştir. Bu süre sonunda batıcı uç tarafından oluşturulan izlerin boyutları optik olarak değerlendirilmiş, elde edilen veriler kullanılarak mikrosertlik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 29. Sertlik ölçme cihazı (Buehler micromet 2001)

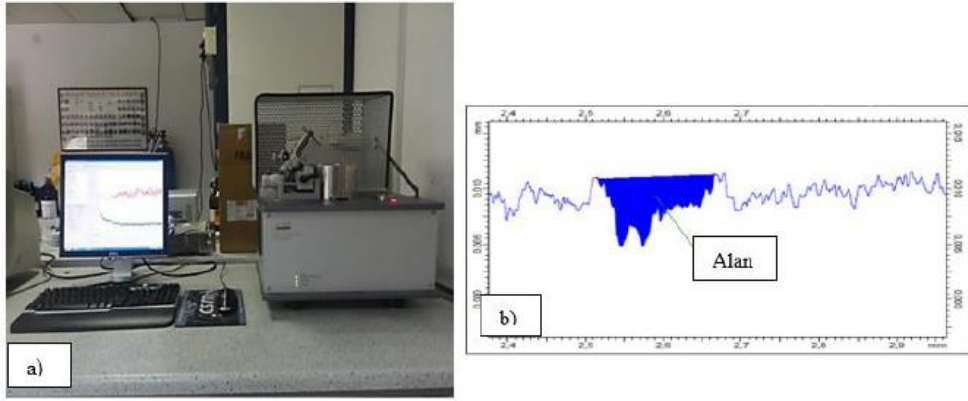
3.4.3. Aşınma Deneyleri

Numunelerin tribolojik performansını değerlendirmek amacıyla, işlem görmemiş Al 7075 taban malzeme ile Dene-1, Dene-2, Dene-3 ve Dene-4, şartlarında büyütülen katkılı oksit kaplamaların üzerinde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Şekil 30-a'da şematik olarak verilen CSM marka tribometre kullanılarak, Tablo 11' de belirtilen test parametreleri altında yürütülmüştür. Testlerin ardından elde edilen aşınma izleri ve yüzey profilleri Şekil 30-b'de sunulmuştur.

Aşınma izlerinin kesit profilleri, Mahr Perthometer M2 yüzey profilometresi ile ölçülmüş; bu profillerden elde edilen veriler kullanılarak aşınma izinin kesit alanı hesaplanmıştır. Aşınma hacmi (V), belirlenen kesit alanı ile aşınma mesafesinin çarpılması sonucu elde edilmiştir. Numunelerin aşınma oranı (W) ise literatürde yaygın olarak kullanılan yaklaşıma uygun biçimde $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ biriminde, aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanmıştır (During, 2018; ASTM G99-17, 2017).

$$\text{Wear rate } (Ws) = \frac{\text{Wear volume}}{\text{Applied load} \times \text{Wear distance}} = \frac{V}{F \cdot S} = \frac{A \cdot \pi \cdot D}{F \cdot S} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Bu yöntem, farklı kaplama tipleri arasındaki tribolojik davranışların karşılaştırılmasında güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar sağlamaktadır. Burada W aşınma oranı (mm^3/Nm), A aşınmış alan (mm^2), D aşınma izi çapı (mm), F normal yük (Nm) ve S aşınma mesafesi (m)' ni ifade etmektedir.



Şekil 30. A) CSM Tribo-test cihazı, b) Tribo-test sonrası aşınmış bölge yüzey profili

Tablo 11. Aşınma Deney Şartları

Parametreler	Deney Şartları
Uygulanan yük, (N)	2
Hız, (mms^{-1})	95
İz çapı, (mm)	3
Ortam	Atmosfer
Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$	22
İzafi nem, (%RH)	45-55
Süre, (sn)	300
Küre Çapı (mm)	6

3.4.4. Korozyon Deneyleri

Kaplama işlemi uygulanmamış Al 7075 taban malzeme ile Deney-1, Deney-2, Deney-3 ve Deney-4, şartlarında büyütülen katkılı oksit kaplamaların korozyon davranışları, atmosfer koşullarında %3,5 NaCl (sodyum klorür) çözeltisi içerisinde yürütülen elektrokimyasal testlerle değerlendirilmiştir. Deneyler, Şekil 31’de şematik olarak gösterilen potansiyodinamik polarizasyon test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Korozyon ölçümleri, üç elektrotlu hücre sistemi esasına göre yapılmıştır. Bu sistemde referans elektrot (RE) olarak gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl), karşıt elektrot (CE) olarak platin tel, çalışma elektrodu (WE) olarak ise test numuneleri kullanılmıştır. Deney öncesinde her bir örnek, açık devre potansiyeline (OCP) ulaşması amacıyla 30 dakika süreyle çözeltide bekletilmiştir.

Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, -1000 mV ile +950 mV potansiyel aralığında, 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen akım-potansiyel (E-log I) eğrilerinden, Tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak anodik ve katodik

doğrusal bölgeler belirlenmiştir. Bu doğrultuda, iki doğrusal bölgenin kesişim noktası korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğunu (I_{corr}) vermektedir.

Korozyon hızları, elde edilen I_{corr} değerleri kullanılarak Stern-Geary yaklaşımı temelinde hesaplanmıştır. Bu yöntemde, polarizasyon direnci (R_p) değeri ile Tafel eğim katsayıları (β_a ve β_c) arasındaki ilişki kullanılmıştır. Korozyon hızı, aşağıdaki genel ifade üzerinden belirlenmiştir;

$$v_{corr} = \frac{K \times I_{corr} \times EW}{\rho} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Burada V_{corr} korozyon hızı (mm/yıl), K dönüşüm katsayısı, EW eşdeğer ağırlık, I_{corr} korozyon akım yoğunluğu ve ρ malzeme yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu yöntem sayesinde, kaplamaların korozyon direncindeki değişim nicel olarak karşılaştırılmış ve her kaplama türünün elektrokimyasal dayanım üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir (Covino vd., 2003; Pedferri, 2018; During, 2018; Revie and Uhlig, 2019).



Şekil 31. Polarizasyon test cihazı (Ametek Par VersaSTAT-3)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

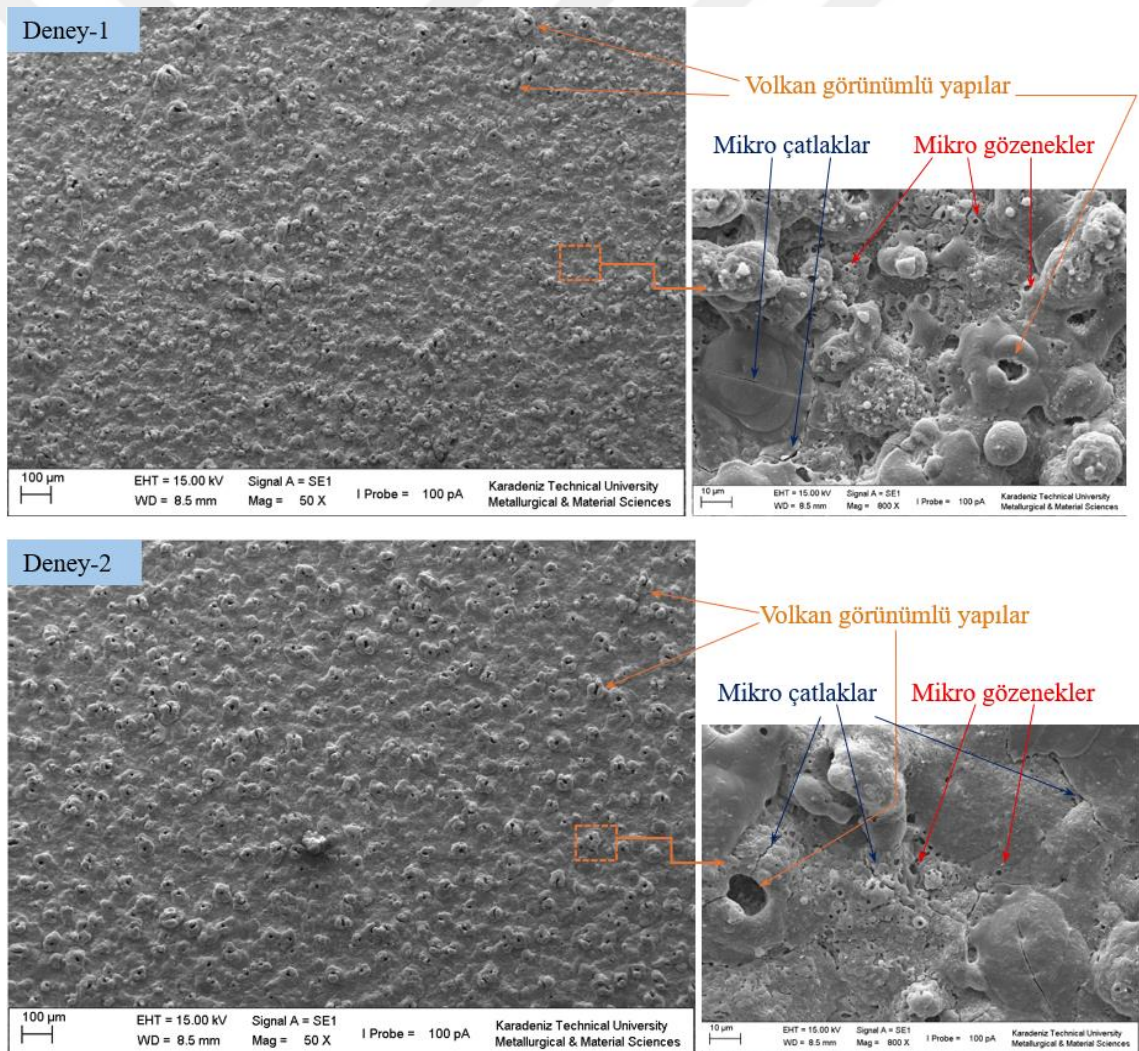
4.1 MAO Kaplamaların Yapısal Karakterizasyonu

MAO (Mikro Ark Oksidasyon) yöntemi ile Al7075 alaşımı üzerine büyütülen Al₂O₃ kaplamaların (Deney-1), B₅H₁₀NaO₁₃ katkılı Al₂O₃ kompozit kaplamaların (Deney-2), B₄C katkılı Al₂O₃ kompozit kaplamaların (Deney-3) ve h-BN ilaveli Al₂O₃ kompozit kaplamaların (Deney-4) yüzey morfolojileri ve kesit görünüşleri sırasıyla Şekil 32 ve Şekil 33' de verilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, her bir kaplamanın karakteristik morfolojik farklılıklar sergilediği gözlemlenmektedir.

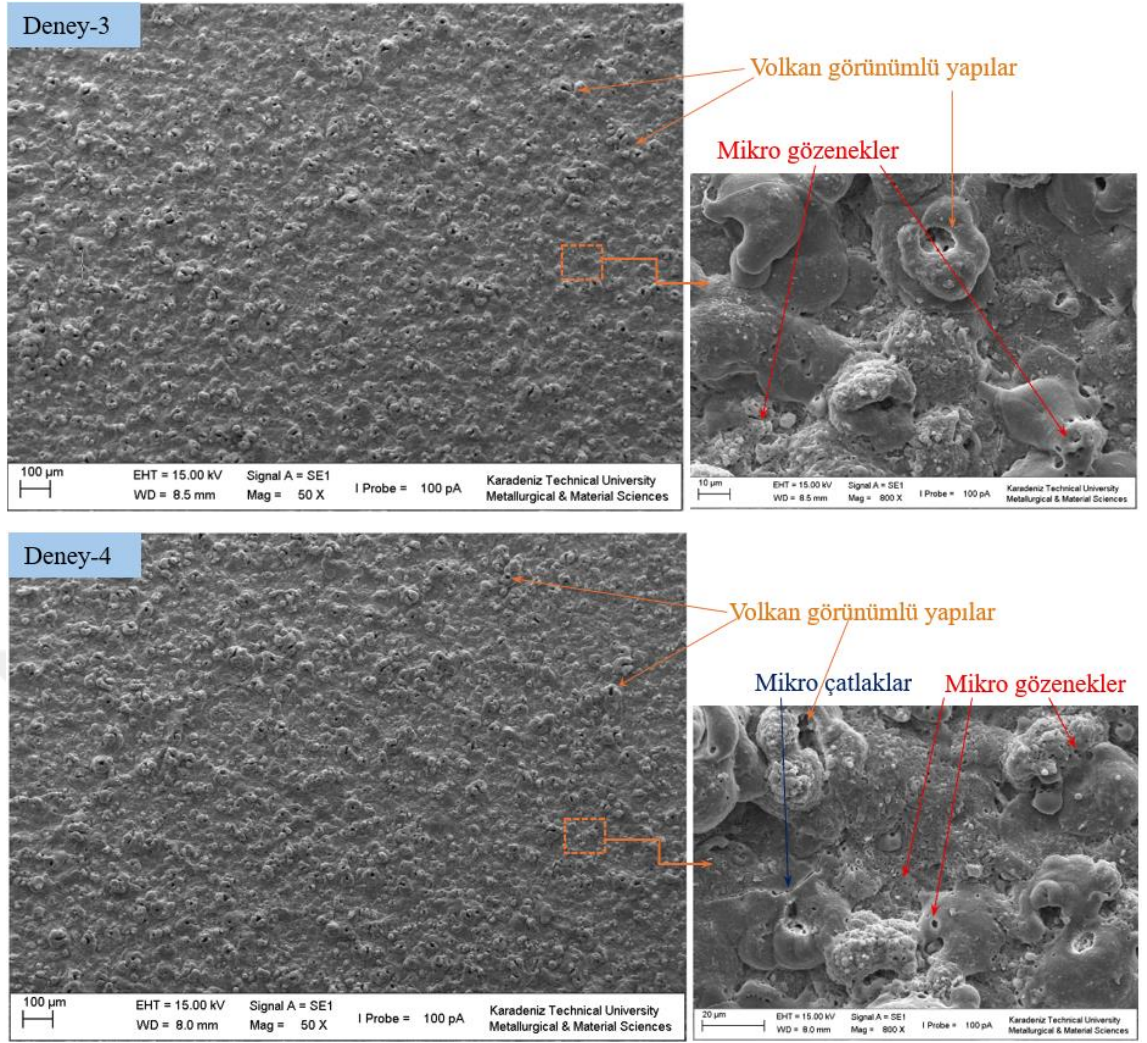
Şekil 32'de sunulan, Deney-1 şartında (Na₂SiO₃, Na₂HPO₄, KOH ve NaAlO₂ içeren elektrolit kullanılarak) elde edilen Al₂O₃ kaplamaya ait yüzey görüntüleri incelendiğinde, farklı boyutlarda çok sayıda mikro gözenek, mikro çatlak ve mikrodeşarjların etkisiyle volkanik yapıya benzer oluşumların oluştuğu görülmektedir. Literatürde, bu tür mikro yapılar genellikle MAO sürecinde meydana gelen mikrodeşarjların bir sonucu olarak açıklanmaktadır (Shi vd., 2009; Şüküroğlu, 2017). Ayrıca, MAO işleminin başlangıcında yoğun mikrodeşarjların kaplamaya ince ve uniform bir yapı kazandırdığı; işlem süresi arttıkça mikrodeşarj sayısının azaldığı ve bunun sonucunda daha geniş ve uniform olmayan gözeneklerin oluştuğu bildirilmektedir (Roknian vd., 2018; Fattah-Alhosseini vd., 2020). Kaplama sürecinde taban malzeme yüzeyinde meydana gelen bölgesel ergimeyi takiben katılaşmanın dairesel bir yol izlemesi, mikro gözeneklerin dairesel bir geometriye sahip olmasına etki etmektedir (Sukuroğlu, 2025).

MAO işlemi sonrası Al7075 alaşımı üzerinde büyütülen kaplamaların Şekil 32'de sunulan SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde, farklı deney şartlarında büyütülen her bir oksit tabakaların yüzeyin her noktasına homojen bir biçimde dağıldığı görülmektedir. Büyütülen bütün kaplamalarda, MAO yöntemine özgü mikro gözenekler ve katılaşma sırasında oluşan termal gerilmelere bağlı mikro çatlaklar belirlenmiştir (Jinguang vd., 2020; Linjie vd., 2021). Literatürde, volkanik görünümlü yapılar çoğunlukla budeşarj kanallarının oluşumuyla ilişkilendirilmiştir (Zhang vd., 2019; Martin vd., 2019; Song vd., 2020; Wu vd., 2021; Ma vd., 2022; Jin vd., 2022; Tian vd., 2022).deşarj kanallarından ergiyen taban malzemenin çıkması ve soğuk elektrolite maruz kalması ile meydana gelen katılaşmanın sonucu olarak yüzeyde mikro boşluklar meydana gelmektedir. Ayrıca, bu kanallar içerisindeki yüksek sıcaklık ve

basınç, mikro çatlakların ortaya çıkmasına da katkıda bulunmaktadır (Chen vd., 2015; Darband vd., 2017; Martin vd., 2019; Zhang vd., 2019; Song vd., 2020; Wu vd., 2021; Rao vd., 2021; Ma vd., 2022). MAO kaplamaların yüzeyinde oluşan mikro gözenekler ve yassı yapıların, erimiş metal oksit birikimi ile ilişkilendirilen sürekli lokaldeşarj olaylarının bir sonucu olduğu ve kaplama yüzeyine homojen olarak dağılım sergilediği literatürde belirtilmiştir (Xia vd., 2013; Ma vd., 2014; Rao vd., 2021; Ma vd., 2022). Şekil 32’da görüldüğü üzere, tüm kaplama örneklerinin yüzeylerinde yoğun şekilde dairesel mikro boşluklar ve yassı yapılar mevcuttur. Mikro gözeneklerin boyutları ve yüzey dağılımları, uygulanan kaplama parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Darband vd., 2017; Zhang vd., 2019; Song vd., 2020; Wu vd., 2021; Rao vd., 2021; Ma vd., 2022; Jin vd., 2022; Tian vd., 2022).



Şekil 32. MAO işlemi sonrası Al7075 alaşımı üzerinde büyütülen kaplamaların yüzey SEM görüntüleri



Şekil 32. MAO işlemi sonrası Al7075 alaşımı üzerinde büyütülen kaplamaların yüzey SEM görüntüleri (Devam)

MAO kaplamalarının oluşumunda belirleyici rol oynayan en kritik parametrelerden biri, kullanılan elektrolitin kimyasal bileşimidir (Shi vd., 2009; Forno vd., 2009). Elektrolit içerisinde yer alan farklı iyon türleri ve eklenen partiküller, kaplama mekanizmasını önemli ölçüde değiştirebilmekte ve elde edilen oksit tabakasının yapısal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Becerik vd., 2011). Bu kapsamda $B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN nanopartikülleri içeren elektrolitler kullanılarak elde edilen Al_2O_3 esaslı kompozit kaplamaların ($B_5H_{10}NaO_{13}$ katkılı Al_2O_3 , B_4C katkılı Al_2O_3 ve h-BN katkılı Al_2O_3) yüzey morfolojileri incelendiğinde (Şekil 32), kaplama mikro yapılarının belirgin biçimde farklılaştığı ve mikro gözenek boyutlarının azaldığı görülmektedir. Her üç durumda da gözeneklerin yüzey boyunca daha dengeli dağıldığı, dolayısıyla kaplamaların daha uniform bir yapı sergilediği söylenebilir.

Elektrolit bileşimine ilave edilen katkı maddelerinin, MAO sürecinin ilerleyişini doğrudan etkileyerek kaplamaların farklı morfolojik özellikler göstermesine neden

olduğu bilinmektedir (Shokouhfar ve Allahkaram, 2016; Raina ve Anand, 2018; Fattah-Alhosseini vd., 2020). Bu etkinin, esas olarak elektrolit iletkenliğinde meydana gelen artıştan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elektrolitin iletkenliğinin artması, dielektrik kırılma potansiyelini düşürmekte ve buna bağlı olarak mikro deşarj yoğunluğunu azaltarak gözenek sayısında azalmaya yol açmaktadır. Literatürde, bu mekanizmayı destekleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Aliofkhazraei, 2016; Li vd., 2018; Fattah-Alhosseini vd., 2020).

Katkı maddelerinin elektrolit iletkenliğini iki temel mekanizma aracılığıyla artırdığı ileri sürülmektedir. İlk olarak, katkı maddelerinin özgül elektriksel iletkenliklerinin mevcut elektrolitten daha yüksek olması, sistemin genel iletkenliğini artırmaktadır. İkinci olarak ise, eklenen partiküller yerel elektrik alanlarında artışa neden olarak daha hızlı ve yoğun elektriksel boşalmaları teşvik etmektedir. Ancak, bu katkı maddelerinin istenen kaplama özelliklerini sağlayabilmesi için doğru tipte ve uygun oranlarda seçilmesi gerekmektedir. Optimum katkı oranlarının dışında kalan değerlerde, elektrolitik ortam dengesiz hale gelmekte ve kaplama kalitesinde istenmeyen değişimler gözlenebilmektedir (Roknian vd., 2018). Ayrıca, elektrolite partikül eklenmesi oksidasyon sırasında akım yoğunluğunun lokal olarak bir bölgede toplanmasını engelleyerek yüzey boyunca daha dengeli bir dağılımın oluşmasına etki etmektedir. Bu durum, ilavesiz MAO kaplamalara kıyasla daha düzgün ve homojen yüzey morfolojilerinin elde edilmesini sağlar (Kaplan vd., 2021). Şekil 32 incelendiğinde, $B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN nanopartikülleri içeren elektrolitlerle elde edilen kompozit kaplamaların yüzeylerinde, gözeneklerin daha düzgün dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu kompozit kaplamalarda oluşan gözenek sayısı, Deney-1 şartında büyütülen katkısız MAO kaplamalara kıyasla belirgin biçimde daha azdır. Benzer şekilde, katkısız kaplamalarda gözlenen mikro çatlaklar, partikül ilaveli kaplamalarda çok daha az düzeyde olduğu görülmektedir.

Deney-2, Deney-3 ve Deney-4 şartlarında büyütülen katkılı oksit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, B_4C katkılı kompozit kaplamalarda oluşan mikro gözeneklerin, $B_5H_{10}NaO_{13}$ ve h-BN katkılı kaplamalara göre daha küçük boyutlara sahip olduğu dikkati çekmektedir. Bu durumun, B_4C partiküllerinin mikro gözenekleri kısmen doldurarak yüzeyde daha kompakt bir yapı oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir.

MAO kaplama sürecinde elektrolit çözelti içerisine ilave edilen nanopartiküller, kaplama yüzeyinin pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen önemli parametrelerdendir. Bu partiküller, kaplama sırasında yüzeydeki mikro deşarj davranışını değiştirerek hem

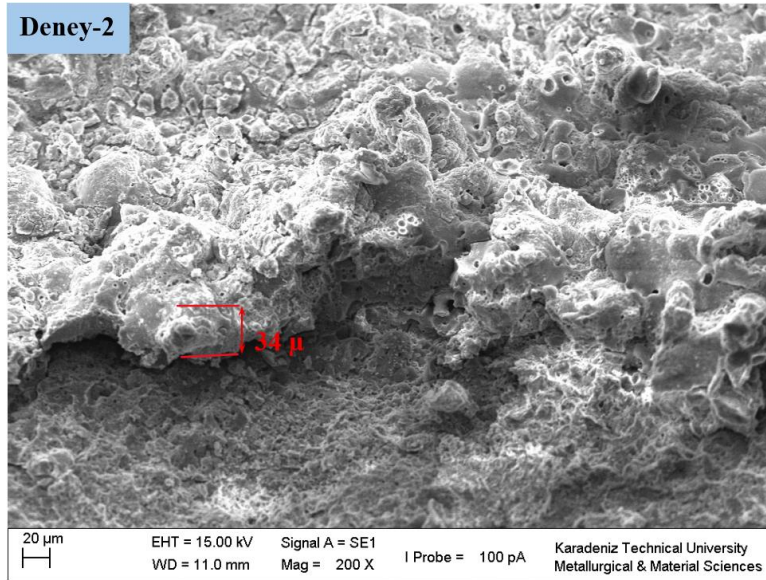
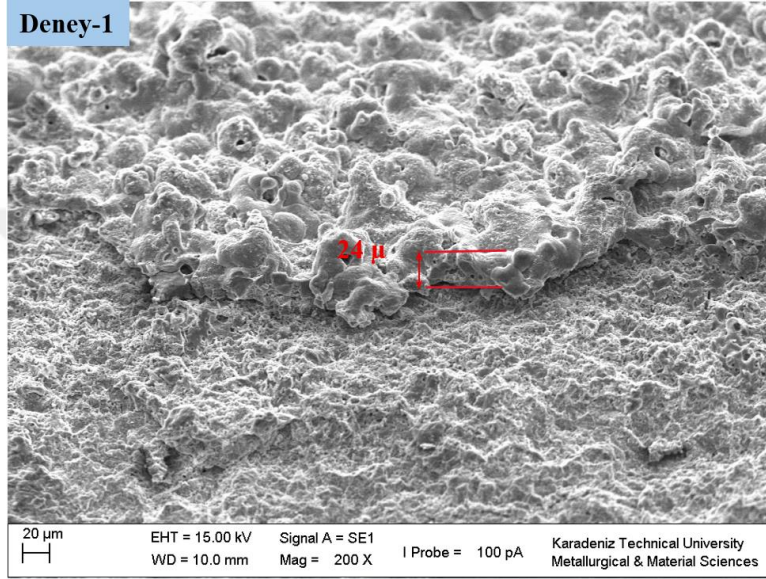
gözeneklerin hem de volkan görünümlü yapıların oluşumunu kontrol altına alabilmektedir. Optimum oranlarda ilave edilen nanopartiküller, kaplama yüzeyindeki mikro yapıların daha homojen dağılmasını sağlayarak yüzey pürüzlülüğünün azalmasına ve kaplama kalitesinin artmasına etki etmektedir (Shokouhfar ve Allahkaram, 2016; Raina ve Anand, 2018; Liv vd., 2018). Bununla birlikte, nanopartikül oranının artması belirli bir eşiğin üzerinde olduğunda, parçacıkların aglomerasyon eğilimi yüzeyde düzensiz bir yapı oluşmasına ve pürüzlülüğün yeniden artmasına neden olabilmektedir (Fattah-Alhosseini vd., 2020). Dolayısıyla, yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi, nanopartikül türü, boyutu ve konsantrasyonunun optimize edilmesiyle doğrudan ilişkilidir (Aliofkhazraei, 2016). MAO kaplamalara ait yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 12’ de verilmektedir. Tablo 12 incelendiğinde nanopartikül ilavesi ile büyütülen bütün kaplamaların Deney-1 şartında büyütülen katkısız MAO kaplamalara kıyasla belirgin biçimde daha az olduğu görülmektedir. Nano partikül katkılı kaplamalar kendi arasında değerlendirildiğinde B₄C katkılı kompozit kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün, B₅H₁₀NaO₁₃ ve h-BN katkılı kaplamalara göre daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 32’ de gösterilen SEM görüntüleri ile de uyumludur.

Tablo 12. MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri

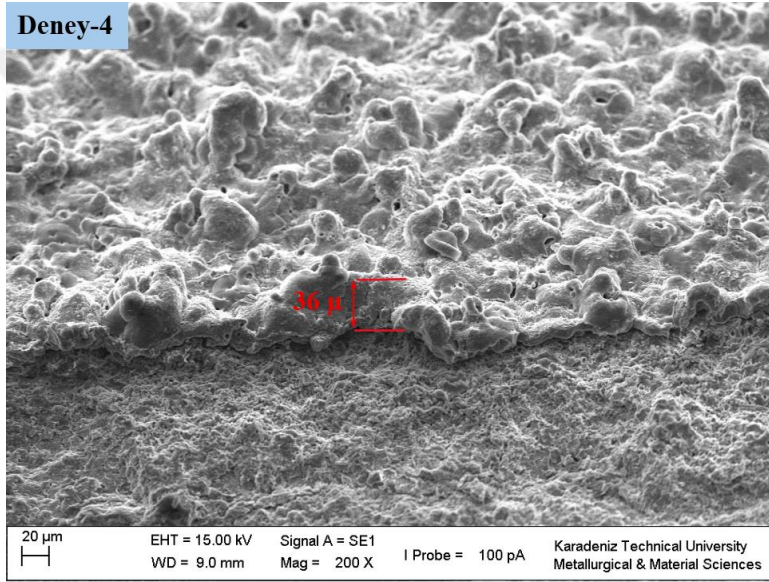
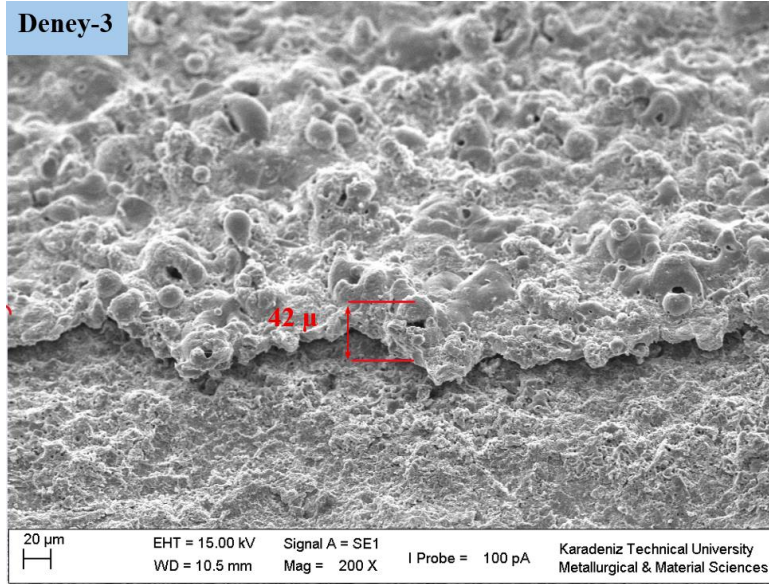
	Al 7075	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4
	Taban Malzeme	(Al ₂ O ₃)	(Al ₂ O ₃ :B ₅ H ₁₀ NaO ₁₃)	(Al ₂ O ₃ :B ₄ C)	(Al ₂ O ₃ :h-BN)
Ra (µm)	0,25	1,911 ± 0,19	1,676 ± 0,16	1,489 ± 0,12	1,224 ± 0,11

Kaplama kalınlığı; taban malzemenin kimyasal bileşimi, elektrolit yapısı, oksidasyon süresi, uygulanan akım yoğunluğu, frekans ve voltaj gibi birçok işlem parametresine bağlı olarak değişmektedir (Yerokhin vd., 1999; Roknian vd., 2018; Li vd., 2018). MAO yönteminde elektrolit içerisine ilave edilen nanopartiküllerde, kaplamanın kalınlık gelişimi üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu partiküller, işlem süresince mikro-deşarj davranışını değiştirerek yerel elektrik alan yoğunluğunu artırmakta ve oksitlenme hızını hızlandırmaktadır. Bunun sonucunda ise kaplama kalınlığında gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Liu (2022) tarafından yapılan çalışmada, Al 5052 alaşımı üzerine uygulanan MAO kaplamalarda elektrolite SiO₂ nanopartikülleri ilavesinin kaplama kalınlığını yaklaşık 16 µm’den 45 µm’ye yükselttiği bildirilmiştir. Benzer biçimde, Shang ve arkadaşları (2020) TiO₂ nanopartikülleri içeren elektrolitlerle gerçekleştirilen deneylerde nanopartikül oranının %0,5’ten %1’e çıkarılmasının, kaplama kalınlığını yaklaşık 72 µm’den 123 µm’ye

yükselttiğini rapor etmiştir. Bu artışın temel nedeni, nanopartiküllerin elektrolitin elektriksel iletkenliğini artırarak mikro-deşarj yoğunluğunu dengelemesi ve oksit tabakasının büyüme kinetiğini hızlandırmasıdır. Ancak nanopartikül miktarının aşırı artması veya partiküllerin aglomerasyon eğiliminin yükselmesi durumunda, mikro-deşarjların düzensizleştiği ve kaplama kalınlığının homojenliğinin azaldığı bildirilmektedir (Chang vd., 2019). Dolayısıyla optimum kaplama kalınlığı elde etmek için nanopartikül türü, boyutu ve konsantrasyon aralığı dikkatle seçilmelidir.



Şekil 33. MAO kaplamalara ait kesit SEM görüntüleri

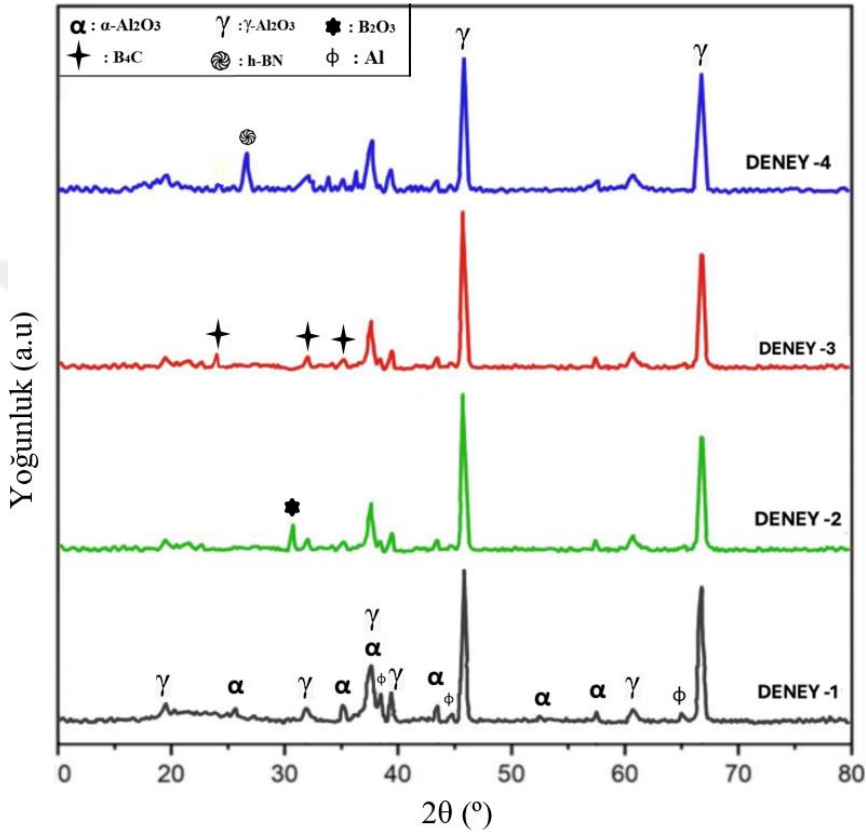


Şekil 33. MAO kaplamalara ait kesit SEM görüntüleri (devam)

Kesit SEM görüntülerin alınabilmesi için sıvı azot içerisinde yaklaşık 20 dk bekletilen MAO kaplamalar gevrek olarak kırılmış ve ölçüm için hazır hale getirilmiştir. Kaplama yüzeylerinde gevrek kırılmadan kaynaklı farklılıklar olduğu SEM kesit görüntülerinde görülmektedir.

Şekil 33' de verilen kesit görüntüler incelendiğinde, MAO yöntemiyle Deneý-1 şartında büyütülen Al_2O_3 kaplamanın kalınlığının $\approx 24 \mu$, Deneý-2 şartında büyütülen $B_5H_{10}NaO_{13}$ katkıli Al_2O_3 kompozit kaplamanın kalınlığının $\approx 34 \mu$, Deneý-3 şartında büyütülen B_4C katkıli Al_2O_3 kompozit kaplamanın kalınlığının $\approx 42 \mu$ ve Deneý-4 şartında büyütülen h-BN katkıli Al_2O_3 kompozit kaplamanın kalınlığının $\approx 36 \mu$ olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, elektrolitik çözeltiye nanopartikül ilavesinin kaplama kalınlığını belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Özellikle nanopartikül katkıli

kompozit kaplamalar karşılaştırıldığında, B₄C takviyeli kompozit kaplamaların, B₅H₁₀NaO₁₃ ve h-BN katkılı kaplamalara kıyasla daha kalın bir oksit tabaka oluşturduğu görülmektedir. Bu durumun, elektrolit içerisine eklenen B₄C nanopartiküllerinin kaplama başlangıç voltajını B₅H₁₀NaO₁₃ ve h-BN katkılı kaplamalara göre daha fazla düşürmesi ve buna bağlı olarak işlem süresi içinde daha kalın ve homojen kaplama oluşumuna imkan sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



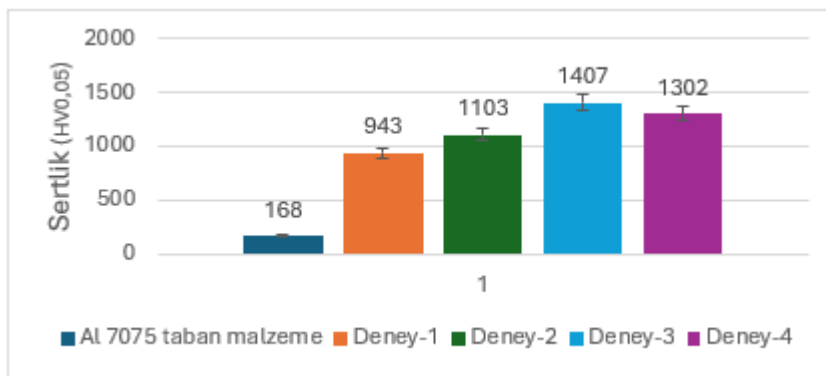
Şekil 34. Al 7075 ve büyütülen MAO kaplamalara ait XRD grafiği

Literatürde yapılan çalışmalar, MAO yöntemiyle alüminyum alaşımlarının yüzeyinde büyütülen kaplamaların temel kristal fazlarının α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ olduğu bildirmektedir. (Muhaffel vd., 2021). Şekil 34' de verilen XRD analiz sonuçları incelendiğinde, elde edilen tüm kaplamalarda bu iki fazın baskın olarak oluştuğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, analizlerde tespit edilen Al pikleri, X-ışınının kaplama tabakasına nüfuz ederek taban malzemeye ulaşması ve oradan geri yansımalarıyla ilişkilendirilmektedir (Ma vd., 2022; Jin vd., 2022). Nanopartikül katkılı olarak büyütülen Deney-2, Deney-3 ve Deney-4 numunelerinde ise sırasıyla B₅H₁₀NaO₁₃, B₄C ve h-BN fazlarının pikleri, α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazlarıyla birlikte gözlemlenmiştir. Bu bulgu, literatürde bildirilen sonuçlarla uyumludur (Roknian vd., 2018; Fattah-Alhosseini vd., 2020). Elektrolit içerisine nanopartikül ilavesinin, sistemin başlangıç voltajını

düşürdüğü ve kaplama sürecinin daha uzun bir zaman diliminde ilerlemesine neden olduğu görülmektedir. Ayrıca, elde edilen XRD desenlerinde yeni oksit fazların bulunmaması, MAO işlemi sırasında Al_2O_3 matrisi ile $B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN partikülleri arasında herhangi bir reaksiyon oluşmadığını göstermektedir. Sonuçlar, nanopartiküllerin kaplama yapısına etkin biçimde entegre olduğunu ve Al_2O_3 tabakasıyla birlikte stabil bir şekilde dahil edildiğini göstermektedir.

4.2. Sertlik ve Aşınma Test Sonuçları

Al 7075 alaşımı taban malzemeler ve üzerine MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların sertlik değerleri, mikrosertlik ölçüm cihazı ile belirlenmiş olup, sonuçlar Şekil 35’ de sunulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalara göre, MAO kaplamaların sertliğini belirleyen en önemli faktörler arasında kaplamanın kompakt yapısı ve faz bileşimi ön plana çıkmaktadır (Krishna vd., 2015; Martin vd., 2019; Ma vd., 2022). Kaplamanın kompakt yapısının, sertlik değerleriyle doğru orantılı olduğu belirtilmiştir. Al 7075 taban malzemesi üzerine büyütülen tüm kaplamalarda $\alpha-Al_2O_3$ ve $\gamma-Al_2O_3$ fazları tespit edilmiş olup, bu fazların baskın olması kaplamanın kompakt yapısının sertlik üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, en küçük gözeneklere sahip olan Dene-3 şartında en yüksek sertlik değerleri (1407 HV) ölçülmüştür. Ayrıca, Dene-3 kaplamalarının yüksek sertliğine, yüzey özelliklerinin yanı sıra kaplama kalınlığının da optimum seviyede olmasının katkı sağladığı düşünülmektedir.

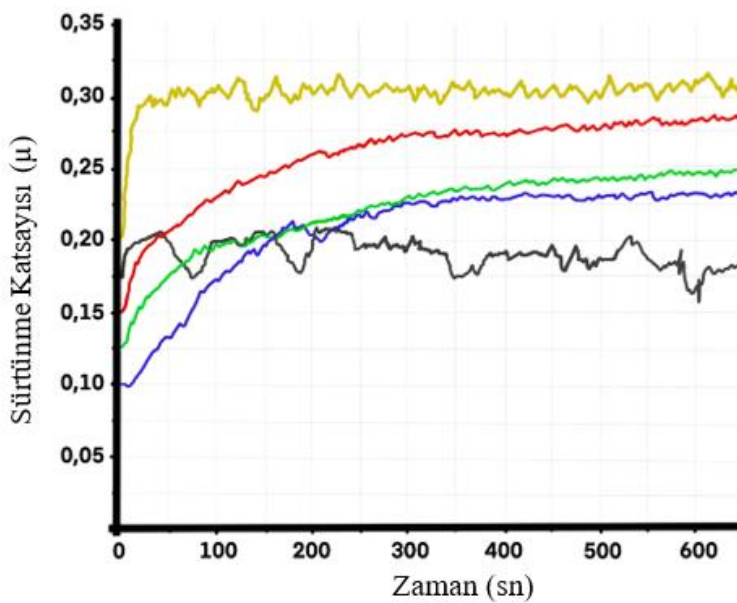


Şekil 35. Al 7075 alaşımı ve MAO yöntemi ile büyütülen kaplamalara ait sertlik değerleri

Al 7075 alaşımı taban malzemesi ve bu malzeme üzerine büyütülen MAO kaplamaların aşınma performansları, atmosfer koşullarında ve oda sıcaklığında

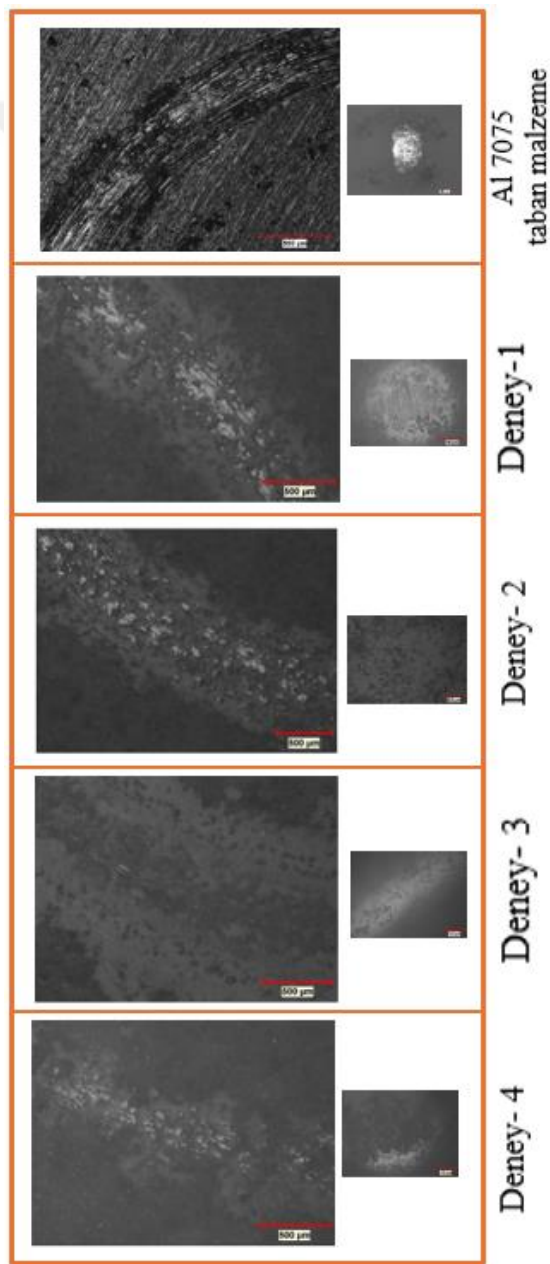
incelenmiştir. Kaplama uygulanmamış Al 7075 numunelerinin aşınma izleri ve sürtünme katsayısı (μ)-zaman ilişkileri Şekil 36'da sunulmuştur.

MAO işlemi uygulanmamış Al 7075 alaşımının aşınma yüzeyinde, kayma yönüne paralel olarak uzanan belirgin oluklar ve çizik izleri gözlemlenmiştir. Aşınmış yüzeydeki plastik deformasyon izleri, malzemenin yüksek aşınma oranına maruz kaldığını ve aşınma mekanizmasının temel olarak abrazyon kaynaklı olduğunu göstermektedir. Al_2O_3 bilyasının yüzeyindeki pürüzler, Al 7075 alaşımının yüzeyi üzerinde yoğun bir sürtünme etkisi oluşturarak çizik izlerinin meydana gelmesine yol açmıştır. Ayrıca, Al_2O_3 bilyasının Al 7075 alaşımına kıyasla çok daha yüksek sertliğe sahip olması, kayma sürecinde taban malzeme yüzeyinde belirgin plastik deformasyonların oluşmasına neden olmuştur. Bu deformasyonların etkisiyle yüzeye yakın bölgelerde dislokasyon yığılmaları meydana gelmiş, bu durum ise pasif oksit tabakasının kırılmasına ve mikroçatlakların başlama noktalarını oluşmasına etki etmiştir. Mikroçatlaklar, ilerleyen aşınma süreci boyunca yüzeye doğru büyüyerek plastik deformasyonun etkisiyle aşınma yüzeyine yayılmıştır. Bunun sonucunda, Al 7075 alaşımının yüzeyinde ince ve uzamış aşınma tabakaları oluşmuş, bu tabakalar daha sonra parçalanarak ayrılmıştır. Ayrılan tabaka parçaları, Al_2O_3 bilyası ile temas bölgesinde küçük aşındırıcı taneciklere dönüşmüş ve bu durum üç cisimli abrazyonun gelişimine neden olmuştur. Dolayısıyla, Al 7075 alaşımının aşınma davranışının temel olarak delaminasyon ve abrazyon mekanizmalarının birleşimiyle gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 36. Al 7075 alaşımı ve Al 7075 üzerine MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların sürtünme katsayısı (μ)-zaman grafiği

Taban malzeme üzerine büyütülmüş oksit kaplamaların aşınma davranışları büyük ölçüde kaplama ile taban malzeme arasındaki adezyon kuvvetine bağlıdır (Polmear vd., 2017). Düşük adezyon değerine sahip kaplamalar, taban malzemeden ayrılmaya daha yatkın olur. Şekil 36’de sunulan sürtünme katsayısı (μ)-zaman grafiklerinde, testin başında kararsız bir sürtünme davranışı gözlemlenmiştir. MAO yöntemiyle kaplanan tüm örneklerde, başlangıçtaki yüksek ve düzensiz sürtünme katsayısı, kaplamanın en dış tabakasında yer alan gözenekli bölgeden kaynaklanmaktadır (Ma vd., 2012; Zhang vd., 2019). Bu dış gözenekli bölge aşındıkça, altında yer alan fonksiyonel ara katman devreye girer ve sürtünme katsayısının kararlı bir seviyeye ulaşmasını sağlar.

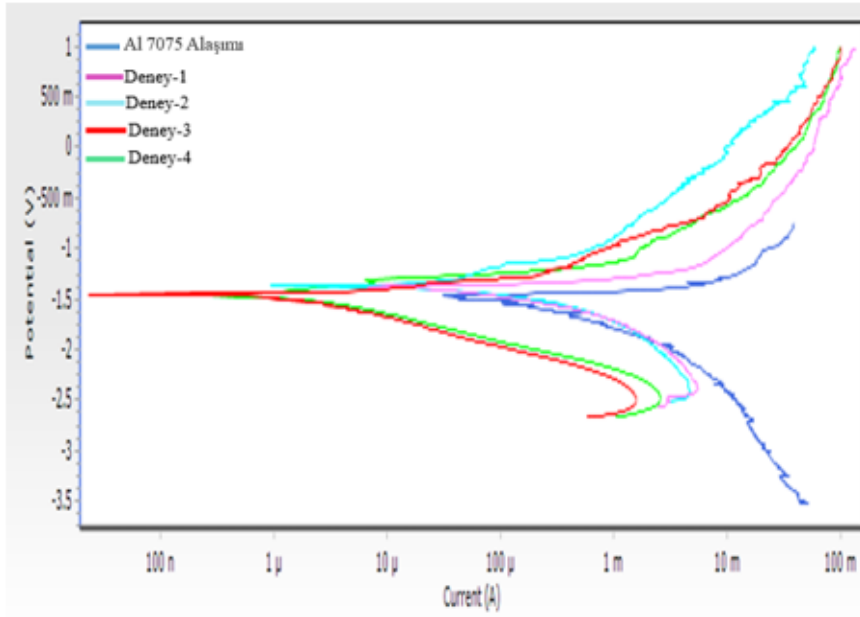


Şekil 37. Al 7075 alaşımı ve Al 7075 üzerine MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların aşınma izleri ve karşı yüzey görüntüleri

XRD ve mikroyapı analizleri incelendiğinde, Deney-3 şartlarında büyütülen kaplamaların diğer deney koşullarına kıyasla daha kalın, gözenek boyutu küçük, homojen dağılımlı ve daha yüksek sertlikte olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Deney-3 kaplamalarında aşınma izlerinin daha dar ve daha sık olmasını açıklamaktadır. Öte yandan, sürtünme katsayısının yüksek olduğu koşullarda, kaplamadan kopan oksit parçacıklarının yüzeyde abrazif etki yaparak sürtünme katsayısını artırdığı düşünülmektedir (Darband vd., 2017; Ma vd., al., 2022). Şekil 37’de gösterilen karşı yüzey görüntüleri, aşınma sırasında taban malzeme parçalarının ayrıldığını ve bu parçaların karşı yüzeye transfer olduğunu ortaya koymaktadır. Karşı yüzeye transfer olan bu parçalar, kaplama yüzeyini sürekli aşındırmakta ve hem taban malzeme hem de kaplama üzerinde hasara yol açmaktadır (Polmear vd., 2017).

4.3. Korozyon Test Sonuçları

Al7075 alaşımının ve MAO kaplamalarının korozyon davranışları, %3,5 NaCl çözeltisi ortamında yapılan potansiyodinamik polarizasyon testleri ile incelenmiştir. Elde edilen polarizasyon eğrileri, malzemenin korozyon direncini ve kaplama işleminin verimliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 38’de bu testlerin eğrileri, Tablo 13’ de ise korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri sunulmaktadır. Şekil 38’deki sonuçlara göre, tüm kaplama koşullarında uygulanan örneklerin I_{corr} değerleri, kaplamasız Al7075 alaşımına göre daha düşük bulunmuştur. Bu, kaplamaların malzemeyi korozyona karşı etkili şekilde koruduğunu göstermektedir. Ayrıca, MAO işlemine tabi tutulan kaplamaların, Al7075 alaşımının korozyon davranışını etkin bir şekilde iyileştirdiği ve bu iyileşmenin, kaplamasız örneklerle karşılaştırıldığında daha düşük korozyon akım yoğunluğu ve daha pozitif korozyon potansiyeli ile doğrulandığı söylenebilir. MAO kaplamalı örnekler, yüzeylerinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak, daha yüksek bir korozyon direnci sunmaktadır.



Şekil 38. Al 7075 taban malzeme ve MAO kaplamalara ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Şekil 38’ de elektrolite partikül eklenmesiyle elde edilen kaplamaların korozyon akım yoğunluğunun azaldığı ve korozyon potansiyelinin pozitif yönde kaydığı gözlemlenmiştir (Wang vd., 2024b). Bu durum, partiküllerin kaplama yapısına entegre olarak korozyon direncini artırdığını ve özellikle seramik partiküllerinin kaplama tabakasının yoğunluğunu artırarak gözenekliliği azalttığını düşündürmektedir. Bu yapı, kaplamaların korozyona karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır.

Partikül ilavesi olmadan MAO işlemiyle büyütülen kaplamalar, Şekil 32’de gösterildiği gibi daha büyük gözeneklere ve daha gevşek bir yapıya sahiptir. Bu özellik, kaplamaların koruyucu etkisini azaltıp, korozyon direncini düşürebilmektedir. Gözeneklerin büyüklüğü, korozyon ajanlarının kaplama yapısına daha kolay nüfuz etmesine neden olur, bu da taban malzemenin korozyon hızının artmasına yol açmaktadır (Lu vd., 2018; Chai vd., 2023; Wang vd., 2024b). Bunun aksine, elektrolite partikül ilave edilerek hazırlanan MAO kaplamaları daha homojen ve yoğun bir yapıya sahip olduğu Şekil 32 ve Şekil 33’ de görülmektedir. Nanopartiküllerin ilavesi, kaplama yüzeyini daha düzgün ve gözeneksiz hale getirmekte, kalınlığını artmasına etki etmektedir. Böylelikle korozyon direnci de artmaktadır. Partikül ilavesi, ayrıca kaplamanın mekanik ve kimyasal dayanıklılığını artırarak daha uzun ömürlü ve dayanıklı kaplamaların elde edilmesini de sağlamaktadır (Lu vd., 2018; Chai vd., 2023).

Elektrolit içerisine partikül eklenmesi, kaplama yüzeyinde homojen bir dağılım sağlayarak mikro yapısal kusurları azaltır ve böylece korozyon ajanlarının kaplama tabakasından geçişini engeller. Ayrıca partiküller, kaplamanın sertliğini ve aşınma

direncini artırarak, korozyon ajanlarının etkilerini sınırlayan bir bariyer işlevi görür. Bu mekanizma, korozyon direncini önemli ölçüde artırır.

Korozyon potansiyelinin yüksek olması ve korozyon akım yoğunluğunun düşük olması, metalin korozyon direncinin güçlü olduğunu gösterir (Liu vd., 2022; Zhang vd., 2024; Wang vd., 2024b). Bu bağlamda, kompozit kaplamaların korozyon direncinin, Al7075 alaşımına göre arttığı Şekil 38’ de gözlemlenmiştir. Kompozit kaplama ve taban malzemenin polarizasyon eğrilerinin katodik bölgeleri benzer özellikler göstermektedir. Bu benzerlik, katodik bölgedeki elektrokimyasal reaksiyonların esasen elektrolit çözeltisindeki oksijen tarafından kontrol edilmesinden kaynaklanmaktadır (Zhang vd., 2024). Ayrıca, B, Ni ve Si gibi elementlerin oksijenle kolayca reaksiyona girerek oksit film tabakaları oluşturabilme yetenekleri, korozyon direncinin artmasında önemli bir rol oynamaktadır (Adesina vd., 2020; Zhang vd., 2024). Bor katkılı kompozit kaplamalar, yüzeyde oluşan oksit tabakasının korozif ortamdaki iyonların kaplama yüzeyine nüfuz etmesini engelleyen bir bariyer oluşturmasını sağlamaktadır. Bu bariyer, metal yüzeyinin doğrudan korozif ortamla temasını engellemiş olur böylelikle korozyon direncinin artmasına etki etmiş olur. Ayrıca, Bor katkılı kaplamalar yüksek sertlik ve aşınma direnci ile de tanınır, bu da kaplamaların uzun ömürlü ve dayanıklı olmasına katkı sağlar.

MAO kaplama ve kaplamasız Al 7075 örneklerinin korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri, Tablo 13’ de sunulmaktadır. Kaplanmış tüm örneklerin korozyon potansiyeli, kaplanmamış örnekten daha yüksek olup, bu durum MAO kaplamalarının korozyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. MAO kaplamalı örnekler arasında, nanopartikül ilavesi yapılan kaplamalar (Deney-2, 3, 4), nanopartikül eklenmeyen MAO kaplamasına (Deney-1) kıyasla daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Özellikle, B4C nanopartikül içeren elektrolit ile kaplanan ve Deney-3 olarak etiketlenen örnekler, yoğun ve kusurlardan arınmış tabakaları ile en iyi korozyon direncini sunmaktadır.

Tablo 13. Al 77075 taban malzeme ve MAO kaplamalara ait E_{corr} ve I_{corr} Değerleri

	E_{corr} (V)	I_{corr} (μ .A/ cm^2)
Al 7075 Alaşımı	-1,822	2,856
Deney-1	-1,465	1,158
Deney-2	-1,369	0,720
Deney-3	-1,292	0,360
Deney-4	-1,315	0,995

Sonuç olarak, Al 7075 alaşımına etki eden korozif çözeltiler, MAO kaplamalar tarafından etkili bir şekilde engellenmektedir (Li vd., 2021). Deney-3 şartında büyütülen kaplamanın, diğer deney koşullarındaki kaplamalardan daha yüksek korozyon direncine sahip olmasının temel nedeni, yoğun iç katman yapısı ve daha az çatlak içermesidir. Yüzeydeki büyük çaplı gözenekler ve mikro çatlaklar, kaplamanın kesit görüntüsünde belirtilen fonksiyonel ana bölge olarak tanımlanan yoğun iç tabakanın, Al alaşımını korumada kritik bir rol oynadığını ve dış gözenekli katmanın, mikro gözenekler ve çatlaklar boyunca korozif çözeltinin kolayca nüfuz etmesine olanak sağladığını göstermektedir. Kompozit kaplamaların korozyon mekanizması, kaplamadaki partiküllerin, korozyon çözeltisinin difüzyon yolunu engelleyerek, alt tabakaya geçen agresif korozyon çözeltisinin etkisini azaltmaya yönelik etkili bir bariyer işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır (Zhao vd., 2017; Chen vd., 2017; Li vd., 2021).

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve üstün mekanik dayanım gibi özellikleriyle öne çıkan Al 7075 alaşımının, özellikle aşınma direnci, tribolojik performans ve korozyon dayanımının iyileştirilmesi amacıyla Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemi kullanılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Al 7075 alaşımı üzerine büyütülen bor katkılı ($B_5H_{10}NaO_{13}$, B_4C ve h-BN) kompozit kaplamaların yapısal özellikleri ile aşınma ve korozyon davranışları incelenmiştir. Çalışmada elde edilen MAO kaplamalara ait performans bulguları aşağıda sunulmaktadır.

- ✓ MAO yöntemi ile Al 7075 alaşımı yüzeyinde büyütülen kaplamaların, MAO yönteminin kendi doğası gereği oluşan mikro boşalmalardan (microdischarge) kaynaklı pürüzlü bir yüzey morfolojisine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ XRD grafiği incelendiğinde Al 7075 alaşımlarının bileşiminden bağımsız olarak α - Al_2O_3 ve γ - Al_2O_3 baskın fazları tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığı fazla olan Deney-3 şartında α - Al_2O_3 fazının daha yoğun olduğu dikkat çekmektedir. Bu durumun, yüzeydeki gözenek boyutlarının düşük ve kaplama kalınlığının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ✓ Deney-3 ve Deney-4 şartlarında sertliğin de en yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. En küçük çapta gözeneklere ve en yüksek kaplama kalınlığına sahip olan Deney-3 şartında en yüksek sertlik değeri tespit edilmiştir.
- ✓ Aşınma testlerinde ilk 50 saniyelik sürede Al 7075 taban malzeme düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir. Sürtünme katsayısının düşük olmasının sebebi Al 7075 alaşımında bulunan doğal pasif oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ✓ Sertlik üzerinde etkin olan α - Al_2O_3 faz yoğunluğunun fazla olduğu Deney-3 şartlarında büyütülen kaplamaların yoğun yapısının aşınma yönü boyunca darbeleri önlediği ve sonuç olarak aşınmış yüzeyde oldukça düşük delaminasyonlara neden olduğu belirlenmiştir. Bu durumun kaplamanın yüksek sertliği, homojen ve yoğun yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- ✓ Korozyon testi verilerine göre Al 7075 taban malzemesi yüzeyinde büyütülen kaplamalarda en düşük korozyon akım yoğunluğu (0,360 A/cm²) Deney-3 şartlarında, en yüksek akım yoğunluğu ise (1,158 A/cm²) Deney-1 şartlarında elde edilmiştir.

Sonuç olarak;

MAO kaplama sürecinde elektrolitik çözelti içerisine ilave edilen partiküller kaplama yapısına dahil olarak taban malzemenin sertliğinin artmasına, aşınma ve korozyon dirençlerinin iyileştirilmesine, kaplamanın istenilen özellikleri kazanmasına etki etmektedir.



KAYNAKÇA

- Adesina, O.S., Obadele, B.A., Farotade, G.A., Isadare, D.A., Adediran, A.A. ve Ikubanni, P.P. (2020). Influence of phase composition and microstructure on corrosion behavior of laser based Ti-Co-Ni ternary coatings on Ti-6Al-4V alloy. *Jornal of Alloys and Compounds*, 827, 154245.
- Aliofkhazraei, M. (2016). *Handbook of Nanoparticles*. Tehran, İran: Springer Reference. doi:10.1007/978-3-319-15338-4.
- ASM International. (2019). *7075 and Alclad 7075: High-strength structural alloy*. ASM Handbook. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02b.a0006737>
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.
- Becerik, D. A., Ayday, A., Kumruoğlu, L. C., Kurnaz, C. ve Özel, A. (2011). The effects of Na₂SiO₃ concentration on the properties of plasma electrolytic oxidation coatings on 6060 aluminum alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1426-1430.
- Bruce, R.W. (2012). *Handbook of Lubrication and Tribology, Theory and Design*, (Second Edition), CRC Press, New York.
- Chai, Y., Yan, J., Wang, C. ve Mei, L. (2023). Effect of electrical parameters on the growth and properties of 7075 aluminum alloy film based on scanning micro-arc oxidation with mesh electrode. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 988-998. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.020>
- Chang, H., Guo, X.-g., Wen, L. ve Jin, Y. (2019). Influence of SiC nanoparticles on microstructure and corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings formed on TC4 alloy. *Journal of Materials Engineering*, 47(3), 109-115. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000766>
- Chen, W., Wang, Z., Sun, L. ve Lu, S. (2015). Research of growth mechanism of ceramic coatings fabricated by micro-arc oxidation on magnesium alloys at high current mode. *Jornal of Magnesium and Alloys*, 3, 253-257.
- Chen, Q., Jiang, Z. ve Tang, S. (2017). Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties. *Applied Surface Science*, 423, 939-950.

- Cheng, T., Chen, Y. ve Nie, X. (2013). Surface morphology manipulation and wear property of bioceramic oxide coatings on titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 215, 253-259.
- Chi, J., Zhang, H., Song, S., Zhang, W., He, X., Nong, Z., Cui, X., Liu, T. ve Man, T. (2025). The impact of pre- and post-treatment processes on corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on Mg alloys: A systematic review. *Materials*, 18(3), 723. <https://doi.org/10.3390/ma18030723>
- Choi, J., Mazumder, J. ve Rice, A. (2020). Innovative Additive Manufacturing Process for Successful Production of 7000 Series Aluminum Alloy Components Using Smart Optical Monitoring System. *SAE Technical Paper*, 2020-01-1300.
- Coşkun, K. (2002). *Hadde Alüminyum Alaşımların Uçaklarda Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Covino Jr. (2003). *ASM Handbook: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, 13A. ASM International
- Czerwinski, F. (2024). Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Material Science*, 59, 14847–14892. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09890-0>
- Çaydaş, U. ve Çelik, M. (2017). AA 7075-T6 Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Sıcaklığı ve İlerleme Kuvvetine Etkilerinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 419-425.
- Çubuk, H.S., Kurt, G. ve Çavdar, U. (2022). Investigation of the Effects of Different Welding Methods Applied on Aluminum 7075 Material on the Mechanical and Microstructure Structure Properties of the Joint Zone. *Turkish Journal of Engineering Research and Education*, 1(2), 120-128.
- Dada, M. ve Popoola, P. (2024). Recent advances in joining technologies of aluminum alloys: a review. *Discovery Materials*, 4, 86. <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00155-w>
- Darband, G.B., Aliofkhaeaei, M., Hamghalam, P. ve Valizade, N. (2017). Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(1), 74-132.
- Demirci, E.E. (2014). *Manyetik Sıçratma (Cfubms) ve Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Teknikleri İle Ti6Al4V Alaşımının Dupleks Yüzey Modifikasyonu, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.*
- Dervishi, E., McBride, M., Edwards, R., Gutierrez, M., Li, N., Buntyn, R. ve Hooks, D.E. (2022). Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a

- function of anodizing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128652. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128652>.
- Devlin, M.T. (2022). Tribology and Wear Modeling and Testing. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 4, 589-595.
- Deyab, M. A., Abd El-Rehim, S. S., Hassan, H. H. ve Shaltot, A. M. (2020). Impact of rare earth compounds on corrosion of aluminum alloy (AA6061) in the marine water environment. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153428.
- Duan, Z., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Liu, X., Li, R., Said, Z., Debnath, S. ve Sharma, S. (2023). Mechanical behavior and semiempirical force model of aerospace aluminum alloy milling using nano biological lubricant. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0720-4>
- During, E.D.D. (2018). Corrosion Atlas Book, Elsevier, Netherland, Section A-B
- Dursun, T. ve Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials and Desing* (1980-2015), 56, 862-871. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- El-Batahgy, A.M., Klimova-Korsmik, O., Akhmetov, A. ve Turichin, G. (2021). High-Power Fiber Laser Welding of High-Strength AA7075-T6 Aluminum Alloy Welds for Mechanical Properties Research. *Materials*, 14(24), 7498. <https://doi.org/10.3390/ma14247498>
- Fattah-Alhosseini, A., Chaharmahali, R. ve Babaei, K. (2020). Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(3), 799-818.
- Forno, A. D., Bestetti, M., Lecis, N., Trasatti, S. P. ve Trueba, M. (2011). Anodic oxidation and silane treatment for corrosion protection of AM60B magnesium alloy. *Materials Science Forum*, 690, 413-416.
- Friedrich, H.E. ve Mordike, B.L. (2012). *Magnesium Technology-Metallurgy, Design Data, Applications*. Springer, Berlin.
- Gamba, M., Cristoforetti, A., Fedel, M., Ceriani, F., Ormellese, M. ve Brenna, A. (2025). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on aluminum alloy 2024: A review of mechanisms, processes, and corrosion resistance enhancement, *Applied Surface Science Advances*, 26, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100707>
- Gao Y., Xiao S., Wu H., Wu C., Chen G., Yin Y. ve Chu, P.K. (2023). Effect of h-BN nanoparticles incorporation on the anti-corrosion and anti-wear properties of

- micro-arc oxidation coatings on 2024 aluminum alloy. *Ceramics International*, Part A, 49, 23, 37475-37485.
- Georgantzia, E., Gkantou, M. ve Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research,. *Engineering Structures*, 227, 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>.
- Guan, F., Duan, J., Zhai, X., Wang, N., Zhang, J., Lu, D. ve Hou, B. (2020). Interaction between sulfate-reducing bacteria and aluminum alloys Corrosion mechanisms of 5052 and Al-Zn-In-Cd aluminum alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 36, 55-64.
- Huda, Z. ve Edi, P. (2013). Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review. *Materials and Design* (1980-2015), 46, 552-560.
- Hutchings, I. M. ve Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Hussein, R.O., Nie, X. ve Northwood, D.O. (2013). An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing. *Electrochimica Acta*, 112, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.08.137>
- İlhan, R. ve Feyzullohoğlu E. (2021). Investigation of adhesive wear properties of glass fiber reinforced polyester composites having different chemical compositions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 236(1), 156-173. doi:10.1177/13506501211005941
- Jayakumar, A., Radoor, S., Kim, J.T., Rhim, J.W., Parameswaranpillai, J. ve Siengchin, S. (2023). *Lightweight and sustainable materials-a global scenario*. *Lightweight and Sustainable Composite Materials* (ss 1-18), Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95189-0.00001-9>
- Jin, S., Ma, X., Wu, R., Wang, G., Zhang, J., Krit, B., Betsofen, S. ve Liu, B. (2022). Advances in micro-arc oxidation coatings on Mg-Li alloys. *Applied Surface Science Advances*, 8, 100219.
- Jinguang, L., Yan, Y., Hongju, D., Minmin, L., Junfei, S., Faping, H., Xiaoming, X. ve Xiaodong, P. (2020). Microstructure and corrosion behavior of as-extruded Mg-6.5Li-xY-yZn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 823, 153839.
- Jones, T. L., Grendahl, S. M., Doherty, K. J., Considine, T. A. ve Placzankis, B. E. (2017). Scientific characterization of the aluminum alloy 7017 as a replacement for the aluminum alloy 7039 in lightweight armor systems. *U.S. Army Research Laboratory*. Retrieved from

- Kaplan, E., Şüküroğlu, E. E. ve Çuvalcı, 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.
- Kato, K. ve Adachi, K. (2000). *Wear mechanisms*. In Modern tribology handbook: volume one: principles of tribology (pp. 273–300). CRC press.
- Kaufman, J. G., Anderson, K. ve Weritz, J. (2003). *Properties of Pure Aluminum*. ASM International.
- Khalid, M.Y., Umer, R. ve Khan, K.A. (2023). Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*, 20, 101372. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372>.
- Khalid Mohammed Ridha, W., Reza Kashyzadeh, K. ve Ghorbani, S. (2023). Common Failures in Hydraulic Kaplan Turbine Blades and Practical Solutions. *Materials*, 16(9), 3303. <https://doi.org/10.3390/ma16093303>
- Kores, S., Strmsek, S., Voncina, M. ve Medved, J. (2023). Innovative Approaches in Development of Aluminium Alloys for Packaging Industry. *TMS Annual Meeting & Exhibition*, 535–541.
- Kousis, C., Keil, P., McMurray, H.N. ve Williams, G. (2022). The kinetics and mechanism of filiform corrosion affecting organic coated Mg alloy surfaces. *Corrosion Science*, 206, 110477.
- Lepicka, M., Ciszewski, A., Golak, K. ve Grądzka-Dahlke, M. (2019). A Comparative Study of Friction and Wear Processes of Model Metallic Biomaterials Including Registration of Friction-Induced Temperature Response of a Tribological Pair. *Materials*, 12(24), 4163. <https://doi.org/10.3390/ma12244163>
- Li, X., Dong, C., Zhao, Q., Pang, Y., Cheng, F. ve Wang, S. (2018). Characterization of microstructure and wear resistance of PEO coatings containing various microparticles on Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 1642-1653.
- Li, Z., Cai, Z., Cui, X., Liu, R., Yang, Z. ve Zhu, M. (2021). Influence of nanoparticle additions on structure and fretting corrosion behavior of micro-arc oxidation coatings on zirconium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 410, 126949. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126949>
- Li, G., Ma, F., Liu, P., Qi, S., Li, W., Zhang, K. ve Chen, X. (2023). Review of micro-arc oxidation of titanium alloys: Mechanism, properties and applications. *Journal*

- of *Alloys and Compounds*, 948, 169773.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169773>
- Li, N., Wang, H., Liu, Q., Hao, Z., Xu, D., Chen, X., Cui, D., Xu, L. ve Feng, Y. (2025). Review of Preparation and Key Functional Properties of Micro-Arc Oxidation Coatings on Various Metal Substrates. *Coatings*, 15(10), 1201.
<https://doi.org/10.3390/coatings15101201>
- Linjie, D., Xi, L., Jiexi, L., Chuanqiang, L., Yong, D. ve Zhengrong, Z. (2021). Corrosion behavior of a eutectic Mg–8Li alloy in NaCl solution. *Electrochemistry Communications*, 129, 107087
- Liu, S., Chen, J., Zhang, D., Wang, Y., He, Z. ve Guo, P. (2022). Properties of Micro-Arc Oxidation Coatings on 5052 Al Alloy Sealed by SiO₂ Nanoparticles. *Coatings*, 12(3), 373. <https://doi.org/10.3390/coatings12030373>
- Lu, X., Blawert, C., Kainer, K. U., Zhang, T., Wang, F. ve Zheludkevich, M. L. (2018). Influence of particle additions on corrosion and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy. *Surface and Coatings Technology*, 352, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.003>
- Lofaj, F. ve Mikula, M. (2021). Wear and Erosion Resistant Ceramic Coatings. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, 2, 425-439.
- Luo, j., Luo, H., Li, S., Wang, R. ve Ma, Y. (2020). Effect of pre-ageing treatment on second nucleating of GPII zones and precipitation kinetics in an ultrafine grained 7075 aluminum alloy. *Materials & Design*, 187, 108402.
- Ma, K.J., Bosta, M.M.S.A. ve 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.
- Ma, X., Jin, S., Wu, R., Ji, Q., Hou, L., Krit, B. ve Betsofen, S., 2022. Influence alloying elements of Al and Y in Mg-Li alloy on the corrosion behavior and wear resistance of microarc oxidation coatings. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128042.
- Ma, J. (2023). *Additive Manufacturing of Aluminum Alloys*. Springer Handbook of Additive Manufacturing. Springer Handbooks. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_42
- Martin, J., Nomine, A.V., Stef, J., Nomine, A., Zou, J.X., Henrion, G. ve Grosdidier, T. (2019). The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy. *Material and Desing*, 178. 107859

- Medina, S., Acuña-Rivera, M., Castellanos, S. ve Castro, K. (2025). Evaluation of Machining Parameters in Turning Al7075-T6 Aluminum Alloy Using Dry, Flooded, and Cryogenic Cutting Fluid Conditions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(10), 328. <https://doi.org/10.3390/jmmp9100328>
- Muhaffel, F., Baydogan, M. ve Cimenoglu, H. (2021). A study to enhance the mechanical durability of the MAO coating fabricated on the 7075 Al alloy for wear-related high temperature applications, *Surface and Coatings Technology*, 409, 126843. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126843>.
- Nadimi, M., Dehghanian, C. ve Etemadmoghadam, A. (2022). Influence of SiO₂ nanoparticles incorporating into ceramic coatings generated by PEO on Aluminium alloy: Morphology, adhesion, corrosion, and wear resistance. *Materials Today Communications*, 31, 103587. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103587>
- Niedźwiedź, M., Korzekwa, J., Bara, M., Kaptacz, S., Aniołek, K., Sowa, M. ve Simka, W. (2025). The Influence of PEO Process Parameters on the Mechanical and Sclerometric Properties of Coatings on the Ultralight Magnesium Alloy LA141. *Coatings*, 15(8), 961. <https://doi.org/10.3390/coatings15080961>
- Palanivelu, R. ve Kumar, A. R. (2014). Scratch and wear behaviour of plasma sprayed nano ceramics bilayer Al₂O₃-13 wt%TiO₂/hydroxyapatite coated on medical grade titanium substrates in SBF environment. *Applied Surface Science*, 315, 372-379.
- Patel, S.K., Singh, V.P., Kumar, D., Roy, B.S. ve Kuriachen, B. (2022). Microstructural, mechanical and wear behavior of A7075 surface composite reinforced with WC nanoparticle through friction stir processing. *Materials Science and Engineering: B*, 276, 115476.
- Pasha, B. A. M. ve Mohamed, K. (2017). Taguchi approach to influence of processing parameters on erosive wear behaviour of Al7034-T6 composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2163–2171.
- Pedefferri, P. (2018). *Corrosion Science and Engineering*. Springer, Milan, Italy.
- Pham, H.V., Kwon, D., Kim, J., Kim, R. ve Moon, S. (2024). Formation behavior of anodizing films on various aluminum alloys in oxalic acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, 315, 128953. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128953>.

- Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.F. ve Qian, M. (2017). *4-Wrought Aluminium Alloys, Light Alloys (Fifth Edition) (157-263)*, Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099431-4.00004-X>
- Popova, S.N. (2015). *Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems* Department of Chemical Engineering, Elsevier, South Carolina, USA.
- Raina, A. ve Anand, A. (2018). Influence of surface roughness and nanoparticles concentration on the friction and wear characteristics of PAO base oil. *Materials Research Express*, 5, 095018. DOI 10.1088/2053-1591/aad764
- Rao, Y., Wang, Q., Oka, D. ve Ramachandran, C.S. (2020). On the PEO treatment of cold sprayed 7075 aluminum alloy and its effects on mechanical, corrosion and dry sliding wear performances thereof. *Surface and Coatings Technology*, 383, 125271.
- Rashad, M., Pan, F., Asif, M. ve Chen, X. (2017). Corrosion behavior of magnesium-graphene composites in sodium chloride solutions, *Journal of Magnesium and Alloys*, 5 (3), 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.06.003>.
- Revie, R. W. ve Uhlig, H. H. (2019). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering* (5th ed.). Willey.
- 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.
- Qi, X., Li, J., He, Y., Liu, Y., Liu, R. ve Song, R. (2023). Study on the wear resistance and corrosion behaviour of self-sealed MAO/ZrO₂ coatings prepared on 7075 aluminium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 969, 172436. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172436>
- Qi, X., Gao, H., He, Y., Su, X., Jiang, B. ve Song, R. (2025). A self-sealing and lubricating MAO/TiO₂/PTFE composite coating fabricated by microarc oxidation on a 6063 aluminum alloy for wear and corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 1017, 179163. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179163>.
- Quadri, T.W., Akpan, E.D., Olasunkanmi, L.O., Fayemi, O.E. ve Ebenso, E.E. (2022). 2 - *Fundamentals of corrosion chemistry* Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors (25-45). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85405-4.00019-7>.

- Rams, J. (2022). *Wrought Aluminum Alloys*. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys (132-140), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00083-1>
- 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
- Shang, W., Wu, F., Wang, Y., Baboukani, A.R., Wen, Y. ve Jiang, J. (2020). Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation/Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys. *ACS Omega*, 5(13), 7262-7270. DOI: 10.1021/acsomega.9b04060
- Shi, X., Wang, Q., Wang, F. ve Ge, S. (2009). Effects of electrolytic concentration on properties of micro-arc film on Ti6Al4V alloy. *Mining Science and Technology (China)*, 19, 2, 220–224.
- Shizhu, W. ve Ping, H. (2012). *Characteristics and Mechanisms of Wear*. Principles of Tribology (272-295). Wiley, Singapore,.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.013>.
- Silva, F.J., Casais, R.B., Martinho, R.P. ve Baptista, A.P.M. (2011). Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests. *Wear*, 271 (9-10), 2632-2639.
- Song, J., She, J., Chen, D. ve Pan, F. (2020). Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8, 1–41.
- Stachowiak, G. W. ve Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Sun, Y. (2023). The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook. *Structures*, 57, 105290. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105290>.
- Sukuroglu, E.E. (2018). Investigation of antibacterial susceptibility of Ag-doped oxide coatings onto AZ91 magnesium alloy by microarc oxidation method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/6871241>
- Sukuroglu, S. (2025). Characterization, corrosion, adhesion and wear properties of Al₂O₃ and Al₂O₃:TiB₂ composite coating on Al 7075 aluminum alloy by one-

- step micro-arc oxidation method, *Materials Today Communications*, 46, 112493.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112493>.
- Stachowiak, G. W. (2006). *Wear: materials, mechanisms and practice*. John Wiley & Sons
- Şimşek, İ., Şimşek, D. ve Özyürek, D. (2020). Investigation of the Effect of Ni Amount on the Wear Performance of A356 Cast Aluminum Alloys. *Metallurgist*, 63, 9, 993-1001.
- Şüküroğlu, E. E. (2016). Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi ile Al2014 Alaşımı Üzerine Büyütülmüş Oksit Kaplamanın Adezyon Özelliklerinin İncelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 232–242.
- Şüküroğlu, E. E. (2017). Mikro ark oksidasyon MAO yöntemi ile Grade 2 titanyum alaşımı üzerine büyütülmüş ilaveli oksit kaplamaların anti bakteriyel duyarlılıklarının incelenmesi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 10-2, 287–295.
- Taub, A., De Moor, E., Luo, A., Matlock, D.K., Speer, J.G. ve Vaidya, U. (2019). Materials for Automotive Lightweighting. *Annual Review of Materials Research*, 49, 327-359. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070218-010134
- Tian, H., Zhang, Y., Hao, X., Zhang, H., Wu, W., Han, G., Dou, Z., Wei, Y., Zhang, Y. ve Chen, F. (2022). Preparation and characterization of the low-energy plasma electrolysis oxide coatings on MgLi alloy. *Surface and Coatings Technology*, 440, 128445.
- Tekin, K.C., Çakmak, E. ve Malayoğlu, U. (2008). Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makine*, 49, 582.
- URL-1, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/application/aluminium-military/>. 10 Ekim 2025.
- URL-2, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/application/aluminum-aerospace/aerospace-forging-2506-lx/>. 10 Ekim 2025.
- URL-3, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/blog/marin-grad-aluminum/>. 10 Ekim 2025.
- URL-4, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/application/aluminum-building/>. 10 Ekim 2025.
- URL-5, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/application/aluminum-packaging/>. 10 Ekim 2025.
- URL-6, <https://www.chalcoaluminum.com/tr/application/aluminum-electrical/>. 10 Ekim 2025.

- URL-7, <https://www.oerlikon.com/balzers/tr/tr/medya/makaleler/extending-the-life-of-precision-components>. 10 Ekim 2025.
- URL-8, <https://www.chaluminium.com/intergranular-corrosion-of-6000-series-alloys>. 10 Ekim 2025.
- URL-9, <https://tr.pinterest.com/pin/galvanic-corrosion-aluminium-steel-metal-brass-bolt-fixture-corrosion-galvanised-failure-materials-m--326088829262758186/>. 10 Ekim 2025.
- URL-10, <https://heat-exchanger-world.com/filiform-corrosion-an-unidentified-enemy-to-aluminium-fins/>. 10 Ekim 2025
- Vargel, C. (2020). *Chapter A.4 - Aluminium alloy series*. Corrosion of Aluminium (Second Edition), (17-20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00004-1>
- Whang, C. M., Kim, Y. K., Kim, J. G., Lee, W. I. ve Kim, Y. H., (2004). Photocatalytic Activity of SiO₂-TiO₂ Nanoparticles Prepared by Sol-Hydrothermal Process. *Material Science Forum*, 449-452, 1117-1120.
- Wang, Y., Ba, F., Chai, Z. ve Zhang, Z. (2024). A review of thermal control coatings prepared by micro-arc oxidation on light alloys. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(3), 100514. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100514>
- Wang, R. Zhao, C. Peng, Z. Yan, X. Sun, Y. Yu, Q. Yu, B. Cai, M. ve Zhou, F. (2024b). Corrosion and wear resistant polyp-xylene composite coating on AZ31 magnesium alloy prepared by micro-arc oxidation and vapor deposition. *Progress in Organic Coatings*, 186, 108016. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108016>
- Wu, Z. R., Hu, X. T. ve Song, Y.D. (2014). Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading. *International Journal of Fatigue*, 59, 170-175.
- Wu, T., Blawert, C., Lu, X., Serdechnova, M. ve Zheludkevich, M.L. (2021). Difference in formation of plasma electrolytic oxidation coatings on MgLi alloy in comparison with pure Mg. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(5), 1725-1740.
- Wu, G., Zhu, L., Chen, X., Li, L., Zhang, S., Wang, Y., Wen, C. ve Yao, J. (2023). Growth characteristics and wear properties of micro-arc oxidation coating on Ti-6Al-4V with different laser texture shapes. *Surface and Coatings Technology*, 475, 130108. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130108>

- Xia, L.H., Song, R.G. ve Guo, J.Z. (2013). Effects of nano additive TiO₂ on performance of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 406–411
- Yamada, R., Ishizawa, S., Itoh, G., Kurumada, A. ve Nakai, M. (2014). *Effects of environment on fatigue crack growth behavior of 2000 and 7000 series aluminum alloys*. Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014) (123-126), Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780081002254.123>
- Yao, W., Wu, L., Wang, J., Jiang, B., Zhang, D., Serdechnova, M., Shulha, T., Blawert, C., Zheludkevich, M.L. ve Pan, F. (2022). Micro-arc oxidation of magnesium alloys: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 118, 158-180, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.053>
- Yerokhin, A.L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Doney S.J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering, *Surface and Coatings Technology*, 122, 73.
- Yerokhin, A.L., Snizhko, L.O., Gurevina, N.L., Leyland, A., Pilkington, A. ve Matthews, A. (2003). Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 17. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/17/314>
- Zhang, E., Li, F., Wang, H., Liu, J., Wang, C., Li, M. ve Yang, K. (2013). A new antibacterial titanium–copper sintered alloy: Preparation and antibacterial property. *Materials Science and Engineering: C*, 33(7), 4280-4287.
- Zhang, J., Song, B., Wei, Q., Bourell, D. ve Shi, Y. (2019). A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(2), 270-284. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>.
- Zhang, J., Dai, W., Wang, X., Wang, Y., Yue, H., Li, Q., Yang, X., Guo, C. ve Li, C. (2023). Micro-arc oxidation of Al alloys: mechanism, microstructure, surface properties, and fatigue damage behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4307-4333. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.028>.
- Zhang, Y., Liu, Z., Lv, Z., Cao, J., Tong, Y., Sun, M., Cui, C. ve Wang, X. (2024). Effect of SiC and TiC content on microstructure and wear behavior of Ni-based composite coating manufactured by laser cladding on Ti–6Al–4V. *Wear*, 552–553, 205431. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205431>

- Zhao, J., Xie, X. ve Zhang, C. (2017). Effect of the graphene oxide additive on the corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation coating of the AZ31 magnesium alloy. *Corrosion Science*, 114, 146-155.
- Zhou, B., Liu, Bo. ve Zhang, S. (2021). The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review. *Metals*, 11(5), 718, 2021.
- Zhu, H. ve Li, J. (2024). Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(2), 100487. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100487>.
- Zuo, S., Cheng, F., Yang, G., Li, J., Deng, Y., Gou, G., Cui, X., Hu, Y. ve Hu, X. (2024). An effective micro-arc oxidation (MAO) treatment on aluminum alloy for stronger bonding joint with carbon fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 177, 107919.

ÖZGEÇMİŞ

Yılmaz Erhan KARACA,. Lise eğitimini Gümüşhanede tamamladıktan sonra 2005 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Mezuniyetinin ardından 2005–2011 yılları arasında özel sektörde, talaşlı imalat alanında faaliyet gösteren Şengün Makine firmasında görev yapmıştır. 2011–2023 yılları arasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi iştiraklerinde çeşitli teknik ve idari kademelerde çalışarak mühendislik, bakım-onarım ve proje yönetimi alanlarında deneyim kazanmıştır. Mart 2023 – Haziran 2025 tarihleri arasında FMK Yapı A.Ş.’de maden sahası işletmeleri ve özel projelerde görev almıştır. 2023 yılı itibarıyla Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlayan Yılmaz Erhan KARACA, 24.E0117.07.01 numaralı proje kodu ile yürütülen tez çalışmasını GÜBAP2907: Lisansüstü Öğrenci Destek Programı kapsamında tamamlamıştır. Evli ve iki çocuk babası olan KARACA halen TCDD Teknik A.Ş.’de Uzman Mühendis olarak görevine devam etmektedir.