



**5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN ELOKSAL KAPLAMA
İŞLEMİNİN CEVAP YÜZEY METODU İLE OPTİMİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

İsa ÇORUHLU

SAMSUN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Samsun 2023



SAMSUN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN ELOKSAL KAPLAMA
İŞLEMİNİN CEVAP YÜZEY METODU İLE OPTİMİZASYONU**

İsa ÇORUHLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. İlhan ÇELİK
İkinci Danışman: Doç. Dr. Fatih ERDEMİR

Temmuz 2023

TEZ ONAYI

İsa ÇORUHLU'nun

“5754 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Eloksal Kaplama İşleminin Cevap Yüzey Metoduile Optimizasyonu” başlıklı tezi 01/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Samsun Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretimve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Ünvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Doç.Dr. İlhan ÇELİK

.....

Üye : Doç.Dr. Temel VAROL

.....

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Çağın BOLAT

.....

Doç.Dr. Cumhur Türk
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

10/07/2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğu, çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgi sunumu olmak üzere tüm okulların bilimsel etik ilkesi ve kurallarına uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer dosyalarını; bu çalışma Samsun Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili açıklamalar bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacağı tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimizi beyanım.

İsa ÇORUHLU

ÖZET

5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN ELOKSAL KAPLAMA İŞLEMİNİN CEVAP YÜZEY METODU İLE OPTİMİZASYONU

İsa ÇORUHLU

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Samsun Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2023

Danışman: Doç. Dr. İlhan ÇELİK
İkinci Danışman: Doç. Dr. Fatih ERDEMİR

Alüminyum 5754 alaşımı, hafiflik ve mukavemet açısından birçok mühendislik uygulaması için ideal bir malzeme olarak dikkat çekmektedir. Ancak, sürtünme ve aşınma gibi yüzey hasarlarının önemli olduğu uygulamalarda, bu alaşımın yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu araştırmada, anodik kaplama işlemi parametrelerinin (voltaj, kaplama süresi ve tane boyutu) yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı üzerindeki etkisini incelemek için merkezi kompozit tasarımı kullanılmıştır. Kabul edilen matematiksel modellerin doğruluğu ve regresyon katsayılarının önemi ANOVA analiziyle değerlendirilmiştir. Başlangıçta numunelerin yüzeyleri 400, 800 ve 1200'lük zımparalarla zımparalanmış ve farklı pürüzlülük seviyelerine sahip yüzeyler elde edilmiştir. Alüminyum 5754 numuneleri, 8 V, 12 V ve 16 V voltajlarda ve 10, 20 ve 30 dakikalık kaplama sürelerinin kombinasyonlarında anodik olarak kaplanmıştır. ANOVA sonuçları, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı için CYM tarafından oluşturulan modellerin istatistiksel olarak önemli olduğunu ve %95 ve %80 güven düzeyinde geçerli olduğunu göstermektedir. En yüksek anodik kaplama kalınlığı 29 μm , 1200 tane boyutuyla, 16 V voltajda ve 30 dakikalık anodizasyon süresiyle elde edilen bir yüzeyde gözlemlenmiştir. En düşük pürüzlülük değeri ise 0,676 μm , 1200 tane boyutuyla, 8 V voltajda ve 10 dakikalık kaplama süresiyle hazırlanan bir yüzeyde elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: 5754 Al, Eloksal, Kaplama, Mekanik Özellikler, ANOVA

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE ANODIZING COATING PROCESS APPLIED TO 5754 ALUMINUM ALLOY BY THE RESPONSE SURFACE METHOD

İsa ÇORUHLU

Department of Mechanical Engineering
Samsun University Graduate School, July 2023

Supervisor: Assoc. Dr. İlhan ÇELİK
Co. Supervisor: Assoc. Dr. Fatih ERDEMİR

Aluminum 5754 alloy appears as a candidate material for many engineering applications in terms of its lightness and strength values. The surface properties of this alloy need to be improved for applications where there is surface damage such as friction and wear. In this study, Central composite design was applied to investigate the influences of anodic coating process parameters (voltage, coating time and grit size) on the response (i.e. surface roughness and coating thickness). The competence of the mathematical models recognized, and the importance of the regression coefficients were studied by ANOVA. The initial surfaces of the samples were sanded with 400, 800 and 1200 grit size and surfaces with 3 different roughnesses were obtained. Al 5754 specimens were anodic coated at 8 V, 12 V and 16 V voltages and combinations of time parameters of 10, 20 and 30 min. The ANOVA results show that the designed models by RSM for average coating thickness and surface roughness are statistically important at the confidence level of 95%, and 80%, respectively. Maximum anodic coated layer of 29 μm was obtained at surface prepared with 1200 grit size, at 16 V of voltage and used for 30 min of anodizing time. The lowest roughness value of 0.676 μm was obtained at the surface was prepared with 1200 grit size, 8 V of voltage and anodizing time of 10 min.

Keywords: 5754 Al, Anodised, Coating, Mechanical Properties, ANOVA

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ilgisini, bilgisini ve tecrübesini esirgemeysen saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. İlhan ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım sırasında bana zaman ayırıp bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Fatih ERDEMİR'e içtenlikle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2023

İSA ÇORUHLU

İÇİNDEKİLER

Özet.....	V
Abstract.....	VI
Şekiller Listesi.....	X
Tablolar Listesi.....	XI
Simgeler ve Kısaltmalar.....	XII
Giriş.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

1.Literatür Özeti.....	6
------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

2.Kuramsal Temeller	10
2.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları.....	10
2.1.1 Al-Cu Alaşımları	12
2.1.2 Al-Mn Alaşımları	14
2.1.3 Al-Si Alaşımları	15
2.1.4 Al-Mg Alaşımları	16
2.1.5 Al-Mg-Si Alaşımları	19
2.1.6 Al-Zn-Mg Alaşımları	20
2.1.7 Al-Li Alaşımları	21
2.2 Yüzey Kaplama Prosesleri	21
2.2.1 Bakır Kaplama.....	21
2.2.2 Nikel Kaplama.....	22
2.2.3 Krom Kaplama	23
2.2.4 Eloksal Kaplama	23
2.2.4.1 Eloksal Kaplama Proses Aşamaları.....	24
2.2.5 Sert Eloksal Kaplama	25
2.3 Kaplamanın Kalitesine Etki Eden Faktörler.....	25
2.3.1 Akım Yoğunluğu.....	25
2.3.2 Konsantrasyon ve Karıştırma	26
2.3.3 Sıcaklık.....	26
2.3.4 Kaplanan Metalin Etkisi.....	26
2.3.5 Elektrolitin Tabiatı	27
2.4 Eloksal Kaplama Öncesi Yüzey İşlemlerinin Etkileri.....	27
2.4.1 Polisaj İşlemi	28
2.4.2 Kostik Soda Çözeltilerinde Kimyasal Olarak Dağlanması	30
2.4.3 Nitrik Asit Çözeltilerinde Dağlama Ürünlerinin Temizlenmesi	31
2.5 Tasarım ve Optimizasyon Yöntemleri	31
2.5.1 Cevap Yüzey Metodolojisi.....	31
2.5.2 Taguchi Metodu	32
2.5.3 Box-Behnken Tasarımı	33
2.5.4 Doehlert tasarımı	33

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. Materyal ve Yöntem.....	35
3.1. Deney Malzemesi	35
3.2. Eloksal (Anodik) Kaplama.....	35
3.3. Cevap Yüzey Metodu.....	36
3.4. XRD Analizi.....	41
3.5. SEM Analizi	41
3.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri.....	42

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. Araştırma Bulguları ve Tartışma	43
4.1. Eloksal Parametrelerinin Ortalama Kaplama Kalınlığı Ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi.....	43
4.2. XRD Analizi.....	48
4.3 Yüzey Topografyası Ve Kesit Analizi	49
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKÇA.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1.Eloksal İşlemi.....	3
Şekil 1. 2.Eloksallı bir alt tabaka katmanı içindeki altıgen bir hücre yapısının görünümü	4
Şekil 2. 1.Al – Cu faz diyagramı ve ısıtıl işlemi ile yapı değişimi.....	13
Şekil 2. 2. 3xxx serisi alüminyum alaşımlarında görülen ara metalik çökeltilerin SEM görüntüleri.....	14
Şekil 2. 3.Al-Si faz diyagramı.....	16
Şekil 2. 4.Al-Mg denge diyagramı.....	18
Şekil 2. 5.Endüstride Kullanılan Eloksal Kaplama Havuzu Örneği.....	24
Şekil 2. 6.Aşınmış Yüzey (a), Polisajlı Yüzey (b).....	29
Şekil 3. 1.XRD cihazı.....	41
Şekil 3. 2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	42
Şekil 3. 3.Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	42
Şekil 4. 1.Ortalama kaplama kalınlığı için değişim değerleri.....	43
Şekil 4. 2.Kaplama süresi, kaplama gerilimi ve tane boyutunun ortalama kaplama kalınlığı üzerindeki eşzamanlı etkilerini gösteren yüzey ve kontur grafikleri.....	45
Şekil 4. 3.Kaplama süresi, kaplama gerilimi ve tane boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki eşzamanlı etkilerini gösteren yüzey ve kontur grafikleri.....	47
Şekil 4. 4.Kaplanmamış ve anodize edilmiş (farklı koşullar altında) 5754 alüminyum alaşım numunelerinin XRD desenleri.....	48
Şekil 4. 5.Al 5754 alaşımı üzerinde oluşan oksit tabakalarının kesit SEM görüntüleri: (a) Num.1, (b) Num.3, (c) Num.8 ve (d) Num.14.....	49
Şekil 4. 6.5754 Al alaşımının eloksallı işlemiyle üretilen anodik alüminyum oksitin üst yüzey SEM görüntüleri: (a) Num.1, (b) Num.3, (c) Num.8 ve (d) Num.14.....	50

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2. 1. Alüminyumun bazı fiziksel özellikleri	11
Tablo 2. 2. Alüminyum alaşımlarının UNS 'ye göre sınıflandırılması	11
Tablo 2. 3. 5754 alüminyum malzemelerin kimyasal bileşimi	17
Tablo 3. 1. Al 5754 alaşımının (%) kimyasal bileşimi.....	35
Tablo 3. 2. MKT analizindeki anotlama parametreleri ve seviyeleri.	36
Tablo 3. 3. Anodizasyon kaplama sürecinde elde edilen kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri	37
Tablo 3. 4. Doğruluk katsayısı (R^2) ve regresyon modelleri.	38
Tablo 3. 5. Ortalama kaplama kalınlığı için ANOVA sonuçları.	39
Tablo 3. 6. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
μm	: Mikrometre
DC	: Doğru Akım
CYM	: Cevap Yüzey Metodolojisi
BBT	: Box-Behnken Tasarımı
DT	: Doehlert Tasarımı
MKT	: Merkezi Kompozit Tasarım
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
HF	: Hidroflorik Asit
HNO_3	: Nitrik Asit
H_2SO_4	: Sülfürik Asit
V	: Voltaj
TSE	: Tartarik Sülfürik Asit Eloksal
EES	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
KAE	: Kromik Asit Eloksalının
AC	: Alternatif Akım
SA	: Sert Anodizasyon
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	: Alüminyum Sülfat
UNS	: Birleştirilmiş Numaralandırma Sistemine
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Test Birliği
Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
Icorr	: Akım yoğunluğu

Zn	: Çinko
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
Li	: Lityum
NaCl	: Sodyum Klorür
EDX	: Enerji Dağılım X-Işını Spektroskopisi
Ti	: Titanyum
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışını Kırınım Modeli
ANOVA	: Varyans Analizi
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değeri

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, özel mekanik özellikleri ve yüksek korozyon direnci nedeniyle tarih boyunca birçok farklı uygulamada kullanılmıştır. Özellikle alüminyum alaşımları, hafifliği sayesinde yapıların kütlesini azaltarak uçaklar, motorlu araçlar, demiryolu taşıtları, enerji, inşaat, sağlık, gıda ve kimya endüstrilerinde çeşitli yapısal çözümlerde kullanılmaktadır. Bu nedenle, alüminyum ve alaşımları, çok yönlü özellikleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılan önemli malzemeler arasındadır (Leśniakvd., 2014; Kawalek vd., 2020). Örneğin; alüminyum ve alaşımları, yüksek korozyon direnci nedeniyle açık havada bulunan bina inşaatı gibi alanlarda sıkça kullanılan malzemelerdir. Ayrıca, sağlık sektöründe tıbbi cihaz ve cerrahi aletlerin sterilizasyonunda kullanılan konteynırların imalatında da alüminyum bileşenler tercih edilmektedir. Alüminyum, bu çeşitli uygulamalar için uygun mekanik özellikleri, hafifliği ve yüksek dayanımı sayesinde birçok sektörde önemli bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Rathi ve Patil, 2022; Fontinha ve Eustáquio, 2022).

Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin değişkenliğine bağlı olarak 1xxx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx ve 9xxx gibi farklı serilerde sınıflandırılır. Magnezyum içeren 5xxx serisindeki alaşımlar, orta düzeyde bir gerilme mukavemetine sahip olmasına rağmen, korozyona karşı son derece dayanıklıdır. Bu alaşımların kaynak yöntemiyle birleştirilmeleri kolaydır. Bunun yanı sıra, geri dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde, diğer alüminyum alaşımları gibi çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkarlar (Leśniakvd., 2014; Kawalek vd., 2020). Bu gibi özellikler göz önüne alınarak bu çalışmada 5754 serisi alüminyum alaşımı tercih edilmiştir.

Alüminyum alaşımları, yüzeylerinde doğal olarak oluşan oksit tabakası sayesinde korozyona karşı iyi bir dirence sahiptir. Ancak, düzenli olarak aşındırıcı ortamlara maruz kaldıklarında, oyuk korozyonu, taneler arası korozyon, pullanma ve gerilimli korozyon çatlaması gibi çeşitli korozyon türleri ortaya çıkabilir. Bu da sonunda bileşenlerin bozulmasına neden olabilir (Zhu vd., 2022; Zhao vd., 2003; Gao vd., 2022). Alüminyum bileşenler, korozyonu önlemek ve aynı zamanda estetik bir görünüm elde etmek için antikorozyif kaplamalarla kaplanır. Toz kaplamalar ve anodik oksit (eloksal) kaplamalar, alüminyum bileşenlerin korozyona karşı dayanıklılığını artırırken aynı zamanda daha estetik bir görünüm sağlar. Bu sayede alüminyum bileşenler, daha uzun ömürlü ve çekici bir şekilde kullanılabilir.

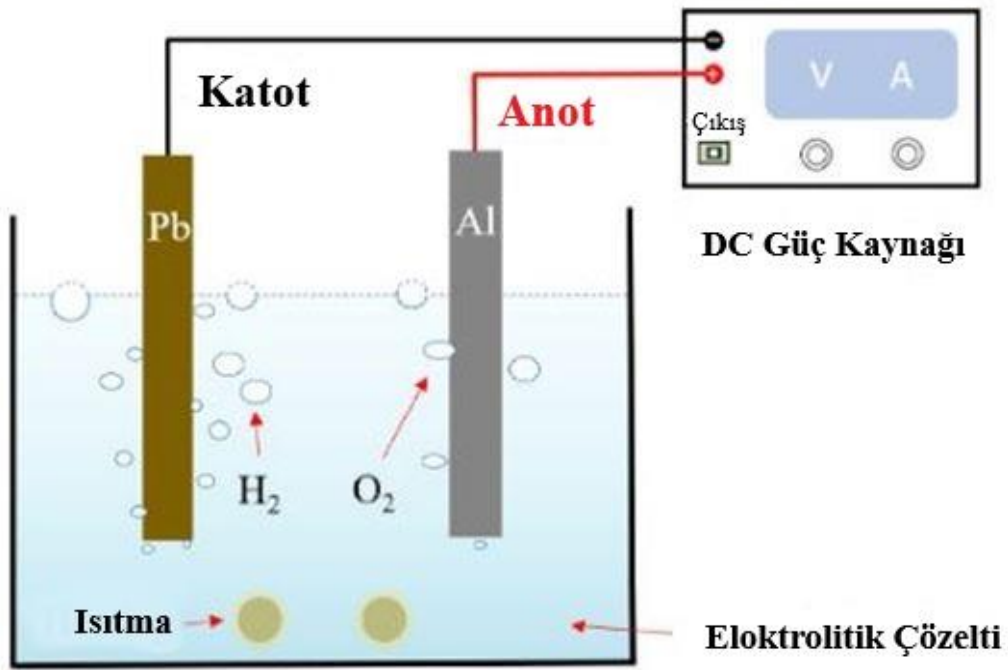
(Gonzálezvd., 2002; Davis, 1993; Gonzálezvd., 2002; Escudero vd., 2007; Oelsner, 1978; Fahy, 1983; Morcillo vd., 2000; Liuvd., 2014; Syed, 2010; Fontinha ve Eustáquio, 2022).

Eloksal (Anodizasyon) işlemi, metal yüzeyini elektrokimyasal yolla anodik film adı verilen metal oksit bir filme dönüştürür. Bu işlem, metalin dayanıklılığını ve korozyona karşı direncini artırarak metal yüzeyini daha uzun süre korumaya yardımcı olur (Runge, 2018; Silnutzer, 2022). Sert eloksal, özellikle alüminyum alaşımları için sıkça kullanılan bir yüzey koruma işlemidir. Bu işlem, alüminyum alaşımlarının yüzeyinde aşınmaya ve korozyona dayanıklı bir tabaka oluşturur. Bu tabaka, alaşımların uzun ömürlü olmasını sağlar ve ayrıca sürtünmeye karşı da dayanıklılık kazandırır. Bu nedenle, sert eloksal, alüminyum alaşımlarının kullanıldığı pek çok uygulamada tercih edilen bir yüzey koruma yöntemidir (Liu vd., 2007; Nickel vd., 2009; Aerts vd., 2007; Huang vd., 2020).

Anodizasyon (eloksal) işlemi, öncelikle yüzey temizleme hazırlığı yaparak başlar. Ardından, asidik bir havuz kullanarak anodik oksit kaplama oluşturmak için anotlama adımı gerçekleştirilir. Son olarak, sızdırmazlık adımıyla dış katmandaki oksit gözenekleri kaplanarak, sonraki boyama işlemi sırasında boyanın yüzeyden atılması engellenir. Bu sayede yüzey, daha kaliteli bir görünüme sahip olur ve daha dayanıklı hale gelir (Alshujeryvd., 2022; Pornnumpa ve Jariyaboon, 2009).

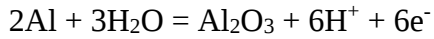
Alüminyum alaşımlarında anotlama işlemi, sülfürik asit bazlı bir çözelti içinde (20 °C' e yakın sıcaklıklarda) anodik olarak polarize edilerek doğal oksit filmini güçlendiren daha kalın bir koruyucu oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka, belirli bir kritik kalınlıkta oluşturulduğunda, çeşitli atmosferik koşullarda korozyona karşı dayanıklı hale gelir. Üretim prosedürlerinde uygun yöntemler kullanarak, bu kaplamalı alaşımların korozyon performansı çeşitli testlerle analiz edilebilir (Gonzálezvd., 2022; Davis, 1993; Gonzálezvd., 2002; Fedelvd., 2021; Fontinha ve Eustáquio, 2022). Anodizasyon işlemi sonucunda oluşan oksit tabakası, genellikle 5 µm ve üzerindeki değerlerde kalınlığa sahiptir. Bu tabaka, yüzeyin aşınmaya ve korozyona karşı direncini artırmanın yanı sıra görsel olarak da çekici bir görünüm sağlamak için kullanılır (Rashid vd., 2022).

Eloksal işleminin bir şeması Şekil 1.1'de verilmiştir. İlgili çalışmada, 5754 alaşımlı bir levha, sülfürik asit ve su çözeltisi içinde anot olarak yerleştirilmiş ve katot olarak ise kurşun levha kullanılmıştır. Bu elektrolitik hücrede, DC güç kaynağı yardımıyla bir anodik oksit kaplama yapılmıştır. Eloksal tankının altında bir ısıtma cihazı kullanılarak anodik kaplama süresince uygun işlem sıcaklığı sağlanmıştır.

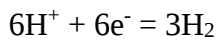


Şekil 1. 1.Eloksal İşlemi (Dong vd., 2022)

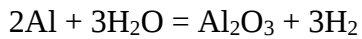
Anot Reaksiyonu:



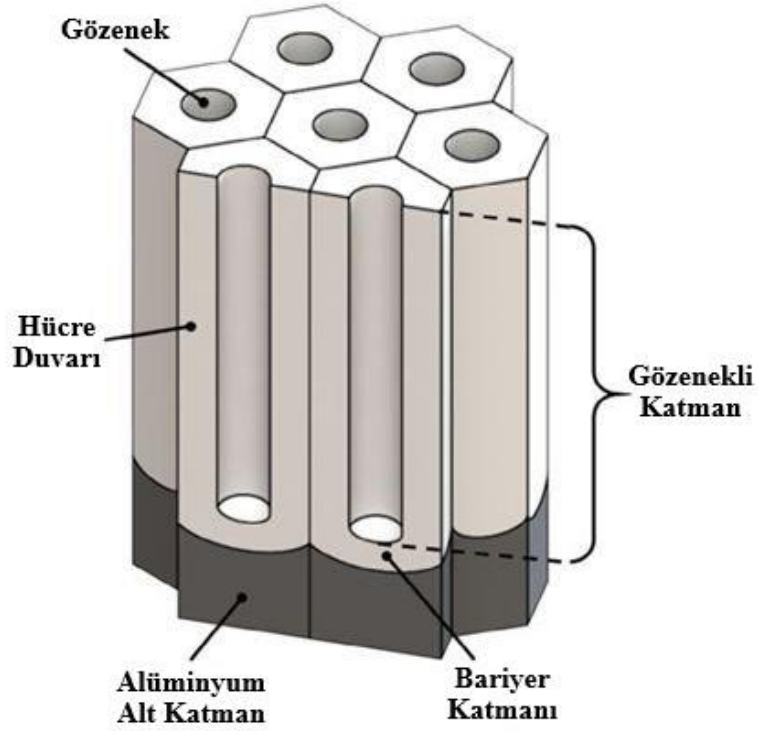
Katod Reaksiyonu:



Net Reaksiyon:



Eloksal işlem sonucunda oluşan oksit film, iç bariyer katmanı ve dış gözenekli katman olmak üzere iki katmandan oluşur. İç bariyer katmanı daha yoğun ve kompaktken dış gözenekli katman ise daha sünek yapıdadır (Şekil 1.2). İç bariyer katmanı yoğun bir yapıya sahiptir ve korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Dış gözenekli katman ise altıgen hücrelerden oluşur ve her hücrenin merkezinde tek bir silindirik gözenek bulunur. Bu yapı, oksit filminin yüzeyinde yüksek bir soğurma özelliği sağlar (Hakimizadvd., 2012; Alshujeryvd., 2022).



Şekil 1. 2.Eloksallı bir alt tabaka katmanı içindeki altıgen bir hücre yapısının görünümü (Scampone ve Timelli, 2022)

Anodizasyon sonucu oluşan gözenekli tabakanın büyüklüğü ve yapısal özellikleri, birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler arasında yüzey pürüzlülüğü, anotlama süresi, akım yoğunluğu, elektrolit tipi ve hücre boyutu gibi faktörler yer almaktadır (O’Sullivan vd., 1970; Scampone vd., 2022).

Literatürde çeşitli anotlama proseslerinin tasarlanması ve parametrelerinin optimize edilmesi için kullanılabilecek farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler arasında ANOVA, Taguchi Yöntemi, Cevap Yüzey Metodolojisi (CYM), Box-Behnken Tasarımı (BBT), Doehlert Tasarımı (DT) ve Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) gibi istatistiksel ve matematiksel yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemlerin her biri, verilen bir veri setinin analiz edilmesinde farklı bir yaklaşım sunmaktadır. ANOVA, duyarlılık analizi ile birlikte, anotlama parametrelerinin optimize edilmesinde kullanılabilecek bir yöntemdir (Milkey vd., 2014; Chen vd., 2022). Taguchi Yöntemi, daha az deneysel çalışma ile yeterli optimizasyon sonuçları üretebilme avantajına sahiptir ve bu da daha ekonomik bir seçenek sunar. Bununla birlikte, hangi optimizasyon yönteminin kullanılacağı araştırmanın yazarları tarafından karar verilir, çünkü deneyler için gereken maliyet, zaman ve kaynakların dikkate alınması gerekmektedir (Chen vd., 2022). CYM, bir sürecin parametrelerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkilerini ve

parametreler arasındaki etkileşimleri belirleyebildiği için daha detaylı bir optimizasyon analizi sağlayabilir. Bu yöntem, daha az sayıda deney ile daha kesin sonuçlar vererek, deneysel çalışmaların maliyetini azaltabilir ve daha verimli bir optimizasyon süreci sağlayabilir (Chen vd., 2021; Chen vd., 2022).

CYM, bağımsız değişkenlerin etkilerini ve aralarındaki etkileşimleri değerlendiren matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir kombinasyonudur ve bir veya daha fazla cevap değişkeni ile ilgili ilişkileri modeller (Dahmoune vd., 2015; Hammoudi vd., 2019). Cevap yüzey metodu, birkaç girdi parametresinin cevaba olan etkisini belirlemek için kullanılır ve sınırlı sayıda deney ile en iyi sonuçların elde edilmesini sağlar. Bu yöntemin diğer optimizasyon yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Deneysel tasarım uygulanarak deneyler gerçekleştirilir ve elde edilen cevaplar kaydedilir. Cevabı önemli ölçüde etkileyen faktörler varyans analizi ile belirlenir. Regresyon denklemleri geliştirilerek cevap tahmin edilir ve süreç parametreleri belirli bir amaç fonksiyonu için optimize edilir (Chelladurai vd., 2021).

Bu araştırmada, 5754 alüminyum alaşımı için eloksal kaplama işlemi parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu parametreler arasında tane boyutu (kaplama işlemi uygulanacak yüzeylerin zımparalandığı zımpara kağıtlarında 1 inç kareye düşen SiC miktarı), akım yoğunluğu ve kaplama süresi yer almaktadır. CYM kullanılarak, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi cevap parametreleri ile değişkenler arasındaki matematiksel ve istatistiksel ilişkiler değerlendirilmiştir. Araştırmada, benzer parametre özelliklerine sahip 5 adet, farklı parametre özelliklerine sahip 15 adet numune kullanılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1.LİTERATÜR ÖZETİ

Yavuz ve Küçükmeroğlu (2022) tarafından yapılan çalışmada alüminyum alaşımasının anodik oksidasyon uygulaması ile yüzey özelliklerini ve aşınma direncini artırmak amaçlanmıştır. Araştırma, uçak motoru pistonları için temsili bir model olarak hizmet veren 7075-T6 alüminyum alaşımasının aşınma özellikleri üzerinde iki farklı anodik oksidasyon türünün, yani sert eloksal ve fosforik kaplamanın etkisini incelemeye odaklanmaktadır. Anodik oksidasyonun etkilerini değerlendirmek için mikro sertlik, sürtünme katsayısı, aşınma direnci, titreşim ve aşınmış yüzeylerin görsel görünümü dahil olmak üzere çeşitli parametreler incelenmiştir. Anodik oksidasyonun test edilen numuneler için sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma direncinde önemli etkiler oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Songur vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) ile işlenen AA7075 alaşımlarının korozyon direnci üzerindeki proses parametrelerinin etkisini Taguchi analiz yöntemi ile incelenmiştir. Bu incelemede akım yoğunluğu, frekans, görev döngüsü ve elektrolit konsantrasyon gibi dört faktör göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak frekansın PEO kaplamaların korozyon direnci üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaplanmamış AA7075 substrattan 476 kat daha iyi olan $2332 \times 10^3 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik en yüksek polarizasyon direnci elde edilmiştir.

Akıncıoğlu (2023) tarafından yapılan çalışmada alüminyum alaşımlarının dayanıklılığını ve yüzey özelliklerini geliştirmek için anodik oksidasyon uygulamasının etkileri incelenmiştir. Sert eloksal ve fosforik kaplama olmak üzere iki farklı anodik oksidasyon biçiminin, uçak motorlarında model piston olarak kullanılan 2017A alaşımasının aşınma özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Anodik oksidasyonun etkisini belirlemek için mikro sertlik, sürtünme katsayısı, aşınma direnci, titreşim ve aşınmış yüzeylerin görsel analizi gibi çeşitli faktörler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuç, anodik oksidasyonun numunelerdeki sertliği, sürtünme katsayısını ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Özcan vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada çeşitli ön yüzey işleme yöntemlerinin AA 6063 alüminyum alaşımasının anodizasyon süreci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Özellikle hidroflorik asit (HF) ve nitrik asit (HNO_3) kullanılarak asidik bir çözelti elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca yağ giderme için Gresoff LIM-5 LV kimyasalı kullanılmıştır. Farklı konsantrasyonların ve işlem sürelerinin sonuçları nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Alüminyum numunelerinin asidik çözeltide aşınmaları incelenmiştir. Optimum aşındırma davranışı, 10

dakika boyunca %1,0 HF konsantrasyonu ve %3,2 HNO₃ konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Ayrıca, en iyi yüzey özellikleri 12 dakika boyunca %1,0 Gresoff LIM-5 LV konsantrasyonu ile gözlemlenmiştir. Anodik oksidasyon daha sonra 180 g/L sülfürik asit (H₂SO₄) ve 18 volt (V) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen alüminyum numunelerin yüzey morfolojisi, pürüzlülük, parlaklık ve kalınlık testlerinin yanı sıra SEM analizi ile incelenmiştir.

Singh vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada anodize titanyumun renk değişiminin analizi ve elektrolitik voltajın titanyumun korozyon davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 17 ila 32 volt arasında değişen voltaj aralıklarında bir sitrik asit banyosu kullanarak saf bir titanyum plaka anodize edilmiştir. Anodize filmi görsel gözlem ve AC Empedans Spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. %3,5 NaCl çözeltisi ve 1 M H₂SO₄ çözeltisinde potansiyodinamik çalışmalar kullanarak korozyon direnci incelenmiştir. Anodize film esas olarak TiO₂ ve Ti₂O₃ 'ten oluşturulmuştur ve voltaj 17 ila 32 volt arasında arttıkça maviden açık griye kadar değişen bir renk spektrumu sergilediği gözlemlenmiştir. Her iki çözeltide de voltaj arttıkça oluşan filmin korozyon direncinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Chung vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada araştırmacılar, farklı ön yüzey işleme yöntemlerinin AA 6061 alüminyum alaşımı için anodizasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Taguchi yöntemini kullanarak elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve anodizasyon süresinin AA6061 alaşımının korozyon direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her bir anodizasyon parametresi, bir dizi L9 ortogonal dizi kullanılarak üç farklı seviyede test edilmiştir. Sonuç olarak en iyi korozyon direnci, 20 dakika boyunca 1 M sülfürik asit içinde 1 A/dm² akım yoğunluğunda anotlama ile elde edilmiş ve $8,516 \times 10^{-11}$ A/cm² korozyon akım yoğunluğuna (I_{corr}) sahip oksitlenmiş bir film elde edilmiştir.

Paz Martine-Viademonte vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada havacılık ve uzay uygulamalarına yönelik anodik oksit koruma katmanlarının ilkeleri ve gereksinimleri ile ilgili yayınlanmış araştırmalara odaklanılmıştır. Ayrıca, eloksal işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Eloksal öncesi ve sonrası işlem adımlarının önemi vurgulanmıştır. Ek olarak, kromik asit eloksalının (KAE) değiştirilmesiyle ilgili zorluklar tartışılmıştır ve tartarik-sülfürik asit eloksalının (TSE) çevre dostu bir alternatif olduğu vurgulanmıştır.

Rueda vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada elektrokimyasal polimerizasyon ile 2024-T3 alüminyum alaşımının sert eloksal kaplamaları üzerinde aşırı oksitlenmiş polipirrol

kaplamaların oluşturulması amaçlanmıştır. Ortalama kalınlığı $4 \pm 0,22 \mu\text{m}$ olan alümina substratlar kullanılmıştır. Polimerik kaplamaları elde etmek için 0,5 M H_2SO_4 ve 0,5 M pirol içeren bir çözelti kullanılmış ve işlem 5°C 'de kuvvetli karıştırma ile gerçekleştirilmiştir. Farklı koşullar altında elde edilen polipirol kaplamalar karşılaştırılmıştır. Darbeli potansiyel kullanılarak elde edilen kaplamalar, ASTM D3359-17 standardına göre %5'ten daha az polimer giderimi ile iyi bir yapışma sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, darbeli potansiyel koşullar sonucu elde edilen kaplamalar, sürekli potansiyel koşulları altında elde edilen kaplamalara kıyasla daha düzgün bir görünüm sergilediği sonucuna varılmıştır.

Dhanish vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada 7075 alüminyum alaşımının CYM ve Taguchi tasarımının uygulanması yoluyla en yüksek korozyon direncine sahip yüzeyleri elde etmek için gerekli koşulların belirlenmesi amaçlanmıştır. Proseslerde tartarik sülfürik asit eloksal (TSE) ve MnVO sızdırmazlık işlemleri kullanılmıştır. Kaplama kalınlığı, voltaj, sıcaklık, sülfürik asit konsantrasyonu, çalkalama, zaman ve tartarik asit konsantrasyonu gibi eloksal parametreleri arasında matematiksel bir model tasarımı oluşturulmuştur. Bu istatistiksel teknikleri kullanarak, maksimum korozyon direncine sahip kaplamalar için optimum koşullar tanımlanmıştır. Optimize edilmiş TSE-MnVO sızdırmaz anodize kaplamaların performansını değerlendirmek için yüzeyler 1000 saat tuz spreylene maruz bırakılmıştır. Optik mikroskopi yoluyla yapılan analiz, NaCl ortamında olağanüstü bariyer özelliklerinin ve kendi kendini iyileştiren korozyon direncinin varlığını ortaya koymuştur. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) ve potansiyodinamik polarizasyon testleri ile özellikle agresif klorür ortamlarında optimize edilmiş kaplamanın olağanüstü koruyucu davranışı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, optimize edilmiş kaplamaların zorlu klorür ortamlarında sergilediği gelişmiş korozyon direnci ve koruyucu özellikleri vurgulanmıştır.

Premchand vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) ve tip II sert anodizasyon (SA) kullanarak yüzey modifikasyon tekniklerine odaklanılmıştır. PEO bazlı seramik oksit kaplamalar, 300 mA/cm^2 akım yoğunluğuna sahip bir alternatif akım (AC) güç kaynağı kullanılarak üretilmiştir. Elektrolitlerin alümina kaplamalar üzerindeki konsantrasyon etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve optimize edilmiştir. İstenen AC-PEO kaplamalarını elde etmek için sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum hidroksit (KOH) oranları 1:3, 1:1 ve 3:1 olan üç farklı sulu elektrolit kullanılmıştır.

Sieber vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada nitrik asit ve oksalit asit ilavesiyle AlCu_4Mg_1 alaşımının sülfürik asit elektrolitindeki anodik oksidasyon süreci incelenmiştir.

Elektrolit bileşiminin proses verimliliği, kaplama kalınlığı ve sertlik üzerindeki etkisini analiz etmek için tam faktöriyel bir deney tasarımı (DOE) kullanılmıştır. Ek olarak, nitrik asit katkısının oksit katmanların oluşumuna etkileri incelenmiştir. Bulguların istatistiksel önemi bir varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, elde edilen kaplamaların bozulma mekanizmalarını ve aşınma direncini değerlendirmek için bir çizik testi uygulanmıştır.

Biltaş (2020) tarafından yapılan çalışmada 6XXX serisi alüminyum alaşımının çeşitli yüzey işlemleri kullanılarak eloksal kapasitesinin artırılmasını amaçlanmıştır. Belirtilen hedeflere uygun olarak, sülfürik asit, oksalik asit, fosforik asit vb. gibi farklı elektrolitler, değişik potansiyel, süre ve sıcaklıkta, farklı kimyasal konsantrasyonlarla alüminyum oksit tabakasının oluşturulması için yöntemler ve teknikler belirlenmiştir. Bu teknikler, homojen, kararlı, çabuk bozulmayan, dış etkilere dayanıklı ve leke vb. gibi kirleticilerden arındırılmış alüminyum oksit tabakalarının oluşturulmasına yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.

Kwalek P. vd. (2020) tarafından yapılan araştırmada 5005 alüminyum alaşımını sert anodize etmek için darbeli akım kullanılmıştır. Akım yoğunluğu ve banyo sıcaklığının anotlama işleminin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha yüksek banyo sıcaklığının, kaplamaların aşınma ve çizilmelere karşı dirençleri gibi mekanik özelliklerinden ödün vermediği gözlemlenmiştir. İncelenen çeşitli eloksal parametreleri arasında, 4 A.dm^{-2} akım yoğunluğu ve 4°C banyo sıcaklığının kaplama üretimi için en az miktarda elektrik enerjisi gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kendirli (2019) tarafından yapılan araştırmada değişik konsantrasyonlarda hazırlanan sülfürik asit (H_2SO_4) ve alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) çözeltileri oluşturulmuştur. Alüminyum yüzeyinde eloksal tabakasının oluşumuna etkisi incelenmek üzere farklı konsantrasyon ve sıcaklık koşulları üzerinde çalışılmıştır. Düşük konsantrasyon-yüksek sıcaklık, yüksek konsantrasyon-düşük sıcaklık ve aynı imalat ortamında konsantrasyon ve sıcaklık değişiminin eloksal tabakaya etkisi her açıdan ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular titizlikle değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Kaya vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada farklı analitik yöntemler kullanılarak, koruyucu alüminyum oksit tabakasının morfolojik mikro yapısal özellikleri, mikro sertlik özellikleri ve bakteriyel tutunma davranışı üzerinde farklı akım yoğunluklarının etkisi

araştırılmıştır. Staphylococcus aureus, yapışma testleri için bir model bakteri olarak kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, kristal morfolojisi, mikro sertlik ve bakteriyel yapışma özelliklerinin uygulanan akım yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Daha yüksek pürüzlülüğe sahip yüzeylerde daha fazla sayıda yapışan bakteri olduğu gözlemlenmiştir.

Mohitfar S.H. vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada 6061-T6 alüminyum alaşım numuneleri, doğru akım kullanılarak sert anodizasyon işlemine tabi tutulmuş ve sağlam anodik kaplamaların oluşumu sağlanmıştır. Çalışma, kaplamaların yüzey morfolojisini, kesitini, sertliğini ve korozyon davranışını analiz etmeye odaklanmıştır. Uygulanan akım yoğunluğunun 55'ten 35 mA cm⁻²'ye düşürülmesiyle, daha az yüzey kusuruna, daha düşük gözenekliliğe ve daha yüksek sertlik değerlerine sahip daha düzgün kaplamalar elde edilmiştir. Deneyler sonucunda ideal elektrolit konsantrasyonu 180 g L⁻¹ olarak belirlenmiş ve optimum sert eloksal süresinin 50 dakika olduğu tespit edilerek minimum kusurlu kaplamalar elde edilmiştir. Optimize edilmiş filmin sertliği yaklaşık 500 HV'ye ulaşmış ve korozyon akım yoğunluğu $3,2 \times 10^{-9}$ A cm⁻² olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, farklı akım yoğunluklarında (30 ila 55 mA cm⁻² arasında değişen), sürelerde (40 ila 100 dakika) ve elektrolit konsantrasyonlarında (25 ila 220 g L⁻¹) üretilen kaplamalar, optimize edilmiş kaplamaya kıyasla daha düşük sertlik ve daha düşük korozyon direnci sergilemiştir. Özellikle, optimize edilmiş kaplamanın polarizasyon direnci çıplak alt tabakayı yaklaşık 1100 kat aştığı gözlemlenmiştir.

Özlü vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada AA6063 alaşımlı alüminyum profillerin anodik oksidasyonu ele alınmıştır. Alüminyumun anot olduğu koşullarda gerçekleştirilen elektroliz işlemi, 180 g/L sülfürik asit içeren bir eloksal banyosuyla yapılmıştır. Çalışmalar, 18 V potansiyel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eloksoz işlemi sonrasında alüminyum oksit kaplama kalınlığı ölçümleri, SEM kesit görüntüleri aracılığıyla alınmıştır. Ayrıca, eloksalı yüzeyden EDX (Enerji Dağılımı X-ışını spektroskopisi) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

2.KURAMSAL TEMELLER

2.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, geniş bir kullanım alanına sahiptir. İnşaat, otomotiv, havacılık, ambalaj, elektronik ve daha birçok sektörde yaygın olarak kullanılır. Aynı zamanda hafiftir, dayanıklıdır, yüksek ısı iletkenliğe sahiptir ve kolayca işlenebilir. Ayrıca oksidasyona ve korozyona karşı dirençli olması da avantajları arasında yer alır.

Tablo 2.1 ‘de alüminyumun temel fiziksel özellikleri verilmiştir:

Tablo 2. 1.Alüminyumun bazı fiziksel özellikleri ¹

Özellikler	Değerleri
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26.98 g/mol
Yoğunluk	2.70 g/cm ³
Erime noktası	660.3 °C
Kaynama noktası	2519 °C
Özgül ısı kapasitesi	0.9 J/g.K
Isıl iletkenlik	237 W/m.K
Elektrik iletkenliği	37.7 MS/m
Kristal yapısı	YMK (yüzey merkezli kübik)
Renk	Gümüşü-Beyaz

¹ "Aluminium- Element information, properties and uses" (Royal Society of Chemistry)

Tablo 2.2 ‘de alüminyum alaşımlarının birleştirilmiş numaralandırma sistemine (UNS) göre numaralandırılmasını göstermektedir. Bu sistem, Amerikan Malzeme ve Test Birliği (ASTM) tarafından kabul edilmiştir.

Tablo 2. 2.Alüminyum alaşımlarının UNS 'ye göre sınıflandırılması ²

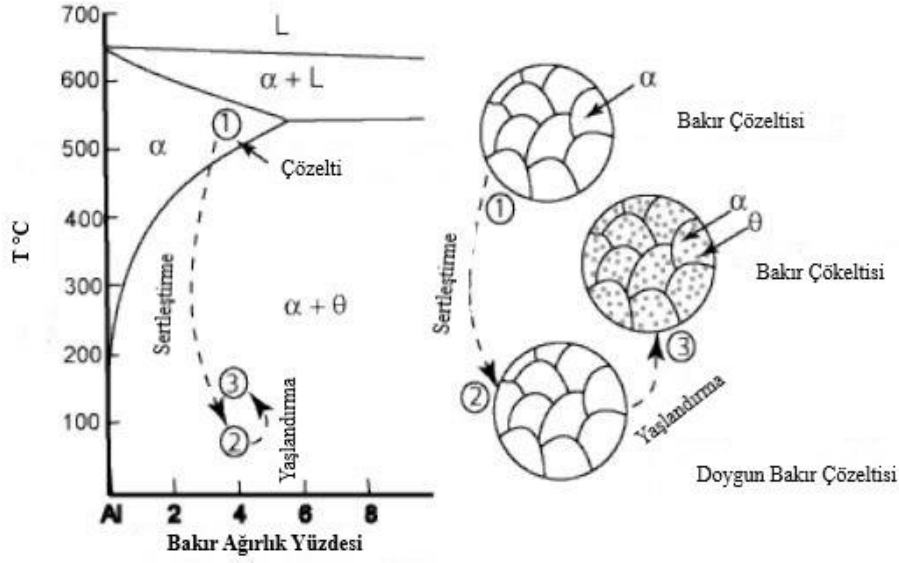
UNS Numarası	Alaşım Serisi	Alaşım Elementleri
A00001 – A99999	Saf Alüminyum	Al
A01000 – A01999	1000 Serisi	Al (%99 veya daha fazla),Mn,Fe,Si,Cu,Zn,Ti,Cr
A02000 – A02999	2000 Serisi	Al (%87 veya daha fazla),Cu,Si,Mg,Zn,Mn,Ti,Cr
A03000 – A03999	3000 Serisi	Al (%96 veya daha fazla),Mn
A04000 – A04999	4000 Serisi	Al (%90 veya daha fazla),Si
A05000 – A05999	5000 Serisi	Al(%97 veya daha fazla),Mg,Mn
A06000 – A06999	6000 Serisi	Al (%95 veya daha fazla),Mg,Si
A07000 – A07999	7000 Serisi	Al (%87 veya daha fazla),Zn,Mg,Cu
A08000 – A08999	8000 Serisi	Diğer Elementler

²“Aluminum Association Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum Finishes and Tempers” ,Aluminum Standards and Data 2020.

2.1.1 Al-Cu Alaşımları

Alüminyum-bakır alaşımları, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan ve Cu’nun ana alaşım elementi olduğu bir alaşım serisidir. UNS sınıflandırma sistemine göre A02000-A02999 arasındaki alaşımlardır. Bu alaşımların özellikleri arasında, termal genleşme katsayısının düşük olması, ısı ve elektriksel iletkenlik değerlerinin yüksek olması yer almaktadır. Al-Cu alaşımları, ısıl işlem yapılabilen alaşımlar olup, yüksek mukavemetleri çökelme sertleştirme yöntemiyle elde edilir. Bu sertleştirme yöntemi, sürecin sıcaklığı ve süresine bağılı olarak çökeltilerin dağılımı, boyutu ve şeklini etkiler. Bu nedenle, alaşımın mekanik özellikleri, çökelme sertleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra değışir (Kenevisi vd., 2021; Gao vd., 2019).

Al-Cu alaşımına, Si, Mg, Mn, Ni, Ti ve Li gibi diğer elementler, alaşımın özelliklerini ve performansını arttırmak için ikincil alaşım elementleri olarak eklenebilir. Bu elementler, alaşımın yorgunluk dayanımını, ağırlık dayanım oranını ve yüksek sıcaklık dayanımını artırarak alaşımın performansını daha da iyileştirir (Kenevisi vd., 2021; Sigworth, 2021).



Şekil 2. 1. Al – Cu faz diyagramı ve ısıt işlemleri ile yapı değişimi ³

³ <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=235>, (Erişim tarihi : 06.06.2023)

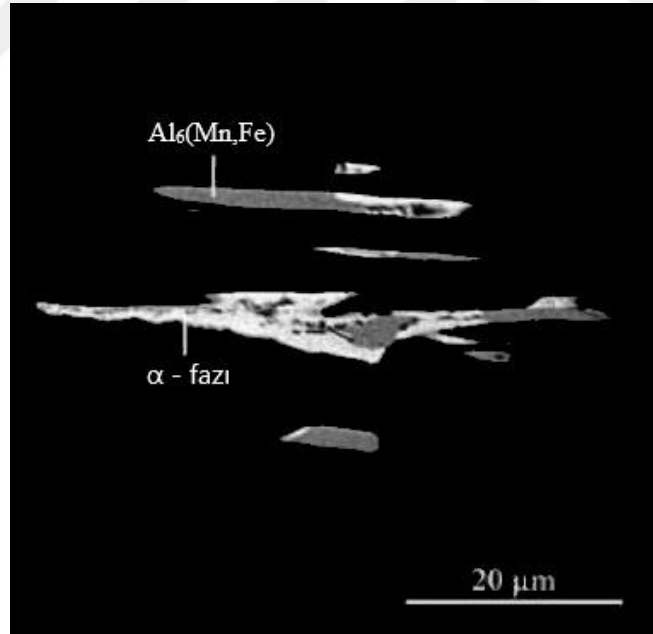
2xxx serisi alüminyum alaşımları, %3-6 oranında bakır içermektedir. Bu alaşımların mukavemet özelliklerinin geliştirilmesi için, çökeltme sertleştirme işlemi kullanılmaktadır. Bu işlem üç temel adımdan oluşmaktadır: çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma. İlk adım olan çözeltiye alma, solvus çizgisinin üzerinde 520°C civarında yapılan 12 saatlik bir işlemdir. Bu işlemde, α fazında bulunan θ (CuAl_2) fazı tamamen eritilerek homojen bir α katı eriyiği oluşması amaçlanmaktadır (Yüksel vd., 2016).

İkinci aşamada, çözeltiye alma işleminden sonra malzeme oda sıcaklığına hızlıca indirilerek su verme işlemi gerçekleştirilir. Soğutma hızı, α katı eriyiği içindeki θ fazının difüzyonunu engelleyerek, α fazı içinde hapsolmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. α fazı, bu aşamada aşırı doymuş ve kararsız bir halde bulunur (Yüksel vd., 2016).

Çökeltme mukavemetlendirmesi işleminin üçüncü adımı olan yaşlandırma işlemi, α fazından θ fazının çökmesini sağlamak için solvus eğrisi altındaki belli bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletme işlemidir. Bu işlem doğal veya suni yaşlandırma şeklinde gerçekleştirilebilir ve sıcaklık parametreleri bu seçimi belirler. Eğer yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilirse, doğal yaşlandırma olarak adlandırılırken, solvus sıcaklığının altında bir sıcaklığa ısıtılarak gerçekleştirilen yaşlandırma suni yaşlandırma olarak adlandırılır (Yüksel vd., 2016).

2.1.2 Al-Mn Alaşımları

Al-Mn alaşımları yani 3xxx serisi alüminyum alaşımları, ticari olarak önemli olan alaşımlardır. UNS sistemine göre A03000-A03999 arasında sınıflandırılırlar. Bu alaşımlar genellikle ana alaşım elementi olarak % 0.5-1.5 Mn içerir. Al-Mn alaşımına Fe ile Si gibi eklemeler yapılır. Mn, alaşımı çekme dayanıklı hale getirirken, Fe ile birlikte kullanıldığında döküm kolaylığını artırır ve alaşımın katılaşma sürecinde çekilme miktarını azaltır. 3xxx serisi levha ve borularının yaygın olarak kullanılmasının nedeni, güçlölük ile şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, anodizasyon davranışı ve korozyon performansının olumlu bir kombinasyonuna sahip olmalarıdır (Engler vd., 2021; Kaufman, 2000). Bu seri, özellikle içecek kutuları için en yaygın kullanım alanına sahiptir. Çünkü bu alaşım serisi, presleme, haddeleme ve üzerine çizim veya baskı yapmak için idealdir. İçecek kutularının üretiminde olduğu kadar, ambalajlama işlemlerinde, bina cephe kaplamalarında, ev aletlerinin gövdelerinde de tercih edilir. Bunun nedeni, kolay şekil alabilme özelliğine sahip olması, kolayca kaynaklanabilmesi, anodik bir yapıya sahip olması ve korozyona karşı direnç göstermesidir. Ayrıca, yüksek sıcaklık performansı nedeniyle ısı boruları gibi uygulamalarda da kullanılır.



şekil 2. 2. 3xxx serisi alüminyum alaşımlarında görölen ara metalik çökeltilerin SEM görüntüleri ⁴

⁴ Alexander, D.T.L., Greer, A.L., Solid-state intermetallic phase transformations in 3xxx aluminium alloys. *Acta Mater.*, 50(10), 2571–2583, 2002.

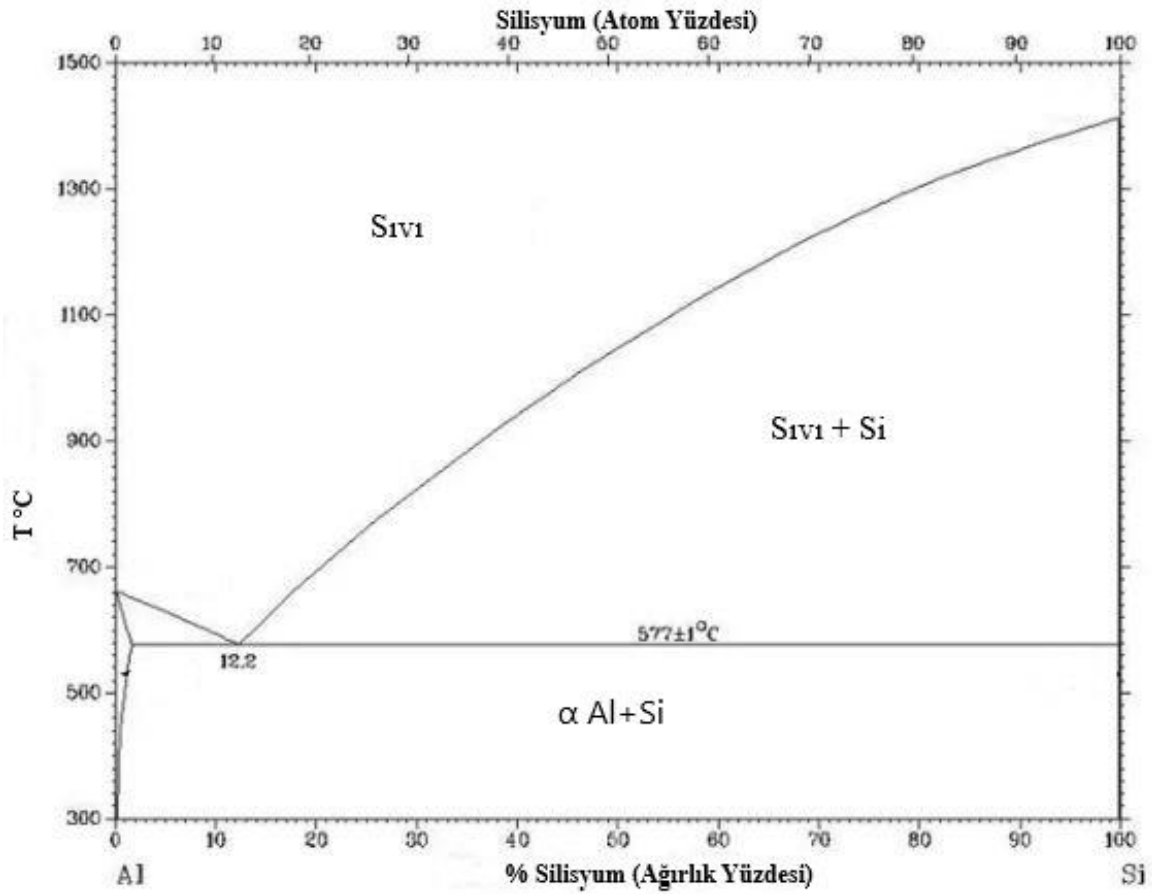
Mangan elementi, alüminyum içerisinde sınırlı bir katı özünölüğüne sahiptir. Örneğin, 3004 gibi alüminyum alaşımlarında demir ve mangan oranı, Al₆(Mn,Fe) ara metalik oluşumunu

azaltmak amacıyla %1,7'nin altında tutulur. 3xxx serisi alaşımlar, yüksek şekillendirilebilirlikleri ve korozyon dayanımları açısından işlem alaşımları içerisinde en çok tercih edilen alaşım serisidir. Manganın bir kısmı, ötektik reaksiyonlarla α Al(Mn,Fe)Si ve $Al_6(Mn,Fe)$ ara metalik çökeltileri oluşturur. Bu ara metalik fazlar, malzemeye mukavemet sağlar. Ayrıca, ara metalik çökeltiler, dislokasyon dağılımını etkileyerek kafes eğilimlerine neden olabilir ve çekirdeklenme hızını etkileyebilir. İlgili ara metalik fazların SEM görüntüleri Şekil 2.2' de temsil edilmektedir (Malcıoğlu, 2022).

2.1.3 Al-Si Alaşımları

UNS sınıflandırma sistemine göre A04000-A04999 arasındaki alaşımlardır. 4xxx serisi alaşımlar, içerdikleri silisyum (Si) elementi nedeniyle (%12'ye kadar) düşük süneklik özellikleri gösteren alaşımlardır. Bu alaşımlarda Si, malzemede ara metalik çökeltiler şeklinde bulunur, ancak aynı zamanda Si molekülleri malzemeyi kırılgan hale getirir. Bu nedenle, bu seri son derece düşük şekillenebilme özelliğine sahiptir ve uygulama alanları oldukça sınırlıdır. 4xxx serisi alaşımların kullanımı genellikle düşük erime sıcaklığından dolayı kaplamalar veya kaynak için dolgu malzemesi olarak sınırlıdır. Dökümde ise çoğunlukla yüksek Si içeren alaşımlar tercih edilir. Si elementi, malzemeye yüksek rijitlik ve düşük süneklik özellikleri kazandırır. Özellikle yüksek oranda Si içeren alüminyum-silikon alaşımları, döküm endüstrisinde geniş ölçüde kullanılır. Bu alaşımlar, döküm sırasında yüksek akışkanlık gösterir ve aynı zamanda soğuma işlemi sırasında Si elementi büzülmenin engellenmesine ve genleşme katsayısının azaltılmasına yardımcı olur. Ancak, yüksek miktarda Si kullanılması durumunda malzeme düşük süneklik özelliklerine sahip olabilir.

Al-Si alaşımları, Si içeriği açısından farklı sınıflandırmalara tabi tutulur. Alaşımların %12,6'dan az Si içerenleri "ötektik altı", %10-13 Si içerenleri "ötektik" ve %12,6'dan fazla Si içerenleri "ötektik üstü" olarak adlandırılır. Al-Si faz diyagramında görüldüğü gibi (Şekil 2.3), ötektik reaksiyon 577 °C 'de gerçekleşir ve alüminyum içindeki Si çözünürlüğü maksimum %1,65'tir (Canbaz, 2021; Zamani, 2017).



Şekil 2. 3. Al-Si faz diyagramı ⁵

⁵ (Murray ve McAlister, 1984, The Al-Si system, Bulletin of alloy phase)

Ticari alüminyum alaşımları genellikle silisyum yanı sıra bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım elementlerini de içerir. Ötektik reaksiyondan sonra, bakır ve magnezyumun oluşturduğu ara metalik fazlar ortaya çıkar. Bu ara metalik fazlar, alaşımın mekanik ve termal özelliklerini etkiler. Bu durumda, Al-Si alaşımları farklı sınıflara ayrılır ve silisyum içeriğine bağlı olarak özelliklerini gösterir. Ticari alaşımlar, silisyumun yanı sıra diğer alaşım elementlerini içerir ve ötektik reaksiyondan sonra ara metalik fazlar oluşur. Bu fazlar, alaşımın özelliklerini belirlemekte önemli bir rol oynar (Canbaz, 2021; Zamani, 2017).

2.1.4 Al-Mg Alaşımları

Al-Mg alaşımları, mekanik özelliklerinin geniş bir aralıkta değişebilmesi nedeniyle çeşitli avantajlara sahiptir ve bu özellikler sayesinde farklı alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. UNS sistemine göre A05000-A05999 arasında sınıflandırılırlar. Bu alaşımlar, özellikle deniz atmosferinde yüksek korozyon direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, mükemmel kaynak yapma özellikleri, hafiflik, balistik özellikler ve yumuşak

temperlerde yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti gibi birçok özelliği bir araya getirir. Bu alaşımların mekanik özellikleri, magnezyum içeriği ve diğer alaşım elementlerinin bileşimiyle belirlenir. Bu sayede, farklı uygulamalara yönelik çeşitli mühendislik gereksinimlerine cevap verebilecek geniş bir yelpazede alaşım seçenekleri sunulmaktadır. Örneğin, denizcilik sektöründe kullanılan alüminyum magnezyum alaşımları, tuzlu suya maruz kaldıklarında korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Aynı zamanda havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan bu alaşımlar, hafiflikleri ve mükemmel mukavemetleri sayesinde yakıt verimliliğini artırırken güvenliği de sağlar (Ök, 2021; Raju vd., 1992).

Al-Mg alaşımları ayrıca farklı sıcaklık koşullarına karşı dayanıklılık gösterir. Yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini korurken, düşük sıcaklıklarda dahi kırılmaya karşı direnç gösterirler. Bu özellikleri, uçak motorları gibi yüksek sıcaklıkta çalışan uygulamalarda ve kriyojenik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar. Kaynak yapma sürecinde ise alüminyum magnezyum alaşımları kolaylıkla kaynaklanabilir ve çeşitli kaynak yöntemlerine uyum sağlar. Bu da üretim süreçlerinde kolaylık ve esneklik sağlar.

Sonuç olarak, alüminyum magnezyum alaşımları, geniş bir özellik yelpazesine sahip olmaları ve farklı uygulamalarda gereksinim duyulan özellikleri bir araya getirmeleri sayesinde çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan önemli malzemelerdir.

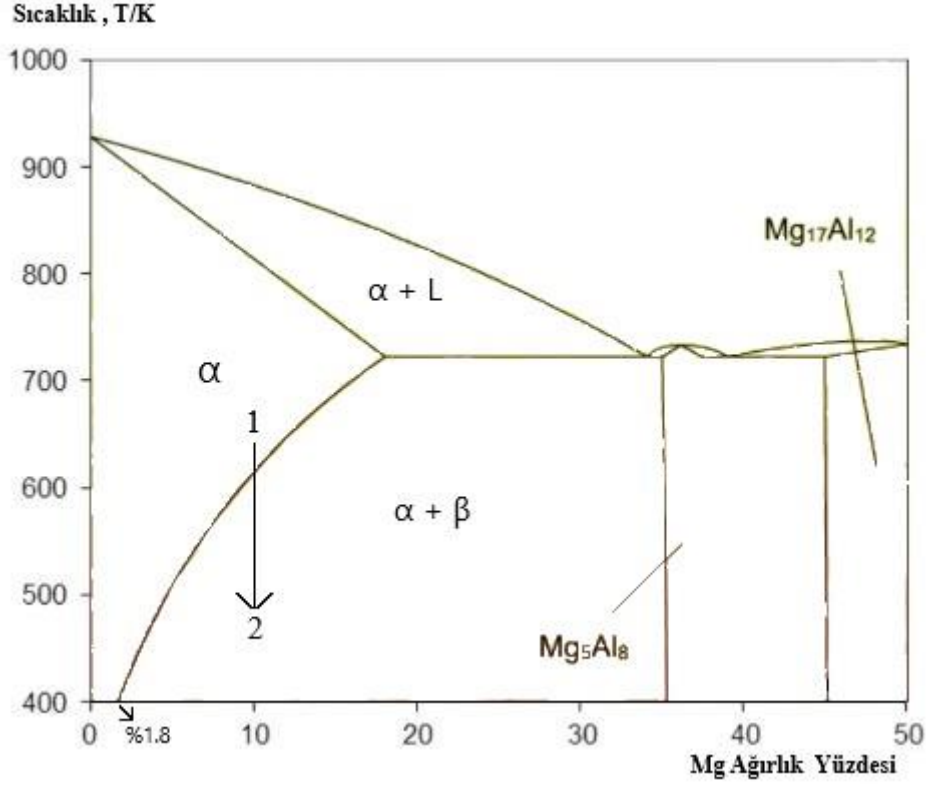
Bu tez çalışmasında kullanılacak olan 5754 alüminyum malzemelerin kimyasal birleşimleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2. 3.5754 alüminyum malzemelerin kimyasal bileşimi ⁶

Malzeme	% Fe	% Si	% Cu	% Mn	% Mg	% Ti	% Zn	% Cr	% Al
Al 5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,15	0,2	0,3	Geri Kalan

⁶Metals Handbook (1979). American Society for Metals, 2.

Al-Mg alaşımları, alüminyum alaşımları içinde önemli bir yere sahiptir. Bu alaşımlar, magnezyumun içeriğine bağlı olarak %6'ya kadar magnezyum içerirler. Alüminyum ve magnezyum arasındaki dengeli bir diyagram, Al-Mg denge diyagramı olarak bilinir ve Şekil 2.4'de gösterilir. Bu alaşımlar, ısıtılımlerle sertleştirilemezler, yani sertliklerini artırmak için ısıtılımlere ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine, mekanik özellikleri genellikle soğutma hızı ve deformasyon yöntemleriyle iyileştirilir. Magnezyumun alüminyum matrisindeki çözünürlüğü sınırlı olduğundan, magnezyum genellikle ikincil faz olarak çökeltiler veya ara metalik bileşikler formunda bulunur.



Şekil 2. 4.Al-Mg denge diyagramı ⁷

⁷Metals Handbook (1979). American Society for Metals, 2.

Alüminyum magnezyum alaşımlarında magnezyum konsantrasyonu önemli bir faktördür. Magnezyum konsantrasyonu %3'ün altında olan alaşımlarda, mukavemet özellikleri ve kaynak kabiliyeti azalır. Bu durum, alaşımın dayanıklılığını ve işlenebilirliğini etkiler. Ancak, magnezyum konsantrasyonu arttıkça, alaşımın mukavemet özellikleri artar.

Öte yandan, magnezyum konsantrasyonu %3'ün üzerinde olan alaşımlar daha yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu tür alaşımlar, teknik saf alüminyuma göre daha yüksek mukavemet sağlarlar. Ayrıca, sert temperleme işlemine tabi tutulmuş olsa bile, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda malzeme yapısı kararlı kalmaktadır. Kaynak kabiliyeti ve yüksek mukavemetin gerektiği uygulamalarda ise %3,5 'in üzerinde magnezyum içeren alaşımlar tercih edilir. Bu tür alaşımlar, kaynak işlemlerinde daha iyi performans gösterirken, yüksek mukavemet gereksinimlerini karşılarlar (Sarıtış, 1995; Ök, 2021).

2.1.5 Al-Mg-Si Alaşımları

UNS sınıflandırma sistemine göre A06000-A06999 arasında yer alan bu alaşımlar, olağanüstü bir şekilde korozyona karşı direnç sağladıkları için tercih edilirler. Ayrıca yüksek mukavemet, kolay şekillendirilebilirlik, yüksek korozyon direnci ve kaynak yapabilme yetenekleri gibi özellikleri bir arada barındırır. Bu özellikler sayesinde, çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Örneğin, ulaşım sektöründe araçların dış cephelerinde, bina yapılarında (kapılar, pencereler, merdivenler), denizcilikte ve ısıtma sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar.

Özellikle ekstrüde 6xxx serisi alaşımlar, işlenmiş ürünlerin üretiminde sıkça tercih edilir. Bu seriye bizmut ya da kalay gibi elementler eklenmesi, işlenebilirliğini önemli ölçüde artırır. Bu alaşımlar, sertlik, iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemet gibi özelliklerin gerektiği yerlerde kolaylıkla anotlanabilir. Özellikle sert fren sistemleri, çekilmiş parçalar, elektronik valfler, pistonlar vb. gibi bileşenlerin eloksal işlemleri için tercih edilirler.

6xxx serisinin başlıca alaşım elementleri Silikon (Si) ve Magnezyum (Mg) olup, bu elementler alaşımın mekanik özelliklerini kontrol etmektedir. Isıl işlem sürecinde çökelme yaparak alaşımın mekanik özelliklerini belirginleştirirler. Isıl işlem sürecindeki çökelme, Silikon ve Magnezyum elementlerinin alaşım matrisinde düzenli bir şekilde bir araya gelmesini sağlar. Bu çökelmeler, alaşımın sertlik, mukavemet ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini artırır. Aynı zamanda alaşımın şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği üzerinde de etkili olurlar.

Silikon, alaşımın sıcaklığa bağlı olarak çökelme hızını kontrol eder. Magnezyum ise çökelmelerin büyüklüğünü ve miktarını belirler. Bu şekilde, 6xxx serisi alaşımların mekanik özellikleri, Silikon ve Magnezyumun etkileşimiyle kontrol edilir ve istenen özelliklere göre optimize edilir. Sonuç olarak, 6xxx serisi alaşımların mekanik özellikleri, Silikon (Si) ve Magnezyum (Mg) gibi elementlerin çökelme süreciyle kontrol edilir. Bu elementlerin bir araya gelmesi, alaşımın sertlik, mukavemet ve işlenebilirlik gibi önemli özelliklerini belirginleştirir ve istenen performansı sağlar (Özdoğru, 2023).

2.1.6 Al-Zn-Mg Alaşımları

Al-Zn-Mg alaşımları, UNS sistemine göre A07000-A07999 arasında sınıflandırılırlar. Bu seri, termal işlem (kelme sertleşmesi) yoluyla glendirilebilen, çinko (genellikle %4-6 ağırlıkça) ve magnezyum (%1-3 ağırlıkça) kombinasyonuna dayanan çok güçlü ısıl işlemlik alaşımlar olarak adlandırılabilir. İşlem sırasında, çinko ve magnezyum elementleri, alaşımın mikro yapısında düzenli bir şekilde çökelir ve mekanik özelliklerini arttırır. Bu güçlendirme mekanizması, alaşımın yüksek mukavemet ve dayanıklılık seviyelerine ulaşmasını sağlar. Ancak, bu alaşımlar stres korozyonuna karşı hassas olabilir. Bu, alaşımın stres altında korozyona uğrama eğilimini ifade eder. Bu nedenle, bu alaşımların kullanıldığı uygulamalarda uygun koruyucu kaplamalar ve bakım önlemleri alınması önemlidir.

Bu alüminyum serisi, üstün mukavemeti sayesinde havacılık, uzay, askeri ve nükleer uygulamalar gibi önemli kritik alanlarda kullanıldığı gibi, inşaat sektöründe ve yüksek dayanıklılık gerektiren spor ekipmanlarının üretiminde de tercih edilir. Alüminyum-inko-magnezyum alaşımları için, alaşımın mukavemetini önemli ölçüde arttırmak için çok az miktarda Cr, Mn ve Cu gibi elementlerin eklenmesi söz konusu olabilir. Bu alaşımlar, yaşlandırma sertleşmesi ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerde 600 MPa değerlerine kadar ulaşabilme potansiyeline sahiptir. Al-Zn-Mg-Cu dörtlüsü, diğer alaşımlara kıyasla daha iyi sonuçlar verir.

Cu elementi, yaşlandırma oranını ve su verme hassasiyetini artırırken, Zn ve Mg elementleri yaşlandırma sürecini kontrol eder. Cu, genel korozyon direncini azaltmasına rağmen, stres korozyonuna karşı direnci artırır. Ayrıca, Cu'nun Si, Fe ve Zn içeren alaşımlarla kombinasyonu, alaşımın sertlik ve mukavemetini büyük ölçüde artırabilir. Mg ile kombinasyonunda ise ani sertleşme elde etmek mümkündür. Öte yandan, %10'dan fazla Zn içeren alaşımlar, stres korozyonuna karşı direnci azaltabilir. Bu nedenle, Zn miktarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi önemlidir. Ayrıca, alüminyum içerisindeki Zn varlığı, alaşımın çözünürlüğünü artırır ve koruyucu kaplama ve anot olarak kullanılabilir.

2.1.7 Al-Li Alaşımları

Al-Li alaşımları, lityumun ana alaşım elementi olduğu ve isteğe bağlı olarak kalayın eklenmesinin mümkün olduğu özel alaşımlardır. Bu alaşımlar, diğer alüminyum alaşımlarıyla karşılaştırıldığında iyi yorulma dayanımı gösterir ve yüksek dayanım özelliklerine sahiptir. Bu zellikler, hafiflik, mukavemet ve sertlik gibi kritik faktörlerin önemli olduğu havacılık ve uzay endüstrisinde büyük avantajlar sağlar. Ancak, Al-Li alaşımlarının üretim maliyetleri diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksektir. Bu, lityumun nispeten nadir bir element olmasından ve alaşımın özel üretim prosesleri gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, Al-Li alaşımlarının yaygın kullanımı bazı uygulamalarda maliyet etkin olmayabilir (Burmabıyık, 2019).

2.2 Yüzey Kaplama Prosesleri

Günümüzde, elektrolitik ve akımsız kaplamaların elektrokimyasal prensipleri daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu durum, akademi ve endüstri alanında geliştirilen gelişmiş kaplama banyolarının yaygın olarak kullanılmaya devam etmesini sağlamıştır. Kaplama işlemlerinin başlangıcında sabit voltaj, potansiyostatik ve piller gibi kaynaklar kullanılırken, günümüzde geliştirilen modern güç kaynakları, hassas akım kontrolü sağlayarak mikron altı ve nanometre kalınlığındaki kaplamaların bile kontrolünü mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, banyo kimyası ve anot şekli gibi faktörlerle birlikte daha yüksek kaplama hızı, daha homojen kaplamalar, düzensiz şekillere daha iyi kaplama, güvenilir kaplamaların yanı sıra platin, osmiyum ve rutenyum gibi metallerin kaplanması gibi çeşitli seçenekler sunmuştur. Elektronik endüstrisinde, manyetik kayıt cihazları için GMR (devinime bağlı direnç) ile entegre devrelerin ve çok katmanlı filmlerin retilimi için elektrolitik uygulamaların geliştirilmesi çalışmaları da devam etmektedir (Algül, 2020).

2.2.1 Bakır Kaplama

Birçok durumda, korozyonu engellemek, diğer metal kaplamalarla ara tabakalar oluşturmak ve elektronik basılı devreler ile elektro şekillendirme için, genellikle bakır kaplamalar kullanılır. Bakır kaplamalar, dekoratif amaçlarla da tercih edilir ve çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. Özellikle koroziye etkilere maruz kalan yüzeylerde, bakır kaplamaların koruyucu özellikleri sayesinde metalin dayanıklılığı artırılır ve uzun ömürlü bir yüzey sağlanır. Elektronik endüstrisinde, bakır kaplamalar, basılı devre kartlarının iletkenlik özelliklerini iyileştirmek ve sinyal iletimini optimize etmek için kullanılır. Ayrıca, elektro şekillendirme işlemlerinde de bakır kaplamalar, metalin mkemmek elektriksel iletkenlik

özelliğinden faydalanarak istenilen şeklin kolayca oluşturulmasına yardımcı olur. Tüm bu faktörler, bakır kaplamaların çeşitli amaçlarla yaygın bir şekilde tercih edilmesini sağlamaktadır.

Bakır kaplama,4 şekilde yapılır:

- a) Asit banyoları (sülfat, fluoborat banyoları)
- b) Alkali siyanür banyoları (seyreltik)
- c) Pirofosfat banyolar (nötr karakterli banyolar)
- d) Özel banyolar (etilendiamin, sülfamat, fosforik asit)

2.2.2 Nikel Kaplama

Nikel kaplama, beyaz renkli bir metal kaplama olup yüksek mekanik dayanıklılık sağlar ve oksitlenmeye karşı dirençli bir yüzey oluşturur. Yüzeyi atmosferle temas ettiğinde bir oksit tabakası oluşur. Korozyon direncini artırmak ve dekoratif amaçlarla, nikel kaplamalar ayrıca krom kaplamalarla kaplanır. Kaplama tabaka kalınlıkları, çok ince tabakalardan (0,5 mm) daha kalın tabakalara kadar değişebilir. Ayrıca, renkli bir seçenek olarak siyah nikel kaplamalar da mevcuttur. Bu kaplama yöntemi, estetik beklentilere uyum sağlarken aynı zamanda dayanıklılığı ve koruma özelliklerini artırır. Nikel kaplamalar, birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen bir seçenek olmuştur ve çeşitli avantajları sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

Nikel kaplamaları için kullanılan banyolar genellikle Watts banyolarının temel prensibine dayanarak oluşturulur. Bu banyolar, çalışma ortamına bağlı olarak yüksek pH seviyesine sahip veya yüksek miktarda klorür iyonu içeren bileşenlere sahiptir. Nikel kaplama banyolarının başlıca bileşenleri arasında NiSO_4 (nikel sülfat), NiCl_2 (nikel klorür) ve H_3BO_3 (borik asit) bulunur. Bu bileşenler, kaplama işleminin doğru şekilde gerçekleşmesini sağlar ve istenen nikel kaplama kalitesini elde etmede önemli rol oynar. Banyo bileşenlerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi, banyonun stabilitesini ve performansını sağlamak için önemlidir. Nikel kaplama banyoları, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve istenilen nikel kaplama özelliklerini elde etmek için doğru bileşenlere ve banyo koşullarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

2.2.3 Krom Kaplama

Krom kaplama, genellikle iki temel amaç için tercih edilir. İlk olarak, parlak ve matlaşmayan bir yüzey elde etmek hedeflenir. Bu sayede, kaplanan parçalar estetik açıdan çekici bir görünüme sahip olur. İkinci olarak, parça yüzeylerine bazı önemli mekanik özellikler kazandırmak amaçlanır. Bunlar arasında sertlik, aşınmaya dayanıklılık ve düşük sürtünme katsayısı gibi faktörler bulunur. Krom kaplama işlemi, kaplanacak parçaların dayanıklılığını artırarak uzun ömürlü ve işlevsel bir yüzey sağlar. Ayrıca, krom kaplama parçaların korozyona karşı dirençli olmasını sağlar, böylece parçaların kullanım ömrü uzar. Bu nedenle, krom kaplama endüstride ve dekoratif uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir kaplama yöntemidir.

Krom kaplama genellikle bir üst kaplama olarak tercih edilir. Bu nedenle, daha önce kaplanmış olan parçaların atmosferik etkilerden zarar görmesini engeller ve yüzeydeki çatlakları kapatır. Krom kaplama, alt kaplamayla birlikte uyumlu bir şekilde çalışarak birbirini tamamlayıcı bir unsur olarak görev yapar. En iyi kaplama sonuçları genellikle bakır, nikel ve krom üçlüsü ile elde edilir. Bu üçlü kombinasyon, kaplanan yüzeyin mükemmel koruma, estetik ve dayanıklılık özellikleri kazanmasını sağlar. Ayrıca, siyah krom kaplama da talep edilen bir kaplama seçeneğidir. Bu kaplama yöntemi, özel bir görünüm sağlayarak parçalara benzersiz bir estetik ve tarz katmaktadır. Krom kaplamanın çeşitli avantajları sayesinde endüstride ve dekoratif uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

2.2.4 Eloksal Kaplama

Kaplama türlerinden biri olan eloksal diğer bir ifade ile anodik oksidasyon, malzeme yüzeyi üzerinde elektrokimyasal bir yöntemle kontrollü bir oksit tabakası oluşturulması esasına dayanan bir prosestir. Eloksal kaplama prosesinin birçok parametreleri mevcuttur. Bunlar; malzemenin yüzey pürüzlülüğü, uygulanan voltaj değeri, banyodaki asit içeriği, elektrolit konsantrasyonu, sıcaklık ve süredir. Bu parametrelerin değişkenliğine bağlı olarak oluşturulan oksit tabakanın mekanik özellikleri farklılık gösterir. Yüzeylerde, kuvvetlice tutunmuş oksit tabaka oluşturmak için ön yüzey hazırlama işlemi son derece kritiktir. Söz konusu yüzey hazırlama işlemleri; yüzeyi pürüzsüz hale getirme, yağ alma, durulama, matlaştırma, durulama, nötralizasyon ve tekrar durulama olmak üzere ardışık bir dizi banyoda yapılmaktadır.



Şekil 2. 5.Endüstride Kullanılan Eloksal Kaplama Havuzu Örneği ⁸

⁸ https://akpaas.com.tr/eloksal/#iLightbox/gallery_image_1/1 (Erişim Tarihi : 10.07.2023)

Eloksal kaplama işlemi sonunda alüminyum malzeme üzerinde oksit tabaka meydana gelir. Bu oksit tabakanın kalınlığı uygulanan eloksal proseslerine göre değişiklik gösterir. Oluşan oksit tabaka korozyon ve aşınma direncini artırır. Eloksal prosesinin titizlikle yapılması önemlidir aksi halde oluşan oksit tabaka malzemenin her noktasında aynı kalınlıkta olmayabilir. Yani malzeme yüzeyinde dalgalanma şeklinde oksit tabakalar meydana gelir. Ayrıca malzemenin eloksal havuzunda tutulma süresi ve uygulanan voltaj değeri de oldukça önemlidir. Süre ve voltaj değeri doğru uygulanmazsa malzeme yüzeyinde yanma meydana gelir.

2.2.4.1 Eloksal Kaplama Proses Aşamaları

Eloksal kaplamanın sorunsuz gerçekleşmesi için malzeme yüzeyinin titizlikle işlenmesi önemlidir. Bu çalışmada malzeme eloksal havuzuna girmeden önce birtakım işlemler prosesin uygunluğuna göre yapıldı. Öncelikle 5754 alüminyum alaşımı numunelerinin yüzeyi 400 lük 800 lük ve 1200 lük zımparalar ile polisaj işlemi uygulandı. Daha sonra numuneler yağ alma banyosuna daldırıldı. Yağ alma banyosunda %4-6 oranında alkali temizleme kimyasal konsantrasyonu (100 lt ye 5 kg) kullanıldı. Bu yağ alma banyosunun sıcaklığı 50-55 °C de tutuldu. Numuneler yağ alma banyosundan çıkarıldıktan sonra su ile nötralizasyonu yapılarak

durulandı. Durulama işleminden sonra numunelerin yüzeylerini matlaştırmak için kostik (NaOH) banyosuna daldırıldı. Numuneler bu banyoda 10-15 dakika süre ile bekletildi. Kostik banyosu %10-12 oranında kostik konsantrasyonu içermektedir. Bu işlemten sonra numuneler su ile durulandı. Daha sonra nötralizasyon için nitrik asit banyosuna daldırıldı. Bu banyodaki nitrik asit konsantrasyonu % 20-25 oranında kullanıldı. Daha sonra tekrar su ile iyice durulandı. Bu durulamanın iyi yapılması önemli çünkü nitrik asit eloksal havuzunda bulunan sülfürik asit oranını düşürür.

Bu işlemlerden sonra numuneler artık eloksal havuzuna girmeye hazır hale geldi. Elokshal havuzunda sülfürik asit ve su konsantrasyonu kullanıldı. Havuz sıcaklığı 14-15 °C de tutuldu. Havuz içerisinde çözünmüş alüminyum oranı %5-6 oranında tutuldu. Çözünmüş alüminyum oranı maksimum %12 olmalıdır. Katot olarak kurşun malzeme kullanıldı. Elokshal voltaj değeri numunelere göre 8 volt, 12 volt ve 16 volt olarak uygulandı. Numunelerin havuzda tutulma süreleri 10 dakika, 20 dakika ve 30 dakika olarak uygulandı.

Elokshal havuzunda çıkarılan numuneler su ile durulandı. Daha sonra soğuk tespit işlemi uygulandı. Bu uygulamadan sonra tekrar su ile yıkanıp durulandı. Durulama işleminin ardından numuneler aparatlar yardımıyla asılarak 25-30 dk aralığında kuruması beklendi. Numunelerin kurutulmasıyla eloksal prosesi tamamlandı.

2.2.5 Sert Elokshal Kaplama

Sert elokshal kaplama, normal elokshal kaplamaya göre daha yüksek voltajlarda gerçekleştirilen bir prosestir. Oluşturulan oksit tabaka korozyon ve aşınmaya karşı daha yüksek koruma sağlar. Oksit tabaka kalınlığı yüksek olduğundan sert elokshal kaplama daha yüksek sertlik ve düşük aşınma değerlerine sahiptir. Normal elokshal kaplama daha çok mimari açıdan tercih edilirken sert elokshal kaplama ise havacılık, otomotiv, uzay vb, sektörlerde yaygın olarak kullanılan yüzey işlemlerinden biridir.

2.3 Kaplamanın Kalitesine Etki Eden Faktörler

2.3.1 Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu, kaplama hızının artmasına ve daha ince taneli bir yapı oluşmasına neden olur. Ancak akım yoğunluğu daha da arttığında, katot bölgesinde meydana gelen metal iyonları çözeltiden yeterince karşılanamaz. Bu durumda katotta bir fakirleşme meydana gelir ve sonucunda kaplama homojen olmaz. Bunun yerine, siyah ve süngerimsi bir kaplama oluşur ki, buna "yanmış kaplama" denir. Bu durumda, kaplama işlemi istenen sonuçları vermez ve

kaplanan yüzeyde istenmeyen bir görünüm oluşur. Bu nedenle, kaplama işleminde akım yoğunluğu dikkatli bir şekilde ayarlanmalı ve optimum seviyede tutulmalıdır. Böylece homojen ve istenilen özelliklere sahip bir kaplama elde edilebilir.

2.3.2 Konsantrasyon ve Karıştırma

Kaplamanın yapısal özellikleri üzerinde konsantrasyonun etkisi büyük önem taşır. Konsantrasyonun artması, tanelerin oluşum hızını artırır ve sonuç olarak ince yapılı ve sıkıca yapışmış bir kaplama elde edilir. Katottaki bölgesel fakirleşmeyi dengelemek için, kaplama banyosunun düzenli bir şekilde karıştırılması önemlidir. Ancak, fazla karıştırma işlemi, kaplama gücünü azaltabilir ve banyoda çamur veya diğer partiküllerin süspansiyon halinde kalmasına neden olabilir, bu da kaplama kalitesini olumsuz etkiler. Bu nedenle, kaplama banyolarının düzenli olarak süzülmesi gereklidir. Böylece, banyodaki olumsuz etkileri minimize ederek kaplama işleminin istenen kalite ve homojenlikte gerçekleşmesi sağlanır.

2.3.3 Sıcaklık

Sıcaklığın kaplama süreci üzerinde iki karşıt etkisi vardır. Bir yandan, sıcaklık arttıkça difüzyon hızı artar ve bu da daha küçük taneli bir yapı oluşumuna katkı sağlar. Ancak, diğer yandan, sıcaklık artışı katot polarizasyonunu azaltır ve daha büyük taneli yapıların oluşmasına neden olabilir. Ayrıca, sıcaklık artışıyla birlikte kaplama süngerimsi bir görünüm alabilir. Orta sıcaklıklarda birinci etki daha belirginken, yüksek sıcaklıklarda ikinci etki daha belirgin hale gelir. Bu nedenle, uygun sıcaklık değerinin belirlenmesi için deneyler yapılması önemlidir. Bu deneyler, istenilen kaplama yapısını elde etmek için en uygun sıcaklık aralığını belirlemeye yardımcı olur.

2.3.4 Kaplanan Metalin Etkisi

Kaplama işlemi için seçilen metalin türü, kaplamanın yapışma yeteneği açısından büyük bir öneme sahiptir. Bazı metaller, diğer metallerle iyi birleşme özelliği gösterir. Örneğin, bakır bu özelliklere sahiptir ve bu nedenle galvanoteknik uygulamalarda destek metal olarak yaygın olarak kullanılır. Ancak, nikel, demir, çinko, kurşun, kalay gibi birçok metale zorlukla yapışır. Bu metaller kaplama yüzeyinde kabuk şeklinde birikir ve kolayca kopabilirler. Bununla birlikte, nikelin bakır üzerindeki yapışma yeteneği diğer metallerden daha yüksektir. Bu özelliği sayesinde nikel kaplama, diğerlerine göre daha güçlü bir bağ oluşturur ve daha kalıcı bir kaplama sağlar. Bu faktörler, kaplama işlemi için uygun metal seçiminin önemini vurgular ve

istenen yapışma ve dayanıklılık özelliklerine sahip bir kaplama elde etmek için dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini gösterir.

2.3.5 Elektrolitin Tabiatı

Normal tuzlarla elde edilen kaplamalara kıyasla, kompleks tuzların elektroliziyle elde edilen kaplamalar daha üstün özelliklere sahiptir. Özellikle, bakır, gümüş ve altın gibi metallerin kaplamaları, bu metallerin potasyum siyanür çift tuzları kullanılarak elde edilir. Kompleks tuzların elektrolizinde, basit tuzların elektrolizine göre katot polarizasyonu daha belirgin hale gelir. Bu durum, daha yüksek bir potansiyel uygulanmasını gerektirir ve bu da taneciklerin oluşumunu kolaylaştırır. Yani, kompleks tuzların elektrolizinde, kaplama işlemi daha etkili ve verimli bir şekilde gerçekleşir. Bu özellikler kompleks tuzların elektrolizinin kaplama işlemlerinde yaygın olarak tercih edilmesini sağlar. Kompleks tuzların kullanımı, daha kaliteli ve homojen kaplamalar elde etmek için kaplama sürecini optimize etmek adına önemli bir adımdır.

2.4 Eloksal Kaplama Öncesi Yüzey İşlemlerinin Etkileri

Alüminyum alaşımlarının anodizasyon işlemine geçmeden önce çeşitli yüzey işlemleri uygulanır. Bu işlemler temel olarak yağ giderme, dağlama ve dağlama ürünlerinin temizlenmesi aşamalarından oluşur.

- Yağ giderme aşamasında, amacımız alaşım yüzeyindeki yağ ve diğer kirliliklerin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasıdır.
- Dağlama işlemi ise iki önemli hedefi kapsar. İlk olarak, iyice giderilemeyen kirliliklerin yüzeyden tamamen temizlenmesini sağlar. İkinci olarak, yüzeydeki bir tabakanın kaldırılmasıyla anodizasyon için homojen bir yüzey hazırlamayı amaçlar.

Ancak, dağlama işlemi sonrasında yüzeyde çözünme ürünleri birikecektir. Bu nedenle bir sonraki adımda, bu ürünlerin temizlenmesi gereken ayrı bir işlem gereklidir. Dağlama işleminden sonra yüzeyde biriken dağlama ürünleri, asidik çözeltiler içerisine batırılarak temizlenir. Bu asidik çözeltiler, yüzeydeki çözünme ürünlerini etkili bir şekilde uzaklaştırmaya yardımcı olur ve alüminyum alaşımının anodizasyon için uygun, temiz bir yüzey elde edilmesini sağlar.

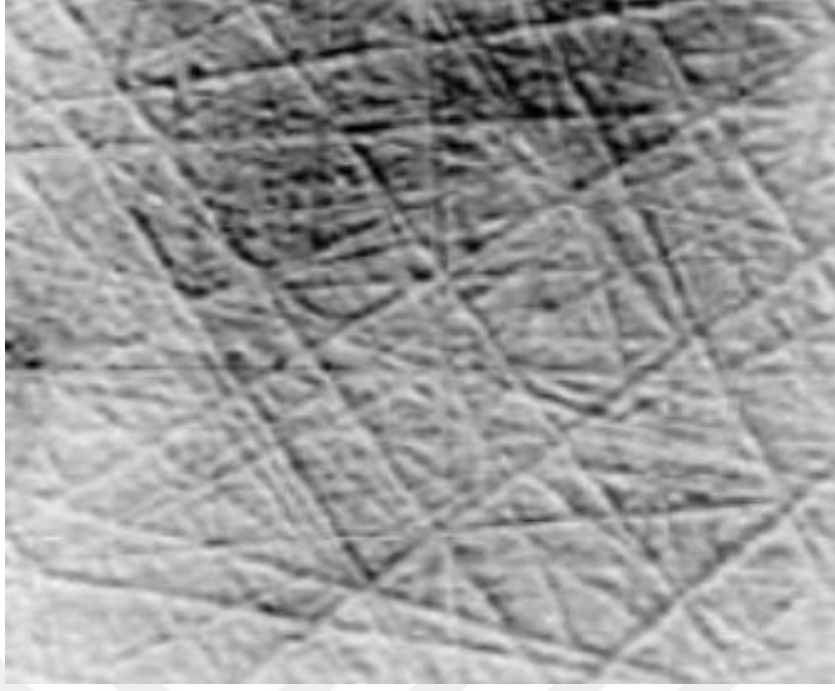
Alüminyum alaşımlarının anodizasyon sürecine hazırlanması için yağ giderme ve dağlama işlemleri titizlik ve özenle yapılması gerekir aksi takdirde kaplama yüzeyi istenilen şekilde olmaz.

2.4.1 Polisaj İşlemi

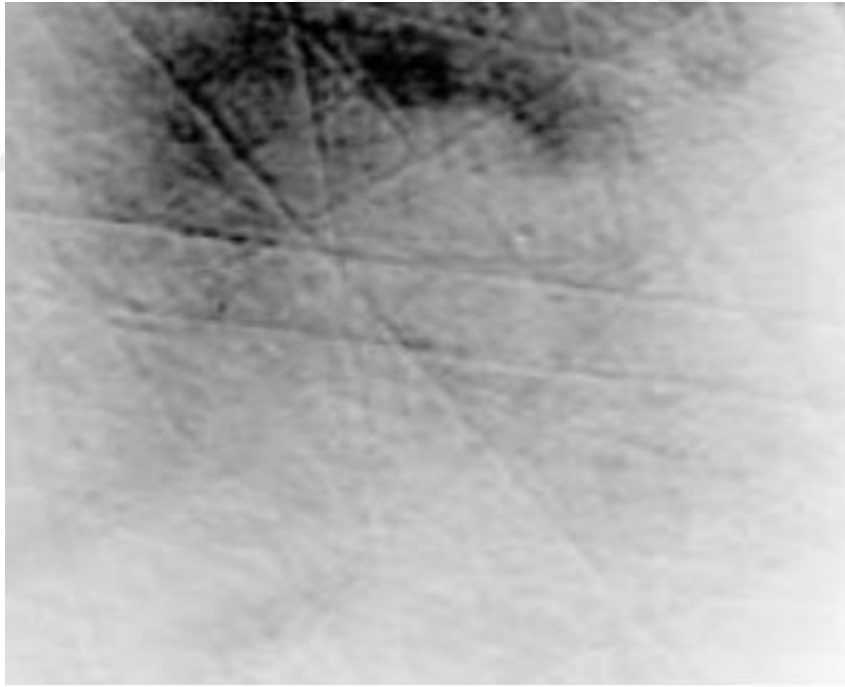
Eloksal kaplama öncesi yüzey pürüzlülüğü sağlanması için polisaj işlemi yapılır. Alüminyumun polisaj işlemi, metal yüzeyin parlak, pürüzsüz ve estetik olarak çekici bir görünüm elde etmek için uygulanan bir yüzey işlemidir. Bu işlem, alüminyumun oksit tabakasını gidererek yüzeydeki çizikleri, lekeleri ve kusurları düzeltir.

Polisaj işlemi genellikle şu adımları içerir:

- **Temizlik:** İlk adım, alüminyum yüzeyin kiri, yağı ve diğer kirleticilerden arındırılmasıdır. Bu, yüzeydeki fazla kirlilikleri gidererek polisajın daha etkili olmasını sağlar.
- **Zımparalama:** Daha sonra, yüzeydeki belirgin çiziklerin ve pürüzlerin giderilmesi için zımpara kağıdı veya zımpara diskleri kullanılır. Bu adım, yüzeyi düzleştirerek sonraki aşamalarda daha iyi bir parlaklık elde etmeye yardımcı olur.
- **Tutkal Alma:** Zımparalama işlemi sonrasında yüzeyde zımpara artıkları veya yapışmış tozlar kalabilir. Bu nedenle tutkal alma işlemi ile yüzey tekrar temizlenir.
- **Polisaj Bileşikleri:** Polisaj bileşikleri, yüzeyin cilalanmasını ve parlaklık kazanmasını sağlayan özel kimyasal maddelerdir. Bu bileşikler, döner bir polisaj pedi veya bez yardımıyla yüzeye uygulanır. Polisaj işlemi boyunca yüzeyde pürüzsüzlük ve parlaklık artar.
- **Parlatma:** Polisaj bileşikleri uygulandıktan sonra, yüzey parlatılır. Daha küçük ve ince zımpara taneleri veya diğer parlaklık artırıcı maddeler kullanılabilir.
- **Temizlik ve Koruma:** Polisaj işlemi tamamlandıktan sonra, alüminyum yüzey tekrar temizlenir. Ardından, yüzeyi korumak için özel bir vernik, cila veya koruyucu kaplama uygulanabilir. Bu adım, parlak ve temiz yüzeyin uzun süreli dayanıklılığını sağlar.



(a)



(b)

Şekil 2. 6.Aşınmış Yüzey (a), Polisajlı Yüzey (b). ⁹

⁹ (Bodur, 2019)

Parlatma işlemi, yüzeylerde mükemmel parlaklık ve pürüzsüzlük elde etmek için kullanılan özel bir yüzey işleme yöntemidir. Bu işlemde, ince zımpara parçacıkları, yüzeylerde gevrek kırılmaların oluşmasına izin vermeden hassas bir şekilde kullanılır. Amacı, malzemeleri plastik deformasyon yoluyla yavaşça uzaklaştırarak sonuçta pürüzsüz bir ayna yüzeyi elde etmektir. Parlatma işleminin başarıyla gerçekleştirilmesi için 1 mm'nin altındaki ince zımparalar kullanılır. Bu ince zımparalar, yüzeyleri etkili bir şekilde düzeltebilir ve kusurları gidererek düzgün ayna kaplamayı sağlar. Ayrıca, bu işlemde özel malzemeler olan zift, mum, sentetik reçine veya suni deri yastıkları da kullanılır. Bu yastıklar, yüzeylerin düzgün bir şekilde cilalanmasına yardımcı olur ve mükemmel parlaklık elde edilmesine katkı sağlar (Marinescu, 2007).

Parlatma işlemi, aşındırmayla karşılaştırıldığında oldukça küçük ölçeklidir ve daha hassas bir yöntemdir. Bu nedenle, kırılğan materyallerin işlenmesinde büyük bir başarı sağlar. Hassas detayların ve mükemmel yüzey kalitesinin önemli olduğu uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir yüzey işlemidir. Özetle, alüminyumun polisaj işlemi, yüzeydeki çizikleri ve kusurları düzelterek parlak ve estetik bir görünüm elde etmek için zımparalama, polisaj bileşikleri ve koruyucu kaplama gibi adımlar içeren bir yüzey işlemidir. Bu işlem, alüminyum parçaların otomotiv, mobilya, süs eşyaları ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılmasını sağlar.

2.4.2 Kostik Soda Çözeltilerinde Kimyasal Olarak Dağlanması

Alkali dağlama, alüminyum yüzeylerin anodizasyon öncesinde en sık tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir dağlama işlemidir. Bu özel işlemin amacı, yüzeyde mevcut olan kirliliklerin etkili bir şekilde temizlenmesi ve aynı zamanda anodizasyon için homojen ve uygun bir yüzey hazırlanmasıdır.

Alkali dağlamanın en temel hedeflerinden biri, yüzeydeki kalan kirliliklerin etkili bir şekilde giderilmesidir. Bu sayede, alüminyum yüzey, istenilen kalitede ve performansta anodizasyon işlemine tabi tutulabilir.

Alkali dağlama işleminin önemli bir ek amacı da dekoratif amaçlarla mat yüzeylerin oluşturulmasıdır. Bu, alüminyum ürünlerin tasarımında önemli bir rol oynamakta ve çeşitli endüstrilerde estetik bir görünümün elde edilmesini desteklemektedir.

2.4.3 Nitrik Asit Çözeltilerinde Dağlama Ürünlerinin Temizlenmesi

Dağlama işlemi, alüminyum alaşımlarında gerçekleştirilen bir kimyasal yüzey işlemidir. Bu işlem sonucunda, alaşım içerisindeki farklı elementlerin kostik çözeltilerde çözünmeyen bazik tuzlar, hidroksitler veya oksitler şeklindeki çözünme ürünleri, alüminyum yüzeyinde bir tabaka olarak kalır.

Yüzeyde oluşan bu çözünme ürünleri, malzemenin homojen bir yüzeye sahip olmasını sağlayarak anodizasyon için uygun hale getirir. Ancak, bu çözünme ürünleri, yüzeyin tamamen temizlenmesini gerektirebilir. Bu nedenle, bu tür çözünme ürünlerini etkili bir şekilde temizlemek ve yüzeyi hazırlamak için genellikle nitrik asit çözeltileri kullanılır.

Nitrik asit çözeltileri, yüzeydeki çözünme ürünlerini etkili bir şekilde uzaklaştırarak temiz ve homojen bir yüzey elde etmeye yardımcı olur. Bu işlem, alüminyum yüzeylerin daha sonraki işlemler için hazır hale gelmesini sağlar ve istenilen kalitede sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunur (Sertçelik, 1999).

2.5 Tasarım ve Optimizasyon Yöntemleri

Proseslerin tasarlanması ve kullanılan parametrelerin optimize edilmesi için kullanılabilecek birçok farklı yöntem mevcuttur. Kullanılan bazı istatistiksel ve matematiksel yöntemler; Cevap Yüzey Metodolojisi (CYM), Taguchi Yöntemi, ANOVA, Box-Behnken Tasarımı ve Doehlert Tasarımı gibi yöntemlerdir.

2.5.1 Cevap Yüzey Metodolojisi

CYM giriş parametrelerinin cevap değerleri üzerindeki etkisini istatistiksel ve matematiksel yöntemlerle inceleyen bir deney tasarımı tekniğidir. Bu teknik, test sonuçlarının iyileştirilmesi ve deney sayısının azaltılması için kullanılır. Bu yöntem, deneylerin daha verimli bir şekilde planlanmasına yardımcı olur ve elde edilen verilerin analizini kolaylaştırır. Böylece, test süreci daha hızlı ve maliyet etkin bir şekilde yürütülebilir. Deney tasarımlarında cevap yüzey metodolojisi ile farklı teknikler kullanılarak optimizasyon yapılabilir.

Cevap değeri, faktörlerin doğrusal bir fonksiyonu ile istatistiksel olarak anlamlı olacak şekilde modellenmişse, tahmin fonksiyonu birinci dereceden bir model olarak tanımlanmaktadır. Tahmin fonksiyonu, β sabit katsayıyı, k giriş faktörü sayısını, ϵ standart hatayı ve X giriş değerini temsil etmek üzere denklem 1'de verildiği ifade edilmektedir (Anderson-Cook vd., 2009; Gökmen vd., 2021). Doğrusal olarak açıklanması mümkün

olmayan fonksiyonlar ise i doğrusal, j polinomal katsayısı temsil etmek üzere denklem 2’de verildiği gibi ifade edilmektedir (Gökmen vd., 2021; Montgomery, 2006).

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_k X_k + \epsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2)$$

R^2 değeri determinasyon katsayısı olarak 0 ile 1 arasında tanımlanan bir istatistiksel parametredir ve 1’e ne kadar yakınsa cevap değerleri giriş faktörleri ile o kadar iyi açıklanabilmektedir. y_i cevap değerinin gerçek değeri, $\hat{y}_i$ tahmini değeri olmak üzere R^2 değeri denklem 3’te verildiği gibi hesaplanmaktadır (Bradley, 2007; Gökmen vd., 2021).

$$R^2 = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \% \quad (3)$$

CYM yöntemi giriş parametrelerinin en düşük, orta ve en yüksek derecelerinde değerlendirme olanağı sağladığı için tercih edilmektedir. Optimize edilecek cevap değerinin maksimum, minimum ya da sabit bir değerde tutulmalıdır. Çünkü bu, ölçüm sonuçları ile yapılan karşılaştırmaların doğruluğu açısından çok önem arz eder ve bu nedenle araştırmacılar tarafından cevap yüzey modeli oluşturulurken “cevap hedefi” tanımlanmaktadır (Wagner vd., 2014).

2.5.2 Taguchi Metodu

Taguchi metodu, ürün ve proseslerde meydana gelen değişkenliğin kaynağı olan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin çeşitli düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve proseslerdeki değişkenliği en aza indirmeyi hedefleyen bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu metod, ürün veya proses tasarımında optimum sonuçları elde etmek için sistemli bir yaklaşım sunar. Taguchi metodu, faktörlerin ve düzeylerinin dikkatli bir

şekilde seçilmesini gerektirir ve istenmeyen değişkenliklerin etkilerini minimize etmek için deneylerin tasarımını optimize eder. Bu sayede, ürün veya proses performansını iyileştirmek, maliyetleri düşürmek ve kaliteyi artırmak için etkili çözümler bulunabilir. Taguchi metodu, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve problemlerin çözümünde rehberlik eden bir yöntemdir.

Taguchi metodu, ürün kalitesinin artırılmasında büyük bir etkiye sahiptir ve aynı zamanda daha az denemeye daha iyi sonuçlar elde etme olasılığı sunar. Bu yöntem, kalite geliştirme süreçlerinde etkili bir araç olarak kullanılabilir. Ayrıca, Taguchi metodu, bir felsefe olarak kalitenin tasarım aşamasında ve proses süreçlerinde sağlanmasını öngörür. Bu felsefe, kalite odaklı bir yaklaşımı benimser ve kalitenin sadece son üründe değil, ürünün tasarım ve üretim aşamalarında da dikkate alınması gerektiğini vurgular. Taguchi metodu, ürünlerin kalitesini artırırken aynı zamanda süreç verimliliğini optimize etmeyi hedefler. Bu sayede, daha az kaynak kullanımıyla daha iyi kalite sağlanabilir ve müşteri memnuniyeti artırılabilir (Canıyılmaz ve Kutay, 2003).

2.5.3 Box-Behnken Tasarımı

Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi, tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında daha az sayıda deneysel veya sayısal sonuç gerektiren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, deneylerin sayısını azaltarak zaman ve kaynak maliyetlerini minimize etmeyi hedefler. Box-Behnken deneysel tasarımı, değişkenler arasındaki etkileşimleri değerlendirmek ve optimum koşulları belirlemek için tasarlanmıştır. Bu yöntem, faktörlerin belirli düzeylerinde deneylerin gerçekleştirilmesini içerir ve bu sayede daha az deneme sayısı ile sonuçlara ulaşılabilir. Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi, deneylerin düşük maliyetli ve verimli bir şekilde yürütülmesini sağlar, aynı zamanda faktörlerin etkileşimlerini anlamak ve optimize etmek için istatistiksel analizlere olanak tanır. Bu nedenle, Box-Behnken deneysel tasarımı, deneylerin planlanması ve verilerin analizi için etkili bir araç olarak kabul edilir (Ergül vd., 2019).

2.5.4 Doehlert tasarımı

Doehlert tasarımı, karesel modeller oluşturarak diğer faktör aralıklarına geçebilme ve genişletilebilme gibi özelliklere sahip bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu tasarım yaklaşımı, tüm ana faktör etkilerini, birinci dereceden etkileşimleri ve karesel etkileri birbirinden bağımsız olarak tahmin edebilme yeteneğine sahiptir. Doehlert tasarımı, iç içe geçmiş çokyüzlü şekilleri olan hiper-üçgenler (simpleks) içerir. Bu geometrik yapı, tasarım alanındaki noktaların

birbirine bağlantısını temsil eder ve her bir nokta farklı faktör düzeylerini temsil eder. Bu sayede, Doehlert tasarımı, faktörler arasındaki etkileşimleri dikkate alarak deneylerin planlanmasını ve sonuçların analizini gerçekleştirir. Bu yöntem, çoklu değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak ve optimize etmek için kullanılan bir araç olarak önemli bir yer tutar. Ayrıca, Doehlert tasarımı, esneklik ve genişletilebilirlik özellikleri sayesinde farklı çalışma alanlarına uyarlanabilir ve çeşitli deneylerin etkili bir şekilde yürütülmesine olanak sağlar (Demir vd., 2017).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Malzemesi

Bu tez çalışmasında, 5754 serisi alüminyum alaşımı numuneler taban malzeme olarak kullanılmıştır. 20 mm x 20 mm x 2 mm ölçülerinde hazırlanan numunelerin kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1.Al 5754 alaşımın (%) kimyasal bileşimi.

Deney Malzemesi	Kimyasal Bileşimi (%)						
	Cu	Si	Ti	Cr	Mn	Mg	Fe
Al 5754	0,1	0,4	0,15	0,3	0,5	2,6-3,2	0,4
							Al
							Geri Kalan

3.2. Eloksal (Anodik) Kaplama

Eloksal kaplama işlemine Al 5754 numuneleri hazır hale getirmek için bir dizi işlem yapılmıştır. Eloksal kaplama işleminden önce Al 5754 numunelerin yüzeyleri zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminden sonra numuneler 50-55 °C sıcaklıktaki yağ alma banyosunda bekletilmiştir. Yağ giderme işleminden sonra numuneler su ile nötralize edilip durulanmıştır. Durulama sonrası numuneler 10-15 dakika sodyum hidroksit banyosunda tutularak numunelerin yüzeyleri matlaştırılmış ve ardından durulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Durulama sonrası nötralizasyon için Al 5754 numuneler 5 dakika nitrik asit solüsyonunda bekletilmiştir. Eloksal banyosunda sülfürik asit oranının düşmemesi için numuneler nitrik asitten tamamen arındırılmıştır. Bu işlemlerin ardından kaplama yapmak için hazır hale gelen numunelere anodik kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi sülfürik asit çözeltisinde (40 g/l H₂SO₄ ve 80 g/l C₄H₆O₆) gerçekleştirilmiştir.

Kaplanacak numunelerin yüzeyleri 3 farklı tane büyüklüğünde (400, 800 ve 1200 SiC/inç²) aşındırıcılar ile zımparalanmıştır. Böylece üç farklı yüzey pürüzlülüğünün kaplama tabakasının yapısına etkisi gözlenmiştir. Kaplama işlemlerinde voltaj değerleri 8, 12 ve 16 V ve kaplama süreleri ise 10, 20 ve 30 dakika olarak seçilmiştir. Eloksal kaplama işlemlerinde elektrolit sıcaklığı 18-20 °C değerlerinde sabit tutulmuştur.

3.3. Cevap Yüzey Metodu

Birçok karmaşık süreci tanımlamak için Cevap Yüzey Metodu (CYM) avantajlıdır. CYM'nin amacı, parametrelerin lineer, kare ve etkileşim sonuçlarının matematiksel ve istatistiksel yöntemlerle belirlenmesini sağlamaktır. Merkezi kompozit tasarımı (MKT), bağımsız değişkenlerin en küçük desenlerini seçmek için kullanılır ve çoklu cevapları seçer. Üç faktör ve üç seviyeli MKT, MINITAB 18 yazılımı kullanılarak bağımsız parametrelerin etkilerini araştırmak için uygulandı. Kullanılan parametreler voltaj, kaplama süresi ve tane büyüklüğüdür. Yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı cevap olarak kullanıldı. Tablo 3.2'de tasarımın performansını ve seviyelerini gösteren oksit kaplama sürecinin parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 3. 2.MKT analizindeki anotlama parametreleri ve seviyeleri.

Semboller	Parametreler	Seviyeler ve Aralıklar		
		-1	0	1
A	Tane Boyutu (SiC/inch ²)	400	800	1200
B	Voltaj (V)	8	12	16
C	Süre (dk)	10	20	30

CYM, polinomal regresyon (PR) denkleminde karşılık gelen yüzey türlerini inceler.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (1)$$

Denklem 1 'de, y sembolü her bir derece için regresyon katsayıları, β_i ile k (değişken sayısı) için polinom modelin cevabını simgeler ve y, β_0 (sabit katsayı). Model basitçe, i=1'den k'ye kadar olan k tahmincinin gücüne yükseltilmiş genel bir doğrusal regresyon modelidir. İkinci dereceden (k=2) bir polinom, bir kuadratik ifade (parabolik eğri) oluşturur ve dördüncü dereceden ifade oluşturur (Park ve Jeong, 2021). Tablo 3.3, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı sonuçlarıyla deneysel tasarımı göstermektedir. Alüminyum 5754 alaşımının kaplama kalınlığı, 7 μm ile 29 μm arasında değişirken, yüzey pürüzlülüğü 0.76 μm ile 1.581 μm arasında değişmektedir.

Tablo 3. 3.Anodizasyon kaplama sürecinde elde edilen kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

No	Tane Boyutu (SiC/inç ²)	Voltaj (V)	Süre (dakika)	Kaplama Kalınlığı (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Num. 1	400	8	10	7	0.76
Num. 2	1200	8	10	10	0.676
Num. 3	400	16	10	18	1.31
Num. 4	1200	16	10	18	1.18
Num. 5	400	8	30	10	1.468
Num. 6	1200	8	30	14	1.498
Num. 7	400	16	30	27	1.36
Num. 8	1200	16	30	29	1.49
Num. 9	400	12	20	10	1.443
Num. 10	1200	12	20	12	0.844
Num. 11	800	8	20	8	0.994
Num. 12	800	16	20	19	1.888
Num. 13	800	12	10	11	1.334
Num. 14	800	12	30	26	1.581
Num. 15	800	12	20	11	1.571
Num. 16	800	12	20	13	1.565
Num. 17	800	12	20	11	1.575
Num. 18	800	12	20	12	1.563
Num. 19	800	12	20	11	1.573
Num. 20	800	12	20	12	1.569

Tablo 3.4'te tane boyutunun (A), gerilimin (B), kaplama süresinin (C), yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı sonuçları üzerindeki etkilerini belirlemek için oluşturulan matematiksel modeller verilmiştir.

Tablo 3. 4. Doğruluk katsayısı (R^2) ve regresyon modelleri.

Regresyon Modelleri	R^2 (%)
Kaplama kalınlığı (μm)	95.35
$Y_1 = 12.8 + 0.0233A - 0.04B - 2.433C - 0.000011A*A + 0.0455B*B + 0.0573C*C$ $- 0.000391A*B + 0.000094A*C + 0.0406B*C$	
Yüzey pürüzlülüğü (μm)	80.23
$Y_2 = -1.34 + 0.00267A + 0.137B + 0.0551C - 0.000002A*A - 0.00090B*B$ $+ 0.00002C*C + 0.000004A*B + 0.000012A*C - 0.00366B*C$	

CYM tarafından bağımsız değişkenlerin farklı sayılarını içeren regresyon modellerinin uyumunu karşılaştırmak için uyarlanmış R^2 kullanılır. Regresyon modelinin uyumu, deneysel cevabın değişkenliğinin model tarafından ne kadar açıklanabileceğini gösteren R^2 değerini analiz ederek belirlenmiştir. Düşük P değerleri, modelin makul olduğunu gösterir. Her tasarım faktörünün özellikleri, F değeri ile kabul edilebilir. Deneysel verilerle regresyon modelinin daha iyi uyumlu olduğu, daha büyük bir F değeriyle desteklenebilir. Tablo 3.5 ve 3.6 her bir cevap için ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğünün ve kaplama kalınlığının R^2 değerleri sırasıyla %95,35 ve %80,23'tür. Model için P değerleri, %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösteren 0,05'ten küçüktür. Bu durumda, kurulan regresyon modelinin doğru olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 3. 5.Ortalama kaplama kalınlığı için ANOVA sonuçları.

	DF	SS	MS	F-Faktör	P-Faktör
Model	9	736.980	81.887	22.76	0.000
A	1	12.100	12.100	3.36	0.097
B	1	384.400	384.400	106.87	0.000
C	1	176.400	176.400	49.04	0.000
A x A	1	8.642	8.642	2.40	0.152
B x B	1	1.455	1.455	0.40	0.539
C x C	1	90.205	90.205	25.08	0.001
A x B	1	3.125	3.125	0.87	0.373
A x C	1	1.125	1.125	0.31	0.588
B x C	1	21.125	21.125	5.87	0.036
Hata	10	35.970	3.597		
Toplam	19	772.950			

R² 95.35 %

Tablo 3. 6.Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

	DF	SS	MS	F-Faktör	P-Faktör
Model	9	1.53459	0.170511	4.51	0.014
A	1	0.04264	0.042641	1.13	0.313
B	1	0.33562	0.335622	8.88	0.014
C	1	0.45668	0.456677	12.08	0.006
A x A	1	0.26762	0.267618	7.08	0.024
B x B	1	0.00057	0.000575	0.02	0.904
C x C	1	0.00001	0.000012	0.00	0.986
A x B	1	0.00036	0.000364	0.01	0.924
A x C	1	0.01748	0.017485	0.46	0.512
B x C	1	0.17111	0.171112	4.52	0.059
Hata	10	0.37816	0.037816		

Toplam	19	1.91276
--------	----	---------

R ²	80.23 %
----------------	---------

3.4. XRD Analizi

Farklı şartlarda eloksal kaplama işlemleri uygulanan numuneler ile eloksal kaplama uygulanmayan numunelerin XRD ölçümleri, $2\theta = 20-80^\circ$ tarama açısında ve 2 derece/dakika tarama hızında gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümleri, Şekil 3.1’de verilen $\lambda=1.5405\text{\AA}$ dalga boyuna sahip CuK α radyasyon kaynaklı Rigaku marka geniş aralıklı difraktometre cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3. 1.XRD cihazı.

3.5. SEM Analizi

İşlemsiz ve kaplama işlemleri uygulanmış deney numunelerinin kaplama kalınlıklarını, aşınma izlerini ve yüzey topoğrafyalarını belirlemek için Jeol JSM 7001 marka SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.2). SEM analizleri, OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Farklı parametrelerle eloksallı kaplanmış Al 5754 alaşımı numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümleri Şekil 3.3'te verilen PCE marka RT-2000 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kalibre edilmiş probu sayesinde standartlara uygun bir şekilde yapılan ölçümlerle ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3. 3.Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

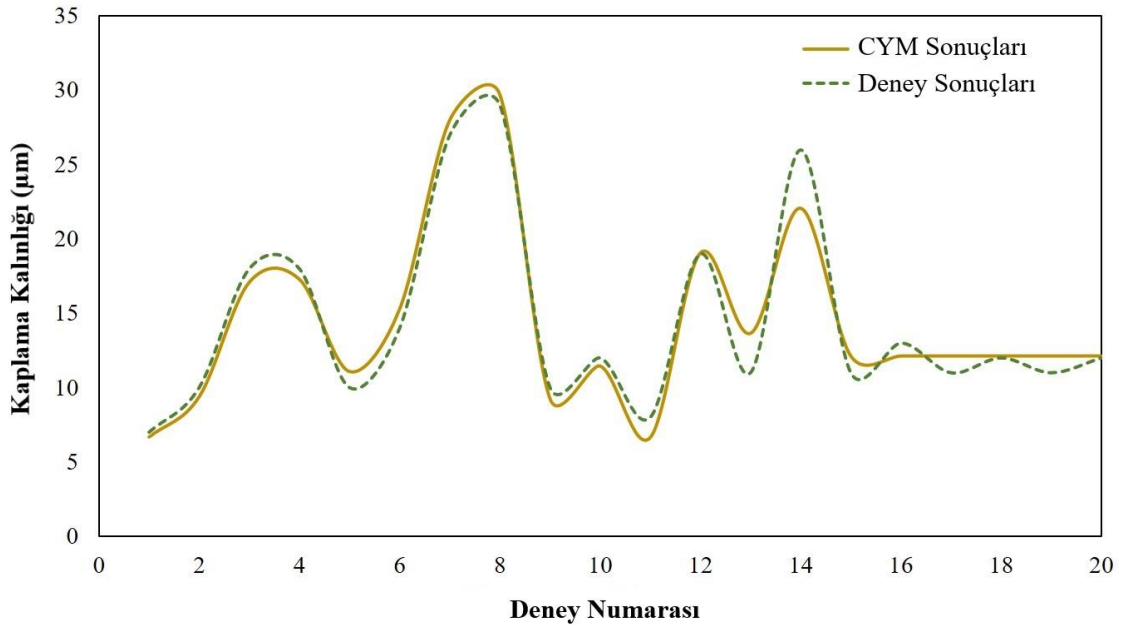
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Eloksoal Parametrelerinin Ortalama Kaplama Kalınlığı ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.1'de hem deneysel sonuçların hem de Cevap Yüzey Metodolojisi (CYM) modellerinden elde edilen sonuçların görsel bir temsili bulunmaktadır. Grafik, CYM modelinin ve gerçek verilerin son derece tutarlı ve iyi eşleşmiş olduğunu göstermektedir. Ayrıca, CYM modeli tarafından öngörülen değerler ile deneysel değerler arasında güçlü bir korelasyon vardır. Bu gözlemlere dayanarak, CYM modelinin kaplama kalınlığını tahmin etmek için uygun bir araç olduğu sonucuna varabiliriz. CYM modeli tarafından yapılan tahminlerin doğru olduğu görülmektedir, bu da CYM modelini belirli koşullar altında kaplama kalınlığı tahminini iyileştirmek için değerli kılmaktadır.

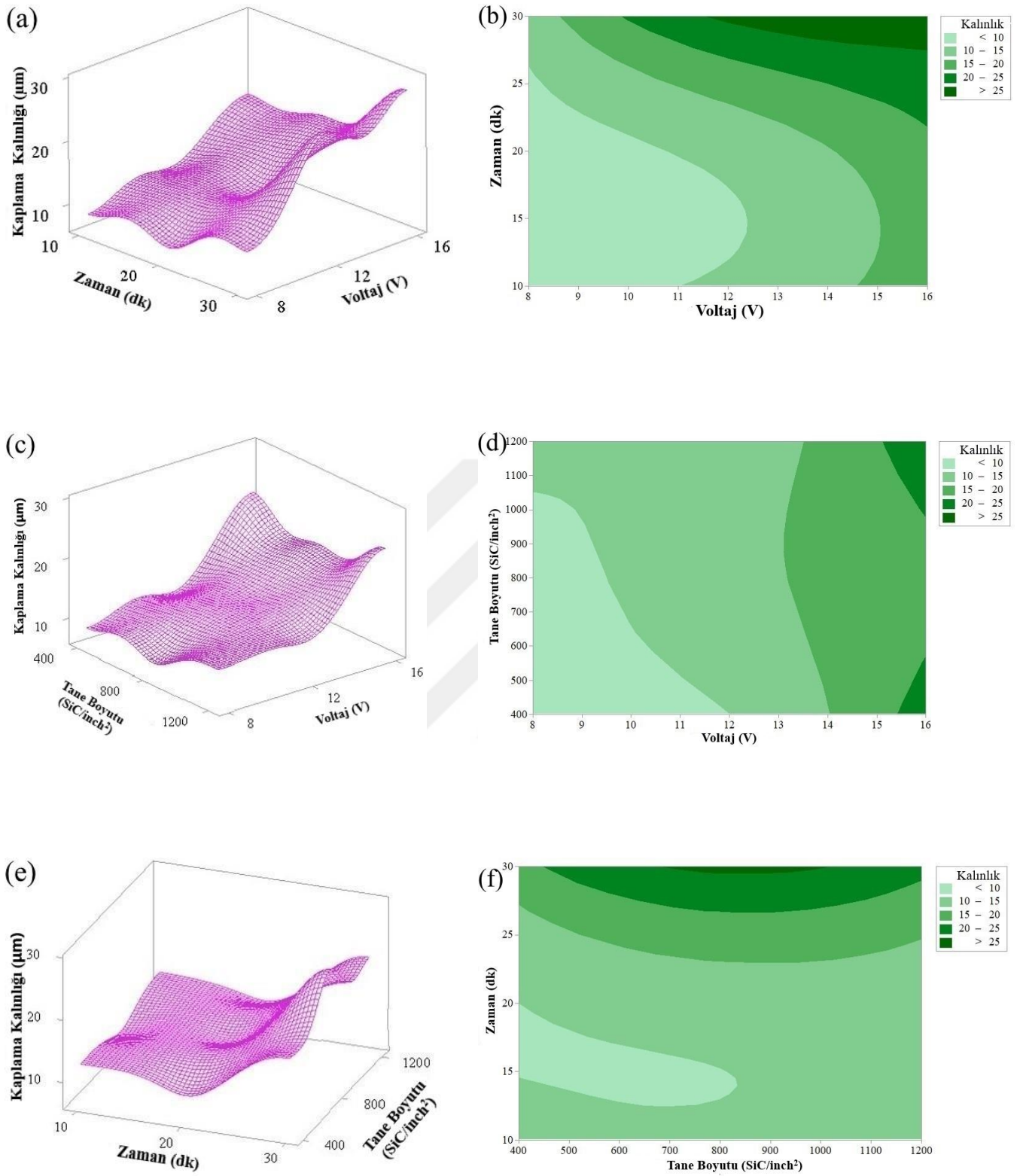
Elde edilen bulgular, kaplama kalınlığının doğru bir şekilde tahmin edilmesinde CYM modeline güvenilebileceğini ve bu alandaki ilerlemelere katkıda bulunabileceğini göstermektedir.



Şekil 4. 1.Ortalama kaplama kalınlığı için değişim değerleri

Şekil 4.2’de zaman, voltaj değeri ve yüzey özelliklerinin birlikte ortalama kaplama kalınlığını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Voltaj değeri arttıkça ortalama kaplama kalınlığının önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. En yüksek kaplama kalınlığı, 29 μm 'ye ulaşarak, 1200 tane boyutu ve 16 V'luk voltajla hazırlanan bir yüzey kullanıldığında elde edilmiştir (Şekil 4.2a-b'de gösterildiği gibi). Anodizasyon için optimum voltajın kaplamanın gözenekliliğini, pürüzlülük faktörünü ve uzunluk/çap oranını doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Genel olarak, anodizasyon sırasında daha yüksek voltajlar daha kalın bir kaplama ile sonuçlanma eğilimindeyken, daha uzun anodizasyon süreleri kaplamada gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır (Myers vd., 2009). Ek olarak, yüzey pürüzlülüğündeki ve voltajdaki artışın kaplama kalınlığındaki artış üzerinde daha az etkisi vardır (Şekil 4.2c-d'de görüldüğü gibi). Bu, her bir spesifik anodizasyon süresinde anodizasyon voltajının artırılmasıyla kaplama kalınlığında önemli bir artış elde edildiği anlamına gelmektedir. Özetle, Şekil 4.2'den elde edilen bulgular ortalama kaplama kalınlığının zaman, voltaj ve yüzey özelliklerinin etkileşiminden etkilendiğini göstermektedir. Anodizasyon sırasında daha yüksek voltajlar daha kalın kaplama tabakalarının elde edilmesini sağlamaktadır.

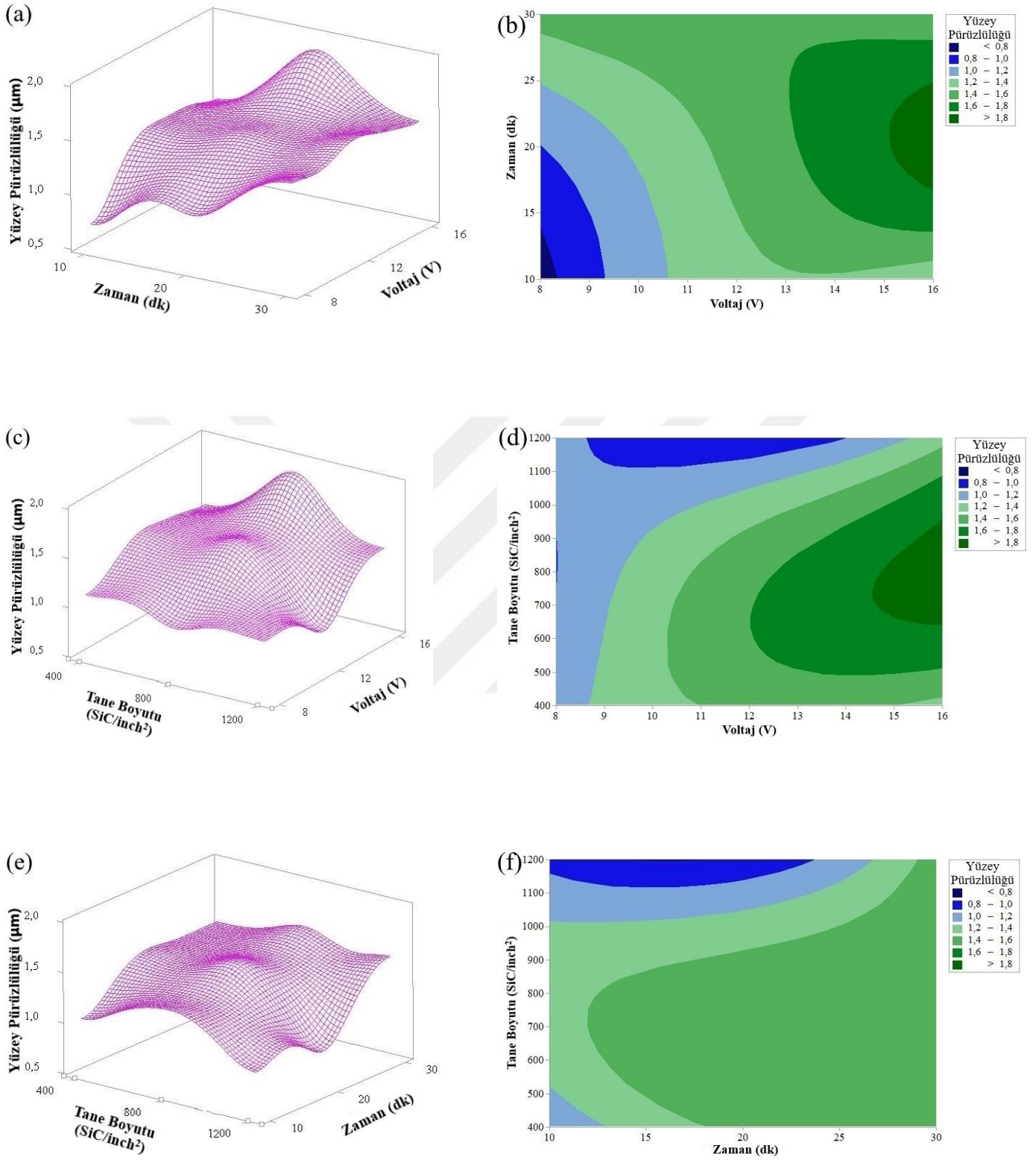
Yahia ve arkadaşları benzer bulgular elde eden bir çalışma yürütmüştür (Ali Yahia vd., 2012). Eloksal potansiyelinin TiO_2 nanotüp dizilerinin oluşumu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmaları, 20 V'luk bir voltajda anotlama yapıldığında, yaklaşık 1 μm 'lik bir kaplama kalınlığına sahip nanotüplerin oluştuğunu ortaya koymuştur. Ancak voltajın 50 V'a yükseltilmesi, 8 μm 'yi aşan daha uzun nanotüp katmanlarının oluşmasıyla sonuçlanmıştır. Çalışmalarında daha yüksek anotlama voltajı kullanmalarının nedeni, deney düzenekleriyle ilişkili farklı ortam pH koşullarına bağlanabilir. Elde ettikleri sonuçlar, anodizasyon potansiyeli ile kaplamanın morfolojisi arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Özellikle, nanotüp çaplarında ve uzunluklarında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Daha yüksek potansiyeller uygulandığında, daha büyük tüp çapları ve daha uzun tüp uzunlukları elde edilmiştir.



Şekil 4. 2.Kaplama süresi, kaplama gerilimi ve tane boyutunun ortalama kaplama kalınlığı üzerindeki eş zamanlı etkilerini gösteren yüzey ve kontur grafikleri.

Tablo 4.5'te, yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizinin (ANOVA) sonuçları verilmiştir. Bulgular, voltaj (B) ve zamanın (C) doğrusal etkisinin istatistiksel olarak anlamlı parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Eloksal süresinin, voltajın ve tane boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerinde farklı derecelerde etkiye sahip olduğu ve genel etkiye sırasıyla %57, %38 ve %5 oranında katkıda bulunduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, oluşturulan Cevap Yüzey Metodolojisi (CYM) modelinin, düşük yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlanan optimum kaplama parametrelerini belirlemek için 5754 Al alaşımının eloksal işlemlerinde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, voltaj (B) ve zaman (C) parametreleri arasında önemli bir etkileşim vardır. İki parametrenin birlikte veya birleşik etkisinin dikkate alınmasının istenen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde önemli role sahiptir. Yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek ve daha pürüzsüz bir yüzey elde etmek için eloksal süresini optimize etmek gerekir. Ek olarak, alüminyum bazlı malzemelerin yüzeyinde gerçekleştirilen eloksal işlemi gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu gözenekli yapı, yüzey pürüzlülüğüne katkıda bulunduğu için eloksal parametrelerinin kontrol edilmesi, istenen yüzey özelliklerinin elde edilmesinde çok önemli hale gelmektedir.

Şekil 4.3, yüzey özelliklerinin, voltajın ve zamanın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki birleşik etkisini göstermektedir. Eloksal işleminin başlangıcında, alüminyum yüzeyinde gözeneksiz bir yapı oluşur. Bununla birlikte, eloksal süresi arttıkça, yüzey kristalleri arasındaki sınırlarda gözenek çekirdekleri ortaya çıkmaya başlar. Bu yüzey kristalleri daha yüksek bir kimyasal potansiyele ve daha fazla kristal yapı kusuruna sahiptir (Stiger vd., 1998). Gözeneklerin varlığı, katı bir yüzeyin ıslanabilirliğini belirlemede önemli bir faktördür. İlginç bir şekilde, yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirlik arasında bir etkileşim vardır, bu da pürüzlülükteki bir artışın yüzeydeki ıslanmayı teşvik ettiğini göstermektedir. Saffari ve diğerleri eloksal süresinin, elektrik akımının, elektrolit tipinin ve konsantrasyonunun nihai temas açısı üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma yürütmüştür (Bordbar-Khiabani vd., 2022). Bulgularına göre, bir numunenin temas açısı 45 dakikalık bir anotlama süresiyle 33° olmaktadır. Ancak, 90 dakikalık bir anotlama süresiyle temas açısı neredeyse 0°'ye düşmektedir. Bu, daha yüksek yüzey enerjisinin ve artan yüzey pürüzlülüğünün malzemenin ıslanabilirliğini iyileştirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, eloksal süresindeki artışın yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olduğu çalışmamızın bulgularıyla uyumludur. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında optimum eloksal süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir.



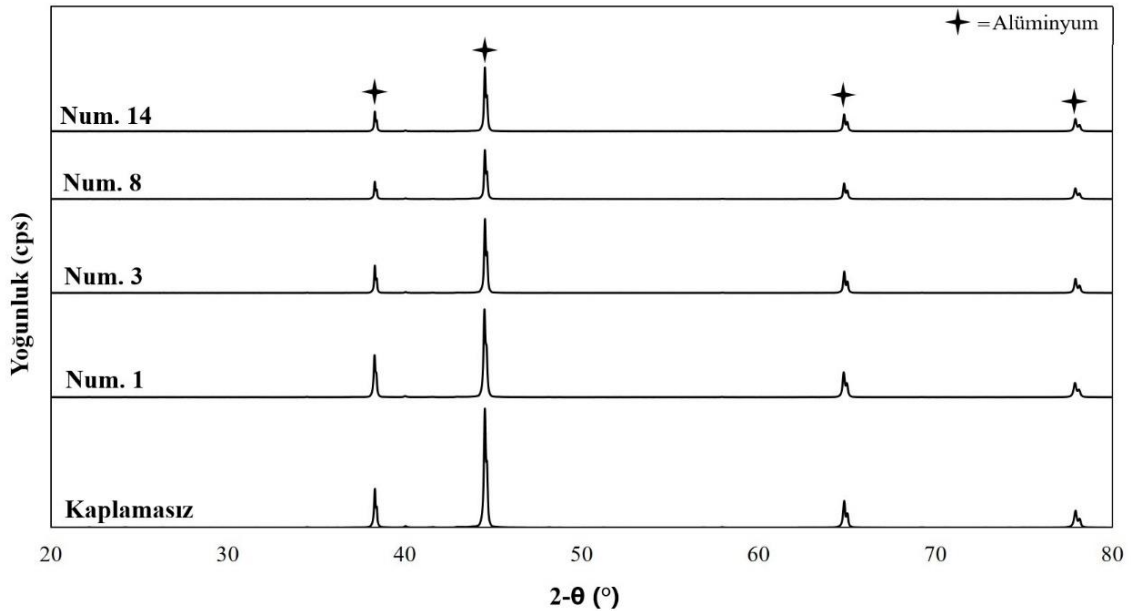
Şekil 4. 3.Kaplama süresi, kaplama gerilimi ve tane boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki eş zamanlı etkilerini gösteren yüzey ve kontur grafikleri.

4.2. XRD Analizi

Şekil 4.4, çeşitli koşullar altında anodize edilmiş ve kaplanmamış 5754 alüminyum alaşım numunelerinin X-ışını kırınım (XRD) modellerini göstermektedir. XRD grafiği incelendiğinde, $2\theta = 38.33^\circ$, $2\theta = 44.54^\circ$, $2\theta = 64.85^\circ$ ve $2\theta = 77.93^\circ$ kırınım açılarında belirli alüminyum fazları tanımlanmaktadır. Anodize edilmiş numunelerin XRD spektrumlarında da alüminyum fazlarının varlığına işaret eden aynı açılarda pikler gözlemlenebilmektedir.

Uygulanan yüzey işlemleri sayesinde alüminyum numunelerin yüzeylerinde yeni fazlar oluşmamıştır (Pasikhani vd., 2016). Bununla birlikte, anodizasyon işleminden sonra oluşan oksit tabakasının, alt tabakadan yansıyan pikleri kısmen maskeleyiği veya zayıflattığı tespit edilmiştir. Bu, 5754 Al alaşımının yüzeyindeki oksit tabakasının bir perde görevi gördüğü ve alt tabakadan yansıyan piklerin yoğunluğunu azalttığı anlamına gelmektedir.

Aslında, 5754 alüminyum alaşımının yüzeyindeki oksit tabakasının kalınlığı arttıkça, alt tabakadan yansıyan piklerin yoğunluğu azalmıştır. Bu gözlem, en kalın oksit tabakasına sahip numunenin (Num. 8) XRD grafiğinde en az pik yoğunluğunu sergilediği Şekil 4.4'te açıkça görülmektedir.

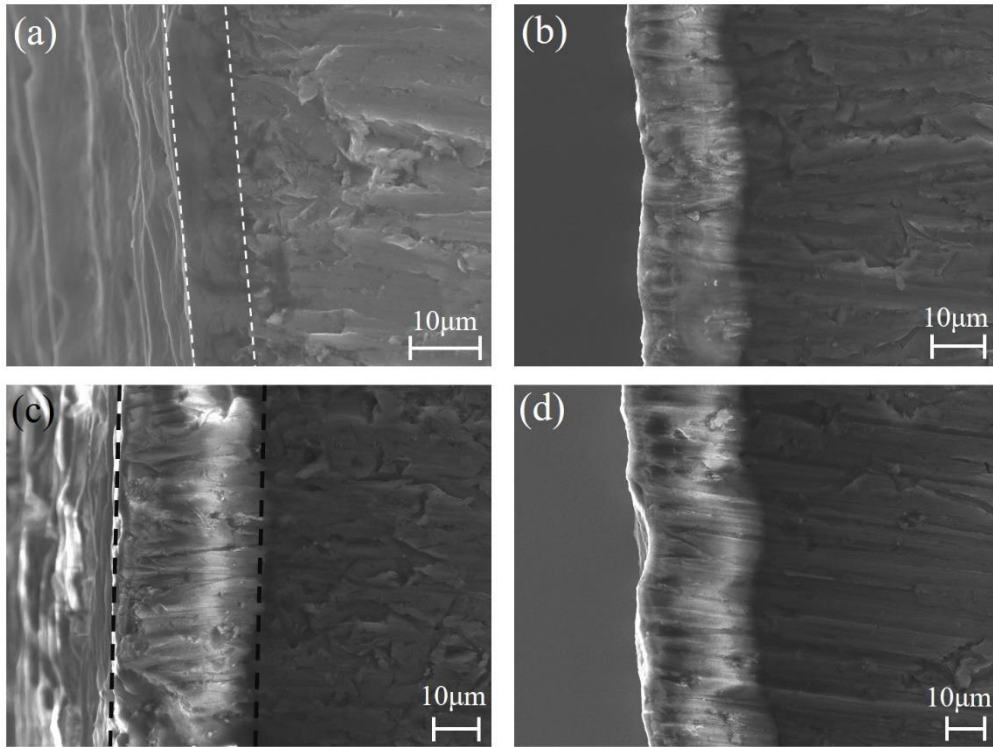


Şekil 4.4. Kaplanmamış ve anodize edilmiş (farklı koşullar altında) 5754 alüminyum alaşım numunelerinin XRD desenleri.

4.3 Yüzey Topografyası ve Kesit Analizi

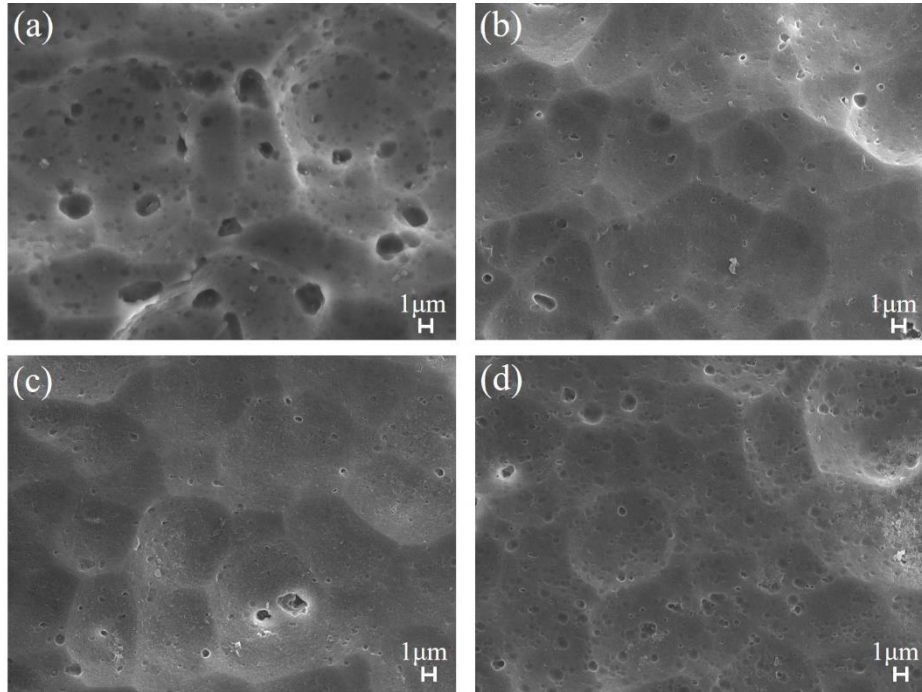
Şekil 4.5'te farklı koşullar altında anodizasyon işlemine tabi tutulan 5754 Al alaşım numunelerinin kesit görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerden yola çıkarak, daha yüksek voltaj değerleri ve daha uzun kaplama süreleri uygulandığında elde edilen kaplama kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. Nitekim en yüksek kaplama kalınlığı, en yüksek voltaj ve en uzun kaplama süresinin kullanıldığı işlemde elde edilmiştir (Şekil 4.5c).

Kesit görüntülerinin analizi değerli bilgiler sağlamıştır. Elde edilen kaplama katmanlarının numune boyunca tutarlı ve homojen bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu homojenlik, anodizasyon işleminin 5754 Al alaşım numunelerinin yüzeyinde tutarlı bir kaplama tabakasını başarılı bir şekilde biriktirdiğini göstermektedir.



Şekil 4. 5.Al 5754 alaşımı üzerinde oluşan oksit tabakalarının kesit SEM görüntüleri: (a) Num.1, (b) Num.3, (c) Num.8 ve (d) Num.14.

Şekil 4.6, farklı koşullar altında kaplanmış 5754 Al alaşım numunelerinin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Anodizasyon işlemi sırasında, anoda bağlı metal yüzeyde indirgenme reaksiyonları yoluyla bir oksit tabakası oluşur. Bu oksit tabakası, elektrolit ve alt tabakaya kıyasla daha düşük iletkenliğe sahiptir ve uygulanan voltajın oksit filmi boyunca dağılmasına neden olur. Elektrik alan gücü, oksit boyunca iyon iletimini belirleyerek oksit filminin büyümesine yol açar. Sonuç olarak, oksit filmin kalınlığı uygulanan voltajla birlikte artar. Oksit film büyüdükçe, farklı geometrik şekillere yol açarak yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğünde değişikliklere neden olur. Şekil 4.6'da yüzeyde tamamen gözenekli bir yapının oluştuğu görülmektedir. Önceki literatürde de anodizasyon işlemi sırasında alüminyum alaşım numunelerinin yüzeyinde oksijen oluşumu rapor edilmiştir. Gözenekli oksit tabakası içinde oksijen gazının salınmasının anodik filmin yapısına zarar verdiği düşünülmektedir (Ding vd., 2018). Anodizasyon işlemi sırasında oluşan oksit tabakası başlangıçta yaklaşık 10-50 nm kalınlığında gözeneksiz bir bariyer tabakası üzerinde gelişir (Ali Yahia vd., 2012). Ancak bu çalışmada düşük voltaj değerlerinde gerçekleştirilen anodizasyon işlemi sonucunda yüzeylerde nispeten büyük gözeneklerin oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.6a). Buna karşılık, voltaj değeri arttıkça gözeneklerin boyutunun azaldığı kaydedilmiştir (Şekil 4.6b-c).



Şekil 4. 6.5754 Al alaşımının eloksal işlemiyle üretilen anodik alüminyum oksitin üst yüzey SEM görüntüleri: (a) Num.1, (b) Num.3, (c) Num.8 ve (d) Num.14.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, Cevap Yüzey Metodolojisi (CYM) kullanılarak çeşitli eloksal parametrelerinin 5754 Al alaşımının ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmaya odaklanmıştır. Amaç, alüminyumun yüzeyinde anodizasyon işlemi yoluyla mikro katmanlı alümina seramik kaplamalar üretmektir. Elokсал süresi, voltaj ve tane boyutunun istenen cevaplar üzerindeki etkilerini analiz etmek için üç faktörlü ve üç seviyeli bir Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) kullanılmıştır.

Ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için regresyon modelleri geliştirilmiş ve bunlar, tahmin edilen ve deneysel değerler arasında güçlü bir korelasyon olduğunu gösteren tatmin edici R^2 değerleri sergilemiştir. Ortalama kaplama kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreleri belirlemek için istatistiksel değerlendirme yapılmıştır. Gerilim, 5754 Al alaşımının ortalama kaplama kalınlığı için en etkili parametre olarak bulunmuş, bunu tane boyutu ve eloksal süresi izlemiştir. Öte yandan, eloksal süresi ve voltaj, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kritik parametreler olarak belirlenirken, tane boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi nispeten düşük seviyede kalmıştır.

Sonuçlar, 29 μm 'lik maksimum ortalama kaplama kalınlığına ulaşmak için 16V'luk bir voltaj ve 30 dakikalık bir anotlama süresi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, 0,676 μm 'lik minimum yüzey pürüzlülüğüne 10 dakikalık bir eloksal süresi ve 8V'luk bir voltajla ulaşılmıştır. Elokсал işlemi, 5754 Al alaşımının yüzeyinde amorf bir oksit tabakasının oluşmasıyla sonuçlanmıştır. Bu amorf oksit tabakası, X-ışını kırınımı (XRD) analizinde alt tabakadan yansıyan pikleri kısmen maskeleymiştir. Genel olarak, 5754 Al alaşımının anodizasyonu, kaplama işleminin karakteristik bir özelliği olan malzeme yüzeyinde gözenekli bir yapının oluşmasına yol açmıştır.

Özetlemek gerekirse, bu çalışmada eloksal süresi, voltaj ve tane boyutunun 5754 Al alaşımının ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için Cevap Yüzey Metodolojisi kullanılmıştır. Sonuçlar, voltajın kaplama kalınlığı ve anotlama süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki önemli etkisini ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışmada istenen kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için en uygun parametre kombinasyonları belirlenmiştir. Elokсал işlemi, malzeme yüzeyinde amorf bir oksit tabakasının ve gözenekli bir yapının oluşmasıyla sonuçlanmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında, 5754 Al alaşımına uygulanan anodik kaplama işlemindeki farklı parametrelerin kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri CYM kullanılarak incelenmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, farklı anodik kaplama parametrelerinin 5754 Al alaşımının tribolojik ve elektrokimyasal özelliklerine etkileri CYM kullanılarak araştırılabilir.



KAYNAKÇA

- A. Hakimizad, K. Raeissi, F. Ashrafizadeh, A comparative study of corrosion performance of sealed anodized layers of conventionally colored and interference-colored aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 2012. 206(22): p. 4628-4633.
- A. Hammoudi, K. Moussaceb, C. Belebchouche, F. Dahmoune, Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 2019, Elsevier.
- A. Kawalek, T. Bajor, S. Sawicki, M. Krakowiak, H. Jurczak; The effect of deformation conditions on rheological properties of the Al 5754 alloy, *Metalurgija*, 2020.
- Ali Yahia S.A., Hamadou L., Kadri A., Benbrahim N. ve Sutter E.M.M. (2012), Effect of anodizing potential on the formation and electrical characteristics of TiO₂ nanotube arrays. *J. Electrochem. Soc.* 159 K83–92
- Anderson-Cook, C. M., Borror, C. M., & Montgomery, D. C. (2009). Rejoinder for “Response surface design evaluation and comparison.” *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139(2), 671–674. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2008.04.009>.
- A.U. Malcıoğlu, 2022, İkiz merdane döküm yöntemiyle dökülen 3xxx alaşımların alternatif termo-mekanik proses sonrası mikroyapı ve korozyon davranışının incelenmesi, Sakarya Üniversitesi.
- Bradley, N. (2007). *The Response Surface Methodology* [Indiana University of South Bend]. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44324-8_1998.
- Bordbar-Khiabani A., Bahrampour S., Mozafari M. ve Gasik M. (2022), Surface functionalization of anodized tantalum with Mn₃O₄ nanoparticles for effective corrosion protection in simulated inflammatory condition *Ceram. Int.* 48 3148–56.
- Ç. Yüksel, Ö. Gürsoy, E. Erzi, D. Dışpınar, 2xx serisi alüminyum alaşımlarında Ag ilavesinin mukavemete etkisi, 2016.
- Ding Z., Smith B.A., Hebert R.R., Zhang W. ve Jaworowski M.R. (2018), Morphology perspective on chromic acid anodizing replacement by thin film sulfuric acid anodizing *Surf. Coatings Technol.* 350 31–9
- D. Leśniak, A. Rękas, W. Libura., J. Zasadziński: Study of the deformability of 5xxx series aluminum alloy with high Mg content in a semi-industrial extrusion process. *Metal Forming* 25 (2014) 3, 159- 167.
- D. Nickel, T. Lampke, G. Alisch, S. Steinhäuser, Micro structural effect on the wear behaviour of the hard-anodised aluminium alloys EN AW-6082 and EN AW-7075, *Mater. Werkst.* 40 (2009) 523–531.
- E. Canbaz, 2021, Zr ve/veya V ilavesinin Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi-gcris.ktun.edu.tr.

E. Canıyılmaz, ve F. Kutay, (2003), Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 18, No 3, 51-63, 2003.

E. Escudero, V. López, E. Otero, MJ. Bartolomé, M.J.; JA. González, Behaviour of anodised aluminium in very long-term atmospheric exposure. Surf. Coat. Technol. 2007, 201, 7303–7309.

E.F. Özdoğru, 2023, The Effect of Chemical Composition on EN AW 6XXX Series Aluminum Alloys, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110218>.

E. Kendirli, (2019), Eloksal banyolarında kullanılan asit çözeltisi derişiminin kaplamaya etkisi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

E.U. Ergül, C. Gezeğin, A. Yıldız, (2019), Yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma kullanılarak transformatör sargı en sıcak nokta sıcaklığının modellenmesi ve optimizasyonu, DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2 (2019) : 467-480, Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.

F. Dahmoune, H. Remini, S. Dairi, O. Aoun, K. Moussi, N. Bouaoudia Madi, N. Adjeroud, N. Kadri, K. Lefsih, L. Boughani, L. Mouni, B. Nayak, K. Madani, Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from P. Lentiscus L. leaves: comparative study of artificial neural network (ANN) versus degree of experiment for predictionability of phenolic compounds recovery, Ind. CropsProd. 77 (2015) 251–261, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.08.062>.

F.W. Fahy, Atmospheric Corrosion of Anodised Aluminium Exposed over a Twelve Year Period in New Zealand. Br. Corr. J. 1983,18, 179–183.

G.K. Sigworth, The corrosion of Al–Cu-based alloys and comments on the paper “effect of solidification time on microstructure, wettability and corrosion properties of A205-T7 aluminum alloys” by Amir Kordjazi et al. Int J Metalcast.2021;15(1):13–16.

G. Oelsner, Results of Natural, Long- Time Weathering of Anodized Aluminum. Aluminium 1978, 54, 530–531.

G. Scamporrino and G. Timelli, Anodizing Al–Si foundry alloys: a critical review, Advanced Engineering Materials, 2022- Wiley Online Library.

H. Algül, (2020), Akımsız Kaplama Yöntemi İle Seramik Partikül Takviyeli Nikel Esaslı Kompozit Kaplamaların Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

H. Bodur, (2019), Metal-Mutfak Eşyalarında Kimyasal Mekanik Parlatma İşlemi İçin Al₂O₃ İçeren Polisaj Bulamaçlarının Hazırlanması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

H.J. Huang, J.H. Qiu, X.W. Wei, E. Sakai, G.J. Jiang, H. Wu, T. Komiyama, Ultra-fast fabrication of porous alumina film with excellent wear and corrosion resistance via hard anodizing in etidronic acid, Surf. Coating. Technol. 393 (2020), 125767.

H. Özlü, S. Çakar, İ. Çeper, (2013), AA6063 Alaşımlı Alüminyum Profilin H₂SO₄ Elektroliti Kullanılarak Eloksal Kaplanması, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, Fen bilimleri Enstitüsü.

İ. Bıltaş, (2020), 6XXX serisi alaşımlarının farklı ön işlem yöntemleriyle alüminyum anodizasyon üzerindeki etkisi (Master'sthesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

İ. Ök, 2021, 5XXX alüminyum alaşımları üzerine uygulanacak fosfatlama işlemi ve organik kaplamalar ile cass testi ve çevrimsel korozyon direncini artıran proses geliştirilmesi - acikerisim.btu.edu.tr.

Isabel Rute Fontinhaand Elsa Eustáquio, Influence of Exposure Conditions and Particulate Deposition on Anodized Aluminum Corrosion, 2022.

I.S. Raju, J.C. Newman, (1992). Stress-Intensity Factorsfor a Widerange of Semielliptical Surface Crack in Finite-Thickness Plates, Engineering Fracture Mechanics, 11, s. 817-829.

J.A. González, M. Morcillo, E. Escudero, V. López, E. Otero, Atmospheric corrosion of bare and anodizedaluminium in a widerange of environmental conditions. Part I: Visual observations and gravimetric results. Surf. Coat. Technol. 2002, 153, 225–234.

J.A. González, Proteção del alumínio en la atmosfer amedianterecu brimientosanódicos. InCorrosão e Protecção de Metaisnas Atmosferas da Iberoamérica. Parte II: Protecção Anticorrosiva de Metais nas Atmosferas da Iberoamérica; M. Morcillo, E. Almeida., F.

F. Sertçelik, (1999), 6063 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Direnci Üzerine Anodizasyon Öncesi Yüzey İşlemlerinin ve AA Anodizasyonla Üretilmiş İnce Oksit Filmlerinin Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Fragata, Z. Panossian, Eds.; Ibero-American Programme, Science and Technologyfor Development: Madrid, Spain, 2002; pp. 269–292.

J.G. Kaufman, Introduction to aluminum alloys and tempers. Materials Park (OH): ASM Int;2000.

J. L. Murray & A. J. Mc Alister, 1984, The Al-Si (Aluminum-Silicon) system, Bulletin of alloy phase diagrams, 5(1), 74.

J. P. O’Sullivan, G. C. Wood, Proc. R. Soc. London, Ser. A1970,317,511.

J.R. Davis, ASM Specialty Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys; ASM International: Novelty, OH, USA, 1993; pp. 579–622.

Jude Mary Runge. The Metallurgy of Anodizing Aluminum. Springer, 2018.Justin Silnutzer, Impedance Analysis of Anodized Aluminum and Structural Bridge Tendons, 2022.

K.H Rashid, A.A Khadom, Sulfosalicylic/oxalicacid anodizing process of 5854 aluminum-magnesium alloy: influence of sealing time and corrosion tendency, Results in Chemistry, 2022.

K.R. Milkey, A.R. Samsudin, A.K. Dubey, P. Kidd, Comparison between taguchi method and response surface methodology (RSM) in modelling CO₂ laser machining. Jordan J. Mech. Indust. Eng. 2014;8.

L. Dong, Y. Li, M Huang, X. Hu, Z. Qu, Y. Lu, Effect of anodizing surface morphology on the adhesion performance of 6061 aluminum alloy, International Journal of Adhesionand Adhesives, 2022.

L. Gao, X. Ou, S. Ni, K. Li, Y. Du, M. Song, Effects of θ' precipitates on the mechanical performance and fracture behavior of an Al–Cu alloy subjected to overaged condition. *Mater Sci Eng A*. 2019; 762:138091.

Marinescu, I.D., Uhlmann, E., Doi, T.K. (2007). *Handbook of Lapping and Polishing*. Boca-Raton: CRC Press.

M. Burmabıyık, 2019, Bakır-Aliminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerinin incelenmesi, dspace.trakya.edu.tr.

Mehmet Selman Gokmen, Ibrahim Dogan, Hasan Aydogan, Yanıt Yüzey Metodolojisi Kullanılarak 1-Propanol/Benzin Yakıt Karışımlarının Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması, 2021, (DOI:10.31590/ejosat.898563).

Metals Handbook (1979). American Society for Metals, 2.

M. Fedel, J. Franch, S. Rossi, Effect of thickness and sealing treatments on the corrosion protection properties of anodic oxide coatings on AA5005. *Surf. Coat. Technol.* 2021, 408, 126761.

M. Gao, Z.H. Sun, W. Yan, Z.H. Tang, Y.N. Zhang, Influence of solid particles deposition on the initial atmospheric corrosion of 7B04 aluminum alloy, *Mater. Today Commun.* 31 (2022), 103562.

M.K. Alshujery, K.A.S. Al-Saadie (2022). Anodizing of aluminum 6061 alloy with incorporated nanoparticles to inhibit the aluminum corrosion. *International Journal of Health Sciences*, 6(S1), 930-940. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS1.4847>.

M.K. Rathi; A.K. Patil Use of Aluminium in Building Construction. Available online: <https://www.engineeringcivil.com/use-of-aluminium-in-building-construction.html> (accessed on 29 August 2022).

M. Morcillo, E. Almeida. B. Rosales, Corrosion of aluminium in SO₂-polluted marine atmospheres. *Aluminium* 2000, 76, 12.

Montgomery, D. C. (2006). Design and Analysis of Experiments. In *Technometrics* (Vol. 48, Issue 1). <https://doi.org/10.1198/tech.2006.s372>.

M.S. Kenevisi, Y. Yu, F. Lin, A review on additive manufacturing of Al–Cu (2xxx) aluminium alloys, processes and defects, *Materials Science and Technology*, 2021-Taylor & Francis.

M.S. Khushaim, Investigation of the Precipitation Behavior in Aluminum Based Alloys, Doktora Tezi, King Abdullah University of Science and Technology, Materials Science and Engineering, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2015.

Myers R, Montgomery D. and Anderson-Cook C. (2009). *Response Surface Methodology: Process and Product, Optimization using Designed Experiments* (New Jersey: Wiley)

N. Pornnumpaand M. Jariyaboon, Antibacterial and corrosion resistance properties of anodized AA6061 aluminum alloy. *Engineering Journal*, 2019. 23(4): p. 171181.

O. Engler, T. Brüggemannand J. Hasenclever, Evolution of micro-chemistry during solidification and homogenisation of AA3xxx aluminium–manganese alloys, *Materials Science and Technology*, 2021, Vol. 37, No. 10, 893–90.

Ö. Demir, B. Aksu, Y. Özsoy, (2017), İlaç Formülasyonu Geliştirilmesinde Deney Tasarımı (DoE) Seçimi ve Kullanımı, *Marmara Pharmaceutical Journal* 21/2: 216-227, 2017, DOI: 10.12991/marupj.277719.

Park Y. ve Jeong C. (2021), The formation of anodic oxide film by anodizing voltage and time of 6061 aluminum alloy *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.* 34 68–72

Pasikhani J.V., Gilani N. ve Pirbazari A.E. (2016), The effect of the anodization voltage on the geometrical characteristics and photocatalytic activity of TiO₂ nanotube arrays *Nano-Structures and Nano-Objects* 8 7–14

P. Kwolek, D. Drapala, K. Krupa, A. Obloj, T. Tokarski, J. Sieniawski, (2020). Mechanical properties of a pulsed anodised 5005 aluminium alloy, *Surface & Coatings Technology*, Department of Materials Science, Poland.

SamsonJerold Samuel Chelladurai, Murugan K., AbhraPratip Ray, Makar and Upadhyaya, Venugopal Narasimharaj, Gnanasekaran S., Optimization of process parameters using response surface methodology: A review, 2021 –Elsevier.

S.H. Mohitfar, M.R. Etminanfar, S. Mahdavi, J. Khalil-Allafi, (2023), Characteristics and corrosion resistance of hard-anodised 6061-T6 aluminium alloy, *Research Center for Advanced Materials*, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

S. Sarıtaş, (1995). *Engineering Metallurgy and Materials*, s. 195-196.

S. Syed, Influence of the environment on atmospheric corrosion of aluminium. *Corros. Eng. Sci. Technol.* 2010, 45, 282–287.

Stiger T.R., Kosinski A.S., Barnhart H.X. ve Kleinbaum D.G. (1998) ANOVA for repeated ordinal data with small sample size, A comparison of ANOVA, MANOVA, WLSand GEE methods by simulation *Commun. Stat. Part B Simul. Comput.* 27 357–75

T. Aerts, T. Dimogerontakis, I. De Graeve, J. Fransaer, H. Terryn, Influence of the anodizing temperature on the porosity and mechanical properties of the porous anodic oxide film, *Surf. Coating. Technol.* 201 (2007) 7310–7317.

Turan M.D. ve Altundoğan H.S. (2011), Use of response surface methods in hydrometallurgical researches *Madencilik* 5011–23

Wagner, J. R., Mount, E. M., &Giles, H. F. (2014). Design of Factorial Experiments. *Extrusion*, 291–308. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3481-2.00025-9>.

Wei-Hsin Chen, Manuel Carrera Uribe, Eilhann E. Kwon, Kun-Yi Andrew Lin, Young-Kwon Park, Lu Ding, Lip Huat Saw, A comprehensive review of thermoelectric generation

optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM), 2022 –Elsevier.

W.H. Chen, CM. Chang, JK. Mutuku, SS. Lam, WJ. Lee, Analysis of microparticle deposition in the human lung by taguchi method and response surface methodology. *EnvironRes* 2021:197.

W. Zhu, Y. Deng, Z. Zhang, G. Tan, X.Guo , Effect of tensile stress response for oxide films on the fatigue failure behavior of anodized AA6082 alloys, 2022.

X. Liu, GS. Frankel, B. Zoofan, SI. Rokhlin, In-situ observation of intergranular stress corrosion cracking in AA2024-T3 under constant load conditions, *CorrosionSci.* 49 (2007) 139–148.

X.X. Zhang, Y. Lv, T. Hashimoto, J.O. Nilsson, X.R. Zhou, Intergranular corrosion of AA6082 Al–Mg–Si alloy extrusion: the influence of trace Cu and grain boundary misorientation, *J. AlloysCompd.* 853 (2021), 157228.

X. Zhao, G.S. Frankel, B. Zoofan, S.I. Rokhlin, In-situ X-ray radiographic study of intergranular corrosion in aluminum alloys, *Corrosion* 59 (2003) 1012–1018.

Y. Liu, Z. Wang, W. Ke. Study on influence of native oxide and corrosion products on atmospheric corrosion of pure Al. *Corr. Sci.* 2014, 80, 169–176.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İsa ÇORUHLU

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2021, Samsun Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Celik, I., Erdemir, F., and Coruhlu, I. (2023). Experimental analysis of anodic coating process parameters of Al 5754 alloy by response surface method. Surface Topography: Metrology and Properties, 11 (2), 025024.