



**7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SKANDİYUM
OKSİT KAPLANARAK YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Esra İBAÇ

Danışman: Doç. Dr.Yusuf Burak BOZKURT
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2026
(Her hakkı saklıdır.)

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

**7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SKANDİYUM OKSİT KAPLANARAK YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

(Improvement of Surface Properties for 7075 Aluminium Alloy by Coating with Scandium
Oxide)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra İBAÇ

Danışman: Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT

Erzurum
Nisan, 2026



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

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

**7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SKANDİYUM OKSİT KAPLANARAK YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT danışmanlığında, Esra İBAÇ tarafından hazırlanan bu çalışma, 01/04/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ayhan ÇELİK Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ali Fatih YETİM Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

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

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
Aslı ıslak imzalıdır

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT* danışmanlığında sunulan “7075 Alüminyum Alaşımının Skandiyum Oksit Kaplanarak Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	6	30
Materyal ve Metot	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	7	25

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

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Esra İBAÇ	Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT
1.4.2026	1.4.2026
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

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

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

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

TEŞEKKÜR

Akademik yolculuğumun en başından sonuna kadar, sadece bilgisiyle değil, sabrı ve vizyonuyl da yolumu aydınlatan; üzerimdeki emeği bu tezin sınırlarının çok ötesinde olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT'a en derin minnetimi ve şükranlarımı sunarım.

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışmam süresince sağladıkları imkanlar ve jüri üyeliği ile çalışmama sundukları katkılardan dolayı Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve Prof. Dr. Ali Fatih YETİM'e teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü desteğini hissettiğim ve kıymetli görüşleriyle çalışmama değer katan Sayın Prof. Dr. Halim KOVACI'ya, Sayın Doç. Dr. Yakup UZUN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yeşim SEÇER KAVASOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu sürecin en zorlu dönemlerinde, akademik desteğini derin bir insani nezaketle birleştirerek yanımda olan; ne zaman zora düşsem kapısını ve vaktini bana açan Sayın Arş. Gör. Dr. Şükran Merve TÜZEMEN'e ve Sayın Arş. Gör. Dr. Burak ATİK'e içtenlikle teşekkür ederim. Bu yolculukta dostluğunu ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Yük. Mak. Mühendisi Kübra YILDIZ'a ve Sayın Yük. Mak. Mühendisi Şenay ER YETİŞİR'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak; hayatım boyunca aldığım her kararda arkamda duran, sevgilerini ve güvenlerini daima hissettiğim, bugün olduğum kişiye dönüşmemdeki asıl pay sahibi olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Esra İBAÇ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SKANDİYUM OKSİT KAPLANARAK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Esra İBAÇ

Danışman: Doç. Dr. Yusuf Burak BOZKURT

Amaç: Bu tezde amaç 7075 alüminyum alaşımı üzerinde elektroforetik kaplama yöntemi ile skandiyum oksit esaslı bariyer tabaka biriktirilerek, taban malzemenin aşınma ve korozyon performansının artırılmasıdır.

Yöntem: Al7075 alaşımı üzerine, yüzey hazırlama işlemlerinin ardından anodik elektroforetik biriktirme (EPD) yöntemi kullanılarak farklı biriktirme süreleri ve farklı Sc_2O_3 içeriklerinde kaplamalar gerçekleştirilmiştir. EPD işlemi sabit gerilim altında uygulanmış olup, biriktirme süresi ve Sc_2O_3 miktarının kaplama morfolojisi ve performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen tüm numune gruplarının kuru ve sıvı ortam koşullarında aşınma ve elektrokimyasal korozyon davranışları değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testlerinde elektrolit ortamı olarak NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Numunelerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu; X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikrosertlik ölçümleri ve profilometre analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm numune gruplarının yüzey ıslanabilirlik özellikleri statik temas açısı ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. Tribolojik testler, karşılıklı hareketli (reciprocating) aşınma test düzeneğinde 1 N normal yük altında gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon davranışının belirlenmesinde açık devre potansiyeli (OCP), çevrimsel potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Bulgular: Farklı biriktirme süreleri ve Sc_2O_3 içeriklerinde anodik EPD yöntemiyle elde edilen kaplamalar arasında, S120 kodlu numune tüm deneysel testler kapsamında en iyi performansı sergilemiştir. SEM ve yüzey analizleri, S120 numunesinde daha homojen, sürekliliği yüksek ve kompakt bir kaplama yapısının oluştuğunu göstermiştir. Bu yapının, kaplama–taban malzeme etkileşimini iyileştirdiği ve yüzey bütünlüğünü artırdığı belirlenmiştir.

Tribolojik test sonuçları, S120 numunesinin mikrosertlik açısından daha yüksek değerlere sahip olduğunu ve aşınma hacmi ile sürtünme katsayısının diğer numune gruplarına kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Elektrokimyasal korozyon testlerinde ise S120 numunesinin daha pozitif açık devre potansiyeli ve daha düşük korozyon akım yoğunluğu sergilemesi, kaplamanın elektrokimyasal reaksiyonları etkin biçimde sınırlandırdığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, 0,1 gr Sc_2O_3 içeriği ve 20 dakika biriktirme süresi kombinasyonuna sahip olan S120 numunesinin, Al7075 alaşımı üzerinde gerçekleştirilen anodik EPD kaplamalar arasında yüzey bütünlüğü, aşınma ve korozyon direnci açısından en dengeli ve en etkin performansı sunduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç: Anodik EPD yaklaşımıyla elde edilen Sc_2O_3 kaplı Al7075 numunesinin aşınma ve korozyona karşı yüzey özellikleri iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EPD, Korozyon, Triboloji, Sc_2O_3

Nisan 2026, 87 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES FOR 7075 ALUMINIUM ALLOY BY COATING WITH SCANDIUM OXIDE

Esra İBAÇ

Supervisor: Assoc. Prof. DrYusuf Burak BOZKURT

Purpose: The aim of this thesis is to improve the wear and corrosion performance of the substrate material by depositing a scandium oxide-based barrier layer on 7075 aluminum alloy using an electrophoretic coating method.

Method: Coatings were prepared on Al7075 alloy using the anodic electrophoretic deposition (EPD) method after surface preparation, with different deposition times and Sc_2O_3 contents. The EPD process was applied under constant voltage, and the effects of deposition time and Sc_2O_3 content on coating morphology and performance were investigated. The wear and electrochemical corrosion behavior of all obtained sample groups was evaluated under dry and liquid conditions. NaCl solution was used as the electrolyte medium in electrochemical corrosion tests. Structural and morphological characterization of the samples was performed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness measurements, and profilometer analyses. In addition, the surface wettability properties of all sample groups were determined using static contact angle measurements. Tribological tests were performed in a reciprocating wear test setup under a normal load of 1 N. Open circuit potential (OCP), cyclic potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) methods were used to determine the electrochemical corrosion behavior.

Results: Among the coatings obtained by the anodic EPD method with different deposition times and Sc_2O_3 contents, sample S120 exhibited the best performance in all experimental tests. SEM and surface analyses showed that a more homogeneous, highly consistent, and compact coating structure was formed in sample S120. It was determined that this structure improved the coating-substrate interaction and increased surface integrity. Tribological test results revealed that sample S120 had higher microhardness values and lower wear volume and friction coefficient compared to other sample groups. In electrochemical corrosion tests, sample S120 exhibited a more positive open-circuit potential and lower corrosion current density, indicating that the coating effectively limited electrochemical reactions. When the obtained findings are evaluated together, it is concluded that the S120 sample, with a combination of 0.1 g Sc_2O_3 content and 20 minutes deposition time, offers the most balanced and effective performance in terms of surface integrity, wear and corrosion resistance among anodic EPD coatings performed on Al7075 alloy.

Conclusion: The surface properties of the Sc_2O_3 -coated Al7075 sample, obtained through the anodic EPD approach, have been improved in terms of resistance to wear and corrosion.

Keywords: EPD, Corrosion, Tribology, Sc_2O_3

April 2026, 87 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	11
GİRİŞ.....	12
KURAMSAL TEMELLER.....	22
Alüminyum	22
Alüminyum Alaşımları	24
Al7075 Serisi.....	25
Elektroforetik Kaplama	27
Elektroforetik Kaplama Parametreleri	29
Süspansiyon İle İlgili Parametreler	29
Proses İle İlgili Parametreler	31
Nadir Toprak Elementleri	32
Skandiyum	32
Elektrokimyasal Korozyon.....	33
Elektrokimyasal Korozyon Termodinamiği.....	35
Elektrokimyasal Korozyon Mekanizması	35
Elektrokimyasal Polarizasyon Eğrileri.....	36
Elektrokimyasal Korozyon Ölçüm Yöntemleri	38
Potansiyodinamik Tarama.....	38
Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES)	40
Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyon Davranışı	44
Islanabilirlik	46
Triboloji	47
Pürüzlülük	48

Sürtünme	49
Aşınma	49
Abrazif Aşınma	50
Adhezif Aşınma	51
Erozif Aşınma	51
Yüzey Yorulması	52
Yağlama	52
MATERYAL VE METOD	55
Kullanılan Malzeme	55
Numunelerin Hazırlanması	55
Anodik EPD Yöntemiyle Al7075-Sc ₂ O ₃ Kaplanması	56
Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon	56
Test Çözeltilerinin Hazırlanması.....	57
Tribolojik Deneyler	57
Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri.....	58
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	59
Kaplama Prosesi.....	60
Statik Temas Açısı Ölçümü	62
Yüzey Pürüzlülük Ölçümü.....	63
Elektrokimyasal Korozyon.....	64
Tafel analizleri	64
Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Analizleri	66
Aşınma Analizleri	70
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	85

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Saf Alüminyuma Ait Bazı Özellikler	23
Tablo 2. Alüminyum Dövme Alaşımları Sınıflandırılması.	24
Tablo 3. Alüminyum Döküm Alaşımları Sınıflandırılması.	25
Tablo 4. Al7075 Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.....	26
Tablo 5. Al7075 Kimyasal ve Mekanik Özellikler	26
Tablo 6. Al7075 Alüminyum Alaşımının Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 7. Elektroforetik Kaplama Parametreleri.....	29
Tablo 8. EPD' de Kullanılan Solventlerin Viskozite ve Dielektrik Sabiti Değerleri.....	31
Tablo 9. Al7075 Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.....	55
Tablo 10. Al7075 Kimyasal ve Mekanik Özellikler.....	55
Tablo 11. Kaplama İşlemi İçin Kullanılacak Parametreler.....	56
Tablo 12. Aşınma Test Parametreleri	57
Tablo 13. Tüm Numunelere Ait Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	63
Tablo 14. Tüm Numune Gruplarına Ait Korozyon Test Sonuçları.	65
Tablo 15. İşlemsiz ve Sc_2O_3 Kaplı Al7075 Numesine Ait EES Sonuçları Tablosu.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kaplama yöntemlerine göre olası film kalınlıkları	27
Şekil 2. Anodik EPD yönteminin şematik gösterimi	29
Şekil 3. Korozyon türleri modellemesi.....	34
Şekil 4. Teorik olarak polarizasyon eğrisi.....	37
Şekil 5. Elektrokimyasal korozyon hücresi; çalışma elektrotu (ÇE), karşıt elektrot (KE) ve referans elektrot (RE) içeren üçlü elektrot sistemi.....	38
Şekil 6. Pasif metallerde potansiyodinamik polarizasyon.....	39
Şekil 7. Sinüzoidal olarak gönderilen potansiyele karşılık elde edilen akım ve faz kayması ..	40
Şekil 8. Koordinat düzleminde x-gerçek ve y-sanal eksenlerde empedansın gösterimi	42
Şekil 9. Basit Randle devresi.....	42
Şekil 10. Nyquist eğrisi	43
Şekil 11. Bode eğrisi	43
Şekil 12. 5°C'de uygulanan farklı potansiyel ve pH değerlerinde alüminyumun korozyon davranışına ilişkin Pourbaix diyagramı.....	45
Şekil 13. Al7075 yerel korozyon şematik gösterimi	46
Şekil 14. (a) Statik temas açısı, (b) Dinamik temas açısı	47
Şekil 15. Yüzey pürüzlülük ölçümü	49
Şekil 16. Aşınma türleri	50
Şekil 17. Abrazif aşınma mekanizması	51
Şekil 18. Adhezif aşınma mekanizması	51
Şekil 19. Eroziv aşınma mekanizması	52
Şekil 20. Yüzey yorulma aşınma mekanizması.....	52
Şekil 21. Stribeck Eğrisi.....	53
Şekil 22. Tüm deney şartlarına ait XRD grafiği.....	59
Şekil 23. Sc ₂ O ₃ kaplı numunelere ait yüzey kesit SEM görüntüleri; (a) S110, (b) S120, (c) S210, (d) S220.....	60
Şekil 24. İşlemsiz Al7075 ve Sc ₂ O ₃ kaplı numunelere ait yüzey SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (d) S220.	61
Şekil 25. (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210 ve (e) S220 numunelerine ait temas açısı ölçümleri.	62
Şekil 26. Al7075, S110, S120, S210, S220 numunelerine ait ADP ve ÇPP eğrileri.	64

Şekil 27. EES analizlerine ilişkin sonuçlar, Bode eğrileri (a ve b), Nyquist eğrisi (c).	66
Şekil 28. İşlemsiz ve Sc_2O_3 kaplı Al7075 numunesine ait eş değer devreler	67
Şekil 29. Korozyon sonrası yüzey SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210 ve (e) S220.	69
Şekil 30. Kuru aşınma sürtünme katsayısı-zaman grafikleri.....	72
Şekil 31. Sıvı aşınma sürtünme katsayısı-zaman grafikleri	73
Şekil 32. Tüm numune gruplarına ait kuru-sıvı aşınma oranları ve sertlik değerleri.....	71
Şekil 33. Kuru aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (e) S220.	74
Şekil 34. Sıvı aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (e) S220.....	75



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ΔG	: Gibbs serbest enerji değişimi
$^{\circ}C$	: Santigrat derece
$\text{\AA}$	: Santimetrenin yüz milyonda biri
ADP	: Açık devre potansiyeli
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
cm	: Santimetre
ÇE	: Çalışma elektrotu
ÇPP	: Çevrimsel potansiyodinamik polarizasyon
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
EES	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
EPD	: Electrophoretic deposition
I_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
KE	: Karşıt elektrot
NaCl	: Sodyum hidroksit
ppm	: Milyonda bir partikül
ppt	: Trilyonda bir partikül
RE	: Referans elektrot
s	: Saniye
Sc	: Skandiyum
Sc₂O₃	: Skandiyum oksit
SOFC	: Katı oksit yakıt hücresi
T	: Sıcaklık
XRD	: X-ray diffraction
Ω	: Ohm

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları benzersiz özelliklerinden dolayı uzun yıllardır demir ve çelik ile beraber metal pazarında varlığını sürdürmektedir. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, ısı ve elektrik iletkenlik, iyi korozyon direnci, düşük aşınma direnci, düşük sertlik, manyetik ve toksik olmayan, kaynaklanabilen ve kolaylıkla işlenebilen bir malzeme türüdür. Yerkabuğunda çokça bulunan cevherlerden biri olmasından ötürü kullanım yelpazesi oldukça geniş ve maliyeti düşüktür. Alüminyum uzay ve havacılık, otomotiv endüstrisi, denizcilik, yüksek hızlı raylı sistemler için önemli bir malzeme grubu niteliği taşımaktadır (Zhang et al., 2024).

Özellikle havacılık ve uzay sektöründe temel hedef, araçların toplam ağırlığını azaltarak yakıt verimliliği sağlamaktır. Bu durum sadece ekonomik bir kazanç değil, aynı zamanda küresel bir sorun haline gelen karbon ayak izinin düşürülmesi noktasında da kritik bir öneme sahiptir (B. Zhang et al., 2024). Karbon ayak izi, son birkaç yıldır dünya gündeminde kendine yer bulmakta ve de gelecek yüzyıllar için büyük tehlike arz etmektedir. Bu doğrultuda ar-ge çalışmaları son yıllarda oldukça hız kazanmış ve diğer metallere nispeten düşük yoğunluklu alüminyum ve alaşımlarına olan rağbet de artmıştır (Kılıç et al., 2019).

Mühendislik malzemeleri servis ömürleri süresince farklı yükleme tipleriyle karşılaşmaktadırlar. Alüminyum alaşımları arasında 7000 serisi, yüksek mekanik özelliklere sahip olduğundan çoğunlukla ilk tercih edilen grup olarak karşımıza çıkmaktadır (Khalid et al., 2023). Al-Zn-Mg-Cu alaşımı olan Al7075 ise havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan alaşımdır. Uçak kanatları, uçak iniş takımları, bağlantı perçinlerinde, dişlilerde, şaftlarda kadar en kritik parçaların imalatında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Özkan et al., 2022).

Alüminyumun oksijen afinitesi oldukça yüksektir. Hava ile kısa bir temasında dahi oksijen ile bileşik yaparak alüminayı (Al_2O_3) oluşturmakta ve hatta tüm yüzey alümin tabakası ile örtülmektedir. Bu sayede alüminyum korozyona karşı yüksek direnç sağlamaktadır. Ancak alüminyum alaşımlarında saflık derecesi azalmakta ve beraberinde korozyon direncinde de düşüş görülmektedir (Hüseyinoğlu, 2018). Özellikle havacılık sektöründe yaygın kullanılan Al7075 alaşımı için bu durum ciddi bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu alaşım üzerinde oluşan doğal oksit tabakası oldukça incedir; dolayısıyla değişken atmosferik koşullar ve zorlu çalışma ortamlarında korozyona karşı yeterli direnci sağlayamamaktadır. Ve bu durum korozyona maruz kalan uçak bileşenlerinin yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini önemli ölçüde tehlikeye atabilmektedir (Zhu & Li, 2024). Bu nedenle, Al7075 gibi kritik parçaların yüzey dayanımını artırmak amacıyla gelişmiş kaplama yöntemlerine başvurulması zorunlu hale gelmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar; düşük performans sergileyen alt taban malzemelerin, yüksek performans gösteren yüzey kaplamalarının uygulanmasının mekanik ve kimyasal özelliklerde pozitif sonuçlar doğurduğunu ortaya koymuştur. İnce film teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemleri ile 0,01-10 mikron aralığında atomik düzeyde hassas kaplamalar gerçekleştirilebilmektedir. PVD yöntemi, yüksek vakum altında sıçratma veya buharlaştırma prensibiyle kaplama malzemesinin ana taban üzerine biriktirilmesi esasına dayanmaktadır.

Öte yandan, elektrokimyasal kaplama yöntemleri, PVD ve benzeri tekniklere kıyasla daha ekonomik olmaları ve çevresel etkilerinin minimize edilmesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu yöntemler arasında özellikle Elektroforetik Biriktirme (EPD); yüksek biriktirme hızı, işlem hassasiyeti, düşük maliyet, kısa kaplama süresi ve karmaşık geometrilere sahip parçalara uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır. Genellikle 30 µm altındaki partiküllerin süspansiyon oluşturduğu iki elektrotlu bir hücrede gerçekleştirilen EPD; uygulanan elektrik alanı etkisiyle yüklü partiküllerin zıt yüklü elektrot yüzeyine yönelmesi ve burada birikerek bir film tabakası oluşturması olarak tanımlanmaktadır

Son yıllarda potansiyel kıtlık tehlikesi, çıkarılabilir madenlerin kısıtlı olması nadir toprak elementlerine olan talebi arttırmıştır. Nadir toprak elementlerinden skandiyum havacılık ve savunma sanayi,katı yakıt oksit hücresi (SOFC), cep telefonları, pil hücreleri, kalıcı mıknatıslar gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Skandia (skandiyum oksit), ham skandiyumun ilk ürünüdür ve diğer metal ve nadir toprak üretimlerinin bir yan ürünüdür. Skandiyum metali bu sebeple çoğunlukla skandiyum oksit (Sc_2O_3) eşdeğer birimiyle gösterilir (Phoung et al., 2023).

Skandiyum metalurjik çalışmalarda Al, Mg, Zn elementlerine katkı maddesi olarak da alaşımlandırılmaktadır. Havacılık ve uzay endüstrisinde Al-Sc alaşımları; yüksek mukavemet, tane inceltici etki ve kaynak dikişlerinde sıcak çatlamayı engellemesi ile diğer yüksek mekanik davranış sergileyen alüminyum alaşımlarından ayrılmaktadır. Sağladığı metalurjik etkilerin yanı sıra daha önce yapılan çalışmalarda AlMgSiScZr alaşımında skandiyum katkısıyla mükemmel bir korozyon direnci elde edildiği görülmüştür. Alaşımda daha koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak çukurlaşma korozyonu azaltırken, termal kararlılığı da arttırdığı görülmüştür. Bu gelişmeler havacılık ve otomotiv sektörü içinde yeni bir uygulamanın kapısını aralamıştır (Bi et al., 2021).

Sutha *et al.* (2021), çalışmada AZ31 magnezyum alaşımı damla döküm yöntemi kullanılarak GeO_2 ve Sc_2O_3 ile kaplanmış ve korozyon direnci üzerinde etkileri incelenmiştir. Yüzeyde uygun kaplama sağlanmasının ardından elektrokimyasal korozyon tayini için %3,5 NaCl elektroliti içinde üç elektrot sistemi kullanılarak gerekli testler yapılmıştır. Bu çalışmayla birlikte AZ31 alaşımı -1,7 V açık devre potansiyeli (E_{corr}) ve $3,4 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ korozyon yoğunluğu (i_{corr}) gösterirken, Sc_2O_3 kaplı AZ31 alaşımı ise -1,4 V E_{corr} ve $5,4 \times 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$ i_{corr} göstermiştir. Germanyum dioksit kaplı AZ31 alaşımında ise -1,3 V E_{corr} ve $2,59 \times 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$ i_{corr} değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu verilerin ışığında 3 farklı parametrede korozyona uğrayan numuneler incelendiğinde; GeO_2 kaplı AZ31 alaşımın korozyon direncinin en yüksek olduğu ve ardından Sc_2O_3 kaplı AZ31 alaşımının geldiği görülmüş, en zayıf korozyon direncine ise AZ31 alaşımının sahip olduğu tespit edilmiştir.

Ryabtsev *et al.* (2020), çalışmada iyon plazma biriktirme yöntemi ile nanoyapılı kuasikristal yüzeyinde 200-260 nm kalınlığında Al-Cu-Fe ve Al-Cu-Fe-Sc ince filmler oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen elektrokimyasal ölçümler neticesinde açık devre potansiyelinin Sc doplu yüzeyde daha pozitif olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra nanoyapılı kuasikristal yüzeyinde biriktirilen Al-Cu-Fe filmlerinin, %5'lik bir NaCl çözeltisinde çukurcuk korozyonuna (pitting) karşı yatkın olduğu görülmüş, buna karşın 8 gün boyunca NaCl çözeltisinde bekletilen Al-Cu-Fe-Sc kaplı yüzeyde ise çukurcuk korozyonun oluşmadığı tespit edilmiştir.

Liu *et al.* (2024), çalışmada nadir toprak elementi Sc'nin Sn-0.7Cu metal alaşımındaki mekanik, termodinamik ve oksidasyon direnci üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma neticesinde Sc'nin alaşımlandırılmasının çökelmiş faz ve matris yapıları detaylıca incelenmiş, mekanik özellikleri, erime karakteristikleri ve oksidasyon direnci üzerinde pozitif etkiye yol açtığı tespit edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %0,1 Sc ilavesinin, alaşımın çekme dayanımını ve uzamasını önemli ölçüde arttırdığı, erime noktasını düşürdüğü, yüzey oksidasyon direncini arttırdığı ve dolayısıyla korozyona karşı dayanım sağladığı tespit edilmiştir.

Mandal *et al.* (2020), çalışmada Sc ilaveli döküm yoluyla üretilmiş Al7075 alaşımını, 300°C ile 500 °C arasındaki farklı sıcaklıklarda 8 saatlik homojenizasyona tabii tutmuş, döküm alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek için çok geçişli sürtünme karıştırma işlemi uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar neticesinde katılaşma sırasında az miktarda skandiyum (%0,33) eklenmesiyle birlikte yüksek mukavemetli Al-Zn-Mg alaşımında önemli tane incelmeleri elde edilmiştir. Oluşan Al_3Sc parçacıkları yüksek erime noktasına ve daha fazla kararlılığa sahiptir ve bu da Sc ilavesinin, döküm alüminyum alaşımının tane boyutunun

incelmesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için ideal alaşım elementi haline getirildiğini ortaya koymuştur.

Deng et al. (2023), Ti64 ve Ti64–0.3Sc'nin tavlama sonrası mikro yapısı, elektrokimyasal korozyonu ve darbe dayanımı incelemiş ve Sc'nin Ti64 üzerinde korozyon dayanımı etkisini tartışmıştır. Bu çalışma neticesinde elektrokimyasal korozyon testleri ve analizleri sonuçlarına göre Ti64–0.3Sc'nin polarizasyon direnci yükselmiş, korozyon hızı ve korozyon ürünlerinin boyutunun azaldığı saptanmıştır. Dolayısıyla Sc'nin pasif filmin kararlılığını arttırdığını ve korozyona karşı oksidasyon direncinin sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca Sc'nin alaşımda tane boyutunu iyileştirdiği ve faz hacim oranını arttırdığı, yeniden kristalleşmeyi önlediği ve tavlama esnasında dislokasyon yoğunluğunu iyileştirdiği saptanmıştır.

Cui et al. (2024), Nb-Si bazlı alaşımlara Sc ilavesinin yaratacağı oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklar altında kırılma tokluğu ve mekanik performans değişimlerini incelemiştir. Elde edilen bulgular neticesinde XRD ve SEM analizlerinde alaşıma Sc ilave edilmesinin γ -(Nb,X)5Si3 tane yapısını incelttiği ve hiperötektik faz yapısından lamelli ötektik faz durumuna geçerek oksidasyon direncini arttırdığı tespit edilmiştir. Sc katkılanması oksit filmin devamlılığı için faz yapılarını değiştirmekle beraber faz sınırlarında Sc₂O₃ oluşumunu da kolaylaştırmaktadır. Bu sayede malzemenin yüksek sıcaklıklarda oksidasyona uğramasına karşın oksit filmin yapışması ve devamlılığı sağlanmaktadır. Faz sınırlarında Sc₂O₃ oluşumu oksijen geçişini engelleyerek sürekli oksit çeperleri (TiO₂ ve SiO₂) oluşturur ve oksidasyon direncini arttırmaktadır. Yapılan bir dizi mekanik test, Nbss (Niyobyum katı çözeltisi) fazı içerisinde skandiyumun, termal çatlak yönlenmesini kontrol ederek ve enerji absorpsiyonunu artırarak kırılma tokluğunda önemli bir yükseliş sağladığını göstermektedir. Özellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilen ölçümlerde 0.8Sc ilaveli Nb-Si alaşımının 12.07 MPa·m^{1/2} kırılma tokluğu değerinden 15.63 MPa·m^{1/2} 'ya ulaşmasıyla önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Bu iyileşme, skandiyumun çatlak ilerlemesine karşı dirençli bir mikro yapı oluşturmadaki etkinliğini ve malzemenin dinamik zorlanmalar altındaki etkisini kanıtlar niteliktedir.

Wongkhuenkaew et al. (2024), ötektik Al-Ni alaşımlarına yaşlandırma işleminden önce ve sonra ağırlıkça %0,2 ve %0,4 Sc eklenmesinin etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmayla Al-Ni alaşımına Sc ilavesinin mikro yapı üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı ancak çökelme sertleşmesi ile sertliğin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra döküm halindeki Al-6Ni alaşımına Sc ilavesi, alaşım yapısında Al₃Sc taneciklerini uyarmaktadır. Bunu takiben anodik akım yoğunluğunu azalmakta ve korozyon hızı düşmektedir. Ayrıca yaşlandırma işleminden sonra mikroyapıda oluşan Al₂O₃ and Ni₂O₃ pasif

oksit filmlerin oluşumu sayesinde korozyon direnci önemli ölçüde artmaktadır. Öte yandan ağırlıkça %0,2 Sc eklenmesi korozyon oranını arttırmakta ve bu da Al_3Ni , Al_3Sc ve Al matris fazları arasındaki galvanik korozyonun pasif filmlerin sağladığı oksidasyon direncini baskılamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akçil *et al.* (2025), AA5754 alaşımına farklı oranlarda (%0,3, %0,8 ve %1) Sc ilave ederek korozyon ve aşınma dirençlerini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda Sc ilavesinin döküm yapısındaki taneleri etkili bir şekilde incelttiği ve sertliği %12'ye kadar artırdığı görülmüştür. Korozyon testlerinde, tüm numunelerde çukurcuk (pitting) korozyonunun etkin olduğu görülmüş ve en yüksek korozyon direnci %0,3 Sc ilavesiyle elde edilmiştir. Aşınma direnci açısından ise Sc katkısının tüm oranlarda performansı artırdığı, özellikle düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı için %0,8 Sc oranının ideal olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmayla beraber skandiyumun, kullanım amacına göre farklı oranlarda hem korozyon hem de aşınma özelliklerini iyileştirdiği ortaya koyulmuştur.

Liang *et al.* (2023), çalışmada Al-Zn-Mg alaşımından bakırın çıkarılıp yerine skandiyum ve zirkonyum eklenmesinin korozyon ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. T6 yaşlandırma işlemi uygulanan alaşım, $Al_3(Sc, Zr)$ parçacıklarının etkisiyle 601 MPa gibi yüksek bir çekme mukavemeti sergilemiştir. Bakırın uzaklaştırılması tane sınırındaki korozyon riskini azaltırken, Sc ilavesi sayesinde oluşan ince taneli yapı korozyonun ilerlemesini zorlaştırmıştır. Sonuç olarak bu yeni alaşımın, geleneksel 7050 alaşımlarına göre taneler arası korozyon ve pul pul dökülme korozyonuna karşı çok daha dirençli olduğu ortaya koyulmuştur.

F. Ahmad *et al.* (2024), çalışmada ZrB_2 ve Al_2O_3 nanopartikülleri ile güçlendirilmiş AA7085 alaşımına farklı oranlarda (%0,1, %0,3 ve %0,5) Sc ilavesinin etkilerini incelemiştir. Yapılan analizler, artan Sc miktarıyla birlikte mikro yapıda iyileşme sağlandığı ve %0,3 Sc oranında oluşan ince $Al_3(Sc, Zr)$ çökeltilerinin korozyon direncini en üst seviyeye çıkardığını göstermiştir. Mekanik özellikler açısından ise, %0,5 Sc ilavesi ve T6 ısıtılma işlemi sonucunda çekme dayanımı 513 MPa'dan 678 MPa'ya yükselerek önemli bir artış sergilemiştir. Sonuç olarak, Sc ilavesinin hem nanopartiküllerin matris içindeki dağılımını iyileştirdiği hem de tane incilmesi yoluyla malzemenin mukavemet ve korozyon direncini aynı anda artırdığı ortaya koyulmuştur.

Wang *et al.* (2019), çalışmada 7000 serisi Al-Zn-Mg-Cu-Zr alaşımına Sc takviyesi ile döküm mikroyapısında oluşan değişimleri incelemişlerdir. Yapılan birtakım deneyler ile 7000 serisi malzemeye ağırlıkça %0,25 oranında Sc ilave edilmesiyle önemli miktarda tane boyutunda incelmeye sebep olduğu bildirilmiştir. Döküm katılaşma sürecinde Al_3Sc ve Al_3Zr birincil fazları oluşmuştur. Daha sonrasında oluşan L, $\alpha-Al$ ve $MgZn_2$ fazları alt tane sınırı

boyunca ötektik yapı oluşturmuştur. Sc konsantrasyonunun artışı ve beraberinde ötektik faz sayısındaki azalmayla mukavemet ve süneklilikte belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra alaşıma eklenen Sc elementi ile malzemenin kaynak dikişlerinde çatlama potansiyelini de azalttığı yapılan çalışmayla ortaya konmuştur.

(J. Liu et al. (2016), Al–Zn–Mg–Cu–Sc–Zr alaşımlarına eser miktarda Sc ve Zr katkılanmasının farklı tavlama sıcaklıklarında ve çeşitli yaşlandırma sürelerinde mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Temel alaşım, Al-0.3(Sc + Zr) ve Al-0.6(Sc + Zr) alaşımlarından en yüksek akma ve çekme dayanımlarına ağırlıkça %0,6 skandiyum ve zirkonyum içerikli alaşımda ulaşılmıştır. Yapılan testler sonucunda, en yüksek mekanik performans ağırlıkça %0,6 (Sc + Zr) içeren alaşımda elde edilmiş; akma dayanımı 318 MPa, çekme dayanımı ise 488 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Daha yüksek oranda mukavemet artışı istendiği durumda yaşlandırma ile elde edilebildiği de ortaya konmuştur. Yapılan çalışma neticesinde skandiyum ile zenginleştirilmiş alaşımın sertlik değeri esas alaşıma oranla oldukça yüksek olduğu bildirilmiş ek olarak üç alaşımında uzama oranları %15'in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Lohar et al. (2009), eser miktarda ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,5 Sc ve %0,15 Zr içeren Al–Sc ve Al–Sc–Zr alaşımlarının çökelti morfolojisi ve alüminyum alaşımlarına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmayla beraber alaşıma eklenen skandiyumun, Al_3Sc çökeltileri oluşturmalarının sertlik değerini arttırdığı ortaya konmuştur.

Chuvil'deev et al. (2020), yüksek mukavemetli Al-0,5Mg alaşımına değişen miktarlarda skandiyum katılmasının yapısal termal kararlılığa, mekanik özelliklerine ve özgül elektriksel direnç üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırma neticesinde döküm yoluyla ultra ince taneli alaşımlar elde edilmiş ve artan skandiyum miktarına bağlı olarak ortalama tane boyutunda azalma meydana gelmiştir. Ultra ince taneli Al-0,5 Mg-Sc alaşımlarındaki ortalama tane boyutunun 0,4-0,5 μm olduğu görülmüştür. Ayrıca alaşıma ağırlıkça %0,5 oranında Sc eklenmesiyle mikro sertlik 500 Mpa'dan 650 Mpa'ya yükselmiştir. Bu şartlar altında çekme dayanımı ise 170 Mpa'dan 245 Mpa'ya yükselirken plastisite %45'ten %34'e minör bir azalış göstermiştir. Al-0,5 Mg-Sc alaşımı ağırlıkça %0,4 Sc konsantrasyonuna ulaştığında 2,99'dan 3,74 $\mu\Omega cm$ 'ye özgül elektrik direnci kademeli olarak yükselmiştir. Ancak Sc miktarı ağırlıkça %0,5'e ulaştığında ise elektriksel direnci 3,70 $\mu\Omega cm$ 'ye azaldığı tespit edilmiştir.

Cavanaugh et al. (2007), yüksek dayanıma sahip alüminyuma eser miktarlarda skandiyum alaşımlanmasıyla mikroyapıda Al_3Sc parçacıklarının oluştuğunu bildirmiş ve bu yeni alaşımın seyreltilmiş klorür çözeltisine maruz kalmasıyla çukurcuk korozyonu karşısında etkilerini incelemiştir. Bu çalışma doğrultusunda mikro-kılcal elektrokimyasal hücre

yöntemiyle korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Klorür çözeltisinde Al_3Sc partiküllerinin saf alüminyumdan daha asil olduğu görülmüştür. Al_3Sc partiküllerinin düşük çözünme oranına sahip olduğu ve bozulmaya karşı dirençli olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapıda oluşan Al_3Ti , Al_6Mn , Al_3Zr partiküllerin lokal korozyona yatkın olduğu, Al_3Sc 'nin çukurcuk korozyonuna karşı pasif olduğu ortaya konmuştur.

Z. Ahmad et al. (2001), çalışmada Al5052 alaşımına ağırlıkça %0,1-0,3 skandiyum katkılanması sonrası NaCl çözeltisindeki korozyon davranışını incelemiştir. İki farklı kısma ayrılan korozyon çalışmaları, ağırlık kaybı ve elektrokimyasal testler ile tamamlanmıştır. Bu testler sonucunda Al-2,5Mg alaşımına skandiyum eklenmesinin mekanik dayanımında iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Alaşım kompozisyonuna her %0,1 Sc eklenmesi durumunda dayanımda 55 Mpa artış sağlandığı görülmüştür. Al-2,5Mg-Sc alaşımında oluşan Al_3Sc fazlarının korozyon davranışında etkili olduğu ve tane sınırlarında birikerek alaşımı güçlendirdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak Al5052 alaşımında, skandiyumun korozyon davranışında gözle görülür bir iyileştirmeye neden olmadığı ancak maruz kalma süresinin artmasıyla korozyon oranının azaldığı görülmüştür.

Shi et al. (2014), çalışmada Al–Zn–Mg–Cu alaşımlarına Sc ve Zr ilavesinin yeniden kristalleşme davranışı ve korozyon direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sc ve Zr katkısının yeniden kristalleşmeyi önemli ölçüde engellediği ve malzemenin "lifli" bir mikroyapı sergilemesini sağladığı görülmüştür. Bu yapısal değişim sayesinde, gerilim korozyonu çatlaması duyarlılığı %58,10'dan %9,25'e kadar düşürülmüştür. Elektrokimyasal testlerde, Sc-Zr içeren alaşımın daha yüksek korozyon potansiyeli ($E_{corr} = -0.638$ V) , polarizasyon direnci ($R_p = 76.7 \Omega/cm^2$) ve daha düşük korozyon akım yoğunluğu ($I_{corr} = 117.4 \mu A/cm^2$) sergileyerek korozyon direncini artırdığı saptanmıştır. Sonuç olarak, Sc ve Zr ilavesinin tane sınırındaki çökeltileri süresiz hale getirerek taneler arası korozyonu ve pul pul dökülmeyi etkili bir şekilde engellediği ortaya koyulmuştur.

Gu et al. (2020), son derece popüler olan seçici lazer ergitme (SLM) ile üretilen skandiyum ve zirkonyum katkılı Al-Mg alaşımının değişik katmanlardaki korozyon davranışlarını incelemiştir. Açık devre potansiyeli XY ekseninde -875 ± 19 mV değerine ulaşırken XZ ekseninde -1126 ± 14 mV değerinde kalmıştır. Ayrıyeten XY ekseninde daha düşük korozyon akım yoğunluğuna ve daha yüksek değerlerde polarizasyon direncine ulaşıldığı görülmüştür. Elde edilen veriler ışığında SLM ile üretilen Al-Mg-Sc-Zr alaşımının XY ekseninde, XZ eksenine göre çok daha iyi korozyon dayanımına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Y. Deng et al. (2015), Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarına eser miktarda Sc ve Zr ilavesinin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucunda yaşlandırılmış Al-Zn-Mg alaşımına ağırlıkça %0,10 skandiyum ve %0,10 zirkonyum eklenmesinin akma mukavemetini 66 Mpa ve çekme mukavemetini de 31 Mpa arttırdığı görülmüştür. Yine temel alaşım kompozisyonuna ağırlıkça %0,25 skandiyum ve %0,10 zirkonyum eklenmesin 96 Mpa akma mukavemeti ve 58 Mpa ekme mukavemeti değerleriyle artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca %0,25 Sc ilavesiyle faz yapısında tane incelirken %0,10 Sc ilavesinde tane yapısında bir değişiklik meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Sun et al. (2021), Al-Zn-Mg-Cu-Zr alaşımına nadir toprak elementi olan skandiyumun katkılanmasının alaşımda yarattığı mikroyapısal ve korozyon dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elektrokimyasal korozyon testleri gerçekleştirilmiş ve Sc bulunmayan esas alaşımın, 112  m derinlikte nüfuz eden taneler arası korozyona maruz kaldığı görülmüştür. Skandiyum içeriğinin ağırlıkça % 0,07 oranında artmasıyla 80,4  m derinliğe gerileyerek korozyon direncinin iyileştiği tespit edilmiştir. Sc içeriğinin ağırlıkça % 0,15'e kadar artmasıyla ise korozyon derinliği 19,6  m'ye kadar düşmüştür. Tane sınırlarında çökelen partiküller çökelti faz sayısının azalmasına neden olmuş ve çökeltilerin kesikli olmasından dolayı anodik çözünme hızı azalmıştır. $Al_3(Sc, Zr)$ partikülleri alaşımın tanelerarası korozyon ve eksfoliasyon korozyonuna karşı direnç sağlamasında etkili olmuştur . Korozyon direnci üzerindeki etkilerinin yanı sıra Al -Zn- Mg-Cu-Zr alaşımına Sc elementinin eklenmesi dentrit oluşumunu ciddi oranda azaltmış ve eş eksenli ince taneli kristaller oluşturmuştur. Eser miktarda skandiyum eklenmesinin alaşım üzerinde yeniden kristalleşmeyi engellediği görülmüştür. Ek olarak $Al_3(Sc, Zr)$ partikülleri tane sınırlarında çökelerek dayanımı ve sertliği arttırdığı görülmüştür.

Kai et al. (2024), Sc nadir toprak elementinin ve ZrB_2 nanopartiküllerinin 7N01 alaşımı üzerindeki mikroyapısal ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu alışma neticesinde ZrB_2 partiküllerinin ağırlıkça %3 oranını açtığı takdirde tane sınırında ciddi bir yığılma sağladığı görülmüştür. Bunun yanı sıra skandiyum partiküllerinin eklenmesi tane sınırında biriken ZrB_2 partiküllerinin düzgün dağılımını sağlamış, alaşımın homojenliğini arttırmıştır. Ayrıyeten Sc ilavesi matris yapısını inceltmiş ve yüksek erime noktasına sahip Al_3Sc nanopartikülleri oluşturmuştur. Zr ve skandiyumun alaşıma eklenmesi ile Orrowan dislokasyon yoğunluğu artmış ve yeniden kristalleşmeyi engelleyerek mekanik özelliklerde iyileştirme sağlamıştır.

Yang et al. (2023), 2A12 alaşımına %40 oranında doğrudan lazer biriktirme yöntemiyle TiC/Al-Cu-Mg-Sc kompozit tozlar ve ağırlıkça %0, %0.2, %0.4 ve %0.6 Sc içeren toz parametreleri ile alaşım üzerinde biriktirme gerçekleştirmiştir. Ağırlıkça %0,2 Sc eklenmesinin eriyik havuzunun akışkanlığını arttırmada etkili olduğu, gözenek ve mikro çatlak kusurlarını engelleyerek ince taneli faz yapısı elde ettiği ve TiC partiküllerinin homojen olarak dağılmasında etkili olduğu yapılan çalışmayla ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra ağırlıkça %0,2 Sc eklenmesiyle akma dayanımı 126 MPa'ya, çekme dayanımı 229 MPa'ya ve uzama %3,07'ye ulaşarak mekanik özelliklerde iyileştirme sağlandığı da g r lm ştir. Ancak Sc miktarının %0,4 ve %0,6 oranlarına ulaşmasıyla faz dönüşümü gerçekleşerek dayanımda azalmaya neden olmuştur. Optimum değer olan ağırlıkça %0,2 Sc eklenmesiyle sertlikte artış sağlanmış olup sabit bir sürtünme katsayısı ve 0,25 cm³/m değerinde minimum aşınma oranı elde edilmiştir.

Obidov et al. (2013), Zn5Al ve Zn55Al alaşımlarına skandiyum eklenmesinin oksidasyon kinetiği üzerindeki etkileri termogravimetrik analiz yöntemiyle incelemiş ve ağırlıkça %0,005–0,05 Sc eklenmesiyle alaşım yüzeyinin oksitlenmesinde gözle görülür bir düşüş sağlandığı g r lm ştir. Ancak Sc oranının %0.1 ve %5 değerlerine kadar artmasıyla oksidasyon direncinin düştüğü g r lm ştir.

Skandiyum elementinin sadece alüminyuma değil magnezyum, titanyum, kalay, silisyum, niyobyum esaslı birçok alaşıma dahil edildiği g r lm ştir. Yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere uygun şartlarda skandiyum eklenmesiyle yalnızca korozyon ve aşınma direncinde iyileştirmeler sağlanmamış olup ;alaşımın faz yapısının hiper tektikten lamelli faz yapısına geçtiği, taneleri incelterek yeniden kristalleşmeyi önlediği, sertlik ve kırılma tokluğunu arttırdığı, kaynak dikişlerinde çatlama potansiyelini iyileştirdiği, malzemenin dayanımını arttırdığı, dislokasyon yoğunluğunu iyileştirerek mikroyapıya ve mekanik dayanıma etki ettiği g r lm ştir (Ahmad et al., 2001; Cui et al., 2024; Kai et al., 2024; C. Liu et al., 2024; Lohar et al., 2009; Singh et al., 2004b; Wang, Liu, et al., 2019

Değerli bir cevher olan skandiyum elementi, literatür araştırmasından da görüldüğü üzere daha çok alaşım elementi olarak kullanılmış, yüzey mühendisliğinde kullanımları sınırlı kalmıştır. Bu çalışmayla birlikte atmosferik servis koşullarına maruz kalan Al7075 alaşımının, yüksek yüzey performansına sahip olan skandiyum nadir toprak elementi ile kaplanarak tribolojik ve koroziyon direncinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıyeten bu çalışmanın, düşük yoğunluklu alüminyum alaşımlarının uzay ve hava araçlarında kullanılmasıyla yakıt verimliliği sağlaması ve beraberinde karbon emisyonunu azaltma noktasında gelecek çalışmalara da ışık tutacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Al7075 alaşımının Anodik EPD yöntemiyle Sc_2O_3 kaplanması suretiyle korozyon ve aşınma davranışlarını araştırmaktır. Elde edilen bütün numune grupları için kuru ve sıvı ortamda aşınma, NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyon testleri uygulanarak birbirleri ile mukayese edilmiştir. Numunelerin yapısal ve morfolik analizleri için X-Işını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikrosertlik, üç boyutlu optik profilometre kullanılmıştır. Ayrıca bütün numune gruplarının statik temas açısı ölçümleri de temas açısı ölçüm (ATM) cihazı ile alınmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Bugüne dek yapılan araştırmalar alüminyum alaşımlarına Sc takviye edilmesinin mikro yapıdaki değişimlerini ortaya koymuştur. Al7075 alaşımına Sc ilavesiyle oluşan yeni alaşımın faz ve matris yapıları incelenmiş; tane inceltici metalurjik yapı, çekme dayanımı ve uzama miktarını arttırdığı, tavlama sırasında dislokasyon yoğunluğunda iyileşme sağladığı ,kaynak dikişlerinde sıcak çatlamayı ve yeniden kristalleşmeyi engellediği gibi birçok iyileştirme sağladığı mevcut literatür taramalarında ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra alaşıma Sc takviyesinin oksidasyon direncinde pozitif etki sağladığı dolayısıyla korozyon dayanımını attırdığı açıkça belirtilmiştir. Ancak nadir toprak elementi olan Sc'nin alüminyum ve alaşımlarına katkı elementi olarak uygulanması dışında farklı bir prosede uygulaması oldukça sınırlı kalmıştır.

Al7075 alaşımı zorlu servis koşullarında aşınma ve korozyona karşı gösterdiği direnç yetersiz kalmakta ve mutlaka bir yüzey prosesine ihtiyaç duymaktadır. Sc'nin korozyon dayanımında yarattığı etki göz önüne alındığında Al7075 yüzeyinde bir kaplama bileşeni olarak kullanılması, ana metalden çok daha kararlı bir pasif oksit tabakası oluşturma potansiyeli taşımaktadır. alaşımdan daha kararlı pasif oksit film tabakası yaratılabilmesi dolayısıyla korozyon dayanımında iyileşme sağlanması bir araştırma konusu niteliği taşımaktadır. Bu doğrultuda, Sc içerikli bir kaplamanın oluşturulması ve bu sayede korozyon ve aşınma direncinin iyileştirilmesi özgün bir araştırma konusu niteliği taşımaktadır.

Alüminyum

Periyodik tabloda 13 atom numarasına sahip olan alüminyum, yeryüzünde %8,07 oranında bulunmakta olup oksijen ve silisyumun ardından en çok bulunan üçüncü elementtir. Yumuşak ve aynı zamanda hafif olan bu element, yüzeydeki pürüzlülüğe bağlı olarak mat gümüşümsü bir renktedir. Alüminyum doğada daha çok mineral halinde boksit cevherinde bulunmaktadır. Oksijenin alüminyuma karşı yüksek afinite göstermesinden dolayı hava ile kısa bir temasında dahi yüzeyinde alümina (Al_2O_3) adı verilen bileşik oluşmaktadır.

Özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ ve erime noktası $660 \text{ }^\circ\text{C}$ olan saf alüminyum yüksek dayanım-ağırlık oranı, aşınma direnci ve iyi korozyon dayanımına sahip olmakla beraber elektriksel iletkenliği de oldukça yüksektir. Bakırın iletkenliğine göre %40 daha düşük olmasına karşın düşük yoğunluğundan ötürü birim kütleye tekabül eden iletkenlik açısından bakırdan daha

yüksek bir iletkenliğe sahiptir (Onur, 2014). Isı ve ışığı iyi yansıtmakta olup manyetik bir element değildir.

Ayrıca yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip olan bu elementin sıcak ve soğuk şekillendirme yetenekleri de oldukça iyi seviyededir.

Alüminyum ve alaşımlarının korozyon dayanımı oldukça yüksektir ancak korozyona karşı en iyi dayanımı sergileyen saf alüminyumdur. Korozyona karşı dayanımlarının yüksek olması yüzeyinde oluşan pasif oksit tabakasından gelmektedir. Bu pasif oksit tabaka korozif ortamlarda alüminyumun korozyona karşı direnç göstermesini sağlamaktadır (Çakır, 2015). Saf alüminyuma ait birtakım özellikler Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Saf Alüminyuma Ait Bazı Özellikler (Onur, 2014).

ÖZELLİK	DEĞER
Atom Ağırlığı	26,97 gr/mol
Ergime Sıcaklığı	660 °C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150°C–300°C
Özgül Isı	0,224 cal/gr (100°C)
Elastisite Modülü	72x10 ³ MPa
Poisson Oranı	0,33
Çekme Dayanımı	40-90 MPa
Kayma Modülü	27x10 ³ MPa
Akma Dayanımı	10-30 MPa
Kopma Uzaması	30-40
Brinell Sertlik	245 Mpa

Sahip olduğu tüm bu üstün özellikler; alüminyum havacılık ve uzay sanayisinden otomotiv sektörüne, deniz araçlarından inşaat ve elektroniğe, enerji iletim hatlarından ev aletlerine kadar oldukça geniş bir yelpazede önemli bir mühendislik malzemesi haline getirmiştir.

Saf alüminyumun bazı mekanik özellikleri kullanım amacına göre sınırlı kalmakta bakır, çinko, magnezyum, silisyum ve manganez gibi elementlerin alaşımlandırılmasından

yararlanılmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının dayanımı yüksek oranda artarken yoğunluğundaki değişimler göz ardı edilebilecek kadar küçük kalmaktadır.

Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun düşük yoğunluğundan yararlanmak isteyen gemi ve kara araçları, uzay ve havacılık, yapı endüstrisi gibi aynı zamanda yüksek dayanım gibi birtakım mekanik özelliklere de ihtiyaç duyan sektörlerde alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Saf alüminyuma alaşım elementi takviyesi ile birtakım özellikler kazandırılabilir. Bu alaşımlar dövme ve döküm olarak iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Alaşımların sınıflandırılması ve isimlendirilmesi bileşimindeki elementlerin kompozisyonuna göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma uluslararası kabul gören Alüminyum Standartlar Birliği (U.S. Aluminium Association) tarafından yapılmaktadır (Turhan, 2002).

Tablo 2’de alüminyum dövme alaşımlarının sembolik sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 2. Alüminyum Dövme Alaşımları Sınıflandırılması (Çakır, 2015).

Simge	Temel Alaşım Elementi
1XXX	Saf alüminyum (% 99 Al)
2XXX	Bakır (Cu)
3XXX	Mangan (Mn)
4XXX	Silisyum (Si)
5XXX	Magnezyum (Mg)
6XXX	Magnezyum (Mg) ve Silisyum(Si)
7XXX	Çinko (Zn)
8XXX	Diğer elementler
9XXX	Kullanılmayan alaşım serisi

Dövme alaşımlarında ilk rakam alaşımın hangi temel alaşım elementini içerdiğini simgelemektedir. Son iki rakam ise alaşımdaki %99.0 alüminyum değerinin noktadan sonraki değerini ifade etmektedir. İkinci rakam ise özel olarak denetlenen empürite element adı verilen bir metalin veya alaşımın içerisinde doğal olarak bulunan ya da üretim esnasında ortaya çıkan alaşım elementlerini simgelemektedir (Turhan, 2002).

Tablo 3’de alüminyum döküm alaşımlarının sembolik sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 3. Alüminyum Döküm Alaşımları Sınıflandırılması (Çakır,2015).

Simge	Temel Alaşım Elementi
1XX.X	Saf alüminyum (% 99 Al)
2XX.X	Bakır (Cu)
3XX.X	Silisyum(Si) ile Magnezyum(Mg) ve/veya Bakır
4XX.X	Silisyum (Si)
5XX.X	Magnezyum (Mg)
6XX.X	Kullanılmayan alaşım serisi
7XX.X	Çinko (Zn)
8XX.X	Kalay (Sn)
9XX.X	Diğer elementler

Döküm alaşımlarında da dört rakamlı simgeleme kullanılmaktadır. İlk rakam temel alaşım elementini tayin ederken, ikinci ve üçüncü rakamlar noktadan sonraki saflık derecesini göstermektedir. Noktadan sonraki rakam ise döküm şeklini vermektedir. 0 dökümü tayin ederken 1 ingotu (külçe) ve 2’de modifiye edilmiş ingotu temsil etmektedir.

Alaşım elementlerinden bakır alüminyuma sertlik, mukavemet, döküm kolaylığı ve işlenebilme gibi özellikler kazandırmaktadır. Alüminyum bakır alaşımında bakırın %12’ye kadar olan değeri mukavemeti arttırırken %12’den fazlası yapıda gevreklik meydana getirerek kırılmaya yol açabilmektedir. Magnezyum ise alaşımda mukavemet, yüksek korozyon dayanımı, kaynaklanabilirlik ve kolay işlenebilmesi istenilen durumlarda temel alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Silisyum takviyesi ile alüminyumun akışkanlığı arttırılarak sıcak çatlama eğilimi düşürülmekte korozyon dayanımı ve kaynak kabiliyetinde artış sağlanmaktadır. Manganez elementi alüminyum alaşımının çekme dayanımını arttırmaktadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığını korozyon dayanımına etki etmeksizin 50-60 °C kadar yükseltebilmektedir. Krom ise alaşımda gerilmeli korozyon çatlaması dayanımını arttırmaktadır. Bir diğer temel alaşım elementi olan çinko, alaşımın dökülebilirliğini azaltmaktadır. Buna karşılık çekme dayanımı artmakta, haddelenme ve işlenebilme kabiliyetlerinde artış sağlanmaktadır (Onur, 2014).

Al7075 Serisi

Çinko temel alaşım elementiyle saf alüminyumdan elde edilen Al7075 alaşımı magnezyum, bakır ve eser miktarda krom, demir, silisyum içeren bir alaşım türüdür. Tablo 4’de Alüminyum 7075 Alaşımının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 4. Al7075 Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu

Elementler	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Al
% Ağırlık	5,6	2,5	1,6	0,22	0,5	0,07	Salt çoğunluk

500 MPa'nın üzerinde dayanıma sahip hafif bir metal alaşımı olmasının yanı sıra, süneklik, tokluk ve yorulmaya karşı iyi direnç sergilemesinden dolayı uzay ve havacılık, deniz araçları, otomotiv, savunma sanayi ve daha birçok sektörde kullanılmaktadır (Li et al., 2024).

Bu alaşım ayrıca askeri ve ticari uçakların üst kanat panelleri, iniş takım silindirleri, armatürler, füze gövde parçaları, düzenleyici valf parçaları, piston ve kolları, motor gövdeleri, dişli ve miller, metre şaft ve dişlileri, bataryalar gibi geniş kullanım alanına sahiptir (Batuk, 2018).

Alüminyum 7075 alaşımının kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 5 'de verilmiştir.

Tablo 5. Al7075 Kimyasal ve Mekanik Özellikler

Akma Gerilmesi (MPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eş değer kütle	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Birim Uzaması (%)
103	2,81	10,454	228	71,7	0,33	10

Al7075 alaşımının fiziksel özellikleri diğer alaşımlara göre üstün özellikler sergilemektedir. Alüminyum 7075 alaşımının fiziksel özellikleri Tablo 6 'da verilmiştir.

Tablo 6. Al7075 Alüminyum Alaşımının Fiziksel Özellikleri (Batuk,2018).

Rijitlik Modülü	2750 kg / mm ²
Kırılma Tokluğu	28,6
Ergitme Aralığı	477 – 635 °C
Özgül Isı (0-100 0C arasında)	0,23 cal/gr °C
Lineer Genleşme Katsayısı (20-100 0C, T6 için)	24-10-6 mm/°C
Özgül Elektrik Direnci (20 0C, T6 için)	0,058 Ohm.mm ² /m

Al7075 alaşımı atmosferik rutubet gibi düşük aktiviteli ortamlarda bile gerilmeli korozyona direnç sağlayamaması, zayıf aşınma direnci ve adezyona karşı eğilim gibi yüzey özellikleri kullanımlarını sınırlamıştır (Erk,2019). Al7075 demir ve çelikle mukayese edildiğinde 3 kat daha hafif ve 2,81 gr/cm³ yoğunluğa sahip hafif bir metaldir. Araçların toplam ağırlığındaki her %10'luk azalmanın %5-10 oranında yakıt tasarrufu sağlaması baz alındığında yüzey özelliklerini iyileştirmek için çeşitli prosesler uygulanmaktadır (Başer,2013).

Elektroforetik Kaplama

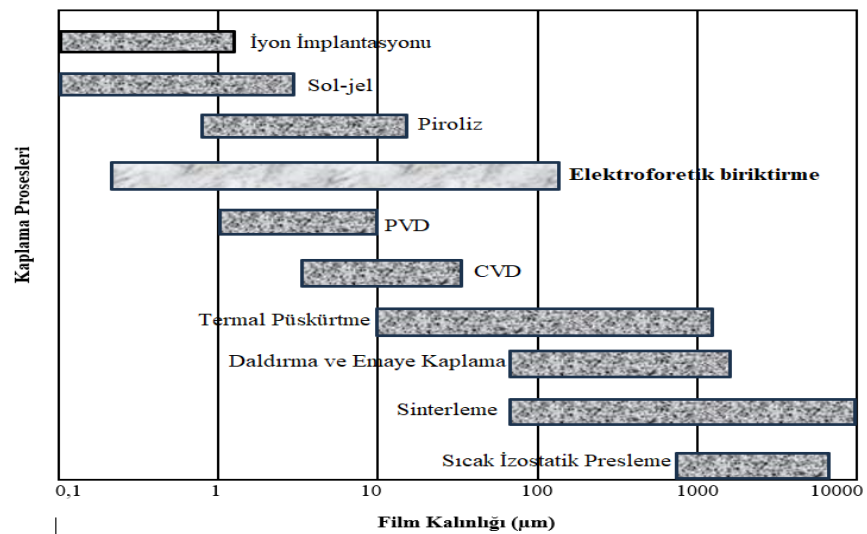
Elektroforetik kaplama, elektrik alanının etkisi altında süspansiyon halindeki yüklü parçacıkların zıt yüklü elektrotlara doğru hareket ettiği ve yüzeyde biriktirilmesine dayanan bir kolloidal kaplama tekniğidir (Besra & Liu, 2007).

1808 yılında Rus bilim adamı Ruess'un ,sudaki kil parçacıklarının elektrik alan kaynaklı hareketini gözlemlediği bilinmektedir. İlk olarak 1933 yılında platin katot üzerine toryum partiküllerini biriktirmek için kullanılmıştır. 1990 yılına kadar emaye ve porselen olmak üzere geleneksel seramiklerin işlenmesinde kullanılan EPD'nin mühendislik uygulamalarındaki kullanımı bu yıllarda oldukça sınırlı kalmıştır. Ancak son yıllarda hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel sektörde ileri yüzey özellikli malzemeler üretebilmek için elektroforetik biriktirmeye olan ilgi büyük oranda artmış ve o zamandan bu yana çeşitli malzemelerin ve yüzeylerin işlenmesinde kullanılmıştır (Corni et al., 2008).

EPD, 30 μm 'den daha küçük partikül boyutlarına sahip metallere, polimerlere, seramiklere ve camlara kolloidal süspansiyon olarak uygulanabildiğinden yoğun ilgi görmektedir. EPD'ye olan bu ilgi sadece farklı malzeme ve malzeme kombinasyonlarıyla kullanılabilmesine değil, aynı zamanda basit ekipmanlarla gerçekleştirilebilmesi ve düşük maliyetli bir yöntem olmasına da dayanmaktadır.

Ayrıca elektroforetik biriktirme , kaplamanın oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmesi, iyi stokiyometri kontrolü (tepkime kontrolü), kısa sürede uygulanabilmesi, karmaşık şekilli yapılar üzerinde homojen biriktirilebilebilmesi, değiştirilebilir kaplama kalınlığı ve partiküllerin yüzeye iyi tutunmasını mümkün kılan bir kaplama yöntemidir (Işın, 2023).

Şekil 1' de kaplama yöntemleriyle oluşturulan muhtemel film kalınlıkları verilmiştir.



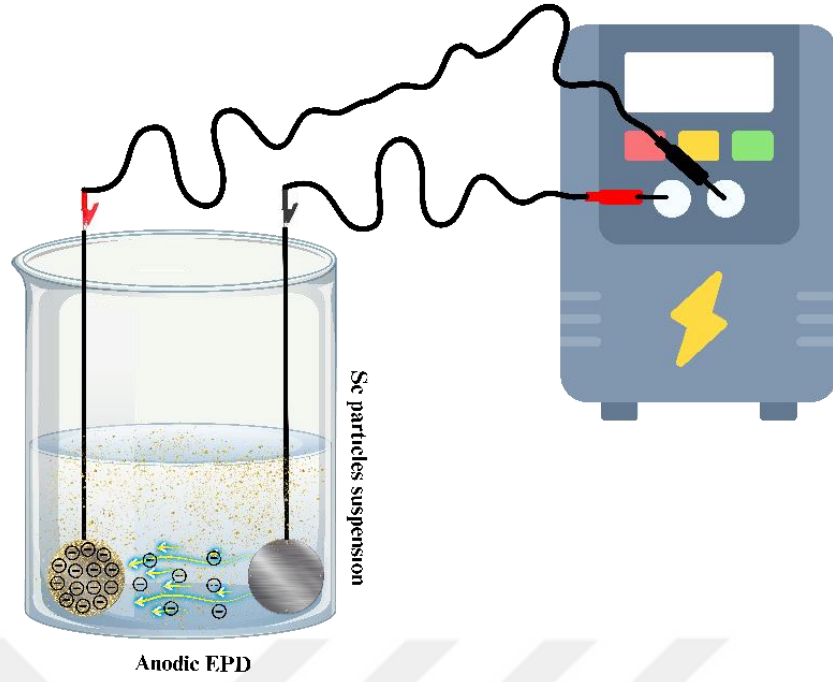
Şekil 1. Kaplama yöntemlerine göre olası film kalınlıkları (T. M. Sridhar,2002)

Elektroforetik biriktirme, uygun bir çözücü içinde dağılmış yüklü partiküllerin uygulanan elektrik alan etkisiyle bir elektroda doğru hareketiyle gerçekleştirilmektedir. EPD boyunca yüklü partiküllerin elektriksel hareketi, partiküllerin birikmesine ve ilgili elektrotta homojen ve sert bir katman oluşmasına neden olmaktadır. Kolloidal proseslerin birçoğunun aksine, düşük oranda katı madde içeren süspansiyonlarda da kullanılabilir. Ortaya çıkan düşük viskozite, prosesin kontrol altında gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Kaplama işleminin gerçekleştiği elektroda bağlı olarak, iki tür elektroforetik biriktirme yöntemi bulunmaktadır. Parçacıklar pozitif yüklü olduğunda, katotta birikme meydana gelir ve bu işleme katodik elektroforetik kaplama denir. Negatif yüklü partiküllerin pozitif elektrot (anot) üzerinde birikmesine ise anodik elektroforetik kaplama ismi verilmektedir (Besra & Liu, 2007).

Elektroforetik biriktirme iki temel aşamada gerçekleşen bir kaplama yöntemidir. İlk aşamada yüzeyde biriktirilecek partiküller uygun şekilde süspansiyon edilmektedir. Bu süspansiyona güç kaynağından pozitif ve negatif olmak üzere iki farklı elektrot daldırılarak devre tamamlanmaktadır. İkinci aşamaya gelindiğinde ise hareket halindeki yüklü parçacıklar elektrik alan etkisinde zıt yüklü elektrot yüzeyinde birikmektedir. Bu yöntem alternatif akım veya doğru akım güç kaynağı eşliğinde gerçekleştirilmektedir (Van Der Biest & Vandeperre, 1999) ; (Atik,2025).

EPD'nin diğer süreçlerle (örneğin daldırma ve hidrofilik kaplama) karşılaştırıldığında kendine has dezavantajı, sıvı ortam olarak su kullanamamasıdır. Çünkü suya voltaj uygulanması elektrotlarda hidrojen ve oksijen gazlarının oluşmasına neden olmakta ve bu da oluşan kaplamanın kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Van Der Biest & Vandeperre, 1999). EPD hücresinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Anodik EPD yönteminin şematik gösterimi

Elektroforetik Kaplama Parametreleri

Elektroforetik kaplamaya etki eden parametreler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Elektroforetik Kaplama Parametreleri(Avcu et al., 2019)

Süspansiyonla İlgili Parametreler	Prosesle İlgili Parametreler
- Tane boyutu - Çözücünün dielektrik sabiti - İletkenlik - Zeta Potansiyeli - Viskozite - Süspansiyonun kararlılığı	- Kaplama süresi - Süspansiyondaki tane konsantrasyonu - Taban malzemenin iletkenliği - Uygulanan voltaj

Süspansiyon İle İlgili Parametreler

Süspansiyonun kararlılığını arttırmak ve partikül yayılımını düzenlemek adına dağıtıcılar veya yüzey aktif maddelerden yararlanılmaktadır. Buna ilave olarak oluşan partikül kümelerini homojen şekilde dağıtmak için sonikasyon ve karıştırma gibi yöntemlerden de faydalanılmaktadır.

Sabit ve birikmiş partiküllerün proses boyunca gösterdiği davranışlar, oluşan tabakanın homojenliğini dolayısıyla kalitesini doğrudan etkilemektedir. Proses sırasında, yerçekimi ve elektroforez kuvvetleri arasında her zaman bir etkileşim vardır. Yerçekimi kuvveti tozun çökmesine neden olurken, elektroforez partikülleri taban malzeme üzerinde biriktirmektedir.

Dielektrik sabiti, bir malzemenin elektriksel yük depolama kabiliyetini ölçen temel bir katsayıdır. EPD prosesinde kullanılacak süspansiyonun dielektrik sabiti; hücreye uygulanan elektrik alan altında aşırı polarizasyonu ve elektrot yüzeyinde birikmeyi engelleyecek olumsuzlukları önlemek adına yeterince düşük olmalıdır. Diğer taraftan bu değer, süspansiyon içerisindeki katı partiküllerin yüzeyini elektriksel olarak yükleyebilecek kadar da yüksek olmalıdır. Bu dengenin kurulması, partiküllerin kararlı bir şekilde hareket etmesi ve homojen bir kaplama tabakası oluşturması açısından kritik öneme sahiptir. Kaplamanın gerçekleştirilebilmesi için sıvıların dielektrik sabitinin 12-25 aralığında olması gerekmektedir. Dielektrik sabitleri 12'den az olan sıvılarda, ayrıştırıcı kuvvetin yetersizliği kaplamayı engellerken dielektrik sabitleri 25'ten yüksek olan süspansiyonlarda, elektroforez yüksek iyonik konsantrasyonun neden olduğu çift katmanlı bölgenin küçülmesiyle durmaktadır (Amrollahi et al., 2015).

EPD prosesi, süspansiyon içindeki yüklü partiküllerin bir dış elektrik alan etkisiyle elektrot yüzeyine doğru hareket edip orada biriktirilmesi prensibine dayanır. Bu süreçte elektriksel yük taşınımı sadece katı partiküllerle değil, sistemde bulunan serbest iyonlar vasıtasıyla da gerçekleşir. Dolayısıyla biriken madde miktarı doğrudan toplam akım değerine bağlanamaz. İdeal bir EPD işleminde, serbest iyon miktarının minimum düzeyde tutularak elektrolitin düşük iletkenlik sergilemesi beklenir. Çünkü yüksek iyonik konsantrasyon ve buna bağlı yüksek elektrik akımı, süspansiyonun kolloidal dengesini bozmakta ve gaz çıkışı (elektroliz) gibi istenmeyen reaksiyonlara yol açarak kaplama kalitesini düşürmektedir. (Van Der Biest & Vandeperre, 1999).

Sıvı viskozitesi, süspansiyondaki partiküllerin hareketini doğrudan etkilemektedir. Bir elektrik alan kuvveti altında hareket eden parçacığın hızı, hareket yönünün tersine hareket eden bir sıvının sürtünme kuvveti tarafından engellenir. Elektroforetik kaplama işleminde süspansiyonun viskozite değerinin düşük olması gerekmektedir.

Genel itibarıyla ideal bir süspansiyonun düşük viskoziteye, yüksek dielektrik sabitine ve düşük iletkenliğe sahip olması istenmektedir. Süspansiyonda çözücü olarak kullanılan solventlerin viskozite ve dielektrik sabiti değerleri aşağıdaki Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. EPD' de Kullanılan Solventlerin Viskozite ve Dielektrik Sabiti Değerleri(Amrollahi et al., 2015)

Solvent	Viskozite (cP)= 10^{-3} N.s.m ⁻²	Bağıl Dielektrik Sabiti
Acetone	0,3087	20,7
Methanol	0,557	32,63
Water	0,890	78,2
Ethanol	1,0885	24,55
Acetylacetone	1,09	25,7
n-Propanol	1,9365	20,33
Iso-propanol	2,0439	19,92
n-Butanol	2,5875	17,51
Ethylene glycol	16,265	37,7

Zeta potansiyeli kaplamanın yoğunluğu, partikül yönü, hızı, süspansiyonun kararlılığını ve partiküller arasındaki itici etkileşimleri belirleyen bir parametredir. Zeta potansiyeli sadece partikül yığılmasını önlemek için değil, aynı zamanda yoğun bir kaplama oluşmasını sağlamak için de gereklidir. Zeta potansiyeli değişimi asitlerin, bazların ve adsorbe edilmiş iyonların süspansiyona eklenmesiyle sağlanmaktadır. Zeta potansiyeli genellikle -100 mV ila +100 mV arasında değerlerde değişmektedir. (Amrollahi et al., 2015).

Taban malzeme yüzeyinde kaplama hızı doğrusal şekilde başlar ve kaplama kalınlığı alt tabakayla iletkenliği kesecek seviyeye geldiğinde geçen süreyle beraber azalır ve belli bir süre sonra dengelenir. Partikül topaklanması ve çökmesi biriktirme hızının zamanla azalmasının nedenlerinden biridir (Besra & Liu, 2007).

EPD 'de uygun parçacık boyutlarını belirlemek için genel bir kural bulunmamasına rağmen, 30 µm'den küçük metal partiküller ile çeşitli seramik ve kil sistemleri için iyi biriktirmenin 1–20 µm aralığında meydana geldiği bildirilmiştir (Besra & Liu, 2007).

Proses İle İlgili Parametreler

Süspansiyonun kararlılığını arttırmak ve partikül yayılımını düzenlemek adına dağıtıcılar veya yüzey aktif maddelerden yararlanılabilemekte ve buna ilave olarak oluşan partikül kümelerini homojen şekilde dağıtmak için sonikasyon ve karıştırma gibi yöntemlerden faydalanılmaktadır.

Yüzeyde ince film tabaka oluşma miktarı uygulanan voltajla orantılı olarak artmaktadır. Yapılan bir çalışmada, orta düzeyde uygulanan voltaj değerlerinde (25-100 V/cm) daha düzgün film yapısının oluştuğu, daha yüksek voltaj değerlerinde (>100 V/cm) ise film kalitesinin

bozulduğu bildirilmiştir. Uygulanan elektrik alanın elektroforezin düzenli şekilde devam etmesini sağlaması gerekmektedir. Çok düşük voltaj değerleri elektroforezi başlatmak için yeterli olmazken, çok yüksek değerler ise film kalitesini bozmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek elektrik alanı süspansiyonun çalkalanmasına neden olabilmekte ve partiküllerin hızını arttırarak homojen ve yoğun olmayan kaplamalar oluşmasına sebebiyet vermektedir(Besra & Liu, 2007).

Süspansiyondaki partikül sayısı EPD için önemli bir faktördür. Bazı durumlarda, partikül tiplerinin her biri aynı yüzey yüküne sahip olsa bile, süspansiyondaki partikül sayısına bağlı olarak farklı miktarlarda çökelebilmektedirler. Süspansiyondaki partikül sayısının yüksek olması durumunda, partiküller eşit şekilde çöker. Bununla beraber partikül miktarının düşük olduğu durumlarda kendi elektroforetik hareketlilikleriyle orantılı olarak çökelmektedir.

Bir başka proses parametresi olan taban malzemenin iletkenliği ise kaplama kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Taban malzemenin iletkenliğinin düşük olması hem yavaş birikime hem de kaplamanın homojen olmamasına yol açmaktadır (Işın, 2023).

Nadir Toprak Elementleri

Nadir toprak elementleri, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tanımına göre yitrium ve skandiyum ile birlikte 15 lantanit serisi de dahil olmak üzere on yedi elementten oluşmaktadır. Yerkabuğunda aktif halde bulunan nadir toprak elementleri; oksitler, silikatlar, karbonotlar ve halojenler gibi bileşikler halinde bulunmaktadır. Yüksek atomik manyetik moment, anizotropi, elektronik enerji seviyesi geçişi, yüksek oksijen afinitesi, elektriksel nitelikleri ve atom çapında yavaş yavaş ama belirgin azalma gösteren lantanit büzülmesine sahiptirler (Shuai et al., 2024).

Skandiyum

Yerkabuğunda ortalama 22 ppm bulunan skandiyum, en çok varolan elementler arasında 31.sırada yer almaktadır. Doğada birçok cevherde bulunmasına rağmen cevherden ayrılabilir miktarları karşılayamamasından dolayı sürdürülebilirliği sınırlı kalmaktadır. Cevherden çıkarılabilmesi için Sc içeriğinin ağırlıkça 20 ppm'i geçmesi beklenmektedir. Halihazırda sadece alüminyum, skandiyum, uranyum, titanyum, nikel, kobalt, tungsten ve tantal gibi metallerin çıkarılmasında yan ürün olarak üretimi sağlanmaktadır (Dehabadi et al., 2021). Scandia (Sc_2O_3), işlenmiş skandiyumun ilk ürünü olmakla beraber genellikle skandiyum oksit ile ifade edilmektedir. Doğada kararlı izotopu olan Sc-45 formunda bulunur. Hava ile temasında yüzeyinde oksit tabakası oluşur ve rengi de gümüş beyazından sarımsı bir renge dönmektedir. Aynı zamanda geçiş metallerinden de olan skandiyum oldukça hafiftir. Demir gibi yüksek erime noktasına $1541^{\circ}C$ ve düşük yoğunluğa (3 gr/cm^3) sahip bir elementtir (Polat,2019).

Skandiyum, sürdürülebilir üretiminin olmamasının yanı sıra çıkarılmasında yaşanan zorluklar nedeniyle de piyasada az bulunan dolayısıyla da pahalı olan nadir toprak elementlerinden biridir. Temini zor ve pahalı bir element olmasına karşın son yıllarda yüksek teknoloji alanında kullanılmasıyla ilgiyi üzerine toplayan bir metal haline gelmiştir. Skandiyum askeri ve havacılık, otomotiv, optik, tıbbi amaçlı lazerler ve katı oksit yakıt hücreleri (SOFC), eklemeli imalat gibi çok geniş kullanım yelpazesine sahip olan umut verici bir elementtir (Botelho Junior et al., 2021). Skandiyumun uygulama alanlarından biri de metalurjik çalışmalardır. Özellikle magnezyum ve alüminyum alaşımlarında oldukça tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarına %0,2 kadar az bir oranda skandiyum alaşımlandırılması ile herhangi bir ısıtma işlemi gerek olmadan tane inceltilebilmekte, dayanım kazandırılabilir. Bunun yanı sıra yüksek korozyon dayanımı, yeniden kristelleşme, ısı direnci, kararlı ve yüksek sertlik, kaynak dikişlerinde sıcak çatlamayı engellemesi gibi üstün mekanik özellikler kazandırılabilir (Altınel, 2018). Magnezyum-manganez alaşımına skandiyum ilavesi manyetik indüksiyonu düşürmektedir. Zirkonyuma skandiyum alaşımlandırılması, korozyon dayanımını arttırmakla birlikte hafif lantanitlerin de oksidasyon hızını düşürmektedir (Altınel, 2018). Skandiyumun seramik, aydınlatma ve nükleer alanlarda da kullanımları mevcuttur. Seramik malzeme gruplarına Sc ilavesi ile mukavemet kazandırılabilir. Ayrıca yüksek ısı direnci, termal şoka dayanımı sayesinde alev spreli kaplamalar için cam kompozisyonlarında bulunmaktadır (Altınel, 2018).

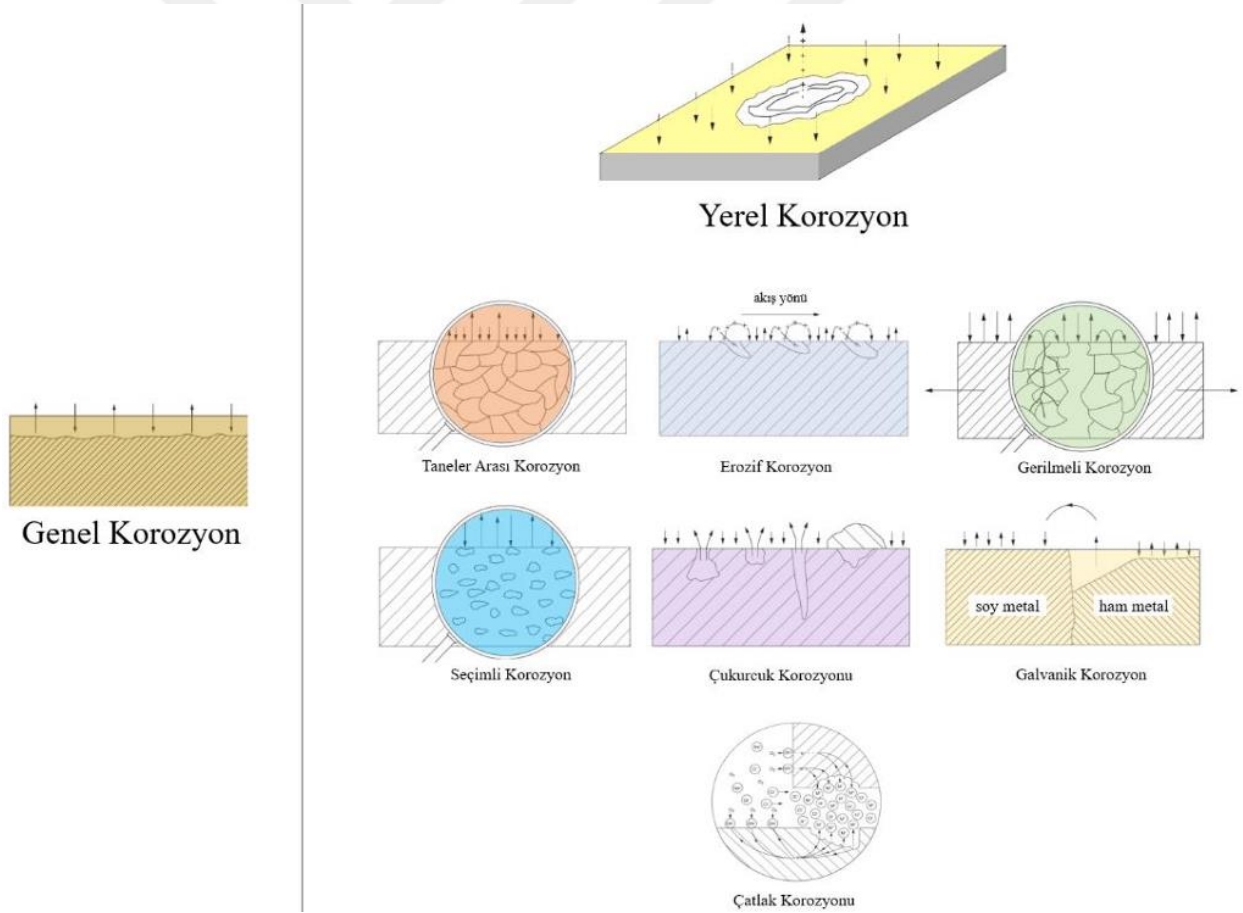
Elektrokimyasal Korozyon

Korozyon; metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu uğradığı bozulmalardır. Borularda, otomobillerde, petrol sahaları ekipmanlarında, nükleer reaktörlerde, metalik implantlarda ve çevremizde birçok yerde gözlemleyebileceğimiz bir olaydır. Metalin bulunduğu her yerde er ya da geç korozyona uğraması kaçınılmazdır. Çünkü altın dışındaki tüm metaller hava ve sudaki oksitlerine göre kararsızdır. Nitekim bu durum metallerin doğada doğal veya metalik hallerinden ziyade oksit, sülfür, silikat gibi bileşik halde bulunduğu geçmişte yapılan çalışmalarla da ortaya konmuştur. Korozyonun meydana getirdiği kayıplar, malzemenin servis ömrünü kısaltıp işlevini yerine getiremeyecek derecede hasar bırakabilmektedir. Bu hasarlar sonucunda malzemenin servis dışı kalmasının yarattığı ekonomik kaybın yanı sıra malzemenin insan yaşamı içinde uzun vadede tehlike yarattığı göz ardı edilmemelidir. Korozyonu tamamen engellemek çoğu zaman mümkün olmaz ancak birtakım işlemlerle malzemenin korozyon hızı düşürülüp, servis ömrü uzatılabilir (Altun, 2004). Korozyon nedeniyle oluşan hasar bugün küresel ekonomide iki buçuk trilyon

dolarlık harcamaya yol açmaktadır. Kayıplar, yenileme, bakım ve koruyucu tedbirler de dahil olmak üzere birçok harcamayı kapsamaktadır (Sehrawat & Mangla, 2025).

Metal ve alaşımlarının gaz fazlı ortamda uğradığı kimyasal korozyon çeşidi kuru korozyon olarak isimlendirilirken, sıvı fazlı ortamlarda uğradığı korozyona ise elektrokimyasal korozyon ismi verilmektedir (Altun, 2004). Korozyon mekanizması oluşum şekillerine göre genel ve yerel olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

Genel korozyon, korozyonun en yaygın hali olmakla beraber elektrokimyasal tepkimelerin korozif ortamda metalin tüm açık yüzeylerinde tekdüze şekilde ilerlediği korozyon mekanizmasına verilen isimdir. Yerel bir diğer adıyla lokal korozyon ise metalin belirli bölgelerinde gerçekleşen ve metalin geri kalan bölgelerini etkilemeyen bir korozyon mekanizmasıdır. Tanelerarası korozyon, çukurlaşma korozyonu, çatlak korozyonu ve galvanik korozyon gibi birçok yerel korozyon mekanizması bulunmaktadır (Speight, 2014). Genel ve yerel korozyon türleri modellenmesi Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Korozyon türleri modellenmesi (Revie, 2011; Bozkurt,2021).

Elektrokimyasal Korozyon Termodinamiği

Elektrokimyasal bir hücre olan korozyon hücresinde metalin kendiliğinden korozyona uğrama durumu termodinamik bağlamda Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta G = -nFE \quad (1)$$

Metal-çözelti ara yüzeyinde n tane elektronun taşınımı ile meydana gelen reaksiyonda tersinir potansiyel fark (E) ve F Faraday sabitini ($\sim 96,500$ cloumbs/mol) temsil etmektedir.

$\Delta G < 0 \rightarrow$ Reaksiyon ilave enerji olmadan gerçekleşebilir (termodinamik açıdan mümkün).

$\Delta G > 0 \rightarrow$ Reaksiyonun harici enerjiye ihtiyacı var.

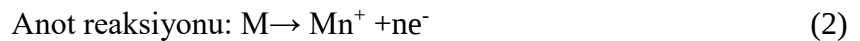
Bu enerji değişim denklemi (1) sayesinde nF sayıda yükün (E) potansiyel ile taşınımı durumunda gerekli olan enerji miktarı hesaplanmaktadır. Enerji değişim miktarı negatif olduğu takdirde dışarıdan bir takviye enerji sağlamadan reaksiyon kendiliğinden gerçekleşmektedir. Aksi halde harici bir enerji kaynağı kullanılmadan gerçekleşmesi mümkün olmayacaktır.

Elektrokimyasal Korozyon Mekanizması

Korozyon mekanizması elektrik enerjisi üretiminde kullanılan pillerin mekanizmasıyla aynıdır. Elektrokimyasal korozyon mekanizması genellikle metalin yüzeyinde başlamakta ve gerekli koşulların sürmesi halinde iç kısımlara doğru ilerlemektedir. Reaksiyonların devamlılığı, anodik ve katodik bölgeler arasındaki potansiyel farkın korunmasına ve dolayısıyla yük transferinin kesintisiz bir şekilde sürmesine bağlıdır. Elektrokimyasal korozyonun meydana gelebilmesi için anot ve katot olmak üzere iki elektrotun varlığı ile bu elektrotlar arasında elektriksel iletimin sağlanması gereklidir. Bölgesel anot veya katot bölgelerinden birinin ortadan kalkması durumunda ise elektrokimyasal reaksiyonlar durmaktadır (Yılmaz,2023).

Korozyon, anodik bölgede yükseltilme ve katodik bölgede gerçekleşen indirgenme reaksiyonlarıyla ifade edilmektedir. Bu reaksiyonlar, metal ile metalin temas ettiği elektrot ara yüzeylerinde meydana gelen anodik ve katodik süreçlerden oluşmaktadır.

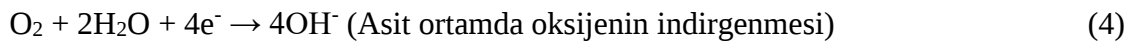
Sulu elektrokimyasal ortamlarda yürüyen reaksiyonlardaki anot ve katot mekanizmaları şu şekilde gerçekleşmektedir;



Anodik reaksiyon elektrik yükü sıfır olan nötr atomların belirli sayıda elektronu serbest bırakarak pozitif yüklü iyonlara dönüşmesi olayıdır. Genel olarak metalin kendi iyonlarına yükseltgenmesi olarak da ifade edilmektedir. Eğer elektronlar serbestleşemiyorsa veya yeterince hızlı gerçekleşemiyorsa anodik reaksiyon tamamen durmakta veya hızının azalması gerekmektedir.

Katodik reaksiyon ise anodik reaksiyonda serbest kalan elektronların harcanması olayıdır.

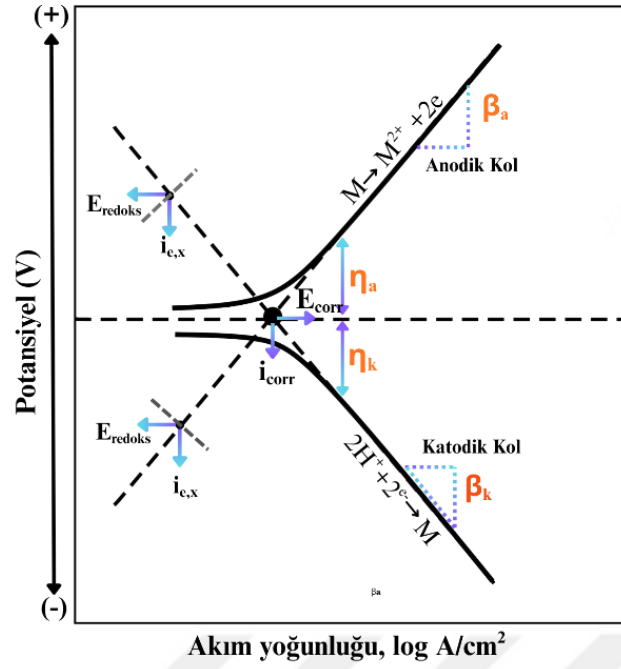
Katot reaksiyonları :



Korozyon sırasında birden fazla indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonu meydana gelebilmekte ve elektrokimyasal pillerde olduğu gibi anodik bölgede serbest kalan elektronların tamamının katodik bölgede harcanması gerekmektedir (Cirik, 2017).

Elektrokimyasal Polarizasyon Eğrileri

Polarizasyon eğrileri korozyon mekanizmasının anlaşılması ve nicelik değerlerle ifade edilebilmesi için temel kabul edilmektedir. Bir metal herhangi bir dışarıdan etki (akım, kimyasal değişim) olmaksızın elektrolit içerisinde indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri oluşturabilmekte ve sistem denge halinde kalabilmektedir. Çünkü metalde yükseltgenen elektron sayısı ile indirgenen elektron sayısı denktir. Ancak elektrot üzerinden harici bir akım verildiğinde sistem denge halinden saparak yeni bir potansiyel ve de reaksiyon hızına ulaşmaktadır. Bu değişim polarizasyon (η) olarak ifade edilmektedir (Yılmaz, 2023).



Şekil 4. Teorik olarak polarizasyon eğrisi (Bozkurt, 2021).

Metalik bir malzeme elektrolit ortamına daldırıldığında, anodik ve katodik reaksiyonların kinetik dengesi sonucunda belirli bir potansiyel ve akım yoğunluğu oluşturmaktadır. Bu potansiyel E_{corr} ve bu potansiyele karşılık gelen akım yoğunluğu ise i_{corr} olarak adlandırılmaktadır.

Üç elektrot düzenindeki elektrokimyasal korozyon test hücresinin anot ve katot potansiyelleri potansiyostat/galvanostat aracılığı ile kontrol edilmektedir. Elektroda anodik yönde bir akım uygulandığında anot bölgesinden uzaklaşan elektronlar açık devre potansiyeline göre pozitif yöne doğru kaymaktadır. Katodik yönde bir akım uygulanması durumunda ise elektronlar elektrot yüzeyinde birikerek açık devre potansiyeline göre negatif yöne doğru kaymaktadır.

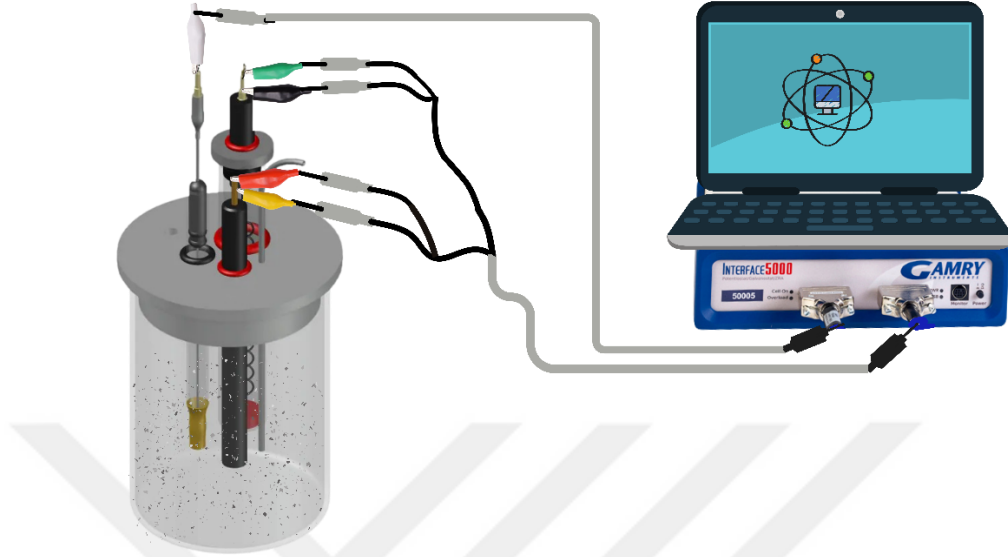
$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \quad (8)$$

$$\eta_k = \beta_k \log \frac{i_k}{i_0} \quad (9)$$

Elektrot potansiyeline (V) karşılık gelen akım yoğunluğunun (i_{corr}) logaritmik olarak çizdirilmesiyle polarizasyon eğrisi elde edilmektedir. β_a ve β_k ise anodik ve katodik kolun eğimini vermektedir (Bozkurt,2021; Atik,2025).

Elektrokimyasal Korozyon Ölçüm Yöntemleri

Şekil 5’de üç elektrotlu elektrokimyasal korozyon hücresinin şematik modeli gösterilmektedir.



Şekil 5. Elektrokimyasal korozyon hücresi; çalışma elektrotu (ÇE), karşı elektrot (KE) ve referans elektrot (RE) içeren üçlü elektrot sistemi (*Tezgahta ve Sahada Elektrokimya*, n.d.)

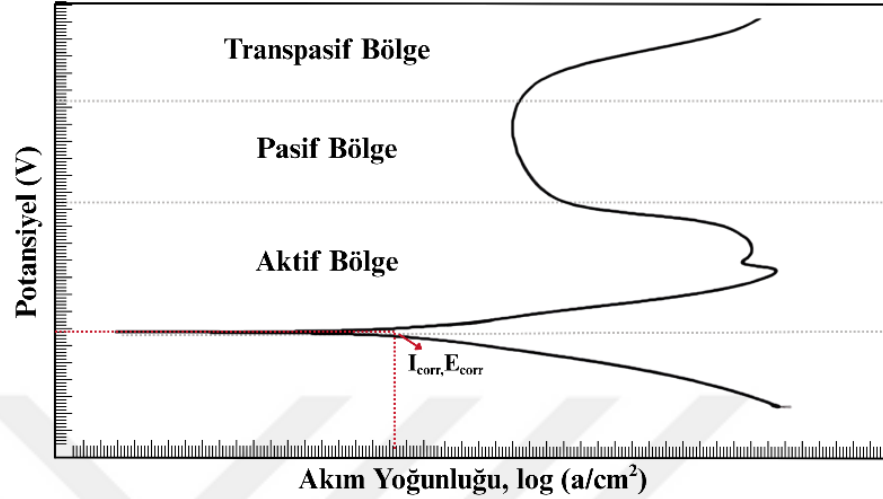
3 elektrotlu korozyon hücresi olarak bilinen bu sistemde çalışma elektrodu, referans elektrot ve karşı elektrot bulunmaktadır. Çalışma elektrodunun potansiyeli, referans elektroda göre ölçülmekte ve çalışma elektrodu ile karşı elektrot arasındaki akım potansiyostat tarafından kontrolü sağlanmaktadır. Referans elektrot olarak olarak doymuş kalomel elektrot veya standart gümüş-gümüş klorür (Ag/AgCl) elektrot tercih edilmektedir. Karşı elektrot olarak ise platin veya grafit kullanılmaktadır. Referans elektrodun ucu, çözelti direncinden kaynaklanan IR düşüşünü en aza indirmek için çalışma elektrodunun yüzeyine yakın bir yere konumlandırılmaktadır (Yi et al., 2019).

Elektrokimyasal korozyon ölçümleri potansiyodinamik tarama (PT) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) yöntemleriyle sağlanmaktadır. Uygulanacak yöntem malzemenin türüne, korozyon mekanizmasına, ortam koşullarına ve elde edilmesi istenen veri türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Potansiyodinamik Tarama

Potansiyodinamik tarama, açık devre potansiyeline ulaşmış hücredeki anodik ve katodik reaksiyonların potansiyostat aracılığı ile dinamik potansiyel kontrolünün sağlandığı bir ölçüm yöntemidir. Açık devre potansiyeli üzerinden $\pm$ yönde başlangıç ve bitiş potansiyelleri uygulanmasıyla pasif metaller için potansiyodinamik polarizasyon diyagramı elde

edilmektedir. Uygulanan potansiyel değeriğinin fonksiyonu olarak bir akım değeri ölçülmekte ve bu doğrultuda anodik ve katodik kolların eğimlerinin kesiştiği noktada korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon potansiyeli (E_{corr}) değeriğlerine ulaşılmaktadır.



Şekil 6. Pasif metallerde potansiyodinamik polarizasyon.

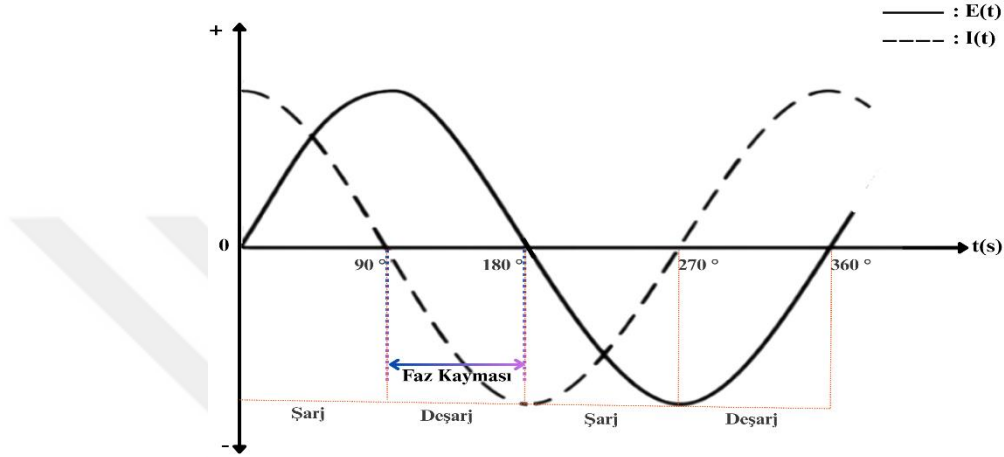
Şekil 6'da görüldüğü üzere metal aktif bölgede çözünmekte ve akım yoğunluğu potansiyel ile beraber hızla artmaktadır. Uygulanan potansiyelin artmasıyla beraber pasivasyon potansiyeline ulaşmakta ve yüksek potansiyele karşı akım değeri sabit kalmaktadır. Aktif-pasif geçiş bölgesi olarak da bilinen bu pasivasyon alanında gerilim uygulanmasına rağmen metal yüzeyinde ince pasif bir oksit film oluşmasından dolayı akım değeri sabit kalmaktadır. Bu alanda çözünme miktarı azalmakta ve yüzey pasifleşmektedir. Pasif bölgeye ulaşıldığında ise yüzeyin kararlı pasif oksit film ile kaplanmasından ötürü çözünme miktarı minimuma ulaşmaktadır. Pasif bölgeden daha yüksek potansiyellerde bulunan transpasif bölgede ise kararlı pasif oksit film bozulmaya başlamakta ve indirgenmeden daha fazla yükseltgenmektedir. Metal yüzeyinde aktif bölgeye nispeten daha düşük hızda çözünmeler oluşmaktadır (Bozkurt, 2021; Atik 2025).

Deney sonucunda ulaşılan anodik ve katodik eğriler doğrusal olmadıklarından matematiksel denklemler ile eğriye teğet doğrular çizdirilmektedir. Tafel ekstrapolasyonu olarak adlandırılan bu teğet çizme işlemi, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı hakkında bilgi sahibi olunabilmesine imkan tanımaktadır. Tafel ekstrapolasyonu, bilhassa paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum gibi pasifleşebilen metal gruplarının korozyon davranışlarını tespit etmek üzere kullanılan bir yöntemdir.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES)

EES (elektrokimyasal empedans spektroskopisi) korozyonda yaygın olarak kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. Bu yöntem ile metal yüzeyine farklı frekans değerlerinde (0,001 ila 100000 Hz) ve (-50 mV) küçük genlikli alternatif akım uygulanarak yüzeyin eş zamanlı verdiği yanıtlar takip edilmektedir.

Yüzeye farklı frekanslarda sinüzoidal potansiyel dalgaları uygulanması durumunda yüzeyin bu potansiyele gösterdiği alternatif akım yine aynı frekans değerinde oluşmaktadır.



Şekil 7. Sinüzoidal olarak gönderilen potansiyele karşılık elde edilen akım ve faz kayması

Ancak kapasitör uygulanan akım ile arasında bir faz farkı oluşturmakta ve oluşan bu farktan dolayı akım ile potansiyel aynı fazda ilerleyememektedir. Potansiyel değeri sıfırdan başlamasına rağmen akım değişimi daha sonra oluşmaktadır. Bu şekilde potansiyel $\frac{\pi}{2}$ faz farkı ile akımı geriden takip etmektedir. Bu faz farkı Şekil 7’de de görüldüğü üzere faz kayması olarak adlandırılmaktadır.

Doğru akım teorisinin aksine alternatif akımda frekans sıfır değildir. Çünkü hücreye uygulanan akımın belirli bir zaman diliminde genliği ve yönü değişmektedir. Doğru akım teorisindeki direnç kavramı alternatif akım teorisinde empedans olarak tanımlanmaktadır. Bu teoriye göre Ohm yasası gereğince;

$$E = I \times Z \quad (10)$$

eşitliği geçerli olmaktadır. Bu eşitlik empedans (Z), akım (I) ve potansiyel (E) ile ifade edilmektedir. Empedans ölçümleri ile elektrokimyasal sisteme uygun eşdeğer devre modelleri geliştirilmektedir. İletilen potansiyel ve akım zamanın bir fonksiyonu olarak 11 ve 12 bağıntılarıyla ifade edilmektedir.

$$E_{(t)} = E_0 \sin(\omega t) \quad (11)$$

$$I_{(t)} = I_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (12)$$

Bu bağıntılar doğrultusunda frekansa bağlı empedans değeri;

$$Z(\omega) = \frac{E_t}{I_0} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} \quad (13)$$

olarak hesaplanmaktadır.

EES analizlerinde sinüzoidal potansiyel ve akım sinyallerini karmaşık sayıların üstel formunda ifade edebilmek için Euler bağıntısı kullanılmaktadır. Bu sayede empedansın büyüklük ve fazı tek bir denklemle açıklanabilmektedir.

$$\exp(j\theta) = \cos\theta + j\sin\theta \quad (14)$$

j faz farkından kaynaklanan akım ve potansiyelin sanal kısmını ifade ederken $\sqrt{-1}$ değerindedir. Bu bağıntının öncülüğünde empedansın gerçek ($Z'(\omega)$) ve sanal ($Z''(\omega)$) değerlerinden oluşan matematiksel bir ifade elde edilmektedir.

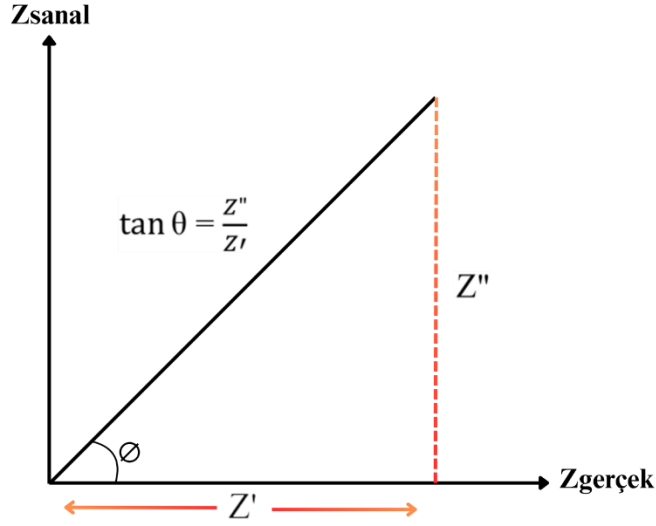
$$E_{(\text{Toplam})} = E_0 \exp(j\omega t) = E' + jE'' \quad (15)$$

$$I_{(\text{Toplam})} = I_0 \exp(j\omega t - \theta) = I' + jI'' \quad (16)$$

$$Z_{\text{Toplam}} = \frac{E' + jE''}{I' + jI''} = Z' + jZ'' \quad (17)$$

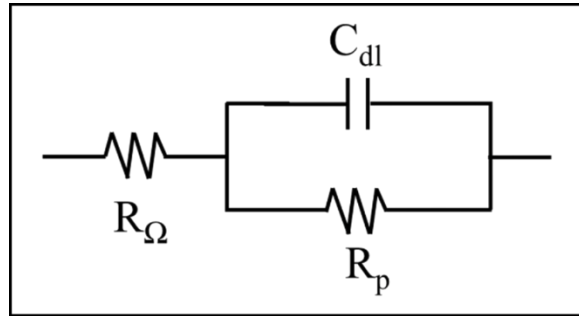
Pisagor bağıntısına göre Empedans büyüklüğü $|Z|$ ise denklem 18'deki gibi yazılmaktadır.

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (18)$$



Şekil 8. Koordinat düzleminde x-gerçek ve y-sanal eksenlerde empedansın gösterimi (Bozkurt,2021).

Elektrokimyasal sistemlerin analizi sırasında, bu sistemlerin elektriksel davranışlarını temsil edebilmek için eşdeğer devre modellerinden yararlanılmaktadır. Bu modeller sayesinde deneysel olarak ölçülen verilerle sistemin teorik yapısı arasında bağlantı kurulabilir ve karakteristik empedans grafikleri oluşturulabilmektedir. Elektrokimyasal empedans yöntemlerinde reaksiyonların gerçekleştiği temel bölge, elektrot ile elektrolit arasındaki ara yüzeydir. Bu yöntem, elektrot yüzeyinde meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme olaylarının kinetik özellikleri ve reaksiyon mekanizmaları hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan güçlü bir analiz yöntemidir(Bozkurt,2021; Atik,2025).

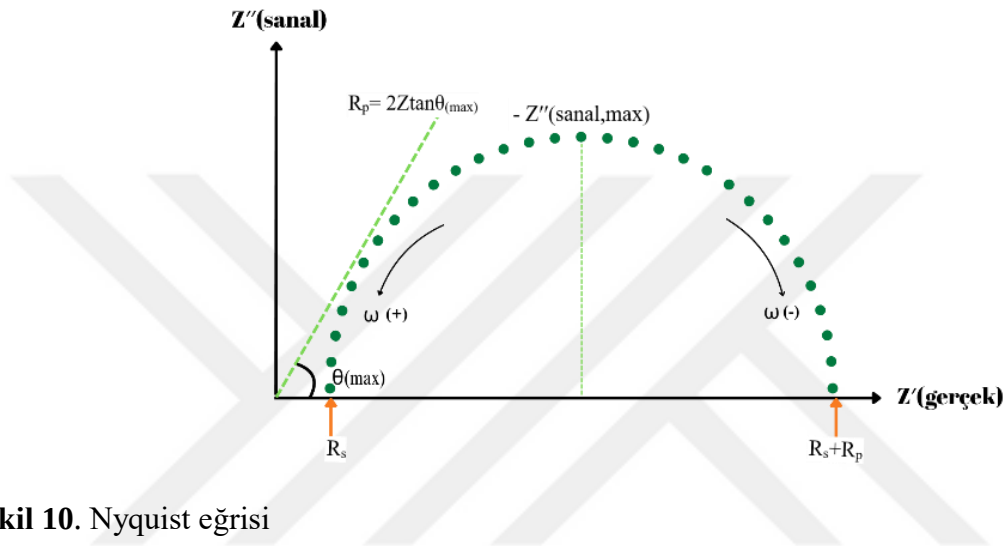


Şekil 9. Basit Randle devresi

Elektrokimyasal sistemlerin empedans davranışlarını açıklamak için Randle eşdeğer devresi (Şekil 9) kullanılmaktadır. Bu devre sistemdeki temel elektrokimyasal süreçleri temsil eden ana elemanlardan oluşmaktadır. Başlıca bunlar arasında, çalışma ve referans elektrotları arasında yer alan çözeltinin elektriksel direncini ifade eden R_s , elektrot–elektrolit ara yüzeyinde gerçekleşen elektron transferine karşı oluşan yük transfer direnci (R_{ct}) yer almaktadır. Bir diğeri metal yüzeyinde yüklerin birikmesi sonucu oluşan çift tabaka kapasitansı (C_{dl}) olup, ara yüzeyin kapasitif özelliklerini temsil etmektedir. Bu üç elemanın bir araya gelmesi sistemin

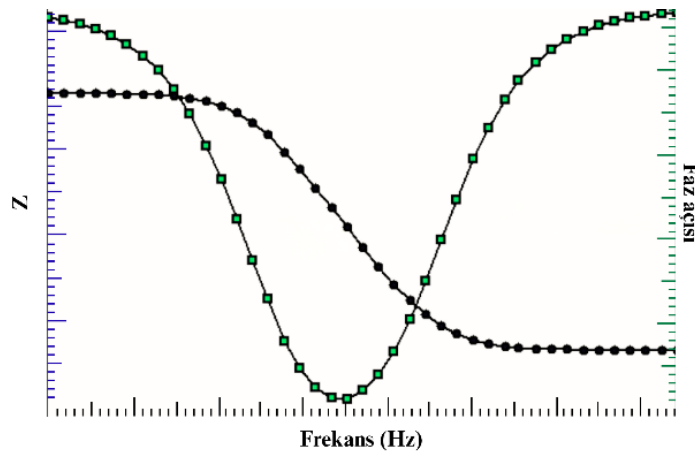
farklı frekans aralıklarındaki davranışlarının anlamlı şekilde modellenmesine imkan tanımaktadır.

Bu bağlamda çalışma elektrodu denge potansiyeline eriştikten sonra Nyquist ve Bode eğrileri elde edilmektedir. Bu eğrilerden elde edilen veriler neticesinde sistemin oksitlenmeye karşı gösterdiği direnç olarak da atfedebileceğimiz polarizasyon direnci (R_p) değerine erişilebilmektedir. Polarizasyon direncine ek olarak, korozyon hızı, dielektrik katsayısı, ara yüzey kapasitans değeri, elektrolit direnci ve kaplanmış bir yüzey ise kaplama direnci değerleri hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir (Bozkurt,2021).



Şekil 10. Nyquist eğrisi

Nyquist eğrisinde sanal ve gerçek empedans değerlerinin toplamı korozyon direnci ile doğru orantılıdır. Toplam empedans ne kadar yüksek ise çalışma elektrotu ara yüzeyinde oksitlenme o kadar az meydana gelmektedir. Çift tabaka kapasitansı, sanal empedans değerini maksimuma ulaştığı nokta esas alınarak hesaplanmaktadır.



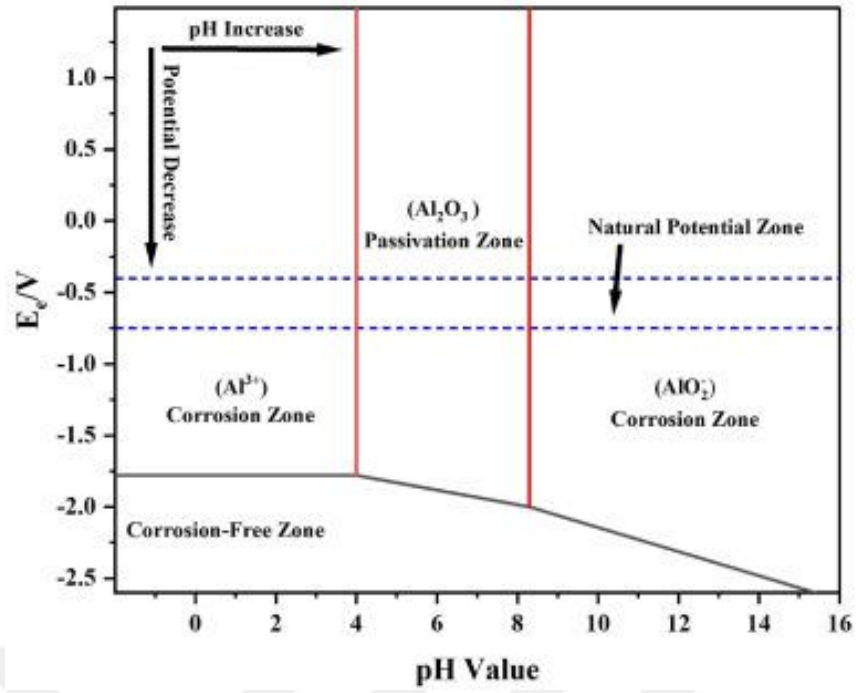
Şekil 11. Bode eğrisi

Frekansa bağılı olarak empedans ve faz açılarının değişimlerini ifade etmek adına Bode eğrisi (Şekil 11) kullanılmaktadır. Bu eğrideki faz açısının elektrotun korozyon direncini yorumlamak adına önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Faz açısı arttığında korozyon direnci de artmaktadır.

Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyon Davranışı

Alüminyum ve alaşımlarının korozyon miktarı, yüksek negatif potansiyelinden dolayı pozitif yüklü metallerle temas ettiğinde büyük oranda artmaktadır. Özellikle alkalilere (tuz, amonyak, sodyum hidroksit) karşı hassas olan Al ve alaşımlarının alkali konsantrasyonu arttığı takdirde korozyon hızı da artmaktadır. Doğal olarak oluşan oksit tabakası sayesinde alüminyum, orta derecede agresif ortamlarda belirli bir korozyon direnci sergileyebilmektedir. Ancak aşındırıcı gazların, katı partiküllerin yoğun olarak bulunduğu endüstriyel atmosferler ve denizel koşullar gibi daha zorlu çevresel ortamlarda bu pasif oksit film tabakası yeterli koruma sağlayamamakta ve özellikle çukurlaşma (pitting) korozyonuna karşı sınırlı bir dayanım göstermektedir. Bilhassa uçaklar ve deniz taşıtları nem, hava olayları, yağ, hidrolik sıvılar ve tuzlu su gibi aşındırıcı ortamlarda korozyona maruz kalmaktadır. Zamanla incelen doğal oksit tabakasıyla birlikte korozyon mekanizması yapısal bütünlüğü ve güvenliği koruma noktasında karşılaşılan en büyük sorunlar arasında gelmektedir (T. Cui et al., 2025; Meng & Frankel, 2004a).

Alüminyum üretim sonrası ilk havayla temasa geçtiğinde, alüminyumun oksijene karşı yüksek afinite ve nispeten düşük standart potansiyeli göstermesinden dolayı , (20–100 Å) film kalınlığında, yüzeye tutunmuş durağan bir alüminyum oksit (Al_2O_3) pasif film tabakası hızla oluşmaktadır. Pasif film tabakasının deformasyona uğramasıyla alüminyumda Al^{+3} ve AlO_2^- iyonları oluşmakta ve beraberinde yüzeyde çözünmeler başlamaktadır. Kütlede kayıplar başlamasıyla da korozyona uğradığı sonucuna ulaşılabilmektedir. Alüminyumun korozyona karşı gösterdiği tutum Pourbaix adı verilen diyagramda (Şekil 12) incelenmekte olup; bu diyagram sulu ortamlarda, farklı pH değerleri ve elektrot potansiyelleri altındaki termodinamik kararlılık bölgelerini detaylı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 12. 5°C'de uygulanan farklı potansiyel ve pH değerlerinde alüminyumun korozyon davranışına ilişkin Pourbaix diyagramı (Zakaria *et al.* 2025)

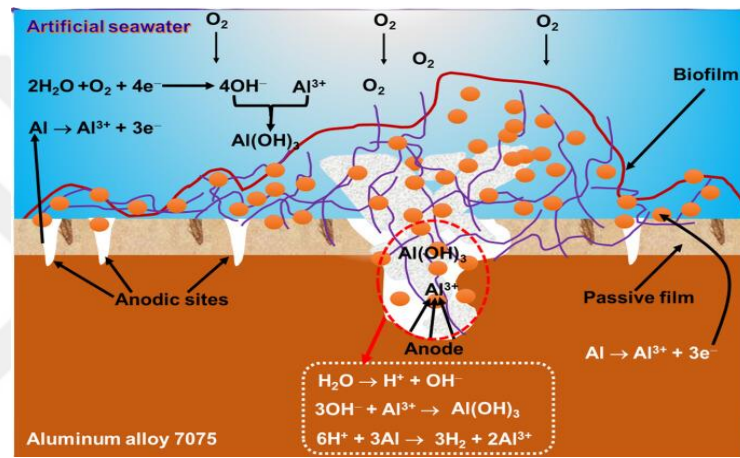
pH 0–4 aralığında asidik ortamda pasif film kararsızdır. Bu nedenle potansiyel arttıkça alüminyum çözünerek Al^{3+} iyonları oluşturmakta ve aktif korozyon meydana gelmektedir. pH ≈ 4 –9 bandında dik çizgilerle modellenen pasivasyon bölgesinde ise pasif film kararlı durumda ve korozyona karşı direnç göstermektedir. Bu bölge mühendislik uygulamalarında en çok görülen atmosferik şartlar, tuzlu su gibi ortamları içermektedir. Ortamın pH değeri 9'u geçtiğinde ise pasif film çözmeye başlamakta ve alüminat iyonları (AlO_2^- veya $Al(OH)_4^-$) oluşmaktadır. Özellikle alkali çözeltilerde alüminyumda hızla çözünmeler meydana gelmektedir. Korozyonsuz bölge olarak isimlendirilen düşük potansiyel alanında alüminyum korozyona karşı pasif durumdadır. Çünkü çözünme termodinamik açıdan mümkün değildir. Bu alan elektrot potansiyelinin düşük olduğu indirgen ortamı temsil etmektedir (Ahmad, 2006; Zakaria *et al.*, 2025).

Diyagramdan elde edilen bilgiler sulu ortamda saf metallerin Ph ve potansiyelleri değiştirilerek korozyona uğramasının önlenmesi açısından önem teşkil etmektedir.

7xxx serisi alaşımları klorür iyonları içeren ortamlarda çukurlaşma korozyonu ve gerilmeli korozyona uğrayabilmektedir. Bilhassa tuzlu su ortamında Al7075'in pasif yüzeyi lokal şekilde çukurlaşmaya açık bir hale gelmektedir. Oluşan çukurcukların derinliği arttıkça ve birbirlerine olan mesafe azaldıkça, çukurdan çatlak oluşumuna doğru bir ilerleme gösterdiği yapılan çalışmalarla desteklenmiştir (Zakaria *et al.*, 2025)

Al7075 alaşımasının kompozisyonunda yer alan bakır, saf alüminyuma oranla mukavemeti artırsa da yoğun bulunduğu bölgelerde elektrokimyasal fark yaratarak galvanik korozyonu tetiklemektedir. Alaşımdaki çinko ve magnezyum ise yaşlandırma işlemi sırasında tane incelterek ikincil fazların oluşumunu sağlamakta; ancak bu çöktürmelerin sınırlarında oluşan potansiyel farklar çukurcuk (pitting) korozyonuna zemin hazırlamaktadır. Malzeme içinde gelişen ve kritik boyutlara ulaşana kadar tespiti oldukça zor olan gerilmeli korozyon çatlakları nedeniyle, bu alaşıma sahip bileşenlerin düzenli bakım ve kontrol altında tutulması büyük önem arz etmektedir (Baydoğan, 2003; Doğan, 2023).

Al7075'in uğradığı yerel korozyona ait şematik gösterim Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Al7075 yerel korozyon şematik gösterimi (Zhang, 2022).

Islanabilirlik

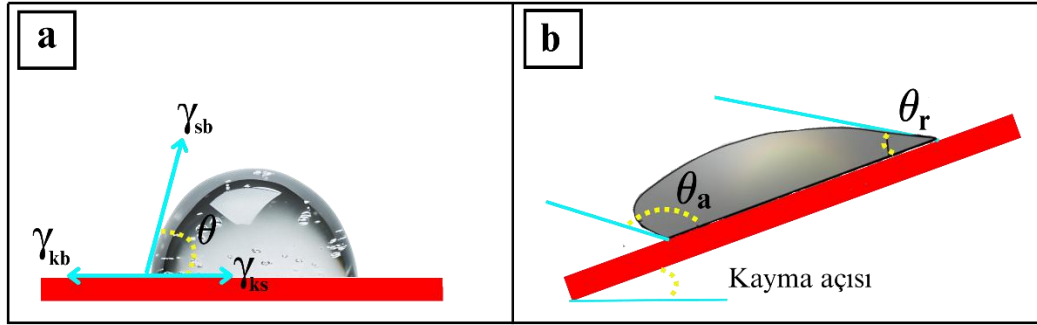
Islanabilirlik, bir sıvının katı bir yüzey üzerinde yayılma eğilimini tanımlayan temel bir yüzey olayıdır ve katı-sıvı-gaz ara yüzeyleri arasındaki denge ilişkilerine dayanmaktadır. Bir yüzeyin ıslanabilirliği, sıvının yüzeye ne derece tutunabildiğini ve yüzey boyunca nasıl davrandığını belirlemektedir. Bu nedenle malzeme bilimi, kaplama teknolojileri, korozyon, yağlama ve biyomalzemeler gibi birçok alanda kritik önem taşımaktadır.

Islanabilirlik davranışının temelinde ara yüzey enerjileri bulunmaktadır. Katı-sıvı-gaz ara yüzeyleri arasındaki denge durumu, klasik olarak Young denklemi (Denklem 19) ile açıklanmaktadır. Bu yaklaşıma göre temas açısını belirleyen faktör, sıvı yüzey gerilimi ile katı yüzey enerjisi arasındaki kuvvetlerin dengelenmesi olarak ifade edilmektedir.

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma \cdot \cos\theta \quad (19)$$

Nicel olarak değerlendirilmesinde temas açısı (θ) ve kayma açısı temel bir göstergedir. Bir sıvı damlasının yüzeye konulmasıyla oluşan bu açı, sıvı ile yüzey arasındaki etkileşimin

derecesini ifade etmektedir. Temas açısı küçük olduğunda sıvı yüzeye daha fazla yayılır ve yüzeyin hidrofilik karakterde olduğu kabul edilmektedir. Buna karşılık yüksek temas açısı, yüzeyin sıvıyı itme eğiliminde olduğunu ve hidrofobik özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Genel olarak $\theta < 90^\circ$ iyi ıslanabilirliği (hidrofilik), $\theta > 90^\circ$ ise düşük ıslanabilirliği (hidrofobik) temsil etmektedir.



Şekil 14. (a) Statik temas açısı, (b) Dinamik temas açısı (Hu and Ma 2019).

Yüzey enerjisi yüksek olan katılar, sıvıyı yüzeyde daha kolay yayarak düşük temas açısı oluştururken; düşük yüzey enerjisine sahip yüzeylerde temas açısı büyümekte ve ıslanabilirlik azalmaktadır.

Yüzeyle gerçek bir temas durumunda ise yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal yapıdan etkilenmektedir. Pürüzlülük arttıkça temas açısı ideal yüzeyden sapmaktadır. Bilhassa kaplamalı yüzeylerde ıslanabilirlik davranışı, hem kaplamanın oluşturduğu mikroyapısal pürüzlülük hem de kaplamanın kimyasal bileşimi tarafından belirlenmektedir. Kaplama sonrası değişen yüzey morfolojisi, temas açısının ideal düz yüzey değerinden sapmasına neden olmaktadır. Ayrıca kaplama tabakasının oksit karakteri, yüzey enerjisini ve sıvının yüzeye adsorpsiyon eğilimini değiştirerek ıslanabilirliği doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kaplamalı numunelerde ölçülen temas açıları, kaplamanın yapısal bütünlüğü, koruyucu performansı ve yüzey-çevre etkileşimleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

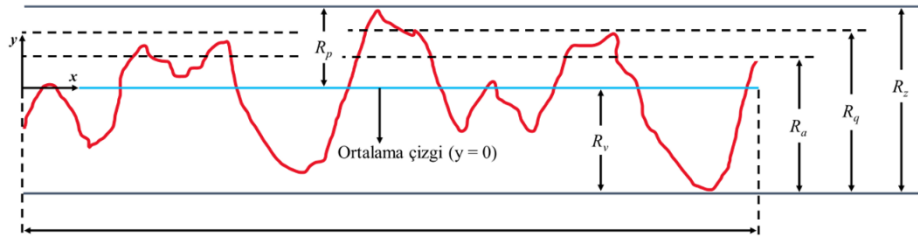
Triboloji

Birbirlerine göre izafi hareket gerçekleştiren iki yüzey arasında meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama davranışlarını triboloji bilim dalı incelemektedir. Tribolojik sistem genel olarak üç temel unsurdan oluşmaktadır. Bunlar birbiriyle temas halinde bulunan iki yüzey, bu yüzeyler arasındaki etkileşim ortamı (genellikle bir yağlayıcı film veya çevresel ortam) ve bu sistemin maruz kaldığı hareket ve yük koşullarıdır. Bu unsurların etkileşimi, sistemin tribolojik davranışını belirleyen en önemli faktörler olarak gösterilmektedir.

Pürüzlülük

Pürüzlülük, malzeme yüzeyinin ideal geometrik yüzey durumundan saparak nispeten mikro seviyedeki düzensizlikler göstermesi olarak ifade edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü genellikle profilometreler, optik tarayıcılar veya atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gibi araçlarla ölçülmektedir. Bu ölçümlerden elde edilen veriler pürüzlülük parametreleri açısından değerlendirilmektedir (Şekil 15). En yaygın kullanılan pürüzlülük parametreleri şunlardır;

- R_a (Ortalama Pürüzlülük): Ölçülen hat boyunca, ortalama çizgiden olan sapmaların mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. En temel ve yaygın kullanılan parametredir. Düşük R_a daha pürüzsüz bir yüzeyi temsil ederken, yüksek R_a değeri yüksek yoğunluklu girinti ve çıkıntıları temsil etmektedir.
- R_z (Maksimum Profil Yüksekliği): Belirli bir ölçüm uzunluğu boyunca yüzeydeki en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki farkı ifade etmektedir. Bu ifadeye göre düşük R_z değeri, pürüzsüz yüzey kalitesi istenildiği durumlarda arzu edilmektedir.
- R_t (Toplam Profil Yüksekliği): Ölçüm uzunluğu boyunca yüzey profilinde belirlenen en yüksek tepe noktası ile en derin çukur arasındaki toplam yükseklik farkını ifade etmektedir. Özellikle kaplamalı yüzeylerde R_t parametresi, kaplama kalınlığındaki düzensizliklerin ve yüzeyde oluşan mikro çatlak veya boşlukların değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.
- R_p (Maksimum Tepe Yüksekliği): Ölçüm uzunluğu boyunca yüzey profilinde ortalama çizgiye göre belirlenen en yüksek tepe noktasının yüksekliğini ifade etmektedir. Yüzeydeki çıkıntıların ne kadar belirgin olduğunu göstermekte ve özellikle ilk temas anında gerçek temas alanı ve temas gerilmeleri üzerinde etkili olmaktadır. Yüksek R_p değerleri, yüzey tepeciklerinin karşı yüzeye daha erken temas etmesine neden olarak sürtünme ve başlangıç aşınmasını artırabilmektedir.
- R_v (Maksimum Çukur Derinliği) : Ölçüm uzunluğu boyunca yüzey profilinde ortalama çizgiye göre belirlenen en derin çukurun derinliğini temsil etmektedir. Bu parametre, yüzeydeki oyuk ve boşlukların boyutunu yansıtmakta ve yağlayıcı tutunumu, korozyon ürünlerinin birikimi ve çatlak başlangıcı açısından önem taşımaktadır. Yüksek R_v değerleri, tribolojik sistemlerde yağ filmi sürekliliğini olumsuz etkileyebileceği gibi, lokal hasar oluşumuna da zemin hazırlayabilmektedir.



Şekil 15. Yüzey pürüzlülük ölçümü (Kadivar *et al.* 2021; Atik,2025)

Mühendislik uygulamalarında yüzey pürüzlülüğünün uygun düzeyde seçilmesi hem tribolojik performansın hem de sistem verimliliğinin optimizasyonu açısından kritik önem taşımaktadır. Örneğin, yatak sistemlerinde çok yüksek pürüzlülük yağ filminin bozulmasına neden olurken, çok düşük pürüzlülük de yağın yüzeye tutunmasını zorlaştırarak karışık yağlama rejimlerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle tüm uygulamalar için pürüzlülük değeri standartlara uygun olacak şekilde optimize edilmektedir.

Sürtünme

Birbirlerine göre izafi hareket eden iki cismin yüzeyleri arasında harekete karşı olan dirence sürtünme adı verilmektedir. Statik sürtünme birbirlerine göre hareket etmeyen cisimlerin yüzeylerinde meydana gelen sürtünme şekli iken dinamik sürtünme ise hareketin sağlandığı sürtünme şekli olarak tasfir edilmektedir. Cismin harekete başlayabilmesi için uygulanan kuvvetin statik sürtünme kuvvetini geçmesi gerekmektedir. Cisim harekete başladığı anda statik sürtünme sonlanmakta ve yerini dinamik sürtünmeye bırakmaktadır.

Aşınma

Birbirlerine kayma, yuvarlanma veya darbe hareketiyle temas eden iki cismin arasında malzeme kaybı meydana gelmektedir. Aşınma mekanizmasında iş parçası (aşınan), karşıt cisim (aşındırıcı), ara malzeme ve temas kuvveti ve hareket olmak üzere 5 parametre söz konusudur. Genel olarak yüzey durumu ve malzeme kaybıyla değerlendirilen aşınma, malzeme kaybı yaşamadan da yerdeğiştirme ile gerçekleşebilmektedir.

Aşınma oranı ve uygulanan yük arasındaki bağıntı Archard Aşınma Eşitliği ile ifade edilebilmektedir.

$$\Delta V = k.W.L \quad (20)$$

$$\Delta V = \text{Hacim kaybı (mm}^3\text{)}$$

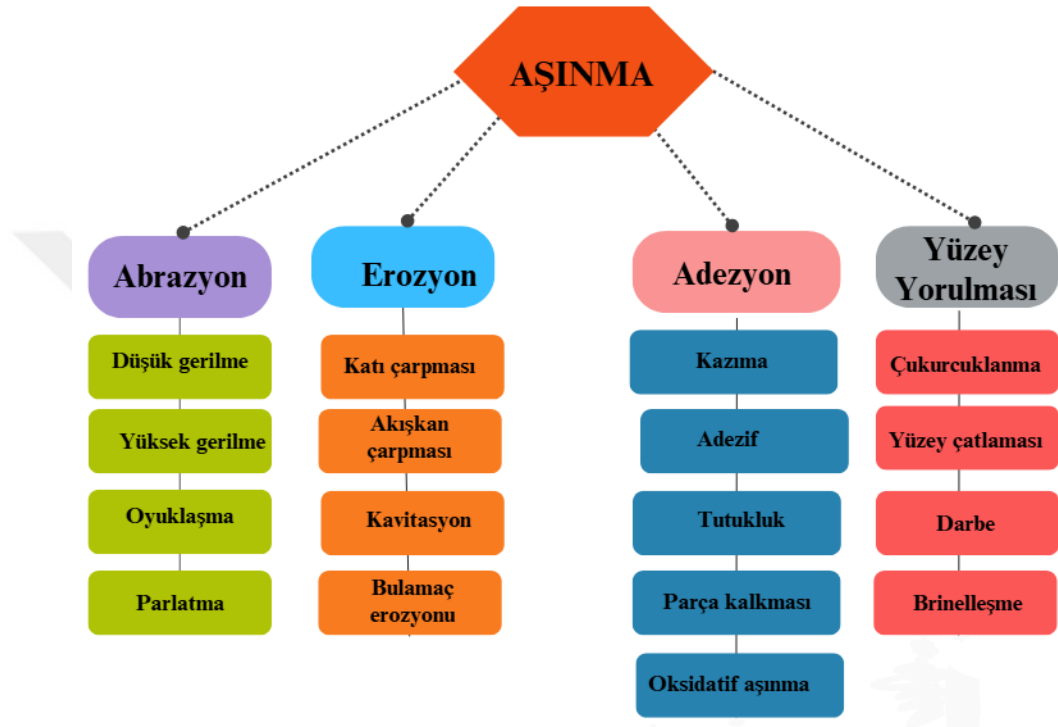
$$k = \text{Aşınma oranı}$$

$$W = \text{Yük (N)}$$

$$L = \text{Aşınma mesafesi (mm)}$$

Yüzey pürüzlülüğü, sertlik, süneklilik ve yüzeydeki kaplamalar aşınma oranını etkileyen parametrelerdir. Yeterli miktarda yağlamanın sağlanmadığı yüzeylerde; çatlamlar, plastik deformasyonlar, mikro yapısal değişimler, oksit tabakasının artması ve nem adsorpsiyonu gibi olaylar meydana gelebilmektedir.

Aşınma malzemenin servis ömrünün kısalmasına, makine, ekipman bozulmasına ve ciddi mali kayıplara neden olabilmektedir (Melentiev, 2023). Aşınma türlerinin sınıflandırılması Şekil 16’da verilmiştir.

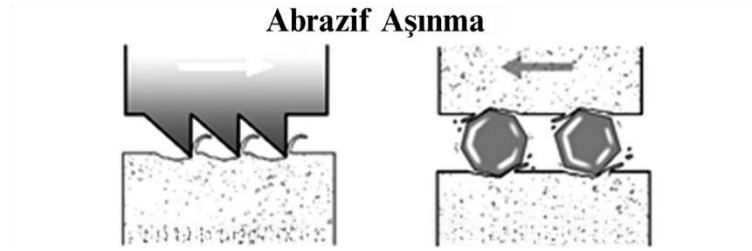


Şekil 16. Aşınma türleri (Bozkurt,2021)

Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, sert bir cismin veya partikülün karşıt yüzeyde yaptığı izafi hareket sonucu yumuşak olan yüzeye hasar vermesi olayıdır (Şekil 17). Bu partiküller sisteme dışarıdan dahil olabileceği gibi adezif aşınma sonucunda kopan kalıntılar olarak da aşınmaya neden olabilmektedir. Yağlayıcı içerisinde bulunabilecek ürünlerde ve hatta malzemelerin yüzeylerine yapışmış olan inklüzyonlarda abrazif aşınmaya neden olabilmektedir. Bu aşınma çeşidi iki veya üç elemanlı olmak üzere iki farklı türde olabilmektedir. İki elemanlı abrazif aşınma daha sert olan cismin diğer cismin yüzeyini çizmesi ile açıklanırken, üç elemanlı abrazif aşınma sürtünen

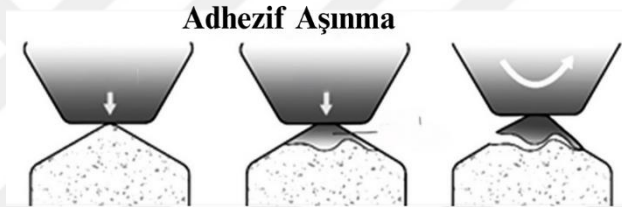
karşıt yüzey cisimlerinin dışında üçüncü bir cismin de serbest aşındırıcı olarak yüzeyler arasını kazınması olarak açıklanabilmektedir.



Şekil 17. Abrasif aşınma mekanizması (Tsujimoto *et al.* 2018)

Abrasif aşınmadan minimum seviyede etkilenebilmek için iş parçasının yüzey sertliği artırılabilir, oksitler, inklüzyonlar ve partiküller uzaklaştırılabilir ve son seçenek olarak da aşınan parçalar değiştirilebilmektedir (Seçer ,2019).

Adhezif Aşınma



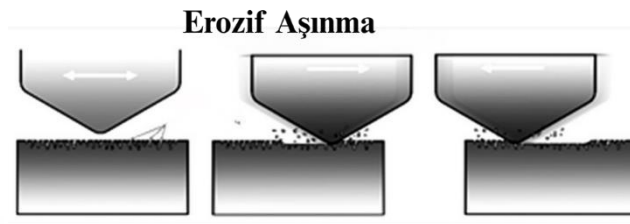
Şekil 18. Adhezif aşınma mekanizması (Tsujimoto *et al.* 2018)

Adhezif aşınma, kayma esnasında temasta olan yüzeylerin yapışmasından kaynaklanan yaygın ve en az engellenebilen aşınma türüdür (Şekil 18). Adhezyon temas eden yüzeylerdeki atomlar arası çekimler sonucunda oluşur. Yüzey kalıntılarının yokluğunda adezyon kuvveti de artmaktadır. Bununla beraber sıcaklık ve uygulanan yükün artmasıyla adezif bağların sayısı da çoğalmaktadır. Bu yeni bağlar kayma sırasında kırılır ve kırılmayı sağlayacak olan bu kuvvet sürtünme kuvvetine de etki etmektedir. Kimyasal ve fiziksel etkileşimlerle oluşan bu kuvvetler yüzeydeki pürüzlülüklerde adezyon oluşumuna ve bu yüzeyler arasında ürün taşınımına neden olmaktadır. Adhezif aşınmayı sınırlayabilmek için termal dayanıma sahip malzeme kullanılmalı, uygun yağlama ve yük miktarı uygulanmalıdır (Seçer ,2019).

Erozif Aşınma

Katı veya sıvı partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması ile erozif aşınma meydana gelmektedir (Şekil 19). Aşınmaya maruz kalan iş parçasının yüzey özellikleri aşınma oranını önemli ölçüde etkilemektedir. Bununla beraber çarpan partikülün özellikleri, çarpma açısı, çarpma hızı ve partikül boyutu da erozif aşınma miktarını belirleyen önemli parametrelerdir. Partikül hızının çok düşük olduğu durumlarda plastik deformasyon oluşmayabilmekte ve

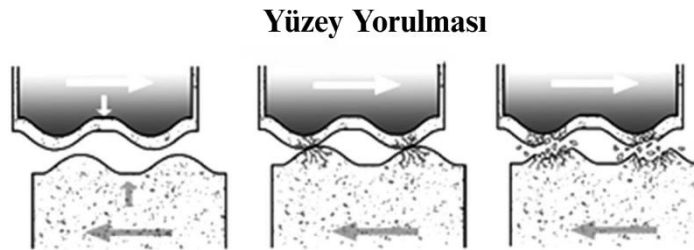
aşınma yüzey yorulması şeklinde devam edebilmektedir. Ancak hız yüksekse, malzeme yüzeyinde kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir ve hatta yüzeyin erimesine bile neden olabilmektedir. Aşındırıcı partikül boyutunun artması, malzeme yüzeyine nüfuz eden temas alanını ve penetrasyon derinliğini artırarak mikro-kesme mekanizmasını şiddetlendirmekte, bu da aşınma hızının kritik bir boyut eşiğine kadar doğrusal olarak yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca sert partiküller yumuşak partiküllere nazaran daha yüksek aşınma hızına sahiptir. Partikül sert ancak yuvarlak şekle sahip ise kuvvetli bir erozif aşınma gerçekleşmez. Partiküllerin keskinliği, akı değeri ve birim alana etki eden parçacıkların kütlesi de erozif aşınmaya etki eden faktörler arasındadır (Erdem, 2006).



Şekil 19. Erozif aşınma mekanizması (Tsujimoto *et al.* 2018)

Yüzey Yorulması

Yorulma aşınması, tekrarlayan sürekli ve değişken yükler altında iş parçasının yüzeylerinin alt kısımlarında çatlaklar meydana gelmesi olayı olarak ifade edilmektedir (Şekil 20). Yüzeyde oluşan bu çatlaklar kayma düzlemleri ya da tane sınırı dislokasyonlarına sahip yüzeylerde iç kısımlara doğru ilerlemektedir. İlk çatlaktan farklı bir çatlak gelişebildiği gibi hali hazırda olan çatlak, altındaki bir başka çatlığa da bağlanabilmektedir. Artan çatlak, yüzeyle buluştuğunda aşınma partikülleri oluşturabilmekte ve sonucunda malzeme yüzeyinden partikül kopmasına neden olabilmektedir. Yorulma aşınması tekrarlı yuvarlanma hareketi yapan rulmanlarda, dişlilerde ve kamlarda sıklıkla görülmektedir (Seçer, 2019).



Şekil 20. Yüzey yorulma aşınma mekanizması (Tsujimoto *et al.* 2018)

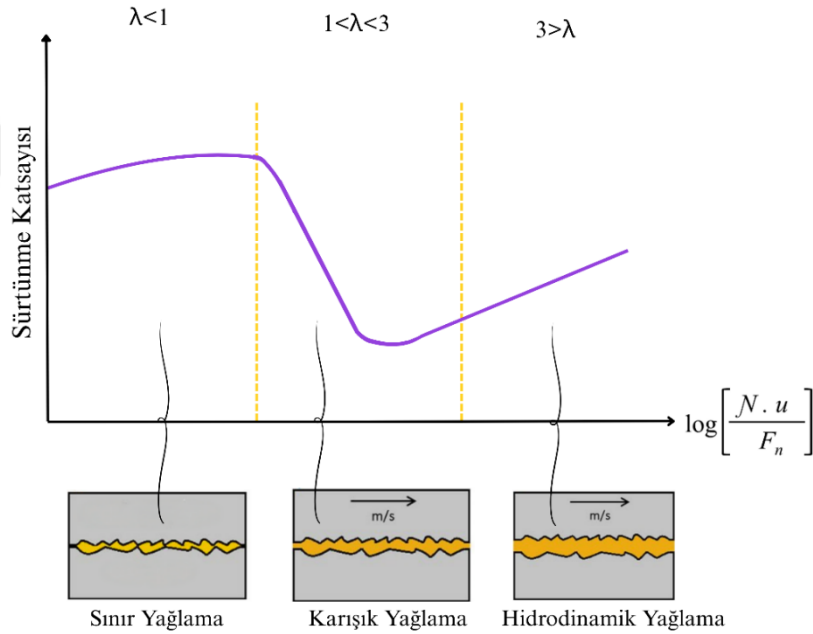
Yağlama

Birbirlerine temas eden yüzeylere veya bu yüzeyler arasında oluşan adezyon kuvvetini azaltmaya yönelik iç sürtünme direnci düşük malzemeler eklendiğinde, sürtünme dayanımı

önemli ölçüde azalmaktadır. Bu bağlamda sürtünme dayanımını azaltmak ve aşınma oranını düşürmek için katı, sıvı veya gaz halde bulunan birtakım yağlayıcılar kullanılmaktadır. Yağlayıcılar temas ettiği yüzeye tutunarak korozyona karşı koruma sağlar ve yüzeyi ıslatarak istenilmeyen partikülleri de uzaklaştırmaktadır. Ayrıca tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan sıcaklık artışını da önemli miktarda düşürmektedir (Seçer, 2019).

Şekil 21.'de görülen Stribeck eğrisi, temas durumundaki iki yüzey arasındaki yağlama rejimlerini ve sürtünme davranışlarını tanımlamak için geliştirilen tribolojik bir eğridir. 1902 yılında Richard Stribeck tarafından deneysel çalışmalarla ortaya konulan bu eğri, bilhassa döner yatak sistemleri ve makine elemanlarının yağlama performansının analizinde kullanılmaktadır. Bu eğri, temas yüzeyleri arasındaki bağıl hız, viskozite ve yük koşullarının değişimiyle sürtünme katsayısının değişimini esas alan bir eğri olması bakımından büyük önem taşımaktadır.

Temas eden yüzeylerin hızına ve durumlarına bağlı olmak üzere 3 farklı yağlama türü bulunmaktadır. Bunlar sınır, karma (elastohidrodinamik) ve hidrodinamik yağlama türleridir.



Şekil 21. Stribeck Eğrisi (Munoz *et al.* 2020).

Pürüzlü yüzeylerin yağlanması için kullanılabilecek yağlama şekillerini belirlemek için boyutsuz bir yağlama parametresi olan λ kullanılmaktadır:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{qA}^2 + R_{qB}^2}} \quad (21)$$

Denklem 21 'de görüldüğü üzere payda bulunan h_0 minimum yağlama film kalınlığını, paydada bulunan değerler ise sırasıyla temas eden cisimlerin ortalama karekök yüzey pürüzlülük değerlerini vermektedir (Akbarzadeh & Khonsari, 2010; Wang & Wang, 2013).

Bu bağlamda yağlama metodolojileri şu şekilde karakterize edilmektedir;

- $3 \leq \lambda$ ise hidrodinamik yağlama; hareket halindeki iki yüzey yağlayıcı film tabakasıyla tamamen birbirlerinden ayrılmış halde bulunmaktadır. Sürtünme katsayısı en düşük seviyede ve yüzey aşınması minimumdur. Hareketli yüzeylerin hızının ve yağ viskozitesinin artması yağ filminin kalınlığının artmasına neden olmaktadır.
- $1 \leq \lambda < 3$ ise karışık yağlama; hem yüzey pürüzleri arasında temas hem de yağ filmi aracılığıyla yük taşınması birlikte deformasyona neden olmaktadır.
- $\Lambda < 1$ ise sınır yağlama; uygulanan yükün artması, hızın azalmasıyla beraber yağlayıcı viskozitesinin düşük olduğu sistemlerde yağ filminde kopmalar oluşabilmektedir. Bunun sonucunda karşılıklı pürüzlerin birbirine teması nedeniyle aşınma gerçekleşebilmektedir (Atik,2025; Abdelbary & Chang, 2023).

MATERYAL VE METOD

Kullanılan Malzeme

Bu tez çalışmasında taban malzeme olarak Al7075 alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın ağırlıkça yüzdesel kimyasal kompozisyonu Tablo 9 'da kimyasal ve mekanik özellikleri ise Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9. Al7075 Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu

Elementler	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Al
% Ağırlık	5,6	2,5	1,6	0,22	0,5	0,07	Salt çoğunluk

Tablo 10. Al7075 Kimyasal ve Mekanik Özellikler

Akma Gerilmesi (MPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eş değer kütle	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Birim Uzaması (%)
103	2,81	10,454	228	71,7	0,33	10

Numunelerin Hazırlanması

Taban malzememiz olan Al7075 alaşımı, 20 mm çapında ve 3 mm kalınlığında eş numuneler olmak üzere kesilmiştir. Kesme işlemi, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan Metkon Metacut 302 ıslak kesme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminin ardından numuneler, yüzeydeki kesme ve yağ kalıntılarından arındırılmak amacıyla metanol içerisinde ultrasonik temizleyici yardımıyla temizlenmiştir.

Yüzey hazırlığının devamında, metalik olmayan inklüzyonları (oksit, sülfür vb.) yüzeyden uzaklaştırmak ve pürüzsüz bir zemin elde etmek için numuneler sırasıyla 60, 220, 400, 800, 1200 ve 2000 numaralı SiC (silisyum karbür) zımparalar ile işlenmiştir. Yüzey parlaklığının sağlanması amacıyla, 3 µm çapındaki alümina (Al₂O₃) seramik tozu ile ince parlatma işlemi uygulanmıştır. Kaplama öncesinde nihai yüzey temizliğinin tam anlamıyla sağlanabilmesi için numuneler 15 dakika boyunca metanol çözeltisinde bekletilmiş ve kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

Kaplama sonrasında numunelerin kesit incelemeleri ve karakterizasyon çalışmaları için Metkon DMT 35 kiti kullanılarak soğuk bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Anodik EPD Yöntemiyle Al7075-Sc₂O₃ Kaplanması

Al7075 taban malzemesi numunelerinin farklı parametrelerde kaplanma işlemi Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan HSPY 300-01 DC güç kaynağı kullanılarak 0.1 A sabit akım ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Kaplamanın yapılacağı hücre için 80 ml etanol (C₂H₆O), 15 ml saf su ve 7 ml asetik asit (CH₃COOH) çözeltisine iki farklı miktarda 0,1 gr ve 0,2 gram Sc₂O₃ eklenmesinin ardından elde edilen karışımı süspanse etmek için manyetik ve ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilmiştir. Deney düzeneğinde, iki elektrotlu bir EPD hücresi oluşturulmuştur. Bu hücrede hem iş parçası hem de karşıt elektrot olarak Al7075 alaşımı kullanılmıştır. Elektrotların hazırlanan süspansiyona daldırılması ve uygun elektrik alanın uygulanmasıyla beraber, numuneler dört farklı deneysel koşul altında kaplama işlemine tabi tutulmuştur.

Tablo 11. Kaplama İşlemi İçin Kullanılacak Parametreler

Kod	Çözelti	Akım (A)	İşlem Sıcaklığı	Kaplama Süresi (Dakika)
S110	7 ml CH ₃ COOH + 80 ml C ₂ H ₆ O +15 ml saf su+ 0.1 gr Sc ₂ O ₃	0,1	25 C°	10
S120	7 ml CH ₃ COOH + 80 ml C ₂ H ₆ O +15 ml saf su+ 0.1 gr Sc ₂ O ₃	0,1	25 C°	20
S210	7 ml CH ₃ COOH + 80 ml C ₂ H ₆ O +15 ml saf su+ 0.2 gr Sc ₂ O ₃	0,1	25 C°	10
S220	7 ml CH ₃ COOH + 80 ml C ₂ H ₆ O +15 ml saf su+ 0.2 gr Sc ₂ O ₃	0,1	25 C°	20

Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon

İşlemsiz Al7075 ve kaplanmış tüm numunelerin faz analizleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan Malvern Panalytical Empyeon X- ışını kırınım ölçer (XRD) cihazında Cu – K α ışınımı ile gerçekleştirilmiştir.

Kaplama öncesi ve sonrası yüzey morfolojisi, kesit görüntüleri, korozyon ve aşınma testleri sonrası yüzey görüntüleri için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan ZEESs Sigma 300 cihazı kullanılmıştır.

Numunelerin kaplama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri için Mahr marka yüzey pürüzlülük cihazı ile her bir numune yüzeyinde farklı bölgelerden alınan 10 ölçümün

ortalaması esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, yüzey pürüzlülüğü R_a , R_p , R_v , R_t ve R_z parametreleri cinsinden ifade edilmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan tüm numunelerin statik temas açısı karakterizasyonu, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde yer alan Attention Theta Flex model optik temas açısı ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Test Çözeltilerinin Hazırlanması

Korozyon ve sıvı aşınma testleri için saf su ile seyreltilen %3,5 derişimli NaCl çözeltisi kullanılmıştır.

Tribolojik Deneyler

Sc_2O_3 kaplı ve işlemsiz Al7075 numunelerin aşınma testlerinin gerçekleştirilebilmesi için Turkeyus PODWT&RWT aşınma test cihazı kullanılmıştır. Zıt yönlü doğrusal hareketli düzlem-pim yöntemi ile aşınma testi gerçekleştirilmiştir. 6 mm çapındaki Al_2O_3 (alümina) top aşındırıcı olarak kullanılmış ve test süresince sürtünme kaynaklı kuvvet verileri yük hücresi aracılığı ile elektrik sinyallerine dönüştürülerek bilgisayara kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler neticesinde aşınma oranlarının hesaplanmasında Archard bağıntısı (Denklem 22) kullanılmıştır.

$$\Delta V = k.W.L \quad (22)$$

ΔV = Hacim kaybı (mm^3)

k = Aşınma oranı

W = Yük (N)

L = Aşınma mesafesi (mm)

Tablo 12. Aşınma Test Parametreleri

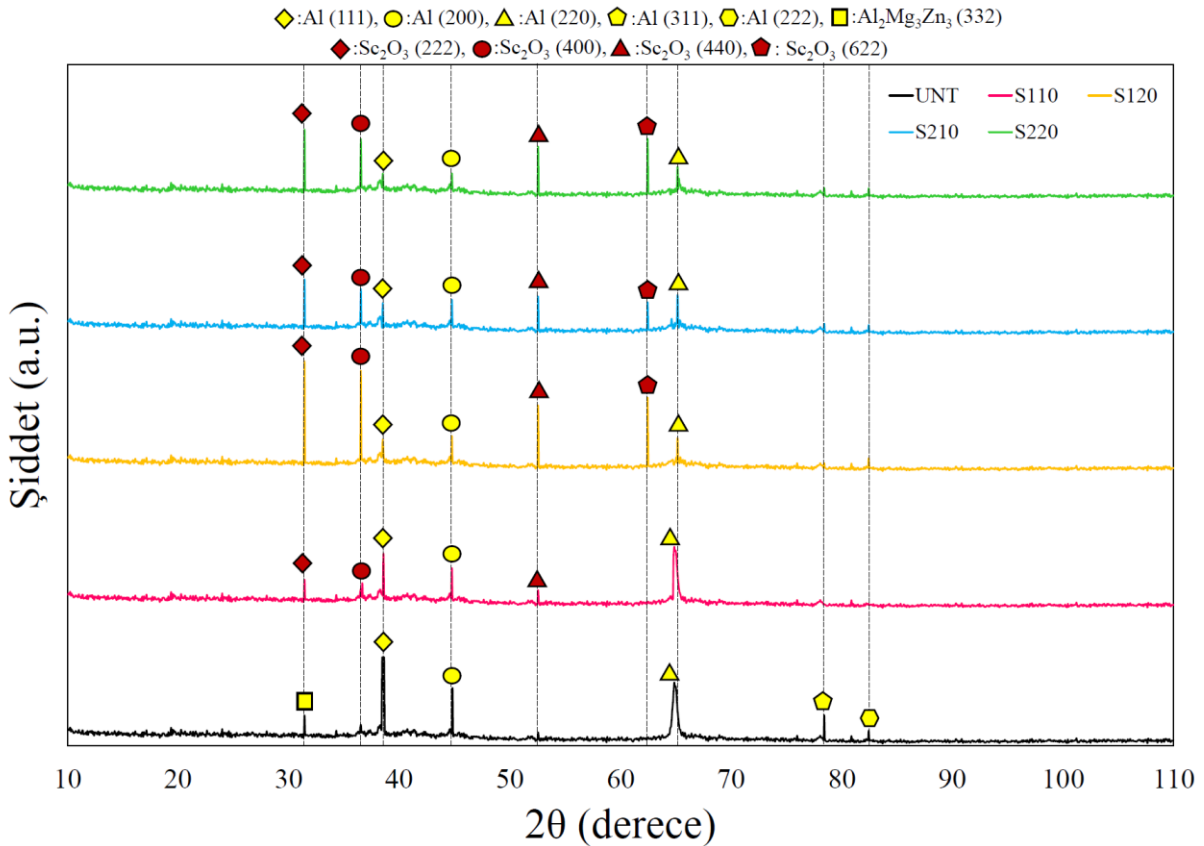
Parametre	Miktar
Yük	1 (N)
Kayma Mesafesi	16 (mm)
Çalışma Frekansı	1 (Hz)
Toplam Süre	1000 (sn)
Toplam Mesafe	90 m
Sıcaklık	24 ± 2 ($^{\circ}C$)

Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri

Al7075 alaşımının Sc_2O_3 kaplanması sonrası elektrokimyasal korozyon davranışındaki değişimlerin tespiti için oda sıcaklığında %3,5 derişimli NaCl özeltisi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Gamry G750 potansiyostat/galvanostat sistemi kullanılarak gerçekleştirilen açık devre potansiyeli, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi deneyleri için lü elektrot sistemi oluşturulmuş ve bu sistemde işlemsiz ve Sc_2O_3 kaplı numuneler çalışma elektrodu, grafit çubuk karşıt elektrot ve Ag/AgCl de referans elektrot olarak kullanılmıştır. Açık devre potansiyeli (OCP) ölümü için gereken süre 7200 sn olarak belirlenmiştir. Ardından numuneler -1;1 V potansiyel aralığında 1 m/V sn'lik tarama hızıyla potansiyodinamik olarak polarize edilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi deneyleri numunelere başlangıç frekansı 100 kHz ve bitiş frekansı 0,01 Hz olacak şekilde uygulanmıştır. Korozyon deneyine tabi tutulan bu numuneler daha sonrasında korozyon ürünlerinden arındırılmak suretiyle ultrasonik temizleyicide metanol ile temizlenmiştir.

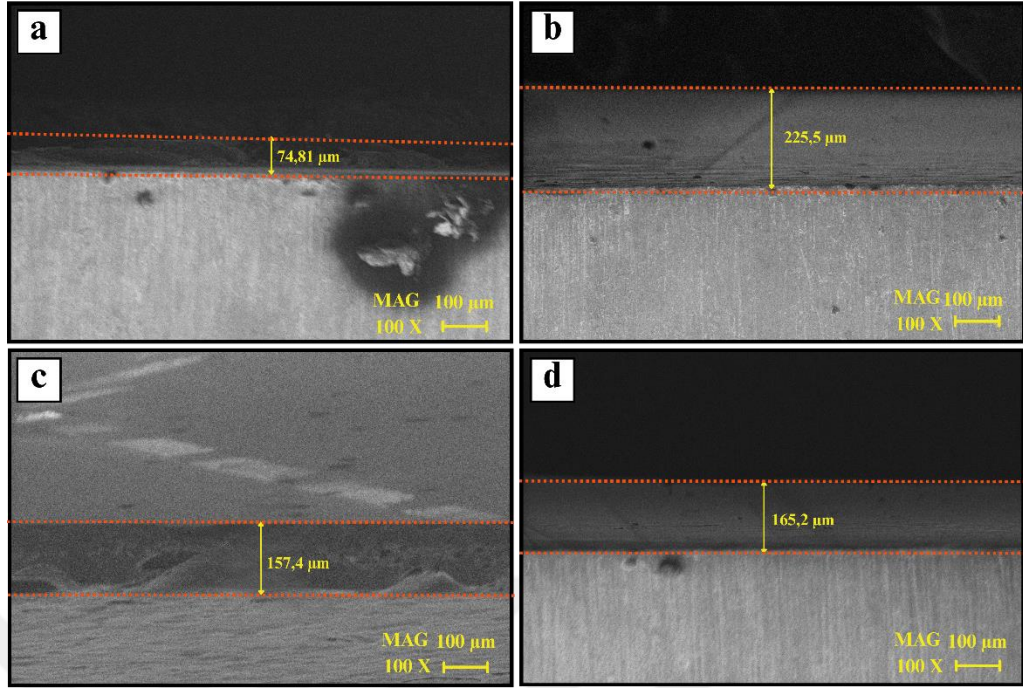
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 22’de tüm deney şartlarına ait XRD sonuçları verilmiştir. Taban malzemeyi temsil eden eğride Al nin baskın element olarak pik şiddetlerine yansıdığı görülmektedir. Farklı kristal düzlemleri temsil eden pikler incelendiğinde en yüksek şiddetli formun Al (111) ile $38,4^\circ$ de olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra Al (200) - $44,7^\circ$ de, Al (220) - $65,1^\circ$ de ve Al (311) - $78,2^\circ$ de pik üretmiştir. Ayrıca temel katkı elementlerinden olan Mg ve Zn nin Al ile oluşturduğu faz olan $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (332) üçlü sistemi $30,8^\circ$ de yer bulmuştur. Son olarak Al (222) ye ait zayıf pik $82,4^\circ$ de görülmüştür. Kaplamalı formları temsil eden eğriler genel olarak incelendiğinde Sc_2O_3 ün varlığını ispatlar nitelikte pik ve şiddet değişimlerinin varlığından söz edilebilir. Bu bağlamda (222), (400), (440) ve (622) indisli düzlemleri temsil eden pikler tespit edilmiştir. En yüksek şiddetli pik S120 şartında (400) indisli düzlem olmuştur ve $36,5^\circ$ de yer bulmuştur. Ayrıca taban malzeme kaplamayı temsil eden bazı piklerin derecelerinin çok yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (332) - $30,8^\circ$; Sc_2O_3 (222) - $30,4^\circ$). S120 şartında kaplamayı temsil eden pik şiddetlerinin diğer şartlardan daha yüksek olduğu söylenebilir. Bu durum daha homojen ve kalın bir oksit filmin varlığına işaret eder.



Şekil 22. Tüm deney şartlarına ait XRD grafiği.

Kaplama Prosesi

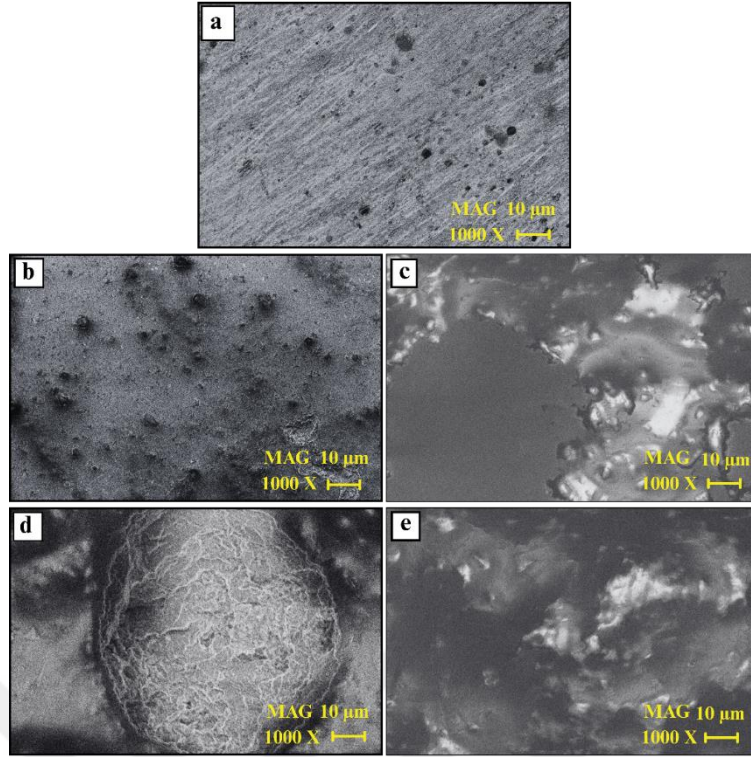


Şekil 23. Sc_2O_3 kaplı numunelere ait yüzey kesit SEM görüntüleri; (a) S110, (b) S120, (c) S210, (d) S220.

Sc_2O_3 kaplı numunelere ait kesit SEM görüntüleri Şekil 23'te verilmektedir. Kaplama kalınlıkları incelendiğinde, kaplama süresi ve Sc_2O_3 miktarının kaplama oluşumu üzerinde birlikte etkili olduğu görülmektedir. En düşük kaplama kalınlığı, kısa kaplama süresi nedeniyle yüzeyde yeterli birikimin gerçekleşemediği S110 numunesinde (74,81 µm) elde edilmiştir. Kaplama süresinin 20 dakikaya çıkarılmasıyla birlikte S120 numunesinde (225,5 µm) kaplama kalınlığında belirgin bir artış gözlenmiştir.

Bununla birlikte, Sc_2O_3 miktarı ve kaplama süresindeki artış kaplama kalınlığında doğrusal bir artışa yol açmamıştır. Özellikle yüksek partikül miktarlarında ve kısa kaplama sürelerinde, yüzeyde partikül yığılması ve buna bağlı düzensiz çökeltme oluştuğu, bunun da kaplama etkinliğini azalttığı düşünülmektedir. Bu durum, S210 numunesinin (157,4 µm) kaplama kalınlığının S220 numunesine (165,2 µm) kıyasla daha düşük olmasını açıklamaktadır.

En yüksek kaplama kalınlığının S120 numunesinde elde edilmesi, bu parametre kombinasyonunun kaplama oluşumu açısından daha uygun koşullar sağladığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, kaplama kalınlığının yalnızca kaplama süresine veya partikül miktarına bağlı olmadığını, her iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 24. İşlemsiz Al7075 ve Sc_2O_3 kaplı numunelere ait yüzey SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (e) S220.

Şekil 24'te işlemsiz Al7075 ve farklı kaplama koşulları altında elde edilen numunelere ait yüzey SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntüler, kaplama işleminin yüzey morfolojisi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

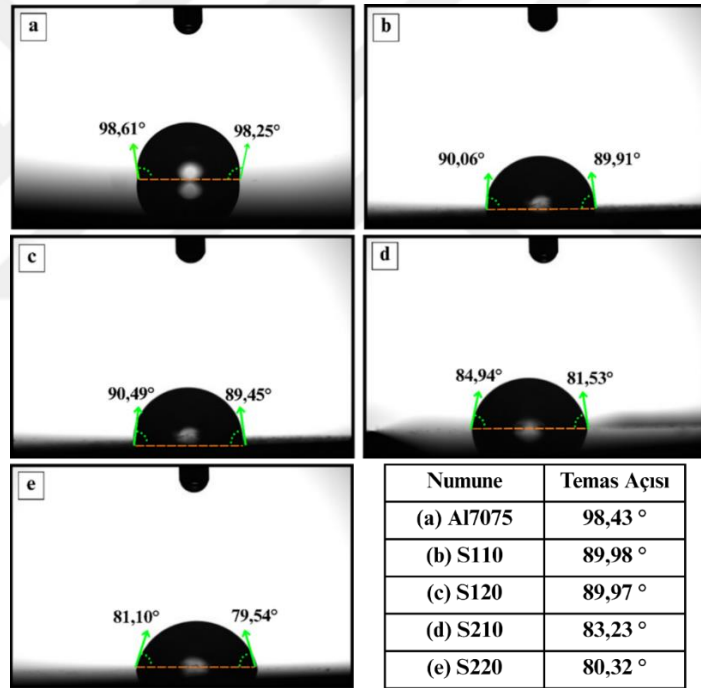
Şekil 24(a)'da işlemsiz Al7075 numunesinin yüzey morfolojisi görülmektedir. Yüzeyde üretimsel ve yüzey hazırlama işlemlerinden kaynaklanan çizgisel izler belirgin olup, genel olarak nispeten düzgün bir yüzey yapısı mevcuttur. Bununla birlikte, yer yer mikro ölçekte düzensizlikler ve lokal yüzey kusurları gözlenmektedir.

Şekil 24(b)'de S110 numunesi yüzeyinin kaplamasız numuneye kıyasla belirgin şekilde daha pürüzlü hale geldiği görülmektedir. Yüzey boyunca homojen olmayan partikül dağılımı ve yer yer oluşan kümelenmeler, kaplama süresinin ve birikim miktarının artmasıyla kaplama homojenliğinin azaldığını göstermektedir. Şekil 24(c) S120 numunesinde kaplama tabakasının bazı bölgelerde daha kompakt ve yoğun bir yapı oluşturduğu, ancak bu yapının tüm yüzeye eşit şekilde yayılmadığı dikkat çekmektedir. Bu durum, kaplama süreci sırasında lokal birikim farklılıklarının oluştuğuna işaret etmektedir. Şekil 24(d) S210 numunesinde belirgin bir partikül yığılması görülmektedir. Yoğun şekilde yüzeye tutunmuş olduğu ancak iç yapısının çatlaklı ve düzensiz bir morfoloji sergilediği anlaşılmaktadır. Bu tür yapılar, mekanik yükler ve aşınma etkisi altında kaplama bütünlüğü açısından zayıf bölgeler olarak değerlendirilebilir. Şekil 24(e)'de ise S220 numunesinin düzensiz ve heterojen bir morfoloji sergilediği görülmektedir.

Partiküllerin kontrolsüz şekilde bir araya gelmesi, yüzey sürekliliğini bozmuş ve kaplama kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir.

Statik Temas Açısı Ölçümü

Bütün numune gruplarının yüzey ıslanabilirlik özelliklerini incelemek amacıyla, oda sıcaklığında her numunenin üzerine 5 µl'lik damıtılmış su damlası bırakılmış ve damlanın yüzeyde 10 saniye boyunca bekletilmesinin ardından statik temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Bir malzemenin ıslanabilirlik düzeyi, ölçülen temas açısı üzerinden değerlendirilebilmektedir. Temas açısının büyüklüğü ile ıslanabilirlik arasında ters bir ilişki bulunmakta; düşük temas açısı yüzeyin daha hidrofilik bir davranış sergilediğini, yüksek temas açısı ise yüzeyin hidrofobik karakterde olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede temas açısı ölçümleri, numunelerin yüzeylerinin sıvıyla etkileşim özelliklerini anlamada önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.



Şekil 25. (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210 ve (e) S220 numunelerine ait temas açısı ölçümleri.

İşlemsiz Al7075 ve yüzeyinde Sc_2O_3 biriktirilen tüm numune gruplarının temas açısı ölçümleri Şekil 25'te verilmektedir. Elde edilen ölçümler neticesinde işlemsiz Al7075'in hidrofobik karakter gösterdiği ancak Sc_2O_3 kaplanmış yüzeylerde açının düşerek hidrofilik karakter sergilediği görülmektedir.

Sc_2O_3 kaplamalı yüzeylerde temas açısının işlemsiz numuneye göre azalması, kaplamanın yüzey enerjisini artırdığını ve suyun yüzeyde daha kolay yayılmasına imkân verdiğini göstermektedir. Kaplamayla birlikte oluşan oksit karakterli yapı ve hafif

mikropürüzlülük, yüzeyin suyla etkileşimini güçlendirmekte ve numunelerin daha hidrofilik davranmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, Al7075 yüzeyine Sc_2O_3 kaplamasının yüzeyi ıslanabilirlik açısından daha aktif hâle getirdiğini ifade etmek mümkündür.

Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Tablo 13. Tüm Numunelere Ait Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Numuneler	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	R_p (μm)	R_v (μm)
Al7075	0,387	3,005	4,203	2,561	-1,642
S110	2,519	15,492	19,752	9,027	-10,725
S120	2,945	15,809	26,939	12,417	-14,547
S210	1,472	13,698	29,849	10,253	-19,595
S220	4,836	28,245	37,719	16,106	-21,628

Kaplama işlemlerinin yüzey morfolojisi üzerindeki etkilerini nicel olarak yorumlayabilmek adına yüzey pürüzlülük değerleri elde edilerek Tablo 13’de verilmiştir. Elde edilen bu veriler, kaplama parametrelerinin yüzey karakteristiği ve kaplama bütünlüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu kanıtlar niteliktedir. S120 numunesi R_a (2,945 μm) ve R_z (15,809 μm) pürüzlülük değerleri ile kaplamanın yüzeyde homojen bir birikim sağladığı görülmektedir. Tepe yüksekliği R_p (12,417 μm) ve çukur derinliği R_v (-14,547 μm) arasındaki dengeli dağılım göz önüne alındığında Sc_2O_3 partiküllerinin taban malzeme olan Al7075 yüzeyine daha dengeli ve kararlı bir şekilde tutunduğunu kanıtlamaktadır.

Buna karşın, S220 numunesinde pürüzlülük değerlerinin yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu artış, yüzeydeki kaplama tabakasının adhezyon bağlarının zayıflamaya başladığını ve derin çatlakların oluştuğunun bir göstergesidir. Özellikle yüksek R_v (-21,628 μm) değeri, kaplamadaki yapısal süreksizliklerin ve derin çatlakların nicel bağlamda bir göstergesidir.

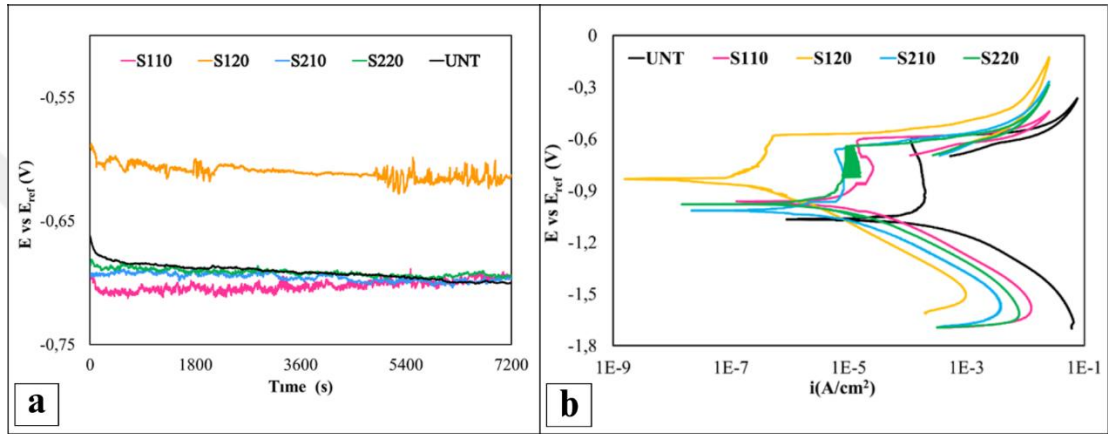
S110 numunesinde ise pürüzlülük değerlerinin S120’ye kıyasla daha düşük seyretmesi, kaplama tabakasının yüzeyde yeterli Sc_2O_3 partikül birikimine ulaşmadığını ve hedeflenen bariyer film tabaka kalınlığının oluşmadığını işaret etmektedir. S210 numunesi ise R_a (1,472 μm) bazında düşük görünse de yüksek R_t (29,849 μm) değeri nedeniyle yüzeyde lokal düzensizliklerin ve heterojen bir kaplama yapısının hâkim olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç itibarıyla kaplama sonrası yüzey SEM görüntüleri ile pürüzlülük parametreleri bir arada değerlendirildiğinde, S120 kaplama parametresinin optimum morfolojik performansı görülmektedir. Ayrıca zaman sabit tutulduğu Sc_2O_3 miktarının arttırıldığı S220 parametresinde ise çatlak ve tutunma problemleri nedeniyle yüzeyde düzensizliklerin oluştuğu tespit edilmiştir.

Elektrokimyasal Korozyon

Tüm numune gruplarının elektrokimyasal korozyon analizleri, %3,5 NaCl (tuzlu su) çözeltisi ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, açık devre potansiyeli (ADP) ölçümleri, potansiyodinamik polarizasyon (PP) testleri ve PP testlerinden önce elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) ölçümleri sağlanmıştır. PP testleri sonucunda elde edilen veriler Tafel analizi yöntemiyle değerlendirilmiş, EES ölçümleri sonrasında ise her bir numunenin yüzey durumunu elektriksel olarak temsil eden eşdeğer devre modelleri oluşturulmuştur.

Tafel analizleri



Şekil 26. Al7075, S110, S120, S210, S220 numunelerine ait ADP ve ÇPP eğrileri.

Açık devre potansiyeli (ADP) 7200 sn boyunca ölçülerek, hücrede anodik-katodik denge sağlanmıştır. Denge durumundaki hücreye ilave gerilim uygulanmaması durumunda esas alaşım üzerine farklı miktarlarda ve sürelerde skandiyum kaplanmasının OCP değerlerine etkileri ölçülmüş, elde edilen bulgular Şekil 26(a)'da verilmiştir. Potansiyel-zaman grafiğini literatürel bilgiler eşliğinde yorumladığımızda daha pozitif potansiyele sahip numune yüzeylerinin daha negatif yüzeylere kıyasla korozyona karşı daha iyi direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda işlemsiz ve beraberindeki 4 numune mukayese edildiğinde S120 kodlu numunenin en yüksek korozyon direncine sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Negatif yöndeki potansiyel dalgalanmasının yüzeydeki koruyucu pasif oksit tabakasının etkisini kaybetmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tüm numune gruplarının korozyon parametrelerini belirlemek amacıyla, çevrimsel potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 26(b)'de analiz edilmiştir. Bu analizde, Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak açık devre potansiyelinin etrafında $\pm 0,25$ V aralığında potansiyel taraması gerçekleştirilmiş ve ilgili değerler her bir grup için hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler doğrultusunda Al7075'e uygulanan kaplamanın etkinliği ve korozyon potansiyeli hakkında yorum yapılabilmesi mümkün hale gelmiştir.

Tafel ekstrapolasyonu ile elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve anodik ve katodik eğimleri (β_a ve β_b) ve korozyon hızı değerleri Tablo 14’de verilmektedir.

Tablo 14. Tüm Numune Gruplarına Ait Korozyon Test Sonuçları

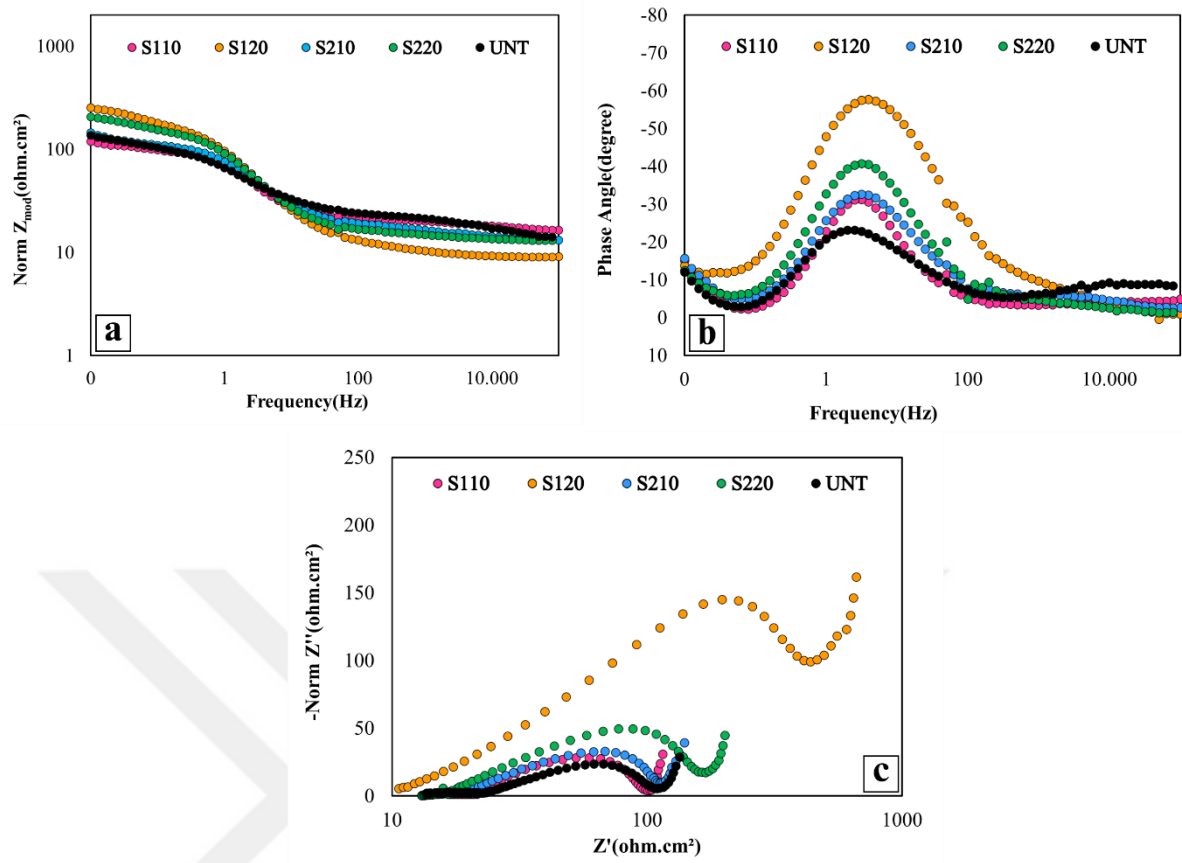
Numuneler	β_a (V/ decade)	β_c (V/decade)	I_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (mV)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Al7075	$23,70 \times 10^{-3}$	$15,80 \times 10^{-3}$	$4,570 \times 10^{-6}$	-1070	$729,6 \times 10^{-3}$
S110	$20,30 \times 10^{-3}$	$19,80 \times 10^{-3}$	153×10^{-9}	-963	$73,38 \times 10^{-3}$
S120	$32,10 \times 10^{-3}$	$35,10 \times 10^{-3}$	$14,10 \times 10^{-9}$	-837	$6,748 \times 10^{-3}$
S210	$79,70 \times 10^{-3}$	$45,20 \times 10^{-3}$	644×10^{-9}	-1020	$308,3 \times 10^{-3}$
S220	$96,90 \times 10^{-3}$	$54,80 \times 10^{-3}$	$1,29 \times 10^{-6}$	-979	$615,6 \times 10^{-3}$

Korozyon potansiyeli (E_{corr}) ile korozyon direnci arasında genel olarak bir korelasyon bulunmaktadır. E_{corr} değerinin daha pozitif (yüksek) değerlere kayması, metalin oksijenle reaksiyona girme eğiliminin azaldığını göstermektedir. Bu durum, malzemenin termodinamik açıdan daha kararlı bir davranış sergilediğini ve korozyona karşı daha dirençli olduğuna işaret etmektedir. Ancak, korozyon direncine ilişkin daha sağlıklı ve güvenilir bir değerlendirme yapılabilmesi için E_{corr} değerinin tek başına yeterli olmadığı, korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ile birlikte ele alınmasının gerekli olduğu bilinmektedir. I_{corr} değerinin negatif (düşük) değerlerde azalması korozyon sürecinin kinetik olarak yavaşladığına işaret etmektedir.

Bu bakımdan Tablo 14 incelendiğinde S120 kodlu numunenin -837 mV ile en yüksek korozyon potansiyeli değerine ulaştığı görülmektedir. S120 kodlu numunenin yanı sıra S110 (-963 mV) kodlu numune ve yakın değerlerde olan S220’nin (-979 mV) de korozyon potansiyelinin işlemsiz Al7075 (-1070 mV)’e göre yüksek olduğu dolayısıyla korozyon direncinin daha iyi olduğu çıkarımına varılmaktadır.

Korozyon akım yoğunluğu açısından değerlendirdiğimizde ise S120 kodlu numunenin $14,10 \times 10^{-9}$ A/cm² değeriyle başta işlemsiz Al7075 ($4,570 \times 10^{-6}$ A/cm²) olmak üzere diğer dört numuneye kıyasla çok daha düşük I_{corr} değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu iki parametreyi birlikte değerlendirdiğimizde 0.10 gr ve 20 dakika Sc₂O₃ kaplanmış S120 numunesinin tüm gruplar arasında en yüksek korozyon direncine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca diğer kaplamalı numunelerde de her iki parametrede sağlanan bu iyileşme, Sc₂O₃ kaplamanın elektrot reaksiyonlarını sınırlayarak korozyon direnci üzerinde belirleyici bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Analizleri



Şekil 27. EES analizlerine ilişkin sonuçlar, Bode eğrileri (a ve b), Nyquist eğrisi (c).

İşlemsiz Al7075 ve beraberindeki Sc_2O_3 kaplı numuneler potansiyodinamik polarizasyon analizlerinden önce elektrokimyasal empedans spektroskopisine tabii tutulmuş, empedansın frekansla değişimi Şekil 27(a)'da verilmiştir.

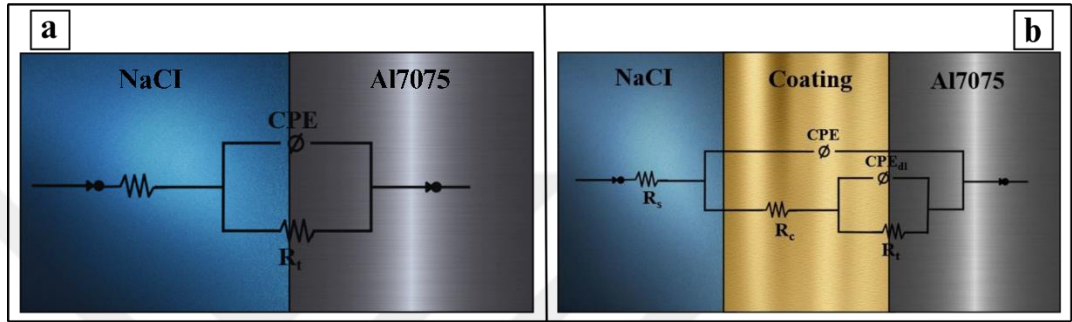
Empedans değeri ile korozyon direncinin doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Korozyon davranışını değerlendirmek için Bode grafiğinde temel olarak düşük frekans bölgesine karşılık gelen empedans değerleri gözetilmektedir. Yüksek frekans bölgesi daha çok çözelti direnci hakkında bilgi edinmemizi sağlamaktadır.

Şekil 27(a)'da düşük frekans bölgesi göz önüne alındığında işlemsiz Al7075'in düşük empedans değerine sahip olduğu ve beraberinde farklı parametrelerde Sc_2O_3 biriktirilen diğer üç numunenin ise empedans değerinin çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca test edilen tüm numuneler düşük frekans değerlerinde yüksek empedans değeri gösterirken, yüksek frekans da empedans değerinde azalma göstermektedir.

Şekil 27(b) faz açısı-frekans değişimini temsil etmektedir. Faz açısının artışıyla beraber yüzeyde kararlı oksit filmin varlığı gözlemlenmiş, dolayısıyla metalin korozyona karşı direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda S120 kodlu 0,10 gr Sc_2O_3 -20 dakika kaplama süreli

numunenin en yüksek korozyon direncine sahip olduğu görülmekte, UNT kodlu işlemsiz Al7075'in ise en düşük korozyon direncine sahip olduğu çıkarımına varılmaktadır.

Nyquist eğrisi ile gerçek ve imajiner empedans değerlerini temsil eden grafik Şekil 27(c)'de verilmiştir. Polarizasyon direnci ne kadar yüksek ise elektrot yüzeyinde iyon taşınımı o kadar zor gerçekleşmekte ve dolayısıyla korozyon hızı düşmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında işlemsiz Al7075'in eğri çapının başta S120 kodlu numune olmak üzere diğer Sc₂O₃ kaplı numunelere kıyasla küçük olduğu, dolayısıyla korozyon direncinin daha zayıf olduğu çıkarımına varılmaktadır.



Şekil 28. İşlemsiz ve Sc₂O₃ kaplı Al7075 numunesine ait eş değer devreler

EES ölçümlerinden elde edilen veriler neticesinde yüzey durumlarını ifade eden eş değer devreler çizilmiştir. Şekil 28(b) Sc₂O₃ biriktirilen Al7075 yüzeyini temsil ederken, Şekil 28(a) işlemsiz Al7075 numunelerinin yüzey durumlarını ifade eden eş değer devrelerdir.

Tablo 15. İşlemsiz ve Sc₂O₃ Kaplı Al7075 Numesine Ait EES Sonuçları Tablosu

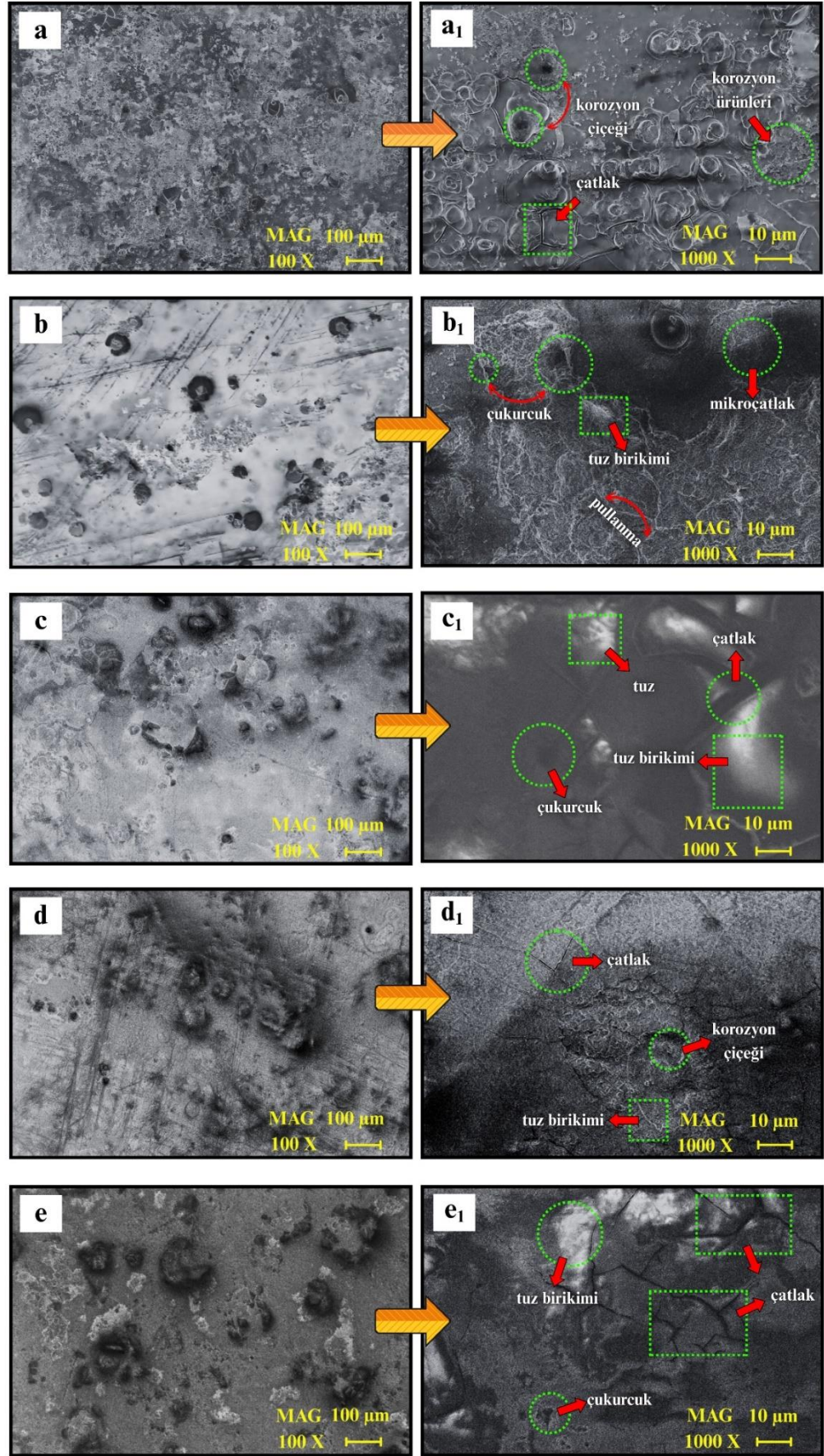
Numuneler	R _s (ohm.cm ²)	R _t (ohm.cm ²)	R _c (ohm.cm ²)	CPE	C _{dl}	
					Y ₀ (ohm ⁻¹ .sn ^a .cm ²)	n
Al7075	19,20	74,84		1,442×10 ⁻³		
S110	16,79	83,88	2,246	6,372×10 ⁻⁶	2,683×10 ⁻³	0,798.9
S120	6,780	526,5	3,670	40,88×10 ⁻⁶	1,287×10 ⁻³	0,7707
S210	13,54	107,5	3,664	12,93×10 ⁻⁶	2,836×10 ⁻³	0,714.6
S220	13,25	163,1	2,156	28,59×10 ⁻⁶	2,243×10 ⁻³	0,757.4

Tablo 15'te sunulan EES verilerinin incelenmesi sonucunda, Sc₂O₃ kaplı Al7075 numunelerin elektrokimyasal davranışlarının, işlemsiz Al7075 numunesine kıyasla belirgin düzeyde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Sc₂O₃ kaplı numunelerin daha yüksek yük transfer direncine (R_t) sahip oldukları belirlenmiştir. Yük transfer direncindeki bu artışın, kaplama tabakası ile elektrolit arasındaki

iyon taşınımını sınırlandıran Sc_2O_3 bariyer tabakasının oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, Sc_2O_3 kaplamasının korozyon süreçlerine karşı etkin bir koruma sağladığını ortaya koymaktadır. Kaplama direnci (R_c), metal yüzeyin elektriksel ve iyonik iletme karşı gösterdiği direnci ifade eden önemli bir parametre olup, en yüksek R_c değerinin S120 kodlu numunede elde edildiği belirlenmiştir. R_c değerinin yüksek olması, malzemenin korozyon eğiliminin azaldığına işaret etmektedir.

Çift tabaka sığası (C_{dl}) değerinin düşük olması, Sc_2O_3 bariyer tabakasının taban yüzeyini elektrolit ortamdan etkin biçimde izole ettiğini ve bu sayede elektrot/elektrolit ara yüzeyinde yük birikimini engellediğine işaret etmektedir. Ayrıca, kaplamalı numunelerde n katsayısının (0.71–0.80 aralığında) yüksek olması, kaplama tabakasının homojen bir morfolojiye sahip olduğunu ve yüzeydeki yük depolama davranışının düzenli bir biçimde gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, CPE (sabit faz elemanı sığası) değerinin düşük olması yüzeyde homojen bir film tabakasının oluştuğuna işaret etmektedir. Yüksek CPE değerine sahip numunelerin ise yüzeyinde daha fazla aktif bölge bulunduğunu ve dolayısıyla korozyona daha yatkın bir yapı sergilediğini ifade etmek mümkündür. Bu bağlamda, işlemsiz Al7075 numunesinin Sc_2O_3 kaplı numunelere kıyasla en yüksek CPE değerine sahip olduğu ve bu durumda yüzeyinin daha aktif karakterde olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 29. Korozyon sonrası yüzey SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210 ve (e) S220.

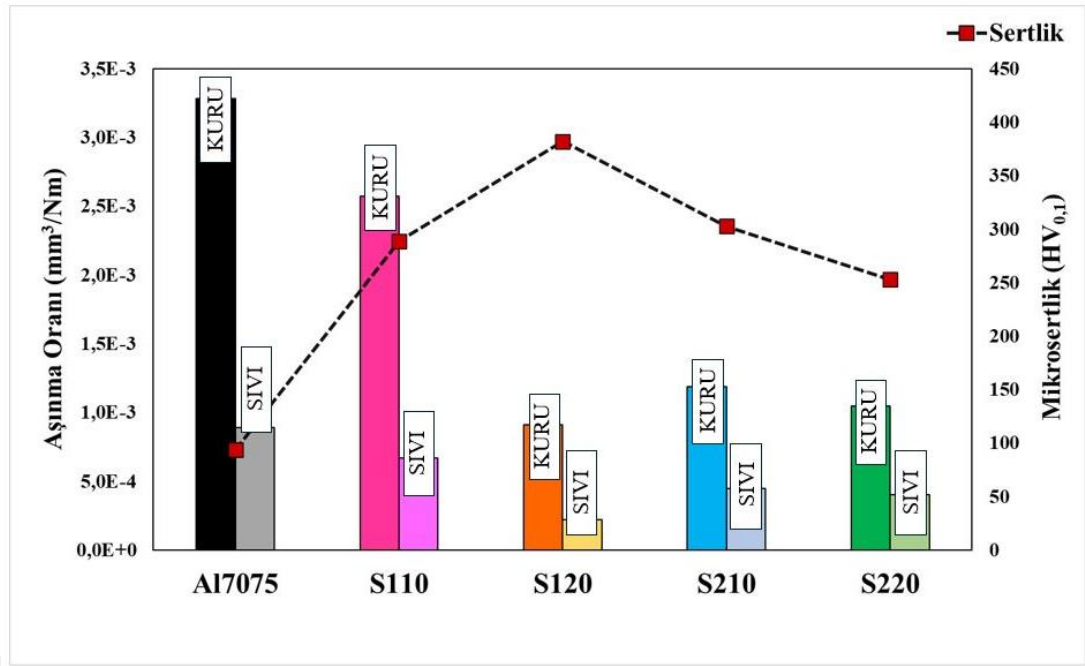
Tüm numunelerin elektrokimyasal korozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri elde edilmiş, Şekil 29'da verilmiştir. Al7075 alaşımının bilhassa çukurcuk ve çatlak korozyonuna eğilim gösterdiği bilinmektedir. Nitekim elde ettiğimiz SEM görüntüleri de bu tezi desteklemektedir. Şekil 29(a₁)'da görüldüğü üzere işlemsiz Al7075 numunesi yüzeyinde çok sayıda çukurcuk ve çatlak korozyonu görülmektedir. Korozyon deneyinin NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmesinden dolayı metal yüzeyinde yeni bileşiklerden korozyon ürünleri oluştuğu görülmektedir. Ayrıca çukurcukların iç yapısının dış ortamla arasındaki kimyasal ve fiziki farklılıklarından dolayı çevrelerinde tuz birikintileri oluşumu görülmektedir. Şekil 29(b₁)'de ise numune yüzeyi boyunca çok sayıda ve farklı boyutlarda çukurcuklar mevcuttur. Ayrıca yer yer tuz birikimleri ve korozyon ürünleri görülmüştür. Şekil 29(c₁) ve Şekil 28(d₁)'de ise numune yüzeyinde düzensiz, tabakalı ve gözenekli yapılardan oluşan korozyon ürünleri görülmektedir ancak çukurcuk miktarında ve derinliğinde azalma sağlanmıştır. Şekil 29(e₁)'deki görüntüde ise numune yüzeyinde çukurcuk miktarının minimum seviyede olduğu ancak yüzeyde derin çatlaklar oluştuğu görülmüştür.

Genel olarak, SEM görüntüleri ile işlemsiz Al7075 alaşımının NaCl ortamında yerel korozyona eğilim gösterdiğini, çukurcuk oluşumunu takiben çatlak gelişiminin meydana geldiği ve yüzeyde tuz çökmesi ile korozyon ürünlerinin biriktiği görülmüştür. Sc₂O₃ kaplamalı numunelerde ise, yüzeyde yer yer derinliği bir miktar azalmış çukurcuklar, mikroçatlaklar ve bunlara eşlik eden tuz birikimleri ile korozyon ürünlerinin oluştuğu görülmektedir.

Aşınma Analizleri

Aşınma deneyleri tüm numuneler için 1N yük altında kuru ve sıvı ortamda (NaCl) gerçekleştirilmiştir. Zıt yönlü doğrusal hareketli düzlem-pin yöntemi ve 6 mm çapındaki Al₂O₃(alümina) topun aşındırıcı olarak kullanılmasıyla aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonrasında aşınma SEM görüntüleri elde edilmiş, buna ilaveten her bir numune için aşınma oranları, yüzey sertlikleri ve sürtünme katsayısı-zaman grafikleri hesaplanmıştır.

Tüm numune grupları için sertlik ve aşınma oranı ait grafik Şekil 30'da verilmiştir. Elde edilen bu veriler incelendiğinde, 0,1 gr-10 dakika Sc₂O₃ biriktirilmiş S120 kodlu numunenin işlemsiz Al7075'e göre üç katından daha fazla yüzey sertliğine ulaştığı görülmektedir (382,6 HV_{0.1}). Kaplama sonrası numunede ölçülen sertlik değerlerindeki bu artış, kaplamanın daha yoğun ve homojen bir yapı oluşturmasıyla ilişkilendirilebilmektedir(Cordova et al., 2024; R. Li et al., 2020; X. Li et al., 2023).



Şekil 30. Tüm numune gruplarına ait kuru-sıvı aşınma oranları ve sertlik değerleri.

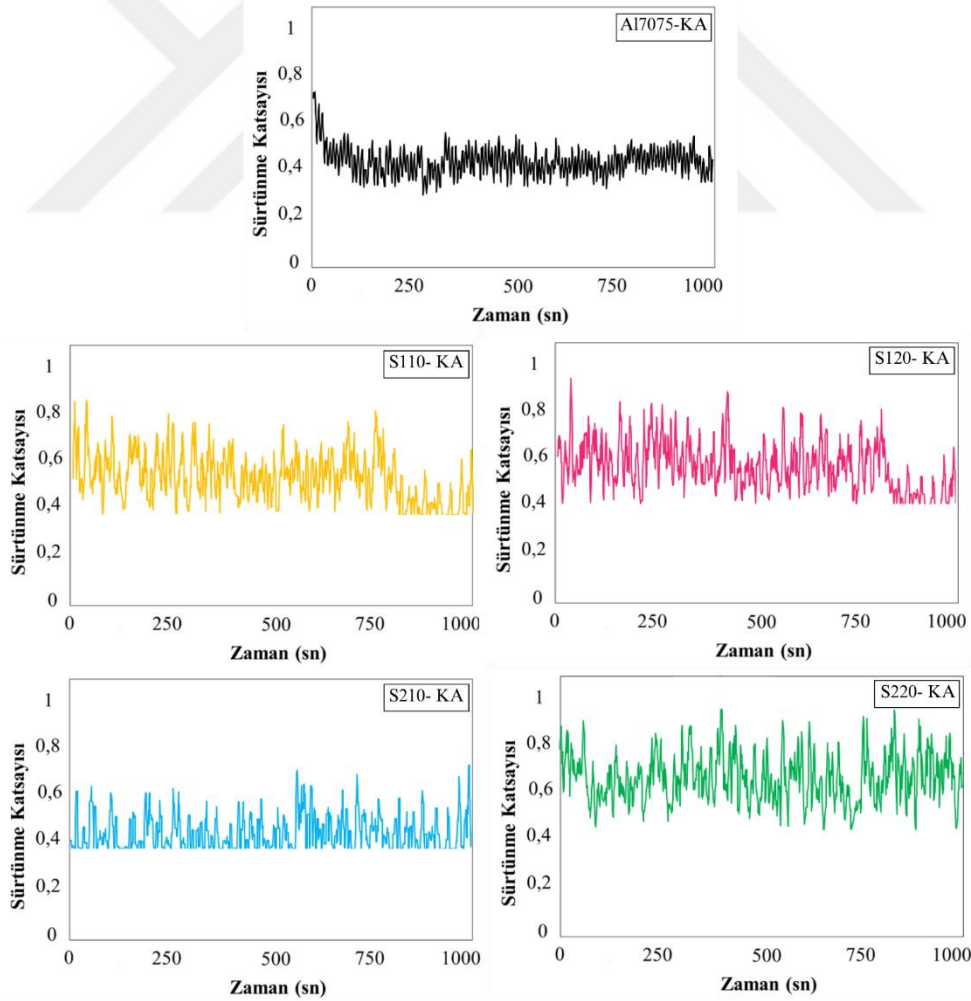
Kuru aşınma testleri neticesinde, işlemsiz Al7075 alaşımının en yüksek aşınma oranı sergilediği ($0,00328 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) ve düşük yüzey sertliği ($93,76 \text{ HV}_{0.1}$) nedeniyle yüzeyden ayrılan partikül miktarının diğer numunelere kıyasla belirgin şekilde fazla olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, yüzeyinde Sc_2O_3 biriktirilen numune gruplarında aşınma direnci önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle S120 kodlu numune yüksek sertlik değerine ($382,6 \text{ HV}_{0.1}$) paralel olarak en düşük aşınma oranını ($0,00091 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) göstermiştir. Bu durum, yüzey sertliği ile aşınma direnci arasındaki ters yönlü korelasyonu doğrular niteliktedir.

Sıvı aşınma deneyleri, kuru ortam mekanizmasından farklı olarak %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, sıvı ortamdaki aşınma oranlarının kuru ortama kıyasla çok daha düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir. Bu durum, test sırasında sıvı ortamın temas yüzeylerinde oluşturduğu ince film tabakasının yağlayıcı bir etki yaratarak sürtünmeyi düşürmesine bağlanmaktadır.

Sıvı aşınma deney sonuçları kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise kuru aşınma verileriyle benzer şekilde, işlemsiz Al7075 en yüksek aşınma oranını ($0,00089 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) verirken, S120 kodlu numune en düşük aşınma oranına ($0,00022 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sahip numune olarak öne çıkmaktadır.

Kuru ortamda ve %3,5 NaCl çözelti ortamında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda, tüm numune gruplarına ait sürtünme katsayısı–zaman grafikleri Şekil 31 ve Şekil 32’de verilmiştir. Kuru ortam koşullarında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, ölçülen en düşük sürtünme katsayısı değerinin (0,4) işlemsiz Al7075 numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Yüzeyinde Sc_2O_3 biriktirilmiş S110, S120, S210 ve S220 numunelerine ait sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0,55; 0,59; 0,44 ve 0,71 olarak değerlendirilmiştir (Şekil 31).

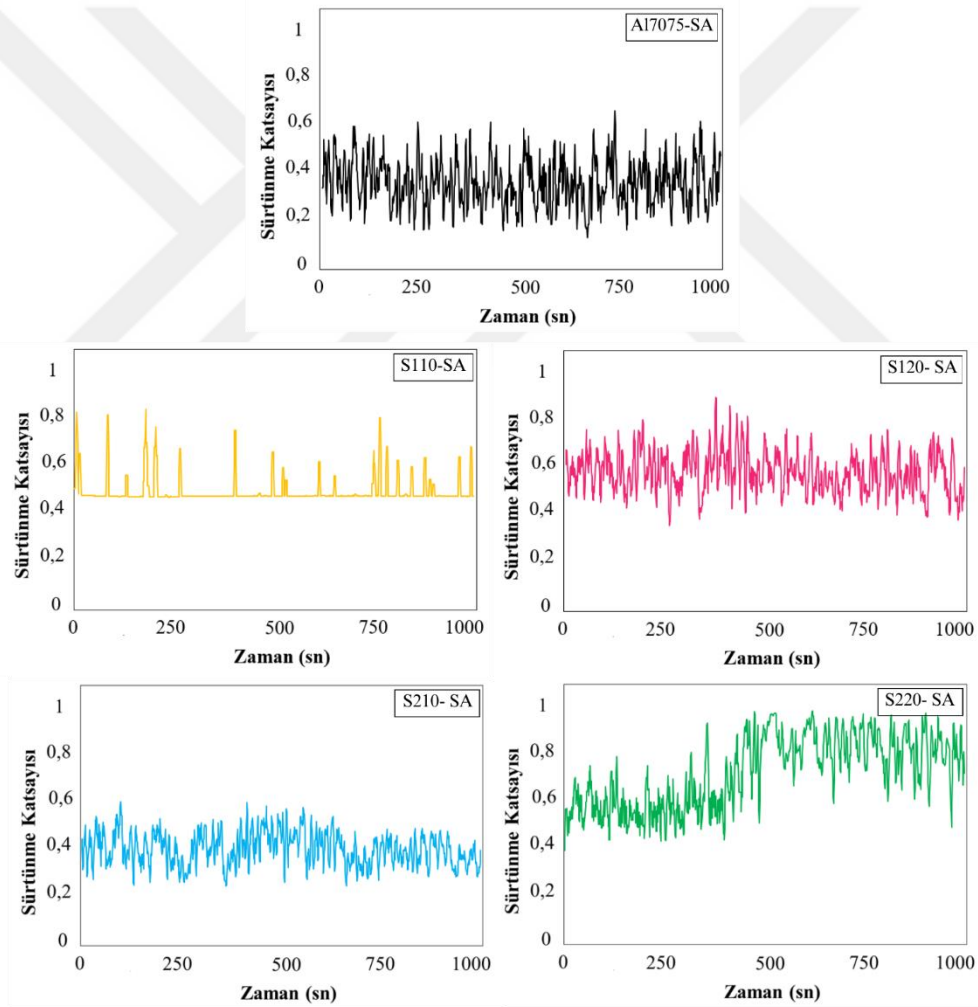
İşlemsiz numunede sürtünme katsayısının minimum olması, yüzeyin pürüzlülük değerinin yine tüm şartlara göre en düşük seviyede ($R_a;0,387$) ölçülmesi ile ilişkilendirilmiştir. Kaplamalı numunelerde, özellikle işlem sonrası heterojen morfoloji sergileyen ve yüzey pürüzlülüğü oldukça artan S220 numunesinde maksimum sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Sc_2O_3 partiküllerinin yüzeyde kompakt bir tabaka oluşturmaması ve oluşan mikro tepe-çukurlar, aşınma topu ile yüzey arasındaki mekanik kenetlenmeyi ve pullanma etkisini artırarak sürtünme direncini yükseltmiştir.



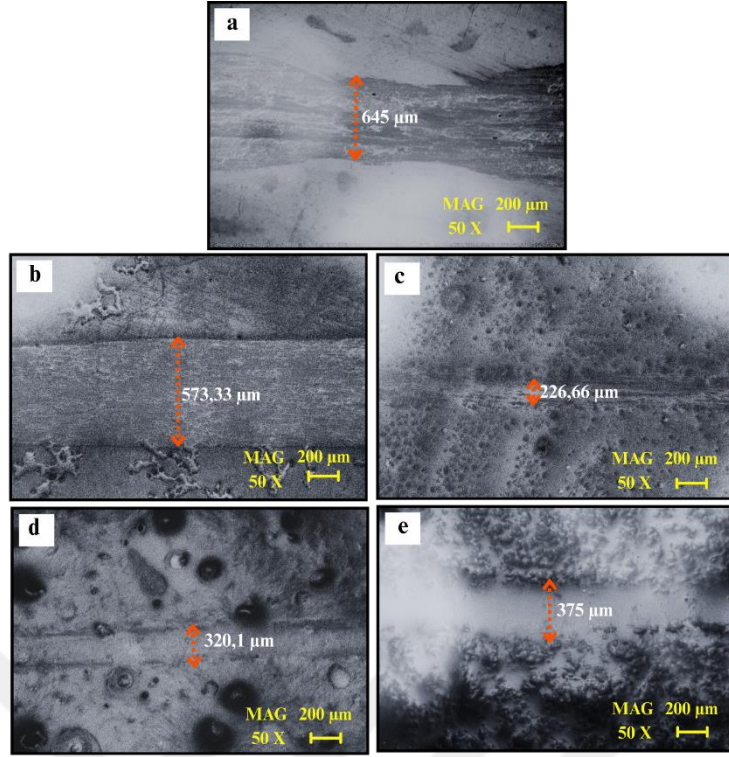
Şekil 31. Kuru aşınma sürtünme katsayısı-zaman grafikleri

%3,5 NaCl çözelti ortamında gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde ise, en düşük sürtünme katsayısı değerinin (0,38) yine işlemsiz Al7075 numunesinde elde edildiği tespit edilmiştir. Aynı ortamda, Sc_2O_3 kaplı S110, S120, S210 ve S220 numunelerine ait sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0,52; 0,57; 0,40 ve 0,63 olarak ölçülmüştür (Şekil 32).

Kuru aşınmaya benzer şekilde işlemsiz Al7075 numunesinde sürtünme katsayısının en düşük çıkması, yüzeyin parlatılmış ve homojen yapısından kaynaklanmaktadır. Sıvı aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayılarının, kuru ortam verilerine kıyasla belirgin şekilde düşük ve kararlı bir seyir izlemesi, test ortamında kullanılan NaCl çözeltisinin ara yüzeyde bir yağlayıcı film tabakası oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Bu sıvı, aşındırıcı top ile numune yüzeyi arasındaki doğrudan teması sınırlandırarak sınır tabaka yağlaması mekanizmasını tetiklemiştir.



Şekil 32. Sıvı aşınma sürtünme katsayısı-zaman grafikleri



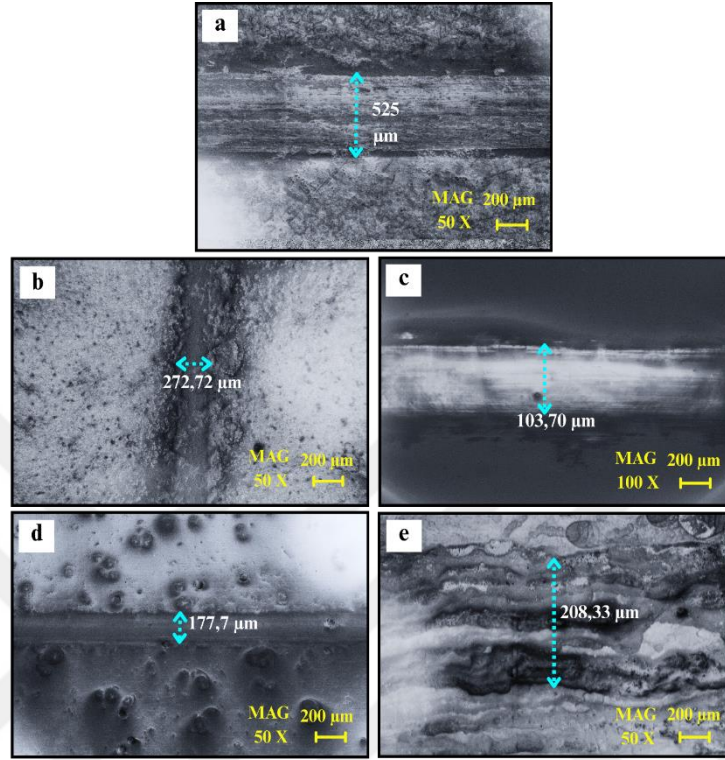
Şekil 33. Kuru aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (e) S220.

Kuru aşınma durumunda yüzeyler arası sürtünmeyi engelleyici bir madde bulunmadığından iki metal arası temas şiddetlenmektedir. Şekil 33(a) işlemsiz Al7075 numunesi SEM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde belirgin çizikler, çukurlar ve yüzeyde sıvanmalar görülmektedir. Çiziklerin yönlü ve de belirgin oluşu, aşınma esnasında oluşan partiküllerin üçüncü cisim olarak davranarak abrasif aşınmadan kaynaklandığına işaret etmektedir. İşlemsiz numuneye ait bulgular değerlendirildiğinde yüzeyde karma bir aşınma mekanizmasının (abrasif+adhezif) etkin olduğu çıkarımına varılmaktadır. Bunun yanı sıra işlemsiz Al7075'in aşınma iz genişliği 645 µm değerinde ölçülmüştür.

S110 numunesine ait görsel incelendiğinde, yüzeyde pullanmalar ve yönlü çizikler görülmektedir. Bu pullanma biçimindeki izler, kaplamanın gerilmeler altında çatlayarak küçük parçalar hâlinde yüzeyden uzaklaştığına işaret etmektedir. Ayrıca aşınma iz genişliğinin 573.33 µm olarak işlemsiz numuneye göre azaldığı görülmektedir.

S120 numunesi aşınma iz genişliği bakımından değerlendirildiğinde, 226,66 µm ile en düşük iz genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Buna ilavaten yüzeyinde belirgin mikro çizikler görülmektedir. Benzer şekilde S210 numunesinde de aşınma yönüne paralel belirgin çizikler görülmektedir. Yüzeydeki aşınma yönünde oluşan bu çizikler abrasif aşınma mekanizmasını desteklemektedir.

Genel olarak kuru sürtünmeye ait SEM görüntüleri ele alındığında geniş aşınma izleri, sıvanma bölgeleri ve pullanmalar saptanmıştır. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde bu etkilerin kaplamalı numunelerde daha sınırlı kaldığı ve aşınma iz genişliğinin işlemsiz numuneye göre çok daha düşük olduğu çıkarımına varılmıştır.



Şekil 34. Sıvı aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri; (a) Al7075, (b) S110, (c) S120, (d) S210, (e) S220.

Şekil 34(a) sıvı aşınma sonrası SEM görüntüsü incelendiğinde, işlemsiz numune yüzeyinde sıvanmalar görülmektedir. Bu sıvanmalar aşınma esnasında temas alanında oluşan yüksek kayma gerilmeleri ve plastik deformasyon sonucunda Al7075 yüzeyinin kayma yönünde yayılmasıyla oluşmaktadır. Yüzeyden ayrılan metal partiküllerinin yüzeye tekrar tutunması, adhezif aşınma mekanizmasının oluştuğunu göstermektedir. İşlemsiz Al7075 numunesinde de bu sıvanma bölgelerinin daha yaygın olması yüzeyin düşük sertliği nedeniyle metal-metal temasının artmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca aşınma izi boyunca mikro-çizikler ve mikro çukurcuklar görülmekte ve bu izler aşınma sırasında aşındırıcı top ve numune arasında üçüncü bir partikülün varlığına işaret etmektedir. Tüm bu bulguların ışığında işlemsiz Al7075'in yüzeyinde hem abrazif hemde adhezif aşınma mekanizmasının aktif olarak gerçekleştiği yorumu yapılabilmektedir.

Şekil 34(b) S110 kodlu numune SEM görüntüsü incelendiğinde, kopan partiküllerin kayma yönünde numune yüzeyine yapıştığı ve çıkıntılar oluşturduğu görülmektedir. Buna ek olarak yüzeyde mikro-çizikler ve aşınma izi sınırlarında homojen olmayan lokal partikül birikimleri görülmektedir. Aşınma iz genişliği 272,72 µm ölçülerek diğer üç numuneye göre

çok daha geniş bir iz genişliği ölçülmüştür. Şekil 34(c) S120 kodlu numunede kayma yönüne paralel çizikler görülmekte ve abrazif aşınmaya atfedilmektedir. Aşınma iz genişliği 103,7 μm olarak tüm numune gruplarına göre en dar iz genişliği olarak değerlendirilmiştir. S210 kodlu numune benzer şekilde kayma yönüne paralel aşınma çizikleri görülmektedir. S110 ve işlemsiz Al7075 numunesine göre aşınma iz genişliği daralarak 177,7 μm olarak ölçülmüştür. S220 kodlu numunede ise kaplamanın çatlayarak taban malzemeye ulaşması sonucu tabanda sıvanmalar görülmektedir. Aşınma iz genişliği 208,33 μm ölçülerek işlemsiz Al7075 ve S110 numunesine göre daha dar bir iz genişliği sağlanmıştır.

SEM görüntülerinden elde edilen iz genişlikleri göz önüne alındığında, Sc_2O_3 kaplı yüzeylerde iz genişliğinin işlemsiz Al7075 yüzeyine göre daha dar olduğu ve Sc_2O_3 bariyer tabakanın yüzey sertliğini arttırarak yüzeyde deformasyonu sınırladığı sonucuna varılmaktadır. Buna ek olarak sıvı aşınma mekanizmasında çözeltinin yüzeyler arasında yağlayıcı bir film etkisi oluşturmamasından dolayı numune-top arasındaki etkileşimi azaltarak kuru aşınmaya nazaran daha dar bir iz genişliği oluşturmaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Havacılık, uzay sanayi ve otomotiv gibi farklı alanlarda kullanılan sıkça kullanılan 7075 alüminyum alaşımının korozyon ve aşınma performansının iyileştirilmesi esasına bağlı olarak EPD yöntemi ile skandiyum oksit esaslı kaplamalar uygulanmış, morfolojik, tribolojik, elektrokimyasal, korozif özellikleri incelenmesi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm numunelerden alınan XRD sonuçlarına göre kaplama morfolojisinin kalınlığına bağlı olarak en şiddetli pikler ilgili açılarda S120 şartında tespit edilmiştir.
- Kesit SEM görüntüleri ayrı ayrı incelendiğinde en düşük film kalınlığı (S110 – 74,81 μm), maksimum değerdeki film kalınlığının yaklaşık olarak üçte biridir (S120 – 225,5 μm). Ayrıca bu şart için maksimum yüzey sertliği elde edilmiştir (382 HV_{0,1}).
- Yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm deney koşullarında yer yer mikro çatlak oluşumlarının gözlemlendiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, aşınma ve korozyon performansını olumsuz etkileyebilecek düzeydeki çatlak yoğunluğunun, kaplama süresi ve çözelti kimyasal miktarının artışıyla birlikte belirgin şekilde yükseldiği tespit edilmiştir.
- Taban malzemeye göre tüm şartlardaki ıslanabilirlik karakteri incelendiğinde, hidrofilik eğilimin kaplama süresi ve kimyasal miktarına bağlı olarak artış gösterdiği söylenebilir. S220 şartında minimum temas açısı elde edilmiştir (80,32°).
- Yüzey pürüzlülüğü açısından numuneler değerlendirildiğinde hidrofiliklik derecesi ile pürüzlülük arasında genel manada bir doğru orantıdan söz edilebilir. Maksimum R_a değeri S220 şartında 4,836 μm olarak ölçülmüştür.
- Elektrokimyasal korozyon analizleri için iki farklı modülden gelen deney sonuçları kullanılmıştır. İlk olarak potansiyodinamik polarizasyon ölçümü dahilinde elde edilen veriler, S120 şartının en geç korozyona uğrayacağına işaret etmektedir (-837 mV). Bunun yanı sıra elektrokimyasal korozyon neticesinde malzemede gelişen toplam kayıp S120 şartında minimumdur ($6,748 \times 10^{-3}$ mm/yıl). Dolayısıyla bu şartın taban malzemeyi korozyon ataklarına karşı önemli ölçüde koruduğu söylenebilir.
- Elektrokimyasal korozyon ölçümleri için ikinci modül olarak değerlendirilen EES ölçümlerine göre kaplama morfolojisi, korozyon ataklarına karşı en yüksek direnci gösterme potansiyeline sahiptir (S120 için R_c değeri 3,670 ohm.cm²).

- Korozyon sonrası hasar görmüş numune yüzeylerine ilişkin SEM görüntüleri incelendiğinde çukurcuk ve çatlak mekanizmalarının ilerlediği yorumu yapılabilir. Yer yer tuz birikimi ve lokal korozyon ürünlerinin varlığı söz konusudur.
- Düzlem - pin sistematğinde yürütölen aşınma deneyleri sonucu iz genişliğı kuru ortamda işlemsiz numunede 645 µm seviyesindedir. Yine aynı ortamda minimum iz genişliğı 226,66 µm ile S120 şartından elde edilmiştir. Sıvı ortamda bu değler sırasıyla 525 µm ve 103,7 645 µm ye düşmüştür. Kütle kayıplarına bağı olarak elde edilen aşınma oranı (kuru ortam) taban malzemeye kıyasla en iyi şartta (S120) yaklaşık olarak 3,2 kat azalmıştır. Benzer şekilde sıvı ortamdaki düşüş ise 4 kat mertebesindedir.
- Tüm bu deney sonuçları kümülatif olarak ele alındığında; Sc₂O₃ ihtiva eden kaplamaya ait performansın, işlem süresi ve kimyasal miktarla birlikte doğrudan artması söz konusu olmamıştır. Bu durum genel olarak yüzey mühendisliğinde kullanılan metal oksit filmlerden farklı bir davranış olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda gelecek çalışmalarda farklı nadir toprak elementlerinin oksit formlarının farklı taban malzemelerde yine farklı depozisyon tekniklerinin uygulanması ile özellikle süre ve kimyasal kompozisyon gibi parametrelerin optimize edilmesi önerilebilir. Ayrıca ideal süre ve kimyasal bileşim seçimi için özellikle korozyon hasarının gelişimi çok daha kısa periyotlarda ve farklı iyon konsantrasyonlarına sahip çözeltilerde ayrı ayrı değlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelbary, A., & Chang, L. (2023). Lubrication and surface engineering. *Principles of Engineering Tribology*, 295–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99115-5.00012-8>
- Ahmad, F., Rajendren, V. B., Kai, X., Shah, S. S. A., Khan, S. U., Dar, S. M., Naveed, A., Zia, A. W., & Zhao, Y. (2024). Role of scandium addition to microstructure, corrosion resistance, and mechanical properties of AA7085/ZrB₂+Al₂O₃ composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 1005, 176065. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2024.176065>
- Ahmad, Z. (2006). BASIC CONCEPTS IN CORROSION. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 9–56. <https://doi.org/10.1016/B978-075065924-6/50003-9>
- Ahmad, Z., Ul-Hamid, A., & B.j, A. A. (2001). The corrosion behavior of scandium alloyed Al 5052 in neutral sodium chloride solution. *Corrosion Science*, 43(7), 1227–1243. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00147-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00147-5)
- Akbarzadeh, S., & Khonsari, M. M. (2010). Effect of surface pattern on stribek curve. *Tribology Letters*, 37(2), 477–486. <https://doi.org/10.1007/S11249-009-9543-2/FIGURES/11>
- Akçil, M., & Akça, Y. (2025). The effect of Sc element Modification on the corrosion Patterns and wear properties of AA5754 aluminium alloy. *Materials Letters*, 394, 138472. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2025.138472>
- Altınel, Y., 2018. Investigation Of The Pre-Concentration Possibility Of Scandium Ores, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Altun, H., 2004. Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamaların Korozyon Davranışlarına Etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Amrollahi, P., Krasinski, J. S., Vaidyanathan, R., Tayebi, L., & Vashae, D. (2015). Electrophoretic Deposition (EPD): Fundamentals and Applications from Nano- to Micro-Scale Structures. *Handbook of Nanoelectrochemistry*, 1–27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15207-3_7-1
- Avcu, E., Baştan, F. E., Abdullah, H. Z., Rehman, M. A. U., Avcu, Y. Y., & Boccaccini, A. R. (2019). Electrophoretic deposition of chitosan-based composite coatings for biomedical applications: A review. *Progress in Materials Science*, 103, 69–108. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2019.01.001>
- Başer, T. A. (2013). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51–58.
- Baydoğan, M., 2003. Retrosesyon ve Yeniden Yaşlandırma Uygulanmış 2014 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Besra, L., & Liu, M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science*, 52(1), 1–61. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2006.07.001>

- Bi, J., Lei, Z., Chen, Y., Chen, X., Lu, N., Tian, Z., & Qin, X. (2021). An additively manufactured Al-14.1Mg-0.47Si-0.31Sc-0.17Zr alloy with high specific strength, good thermal stability and excellent corrosion resistance. *Journal of Materials Science & Technology*, 67, 23–35. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2020.06.036>
- Botelho Junior, A. B., Espinosa, D. C. R., Vaughan, J., & Tenório, J. A. S. (2021). Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects. *Minerals Engineering*, 172, 107148. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2021.107148>
- Bozkurt, Y., 2021. Seramik Kaplanmış Az31 Alaşımının Tribolojik, Korozyon, Tribokorozyon Performansı Ve Biyouyumluluk Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Cavanaugh, M. K., Birbilis, N., Buchheit, R. G., & Bovard, F. (2007). Investigating localized corrosion susceptibility arising from Sc containing intermetallic Al3Sc in high strength Al-alloys. *Scripta Materialia*, 56(11), 995–998. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2007.01.036>
- Chuvil'deev, V. N., Shadrina, I. S., Nokhrin, A. V., Kopylov, V. I., Bobrov, A. A., Gryaznov, M. Y., Shotin, S. V., Tabachkova, N. Y., Chegurov, M. K., & Melekhin, N. V. (2020). An investigation of thermal stability of structure and mechanical properties of Al-0.5Mg–Sc ultrafine-grained aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 831, 154805. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.154805>
- Cirik, E., 2017. Anodik Oksidasyon Yönteminin 7075-T6 Alüminyum Alaşımının Yorulma Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İmalat Tasarım Bilim Dalı.
- Cordova, L., Bor, T., Macía Rodríguez, E., Tinga, T., & Campos, M. (2024). In-situ mechanical and microstructural characterization of miniaturized Al-Mg-Sc-Zr and AlSi10Mg specimens processed by laser powder-bed fusion (PBF-LB). *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 348–359. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.03.084>
- Corni, I., Ryan, M. P., & Boccaccini, A. R. (2008). Electrophoretic deposition: From traditional ceramics to nanotechnology. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(7), 1353–1367. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2007.12.011>
- Cui, T., Wu, J., Song, J., Meng, D., Jin, X., Tian, H., & Cui, Z. (2025). Atmospheric Corrosion Behavior of Typical Aluminum Alloys in Low-Temperature Environment. *Metals* 2025, Vol. 15, Page 277, 15(3), 277. <https://doi.org/10.3390/MET15030277>
- Cui, X., Chen, D., Xu, F., Du, S., Chen, R., & Song, Q. (2024). Investigating scandium-alloyed NbSi systems: Microstructure, oxidation behavior, and fracture toughness. *Materials Characterization*, 217, 114409. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2024.114409>
- Dehabadi, M., Legin, E., Legin, A., Yaghmaei, S., Nechaev, A., Babain, V., & Kirsanov, D. (2021). Developing potentiometric sensors for scandium. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 348, 130699. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2021.130699>
- Deng, T., Zhong, X., Zhong, M., Lai, Y., Zhu, Z., Zhang, L., & Ojo, O. A. (2023). Effect of scandium on microstructure and corrosion resistance of Ti64 alloy in NaCl solution. *Materials Characterization*, 197, 112671. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2023.112671>
- Deng, Y., Peng, B., Xu, G., Pan, Q., Ye, R., Wang, Y., Lu, L., & Yin, Z. (2015). Stress corrosion cracking of a high-strength friction-stir-welded joint of an Al–Zn–Mg–Zr alloy containing 0.25 wt.% Sc. *Corrosion Science*, 100, 57–72. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2015.06.031>

- Doğan, M.,2023. 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yaşlanma Parametrelerinin Korozyon Davranışına Etkisi,Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Erdem, E.,2006. AISI 1060 Çeliğinin Erozif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi ve Geliştirilmesi,Yüksek Lisans Tezi ,İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Bilim Dalı.
- Erk, N.,(2019).7075 Alüminyum Alaşımı Üzerinde Oluşturulan Mikro Ark Oksidasyon Kaplamaların Aşınma Ve Korozyon Dayanımına Zirkonya Partikül Takviyesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı,Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bilim Dalı.
- Gu, D., Zhang, H., Dai, D., Ma, C., Zhang, H., Li, Y., & Li, S. (2020). Anisotropic corrosion behavior of Sc and Zr modified Al-Mg alloy produced by selective laser melting. *Corrosion Science*, 170, 108657. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2020.108657>
- Hüseyinoğlu, M., 2008.7075 Alüminyum Alaşımının Freze İle İşlenmesinde Minimum Soğutma Sıvısı Kullanmanın Performans Karakterlerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Işın, E.,2023. Improvement of Surface Properties Of Biodegradable Zinc Based Alloys By Electrophoretic Deposition Method, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Kadivar, M., Tormey, D., & McGranaghan, G. (2021). A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100077. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2021.100077>
- Kai, X., Wang, Y., Chen, R., Peng, Y., Shi, A., Tao, R., Liang, X., Li, G., Chen, G., Xu, X., & Zhao, Y. (2024). Effects of in-situ ZrB₂ nanoparticles and scandium on microstructure and mechanical property of 7N01 aluminum alloy. *Journal of Rare Earths*, 42(3), 612–620. <https://doi.org/10.1016/J.JRE.2023.04.004>
- Khalid, M. Y., Umer, R., & 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>
- Kılıç, S., Kacar, İ., & Öztürk, F. (2019). Havacılık endüstrisinde yeni trend: Al-Li alaşımları. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 275–296. <https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.416490>
- Li, R., Wang, M., Li, Z., Cao, P., Yuan, T., & Zhu, H. (2020). Developing a high-strength Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy for selective laser melting: Crack-inhibiting and multiple strengthening mechanisms. *Acta Materialia*, 193, 83–98. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2020.03.060>
- Li, X., Liu, Y., Tan, C., & Zou, Y. (2023). Laser powder bed fusion of a novel crack-free Al-Mg-Sc-Zr alloy: Printability, microstructure characterization and mechanical performance. *Optics & Laser Technology*, 162, 109281. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2023.109281>
- Li, Y., Tang, J., Liu, X., Guan, X., Dong, S., & Ren, X. (2024). The effect of adding ZrH₂ particles on grain refinement and tensile strength during laser metal deposition of 7075 aluminum alloy. *Manufacturing Letters*. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2024.11.003>
- Liang, Y., Li, G., Liu, L., Jiang, J., Cao, J., Shao, W., & Zhen, L. (2023). Corrosion behavior of Al-6.8Zn-2.2Mg-Sc-Zr alloy with high resistance to intergranular corrosion. *Journal*

- of *Materials Research and Technology*, 24, 7552–7569.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.05.017>
- Liu, C., Wang, L., Wei, H., Cai, S., & Li, Z. (2024). Effect of rare earth elements scandium on Sn-0.7Cu brazing metal: First-principles calculation. *Surfaces and Interfaces*, 52, 104960. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2024.104960>
- Liu, J., Yao, P., Zhao, N., Shi, C., Li, H., Li, X., Xi, D., & Yang, S. (2016). Effect of minor Sc and Zr on recrystallization behavior and mechanical properties of novel Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 657, 717–725. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2015.10.122>
- Lohar, A. K., Mondal, B., Rafaja, D., Klemm, V., & Panigrahi, S. C. (2009). Microstructural investigations on as-cast and annealed Al–Sc and Al–Sc–Zr alloys. *Materials Characterization*, 60(11), 1387–1394. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2009.06.012>
- Mandal, P. K., Felix, J., JohnVarkey, M., & Vishnu, K. C. (2020). Effect of Scandium on Homogenization Treatment and Friction Stir Processing on Mechanical Properties of 7075 Aluminium Alloy Prepared by Foundry Route. *Materials Today: Proceedings*, 24, A6–A14. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.04.394>
- Measurement and Symbol of Surface Roughness | NS TOOL CO.,LTD. (n.d.). Retrieved December 29, 2025, from https://www.ns-tool.com/en/technology/technical_data/surface_roughness/
- Melentiev, R. (2023). Physical theories of solid particle erosion and abrasive jet wear. *Journal of Manufacturing Processes*, 106, 422–452. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2023.10.014>
- Meng, Q., & Frankel, G. S. (2004). Effect of Cu Content on Corrosion Behavior of 7xxx Series Aluminum Alloys. *Journal of The Electrochemical Society*, 151(5), B271. <https://doi.org/10.1149/1.1695385>
- Obidov, Z. R., Amonova, A. V., & Ganiev, I. N. (2013). Effect of scandium doping on the oxidation resistance of Zn5Al and Zn55Al alloys. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 87(4), 702–703. <https://doi.org/10.1134/S0036024413040201/METRICS>
- Onur, A., (2014). AA6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırma İşlemine Bağlı Olarak İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Özkan, Z., Gökmeşe, H., & Gökmen, U. (2022). Investigation of the Microstructure-Hardness and Wear Performances of Hybrid/Composite Materials Al₂O₃/SiC Particle Reinforced in AA 7075 Matrix. *Science of Sintering*, 54(2). <https://ojs.itn.sanu.ac.rs/index.php/scisint/article/view/583>
- Phoung, S., Williams, E., Gaustad, G., & Gupta, A. (2023). Exploring global supply and demand of scandium oxide in 2030. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136673. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136673>
- Polat, Ç., 2019. Erimiş Tuz İçerisinde Elektrokimyasal Yöntemle Al-Sc Alaşımı Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Revie, R. W. (2011). Uhlig's Corrosion Handbook: Third Edition. Uhlig's Corrosion Handbook: Third Edition. <https://doi.org/10.1002/9780470872864>
- Ryabtsev, S. I., Polonsky, V. A., & Sukhova, O. V. (2020). Effect of Scandium on the Structure and Corrosion Properties of Vapor-Deposited Nanostructured

- Quasicrystalline Al–Cu–Fe Films. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 58(9–10), 567–575. <https://doi.org/10.1007/S11106-020-00111-2/FIGURES/8>
- Seçer, Y., 2019. Seçici Lazer Ergitme İle Oluşturulan Farklı Yüzey Tekstürlerinin Ve Plazma Nitrürleme İşleminin AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Yapısal, Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı.
- Sehrawat, R., & Mangla, B. (2025). Coordination interaction of biologically important macromolecules with metals and alloys for corrosion protection: An extensive study. *Coordination Chemistry Reviews*, 525, 216346. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2024.216346>
- Shi, Y., Pan, Q., Li, M., Huang, X., & Li, B. (2014). Effect of Sc and Zr additions on corrosion behaviour of Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 612, 42–50. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2014.05.128>
- Shuai, Z., Zhu, Y., Gao, P., & Han, Y. (2024). Rare earth elements resources and beneficiation: A review. *Minerals Engineering*, 218, 109011. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2024.109011>
- Singh, V., Prasad, K. S., & Gokhale, A. A. (2004). Effect of minor Sc additions on structure, age hardening and tensile properties of aluminium alloy AA8090 plate. *Scripta Materialia*, 50(6), 903–908. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2003.12.001>
- Speight, J. G. (2014). Mechanism of Acid Corrosion. *High Acid Crudes*, 31–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800630-6.00002-2>
- Sun, Y., Luo, Y., Pan, Q., Liu, B., Long, L., Wang, W., Ye, J., Huang, Z., & Xiang, S. (2021). Effect of Sc content on microstructure and properties of Al–Zn–Mg–Cu–Zr alloy. *Materials Today Communications*, 26, 101899. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2020.101899>
- Sutha, L., & Cyril, A. (2021). Corrosion behavior of GeO₂ and Sc₂O₃ Coatings on AZ31 Alloy. *Oriental Journal Of Chemistry*, 37(2), 433–439. <https://doi.org/10.13005/OJC/370224>
- Tezgahta ve Sahada Elektrokimya. (n.d.). Retrieved October 10, 2025, from <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/wet-chemical-analysis/electrochemistry-on-the-bench-and-in-the-field>
- Tsujimoto, A., Barkmeier, W. W., Fischer, N. G., Nojiri, K., Nagura, Y., Takamizawa, T., Latta, M. A., & Miazaki, M. (2018). Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors. *Japanese Dental Science Review*, 54(2), 76–87. <https://doi.org/10.1016/J.JDSR.2017.11.002>
- Turhan, S., (2002). Alüminyumun Mekanik Özelliklerine Ve Aşınma Davranışına Magnezyumun Ve Silisyumun Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü ,Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Van Der Biest, O. O., & Vandeperre, L. J. (1999). Electrophoretic deposition of materials. *Annual Review of Materials Science*, 29, 327–352. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.MATSCI.29.1.327>
- Wang, Y., & Wang, Q. J. (2013). Stribeck Curves. *Encyclopedia of Tribology*, 3365–3370. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_148
- Wang, Y., Liu, H., Ma, X., Wu, R., Sun, J., Hou, L., Zhang, J., Li, X., & Zhang, M. (2019). Effects of Sc and Zr on microstructure and properties of 1420 aluminum alloy. *Materials Characterization*, 154, 241–247. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2019.06.001>

- Wang, Y., Xiong, B. Q., Li, Z. H., Huang, S. H., Wen, K., Li, X. W., & Zhang, Y. A. (2019). As-cast microstructure of Al–Zn–Mg–Cu–Zr alloy containing trace amount of Sc. *Rare Metals*, 38(4), 343–349. <https://doi.org/10.1007/S12598-018-1136-5/FIGURES/7>
- What is Surface Finish and Types of Surface Finish Measurement Parameters. (n.d.). Retrieved December 29, 2025, from <https://www.taylor-hobson.com/resource-center/blog/2024/june/what-is-surface-finish-and-types-of-surface-finish-parameters>
- Wloka, J., & Virtanen, S. (2007). Influence of scandium on the pitting behaviour of Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Acta Materialia*, 55(19), 6666–6672. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2007.08.021>
- Wongkhuenkaew, N., Suwanpreecha, C., Chowwanonthapunya, T., Pongsaksawad, W., & Limmaneevichitr, C. (2024). Enhancing electrochemical corrosion resistance in Al–6Ni alloys through trace Sc additions. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 3066–3078. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.04.045>
- Yanardağ, T. (2019). *Elektrokimyasal empedans spektroskopisi*. Ankara: Gazi Kitabevi. ISBN: 978-605-344-958-4
- Yang, Q., Liu, Y., Hu, D., Chen, H., & Zhang, W. (2023). Effect of Sc on the microstructure and mechanical properties of direct laser-deposited/Al-Cu-Mg-Sc composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 474, 130103. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2023.130103>
- Yılmaz, Ş., 2023. Alüminyum 2024 ve 7075 Alaşımlarının Genel Korozyonuna Yüzey İşlemleri ve Organik İnhibitörlerin Etkisinin Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı.
- Yi, P., Zhang, D., Qiu, D., Peng, L., & Lai, X. (2019). Carbon-based coatings for metallic bipolar plates used in proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13), 6813–6843. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.176>
- Zakaria, H., Silai, Z., Hussain, G., Domblesky, J. P., Kong, J., Louhichi, B., & Wei, H. (2025). In-process and post-machining corrosion of aluminum alloys: Mechanisms, root causes, and inhibitive approaches. *Materials Today Chemistry*, 48, 102897. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2025.102897>
- Zhang, B., Zhang, Y., Zheng, K., & Chi, Y. (2024). Research on the microstructure, mechanical and fatigue performance of 7075/6061 dissimilar aluminum alloy fusion welding joint treated by nanoparticle and post-weld heat treatment. *Engineering Fracture Mechanics*, 110550. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2024.110550>
- Zhang, P., Yue, X., Wang, S., Sun, Y., Zhou, H., & Zhang, J. (2024). Characterization of surface integrity of 7075-T6 aluminum alloy subjected to microbiologically induced corrosion during high-speed machining. *Journal of Alloys and Compounds*, 1008, 176843. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2024.176843>
- Zhu, H., & 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>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Esra İBAÇ
Doğum Tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Beşikdüzü Borsa İstanbul Fen Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
-	
Tezden Üretilmiş Bildiriler	
<i>Deposition of Scandium Oxide Film on Al7075 Alloy by Electrophoretic Coating Technique, 2nd International Conference on Engineering, Natural Sciences, and Technological Developments (ICENSTED 2025).</i>	