



**T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ELOKSAL
KAPLAMALARININ OPTİMUM ÜRETİM KOŞULLARININ
ARAŞTIRILMASI VE SAVUNMA SANAYİ UYGULAMALARI
İÇİN TEST EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AHMET ÇAĞRI YÜZER
(20229210010)**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. KÜRŞAD OĞUZ OSKAY**

**SİVAS
OCAK 2025**

AHMET ÇAĞRI YÜZER'in hazırladığı ve “**Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Eloksal Kaplamalarının Optimum Üretim Koşullarının Araştırılması Ve Savunma Sanayi Uygulamaları İçin Test Edilmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

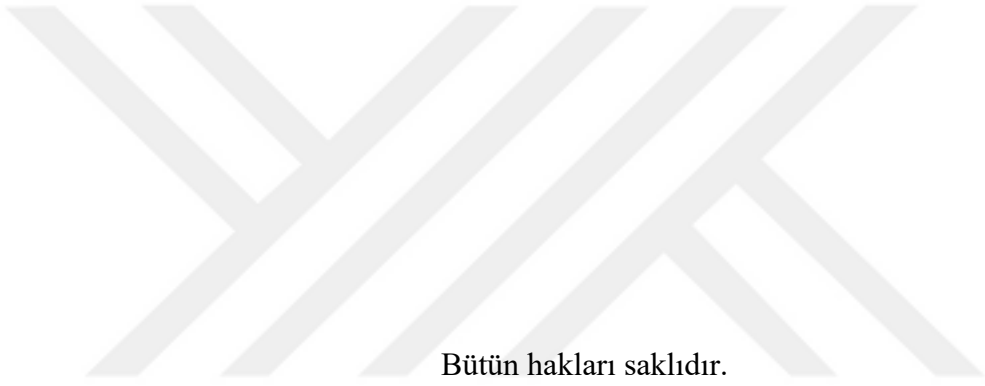
Tez Danışmanı	Doç. Dr. Kürşad Oğuz OSKAY Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Recep ÇALIN Kırıkkale Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Kerim Emre ÖKSÜZ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nail ALTUNAY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© AHMET ÇAĞRI YÜZER, 2025

TEŞEKKÜRLERİMLE VE İTHAF

Eğitimimi fikir, destek ve sabırla tamamlamamda yardımcı olan değerli hayat arkadaşım Dilan YÜZER' e ve varlığıyla destek olan biricik oğlum Alaz Kutay YÜZER' e tüm sevgilerimle teşekkür ederim.

Eğitim hayatımı tüm gücüyle destekleyen, lisans eğitimimi, yüksek lisans seviyesine çıkarmamı, benim için benden daha çok isteyen saygı değer ve fedakar babam Hasan Fehmi YÜZER ve yine tüm eğitim hayatım boyunca var gücüyle destekleyen fedakar annem Nuray YÜZER' e en içten teşekkür, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatımı başından sonuna kadar her şeyiyle destekleyen ağabeyim Selim Safa YÜZER' e ve verdiği fikirleri ile çok değerli eşi Canse YÜZER' e teşekkür, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Alaz Kutay YÜZER' e ithafen



ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

23.01.2025

Ahmet Çağrı YÜZER

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen ve beni özgür bırakan sayın danışman hocam Doç. Dr. Kürşad Oğuz OSKAY’a çok teşekkür ederim.

Bilgi ve destekleri ile emeğini ve tecrübelerini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Kerim Emre ÖKSÜZ’e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimime başlamama vesile olan ve ders dönemimde, desteklerini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Ali ÖZER’ e çok teşekkür ederim.

Tüm tez dönemi boyunca bilgi ve emeklerini esirgemeyen SEM uzmanı Halil İbrahim ÇETİNER hocama teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi süresince teknik ve altyapı destekleri ile yanımda olan Aselsan Sivas firmasına teşekkür ederim.

ÖZET
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ELOKSAL
KAPLAMALARININ OPTİMUM ÜRETİM KOŞULLARININ
ARAŞTIRILMASI VE SAVUNMA SANAYİ UYGULAMALARI
İÇİN TEST EDİLMESİ

Ahmet Çağrı YÜZER

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kürşad Oğuz OSKAY

2025, 58+XV sayfa

Alüminyum alaşımlarını, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanım özellikleri nedeniyle mimari, otomotiv endüstrisi, elektronik endüstrisi, hidrolik, medikal ve yarı iletken ekipmanları gibi birçok uygulamada kullanımını görmek mümkündür. Saf alüminyum, yüksek ve düşük pH ortamları dışında, genelde oldukça yüksek bir korozyon direncine sahiptir ve çoğu metale göre daha az koruma gerektirir. Ancak, alüminyum matrisini güçlendirmek için kullanılan alaşım elementleri, mikroyapıda ikinci fazlar oluşturarak matrisle önemli ölçüde farklı elektrokimyasal potansiyellere sahip olabilir. Bu durum, mikro-galvanik çiftlerin oluşmasına yol açabilir ve korozyon dayanımını arttırmak için yüzey modifikasyonu gerektirebilmektedir. Bu çalışmada, savunma sanayinde kullanılan 7075 alüminyum alaşımının yüzeyine anodizasyon (eloksal kaplama) işlemi uygulanarak MIL-STD-810 standardına uygun kaplamalar üretilmiştir. Anodizasyon işlemi alüminyum üzerinde "alumina" olarak bilinen koruyucu poroz oksit yapı bir tabakanın oluşturulduğu elektrolitik bir işlemdir. Bu işlem sonrasında alaşımın korozyon ve aşınma direnci önemli ölçüde artırmaktadır. Deneylerde, kaplama işlemi sırasında sülfürik asit içeren bir elektrolit kullanılmıştır. Kaplanan numuneler, boyandıktan sonra saf su kullanılarak 95°C’de mühürleme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada, anodizasyon koşullarının kaplama özelliklerine etkisini anlamak amacıyla uygulanan akım yoğunluğu, anodizasyon süresi ve elektrolit asit konsantrasyonunun etkileri değerlendirilmiştir. Anodizasyon işlemi sonrasında elde edilen kaplamaların zorlu çevresel koşullara dayanıklılığı MIL-STD-810 standardına uygun testlerle analiz edilmiştir. Ayrıca, kaplamaların mikroyapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Boyanabilirlik ve boyanın yüzeye yapışma performansları açısından da kaplamaların değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, optimum anodizasyon koşulları belirlenerek, savunma sanayinde kritik öneme sahip alüminyum alaşımlarının yüzey kaplama kalitesi artırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eloksal kaplama, Anodik oksidasyon, MIL-STD-810, Savunma sanayii, Alüminyum, Alüminyum alaşımları, Alüminyum 6061-7075

ABSTRACT
INVESTIGATION OF THE OPTIMUM PRODUCTION
CONDITIONS FOR ANODIZING COATINGS APPLIED TO
ALUMINUM ALLOYS AND TESTING FOR DEFENSE
INDUSTRY APPLICATIONS

Ahmet Çağrı YÜZER

Master of Science Thesis

Department of Metallurgy and Material Engineering

Supervisor: Assistant Professor Kürşad Oğuz OSKAY

2025, 58+XV pages

Aluminum alloys are widely used in applications such as architecture, the automotive industry, electronics, hydraulics, medical devices, and semiconductor equipment due to their low density and high mechanical strength. Pure aluminum generally has a high corrosion resistance, except in high and low pH environments, and requires less protection than most metals. However, alloying elements used to strengthen the aluminum matrix can form secondary phases in the microstructure with significantly different electrochemical potentials compared to the matrix. This can lead to the formation of micro-galvanic couples, which may necessitate surface modification to enhance corrosion resistance. In this study, an anodizing (also known as anodic oxidation) process was applied to the surface of 7075 aluminum alloy, commonly used in the defense industry, to produce coatings in compliance with the MIL-STD-810 standard. Anodizing is an electrolytic process in which a protective porous oxide layer, known as alumina, is formed on the surface of aluminum. This process significantly improves the corrosion and wear resistance of the alloy. During the experiments, an electrolyte containing sulfuric acid was used in the coating process. The coated samples were subjected to a sealing process in pure water at 95°C after being dyed. The effects of current density, anodizing time, and electrolyte acid concentration on the coating properties were evaluated to understand the impact of anodizing conditions. The durability of the coatings obtained after the anodizing process was analyzed using tests in accordance with the MIL-STD-810 standard under harsh environmental conditions. Additionally, the microstructural properties of the coatings were examined in detail using scanning electron microscopy (SEM). The coatings were also evaluated for paintability and paint adhesion performance. At the end of the study, optimal anodizing conditions were determined, enhancing the surface coating quality of aluminum alloys that are critically important in the defense industry.

Key Words: Anodizing coating, anodic oxidation, MIL-STD-810, Defense industry, Aluminum, Aluminum alloys, Aluminum 6061-7075

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLERİMİLE VE İTHAF	v
ETİK.....	vi
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
İÇİNDEKİLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI HAKKINDA	1
1.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	1
1.2.1. 1000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	2
1.2.2. 2000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	3
1.2.3. 3000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	3
1.2.4. 4000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	3
1.2.5. 5000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	3
1.2.6. 6000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	3
1.2.7. 7000 Serisi Alüminyum Alaşımları:	4
1.3. ALAŞIM ELEMENTLERİ VE ALAŞIM ELEMENT ETKİLERİ	4
1.3.1. Çinkonun Etkisi:.....	5
1.3.2. Bakırın Etkisi:	5
1.3.3. Magnezyumun Etkisi:	5
1.3.4. Silisyumun Etkisi:.....	5
1.4. ELOKSAL KAPLAMA	5
1.4.1. Eloksal Kaplama Reaksiyonları.....	6
1.4.2. Eloksal (Anodik Oksit) Kaplama Oluşumu	7
1.4.3. Sert Eloksal	10
1.4.4. Eloksal Kaplama Öncesi Hazırlık İşlemleri.....	11
1.5. ELOKSAL KAPLAMA EKİPMANLARI	12
1.5.1.1. Kaplama Havuzu.....	13
1.5.2. Katot.....	13
1.5.3. Karıştırma Aparatı.....	13
1.5.4. Soğutma Suyu.....	13
1.5.5. Askılar	14
1.5.6. Elektrolit	14
1.5.7. Geometrik Tasarım	17

1.5.8.	<i>Mühürleme İşlemi</i>	17
1.6.	MIL-STD-810 TEST YÖNTEMLERİ.....	19
1.6.1.	<i>Termal Şok Testi</i>	20
1.6.2.	<i>Nem Testi</i>	20
1.6.3.	<i>Atış Testi</i>	20
2.	MATERYAL VE YÖNTEM	22
2.1.	ANODİK OKSİDASYON İŞLEMİ	22
2.2.	MİL-STD TEST YÖNTEMLERİ.....	26
2.2.1.	<i>Termal Şok Testi</i>	26
2.2.2.	<i>Nem Testi</i>	27
2.2.3.	<i>Atış Testi</i>	27
3.	BULGULAR	28
3.1.	KATOT TÜRÜ.....	28
3.1.1.	<i>Alüminyum Katot ile Yapılan Çalışmalar</i>	28
3.1.2.	<i>Kurşun Katot ile Yapılan Çalışmalar</i>	30
3.2.	SÜRE VE AKIM YOĞUNLUK ÇALIŞMALARI	33
3.2.1.	<i>10 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri</i>	33
3.2.2.	<i>15 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri</i>	34
3.2.3.	<i>20 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri</i>	36
3.2.4.	<i>MIL-STD Testlerinin Mikroyapı Üzerindeki Etkileri</i>	39
3.2.5.	<i>Akım Yoğunluğunun Eloksal Kaplama Mikroyapısına Etkisi ve Savunma Sanayi Uygulamaları</i>	40
3.3.	ASİT KONSANTRASYONU ÜZERİNE İNCELEMELER	42
3.4.	ASKI FARKLILIKLARINA GÖRE ELOKSAL KAPLAMA İNCELEMELERİ	46
3.5.	AL-6061 ALAŞIMLARINDA BELİRLENEN OPTİMUM DEĞERLERİN SONUÇLARI	49
4.	GENEL SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR	51
	KAYNAKÇA	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

SEM: Scanner electron microscope

V: Volt

A: Amper

Dm²: Desimetrekare

Dm: Desimetre

Cm: Santimetre

C: Santigrat

°: Derece

µm: Mikrometre

nm: Nanometre

Al: Alüminyum

Pb: Kurşun

Şekiller Dizini

Şekil 1. 1: Eloksal kaplama işlem banyosu şematik gösterimi.....	7
Şekil 1. 2: Gözeneklerin İçten Dışa Oluşumu (Alpay, 2009).....	8
Şekil 1. 3: Gözeneklerin İçten Dışa Oluşumu 4 Aşamalı (Alpay, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023).....	9
Şekil 1. 4: Alüminyum Üzerinde Büyüyen Bariyer Oksit ve Gözenekli Oksit Tabaka Kesit Görünümü (Runge, 2017).....	9
Şekil 1. 5: FAD Diyagramı (João Victor de Sousa Araujo, 2023).....	10
Şekil 1. 6: Anodik Oksidasyon Türleri ve Kaplama Kalınlıkları	11
Şekil 1. 7: Mühürleme İşleminde Gerçekleşen Yapısal Değişiklikler (Stanley Udochukwu Ofoegbu, 2020; Shang, 2017).....	19
Şekil 2. 1: Güç Kaynağı.....	22
Şekil 2. 2: Dağlanmış Numune.....	23
Şekil 2. 3: Dağlama İşleminde Sonra Kimyasal Temizlenmiş Numune	23
Şekil 2. 4: Kurşun Katotlu Eloksal Havuzu.....	24
Şekil 2. 5: Soğutma Havuzu (Alüminyum Katot)	24
Şekil 2. 6: Kaplama Kalınlık Ölçme Cihazı	25
Şekil 2. 7: Boyanmış Numune	25
Şekil 2. 8: Akış Şeması.....	25
Şekil 2. 9: Çevre Koşulları, Termal Şok-Saat Testi Uygulama Şekli Grafikselleştirimi.....	26
Şekil 2. 10: Çevre Koşulları, Sıcaklık-Saat ve Nem-Saat Testlerinin Uygulama Sürelerinin Grafikselleştirimi	27
Şekil 3. 1: Alüminyum Katot ile Çalışılmış Numunelere Ait SEM Görüntüleri, Süre Parametreleri a) 10 Dk. b) 15 Dk. c) 20 Dk. d) 25 Dk.	29
Şekil 3. 2: Mat Boya Görünümü.....	30
Şekil 3. 3: Proses Süresinin Mikroyapı SEM Görüntüleri, 2 A/dm ² a) 10 Dk. b) 15 Dk. c) 20 Dk.....	31
Şekil 3. 4: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 2 A/dm ² a) 10 Dk. b) 15 Dk. c) 20 Dk.....	32
Şekil 3. 5: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 10 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4 A/dm ²	33
Şekil 3. 6: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 10 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4 A/dm ²	34

Şekil 3. 7: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 15 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4A/dm ²	35
Şekil 3. 8: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 15 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4 A/dm ²	36
Şekil 3. 9: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 20 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4A/dm ²	37
Şekil 3. 10: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 20 Dakika a) 2 A/dm ² b) 3 A/dm ² c) 4 A/dm ²	38
Şekil 3. 11: Test Öncesi ve Test Sonrası Mikroyapı-Makro Görsel.....	39
Şekil 3. 12: Akım Yoğunluğunun Gözenek Çapına Etkisi SEM Görüntüleri, 15 Dakika a) 3 A/dm ² b) 4 A/dm ²	40
Şekil 3. 13: Asit Konsantrasyonunun Kaplamaya Etkisi, 3 A/dm ² 15 Dakika a) 100 g/l b) 125g/l c) 150 g/l d) 175 g/l e) 200 g/l	43
Şekil 3. 14: Asit Konsantrasyonunun Boya ve Test Prosesleri Sonrası Makro Görünümlerine Etkisi, 3 A/dm ² - 15 Dakika a) 100 g/l b) 125 g/l c) 150g/l d) 175g/l e) 200 g/l	45
Şekil 3. 15: Optimum Değerler ile Anodik Oksidasyon ve Boya Prosesi Tamamlanmış, Dişli Yan Yüzeyleri Olan Numunelerin MIL-STD Testi Öncesi ve Sonrası Makro Fotoğraflar a) Test Öncesi b) Test Sonrası	46
Şekil 3. 16: Askı Tasarımlarının, Makro Görünümlerine Etkisi Titanyum Kablo ile Bağlanmış Numune 3 A/dm ² - 15 Dakika.....	47
Şekil 3. 17: Askı Tasarımlarının, Makro Görünümlerine Etkisi, Uygun Askı Aparatı ile Prosesi Tamamlamış Numuneler a) 3 A/dm ² – 15 Dakika b) 3 A/dm ² - 20 Dakika	48
Şekil 3. 18: Anodik Oksidasyon İşlemi Uygulanan Numuneler a) Al-6061 b) Al-7075	49
Şekil 3. 19: Al-6061 tip Alüminyuma Ait Mikroyapı SEM Görüntüleri	50
Şekil 3. 20: Al-6061 tip Alüminyuma Ait Makro Görsel.....	50

Çizelgeler Dizini

Çizelge 1. 1: Saf Alüminyum Özellikleri	1
Çizelge 1. 2: Alaşım Elementlerinin Çözünürlük Sınırları.....	2
Çizelge 1. 3: Döküm Alüminyum Alaşımları (Richard, 2018)	2
Çizelge 1. 4: 6061 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımının Ağırlıkça Alaşım Elementi	4
Çizelge 1. 5: Sert Eloksal Parametleri	11
Çizelge 1. 6: Eloksal Kaplama İşleminin Asitlere Göre Parametleri (Giulia Scampone, 2022; Proenca M.P., 2008).....	15
Çizelge 1. 7: Sülfürik Asit Parametreleri (Giulia Scampone, 2022)	15
Çizelge 1. 8: Elektrolitlere Göre Eloksal Kaplamanın Avantaj-Dezavantajlar	17
Çizelge 1. 9: Keskin Köşelere Göre Eğrilik Yarıçapı (Defense, 15-09-2003)	17
Çizelge 3. 1: Alüminyum Katot Süre Çalışmaları	28
Çizelge 3. 2: Proses Süresinin Kaplama Kalınlığına Etkileri	31
Çizelge 3. 3: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 10 Dakika.....	33
Çizelge 3. 4: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 15 Dakika.....	34
Çizelge 3. 5: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 20 Dakika.....	36
Çizelge 3. 6: 15 Dakika Uygulamada 3-4 A/dm ² Akım Yoğunluğunun Karşılaştırması	40
Çizelge 3. 7: Belirlenen Optimum Parametreler.....	42
Çizelge 3. 8: Asit Konsantrasyon Çalışmaları	42
Çizelge 3. 9: Optimum Parametreler	49

1. GİRİŞ

1.1.Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları Hakkında

Alüminyumun yoğunluğu ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ve ergime sıcaklığı oldukça düşüktür. Ergitilmesi kolay olduğundan dökülmesi ve şekillendirmesi kolaydır. Alüminyumun sahip olmuş olduğu düşük ağırlık, düşük yoğunluk ve üstün yüzeysel, mekaniksel özelliklerinden ötürü kullanım alanı oldukça geniştir. Aynı zamanda alüminyumun; korozyon direnci, zehirli olmayışı, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri mevcuttur. Bu özellikleri ile birçok sanayide tercih sebebi olmaktadır. Bunlardan başlıcaları; makine, imalat, metal, inşaat, kimya, gıda, uzay, hava ve savunma sanayileridir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009; Cirik, 2007; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Saf alüminyumun bazı özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir (Ak, 2012; ASM Metals Handbook 2, 1985; Gökşahin, 2007; Richard, 2018).

Çizelge 1. 1: Saf Alüminyum Özellikleri

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26.97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Küp
Yoğunluğu	2.7 gr/cm ³
Ergime noktası	63 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150-300 °C
Buharlaşıma noktası	2450 °C
Özgül ısı	0.224 cal/gr
Elastisite modülü	72x10 ³
Kayma modülü	27x10 ³
Çekme Mukavemeti	2-90 Mpa
Akma mukavemeti	10-30 Mpa
Kopma uzaması	%30-40

1.2.Alüminyum Alaşımları

Saf alüminyum, düşük yoğunluk ve yüksek korozyon direnci gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, mekanik mukavemet açısından birçok mühendislik uygulaması için yetersizdir. Bu nedenle, alüminyumun mukavemetini ve diğer mekanik özelliklerini artırmak amacıyla alaşımlandırma işlemi yapılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında genellikle magnezyum (Mg), silisyum (Si), manganez (Mn), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi alaşım elementleri kullanılmaktadır. Bu elementler, alüminyumun tane yapısını ve çökelti sertleşmesini iyileştirerek mukavemet, sertlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerde kayda değer bir artış sağlamaktadır. Alaşım elementlerinin miktarının artışı, genellikle malzemenin mekanik mukavemetinde doğrusal bir iyileşme ile sonuçlanmaktadır. Ancak, alaşım elementlerinin yüksek konsantrasyonlarda

kullanımı, korozyon direnci veya işlenebilirlik gibi diğer özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir. (Şişmanoğlu, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Alüminyumda, alaşım elementlerinin çözünürlük sınırları Çizelge 1.2’de verilmiştir. (Charles, 2007; Cirik, 2007).

Çizelge 1. 2: Alaşım Elementlerinin Çözünürlük Sınırları

Alaşım Elementi	Katılma Sıcaklığında Çözünürlük (%)	Oda Sıcaklığında Çözünürlük (%)	Fark
Cu	5,65	0,02	5,63
Mg	14,9	2,5	12,4
Mn	1,8	0,3	1,5
Si	1,65	0,1	1,55
Zn	8,2	2,0	6,2

Alüminyum alaşımlarının serileri, alaşımların en uygun olduğu kullanım alanlarını belirlemek amacıyla kategorize edilmiştir. Döküm alüminyum alaşımlarının tablosu Çizelge 1.3’deki gibidir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018; Demir, 2008; Richard, 2018; Shang, 2017).

Çizelge 1. 3: Döküm Alüminyum Alaşımları (Richard, 2018)

Simge	Ana Alaşım Elementi
1XXX	%99 ve üzeri Al
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg ve Si
7XXX	Zn
8XXX	Diğer elementler
9XXX	Kullanılmayan ürün

1.2.1. 1000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Soğuk işleme uygun olan ağırlıkça minimum %99 alüminyum içerip çok az miktarda alaşım elementi içeren alüminyumlardır (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023). Yüksek seviyede elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamalarda, örneğin yüksek güçlü elektrik hatlarında yaygın olarak kullanılır. (Richard, 2018)

1.2.2. 2000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Mukavemet değerleri olarak çelik ile rekabet edebilen ve ağırlıkça en fazla bakır (Cu) içeren alüminyum alaşımıdır. Genellikle uçak yapımında kullanılmaktadır ve yüksek sıcaklıkta, özellikle 150°C'de gerekli mukavemeti sağlaması gereken parçaların üretiminde uygundur. Çökelme sertleşmesi ile mukavemet değerleri artırılmaktadır. Ancak bu alüminyum alaşımlarının gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti bulunduğu için alternatif alaşımlar kullanılmaktadır (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009). Güçlendirilmiş özelliklerin gerektiği uygulamalarda tercih edilmektedir. Bazı durumlarda, 2xxx serisi alaşımlar, koruma amacıyla dış kaplama tabakası ile birlikte 6xxx serisi alaşımlarla kullanılmaktadır (Richard, 2018).

1.2.3. 3000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Soğuk işleme uygun olan alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyumdan sonra ağırlıkça en çok mangan (Mn) elementi içermektedir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009). Genellikle içecek kutularının üretiminde kullanılır, özellikle konserve sanayisinde yaygın olarak tercih edilir (Richard, 2018).

1.2.4. 4000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ağırlıkça en çok silisyum (Si) içeren alaşımlardır (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009; Richard, 2018). Silisyum elementinin varlığı, alaşımın düşük erime sıcaklığına sahip olmasını sağlar. Bu özellik, alüminyumun birleştirilmesinde, özellikle kaynak işlemlerinde avantajlıdır, çünkü bu alaşımlar, temel metalin erime sıcaklığından daha düşük bir erime noktasına sahiptir ve bu da kaynak işlemleri sırasında daha iyi işlenebilirlik sağlar (Richard, 2018).

1.2.5. 5000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Ağırlıkça en fazla magnezyum içeren ve soğuk işlem yoluyla mukavemet değerleri çok yükseklerle çıkarılabilen alaşımlardır. Düşük sıcaklık işlemlerinde önerilmektedir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009). İyi korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik özellikleri gösterir. Bu nedenle, denizcilik uygulamaları için uygundur (Richard, 2018).

1.2.6. 6000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Ağırlıkça en fazla magnezyum ve silisyum içeren alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, şekillendirme sırasında iyi şekil alabilirlik ve kaynaklanabilirlik avantajına sahiptir, bu nedenle AA 6061 gibi 6xxx serisi alüminyum alaşımları yaygın olarak ekstrüzyon işlemlerinde kullanılmaktadır (Richard, 2018). Çökelme sertleşmesi ile mukavemet değerleri artırılabilir. 7000 kalite alüminyum alaşımlarına yakın sertlik değerleri elde edilebilmektedir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Şişmanoğlu, 2009).

1.2.7. 7000 Serisi Alüminyum Alaşımları:

Ağırlıkça en fazla çinko (Zn) elementi içeren alüminyum alaşımlarıdır. Çökelme sertleşmesi yöntemiyle alüminyum alaşımları arasında en yüksek sertlik değerlerine ulaşan alaşımlardır. Yüksek gerilim yoğunluğu gerektiren uygulamalarda kullanılır, örneğin uçak yapıları, otomotiv, araç tamponları gibi alanlarda tercih edilir. Çinko bu alaşımların ana alaşım elementidir (Richard, 2018).

Alüminyum alaşımları arasında, 7xxx serisi, en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Yüksek gerilme mukavemetine sahip olmasına rağmen, korozyon direnci düşüktür. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin (gerilme mukavemeti ve çatlama dayanımı) ve korozyon direncinin optimum kombinasyonu, hafif yaşlandırılmış bir ısıtıl işlem veya kaplama yöntemleri ile sağlanabilmektedir (Richard, 2018). Alüminyum alaşımı 7075, alüminyum alaşım sınıflandırmasında en yüksek kaliteye sahiptir. Alüminyum alaşımı 7075-O veya 7075-T6, genellikle savunma sanayi, havacılık uygulamaları (örneğin, rulman ve iniş takımı üretimi için ham madde olarak, roketler, pervaneler) gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (Richard, 2018).

Çizelge 1.4'de 7075 kalite alüminyum alaşımının içerisindeki ağırlıkça alaşım elementleri verilmiştir (ASM Metals Handbook 2, 1985; João Victor de Sousa Araujo, 2023; Şişmanoğlu, 2009).

Çizelge 1. 4: 6061 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımının Ağırlıkça Alaşım Elementi

Tür	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
7075	5,1-5,6	2,1-2,9	1,2-2	0,18-0,28	<0,3	<0,5	<0,4	<0,2	Kalan
6061	<0,25	0,8-1,2	<0,4	<0,35	<0,15	<0,7	0,4-0,8	<0,25	Kalan

1.3. Alaşım Elementleri ve Alaşım Element Etkileri

Alüminyum alaşımlarında element olarak başlıca çinko, magnezyum, silisyum ve bakır kullanılır. Alüminyum düşük ergime sıcaklığından ötürü çoğu metal ile sıvı halde kolayca karışabilir ve mekanik özellikleri büyük ölçüde iyileşir. Alüminyum yüksek sıcaklıklarda yüksek katı çözünürlüğü, oda sıcaklığında ise düşük katı çözünürlüğü gösterir. Bu sıcaklık aralarında alaşım elementleri çökelme sertleşmesi yaparak işlenebilirlik, korozyon direnci ve mekanik özelliklerini iyileştirir. Daha sonrasında ısıtıl işlemler ile mekanik özellikler dahada iyi hale getirilebilir (Charles, 2007; Cirik, 2007; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Çökelme sertleşmesinin (yaşlandırma) ısıtıl işlem kademeleri aşağıdaki gibidir (Charles, 2007; Cirik, 2007).

-Çözeltiye alma

-Su verme (Ani soğutma)

-Yaşlandırma (Doğal ve yapay yaşlandırma)

1.3.1. Çinkonun Etkisi:

Al-Zn genellikle en yüksek mukavemet dayanımına sahip alaşımlardır. Çinko ile alaşımın işlenebilirlik özelliği artmaktadır. Çinko dökülebilirliği düşüren bir alaşım elementidir. Yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gibi sıcak yırtılmalara sebep olmaktadır. Ancak bu özellik diğer alaşım elementleri bu kötü özellik ortadan kaldırılabilir. %10'dan fazla çinko içeren alaşımlar gerilmeli korozyon çatlamasına yatkınlık göstermektedir (Charles, 2007; Tekin, 1982; Cirik, 2007; Coşguner, 2001; Shang, 2017).

1.3.2. Bakırın Etkisi:

Bakır, akıcılığı artırarak döküm işini kolaylaştırır aynı zamanda çinkonunda sebep olduğu sıcak yırtılma ve çekilmesini giderir. Bakırın elastikliği ile kopma mukavemeti, elastiklik sınırı ve sertlik gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmektedir. Ancak bakır alaşımı ile korozyon direnci düşmektedir. Korozyon direncini korumak için %5'ten fazla bakır kullanılmamalıdır. Bakır ilavesi ile malzemenin yoğunluğu önemli ölçüde artmaktadır (Mondolfo, 1976; Cirik, 2007; Shang, 2017).

1.3.3. Magnezyumun Etkisi:

Magnezyum, alüminyumun korozyon özelliklerini korur. Ayrıca mukavemet, süneklik ve kaynaklanabilirliğini iyileştirir. Mekanik özelliklerini iyileştirirken malzemenin yoğunluğunu artırmaz. Magnezyum alaşımı ile malzemenin dökülebilirliği azaldığı için karmaşık parçaların üretiminde kullanılmamaktadır. Magnezyumun döküm zorluğu ise silisyum ilavesi ile çözülebilmektedir. Magnezyumun silisyum ile birlikte uygulanması alüminyum ısıtılmasında daha uygun hale getirir ve korozyon dayanımını daha da iyileştirir (Coşguner, 2001; Cirik, 2007; Shang, 2017).

1.3.4. Silisyumun Etkisi:

Alüminyum ile en çok kullanılan alaşım elementleri bakır ve silisyumdur. Silisyum döküm yöntemi ile olan üretimlerde akışkanlığı artırmakta kullanılmaktadır. Akışkanlığı artan malzemelerde sıcak yırtılma probleminin azaldığı gözlemlenmektedir. Silisyumun artışı ile akma ve çekme mukavemeti artış göstermektedir. Ancak silisyum, malzemelerin; darbe, yorulma, süneklik gibi mukavemetlerini düşürerek kırılgan bir hale getirir. Silisyum alaşımları bakır alaşımlarına kıyasla korozyona daha dayanıklıdır (Üçışık, 1978; Coşguner, 2001; Cirik, 2007; Shang, 2017).

1.4. Eloksal Kaplama

Alüminyum, düşük yoğunluğu ve çelikle karşılaştırılabilir düzeyde mekanik dayanımı sayesinde sanayi sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu özellikleri, özellikle otomotiv, havacılık ve inşaat gibi ağırlık ve dayanıklılığın kritik olduğu sektörlerde tercih edilmesini sağlamaktadır. Ancak, alüminyumun oksijene karşı yüksek afinitesi nedeniyle yüzeyinde doğal bir oksit tabakası oluşur. Bu oksit tabakası, alüminyumun korozyona karşı direncini artırmakla birlikte, endüstriyel uygulamalarda mekanik özellikler veya estetik açıdan istenen katkıyı sağlamaz. Bu nedenle, alüminyum yüzeyine uygulanan eloksal kaplama (anodik oksidasyon) gibi

yüzey iyileştirme yöntemleri, malzemenin hem koruma hem de dekoratif amaçlarla kullanımını optimize etmek için geliştirilmiştir. (Gökşahin, 2007).

Eloksal, alüminyumun yüzeyinde oksit tabakası oluşturma prosesidir. Prosesin amacı alüminyumun yüzeyinde anodik oksit tabakası oluşturmaktır. Oluşan bu yüzey mükemmel sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci sağlamaktadır. Bu işlem elektrokimyasal bir prosestir (Gökşahin, 2007; Charles, 2007; Şişmanoğlu, 2009).

1.4.1. Eloksal Kaplama Reaksiyonları

Gözenekli anodik alüminyum oksit, aşağıda belirtilen elektrokimyasal adımlarla oluşmaktadır. Elektrolit içerisinde bulunan oksijen iyonlarının, alüminyum altlık yüzeyindeki alüminyum iyonları ile reaksiyona girerek alüminyum oksit (Al_2O_3) oluşturulmasıyla gerçekleşmektedir. Anotta oksidasyon reaksiyonu gerçekleşerek alümina oluşur ve bu süreç beş adım ile gerçekleşmektedir.

- a. Güç kaynağına anot olarak bağlanan alüminyum metali, uygulanan voltajın etkisiyle Eşitlik 1.1' de gösterilen reaksiyona uygun şekilde oksidasyona uğrar ve (Al^{3+}) iyonları oluşur. Bu iyonlar elektrik alanının etkisiyle oksit tabakasına doğru taşınır:



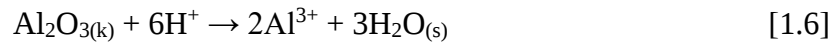
- b. Elektrolitteki su molekülleri iyonlarına ayrışarak, oksijen (O^{2-}) ve hidroksit (OH^-) iyonları açığa çıkar ve bu iyonlar oksit tabakasına doğru hareket eder:



- c. Daha sonra oksijen iyonları veya hidroksit iyonları, anotun pozitif potansiyeline doğru çekilir ve alüminyum metali ile reaksiyona girerek alüminyum oksit oluşturur. Bu reaksiyon şu denklemlerle ifade edilir:



- d. Elektrolitte ve Denklem 1.3' te sağlanan hidrojen iyonları, alüminyum oksidi çözerek alüminyum iyonları ve su molekülleri oluşturur:



- e. Hidrojen iyonları, katotun elektrik alanı tarafından çekilir ve katotta hidrojen gazı ve elektronlar oluşur:



Anodik oksidasyon reaksiyonları iki farklı süreç ile incelenebilir. Birinci kısım, anodik oksidasyon ve alüminyum altlığının elektrokimyasal çözünmesi, yani denklem [1.4] ve [1.6], ikinci kısım ise elektrik alanında yardımıyla alüminyum oksidin çözünmesi ve oluşumudur.

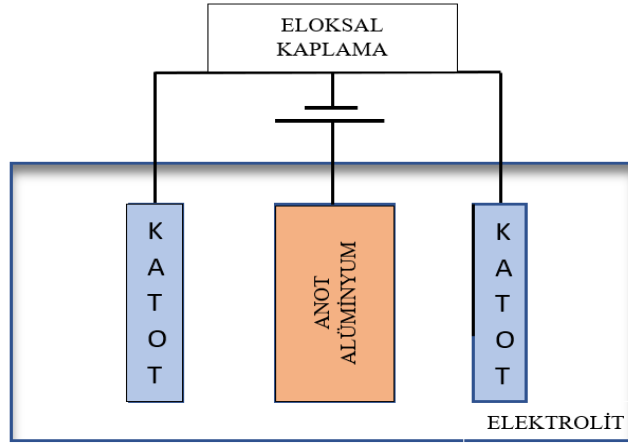
Alüminyum oksidasyon işlemi tam anlamıyla büyüdüğünde, gözenekler Şekil 1.4'te de görüldüğü gibi altıgen bir yapı oluşmaktadır. Bunun sebebi ise alümina hacminin genişlemesidir. Bu sebeple reaksiyon öncesi ve sonrası hacim genişlemesi anodik oksidasyon parametrelerinden etkilenmektedir ve bu durum ile birlikte gözeneklerde birbirini etkilemektedir. Birbirini iten kuvvetler, altıgen gözenek şablonlarının düzenli bir şekilde oluşmasına neden olur (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023).

Alüminyum anodik oksidasyon gözenek oluşumunda alüminyum, alümina oluşturduğunda hacim %30'dan fazla artar. Hacim genişlemesi sürecinde birbirleriyle oluşan etkileşimden ötürü iç gerilmeler oluşur. Oksidasyon süreci ile birlikte altıgenler düzene girerler. İç gerilmelerin yatay yönde düzenli hale gelmesinden sonra alüminyum anodik oksidasyonu dikey yönde büyür ve yüksek bir boy/en oranını oluşturur (Jessensky, Müller, & Gösele, 1998)

Poroz kaplamanın oluşumu ve büyümesi, alüminyum yüzeyini korozyona karşı koruma sağlamak açısından önemlidir. Ham metal ile karşılaştırıldığında, anodize edilmiş metallerin boya astarlarıyla daha iyi yapışma özelliği bulunur ve renk stabilitesi daha iyi korunabilir (Richard, 2018).

1.4.2. Eloksal (Anodik Oksit) Kaplama Oluşumu

Eloksal işlem banyosu Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1. 1: Eloksal kaplama işlem banyosu şematik gösterimi
(João Victor de Sousa Araujo, 2023)

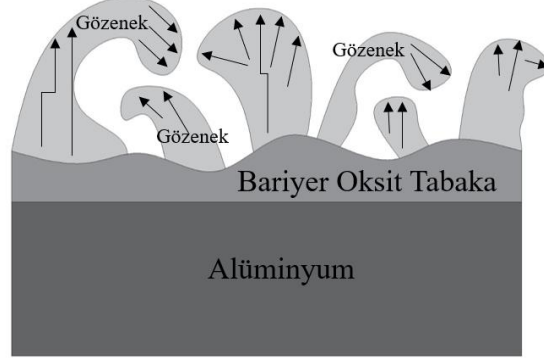
Anot ve katot reaksiyonları eloksal işlem banyosunda gerçekleşir. Banyonun içerisinde reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan asit çözeltileri bulunmaktadır. Bu çözeltilere elektrolit adı verilmektedir. Çözeltilerin amacı uygulanan akımın daha kolay iletilmesini ve daha oksitleyici bir reaksiyon oluşmasını sağlamaktır. Bu elektrolitler; sülfürik asit, kromik asit, okzalik asit, fosforik asit, tartarik asit, borik asit

ve çeşitli organik asitler içermektedir. Malzeme kalınlığı, elektrolit ve malzeme çeşidi gibi faktörlere göre belirli bir akım uygulanır. Uygulanan akım ile birlikte elektrolit içerisindeki su ayrışarak oksijen anotta toplanır. Alüminyum ile birleşen oksijen alüminyumun yüzeyinde oksit filmini oluşturur. Bu oksit film ince ve yoğun olan bariyer tabakadır. Elektrolitin içindeki iyonlar yüzeydeki oksit tabakayı parçalamaya çalışarak gözenekli bir yapı oluşturur. Bu gözenekli yapı ise dış tabakadır. Oluşan oksit tabaka saydam olduğu için malzeme görüntüsünü bozmamaktadır ve koruyucu özelliklere sahiptir. Oluşan bu gözenekli yapı renklendirilip boyanabilmektedir. Oksit tabakanın kalınlığı ve yüzey özellikleri ile görüntüsü; voltaj, elektrolit, banyo sıcaklığı, anodizasyon süresine bağlı olarak değişmektedir (Giulia Scampone, 2022; Şişmanoğlu, 2009; Gökşahin, 2007; Hans Gunther Germscheid, 1972).

Eloksal kaplamanın mükemmel korozyon direnci, aşınma direnci dekoratif özelliği, yalıtkanlık ve sertlik gibi önemli avantajları vardır (Hans Gunther Germscheid, 1972) (Şişmanoğlu, 2009) (Giulia Scampone, 2022), (Şişmanoğlu, 2009).

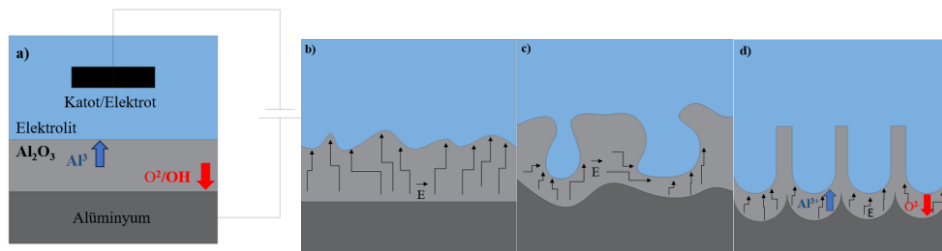
Eloksal kaplama işleminin en önemli özelliklerinden biriside alüminyum ile alüminyum oksit arasında oluşmaktadır. Proses yönü aşağıdaki gibi içten dışa doğrudur. Proses süresine dikkat edilmez ise malzemeden kayıplar olabilir (A. Ahmadi, 2006; Cheng, 2001; Tsangaraki-Kaplanoglou, 2006; Alpaya, 2009).

Bu kaplama yönteminin boyanabilir oluşu ile sanayide ve dekoratif amaçlarda da tercih sebebi olmaktadır (Charles, 2007; Şişmanoğlu, 2009).



Şekil 1.2: Gözeneklerin İçten Dışa Oluşumu (Alpaya, 2009)

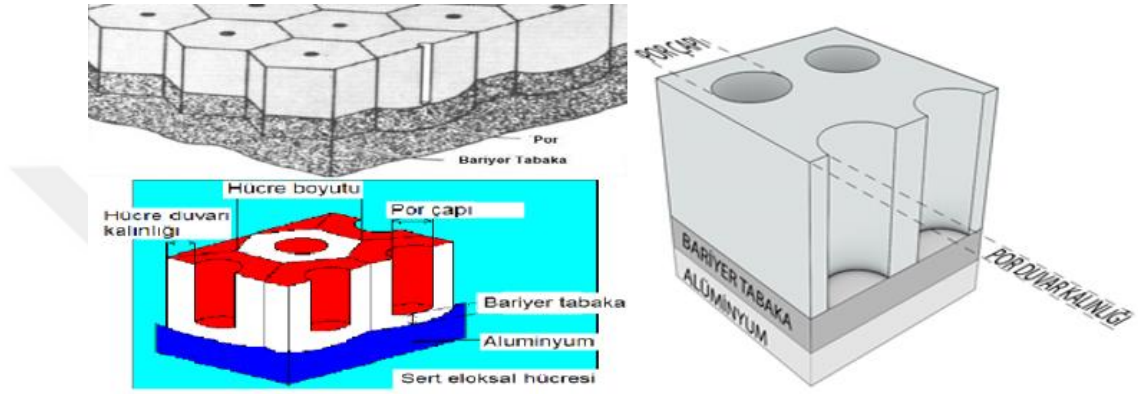
Şekil 1.2’de alüminyum anodik oksidasyon işleminde gözeneklerin gelişimi gösterilmektedir. Öncelik olarak bariyer oksit tabakası oluşur ve ardından yapıları kimyasal reaksiyonlar sonucunda ilerlemektedir. Bu kimyasal tepkime dört aşamalı olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 1.3: Gözeneklerin İçten Dışa Oluşumu 4 Aşamalı (Alpay, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023)

- a) Elektrolite temas eden alüminyum yüzeyinde koruyucu oksit tabakası oluşur
- b) Yüzey dalgalanmaları ile alan oluşumu
- c) Alan etkisiyle gözenek oluşumu
- d) Kararlı gözenek büyümesi

Şekil 1.4' te ise 2 tabakalı eloksal yapı görünmektedir. Gözenek yapısı daha önceki bilgilerde verildiği gibi elektrolit cinsi, akım gibi parametrelerle değişebilmektedir. Elektrolit anodik yapıyı çözemezse gözeneksiz, ince ve yalıtkan bir yapı oluşmaktadır (Charles A, 2001; Gökşahin, 2007; João Victor de Sousa Araujo, 2023).



Şekil 1.4: Alüminyum Üzerinde Büyüyen Bariyer Oksit ve Gözenekli Oksit Tabaka Kesit Görünümü (Runge, 2017)

Gözenekli alüminyum anodik oksidin oluşum sürecini gösteren şematik diyagram Şekil 1.5' te verilmiştir. Anodizasyon işleminde gözenek yapısının oluşumu, alan destekli çözünme (Field-Assisted Dissolution - FAD) modeline dayanmaktadır. Bu diyagramın aşamaları aşağıdaki gibidir.

Gözeneklerin çekirdeklenmesi: Bariyer tabakasında mevcut olan kusurlarda elektrik alanın yerel olarak yoğunlaşması ile gözeneklerin başlangıcı oluşur.

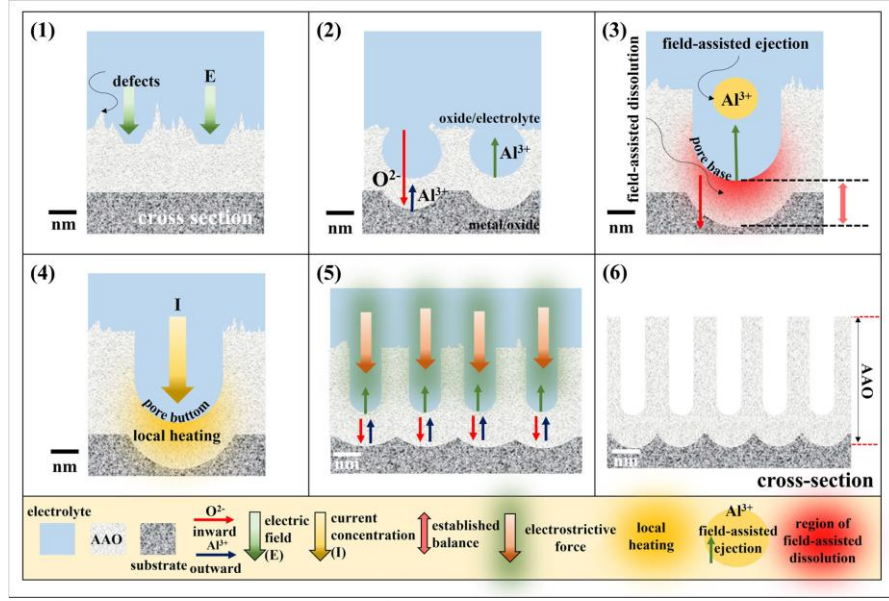
Gözenek başlatılması: O_2 moleküllerinin bariyer tabakasına girişi ve Al^{3+} iyonlarının çıkışı sayesinde gözenek oluşumu başlar.

Denge durumu: Bariyer tabakasındaki oksit büyümesi ile gözenek tabanlarındaki alan destekli çözünme arasında bir denge sağlanır.

Çözünme: Akım yoğunlaşması sonucu oluşan yerel ısınma etkileri, çözünmeyi tetikler.

Elektrostriksiyon: Elektrostriksiyon (elektrik alanının mekanik deformasyon yaratması), gözenekleri stabilize eder.

Son gözenekli anodize tabaka: Sürecin sonunda oluşan nihai gözenekli anodik tabaka ortaya çıkar. (João Victor de Sousa Araujo, 2023)



Şekil 1. 5: FAD Diyagramı (João Víctor de Sousa Araujo, 2023)

1.4.3. Sert Eloksal

Anodizasyon potansiyeli, düşük potansiyel için yumuşak anodizasyon ve yüksek potansiyel için sert anodizasyon olarak sınıflandırılabilir. Anodik alüminyum oksit sürecinde, düşük uygulama potansiyeli düzenli gözenek yapıları üretmek için uygun değildir. Buna karşılık, yüksek potansiyel, elektrik yüklerinin birikmesiyle aşırı Joule ısınmasına neden olabilir ve bu durum nanoyapının bozulmasına yol açar. Elektrolitlerin farklı ayrışma dereceleri nedeniyle uygulanan potansiyel de değişiklik göstermektedir (Alvarez, 2018).

Genel olarak:

Anodizasyon potansiyelleri:

Sülfürik asit için 20–25 V,

Oksalik asit için 30–40 V,

Fosforik asit için 160–195 V arasında değişmektedir.

Sert eloksalın normal eloksallardan farkı daha kalın ve yüksek aşınma dayanımı olmasıdır. Sert eloksal özel parametrelere tabii tutulmaktadır. Kalınlık 25 ile 250 μm arasında olmaktadır. İşlem süresi ortalama 15 ile 25 dakika arasında değişmektedir ancak istenen kaplama kalınlığı ve kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir. İşlem diğer eloksal kaplama yöntemlerine göre süre olarak daha uzun ve sıcaklık olarak daha soğuk olarak yapılmaktadır. Elektrolit olarak genelde sülfürik asit kullanılmaktadır. Yüksek asit konsantrasyonu, düşük sıcaklık ve yüksek akım yoğunluğu ile yapılmaktadır (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023).

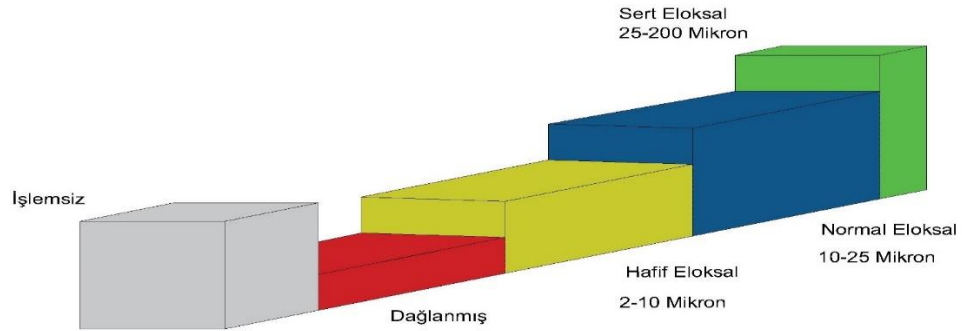
Sert eloksalın parametleri Çizelge 1.5’te verilmiştir.

Çizelge 1. 5: Sert Eloksal Parametreleri

Elektrolit konsantrasyonu	%5-15 Sülfürik Asit (Hacimce)
Akım Yoğunluğu	2-5 A/dm ² (Doğru akım)
Voltaj	20-120 Volt
Sıcaklık	-5 ile +10 °C

Aşınma dayanımı istenen durumlarda sert eloksal daha uygun olmaktadır. Döküntü gibi problemleri ortadan kaldırılması istenen durumlarda düşük anodizasyon sıcaklığı ve yüksek akım yoğunluğu önerilmektedir. Ayrıca elektrolit yoğunluğunun da düşük olması yüzeyi daha sert yapacağı için aşınma direnci yüksek olacaktır. Ancak bu kaplama türü ise termal farklılıklardan daha çok etkilenmektedir. Bu tür kaplamalar, gözeneklilik yapısı ve termal genleşme katsayısı bakımından temel alüminyum yüzeyinden farklı özellikler sergilemektedir. Bu farklılıklar, özellikle termal gerilmeler altında kaplama ve alt tabaka arasında uyumsuzluklara yol açabilmekte ve bu durum kaplamanın yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Sert eloksal kaplamalar, diğer eloksal türlerine kıyasla termal genleşme farklılıklarına karşı daha hassas olup, özellikle ani sıcaklık değişimlerinde çatlama, ayrılma veya deformasyon gibi problemlerin oluşmasına daha yatkındır. Bu nedenle, sert eloksal kaplamaların uygulanacağı durumlarda, termal çevrimler ve sıcaklık değişimlerinin göz önünde bulundurulması kritik öneme sahiptir. (Jozefowicz, 2001; Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023; Alvarez, 2018).

Sert eloksalin diğer kaplamalara olan karşılaştırma şeması Şekil 1.6' da verilmiştir. (Gökşahin, 2007).



Şekil 1. 6: Anodik Oksidasyon Türleri ve Kaplama Kalınlıkları

1.4.4. Eloksal Kaplama Öncesi Hazırlık İşlemleri

Eloksal kaplama malzemenin yüzeyinde olmaktadır. Malzemede bulunan kusurları götürmemektedir. Dolayısıyla kaplama öncesinde hazırlık işlemleri yapılması son derece önemlidir. Ön hazırlık işlemleri fiziksel ve kimyasal olarak ayrılmaktadır.

Fiziksel özellikler başlıca; taşlama, polisaj, kumlama ve çapak alma işlemlerdir. Bu işlemlerin amacı seri üretimde olan hataları minimuma indirip düzenlemektir. Fiziksel hazırlıkların sebebi üretilen parçalarda çapak, çizik, oyuk gibi yüzeysel hataları gidermek amacı ile yapılmaktadır. Yüzeyin daha homojen ve hatasız, pürüzsüz

olmasını sağlayarak oksit filminde daha homojen dağılmasını sağlamak amaçlı yapılmaktadır.

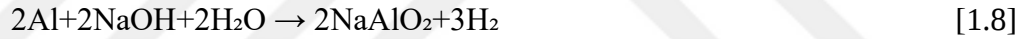
Kimyasal özellik olarak yapılan yüzey işlemleri ise temizlik, yağ alma, durulama, dağlama deoksidasyon gibi işlemleri kapsamaktadır. Yapılan fiziksel işlemlerin ardından kalan yağ, kir gibi kalıntıları almak amaçlı yapılır. Daha sonrasında kullanılan kimyasalı yüzeyden uzaklaştırma amaçlı durulama işlemi ve deoksidasyon işlemleri yapılır.

Temizleyici madde olarak su ve deterjan gibi ürünler kullanılmaktadır. Bu banyolar sıklıkla temizlenmelidir. Ortalama 55 °C sıcaklık ile yapılıp su ile durulanmaktadır.

Dağlama aşamasında ise sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmaktadır. Yaklaşık 50-60°C sıcaklıkta yapılır. Bu işlem ile yüzey matlaşır. Yüzeyde kalan oksit tabakaları uzaklaştırmak amaçlı %10'luk elektrolit banyolarında 80-90°C sıcaklıklarda yapılmaktadır. Elektrolit banyosunda yapılan işlemle yüzey tekrar parlak hale getirilir. Bu işlem esnasında malzeme yüzeyinden alüminyum çözünür ve elektrolite karışır. Çözünen alüminyum çözelti doygunluğa ulaşınca dibe çöker. Bu denge mutlaka korunmalıdır. Aksi takdirde yüzey kusurlarına sebep olmaktadır.

Dağlama işlemi reaksiyonları aşağıdaki gibidir,

(1) Dağlama Reaksiyonu:



(2) Sodyum Alüminatın Çözünmesi:



(3) Alüminyum Hidroksitin Çözünmesi:



Dağlama işleminin ardından kullanılan iki kimyasalın birbirine karışmaması için durulama banyoları bulunmaktadır. Homojen dağılıp çözülmeyen alaşım elementleri yüzeylerde lekeler oluşturmaktadır. Bu sebepten ötürü dağlama işleminin ardından alüminyum alaşımları durulanıp 50-70°C sıcaklığında 20 dakika periyotlarla nötralizasyon işlemine tabi tutulmalıdır. Bu işlem ile birlikte yüzey artık metallerden arındırılır. Nötralizasyon banyolarında ise genellikle %20-30 derişikli nitrik veya sülfürik asit gibi maddeler kullanılmaktadır (Demir, 2008; Henley, 1981; Demiral, 2015; Yavuz, 2018).

1.5. Eloksal Kaplama Ekipmanları

Anodik oksidasyon yani eloksal işlemi yapılırken belli başlı kullanılan malzemeler vardır. Bunlardan çeşitli parametlerde olanı ve bu parametrelere göre kaplamayı etkileyecek olanların çeşitleri açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir. Bunlar;

kaplama havuzu, elektrolit, katot, soğutma suyu, askı ve karıştırma aparatlarıdır (Charles, 2007; Henley, 1981; Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018).

1.5.1.1.Kaplama Havuzu

Kaplama havuzu olarak birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Havuz seçilirken dikkat edilmesi gereken en önemli konu havuz ile anotun ve elektrolitin reaksiyon oluşturmamasıdır. Günümüzde daha kullanışlı ve sorunsuz olan inert malzemelerden seçilmeye özen gösterilmiştir. Bu havuzlarda pvc ve fiberglas gibi malzemelerden oluşmaktadır. Havuz seçimlerinde kaplanacak malzemenin şekli kapasitesi gibi durumlara ayrıca dikkat edilmelidir (Charles, 2007; Henley, 1981; Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018).

1.5.2. Katot

Katot malzeme seçilirken elektrik iletkenliği alüminyumdan daha yüksek olan bir malzeme seçilmesidir. Daha iletken bir malzeme seçilmesi halinde eloksallı kaplama için gerekli olan enerji gereksinimi azalacaktır. Günümüzde alüminyum eloksallı kaplamalarında katot malzeme olarak alüminyum, kurşun, karbon veya paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Sıklıkla alüminyum tercih edilmektedir. Genelde ısı işleme uğratılmış T-5 veya T-6 tercih edilmektedir.

Katot malzemenin havuz içerisinde yer ve oranı önemlidir. Genelde anot-katot yüzey alanı oranı 3:1 seçilmektedir. Havuz içerisinde derinlik olarak ise katot parçası anottan daha yukarıda olmalıdır. Katot malzemenin derinde olması gibi durumlarda anot malzemenin alt kısımları daha kalın bir kaplamaya maruz kalacak ve istenmeyen bir kaplama veya renklendirme olacaktır. Anot-katot arası mesafeye de dikkat edilmelidir. Düzensiz yakınlıklarda da istenmeyen ve homojen olmayan kalınlıkta kaplamalar olacaktır (Charles, 2007; Henley, 1981; Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018).

1.5.3. Karıştırma Aparatı

Çözeltiye uygulanan voltaj ile birlikte çözelti ısınmaktadır. Isınmanın lokal olmaması adına çözeltinin karıştırılması gerekmektedir. Lokal olması gibi durumlarda kontrolsüz kalınlıkta kaplamalar olmaktadır ve kaplamanın mekanik özelliklerini de düşürmektedir. Kullanılan karıştırma aparatının çözelti ile tepkimeye girmeyecek malzemeden seçilmesine dikkat edilmelidir (ASM Metals Handbook 5, 1994; T. Aerts, 2007; A.I. Vorobyova, 2007; Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018).

1.5.4. Soğutma Suyu

Eloksallı kaplamaların mekanik özelliklerini başlıca etkileyen faktörlerden birisi de çözeltinin sıcaklığıdır. Elektrolit-çözeltinin sıcaklığını stabil tutmak kaplama kalitesi ve homojenliği açısından çok önemlidir. Uygulanan voltaj ile elektrolit sıcaklığı, elektrolit sıcaklığından dolayı da akım yoğunluğu artar. Akım yoğunluğunun artması oksit tabakada çözünmeler meydana getirir ve mekanik özellikleri de kötü etkiler. Yüksek elektrolit sıcaklığı ile oksit tabakanın gözenekleri kontrolsüz, çok büyür ve bu durum yüzey sertliğinin azalmasına aşınma direncinin düşmesine sebep olmaktadır.

Tüm bu sebeplerden ötürü havuzun dış yüzeyinde soğutma suyu çevrilmiştir (Charles, 2007; ASM Metals Handbook 5, 1994; Şişmanoğlu, 2009).

1.5.5. Askılar

Askı malzemesi olarak genellikle bakır içermeyen alüminyum, titanyum tercih edilmektedir. Askı olarak alüminyum malzeme seçilecekse eloksal kaplanacak alüminyum ile aynı alaşım içermesine dikkat edilmelidir. Askıların çözeltiye temas etmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde askılarda kaplanacak ve anot malzemenin eloksal kaplama şartlarını sağlamak güçleşecektir. Titanyum malzemenin avantajı çözelti ile temasında herhangi bir problem olmamaktadır. Ancak titanyumun pahalı bir malzeme olmasından dolayı sanayide kullanımı yaygın olmamaktadır. Sert eloksal kaplamalarında titanyum malzemeler kullanıma uygun değildir sebebi ise titanyum düşük sıcaklık ve yüksek akımlarda düşük iletkenliğe sahip olmaktadır. Bu durumda ise bağlı olduğu alüminyum malzemeyi yakmaktadır (Charles, 2007; ASM Metals Handbook 5, 1994; Şişmanoğlu, 2009).

1.5.6. Elektrolit

Eloksal kaplama için günümüzde birçok farklı elektrolit kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarını anodize etmek için farklı elektrolitler kullanılabilir. Bazıları yalnızca bariyer tabakası oluşumunu teşvik ederken, diğerleri hem bariyer hem de gözenekli tabakayı içeren bir sistem oluşturur. Kullanılan elektrolitlerin çeşitleri malzemeye uygunluğu, maliyeti, istenen yüzey özelliklerine göre belirlenmektedir. Gözenekli elektrolitler arasında sülfürik asit öne çıkar ve kromik asit anodizasyonunun yerini almak amacıyla tartarik ve adipik gibi bazı organik asitlerle kombinasyon halinde kullanılır. Günümüzde kullanılan belli başlı elektrolitler; sülfürik asit, oksalik asit, sülfürik-oksalik asit, kromik asit, fosforik asit, borik asit, tartarik asit ve organik asitler bulunmaktadır. Kullanım özelliklerine göre asitler incelenmiştir. Çizelge 1.6'da kısaca parametreler verilmiştir (Charles, 2007; ASM Metals Handbook 5, 1994; Şişmanoğlu, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Elektrolitin sıcaklığının, alüminyum anodik oksidasyon işleminin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Elektrolit sıcaklığındaki artış, anodize filmdeki çözünme ile doğru orantılıdır, bu da daha ince, gözenekli ve yumuşak filmlerin oluşmasına yol açar. Daha düşük sıcaklıklar, genellikle yüksek akım yoğunlukları ve güçlü karıştırma ile birlikte kullanıldığında, daha sert kaplamalar üretmek için tercih edilir. Dekoratif ve koruyucu anodizasyon işlemlerinde genellikle 15–40°C arasındaki sıcaklıklar kullanılır. Sıcaklık artırıldığında, oksidin elektrolitte daha fazla çözünmesi nedeniyle maksimum kalınlık azalır. Alüminyumun anodik oksidasyon tabakasının kalınlığının, kullanılan elektrolit türüne bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Bu sıralama; kromik asit > fosforik asit > oksalik asit > sülfürik asit olarak belirlenmiştir. Daha az yoğun asitler, daha yoğun asitlere kıyasla daha sert, daha kalın, daha az gözenekli ve aşınmaya karşı daha dirençli oksit kaplamalar üretme eğilimindedir (João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Çizelge 1. 6: Eloksal Kaplama İşleminin Asitlere Göre Parametreleri (Giulia Scampone, 2022; Proenca M.P., 2008)

Elektrolit Türü	Konsantrasyon (g/l)	Sıcaklık (°C)	Voltaj (V)	Tabaka Kalınlığı (µm)
Sülfürik Asit	150-200	18-20	12-22	5-100
Sülfürik/Okzalik Asit	13-14	10-20	12-25	5-35
Kromik Asit	30-100	25-55	30-70	2-8
Fosforik Asit	120-250	20-30	30-120	1-30
Borik Asit	2-50	70-100	50-5000	Max. 0,5
Tartarik Asit	20-2	70-4	120-150	Max. 0,16

Sülfürik Asit

En genel kullanılan elektrolit olan sülfürik asitin başlıca özellikleri; %15-20 konsantrasyonda, 18-20 °C sıcaklıkta, 10-24 voltaj değerleri arasında uygulanmaktadır. Kaplama kalınlığı uygulanan süreler göre 5-100 µm arasında oluşmaktadır. Renk olarak sarı, gri renkler almaktadır. Üstün yapışma özellikleri ile renklendirme işlemlerine kolaylık sağlamaktadır. Kusursuz korozyon dayanım karşılığı vermektedir (ASM Metals Handbook 5, 1994; Giulia Scampone, 2022; Johnsen B.B., 2004; Luksepp T., 2009; Proenca M.P., 2008; Saenz de Miera M., 2008; Şişmanoğlu, 2009; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Çizelge 1. 7: Sülfürik Asit Parametreleri (Giulia Scampone, 2022)

H ₂ SO ₄ (g/l)	Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	Gerilim (V)	Sıcaklık (°C)	Süre (Dk)	Kaplama Kalınlığı (µm)	Katot
150-225	1-2	10-22	15-24	Max. 3	8-15	Al

Okzalik Asit

Sülfürik asite göre daha sert ve aşınma direncine sahip yüzeyler için kullanılmaktadır. Alternatif akım veya doğru akım yöntemi ile yapılabilir. Ancak sülfürik asit yöntemine göre daha pahalıdır. Uygulama özellikleri olarak; %3 konsantrasyonda, 24-35 °C sıcaklıkta, 30-40 dakika sürelerinde uygulanmaktadır. Renk olarak sarı bir kaplama oluşmaktadır (Anodizing O. A., 2000; Şişmanoğlu, 2009; Lapique F., 2003; João Victor de Sousa Araujo, 2023).

Sülfürik-Okzalik Asit

Yüksek akım yoğunluğunun kullanıldığı durumlarda kullanılan bu elektrolit ile çok yoğun ve sert bir yüzey elde edilmektedir. Tabaka kalınlığı olarak 5-35 µm oluşmaktadır. Uygulama özellikleri ise %16-18 konsantrasyonunda, 10-20 °C sıcaklığında, 12-35 voltaj aralığında uygulanmaktadır (Şişmanoğlu, 2009; Lapique F., 2003).

Kromik Asit

Kromik asit elektrolit çeşidi korozyonun direncinin yüksek olması istenilen durumlarda kullanılmaktadır. Genelde krom kaplamaların tuzun oluşturduğu

korozyondan ötürü denizcilik sektöründe kullanılmaktadır. Oluşan kaplama 2-8 µm değerlerinde ve incedir. Kromik asit, sülfürik asite kıyasla daha düşük aşınma direncine sahiptir. Uygulama özellikleri ise %3-10 konsantrasyonunda, 25-55 °C sıcaklığında, 30-70 voltaj aralığında 30-45 dakika arasında uygulanmaktadır (ASM Metals Handbook 5, 1994; Şişmanoğlu, 2009; Lapique F., 2003).

Fosforik Asit

Fosforik asitin kullanım alanı kısıtlıdır. Çünkü oluşturduğu gözeneklerin çapı büyük oluşmaktadır. Bu durum aşınma direnci ve yüzey sertliğini düşürürken boyanabilme özelliğini olumlu etkilemektedir. Fosforik asitlerde yüzeyde mükemmel yapışma özellikleri de yüksektir. Ancak korozyon direnci düşüktür. Ayrıca sülfürik asit yöntemine göre 5 kat daha pahalıdır. Oluşan tabaka kalınlığı 1-30 µm olmaktadır. Uygulama özellikleri ise %12-25 konsantrasyonunda, 20-30 °C sıcaklığında, 30-120 voltaj aralığında 15-30 dakika uygulanmaktadır. Yüksek voltaj gözlemlenmektedir (Şişmanoğlu, 2009; Anodizing P. A., 2000; Arrowsmith D.J., 1986; ASM Metals Handbook 5, 1994; Giulia Scampone, 2022; Johnsen B.B., 2004; Proenca M.P., 2008).

Borik Asit

Borik asit ile yapılan eloksal kaplamaların kalınlıkları maximum 0,5 µm bir değere sahiptir. Oluşan kaplama ince ve düz-gözeneksiz bir yapıya sahiptir. Bu durum ise boyanabilirliği zorlaştırmaktadır. Yapılan kaplama bariyer oksit tabaka olarak kullanılmaktadır. Uygulama özellikleri incelendiğinde borik asitin konsantrasyonu %4-5 gibi düşük bir değere sahip olmasına rağmen 70-100 °C sıcaklığa ve 50-5000 voltaj gibi yüksek değerlere sahiptir (Giulia Scampone, 2022; Doğru, 2008; Şişmanoğlu, 2009; Lapique F., 2003).

Tartarik Asit

Tartarik asitte borik asit gibi düşük yüzey kalınlığı, düşük konsantrasyon ve yüksek voltaj, yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. Uygulama özelliklerinde %2-4 konsantrasyon, 70-4 °C sıcaklık, 120-150 voltaj aralıklarında maksimum 0,16 µm kalınları elde edilebilmektedir (Şişmanoğlu, 2009; Giulia Scampone, 2022; Lapique F., 2003; Sulka G.D., 2002).

Organik Asit

Organik asitlerin diğer kaplamalara göre farkı ikinci defa renklendirmeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Çünkü oluşan tabaka siyah, sarı ve bronz gibi renkler elde edilebilmektedir. Organik asitler daha kolay işlem, araç-gereç ve düşük enerji maliyetlerinden ötürü geniş renk skalasında düşünülünce kullanım alanı oldukça geniştir. Organik asitlerle yapılan kaplama çok sert ve yoğun oluşmaktadır. Uygulama özellikleri ise 90-100 g/l konsantrasyonlarında 18-20 °C ve 75 voltaj değerlerinde yapılmaktadır (Şişmanoğlu, 2009; Giulia Scampone, 2022; Lapique F., 2003; Sulka G.D., 2002).

Çizelge 1. 8: Elektrolitlere Göre Eloksal Kaplamanın Avantaj-Dezavantajlar

Elektrolit	Enerji Tüketimi	Sıcaklık	Kaplama Türü	Poroz	Boyanabilirlik	Maliyet
Sülfürik	Orta	Düşük	Orta	Orta	İyi	Orta
Okzalik	Orta	Düşük	Sert	Az	Orta	Pahalı
Kromik	Düşük	Orta	Sert	Az	Orta	Pahalı
Fosforik	Yüksek	Düşük	Yumuşak	Çok	Çok İyi	Çok Pahalı
Borik	Çok Yüksek	Yüksek	Çok Sert	Çok Az	Kötü	Orta
Tartarik	Yüksek	Yüksek	Çok Sert	Çok Az	Kötü	Orta
Organik	Orta	Düşük	Orta	Orta	Orta	Düşük

1.5.7. Geometrik Tasarım

Anodik oksidasyon işlemlerinde askı tasarımı kadar ürünün geometrik şekli de önemlidir. Numunenin şekli ve boyutuna göre birkaç farklı noktadan akım gönderilmesi gerekmektedir. Akımın verildiği noktalar karşılıklı olmamalı ve eşit mesafeli olmak zorundadır.

Anodik kaplamaların başarısı ürünün geometrik şekline de bağlıdır. Anodik oksidasyon işlemi yüzeyden oluşarak başladığı için keskin köşelerde boşluklar geliştirir. Bu köşelerin ve dişli yüzeylerin yeterince anodize edilmesi çok zordur. Genel olarak yapılması tavsiye edilmez. Dişli yüzeyler anodize edilmeden önce yuvarlatma işlemi gerektirir. Anodik oksidasyon işlemi yapılacaksa keskin köşe ve kenarların Çizelge 1.9 değerlerince kaplanması gerekmektedir. Bu tabloda kaplama kalınlıkları ve keskin köşelerin eğrilik yarı çapları hakkında bilgi vermektedir (ASM Metals Handbook 5, 1994; Defense, 15-09-2003; Charles, 2007).

Çizelge 1. 9: Keskin Köşelere Göre Eğrilik Yarıçapı (Defense, 15-09-2003)

Beklenen Kaplama Kalınlık Değeri (inch)	İç Köşeler Eğrilik Yarıçapı (inch)
0.001	1/32
0.002	1/16
0.003	3/32
0.004	1/8

1.5.8. Mühürleme İşlemi

Mühürleme işlemi anodizasyon işleminin son aşaması olarak boya işleminden de sonra yapılmaktadır. Anodizasyon işlemi için mühürleme işlemi 95 °C’ de, saf su havuzlarına daldırılarak yapılmaktadır. Mühürleme işleminden önce anodik oksit tabaka iki katmandan oluşmaktadır.

Daha kalın ve gözenekli olan dış tabaka mikrometre ölçeğinde (μm) oluşmaktadır ve tüp şeklinde gözenekler içermektedir. Bu tüplerin yüzeyle neredeyse dik açısı yaptığı görülmüştür. Dış tabakanın altında ise daha ince ve kompakt iç tabaka (bariyer tabaka),

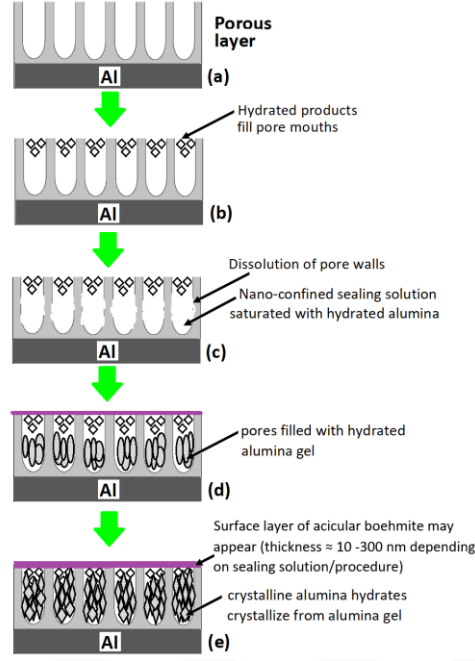
nanometre ölçeğinde (nm) oluşmaktadır. Bu iç tabaka alüminyum alt tabakasına bitişiktir ve gözenekli dış tabakayı desteklemektedir.

Gözeneklerin Yapısı: Gözenek çapı genellikle yaklaşık 100 nm aralığında olduğu incelenmiştir, ancak bu değer anodizasyon koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Bileşim: Gözenekli tabaka, çoğunlukla amorf alumina (Al_2O_3) içerir. Ancak, yüzeyin açık gözenekli yapısı, çevresel faktörlere maruz kalmaya ve mühürleme işlemleri sırasında doldurulmaya uygundur.

Mühürleme işleminin etkilerini anlamak ve mühürleme sırasında gerçekleşen yapısal değişiklikler aşağıda belirtilmiştir (Stanley Udochukwu Ofoegbu, 2020; Shang, 2017).

- a) Mühürleme öncesi anodize alüminyumun gözenekleri açık durumdadır ve oksit tabakası düzenli gözenekli bir yapı sergilemektedir. Gözenek tabanında ince bir bariyer tabakası bulunmaktadır.
- b) Mühürleme işlemi sırasında, gözenek ağzlarında hidratlanmış alümina ürünleri birikmeye başlar. Bu, gözeneklerin kısmen kapanmasına neden olur ve korozyon maddelerinin girişini sınırlar.
- c) Yüksek sıcaklıklı mühürleme sırasında gözenek duvarları kısmen çözünür. Bu çözünme, gözenek yapısının düzenlenmesine ve pürüzsüzleşmesine katkıda bulunur.
- d) Gözenekler içinde hidratlanmış alümina jel birikir. Yüzeyde iğnemsî (acicular) boehmit tabakası oluşmaya başlar. Bu, yüzeyi daha kompakt hale getirir ve gözenekleri kapatır.
- e) Süreç ilerledikçe, hidratlanmış alümina jel kristalleşir ve daha stabil bir alümina yapısı oluşturur. Bu, anodize tabakanın dayanıklılığını ve korozyona karşı direncini artırır. Aynı zamanda boyanın daha iyi tutunmasını da sağlamaktadır.



Şekil 1. 7: Mühürleme İşleminde Gerçekleşen Yapısal Değişiklikler (Stanley Udochukwu Ofoegbu, 2020; Shang, 2017)

1.6. MIL-STD-810 Test Yöntemleri

MIL-STD-810 (Military Standards) bir savunma standardı olarak tasarlanmıştır. Bu standart malzemelerin çevre değerine ve dayanıklılığına güvenmek için tasarlanmıştır. Çevre mühendisliği ve ABD Savunma Bakanlığının ABD Ordusu, hava ve deniz kuvvetlerinin yanı sıra Çevre Bilimleri ve Teknoloji Enstitüsü'nün (IEST) katkılarıyla tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Dünyada, Türkiye Savunma Sanayi dahil birçok ülke bu standarda bağlı çalışmalarını sürdürmektedir (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008).

MIL-STD-810 ilk kez 1961 yılında yayınlanmıştır. Test yöntemleri, açıklamalar ve farklı test şiddet, süreleriyle bir dizi versiyona tabi tutulmaktadır. Military Standart 810 birçok test içermektedir. Bu testlerin amacı bir materyalin dış dünyada davranışını, malzeme özelliklerini koruma süresini gibi bilgileri vermekte ve test etmektir. Bu testlerin amaç ve vermiş olduğu bilgilerden bazıları aşağıdaki gibidir (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008).

- Çevresel stres dizilerini, sürelerini ve kullanım ömür seviyelerini belirlemek.
- Malzemeye ve çevresel etkenlere uygun malzeme analizi yapmak.
- Çevresel streslere maruz kalan malzemenin performansını görmek.
- Malzeme tasarımı, malzeme çeşidini, üretim süreçlerini, paketleme tekniklerini, bakım yöntemlerindeki eksiklik ve kusurları tanımlayıp gidermek.

Savunma sanayimizinde kullanmış olduğu standartlara bağlı testler, son kullanıcının taleplerine göre uygulanmaktadır. Her malzemeye aynı test uygulanmamaktadır. Uygulanan testlerden bazıları; suni atış, yağmur, titreşim, toz, nem, yüksek sıcaklık,

termal şok, tuz, rakım ve yükseklik gibi çevresel koşulları kapsayan testlerdir (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008; Defense, 15-09-2003).

Savunma sanayinde kullanılan alüminyum alaşımlarında uygulanan anodik oksidasyon kaplamalarında, kaplama kalkması, döküntü problemleri sıklıkla görülmektedir. Bu problemler genellikle termal şok, nem, atış gibi testlerde görülmektedir

1.6.1. Termal Şok Testi

Termal şok testi numunelerin belirli bir sıcaklıkta başlayarak -40°C derece ile 70°C derece arasında belirli saatlerde tutulması esasına dayanır. Bu testin amacı malzemenin bozulma miktarı ve ortam koşullarına uygunluğunu vermesidir (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008; Defense, 15-09-2003).

1.6.2. Nem Testi

Alüminyum alaşımlarının oksijene olan ilgisinden ötürü kaplama kalkmaları en çok nem testlerinde görülmektedir. Nem testi belirli bir nem oranında, farklı sıcaklık ve sürelerde kaplanmış numunelerin tutulması esasına dayanmaktadır (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008; Defense, 15-09-2003).

1.6.3. Atış Testi

Atış testi; savunma sanayinde kullanılan ekipmanların, kullanıldığı teçhizattaki atışı esnasında oluşan güç ve sarsıntının suni bir şekilde oluşturulmasına dayanır. Her teçhizat için farklı bir tepme gücü vardır (Mil-Std 810H, 2019; Services, 2023; Mil-Std 810G, 2008; Defense, 15-09-2003).

- İvme genlik değeri, tüm frekans aralığında 1 birim ise 1g değerine sahiptir (Kuntay, 2010).

Literatür Araştırması

Alüminyum alaşımlarını, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanım özellikleri nedeniyle mimari, otomotiv endüstrisi, elektronik endüstrisi, hidrolik, medikal ve yarı iletken ekipmanları gibi birçok uygulamada kullanımını görmek mümkündür. Saf alüminyum, yüksek ve düşük pH ortamları dışında, genelde oldukça yüksek bir korozyon direncine sahiptir ve çoğu metale göre daha az koruma gerektirir (Yavuz, 2018). Ancak, alüminyum matrisini güçlendirmek için kullanılan alaşım elementleri, mikroyapıda ikinci fazlar oluşturarak matrisle önemli ölçüde farklı elektrokimyasal potansiyellere sahip olabilir (Runge, 2017). Bu durum, mikro-galvanik çiftlerin oluşmasına yol açabilir ve korozyon dayanımını arttırmak için yüzey modifikasyonu gerektirebilmektedir (ASM Metals Handbook 2, 1985; Cirik, 2007; Charles, 2007; Şişmanoğlu, 2009; A. Ahmadi, 2006; Tsangaraki-Kaplanoglou, 2006). Bu modifikasyon yöntemlerinden en bilineni, alüminyum üzerinde "alumina" olarak bilinen koruyucu gözeneksiz oksit yapı bir tabakanın oluşturulduğu elektrolitik bir işlem olan anodizasyon işlemi yöntemidir. (Alpay, 2009; Charles A, 2001; Gökşahin, 2007).

Alüminyum alaşımlarının yüzey modifikasyonuna ait anodizasyon yöntemi ile ilgili önceki çalışmalarda; ön işlem (Alpay, 2009), yorulma (Cirik, 2007), aşınma (Gökşahin, 2007), korozyon (Yavuz, 2018) ve yüzey özellikleri (Şişmanoğlu, 2009) gibi çalışmalar yapılmıştır. Yapılan literatür taramalarında alüminyumun kübik yapılarına (Runge, 2017), işlem aşamaları incelemelerine (Stanley Udochukwu Ofoegbu, 2020; João Victor de Sousa Araujo, 2023) rastlanmıştır. Kaplama işlemi sırasında farklı asit içeren elektrolitler ile çalışılmıştır (Sang Yoon Park, 1995–2008) ancak elektrolitlerin maliyet, endüstriye uygunluk, toksik maddeler içermesi gibi durumlar söz konusu olmuştur. Çalışmamıza benzer olarak yayınlanmış bildiride (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023) "Nanogözenekli Anodik Alüminyum Oksit Üretimindeki Gelişmeler ve Sensör Uygulamaları" çalışılmıştır. Ancak yapılan çalışmada anodik oksidasyon işlemi iki aşamalı olarak yapılmış ve farklı elektrolitler denenmiştir, kullanılan elektrolitin maliyeti ve prosesin iki aşamalı olduğu bilinerek sanayi uygulamalarına uygun olmadığı düşünülmüştür. Aynı zamanda yapılan çalışmada (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023) optimum verilere ulaşılamamış, elektrolit türlerine göre uygulanan potansiyeller tartışılmıştır.

Savunma sanayinde kullanılan 7075 alüminyum alaşımının yüzeyine anodizasyon (eloksal kaplama) işlemi uygulaması çalışılmış ancak optimum değer bilgisi elde edilememiştir. Aynı zamanda yapılan çalışmalar savunma sanayinin kullanmış olduğu standartlarca denenmemiş ve boya uygulamasına geçilmemiştir (Cirik, 2007).

Tüm bu bilgiler ışığında, bu çalışmada, alüminyum alaşımlarından savunma sanayinde sıkça rastlanan 7075 tip alüminyum alaşımlarına, anodizasyon çalışmaları yapılmış, optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada, anodizasyon koşullarının kaplama özelliklerine etkisini anlamak amacıyla uygulanan akım yoğunluğu, anodizasyon süresi ve elektrolit asit konsantrasyonunun etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca anodizasyon yöntemine ait çalışmalarda, bir sonraki adım olan boyama işlemine rastlanmamıştır, boyanın tutunabilirliği denenmemiştir. Çalışmamızda ise kaplanan numuneler, boyandıktan sonra saf su kullanılarak 95°C’de mühürleme işlemine tabi tutulmuştur. Anodizasyon işlemi sonrasında elde edilen kaplamaların zorlu çevresel koşullara dayanıklılığı MIL-STD-810 standardına uygun testlerle analiz edilmiştir (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019). Ayrıca, kaplamaların mikroyapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Boyanabilirlik ve boyanın yüzeye yapışma performansları açısından da kaplamaların değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, optimum anodizasyon koşulları belirlenerek, savunma sanayinde kritik öneme sahip alüminyum alaşımlarının yüzey kaplama kalitesi artırılmış, MIL-STD-810 standardına uygun kaplamalar üretilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada anodik oksidasyon işlemi uygulanmış alüminyum 6061 ve alüminyum 7075 alaşımlarının farklı akım yoğunlukları, işlem süresi, asit konsantrasyonu ve katot türlerinin; kaplama kalınlığı ve döküntüye olan etkisi, petek görünümlü gözenek yapısının döküntüye olan etkisi ve döküntünün yok edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca mikroyapının boyanabilirlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Anodik oksidasyon işlemi
2. Mil-Std Test Yöntemleri
3. Sonuçlar ve Çıkarımlar

2.1. Anodik Oksidasyon İşlemi

Anodik oksidasyon işlemi Şekil 2.1’ de görülen KVK DC Power Supply cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz 30V-5A değerlerine kadar doğru akım sağlayabilmektedir. Anodik oksidasyon işlemi için kullanılan parametreler akım yoğunluğu, işlem süresi, katot türü ve asit konsantrasyonudur.



Şekil 2. 1: Güç Kaynağı

Numunelerin başlangıç boyutlarının eni 4 cm yükseklik 5 cm ve kalınlık olarak 1 cm olan plakalar belirlenmiştir. Katot malzeme olarak önce alüminyum plakalar ile denemeler yapılmıştır. Katot anot yüzey alanlarının oranı bir olarak seçilerek deneyler yapılmıştır. Ancak kurşunun yüksek enerji üretimi yani potansiyel farkından ve düşük maliyetinden ötürü kurşun katotlarda denenmiştir. Bu sayede kurşun plakada daha düşük yüzey alanına ihtiyaç duyulmuş ve daha avantajlı olduğu düşünülmüştür. Anodik oksidasyon işlem havuzunda anot katot arası mesafe 20 cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca anot ve katot malzemelerin aynı derinliklerde olmasına özen gösterilmiştir.

Anodik oksidasyon işlemi öncesinde numunelere yağ alma işlemi uygulanmıştır. İşlem, numunelere 600-1000 mesh zımpara kağıdı ile zımparalanarak uygulanmıştır.

Anodik oksidasyon işlem öncesi hazırlık işlemlerinden olan dağlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem “Carlo Erba” marka, %97 saflıkta sodyum hidrooksitler ile minimum 45°C olmak kaydı ile 45-50°C arasında 1.25 M çözeltide 5 dakika bekletilerek uygulanmıştır. Daha sonra numuneler saf su ile durulanmıştır.



Şekil 2. 2: Dağlanmış Numune

Dağlama işleminden sonra numuneler 0.5 M nitrik asit-saf su çözeltisinde oda sıcaklığında 5 dakika bekletilerek dağlanmış yüzey temizlenmiştir. Numuneler bu işlemden sonrada saf su ile durulanarak eloksal banyosuna farklı kimyasalların girmesi engellenmiştir.



Şekil 2. 3: Dağlama İşleminde Sonra Kimyasal Temizlenmiş Numune

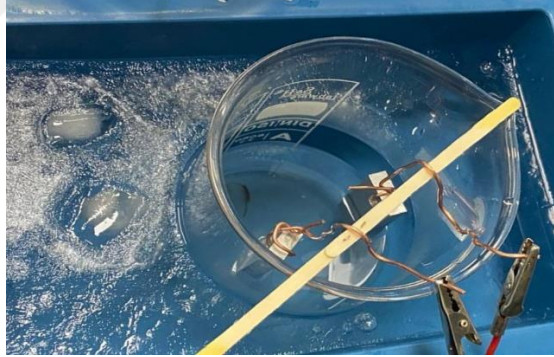
Anodik oksidasyon işlemlerinde askı aparatı olarak titanyum ve bakır teller kullanılmıştır. Tellerin oksitlenmemesi ve elektroliti kirletmemesine özen gösterilmiştir. Eloksoal havuzunun içerisi 100-125-150-175 ve 200 g/L sülfürik asit-saf su çözeltiyle çalışılmıştır. Çalışmada, Sigma-Aldrich markasına ait %95-97 saflıkta sülfürik asit kullanılmıştır.



Şekil 2. 4: Kurşun Katotlu Eloksal Havuzu

Anodik oksidasyon işlemi serbest voltaj ile; 2-3 ve 4 A/dm² arasında 10-15-20 dakika olarak yapılmıştır. Havuz sıcaklığı oda sıcaklığında takip edilmiştir. Elektroliz kompozisyonu ise 100-125-150-175 ve 200 g/ml olarak takip edilmiştir.

Alüminyum katot kullanılan durumlarda istenilen voltaj ve akım değerlerinde kalabilmek için buz havuzları yapılmış ve soğutma olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. 5: Soğutma Havuzu (Alüminyum Katot)

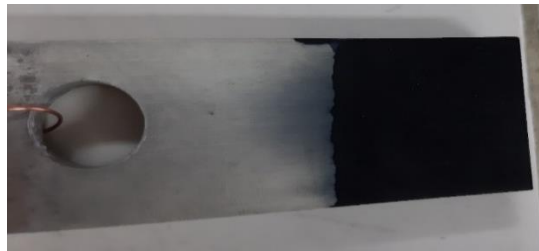
Anodik oksidasyon işlem sonrasında numunelerin yüzeyleri kimyasaldan arındırmak amacı ile yıkamalara tabi tutulmuştur. Yıkamalar oda sıcaklığında yapılmıştır. Ardından numuneler oda sıcaklığında, temiz bir alanda kurumaya bırakılmıştır.

Tüm numuneler boyanmadan önce kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. PHYNIX Kaplama kalınlık ölçme cihazı prob yardımı ile kaplanmış yüzeye temas ettirilerek uygulanmıştır.

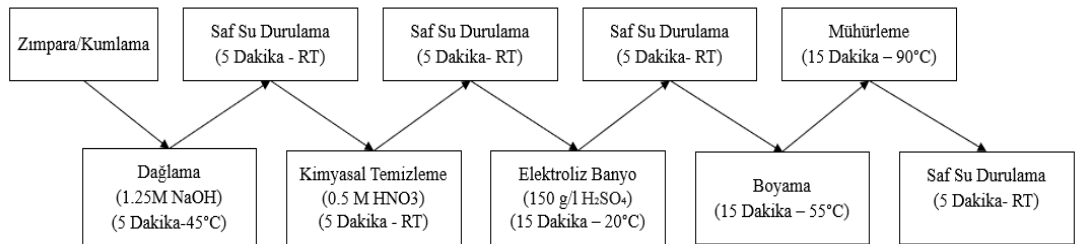


Şekil 2. 6: Kaplama Kalınlık Ölçme Cihazı

Eloksal boya işlemi uygulanmadan önce eloksal kuru boya 50 gr/l saf su çözeltisinde hazırlanmıştır. Eloksal boya, 55°C sıcaklıkta ve pH 4,5 değerinde tam çözünme sağlamaktadır. Karıştırıcı yardımı ile boya 55°C' e çıkartılmış ve numuneler içine daldırma yöntemi ile boyanmıştır. Numuneler minimum 5 dakika boya havuzunda bekletilmiştir. Boyanın tam nüfuziyet sağlamasının ardından tespitleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde boyanmış numuneler, 90 °C'lik saf su havuzlarına daldırılarak uygulanmıştır. Tespit işleminin amacı hem boyanın tam yapışmasını sağlamak hem de yüzeye tutunmayan boyanın dökmesini sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Aynı zamanda tespit işlemi boya kusmalarını engellemek amacıyla yapılmıştır (Stanley Udochukwu Ofoegbu, 2020). Tespit işleminin ardından numuneler termal şoka uğratmak amacıyla oda sıcaklığındaki saf su havuzlarına daldırılmıştır.



Şekil 2. 7: Boyanmış Numune



Şekil 2. 8: Akış Şeması

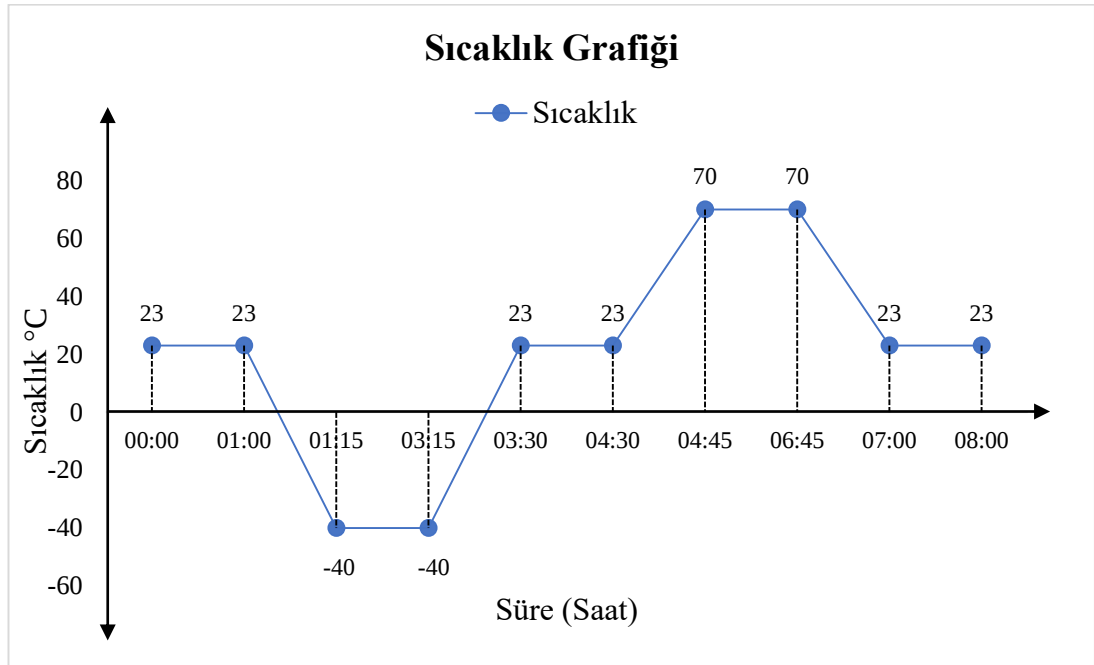
Anodik oksidasyon işlemlerinde, savunma sanayi standartlarına göre kaplama kalınlıkları genellikle 10-25 µm aralığında talep edilmektedir. Kaplama kalınlığının 10 µm'nin altında olması durumunda gözenek tüplerinin oluşumu zorlaşmakta (Richard, 2018), 25 µm'nin üzerinde olması durumunda ise kaplamanın mekanik dayanım özelliklerinde azalma meydana gelmekte ve karşılıklı çalışan parçalarda alüminyum oksit tabakasının aşınarak dökülme riski oluşmaktadır (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019). Kaplama kalınlıklarının, üst sınırların üzerinde büyümesi durumunda, boya nüfuzunun aşırı artması ve boya partikülleri arasında mekanik-kimyasal bağların zayıflaması öngörülmektedir. Bu durum, boya döküntülerine yol açabileceği düşünülmektedir. Savunma sanayi standartlarında gözenek çap sınırlaması kullanılan alana göre 30 µm ile belirlenmiştir (Defense, 15-09-2003). Çalışmamız savunma sanayi, elektro-optik alanında, seri üretim esnasında yapılan fire miktarları düşünülerek, elektro-optik alanına ait standartlar gözetilmiştir (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019). Olası boya döküntüleri, savunma sanayiinde kullanılan dürbün gibi ürünlerin merceklelerinin önüne gelmesiyle görüntüye çok büyük parçalar gibi girmektedir.

2.2.Mil-Std Test Yöntemleri

2.2.1. Termal Şok Testi

Prosesimizde ACS Discovery iklimlendirme kabiniinde, 23°C sıcaklıkta başlanarak, -40°C sıcaklık arasında 2 saat, 23°C sıcaklıkta 1 saat, 70°C sıcaklıkta 2 saat ve 23°C sıcaklıkta 1 saat olacak şekilde testlere tabii tutulmuştur.

Uygulanan olan sıcaklık grafiği aşağıdaki gibidir.

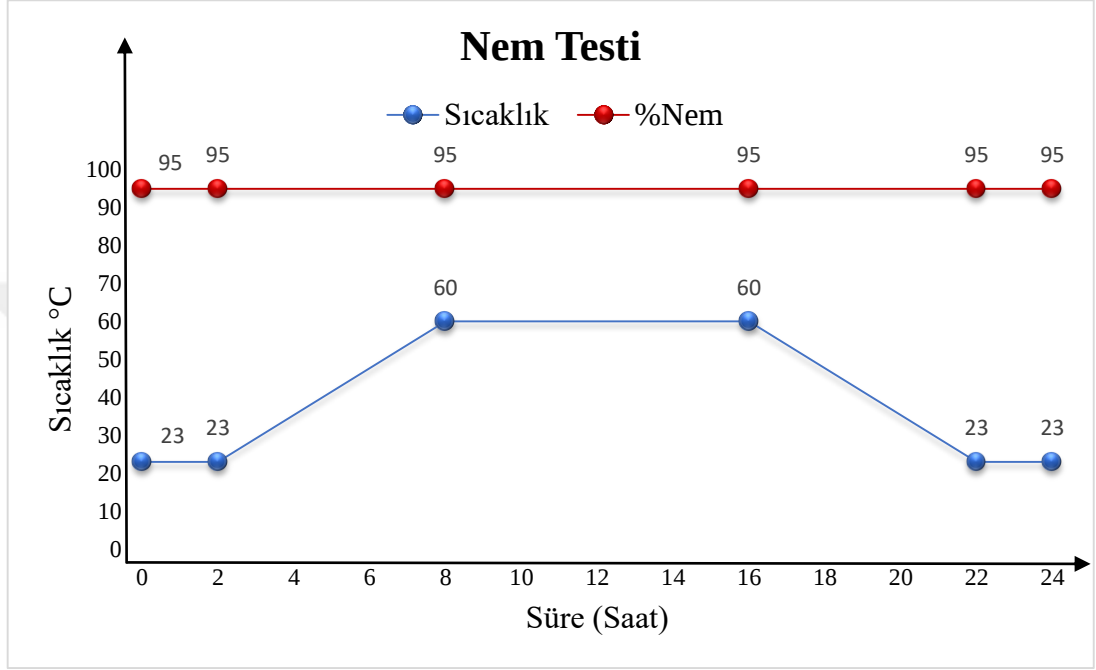


Şekil 2. 9: Çevre Koşulları, Termal Şok-Saat Testi Uygulama Şekli Grafikselsel Gösterimi

2.2.2. Nem Testi

Prosesimizde kaplanan numuneler ACS Discovery iklimlendirme kabininde, 23°C sıcaklıkta %95 nemde 2 saat, 23-60°C sıcaklıkta %95 nemde 6 saat, 60°C sıcaklıkta %95 nemde 8 saat, 60-23°C sıcaklıkta %95 nemde 6 saat ve 23°C sıcaklıkta %95 nemde 2 saat olmak üzere çevre koşulları testine tabii tutulmuştur.

Uygulanan nem testi ve süre grafiğimiz aşağıdaki gibidir.



Şekil 2. 10: Çevre Koşulları, Sıcaklık-Saat ve Nem-Saat Testlerinin Uygulama Sürelerinin Grafikselsel Gösterimi

2.2.3. Atış Testi

Prosesimizde kaplanmış numuneler, MPT-76 kodlu piyade tüfeğimizin oluşturmuş olduğu 500 g tepme kuvveti oluşturan düzeneklere bağlanmıştır. Son kullanıcının belirlemiş olduğu atış sayısına göre değişen uygulama 20 atış ile 200 atış arasında değişmektedir. Çalışmamızda bağlanmış olan her numune için 100 adet atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar en son test olarak uygulanmıştır.

3. BULGULAR

Çalışmalarımızda, literatür araştırmaları ve eloksal kaplama yapan endüstri kuruluşları ile gerçekleştirilen görüşmeler dikkate alınarak, iki farklı katot malzemesi ile kurşun ve alüminyum alaşımlarında (Şişmanoğlu, 2009) denemeler yapılmıştır.

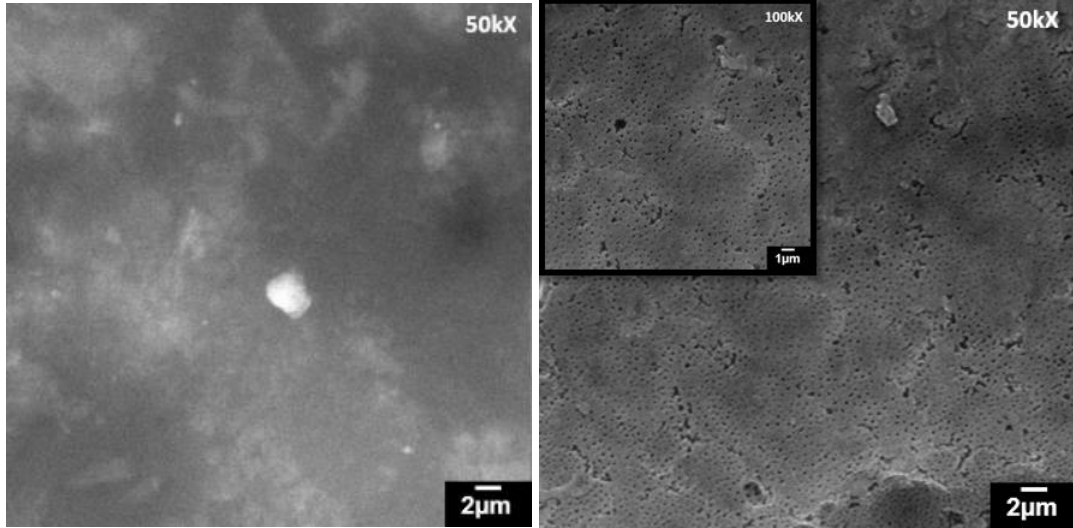
3.1. Katot Türü

3.1.1. Alüminyum Katot ile Yapılan Çalışmalar

Literatür çalışmaları referans alınarak (Gökşahin, 2007; Şişmanoğlu, 2009; Alpay, 2009) alüminyum katot proses çalışmalarında, asit konsantrasyonu 150 g/l, akım yoğunluğu 2 A/dm² olarak denenmiştir. Anodik oksidasyon işlemi uygulanan numunelerin yüzey alanı 0,5 dm² ölçülerinde çalışılmıştır. Bu çalışmalara ait parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

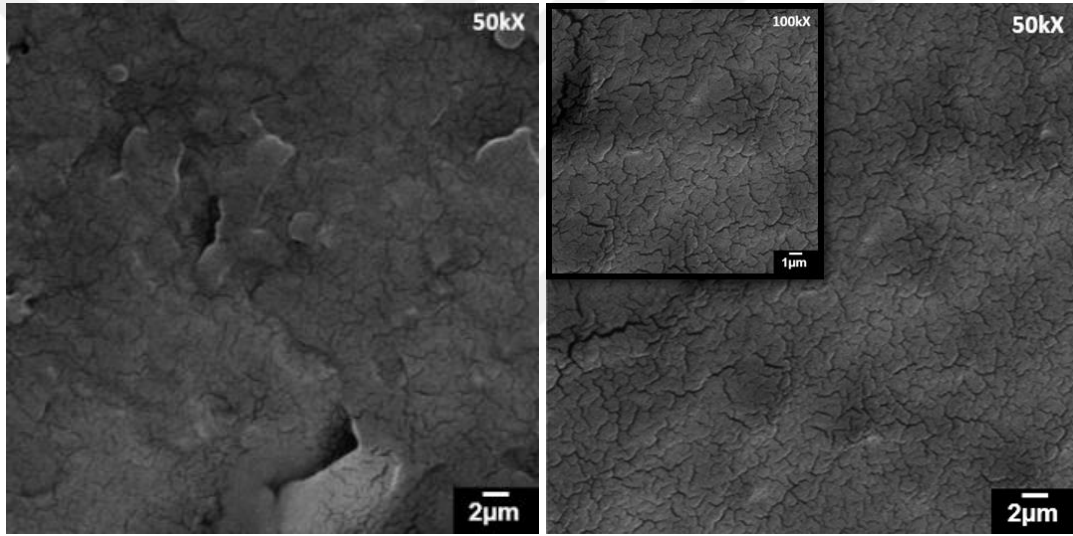
Çizelge 3. 1: Alüminyum Katot Süre Çalışmaları

Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (µm)
10	17
15	20
20	29
25	29



a) 10 Dk.

b) 15 Dk.



c) 20 Dk.

d) 25 Dk.

Şekil 3. 1: Alüminyum Katot ile Çalışılmış Numunelere Ait SEM Görüntüleri, Süre Parametreleri **a)** 10 Dk. **b)** 15 Dk. **c)** 20 Dk. **d)** 25 Dk.

Alüminyum katot ile gerçekleştirilen anodik oksidasyon işlem çalışmalarında sürenin artması ile birlikte oksit tabaka büyümektedir. Yüzeyde büyüyen oksit tabakanın elektriksel iletkenliği düşürmesi ile birlikte direnç artmaktadır. Bununla birlikte uygulanan potansiyelde ve havuz sıcaklığında artış gözlemlenmiştir. Kaplama havuzunun sıcaklığındaki artış literatürde belirtilen havuz sıcaklıklarından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Yavuz, 2018; Cirik, 2007). Yapılan çalışmalar sonucunda, sıcaklık ve voltaj değerlerindeki artışın kaplama kalınlığının artmasına doğrudan etki ettiği belirlenmiştir (Alpay, 2009). Havuzun sıcaklığını sabit tutmak için Şekil 2.5'te görülen buz havuzlarında denemeler yapılmıştır. Sıcaklık değerlerini düşürebilmek amacıyla anot yüzey alanının azaltılmasıyla prostedeki direncin düşürülmesi denenmiş, ancak sıcaklık yine referans alınan değerlerde tutulamamıştır (Yavuz, 2018; Cirik, 2007).

Alüminyum katot kullanılarak yapılan anodik oksidasyon işlemi uygulanmış numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 3.1’de sunulmuştur. İstenen kaplama kalınlığının deney süresinin düşük tutulmasıyla elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğunun sabit tutulduğu çalışmalarda, proses süresi 10 dakika olarak çalışılan numunede beklenen gözenek yapısını oluşturmak için yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Deneylerde süre kademeli olarak artırılmıştır. Şekil 3.1 (b)’de yer alan 15 dakikalık çalışmaya ait SEM görüntüsünde gözenekli yapılar oluşturulmaya başlamıştır; ancak bu gözenek yapısının homojen olmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum, boyanın soluk bir görüntü vermesine neden olmuştur. Şekil 3.2’ de ise soluk görünümlü numune örneği sunulmuştur. Proses süresinin artırılarak 20 ve 25 dakika süre ile yapılan deneylerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ise çatlaklar ve malzeme yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Bu durum, oluşan alüminyum oksit tabakasının düzensiz bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca 20 ve 25 dakika süre ile çalışılan numunelerde kaplama kalınlıkları da referans aralığını aşmıştır (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019).



Şekil 3. 2: Mat Boya Görünümü

Sabit akım uygulanarak gerçekleştirilen çalışmalarda alüminyum katot seçilmesi durumunda, uygulanan potansiyelde dalgalanmalar olduğu ve sabit bir değerde tutmanın zor olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, kaplama banyosunun sıcaklığını kontrol etmek de güçleşmiştir. Alüminyum katot ile uygulanan anodik oksidasyon işlemlerinde kaplama kalınlıklarının standartlara uygun olmaması ve stabil değerler elde edilememesi nedeniyle çalışmalara kurşun katot kullanılarak devam edilmiştir.

3.1.2. Kurşun Katot ile Yapılan Çalışmalar

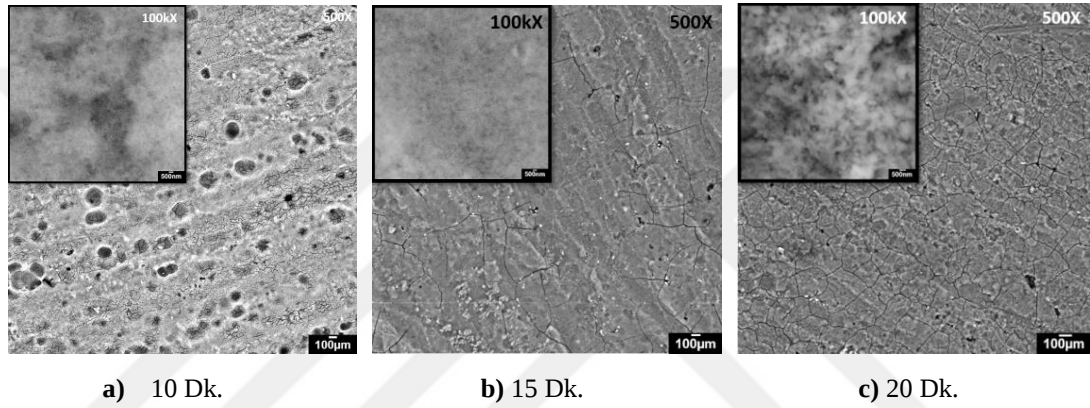
Eloksal kaplama çalışmalarının kurşun katot kullanılarak yapılan deneylerinde, asit konsantrasyonu 100-125-150-175-200 g/l, akım yoğunluğu 2-3-4 A/dm² ve süre 10-15-20 dakika seçilerek çalışmalar yapılmıştır. Alüminyum oksidasyon işleminde, kurşun katot kullanılarak yapılan deneylerde 0,5 dm² anot malzemelerin yüzey alanı kullanılmış, endüstride uygulanan yöntemler incelenerek katot malzemelerinin yüzey alanı 0,34 dm² olarak belirlenmiştir. Çalışmalarda akım yoğunluğu kontrol altında tutularak deneyler gerçekleştirilmiş, sıcaklık ise literatürde belirtilen referanslara uygun olarak oda sıcaklığına ayarlanmıştır (Şişmanoğlu, 2009; Yavuz, 2018).

Anodik oksidasyon çalışmalarında sürenin etkisini incelemek için deneylerde hücreye 2 A/dm² akım uygulanmıştır. Deney süresi 10-20 dk. aralığında değiştirilmiştir. Belirtilen parametrelere bağlı olarak deney süresinin mikroyapı ve kaplama kalınlığına etkisi incelenmiştir. Elde edilen kaplama kalınlık değerleri ve prosesle ilgili veriler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3. 2: Proses Süresinin Kaplama Kalınlığına Etkileri

Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (μm)
2	10	6,2
2	15	7,6
2	20	9,3

Çizelge 3.2'nin incelenmesi sonucunda, kaplamanın oluşumunun proses süresi ile doğrudan ilişkilendiği gözlemlenmiştir (Nissa, 2013). Proses verilerine göre, kaplama kalınlığı süre ile birlikte dağılım göstermiş ve ilk 5 dakikalık sürede yaklaşık 3,1 μm kalınlığında oksit tabaka oluşumu gerçekleşmiştir. Ancak bu değerler, savunma sanayi standartlarını karşılayamamaktadır. Proses sonucunda oluşan oksit yüzeylerin mikroyapı görseli Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3. 3: Proses Süresinin Mikroyapı SEM Görüntüleri, 2 A/dm² **a)** 10 Dk. **b)** 15 Dk. **c)** 20 Dk.

Şekil 3.3' te sunulan SEM görüntüleri, Çizelge 3.2'ye ait süre parametre değerleriyle elde edilen numunelere aittir. Şekil 3.3(a) görselinde, proses süresinin 10 dakika uygulandığı numunenin SEM fotoğrafı yer almaktadır. Bu görselin 100 kX büyütülmüş mikroyapısında gözenek yapılarının oluşmaya başladığı görülmektedir. Görselin 500 X, çatlak başlangıçlarının varlığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.3 (a) görselinde her iki büyütmeninde incelenmesi sonucunda malzemenin yüzeyinde çatlaklar ve düzensiz pürüzlü yüzeyler görülmektedir.

Şekil 3.3 (b)'de verilen numunenin SEM görüntüsüne ait mikroyapısında gözenek yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak, 500 X büyütmesinde çatlak başlangıçlarının varlığı dikkat çekmektedir. Bu çatlaklar, oluşturulan kaplama yüzeyinin kırılma bir yapıya sahip olabileceğini veya gerilme, termal şok ya da diğer mekanik yükler altında ilerleyebileceğini düşündürmektedir. Şekil 3.3 (b)'de yer alan SEM görüntüsüne ait 100 kX büyütme ile incelendiğinde, gözenek yapısının oluştuğu ancak gözenek çaplarının küçük olduğu ve gözenek kanallarının derinleşmediği görülmüştür. Bu nedenle, standart kaplama kalınlığına ulaşamamıştır. (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019).

Şekil 3.3 (c)'deki üçüncü görselde, proses süresinin 20 dakikaya çıkarıldığı görülmektedir. Bu süre zarfında, oksit gözenek yapısının oluşmadığı, bariyer oksit aşamasında kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, 500 X SEM görüntülerinde, sürenin 15 dakikadan 20 dakikaya artırılmasıyla çatlakların yüzey boyunca geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar malzemenin zayıf noktalarını ve iç gerilmelerini göstermektedir. Bu zayıf noktalar ve iç gerilmeler, mekanik tutunmayı olumsuz yönde etkileyeceği bilinmektedir. Sürenin artırılmasıyla birlikte kaplama kalınlığının da arttığı kaydedilmiştir.

Anodik oksidasyon işleminde, 2 A/dm² akım yoğunluğunda 10, 15 ve 20 dakikalık sürelerde denenilen numunelerin SEM fotoğraflarına göre, süre artışıyla birlikte çatlak oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir. Boya ve test süreçleri sonrasında elde edilen makro görüntüler, Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3. 4: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görüntüler, 2 A/dm² a) 10 Dk. b) 15 Dk. c) 20 Dk.

Amper değerleri 2 A/dm² olarak belirlenen ve Şekil 3.4' te gösterilen numuneler, 10, 15 ve 20 dakikalık anodik oksidasyon proseslerine tabi tutulmuştur. Şekil 3.4 (a)' da yer alan makro görüntüde, boyanın test öncesinde oksit yüzeye iyi tutunduğu gözlemlenmiştir. Ancak aynı görüntüde, test sonrasında boyanın matlaşarak yüzeyden ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu durum, boya uygulaması sırasında boyanın numune yüzeyine yeterli derecede yapışmadığını veya yüzeye yeterli miktarda boya tutunamadığını göstermektedir. Sonuç olarak, yüzeyde mat bir görünüm oluşmaktadır. Boyanın yeterli derecede yapışmamasının veya yetersiz miktarda boyanın yapışmasının nedeni olarak, gözenek kanallarının yani kaplama kalınlığının yeterince derinleşmemesi olduğu düşünülmüştür.

Şekil 3.3 (c)' deki görselde, proses süresinin uzatılmasının etkisiyle, SEM fotoğraflarından da anlaşılabileceği üzere, gözenek yapılarının tamamen kapandığı görülmektedir (Nissa, 2013). Bu durum, Şekil 3.4 (c)' de de gösterildiği gibi, numunenin boyanma kabiliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Oksit yüzeye tutunan boya, dış etkenlerin zorlaması sonucunda numuneyi tamamen terk etmiştir ve malzemenin dış yüzeyinde bozulmalar gözlemlenmiştir.

3.2. Süre ve Akım Yoğunluk Çalışmaları

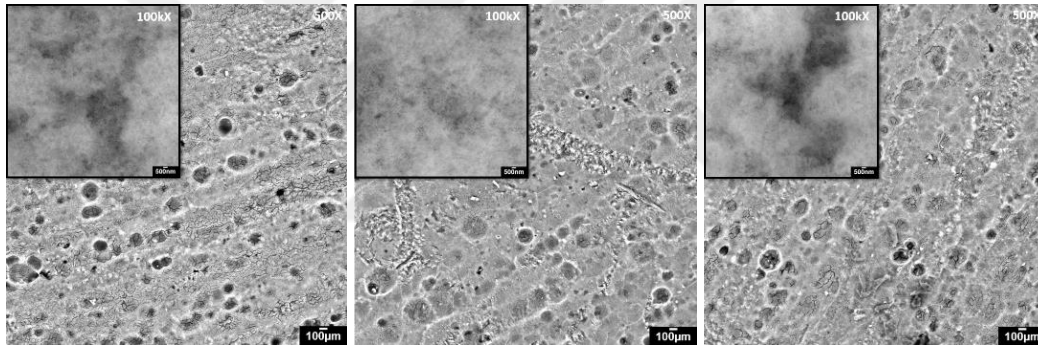
3.2.1. 10 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri

Bu aşamada, prosesin akım yoğunluğunun kaplama kalınlığı ve anodik oksidasyon işlemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Katot çalışmalarında gözenek yapısının oluşmasından da ötürü deney çalışmalarına 10 dakika ile başlanmıştır.

Çizelge 3. 3: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 10 Dakika

Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (μm)
2	10	6,2
3	10	9,7
4	10	14,1

Akım yoğunluğunun 10 dakika uygulandığı deney numunelerine ait kaplama kalınlık değerleri Çizelge 3.3' te, mikroyapı fotoğrafları ise Şekil 3.5' te sunulmuştur. Uygulanan akım yoğunluklarından, 4 A/dm² harici akım yoğunluklarında, referans alınan kaplama kalınlıklarına erişilememiştir.



a) 2 A/dm²

b) 3 A/dm²

c) 4 A/dm²

Şekil 3. 5: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 10 Dakika a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4 A/dm²

Şekil 3.5' te verilen numunelere ait SEM görsellerinin 100 kX büyütmeleri incelendiğinde, 2 A/dm² akım yoğunluğunun uygulanan numunede gözenek yapısının olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, kaplama kalınlığının çok düşük değerlerde olduğu Çizelge 3.3' de belirtilmiştir (Defense, 15-09-2003). 3 A/dm² akım yoğunluğunda gözenek yapısının olduğu görülmektedir. Ancak, önceki çalışmalarımızda tespit edildiği üzere, boyanın yüzeye tutunmasını engelleyen bariyer oksit tabakasının, gözenek yapısına dönüşmeyen kısımlarının kaldığı gözlemlenmiştir. 4 A/dm² akım yoğunluğu ise 3 A/dm² akım yoğunluğuna benzer bir görünüm sergilemektedir. Ancak, artan akım yoğunluğu ile gözenek yapısına dönüşmesi tamamlanamayan bariyer oksit görünümüne daha sık rastlanmıştır. Bu mikroyapı analizine dayanarak, yüzeyin tam anlamıyla gözenekli bir yapı geliştirmediği veya bariyer oksit tabakasının tamamen çözünmediği görülmektedir. Özellikle 100 kX büyütmelemlerde, yüzeyde potansiyel bariyer etkisi yaratacak bölgeler olduğunu gösteriyor.

Şekil 3.5’ teki görsellerin 500X büyütmeleri incelendiğinde benzer oluşumlar gözlemlenmiştir. 2 A/dm² akım yoğunluğunda çatlak başlangıçları görülürken, 4 A/dm² akım yoğunluklarında çatlakların ilerlediği belirlenmiştir. Çatlaklar ileri seviyelerde ve sık değildir. Numunelerin boya prosesi sonuçları ile test sonrası davranışlarını gözlemek amacıyla proseslere tabii tutulmuştur. Numunelere ait boya ve test sonrası makro görseller Şekil 3.6’ da sunulmuştur.



a) 2 A/dm²

b) 3 A/dm²

c) 4 A/dm²

Şekil 3. 6: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 10 Dakika a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4 A/dm²

Boya ve test prosesleri sonucunda makro görseller, SEM fotoğraflarını doğrular nitelikte olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.6 (a) görselinde gözenek kanallarının derinleşmemesinden ötürü boya mat görüntü vermiş ve tam tutunum sağlayamadığı noktalar görülmektedir. Aynı görselde bulunan ve test sonrası sunulan numunede boyanın yüzeyi bırakmış olduğu görülmektedir. Şekil 3.6 (b) görselinde ise gözenek tüplerinin daha açık oluşuna bağlı olarak boyanın yüzeye daha iyi tutunmuş olduğu test öncesi ve sonrası hallerinin kısmen aynı olduğu görülmektedir. Ancak SEM fotoğrafında gösterilmiş olduğu üzere gözenek yapısının homojen olmamasından kaynaklı boya, numune yüzeyinde homojen görüntü yani her noktasında aynı parlaklığı vermemiştir. Şekil 3.6 (c) görselinde ise boya malzeme yüzeyine tutunmuş ancak test aşamalarından sonra mat bir görünüm almıştır.

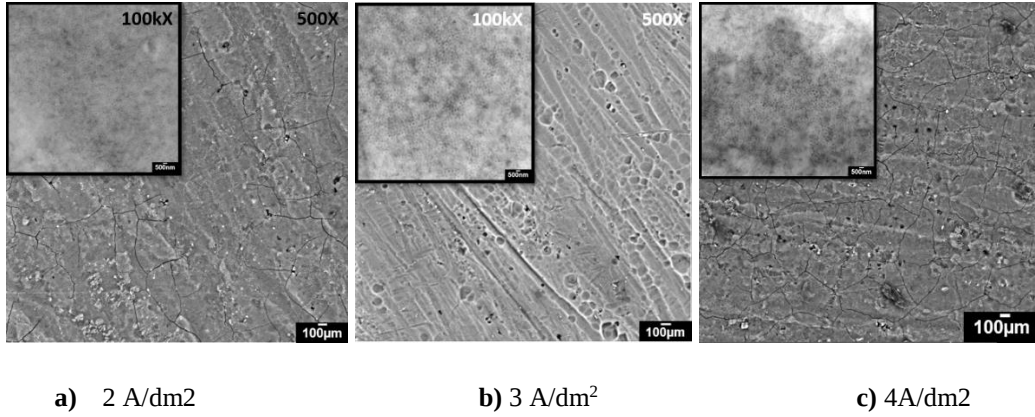
3.2.2. 15 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri

Gözenek kanallarının açık ve homojen olması ile kaplama kalınlığının, boyanın yüzeye tutunmasını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, deney süresi 15 dakikaya çıkartılarak çalışılmıştır.

Çizelge 3. 4: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 15 Dakika

Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (µm)
2	15	7,6
3	15	12,8
4	15	22

Çizelge 3.4’ te anodik oksidasyon işlemi sonrası deney parametreleri ve kaplama kalınlıkları verilmiştir. Bu çalışmalara ait SEM fotoğrafları Şekil 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3. 7: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 15 Dakika **a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4A/dm²**

Şekil 3.7 (a) görseli, 3.1.2 başlığı altında yer alan kurşun katot ile gerçekleştirilen çalışmalar bölümünde incelenmiş ve bu inceleme sonucunda kaplama kalınlığının yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, Şekil 3.6 (a)’ da görüldüğü üzere, gözenek tüplerinin yeterince derinleşmemesi, yüzeyde boya silinmelerine yol açmıştır. Bu durumun temel nedeni, bariyer oksit tabakasında kalan mikroyapının boyanın yüzeye penetrasyonunu engellemesidir. Gözenek yapıların derinleşmemesi, boyanın yüzeyde etkili bir şekilde tutunamamasına neden olmakta ve sonuç olarak mat bir görünümün oluşmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3.7 (b)’ de verilen 100 kX büyütme, bariyer tabakasının, homojen gözenekli bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Homojen gözenek yapısının, boyama prosesinde, her yüzeyde eşit parlaklıkta bir görüntü vermesi beklenmektedir. Aynı numunenin 500 X büyütmesine ait görselde ise daha düzenli ve pürüzsüz bir yüzey görülmektedir. Akım yoğunluğu olarak 2 A/dm² uygulanan Şekil 3.3 (b) ve Şekil 3.5 (a) görsellerinde görülen ve kaplama yüzeyinde iç gerilme yaratan çatlaklar, ilgili numuneye ait Şekil 3.7 (b)’ de görülmemektedir. Çizelge 3.4’ te, numuneye ait kaplama kalınlık değerleri ise MIL-STD şartlarını karşılamaktadır (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019).

Şekil 3.7 (c)’ de, 500X büyütme altında yüzeyde geniş bir çatlak ağı veya çizgisel yapılar gözlemlenmiştir. Bu çatlak ağı, malzeme yüzeyinde gerilimlerin oluşmasına neden olmakta ve bu bölgelerde kaplamanın daha zayıf olabileceği düşünülmektedir. Ancak, aynı numunenin 100kX büyütmesinde gözenek yapısının olduğu görülmüştür. Akım yoğunluğu 4 A/dm² uygulanan numuneye kıyasla 3 A/dm² olarak uygulanan numunenin daha homojen bir yüzey yapısı sergilediği tespit edilmiştir (A.H. Mahmud, 2014; Peyravi, Jahanshahi, Rahimpour, Javadi, & Hajavi, 2014). Öte yandan, akım yoğunluğu 4 A/dm² olarak uygulanan numunenin kaplama kalınlığı açısından standart parametrelerini üst sınır seviyelerde karşıladığı belirlenmiştir. (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019).

Çizelge 3.4’ te verilen numunelere uygulanan boya ve test aşamaları sonrasına ait makro görseller Şekil 3.8’ de verilmiştir.



a) 2 A/dm²

b) 3 A/dm²

c) 4 A/dm²

Şekil 3. 8: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 15 Dakika a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4 A/dm²

Çizelge 3.4' e ait numunelerin makro görselleri Şekil 3.8' de sunulmuştur. Önceki çalışmalarda görülen 2 A/dm² akım yoğunluğundaki numunenin boyanabildiği ancak testler sonucunda başarısız sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Şekil 3.4 (b) ve Şekil 3.8 (a)). Bu duruma, gözenek yapısının kısmi kapalı ve homojen olmayışının sebep olduğu gösterilmiştir.

Akım yoğunluğunun 3 A/dm²' ye çıkarılmasıyla elde edilen numuneye ait Şekil 3.8 (b) incelendiğinde, boyanın oksit yüzey üzerine homojen bir şekilde yayıldığı ve iyi bir tutunma sağladığı gözlemlenmiştir. Boyanın homojen olarak yüzeye dağılabilmesi gözenek yapısının oluşmasına, boyanın tutunma performansı ise kaplama kalınlığına bağlanmıştır. Aynı numuneye MIL-STD testleri uygulanmış ve herhangi bir bozulma tespit edilmemiştir. Akım yoğunluğunun 4 A/dm²' ye yükseltildiği numunenin test öncesi ve sonrası makro görsellerinde de herhangi bir bozulma görülmemiş, ancak 3 A/dm² akım yoğunluğu uygulanan numuneye kıyasla daha soluk bir görüntü verdiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.8 (c)).

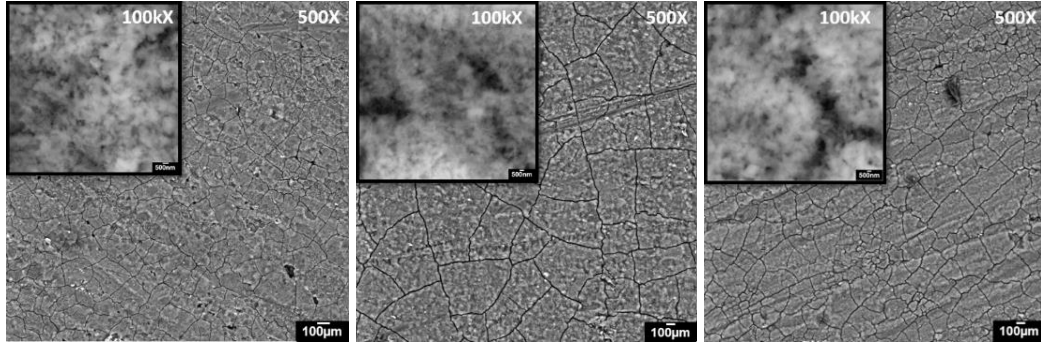
3.2.3. 20 Dakikalık İşlem Süresi İncelemeleri

4 A/dm² akım yoğunluğunda, 15 dakikalık deney süresi uygulanan numunelerde hem kaplama kalınlığının üst sınır seviyelerine ulaşıldığı hem de test performans sonuçlarının olumlu olduğu görseller ile ispatlanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde 500X büyütmede çatlak ağı gözlemlensede, 100 kX büyütmelerde bariyer oksit tabakasının büyük ölçüde gözenek yapısına dönüştüğü belirlenmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, 20 dakikalık deney süresinin denemeleri tercih edilmiştir.

Çizelge 3. 5: Akım Yoğunluğunun Kaplama Kalınlığına Etkisi 20 Dakika

Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (µm)
2	20	9,3
3	20	13,7
4	20	23

Çizelge 3.5' in incelenmesi sonucunda, kaplama kalınlığının prosesin akım yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Yüksek akım yoğunluğu uygulandığında, kaplama kalınlığının hızla arttığı gözlemlenmiştir. Ancak elde edilen kaplama kalınlık değerleri, savunma sanayi standartlarını karşılayacak niteliktedir. Proses sonucunda oluşan oksit yüzeylerin mikroyapı görseli şekil 3.9' da sunulmuştur.



a) 2 A/dm²

b) 3 A/dm²

c) 4 A/dm²

Şekil 3. 9: Akım Yoğunluğunun Mikroyapı SEM Görüntüleri, 20 Dakika a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4A/dm²

Şekil 3.9' da sunulan SEM görüntülerinin 500X büyütmelerinin incelenmesi sonucunda, artan akım yoğunluğunun çatlakların sıklaşmasına ve sınırların derinleşmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, artan akım yoğunluğu ile birlikte gözenek yapısının duvarlarının çöktüğü ve bariyer oksit tabakasının yoğunluğunun da arttığı şekil 3.9' da görülmektedir (A.H. Mahmud, 2014). Anodizasyon, yüzeyde oksit tabakası büyümesi sırasında ve termal gerilimler ile birlikte hacimsel genişleme meydana getirmektedir. Bu genişleme, malzeme yüzeyinde gerilimlere yol açabilir ve çatlak oluşumuna neden olabilir. Yüzeyde oluşan gerilim ile birlikte boya yapışmasının olumsuz etkilediği önceki görsellerden de bilinmektedir.

Şekil 3.9 (a)'da yer alan, 2 A/dm² akım yoğunluğunun 20 dakika süreyle uygulandığı numunenin 500X büyütme altındaki mikroyapısı, Şekil 3.7 (a)'da görülen, aynı akım yoğunluğunun 15 dakika süreyle uygulandığı numunenin mikroyapısına kıyasla belirgin farklılıklar göstermektedir. Şekil 3.9 (a)'da gözlemlenen çatlaklar ve ince yapılar malzemenin yüzeyinde iç gerilmelere sebebiyet vermektedir. Çatlaklar, özellikle kalın bir anodize tabaka oluşmuşsa, gerilmelerin artmasıyla daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 3.9 b ve c). Yüksek büyütmede görülen bulanık ve homojen gibi görünen yapı, anodizasyon işlemi sonucu oluşan amorf oksit tabakasıdır. Bu tabaka bilindiği üzere bariyer oksit tabakasıdır. Bu yapının gözenek yapısına dönüşmesi beklenmektedir. Anodize edilmiş yüzeylerde gözenekli bir yapı sıkça görülmektedir, çünkü anodizasyon sürecinde yüzeyde oksit tabakasında belirli büyüklükte düzenli veya düzensiz gözenekler oluşmaktadır. Bu gözenekli yapı, elektron mikroskobu altında homojen ancak pürüzlü bir yüzey olarak gözlemlenebilir ve oksit tabakasının koruyucu özelliklerini artırmaktadır. Ancak, Şekil 3.9' da sunulan çalışmada, numunelere uygulanan akım yoğunlukları ve süreler sonucunda gözenekli yapı oluşumu sağlanamamıştır.

Bu sonuçlar, akım yoğunluğunun artırılmasıyla yüzeyde çatlak oluşumunun arttığını göstermektedir. Ayrıca, deney süresinin 10-15 dakika olarak tutulduğu çalışmalara ait görsellerin incelenmesi sonucunda, deney süresinin uzatıldığı durumlarda da malzeme yüzeyinde çatlak oluşumunun gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinin ardından numunelere boya ve test prosesleri uygulanmıştır.



a) 2 A/dm²

b) 3 A/dm²

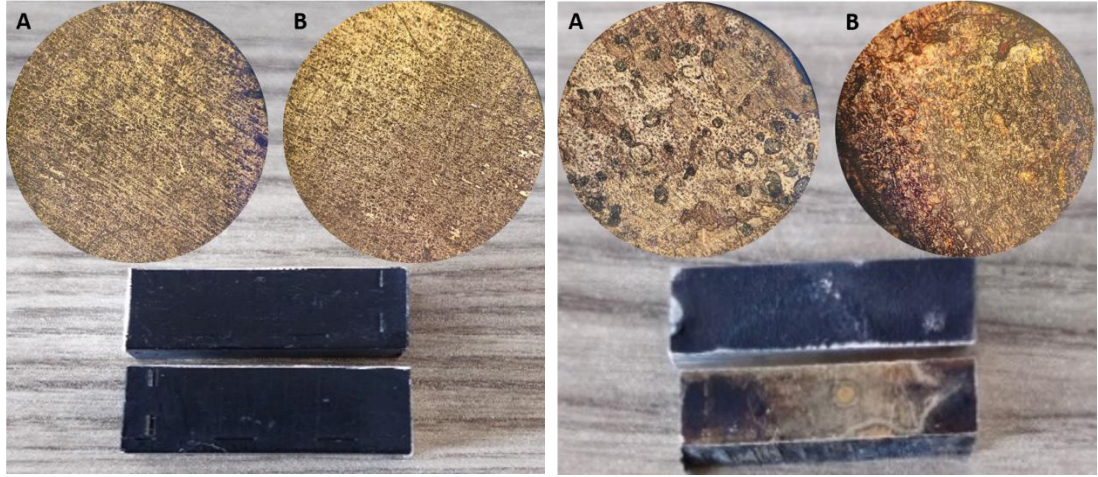
c) 4 A/dm²

Şekil 3. 10: Test Öncesi ve Sonrası Makro Görünümler, 20 Dakika a) 2 A/dm² b) 3 A/dm² c) 4 A/dm²

Şekil 3.10' da, boya ve test süreçleri uygulanan numunelerin makro fotoğrafları sunulmuştur. Yüksek akım yoğunluğunda çalışılan numuneler, düşük akım yoğunluğunda gerçekleştirilen çalışmalardaki numunelere benzer bir davranış sergilemiştir. Her iki durumda da malzemelerin boyanabilme kabiliyeti azalmış ve boyanın tutunma dayanımı, Şekil 3.10' da görüldüğü üzere, istenilen sonuçları vermemiştir. Ortalama akım yoğunluğunda çalışılan numuneler ise, diğer çalışmalara kıyasla daha başarılı boyanabilme kabiliyeti göstermiştir. Ancak, boya, gözenek yapıların oluşamamasından dolayı tam yapışma sağlayamamıştır. MIL-STD testleri sonrasında tutunan boyanın, dış etkenlerle zorlanması sonucunda malzeme yüzeyinden tamamen ayrıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar ve testler sonucunda, uzun süreli prosesler ve yüksek akım yoğunluğu, oksit tabakasının gözenek tüplerinin çökmesine ve yüzeyde çatlakların oluşmasına neden olmuştur (A.H. Mahmud, 2014; Nissa, 2013).

Şekil 3.7 (c) ve Şekil 3.9 (c) incelendiğinde, 4 A/dm² akım yoğunluğunda 15 dakika ve 20 dakika süreleri arasında yapılan karşılaştırmada, sürenin artırılmasıyla birlikte gözenek yapısının çöktüğü (A.H. Mahmud, 2014), kaplamanın bariyer oksit tabakası olarak kalınlaştığı ve 500X büyütmelemlerde çatlakların derinleşip sıklaştığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, 15 veya 20 dakikada uygulanan herhangi iki aynı değerdeki akım yoğunluğunun karşılaştırılması sonucunda da benzer etkiler ortaya çıkmıştır. Bariyer oksit tabakalarının ise boya yapışmasını engellediği, tam yapışma sağlamayı zorlaştırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bariyer oksit tabakasında oluşan çatlakların ise malzeme yüzeyindeki mekanik dayanım açısından oksit-boya döküntülerine neden olduğu yapılan testlerle gösterilmiş, ilgili makro fotoğraflar sunulmuştur (Walton, 2023).

3.2.4. MIL-STD Testlerinin Mikroyapı Üzerindeki Etkileri



a) 3A/dm²-15 Dakika

b) 3A/dm²-20 Dakika

Şekil 3. 11: Test Öncesi ve Test Sonrası Mikroyapı-Makro Görsel

Şekil 3.7 ve Şekil 3.9’da SEM görselleri verilen numunelerin test öncesi ve sonrası optik mikroskop görüntüleri (A: Test öncesi B: Test sonrası) ile makro görselleri Şekil 3.11’de sunulmuştur. Mil-Std testlerini başarılı ve başarısız tamamlamış olan iki farklı numune incelenmiştir.

Şekil 3.11 (a)’ da Mil-Std testlerini başarılı olarak tamamlamış, optimum parametreler ile çalışılmış numuneye ait makro görseller, test öncesi (3.11 a-A) ve test sonrası (3.11 a-B) olmak üzere optik mikroskop görselleri sunulmuştur. Şekil 3.11 (a) optik mikroskop görselinde görüldüğü üzere Mil-Std testleri öncesinde homojen olan malzeme yüzeyi testlerin sonucunda da homojenliğini korumuştur. Görüntülerde belirgin bir şekilde homojen oksit tabakasının oluştuğu ve kendini koruduğu görülmektedir.

Şekil 3.11 (b)’ de Mil-Std testlerini başarılı olarak tamamlayamamış numuneye ait makro görseller, test öncesi (3.11 b-A) ve test sonrası (3.11 b-B) olmak üzere optik mikroskop görselleri sunulmuştur. Şekil (3.11 b-A)’da görülen optik mikroskop görüntüsünde görülen dairesel koyu bölgeler kaplama sırasında oluşan düzensizliklerin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Bu izler ve çizgisel görüntüler kaplama prosesinin iyileştirilmesi gerektiği göstermektedir. Farklı koyuluk derecelerine sahip bölgeler, kaplama kalınlığındaki veya yoğunluğundaki değişimleri göstermektedir. Bu, kaplama sürecindeki parametrelerin (örneğin, akım yoğunluğu veya süre) optimizasyon ihtiyacına işaret etmektedir.

Şekil (3.11 b-B)’ de görülen, Mil-Std testlerinden sonraki görselde ise yüzeyde belirgin şekilde görülen dalgalı, düzensiz yapı, oluşturulamamış olan kaplamanın testler sırasında zarar gördüğünü ve tamamen bozulduğunu göstermektedir. Yüzeyde görülen farklı tonlar ve bölgeler, kaplama tabakasının homojenliğinin değiştiğine işaret etmektedir. Özellikle koyulaşan alanlar, kaplamanın koruma özelliğinin azaldığı bölgeleri göstermektedir. Test sonrası gözeneklerin dağılması ve genişlemesi, eloksal kaplamanın gözenek yapısının test sırasında zarar gördüğünü göstermektedir. Bu durumda eloksal kaplamaya tam tutunamamış olan boyanın, tamamen bırakmasıyla

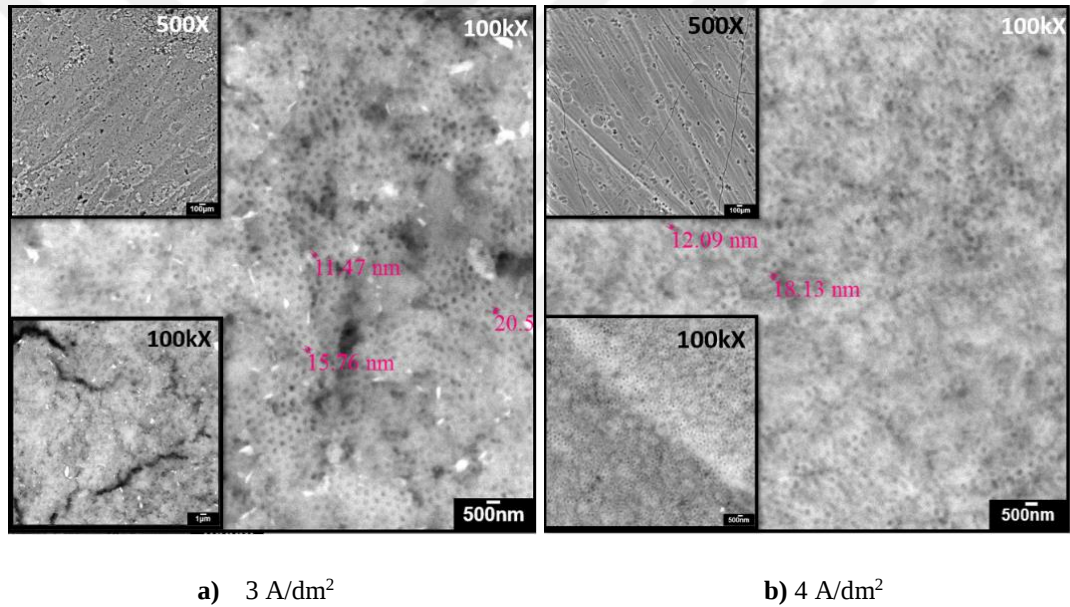
sonuçlanmıştır. Boya bırakmasıyla birlikte çöken gözenek duvarları ile birlikte alüminyum oksit kopmaları görülmektedir.

3.2.5. Akım Yoğunluğunun Eloksal Kaplama Mikroyapısına Etkisi ve Savunma Sanayi Uygulamaları

Çizelge 3. 6: 15 Dakika Uygulamada 3-4 A/dm² Akım Yoğunluğunun Karşılaştırması

Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (μm)
3	15	13,5
4	15	23

Çizelge 3.6’ da, aynı süre boyunca işleme tabi tutulmuş iki numunenin kaplama kalınlık ölçüleri karşılaştırılmıştır. Proses, 15 dakika süresince 3 A/dm² akım uygulanan numunenin kaplama kalınlığı 13,5 μm iken, 4 A/dm² akım uygulanan numunenin kaplama kalınlığı 23 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 12: Akım Yoğunluğunun Gözenek Çapına Etkisi SEM Görüntüleri, 15 Dakika **a)** 3 A/dm² **b)** 4 A/dm²

Çizelge 3.6’ da numunelerin kaplama proses parametreleri ve kalınlık bilgileri verilmiştir. Şekil 3.12’de yer alan SEM fotoğraflarında, numunelerin mikroyapıları gözlemlenmektedir. Şekiller incelendiğinde, aynı proses süresine sahip ancak akım yoğunluğu artırılan numunelerin gözenek çaplarının benzer olduğu görülmektedir (Totaro, 2022). Ancak, Çizelge 3.6’ daki kaplama kalınlık bilgileri incelendiğinde, akım yoğunluğunun artmasıyla kaplama kalınlıklarının da arttığı tespit edilmiştir. Akım yoğunluğuna bağlı olarak kaplama kalınlıklarının artmasının, gözenek tüplerinin derinleştiğini göstermektedir.

Savunma sanayinde kullanılan MIL-STD ve "Military Specification - Anodic Coating for Aluminum and Aluminum Alloys A-8625F" standardında, kaplama kalınlığının geometrik şekillere göre nasıl değişiklik gösterdiği detaylandırılmaktadır. Bu standartlarda, düz yüzeylerde kaplamanın daha ince tutulması önerilirken, “keskin köşeler ve yarıçap (radius) içeren yüzeylerde” kaplama kalınlığının daha yüksek olması gerektiği vurgulanmaktadır (Defense, 15-09-2003). Şekil 3.12 ve Çizelge 3.6’ da sunulmuş olan, bu sonuçlara akım yoğunluğunun artırılmasıyla ulaşılmıştır.

Kaplama yapılacak numunelerin geometrik şekilleri, kaplama kalınlığının artırılması gereken bölgeler açısından önem taşımaktadır. Dişli ve karmaşık yapıya sahip yüzeylerde akım geçişinin zor olması nedeniyle kaplamanın daha geç olduğu ve bu bölgelerde kalınlık homojenliğini sağlamak için kaplama kalınlığının yüksek tutulması gerektiği belirlenmiştir. Bu, savunma sanayinde özellikle elektro-optik cihazlar (örneğin dürbünler) için önemlidir. Kaplama sırasında meydana gelebilecek boya veya oksit döküntüleri, cihazın içinde lens ve prizma gibi hassas parçaların önüne düşerek çok büyük görünerek, görüntü kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Yapılan çalışmalar ile sunulan makro görseller ve mikroyapılarda, düz yüzeylerde, kaplama kalınlığının yetersiz olması durumunda gözenek yapılarının içine yeterli boya nüfuz edememekte, bu da homojen olmayan ve mat bir görünüm oluşturmakta ve boya-oksit döküntülerine neden olmaktadır. Öte yandan, kaplama kalınlığı standartlarda belirtilen değerlerin üzerine çıktığında fazla boya nüfuz etmekte ve yapılan testlerde kaplamanın soyulması gözlemlenmektedir (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019; Defense, 15-09-2003). Ayrıca, gözenek yapısının oluşmadığı durumlarda bariyer oksit tabakasında gerilim birikmekte ve bu durum döküntülere yol açmaktadır. Gözenek yapısının varlığı, malzeme yüzeyine esneklik kazandırarak karşılıklı çalışan parçalarda aşınmayı azaltmakta ve oksit döküntülerine karşı koruma sağladığı düşünülmektedir.

Şekil 3.12’ de sunulan SEM fotoğraflarına ait 500X büyütmelemlerde, geçmiş çalışmalara paralel olarak, akım yoğunluğunun artışıyla çatlakların olduğu gözlemlenmiştir (A.H. Mahmud, 2014). Ancak her iki numunenin homojenitesinde belirgin bir fark bulunmamıştır. Kaplama kalınlık değerleri, artan akım yoğunluğu ile üst sınırlara ulaşmış ve özellikle radiuslarda istenen düzeylere ulaştığı görülmüştür. Düz yüzeylerde ise elektro-optik alan için kalınlık, üst sınır düzeylere çıkmıştır (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019). 3 A/dm² akım yoğunluğu uygulanan numunelerin düz yüzeylerinde ise kaplama kalınlığı, savunma sanayi standartlarına göre ideal seviyelerde (10-25 µm) kalmaktadır (Mil-Std 810G, 2008; Mil-Std 810H, 2019; Defense, 15-09-2003). 4 A/dm² akım yoğunluğu uygulanan numunelerin kaplama kalınlıkları ise yine "Military Specification - Anodic Coating for Aluminum and Aluminum Alloys A-8625F" standardında, kaplama kalınlığının geometrik şekillere göre istediği değerleri karşılamıştır (<25 µm).

Yapılan çalışmalar ışığında optimum parametreler belirlenmiş ve bu parametreler ile birlikte asit konsantrasyon çalışmalarına geçilmiştir. Optimum parametreler, gözenek yapısı oluşumu, kaplama kalınlık değerleri, boyanabilme performansı ve test performans sonuçlarına göre belirlenmiştir. Düz yüzeyler için belirlenen optimum parametre değerleri Çizelge 3.7’ de verilmiştir.

Çizelge 3. 7: Belirlenen Optimum Parametreler

Katot Yüzey Alanı (cm ²)	Anot Yüzey Alanı (cm ²)	Katot Türü	Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)
0,5	0,34	Kurşun	3	15

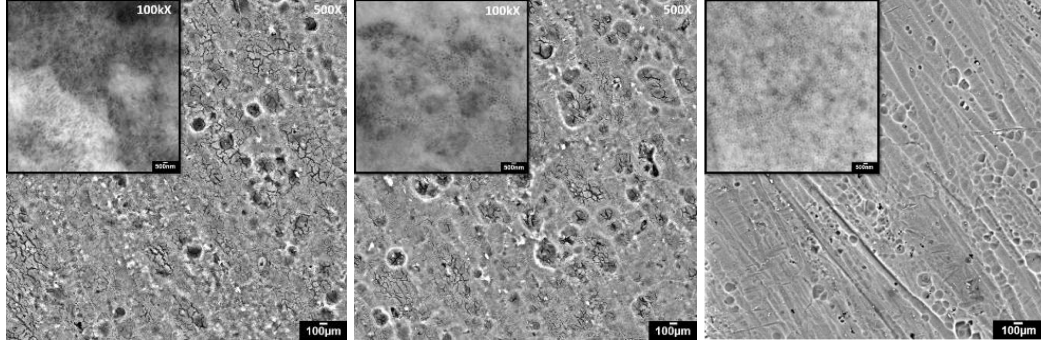
3.3. Asit Konsantrasyonu Üzerine İncelemeler

Belirlenen optimum parametrelere göre son değişken olarak asit konsantrasyonları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Asit konsantrasyonu olarak 100 g/l’den başlayarak 100, 125, 150, 175 ve 200 g/l değerleri ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Direncin düşeceği ve akım geçişinin kolaylaşacağı düşünülerek asit konsantrasyonunun artırılması hedeflenmiştir. Asit konsantrasyonu çalışmaları ve ilgili parametre değerleri Çizelge 3.8’ de sunulmuştur.

Çizelge 3. 8: Asit Konsantrasyon Çalışmaları

Asit Konsantrasyonu (g/l)	Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)	Kaplama Kalınlığı (µm)
100	3	15	8,2
125	3	15	10,1
150	3	15	12,8
175	3	15	18,2
200	3	15	24,6

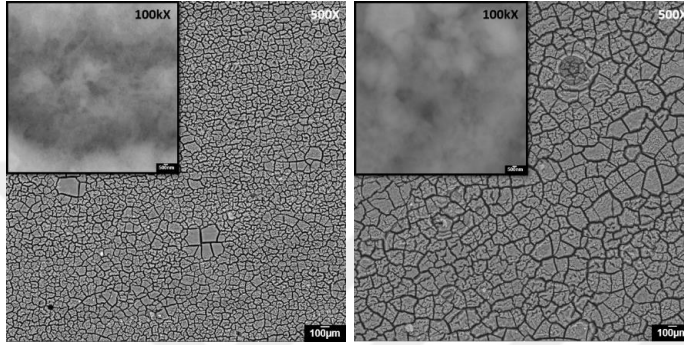
Çizelge 3.8’ de artan asit konsantrasyonuna bağlı olarak kaplama kalınlığına ait değerler verilmiştir. Asit konsantrasyonunun artmasıyla birlikte kaplama kalınlığında da doğru orantılı bir artış gözlemlenmiştir. Prosese tabi tutulan numunelerin SEM fotoğrafları ise Şekil 3.13’de ve makro fotoğrafları ise Şekil 3.14’ de verilmiştir (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023).



a) 100 g/l

b) 125 g/l

c) 150 g/l



d) 175 g/l

e) 200 g/l

Şekil 3. 13: Asit Konsantrasyonunun Kaplamaya Etkisi, 3 A/dm² 15 Dakika **a)** 100 g/l **b)** 125g/l **c)** 150 g/l **d)** 175 g/l **e)** 200 g/l

Sabit akım ile gerçekleştirilen deneylerde, düşük asit konsantrasyonu ile başlanan süreçlerde voltaj değerlerinin yüksek seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, sistemdeki direncin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Asit konsantrasyonunun artışı, prosesin iletkenliğini artırmış ve bunun sonucunda voltaj değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Bu durum şöyle açıklanabilir; asit konsantrasyonun artması ile elektrolitin elektriksel iletkenliği artmaktadır. Galvanostatik koşullarda, elektrolit direncinin azalması potansiyelin düşmesine sebep olmaktadır.

Şekil 3.13'te verilen mikroyapı fotoğraflarına göre, 100 g/l asit konsantrasyonu ile çalışılan numuneye ait (a) görselde, 100kX büyütmede gözenek yapısının oluştuğu görülmektedir. Ancak, kaplama kalınlığının düşük olması nedeniyle gözenek tüplerinin yeterince derinleşmediği ve 100 kX büyütme görselinde de görüldüğü üzere ince bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kaplama kalınlığının savunma sanayi standartlarına kıyasla yetersiz olduğunu göstermektedir (Defense, 15-09-2003). Bu büyütme seviyesinde, yüzeyin pürüzsüz ve homojen bir oksit tabakasıyla kaplandığı gözlemlenmektedir. Anodik oksit tabakası, yüzeyi korozyona karşı koruyan, sert ve kimyasal olarak stabil bir yapı sunmaktadır. Aynı numuneye ait 500X büyütmede ise çatlak oluşumlarının yoğun şekilde, ancak başlangıç aşamasında kaldığı gözlemlenmiştir. Asit banyosunun iletkenliğinin, konsantrasyona bağlı olarak düşmesinin, malzemedeki çatlaklara sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Mikro çatlaklar anodizasyon işleminin tipik sonuçlarıdır ve yüzeyin pürüzlülüğünü

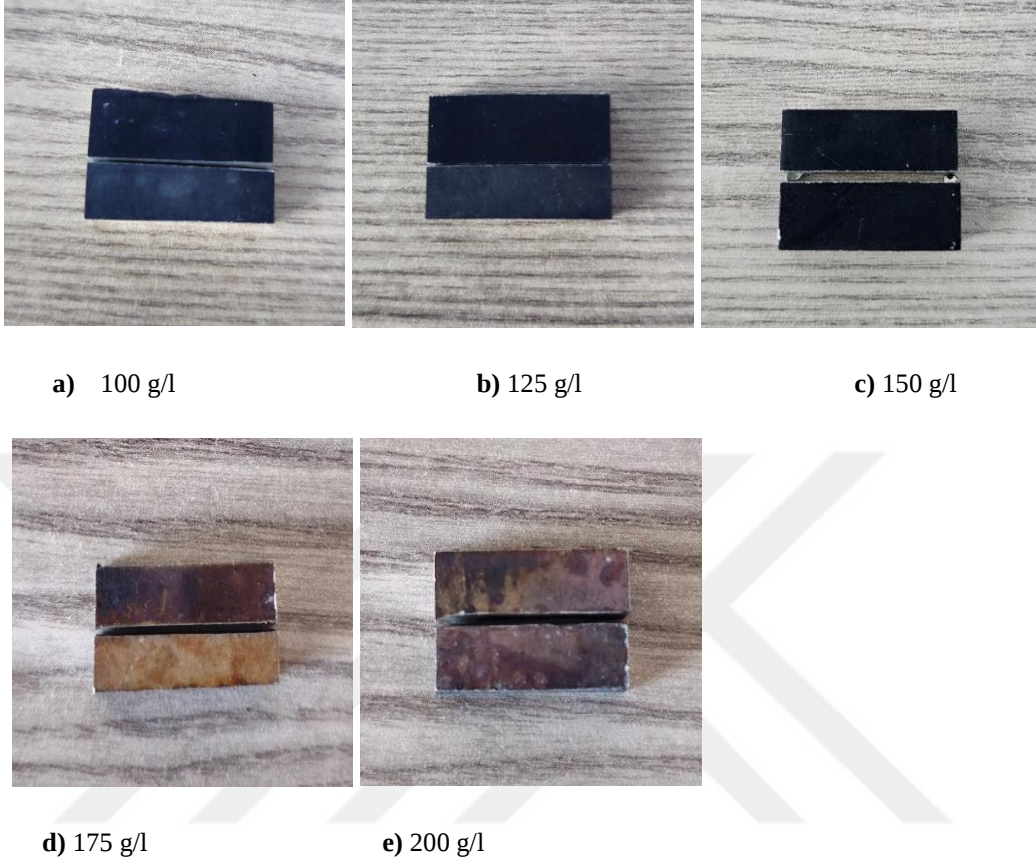
artırmaktadır. Gözenek yapısı, yüzeyde daha iyi kaplama tutunması ve korozyona karşı koruma sağlamak için önemlidir. Aynı zamanda, bu tür gözenekler boya veya diğer yüzey işlemlerinde daha iyi yapışma sağlamaktadır.

125 g/L asit konsantrasyonunda gerçekleştirilen anodizasyon işlemi sonucunda elde edilen Şekil 3.13 (b) görselinin 100kX büyütmesinde, gözenek yapılarının oluştuğu ancak homojen bir dağılım göstermediği gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlığının alt sınır düzeyde olduğu bu koşullarda, yüzeyde çatlak oluşumu tespit edilmemiştir. Gözenek yapısının belirgin şekilde görülebildiği bu yapı, homojen olmadığından boyama sonrasında mat bir görünüm oluşturmaya beklenmektedir. Gözenek homojenitesinin sağlanması durumunda, ince kaplama kalınlığı gerektiren uygulamalar için uygun bir parametre olabileceği anlaşılmaktadır. Ancak, gözenek tüplerinin alt sınır düzeyde derinleşmiş olması nedeniyle, bu anodik oksidasyon işleminden elde edilen kaplamanın yalnızca düz ve radius içermeyen numunelerde boya tutunması açısından başarılı olacağı değerlendirilmektedir (Defense, 15-09-2003).

Literatürde de belirtilen 150-200 g/L asit konsantrasyonunda gerçekleştirilen ve optimum koşullarda çalışılmış numuneye ait Şekil 3.13 (c) görselinde, gözenek yapılarının homojen hale geldiği ve çatlak oluşumunun olmadığı gözlemlenmiştir (Chin-An, Chung-Yu, Chia-Wei, & Chen-Kuei, 2023). 500X büyütmede, yüzeyde belirgin bir şekilde paralel çizgisel izler görülmektedir. Bu çizgisel yapılar, muhtemelen işlem öncesinde yapılan mekanik yüzey hazırlık işlemlerinin (örneğin zımparalama veya polisaj) izleridir. Bu tür izler, anodizasyon işlemi sırasında tamamen kaybolmaz ve kaplama yüzeyinde kalabilmektedir. Gözenek yapısı, 125 g/L asit konsantrasyonunda elde edilen yapıya kıyasla daha homojen ve düzenlidir, bu da anodizasyon koşullarının daha optimum bir kaplama yapısı oluşturduğunu düşündürmektedir. Aynı numuneye ait, 100kX büyütmede, gözenek yapısının homojen olarak dağıldığı ve belirgin bir çatlak oluşumunun olmadığı görülmektedir. Bu, kullanılan 150 g/L asit konsantrasyonunun gözenek yapısının homojenliğini artırarak yüzeyde daha düzenli bir oksit tabakası oluşmasını sağladığını gösterir. Homojen gözenek yapısı, kaplamanın korozyon direncini ve boya gibi yüzey işlemlerinde tutunma kabiliyetini artırmıştır. Bu yapı aynı zamanda, kaplamanın yüzeyde daha pürüzsüz bir görünüm sunmasına olanak tanımaktadır. 125 g/L asit konsantrasyonunda elde edilen yapıya kıyasla kaplama kalınlığının da arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.8' de belirlenen parametreler sonucunda, Şekil 3.13 (d) ve Şekil 3.13 (e) numunelerinde 500X büyütmede ciddi çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu çatlakların, yüzeyde gerilim oluşturduğu bilinmektedir (Walton, 2023). Ayrıca, asit konsantrasyonunun artmasıyla birlikte bariyer oksit tabakasının, gözenek duvarlarının çökmesine sebep olduğu görülmüştür (Cabral-Miramontes, ve diğerleri, 2024; Virk, 2008). Daha önceki çalışmalarımızda bariyer oksit tabakasının boya nüfuziyeti ve tutunumu üzerinde olumsuz etkiler yarattığı bilinmektedir. Bunun sebebi olarak, bariyer oksit tabakası düz bir yüzey oluştururken, gözenek yapısını boyanın yapışmasına zemin sağlamaktadır.

Farklı asit konsantrasyonu uygulanan anodik oksidasyon işlemi çalışmaları sonrası numuneler, boya ve diğer işlemlere tabi tutulmuş olup, bu süreçlerin görselleri Şekil 3.14' te sunulmuştur.



Şekil 3. 14: Asit Konsantrasyonunun Boya ve Test Prosesleri Sonrası Makro Görünümüne Etkisi, 3 A/dm² - 15 Dakika **a)** 100 g/l **b)** 125 g/l **c)** 150g/l **d)** 175g/l **e)** 200 g/l

Yapılan boya uygulamaları, SEM fotoğraflarını destekler nitelikte olup Şekil 3.14' te sunulmuştur. Gözenek tüpleri yeterince derinleşmeyen Şekil 3.14 (a) görselinde boyanın yüzeye yapıştığı ancak MIL-STD testlerinden sonra malzeme yüzeyini bıraktığı görülmektedir. Çizelge 3.8' de görüldüğü üzere, 125 g/L asit konsantrasyonunda işlem gören numune, 100 g/L asit konsantrasyonundaki numuneye kıyasla daha kalın bir kaplama performansı sergilemiştir. 125 g/L asit konsantrasyonunda işlenen (b) numunesinde, gözenek tüplerinin oluşumu ve eloksal kaplama kalınlığı ile doğru orantılı olarak, boyanın yüzeye daha iyi nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Yani Şekil 3.14' te görülen (b) numunesi (a) numunesine göre daha derin bir penetrasyon sağlamıştır. Ancak testler sonrasında bu numunede boya ile ayrılmış, mat ve soluk bir görüntü vermiştir. Gözenek tüplerinin derinleştiği ve homojen yüzey olan 150 g/l asit konsantrasyon ile çalışılan Şekil 3.14 (c) görselinde ise, numune test öncesi ve sonrası aynı görüntüyü vermeyi başarmıştır. Asit konsantrasyonunun 175 ve 200 g/l çalışılan numunelerde boya tutunamamış ve malzeme yüzeyi bozuk görüntü vermiştir. Şekil 3.13 (d) ve (e) görsellerinin 500X büyütmesinden de görüleceği üzere malzeme yüzeyinde çok fazla çatlak görülmektedir. Bu çatlaklar malzemenin termal şoka maruz kalmasıyla veya iç gerilme yüklemesi halinde oluşmaktadır. Şekil 3.11' de görüldüğü üzere MIL-STD testlerinde

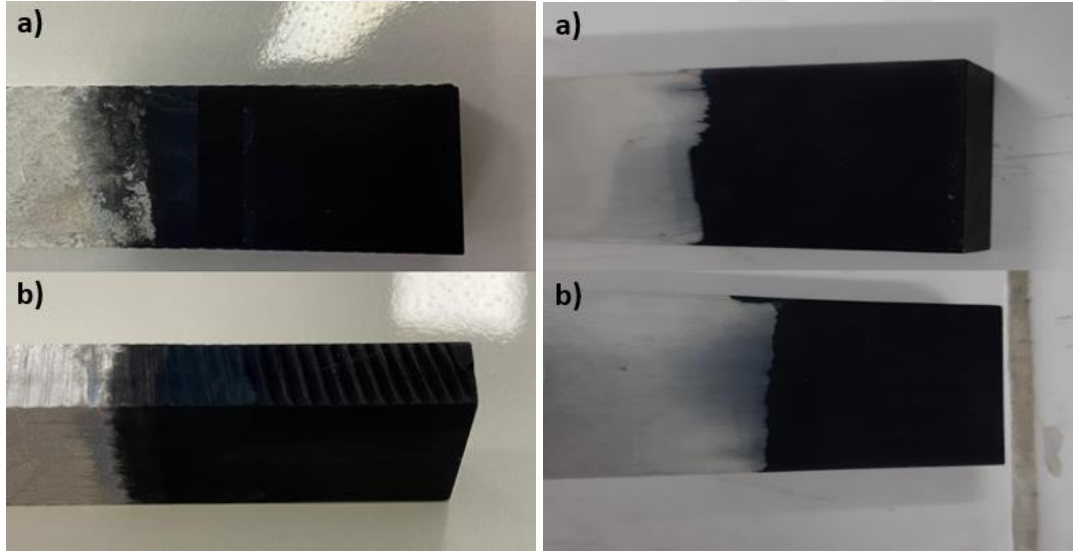
malzeme yüzeyindeki çatlakları ilerletmektedir. İlerleyen çatlaklar ise malzeme veya boyada kopmalara sebep olduğu görülmüştür. Şekil 3.14 (d) ve (e) görsellerinden de görüldüğü üzere oksitlenen malzeme yüzeyinde pul pul oksit tabaka döküntüleri görülmüştür (Walton, 2023).

Bu çalışmaların ışığında, ideal asit konsantrasyonu olarak 150 g/l belirlenmiştir. Ayrıca, artan asit konsantrasyonuna bağlı olarak, Şekil 3.13 (d) ve (e) numunelerine ait SEM görüntülerinde 500X büyütmelerde çatlakların arttığı ve çatlakların derinleştiği gözlemlenmiştir (Cabral-Miramontes, ve diğerleri, 2024; Walton, 2023).

3.4. Askı Farklılıklarına Göre Eloksal Kaplama İncelemeleri

Optimum değerlerin stabilitesini değerlendirmek amacıyla, dışlı yan yüzeyleri olan farklı numuneler optimum parametrelere tabi tutulmuştur. Numunelerin keskin köşeleri özellikle incelenmiş ve herhangi bir çentik görülmemiştir. Uygulanan proses sonrasında parlak bir yüzey elde edilmiş ve MIL-STD testlerine tabi tutulmuştur. Nem ve termal şok testlerinde, dışlı yan yüzeyleri ve keskin köşelerinde boya kalkması ile düz yüzeylerde matlaşma gözlemlenmemiştir. Anodik oksidasyon işlemi ve testlerin uygulandığı numunelere ait görseller, Şekil 3.15' te sunulmuştur.

Tüm testleri başarıyla tamamlayan numuneler, MPT-76 kodlu piyade tüfeğimizin oluşturduğu 500 g tepme kuvveti oluşturan düzeneklere bağlanarak atış testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda da yüzeylerde herhangi bir çizilme, deformasyon veya döküntü meydana gelmemiştir.



Şekil 3. 15: Optimum Değerler ile Anodik Oksidasyon ve Boya Prosesi Tamamlanmış, Dışlı Yan Yüzeyleri Olan Numunelerin MIL-STD Testi Öncesi ve Sonrası Makro Fotoğraflar **a)** Test Öncesi **b)** Test Sonrası

Belirlenen optimum değerler ile karmaşık geometrik şekle sahip numuneler kaplanmıştır. Anodik oksidasyon işleminde askı tasarımı nın önemini vurgulamak amacıyla, aynı tipte iki adet numune, iki farklı askı tasarımı ile optimum proseslere tabi tutulmuştur. Numunelerden birine standart titanyum kablo ile anodik oksidasyon işlemi uygulanırken, diğer numuneye özel olarak tasarlanmış titanyum askı ile işlem gerçekleştirilmiştir. Anodik oksidasyon işlemi sonrası, sırasıyla; boya, termal şok, nem ve atış testi prosesleri uygulanmıştır. Anodik oksidasyon işlemi ve test proseslerinin uygulandığı numuneye ait makro görseller şekil 3.16’ da sunulmuştur.



şekil 3. 16: Askı Tasarımlarının, Makro Grntmlerine Etkisi Titanyum Kablo ile Bağlanmış Numune 3 A/dm² - 15 Dakika

şekil 3.16’ da, tek noktadan bağlanan ve herhangi bir askı düzeni olmadan optimum parametre değerlerinde anodik oksidasyon ve boyama işlemlerine tabi tutulan karmaşık yapılı dişli parçaların boyayı tutmadığı gözlemlenmektedir. Testler sonucunda numuneye ait boyada pul pul dökülmeler gözlemlenmiştir. İçi boş parçaların hem içten hem de dıştan akım verilmediği durumlarda, şekil 3.16 görselinde görüldüğü üzere boyanın tutunma kabiliyeti düşmektedir. Özellikle içi boş ve dişli yüzeyli parçalarda, i ve dış olmak üzere, düz ve dişli yüzeyler için eşit aralıklarla askı aparatı hazırlanması gerekmektedir. Aksi halde homojen bir yapı elde edilememektedir. Bu durum, şekil 3.17’de sunulan işlemlerle ispatlanmıştır.



a) 3 A/dm² – 15 Dakika

b) 3 A/dm² - 20 Dakika

Şekil 3. 17: Askı Tasarımlarının, Makro Görünümlerine Etkisi, Uygun Askı Aparatı ile Prosesi Tamamlamış Numuneler a) 3 A/dm² – 15 Dakika b) 3 A/dm² - 20 Dakika

Şekil 3.17' de sunulan numunelere ait işlemler, özel askılar kullanılarak uygulanmıştır. Eloksal kaplamanın oluşmadığı yüzeylerde, boyanın tutunamadığı ve döküntülerin meydana geldiği daha önceki örneklerde de gösterilmiştir. Keskin köşelerde proses süresinin uzatılmasının eloksal kaplama oluşumunu sağlamadığı ise Şekil 3.17 (b)' de ispatlanmıştır. Proses süresinin uzun tutulduğu çalışmalarda, gözenek yapısına nüfuz eden boyanın testler sonrasında dökülmeye daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, gözenek tüplerinin yeterince derinleşmemesi nedeniyle boyanın tutunma özelliğini olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı, önceki örneklerde olduğu gibi bu çalışmada da doğrulanmıştır. Ayrıca Şekil 3.17 (b)' de görüldüğü üzere kaplama homojen bir şekilde oluşmamış ve yüzey mat bir görünüm almıştır; bu durum, boyanın testler sonrasında yüzeye tutunamamasına yol açmıştır.

Askı tasarımlarında akımın, malzeme yüzeyine karşılıklı gelmemesine dikkat edilmelidir. Bu durum, malzeme yüzeyinde yanık oluşmasına sebebiyet vermektedir. Askı tasarımlarına ek olarak dişli yüzeylerde gözenek tüplerinin geç oluşması nedeniyle, bu yüzeylerde eğrilik yarıçaplarında yumuşatma olmalıdır. *Military Specification, Anodic Coating for Aluminum and Aluminum Alloys* standartlarında belirtilen keskin köşelerde gözenek tüplerinin geç oluşması, boya dökülmesine ve kaplamanın oluşum şekli gereği (Defense, 15-09-2003), keskin köşelerin incelenmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu durum, karşılıklı çalışan parçalarda dökülmelerin kolaylaşmasına neden olmakta ve alüminyum oksit döküntülerine yol açmaktadır; bu durum Şekil 3.17 (b)' de gösterilmiştir.

Şekil 3.15 ve Şekil 3.17 (a)' da çalışılan optimum değerlerde, boyaların daha sağlam tutunma performansları gösterdiği gözlemlenmiştir. Belirlenen optimum değerlerden biri olan kurşun katot kullanımı, havuz sıcaklığı ve voltaj salınımı gibi parametrelerin stabil tutulabilmesi nedeniyle endüstriyel açıdan daha uygun bulunmuştur. Bu sayede, proses içindeki birçok parametre kontrol edilebilir hale gelmiş ve gözenek yapısı, derinliği ve kaplama kalınlığı ayarlanabilir olmuştur.

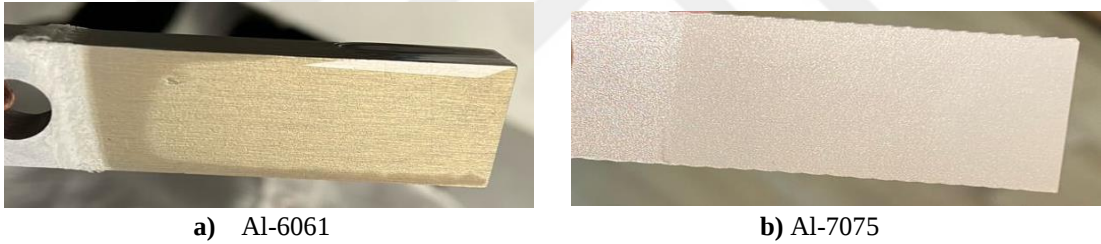
Tüm gerçekleştirilen çalışmalar ve test sonuçları sonucunda, aşağıda Çizelge 3.9' da sunulan optimum değerler tablosu elde edilmiştir.

Çizelge 3. 9: Optimum Parametreler

Katot	Asit Konsantrasyonu (g/l)	Amper (A/dm ²)	Süre (Dk.)
Pb	150	3	15

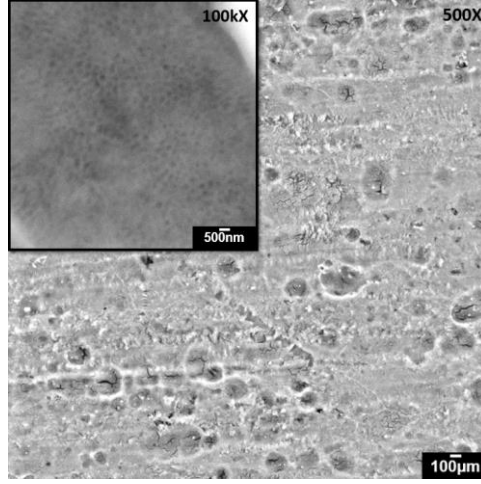
3.5. Al-6061 Alaşımlarında Belirlenen Optimum Değerlerin Sonuçları

Yapılan çalışmalar doğrultusunda, Çizelge 3.9' da belirlenen optimum parametreler savunma sanayinde sıkça kullanılan bir başka alüminyum alaşımı türü olan Al-6061'e uygulanmış ve benzer performans sergilediği gözlemlenmiştir. Al-6061 alaşımına sahip numunenin kaplama kalınlığı ise 16,1 µm olarak ölçülmüştür. Numunelere ait makro görseller Şekil 3.18' de sunulmuş, SEM görüntüleri ise Şekil 3.19' da incelenmiştir.



Şekil 3. 18: Anodik Oksidasyon İşlemi Uygulanan Numuneler **a)** Al-6061 **b)** Al-7075

Yapılan çalışmalarda, oksidasyon işlemine tabii tutulan alaşımlardan, 6061 alaşımlarının düşük akım yoğunluk değerlerinde gri renkte kaldığı gözlemlenirken, şekil 3.18 (a)' da görüldüğü gibi yüksek akım yoğunluk değerlerinde sarı renk aldığı görülmüştür. Anodik oksidasyon işlemine tabii tutulan 7075 alaşımlarında ise düşük akım yoğunluk değerlerinde parlak gri renk alırken yüksek voltaj değerlerinde şekil 3.18 (b)' de görüldüğü gibi mat gri renk aldığı görülmüştür. (Şişmanoğlu, 2009)



Şekil 3. 19: Al-6061 tip Alüminyuma Ait Mikroyapı SEM Görüntüleri

7075 tip alüminyum alaşımı ile yapılan çalışmalar sonucunda belirlenen optimum parametreler, Al-6061 alaşımı üzerinde de uygulanmış ve Şekil 3.19’ da gösterilen mikroyapı elde edilmiştir. Bu görselde, 100kX büyütmede homojen bir gözenek yapısı gözlemlenirken, 500X büyütmede herhangi bir yüzey çatlağına rastlanmamıştır. Belirlenen parametrelerin Al-6061 alüminyum alaşımında da başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Şekil 3.19’da mikroyapısı verilen numunenin boya prosesi ve test sonrası makro görselleri ise Şekil 3.20’ de sunulmuştur.



Şekil 3. 20: Al-6061 tip Alüminyuma Ait Makro Görsel

Şekil 3.20’ de gösterilen numunenin kaplama kalınlığı 16,1 µm olarak ölçülmüştür. Boya ve test prosesleri sonrasında numunede herhangi bir renk solması veya boya bırakma durumu gözlemlenmemiştir.

Anodik oksidasyon işlemi için katot türü, proses süresi, akım yoğunluğu ve asit konsantrasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

4. GENEL SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR

7075 tip alüminyum alaşımlarına yönelik yapılan çalışmalarda, anodizasyon işlemleri için iki farklı katot tipi kullanılmıştır, bunlar; alüminyum ve kurşun katot. Alüminyum katot uygulamalarında, işlem süreleri olarak 10, 15, 20 ve 25 dakika belirlenmiş; akım yoğunluğu 2 A/dm^2 ve asit konsantrasyonu ise 150 g/l olarak ayarlanmıştır. Kurşun katot kullanılarak yapılan uygulamalarda ise işlem süreleri yine 10, 15 ve 20 dakika olarak seçilmiş; akım yoğunlukları 2, 3 ve 4 A/dm^2 arasında değişkenlik göstermiştir. Asit konsantrasyonu için 100, 125, 150, 175 ve 200 g/l değerleri kullanılmıştır. Proses boyunca sabit akım uygulanmış, voltaj ise serbest bırakılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde numunelerin mikroyapıları incelenmiş, boyama işlemleri yapılmış ve MIL-STD testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki nitelikler belirlenmiştir:

Alüminyum Katot:

- Eloksal kaplama işleminde uygulama süresinin artması ile bariyer oksit tabaka artmıştır.
- Oksit tabakasının büyümesi elektriksel iletkenliği düşürmüş ve direnci artırmıştır.
- Direnç artışıyla birlikte uygulanan potansiyel ve kaplama havuzunun sıcaklığı yükselmiştir.
- Kaplama havuzunun sıcaklığı literatürde belirtilen değerlerden daha yüksek ölçülmüştür.
- Sıcaklık ve voltaj artışı, kaplama kalınlığını doğrudan artırmıştır.
- Proses parametrelerinin sabit tutulmaması ve voltaj dalgalanmaları gözlemlenmiştir.
- Voltaj dalgalanmaları nedeniyle kaplama kalınlığı standart değerleri aşmış ve stabilite olumsuz etkilenmiştir.
- Alüminyum katot kullanıldığında hedeflenen gözenekli yapı ve tüpler tam anlamıyla oluşturulamamıştır. Bu durum, boyanın mat bir görünüm sergilemesine yol açmıştır.

Kurşun Katot: Akım

- Düz ve basit geometrik toleranslarda 3 A/dm^2 akım yoğunluğu ideal olarak belirlenmiştir.
- Karmaşık şekil ve dişli yüzeylere sahip numunelerde akım yoğunluğunun 4 A/dm^2 'ye kadar artırılması gerektiği belirlenmiştir.
- Düşük akım değerlerinde gözenek tüplerinin kapalı kaldığı ve homojen bir yapı oluşturulamadığı tespit edilmiştir.
- Yüksek akım değerlerinde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların malzeme yüzeyinde gerilme yarattığı belirlenmiştir. Ancak akımla doğru orantılı olarak tüplerde derinleşmiştir.
- Kurşun katot çalışmalarında $3-4 \text{ A/dm}^2$ akım yoğunluğunda gözenek yapısının başarıyla oluşturulduğu tespit edilmiştir.

- Dişli yüzeylere sahip numunelerde, optimum koşullarda yapılan anodik oksidasyon işlemleri sonucunda eloksal kaplama radiusunun bulunmaması, karşılıklı çalışan parçalar arasında boya tutunma sorunlarına yol açmıştır. Bu durum aynı zamanda, çalışma sırasında kaplamanın aşınma riskini artırmaktadır.
- Yüksek akım uygulamalarının yalnızca dişli yüzeylerde tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Kurşun Katot: Süre

- İdeal süre 15 dakika olarak belirlenmiştir.
- Sürenin artmasıyla kaplama kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.
- 15 dakikadan kısa sürelerde gözenek tüplerinin yeni oluşmaya başladığı tespit edilmiştir.
- Kısa sürelerde bariyer oksit tabakasında kalan yüzeylerde boya tutunumu zayıf kalmıştır.
- 15 dakikadan uzun sürelerde bariyer oksit tabakasının gözenek tüplerine doğru ilerlediği belirlenmiştir.
- Oksit tabakanın bariyer oksit tabakası olarak kalınlaşmasına ve gözenekli yapıya tam geçişin sağlanamamasına neden olmuştur. Bariyer oksit tabakasının kalınlaşması gözenek duvarlarının çökmesine sebep olmuştur. Bu durum, gözenekli yapıya tam geçişin sağlanamamasına ve mat yüzeylerin oluşmasına neden olmuştur.
- Gözenekli yapıya geçiş sağlanamaması sonucu mat yüzeyler oluşmuştur.

Kurşun Katot: Asit Konsantrasyonu

- İdeal asit konsantrasyonu 150 g/l olarak belirlenmiştir.
- Düşük asit konsantrasyonu içeren banyolarda gözenek yapısı oluşturulabilmiş ancak kaplama kalınlıkları düşük kalmıştır.
- Asit konsantrasyonunun artışı, boyanın yüzeyde tutunma performansını olumsuz etkilemiştir.
- SEM fotoğraflarında yüksek asit konsantrasyonu ile işlem gören numunelerde çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Çatlaklar nedeniyle boyada ve malzemede pul pul dökülmeler meydana gelmiştir.
- Düşük asit konsantrasyonu içeren havuzların daha hızlı ısındığı belirlenmiştir.

Diğer:

- Tek nokta bağlantılarında, anot malzemenin düzensiz bir şekilde ısındığı ve bu bölgelerde yanık izlerinin oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, bağlantı noktalarında meydana gelen ısı farklılıklarının, malzemenin fiziksel bütünlüğü üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceğini düşündürmektedir.
- Eloksal kaplanmış ve boyanmış bir malzemenin prosese uygunluğunun, belirgin bir ton farkı olmadığı sürece gözle kontrol edilemeyeceği anlaşılmıştır.

Eloksal kaplamanın başarısı, kalitesi ve dayanıklılığı, yalnızca yüzey gözlemleriyle değil, mikroyapı analizi gibi daha detaylı ve kapsamlı yöntemlerle değerlendirilmelidir.

- Eloksal kaplanmış bir malzemede, alıştırma yaparak veya ultrasonik yıkama ile belirli bir miktar dökme işlemi gerçekleştirildiğinde, döküntülerin sona erdiği söylenemez. Aksine, bu durumun sürekli bir döngü halinde devam edeceği anlaşılmaktadır. Boya sökülmesinin bittiği noktada, oksit tabakanın kazınma sürecinin başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, eloksal kaplama uygulamalarının sürekliliği ve dayanıklılığı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Döküntülerin ortadan kaldırılması için uygulanan yöntemlerin, malzeme yüzeyinin bütünlüğü üzerinde uzun vadede olumsuz sonuçlar doğurabileceği düşünülmektedir.
- Boyanın 55°C'nin altında uygulanması durumunda, numunenin kuruma süreciyle birlikte boyanın yüzeyde tozlaşarak döküldüğü tespit edilmiştir. Tespit işlemi uygulanmadığında ise, boya 55°C'de uygulanmış olsa bile, yüzeye fazla tutunmuş durumda bulunan boyanın numunenin soğuması ile birlikte toz halinde yüzeyden ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu sorunun önüne geçmek amacıyla, tespit işleminin ardından numunenin oda sıcaklığındaki bir havuza aktarılması tercih edilmiştir; bu uygulamanın amacı, yüzeyde kalan toz boya partiküllerinin termal şok etkisiyle uzaklaştırılmasıdır. Ayrıca, yüzeyde kuma yapan toz boyanın tamamen temizlenmesini sağlamak amacıyla basınçlı hava uygulamasının ek bir yöntem olarak kullanılabileceği önerilmektedir.
- gözenek yapısının oluşmadığı durumlarda, malzemenin kısmen boyandığı gözlemlenmiştir; ancak testler veya malzemenin kullanımı sonrasında boyanın döküldüğü belirlenmiştir. Bu durum, gözenek yapıların olmayışının, boya uygulamalarında yeterli tutunmayı sağlamadığını göstermiştir. Dolayısıyla, etkili bir kaplama için derin gözenek yapılarının varlığı kritik öneme sahiptir.
- Yapılan çalışmalar ve endüstri ile yapılan tartışmalar sonucunda, kaplama kalınlığının yetersiz olduğu durumlarda boyanın tüm prosesler sonrasında toz halinde yüzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, gözenek tüplerinin yeterince derinleşmemesine atfedilmiştir.
- NaOH dağlama banyosunun kullanılmadığı ya da 45°C'nin altında uygulandığı durumlarda, yüzey temizliği ve banyo bakımı gibi süreçlerin ihmal edilmesi, kaplama kalitesini olumsuz etkileyerek kaplamanın estetik ve koruyucu özelliklerinde istenmeyen sonuçlara yol açmıştır.
- Sıcak havuzlarda çatlak oluşumu nispeten daha az gözlemlenmiştir; ancak gözenek çaplarının ani büyümesi istenmeyen bir durumdur. Bu süreçte düzensiz büyümelerle karşılaşmıştır. Sıcaklığın, gözenek çaplarını doğru orantılı bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalar ve literatür taramaları neticesinde, bu alanda ilerlemek isteyen araştırmacılar için sıcaklık ve yüzey alanı analizlerinin önemli bir referans sağlayacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda, mevcut çalışmaların yetersiz olduğu ve daha fazla araştırma yapılabileceği düşünülmektedir.

Kaynakça

- A. Ahmadi, P. N.** (2006). *Study of corrosion resistance of colored anodized aluminum with Quinizarin using cyclic voltammetry and impedance measurement methods* 227–233. Progress in Organic Coatings 56.
- A.H. Mahmud, A. H.** (2014). *The Effect of Applied Voltage and Anodisation Time on Anodized Aluminum Oxide Nanostructures*. Malaysia: Universiti Teknologi MARA (UiTM), Faculty of Applied Sciences, Chemistry Department.
- A.I. Vorobyova, E. A.** (2007). 36. Self-organized growth mechanism for porous aluminium anodic oxide: Russian Microelectronics.
- Ak, M.** (2012). *AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi) .
- Alpay, N.** (2009). *Farklı Önışlem Yöntemlerinin Alüminyum Anodizasyonu Üzerindeki Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Alvarez, J. M.** (2018). *Hard Anodic Films For Aluminium Alloys*. The University Of Manchester For The Doctor Of Philosophy In The Faculty Of Science And Engineering.
- Anodizing, O. A.** (2000). *An in house evaluation by METALAST International, Inc.* METALAST International Inc.
- Anodizing, P. A.** (2000). *An in house evaluation by METALAST International, Inc.* METALAST International Inc.
- Arrowsmith D.J., C. A.** (1986). *Surface Pretreatment of Aluminium and Aluminium Alloys Prior to Adhesive Bonding*. lectroplating or Painting, United States Patent No: 4.
- ASM Metals Handbook 2.** (1985). Non Ferrous Metals 9th Edition: Belgium: ASM International.
- ASM Metals Handbook 2.** (1985). P. a.-f.-P. Materials içinde, *Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys* (s. 21-22). Belgium: ASM International.
- ASM Metals Handbook 2.** (1985). P. a.-f.-P. Materials içinde, *Introduction to Aluminium and Aluminium Alloys* (s. 17-18). Belgium: ASM International.
- ASM Metals Handbook 5.** (1994). *International, ASM* (s. 1416-1444). içinde Anodizing: Surface Engineering.

- Baik , S., Lee, Y., Lim, K., & Kim, K.-T.** (2014). *Thin film solar cells on honeycomb-structured substrates for photovoltaic building blocks.*
- Cabral-Miramontes, J., Almeraya-Calderón, F., Méndez-Ramírez, C., Flores-De los Rios, J., Maldonado-Bandala, E., Baltazar-Zamora, M., . . . Gaona-Tiburcio, C.** (2024). *Effect of Citric Acid Hard Anodizing on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Different Aluminum Alloys.* Basel, Switzerland: MDPI Materials.
- Charles A, G.** (2001). *Houghton Metal Finishing.* Anodizing of aluminum Alpharetta, Ga.
- Charles, A. G.** (2007). *Anodizing of Aluminium, Surface Treatments, 105, 397-412.* Charlie Grubbs Consulting: Lakeland, FLA.
- Cheng, B.** (2001). *The Coating Formation Efficiency of the METALAST Anodizing Processes.* METALAST International.
- Chin-An, K., Chung-Yu, Y., Chia-Wei, H., & Chen-Kuei, C.** (2023). Advances in the Fabrication of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide and Its Applications to Sensors: A Review. *Nanomaterials.*
- Cirik, E.** (2007). *Anodik Oksidasyon İşleminin 7075-T6 Alüminyum Alaşımının Yorulma Davranışına Olan Etkisinin İncelenmesi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Coşguner, A.** (2001). *5000 Serisi Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri.* Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Defense, U. S.** (15-09-2003). *Military specification anodic coatings for aluminum and aluminum alloys (MIL-A-8625F).* United States Department of Defense.
- Demir, E.** (2008). *Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi.* Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Demiral, F.** (2015). *İkiz Merdane Surekli Dokum Yöntemiyle Üretilen AA 1050 Alüminyum Alaşımına Anodik Oksidasyon (Eloksal) İşleminin Uygulanabilme Kabiliyetinin İncelenmesi.* Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Doğru, B.** (2008). *Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Borik Asit Sülfürik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi.* Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Giulia Scampone, G. T.** (2022). *Anodizing Al–Si Foundry Alloys.* University of Padova Department of Management and Engineering: (Review).

- Gökşahin, E.** (2007). *Sert Eloksal İle Kaplanmış 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- Hans Gunther Germscheid, R. G.** (1972). *US Patent*, 3. 77-657.
- Henley, W. F.** (1981). *Anodic Oxidation of Aluminium and Its Alloys*. England: Pergamon Press.
- Jessensky, O., Müller , F., & Gösele, U.** (1998). *Self-Organized Formation of Hexagonal Pore Structures in Anodic Alumina*. The Electrochemical Society.
- João Victor de Sousa Araujo, M. M.** (2023). A historical, statistical and electrochemical approach on the effect of microstructure in the anodizing of Al alloys: a review. J. Araujo, M. Milagre, & I. Costa içinde, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* (s. 521-581). Taylor&Francis.
- Johnsen B.B., L. F.** (2004). *The durability of bonded aluminium joints: a comparison of AC and DC anodising pretreatments* 153-161. International Journal of Adhesion & Adhesives 24.
- Jozefowicz, M.** (2001). *Hard Coat Aluminum Anodizing*, 1.
- Kuntay, A.** (2010). Sonlu Elemanlar ile Shock Response Spectrum Analizi Yapılması. Türkiye: Eksen Mühendislik.
- Lapique F., B. A.** (2003). *Hot AC Anodising as a Cr(VI)-free Pre-treatment for Structural Bonding of Aluminium* Vol. 4. Adhesion and Interface.
- Luksepp T., K. K.** (2009). *The influence of water when bonding with heat-curing epoxy adhesives on sealed sulphuric acid-anodised aluminium* 268-279. International Journal of Adhesion & Adhesives 29.
- Mil-Std 810G** (1961 2008).
- Mil-Std 810H** (1961 2019).
- Mondolfo, L.** (1976). *Aluminium Alloys Structure and Properties*. England: Butterworth and Co. (Publishers) Ltd. 693-724.
- Nissa, J.** (2013). *Fabrication of a Porous Anodic Alumina Membrane*. Lund University.
- Peyravi, M., Jahanshahi, M., Rahimpour, A., Javadi, A., & Hajavi, S.** (2014). *Novel thin film nanocomposite membranes incorporated with functionalized TiO₂ nanoparticles for organic solvent nanofiltration*.

- Proenca M.P., S. C.** (2008). *Nanopore formation and growth in phosphoric acid Al anodization*. Portugal.
- Richard, A.** (2018). *Surface Modification of Aluminium-Zinc Alloy (AA7075) And Its Corrosion Characteristics*. University of Malaya Materials Engineering, Kuala Lumpur: Degree of Master of Materials.
- Runge, J. M.** (2017). *The Metallurgy of Anodizing Aluminum* (s. 276). içinde Chicago, IL, USA: Springer.
- Saenz de Miera M., C. M.** (2008). *Modelling the Anodizing Behaviour of Aluminium Alloys in Sulphuric Acid Through Alloy Analogues 2410-3415*. Corrosion Science 50.
- Sang Yoon Park, W. J.** (1995–2008). Recent Trends in Surface Treatment Technologies. *Adhesion, The Journal of* (s. 199-205). içinde
- Services, E. L.** (2023, 06 02). (Eurolab Laboratory Services) 06 02, 2023 tarihinde www.laboratuvar.com/sektorel/savunma/mil-std-810:
www.laboratuvar.com/sektorel/savunma/mil-std-810 adresinden alındı
- Shang, G.** (2017). *Behaviours Of Anodized Superpure Aluminium And Aa 5657 Alloy In Highly Alkaline Solution*. University of Manchester in the Faculty of Science and Engineering for the degree of Doctor of Philosophy.
- Stanley Udochukwu Ofoegbu, F. A.** (2020). University of Aveiro Department of Mechanical Engineering, Centre for Mechanical Technology and Automation.
- Sulka G.D., S. S.-P.** (2002). *Nanostructuring of Aluminium and Synthesis of Porous Aluminium Membranes By Anodising*. Belgium Poland.
- Şişmanoğlu, T.** (2009). *Anodik Oksidasyon Yöntemiyle 2024, 6082 Ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü : (Yüksek Lisans Tezi).
- T. Aerts, T. D.** (2007). 201. Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film: Surf. & Coat. Tech.
- Tekin, E.** (1982). *Demir Dışı Metaller ve Uygulamalı Optik Metalografisi*. Ankara: Yayın No: 101.
- Totaro, P.** (2022). *Effect Of Current Density Ramping On The Anodic Reaction And Morphology Of Aerospace Aluminum Alloys*. Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering.

Tsangaraki-Kaplanoglou, S. T. (2006). *Effect of alloy types on the anodizing process of aluminum 2634 – 2641*. Surface & Coatings Technology.

Üçışık, A. (1978). *Alüminyum Alaşımları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi: (Fiziksel Metalurji Kürsüsü).

Virk, R. S. (2008). *Study of Voltage, Acid Concentration, and Temperature on Nanopore Structures* . San Jose State University.

Walton, J. (2023). *Material And Electrochemical Properties Of Wrought And Additively Manufactured Aluminum Alloys- Effects Of Surface Pretreatment And Surface Finishing*. Michigan State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemistry – Doctor of Philosophy.

Yavuz, S. (2018). *Silah Gövde Malzemesi Aa7075-T6 Alaşımının Anodik Oksidasyonu*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü: (Yüksek Lisans Tezi).