

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK NANO YÜZEY İŞLEM
KİMYASALININ KAPLAMA SONRASI KOROZYON PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATİCE CANTAZ

TEZ DANIŞMANI
PROF. Dr. NURGÜL ÖZBAY

BİLECİK, 2025

10705849

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK NANO YÜZEY İŞLEM
KİMYASALININ KAPLAMA SONRASI KOROZYON PERFORMANSINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATİCE CANTAZ

TEZ DANIŞMANI
PROF. Dr. NURGÜL ÖZBAY

BİLECİK, 2025

10705849

BEYAN

“ Farklı Alüminyum Alaşımlarına Uygulanacak Nano Yüzey İşlem Kimyasalının Kaplama Sonrası Korozyon Performansına Etkisinin İncelenmesi ” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:			

Hatice CANTAZ

.../.../2025

İmza

ÖN SÖZ

Bu çalışmanın yapılmasında çalışmamı sahiplenerek bana yol gösteren ve takip eden danışmanım Sayın Prof.Dr.Nurgül ÖZBAY'a değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.Ayrıca bana destek olan Sayın Doç.Dr. Adife Şeyda YARGIÇ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Recep CANTAZ, annem Gülseren CANTAZ ,canım kardeşim Mehmet CANTAZ'a ve oğlum Mehmet Kutay KARAGÖZ ve Utku Mete KARAGÖZ'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hatice CANTAZ

2025

ÖZET

FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK NANO YÜZEY İŞLEM KİMYASALININ KAPLAMA SONRASI KOROZYON PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Son yıllarda elektrikli araçlar için kullanılan alüminyum alaşımlarının korozif özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada farklı Alüminyum alaşımlarında kataforez fosfat alt kaplamalarında yaşanan kristal oluşumundaki sıkıntılar baz alınarak alternatif olan nano alt kaplamanın kataforez kaplayarak korozyon performansına etkisi incelenmiştir. Üç farklı alüminyum üzerine fosfat alt kaplamaları ve farklı içeriklerle oluşturulan nano kaplama alt kaplama uygulanarak üretilen kataforez kaplamalar kuru yapışma, çevrim testi ve Scap korozyon testleri uygulanarak korozyon performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışma alüminyum malzemeler yanında diğer hafif metaller için uygulanabilecek bir proses olmasından dolayı yeni araştırmalara ışık tutacaktır. Çalışma sonucunda nano ön işlem uygulanan alüminyum alaşımlarının kataforez kaplama sonucunda performans testlerinin fosfat ön işlem uygulanan alüminyum alaşımlarına kıyasla iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda nano alt kaplamalar yenilikçi prosesler olarak araştırmalara ışık tutacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaplama, Alüminyum, Kataforez, Fosfat, Nano, Performans Testleri.

ABSTRACT

INVERSION OF THE EFFECT OF NANO SURFACE TREATMENT CHEMICAL APPLIED TO DIFFERENT ALUMINUM ALLOYS ON THE CORROSION PERFORMANCE AFTER COATING

In recent years, the corrosive properties of aluminum alloys used in electric vehicles need to be improved. In this study, based on the problems encountered in crystal formation in cataphoresis phosphate subcoatings on different aluminum alloys, the effect of an alternative nano subcoating on corrosion performance through cataphoresis coating was investigated. By applying phosphate subcoatings and nano subcoatings with different compositions to three different aluminum alloys, cataphoresis coatings were produced and their corrosion performances were compared through dry adhesion, cycle test, and SCAB corrosion tests. Since this process can be applied not only to aluminum materials but also to other light metals, this study will shed light on new research.

As a result of the study, it was observed that aluminum alloys treated with nano pre-treatment exhibited better performance in corrosion tests after cataphoresis coating compared to those treated with phosphate pre-treatment. Accordingly, nano subcoatings will contribute to research as innovative processes.

Keywords : Coating, Aluminum, Cataphoresis, Phosphate, Nano, Corrosion, Performance tests

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2.ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	2
2.1.Alüminyumun Kısa Tarihçesi ve Endüstriyel Gelişimi	2
2.2.Alüminyum Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	3
2.2.1.Şekillendirme	4
2.2.2.Yansıma.....	4
2.2.3.Mukavemet/Ağırlık Oranı.....	4
2.2.4.Hafiflik	4
2.2.5.Esneklik	5
2.2.6.Geri Dönüşüm.....	5
2.2.7.Korozyon	5
2.2.8.İletkenlik	6

2.3.Aluminyum Alaşımları Sınıflandırılması	6
2.3.1.Dövme Alüminyum Alaşımlar	8
2.3.1.1. 1xxx Serisi Alaşımlar	9
2.3.1.2. 2xxx Serisi Alaşımlar	9
2.3.1.3.3xxx Serisi Alaşımlar	10
2.3.1.4.4xxx Serisi Alaşımlar	10
2.3.1.5.5xxx Serisi Alaşımlar	10
2.3.1.6.6xxx Serisi Alaşımlar	11
2.3.1.7.7xxx Serisi Alaşımlar	11
2.3.1.8.8xxx Serisi Alaşımlar	12
2.4.Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum Yeri ve Payı.....	12
3.KOROZON.....	15
3.1.Korozyon Reaksiyonları	15
3.2.Korozyon Hücresi	17
3.3.Korozyon Çeşitleri.....	19
3.3.1.Genel-Üniform Korozyon	22
3.3.2.Çukurcuk Korozyon	22
3.3.3.Aralık/Çatlak Korozyonu	22
3.3.4.Galvanik Korozyon	22
3.3.5.Erozyon/Hız Etkili Korozyon	23
3.3.6.Taneler Arası Korozyon	23

3.4.Korozyondan Korunma Yöntemleri.....	23
3.4.1.Malzeme Seçimi.....	24
3.4.2.Anodik Koruma.....	25
3.4.3.Katodik Koruma	25
3.4.4.Yüzey Kaplama	26
3.4.4.1.Organik Kaplamalar.....	26
3.4.4.2.İnorganik Kaplamalar	26
3.4.4.3.Metalik Kaplamalar	27
4.FOSFAT KAPLAMA	30
4.1.Fosfat Kaplama Karakterizasyonu	30
4.2.Fosfat Kaplamanın Kalınlığı ve Kaplama Ağırlığı.....	31
4.3.Boya için Baz olarak Fosfat Kaplama	32
4.4.Kristal Boyutunun Etkileri ve Gözenekliliğin Sonuçları :.....	33
4.5.Fosfat Kaplamanın Reaksiyon Mekanizması	35
4.6.Metal Kompozisyonunun Fosfat Kaplama Özellikleri Üzerine Etkisi	38
5.NANO KAPLAMALAR.....	40
5.1.Nano Kaplama	40
5.1.1.Nanoteknoloji ve Nano Kaplama Nedir?	40
5.1.2.Nano Kaplamaların Özellikleri.....	40
5.1.3.Nano Kaplamaların Uygulama Alanları.....	40
5.1.3.1.Boya öncesi uygulanan nano kaplamalar:.....	40

5.1.3.2.Su Tutmaz Kaplamalar:.....	41
5.1.3.3.Kendi Kendini Temizleyen Kaplamalar:.....	41
5.1.3.4.Çizilme Dayanımını Artırıcı Kaplamalar:	42
5.1.3.5.Korozyon Önleyici Nano Kaplamalar:	42
6.KATAFOREZ KAPLAMA	44
6.1.Kataforez Kaplama Tanımı.....	44
6.2.Kataforez Kaplama Proses Akışı	46
6.3.Kataforez Kaplamanın Yüzey Hazırlama Prosesi.....	47
6.3.1.Yağ Alma.....	47
6.3.2.Durulama	49
6.3.3.Aktivasyon	49
6.3.4.Dönüşüm Kaplama (Fosfat ve Nano Kaplama).....	51
6.3.5.Durulama	51
6.3.6.Pasivasyon.....	51
6.3.7.Deiyonize Durulama.....	51
6.4.Kataforez Kaplama Banyosu.....	52
6.5.Kürlenme Prosesi.....	59
7.LİTERATÜR TARAMASI	61
8.MATERYAL VE METOT	63
8.1.Kuru Yapışma (Cross Cut) Testi	64
8.2.Scanning Electron Microscope (SEM).....	67

8.3.CASS Testi	68
8.4.Çevrimsel Korozyon Testi	69
8.5.El Tipi XRF Cihazı	71
9.DENEYSEL YÖNTEMLER VE SONUÇLAR.....	73
9.1.Deneysel Yöntemler	73
9.1.1. Fosfat Banyo Parametreleri	74
9.1.2. Nano Ön İşlem Banyo Parametreleri	75
9.1.3. Kataforez Kaplama Banyo Çalışma Parametreleri	76
9.2.Deneysel Sonuçlar	77
9.2.1.Sem Cihazı İle Fosfat Kristal Görüntüleri.....	77
9.2.2.Ham ve Nano Kaplanmış Alüminyum Plakların XRF Sonuçları.....	78
9.2.3.Kuru Yapışma Testi Sonuçları	80
10.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKÇA.....	90

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Dövme ve döküm alaşımların sınıflandırılması.	7
Tablo 3.1. Korozif ortam çeşitlerine göre malzemelerin kullanılabilirlik durumları.	24
Tablo 4.1. Çelik, çinko, alüminyum yüzeyler üzerindeki kompozisyon ve çinko fosfat kaplamalar.	37
Tablo 4.2. Farklı miktarlarda bakır, krom, nikel içeren soğuk haddelenmiş çeliklerin fosfatlanabilirliği.	39
Tablo 8.1. Çalışmada kullanılan alüminyum çeşitlerinin X-RF cihazı analizleri.	63
Tablo 8.2. Yapışma testinin ISO 2409 göre değerlendirme kriterleri.	66
Tablo 9.1. Farklı alüminyum türleri için yapılan deneysel çalışmalar.	73
Tablo 9.2. Farklı tipteki alüminyum plakar üzerinde yapılan fosfat ön işlem çalışmasında kullanılan flor miktarı ve süreler.	73
Tablo 9.3. Farklı tipteki alüminyum plakalar üzerinde yapılan nano ön işlem çalışmasında kullanılan nano çeşitleri ve süreler.	74
Tablo 9.4. Fosfat kaplama deneysel ve teorik çalışma parametreleri.	75
Tablo 9.5. Nano kaplama deneysel ve teorik çalışma parametreleri.	76
Tablo 9.6. Kataforez kaplama proses parametre değerleri.	77
Tablo 9.7. Farklı alaşımlardaki alüminyum plakalara uygulanan farklı flor değerlerinin fosfat kaplama sonrası SEM görüntüleri.	78
Tablo 9.11. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında kuru yapışma test sonuçları.	81

Tablo 9.12. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında kuru yapışma test sonuçları.....	82
Tablo 9.13. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında CASS testi sonuçları.	83
Tablo 9.14. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında CASS testi sonuçları.	84
Tablo 9.15. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçları.	85
Tablo 9.16. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçları.	86

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Temel alüminyum alaşımları.	8
Şekil 2.2. Dünyada artan alüminyumun talebi ve sektör bazlı grafiği.	14
Şekil 2.3. Sektörlere göre Avrupa’da alüminyum talebi (Mton)	14
Şekil 3.1. Korozyona uğramış bir metal.	15
Şekil 3.2. Temel korozyon hücresi.	17
Şekil 3.3. Yeraltı boru hattının hücresi.	19
Şekil 3.4. Islak korozyon türlerinin temsili görseller.	20
Şekil 3.5. Lokalize korozyonun makroskobik ve mikroskobik formlarının sınıflandırılması.	21
Şekil 3.6. Çinko kaplama ile galvanik olarak korunan metal.	25
Şekil 4.1. Soğuk çekme sac, elektrogalvanizli sac, sıcak daldırma galvanizli sac, alüminyum sacın düşük çinkolu fosfat kaplamalarının kristal morfolojileri.	38
Şekil 5.1. Hidrofob ve hidrofil yüzeylerde su damlacıkları.	41
Şekil 5.2. Nano kaplama yapılmış ve yapılmamış örnekler.	43
Şekil 6.1. Elektro kaplama uygulaması.	44
Şekil 6.2. Kataforez kaplama proses akışı.	46
Şekil 6.3. Partiküllerin yüzeyden ayrılma mekanizmasının gösterilmesi.	48
Şekil 6.4. Yağın yüzeyden ayrılma mekanizması.	48
Şekil 6.5. Kataforez kaplamada gerçekleşen reaksiyonlar.	52
Şekil 6.6. Kataforez kaplama banyosunda meydana gelen reaksiyonlar.	52

Şekil 6.7. Kataforez kaplama kimyasalların hareketi.	53
Şekil 6.8. Kataforez kaplama süresince elektrottaki OH ⁻ konsantrasyonunun profili.....	54
Şekil 6.9. Kataforez kaplama potansiyostatik denemelerinde akım-zaman eğrileri.	55
Şekil 6.10. Ultrafiltrat membran çalışma düzeneği.....	56
Şekil 6.11. Kataforez kaplamanın ultrafiltrasyon biriminde kullanılan özel sarımsı membranların konfigürasyonu.	57
Şekil 6.12. Boru şeklinde membranla ultrafiltratın ayrılma prosesi.	57
Şekil 6.13. Kataforez kaplamanın yenilenme proseslerindeki asit baz dengesi.....	58
Şekil 8.1. Cross Cut test ekipmanları.	65
Şekil 8.2. Cross Cut test ekipmanları.....	66
Şekil 8.3. Özel yapışma bandının kullanılması.....	67
Şekil 8.4. SEM Cihazı.....	69
Şekil 8.5. Renault 47-01-000-E standartına göre 1 çevrim (24 saat)'de gerçekleştirilen test aşamaları.....	71
Şekil 8.6. ASCOTT CC1000 IP çevrimsel korozyon test kabini.....	71
Şekil 8.7. El tipi Bruker XRF S1 TITAN 600 cihazı.....	73
Şekil 9.8. Alüminyum 5754 alaşımının XRF ölçümleri.....	81
Şekil 9.9. Alüminyum 6061 alaşımının XRF ölçümleri.....	81
Şekil 9.10. Alüminyum 7075 alaşımının XRF ölçümleri.....	82

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

C	: Dokunun kapasitansı [F]
H	: Isı miktarı [J]
q	: Faz yükü [C]
t	: Zaman [s]
u,v	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri
w	: Açısal hız [rad/s]
XC	: Kapasitif reaktans
XL	: Endüktif reaktans
α	: Asal gerilme doğrultusundan sapma açısı
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
D	: Çap [m]
ρ	: Yoğunluk
m	: Kütle [kg]
μ	: Dinamik Viskozite
E	: Elastisite Modülü
v	: Poisson's Oranı
b	: Bulk Modülü
σ	: Couchy Gerilme Tensörü

1.GİRİŞ

Alüminyum, hafifliği ve geliştirilebilir özellikleri sayesinde birçok endüstride tercih edilen bir malzemedir. Alüminyum, hafifliği sayesinde enerji verimliliğinin önemli olduğu birçok sektörde tercih edilmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, alüminyumun düşük yoğunluğu, yakıt tüketimini azaltmaya katkı sağlarken, korozyon ve aşınma gibi geliştirilebilir yüzey özellikleri, bu araçların güvenlik ve dayanıklılığını artırmaktadır. Bu özellikler, alüminyumun mühendislik uygulamalarında sürdürülebilirlik ve performans açısından önemli avantajlar sunmasına olanak tanımaktadır.

Korozyon ve aşınma gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla literatürde çeşitli kaplama teknikleri önerilmektedir. Özellikle elektrikli araçlar için kullanılan alüminyum alaşımlarının, çevresel etmenlere karşı daha dayanıklı hale getirilmesi, bu materyallerin performansını ve uzun ömürlülüğünü artırmak adına kritik bir gereklilik oluşturmaktadır. Bu bağlamda, alüminyum alaşımlarının korozif özelliklerinin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik ve güvenlik açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Bu korozif özelliklerin geliştirilmesi için ucuzluğu ve uygulanabilirlik yeteneği nedeniyle kataforez kaplamalar tercih edilmektedir. Bu kaplamaların uygulanabilmesi için kaplama öncesi fosfatlama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu fosfatlama işlemi kaplamanın hem yüzeye yapışma mukavemetini artırıp hem de korozyon özelliklerini daha da geliştirdiği için uygulan önemli bir prosestir. Ancak alüminyum malzemeler içerisinde bulunan silisyum nedeni ile fosfat kristal oluşumu istenen homojen düzeyde olmamakta bu da kaplamanın yapışma mukavemetine ve korozyon özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Alüminyuma uygulanan fosfat kaplamalar istenen korozyon özelliklerini sağlamadığı ve yüksek sıcaklıkta çalıştığı için ve süreç sonunda yüksek oranda fosfat çamuru oluşturduğu için endüstri için yüksak maliyet oluşturmaktadır. Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan alüminyumun en iyi şekilde korozyon özelliğini sağlayabilmek için uygulanabilecek fosfat kaplamaya alternatif nanokaplamalar oluşturulmuştur. Fosfatlama ve nanokaplama ön işlemleri sonrasında üretilen kataforez kaplamalar kuru yapışma, çevrim testleri uygulanarak korozyon performanslarının karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışma alüminyum malzemeler yanında diğer hafif metaller için uygulanabilecek bir proses olmasından dolayı yeni araştırmalara ışık tutacaktır.

2.ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1.Alüminyumun Kısa Tarihçesi ve Endüstriyel Gelişimi

Bakır, kalay, demir, kurşun, gümüş ve altın gibi metaller, tarihsel süreç boyunca doğal olarak var olmuş ve insanlık tarafından erken dönemlerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, bu yaygın ve uzun süre bilinen elementlerin aksine, alüminyum ancak 19. yüzyılda keşfedilmiş ve endüstriyel kullanımı o dönemde mümkün olabilmıştır (Doğan, 2023: 10).

Alüminyumun varlığı, 1808 yılında İngiliz bilim insanı H. Davy tarafından "aluminium" adını verdiği yeni bir metal kanıtlamış, ancak bu ad zamanla alüminyum olarak değiştirilmiştir. Alüminyumun üretimi, ergimiş alüminyum tuzlarının elektrolizinde demir katotları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve böylece alüminyum-demir alaşımı elde edilmiştir. 1825'te Danimarkalı bilim insanı N.C. Ørsted, saf alüminyum üretimini başarmış, takip eden yıllarda Alman kimyager F. Wöhler, potasyumla susuz alüminyum klorürün reaksiyonundan alüminyum tozu üretme yöntemini geliştirmiştir. Bu dönemde alüminyumun bazı fiziksel özellikleri, özellikle yoğunluğu, ortaya konmuştur (Doğan, 2023: 10).

1886 yılında, Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul Héroult, elektroliz yoluyla alüminyum üretmeyi keşfetmişlerdir. Bu bağımsız keşif, alüminyumun endüstriyel üretiminin temellerini atarak, modern alüminyum sanayisinin gelişimine önemli bir katkı sağlamıştır (Lawrance, 1963: 128-133).

Hall-Héroult prosesinin başarısı, 1888'de Karl Bayer'in boksit cevherinden alumina elde etme yöntemini geliştirmesiyle daha da pekişti. Deville yöntemi, alüminyum klorürün ($AlCl_3$) sodyum (Na) ile indirgenmesine dayanırken, Hall-Héroult yöntemi doğrudan boksit cevherinden elde edilen alumina (Al_2O_3)'yı kriyolit (Na_3AlF_6) içinde eriterek elektroliz yoluyla saf alüminyuma indirger. Hall-Héroult yöntemi alüminyumun elektrik enerjisi kullanarak saflaştırabiliyorken, Deville yönteminin indirgeme için kullanmakta olduğu sodyumu üretme aşamasında karşılamak durumunda kaldığı yüksek enerjiden kaynaklı üretim pahalılığı bu üretim yöntemini geri plana düşürmüştür. Özellikle elektroliz yöntemi büyük ölçekte uygulanabildiği için üretim maliyetlerini ciddi şekilde düşürerek alüminyumun yaygınlaşmasını sağladı.(Lawrance, 1963: 128-133).

20. yüzyılın başlarında alüminyumun ticari üretimi hızla arttı. 1910'da ilk alüminyum folyo üretilirken, 1959'da ise ilk alüminyum içecek kutusu piyasaya sürüldü. I. ve II. Dünya

Savaşları, alüminyumun stratejik önemini büyük ölçüde artırdı. Özellikle savaş dönemlerinde, hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle uçak yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaya başlandı. 1950'ler ve sonrasında alüminyum, inşaat, otomotiv ve ambalaj sektörlerinde geniş bir kullanım alanı buldu. Uzay çağının başlamasıyla birlikte ise, hafifliği ve güçlü yapısı sayesinde uzay araçlarının üretiminde önemli bir malzeme haline geldi. 1960'larda alüminyum içecek kutuları yaygınlaşarak günlük yaşamda yer buldu, aynı dönemde geri dönüşüm programları da başlatıldı. 1970'ler ve 1980'lerdeki enerji krizi, alüminyumun hafifliği nedeniyle otomotiv sektöründe daha fazla kullanılmasına neden oldu. 1990'lar ve 2000'lerde, sürdürülebilirlik kavramının önem kazanmasıyla birlikte, alüminyumun geri dönüştürülebilirliği vurgulandı ve yeni alaşımlar ile üretim teknikleri geliştirildi. Günümüzde ise alüminyum, modern yaşamın pek çok alanında vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir (Lawrance, 1963: 128-133).

2.2.Alüminyum Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alüminyum, gümüşümsü rengini ve sünek yapısını taşıyan bir metaldir ve doğada serbest olarak bulunabilir. Atom numarası 13 ve atom ağırlığı 26.982 g/mol olan alüminyum, periyodik tabloda 3A grubunda yer alır. Elektron yapıdaki çeşitliliği ve fiziksel özellikleri bakımından tipik metalleri temsil eder. Saf alüminyum, genellikle düşük mukavemete sahip olup, güçlendirilmiş halleri ise daha dayanıklı olabilmektedir (Doğan, 2023: 16-20).

Alüminyumun en dikkat çekici özelliklerinden biri, son derece çok yönlü olmasıdır. Üç yüzden fazla farklı alaşım bileşimi yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun çeşitli uygulamalarda ekonomik ve çekici olmasını sağlayan başlıca özellikleri, görünümü, hafifliği, üretilebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ile korozyon direncidir. Alüminyumun yoğunluğu yalnızca 2,7 g/cm³'tür, bu da çeliğin (7,83 g/cm³), bakırın (8,93 g/cm³) ve pirincin (8,53 g/cm³) yaklaşık üçte biri kadar bir değerdir. Alüminyum, atmosfer, su (tuzlu su dahil), petrokimyasallar ve pek çok kimyasal ortamda mükemmel korozyon direnci gösterir. Ayrıca, alüminyum yüzeyler son derece yansıtıcı olabilir ve farklı dalga boylarında yüksek yansıma özelliği, onu çeşitli dekoratif ve işlevsel uygulamalar için cazip kılar. Alüminyum, mükemmel elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir; özellikle aynı ağırlıktaki bakırdan neredeyse iki kat daha iletken olduğundan, iletkenlik gereksinimlerini karşılamak için tercih edilir. Yüksek gerilim iletim kabloları gibi uygulamalarda hem elektriksel iletkenlik hem de mekanik dayanıklılık için kullanılır. Ayrıca, ferromanyetik olmaması nedeniyle elektrik ve elektronik endüstrilerinde önemli bir avantaja sahiptir. Alüminyum alaşımları toksik değildir, bu nedenle

yiyecek ve içecek kaplarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bazı alüminyum alaşımları ise, yumuşak çeliklerden daha güçlüdür. Ancak, saf alüminyum ve bazı alaşımlarının dayanımı ve sertliği oldukça düşüktür (Doğan, 2023: 16-20).

2.2.1.Şekillendirme

Alüminyum, sünek bir malzeme olduğu için kolayca şekil alabilir. Bu özellik, alüminyum mamullerinin plastik deformasyon yöntemleriyle üretilmesinde büyük bir avantaj sağlar. Alüminyumun yüksek şekil alabilirliği, profiller, levhalar ve dövme ürünlerin verimli ve kaliteli bir şekilde üretilmesine olanak tanır (Doğan, 2023: 16-20).

2.2.2.Yansımaya

Alüminyum, yüzeyi pürüzsüz olduğunda radyo dalgalarını, görünür ışığı ve mikrodalga ışınlarını son derece iyi yansıtır. Görünür ışığın %80'ini ve termal dalgaların %90'ını yansıtmaya kapasitesine sahiptir. Alüminyum alaşımlarının uygulama alanına ve kullanım amacına bağlı olarak, polisaj işleminle parlak bir yüzey elde edilebileceği gibi, satinaj yöntemiyle mat bir görünüm de sağlanabilir (Vargel, 2020: 163-170 ; Yılmaz, 2003: 38-42).

2.2.3.Mukavemet/Ağırlık Oranı

Alüminyum alaşımlarının nispeten yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk kombinasyonu, daha ağır metallerin yerini alırken yük taşıma kapasitesinde herhangi bir kayba yol açmadan birçok avantaj sunar. Bu özellikler, mükemmel korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirlik ile birleştinde, alüminyumun teknelerde, uçaklarda ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Alüminyum alaşımlarında deformasyon ve yaşlandırma yöntemleriyle yapılan sertleştirme işlemleri, 700 MPa'ya kadar yüksek mukavemet değerleri elde edilmesine olanak tanır (Vargel, 2020: 163-170 ; Yılmaz, 2003: 38-42).

2.2.4.Hafiflik

Alüminyum, özellikle ulaşım sektörü olmak üzere birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel nedeni, yoğunluğu yalnızca 2,7 g/cm³ olan son derece hafif bir metal olmasıdır. Alüminyum ve alaşımlarının ağırlığı, aynı hacimdeki demir, elik veya bakırın sadece üçte biri kadar olup, bu da onları özellikle taşıma ve yapı uygulamaları için ideal kılar. Alüminyum, yaşlandırma işlemi ile yüksek mukavemet kazanabilir ve sertliği artırılarak yüksek

mukavemet-ağırlık oranı elde edilebilir. Küresel iklim değişikliği ile mücadelede, alüminyumdan yapılan daha hafif araçlar, yakıt tüketimini azaltarak çevre kirliliği ve sera gazı emisyonlarını düşürebilir. Bir aracın ağırlığının %10 oranında azaltılması, yaklaşık %5-6 oranında yakıt tasarrufu sağlar (Vargel, 2020: 163-170 ; Doğan, 2023: 22-25; Mallick, 2020: 77-82).

2.2.5.Esneklik

Alüminyum alaşımları, çeliğe göre yük altında üç kat daha fazla esneyip geri yaylanabilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, esnek mukavemet ve şekil koruması sağlamak için büyük avantaj sunar. Ayrıca, alüminyum alaşımları, taşıt araçlarında rijitliği sağlarken aynı zamanda çarpma enerjisinin emilmesinde de üstün performans gösterir. Bu özellikler sayesinde, alüminyum alaşımları diğer malzemelere kıyasla %50'ye kadar daha düşük ağırlıkla aynı performansı sunabilir (Yıldırım, 2006: 18-22).

2.2.6.Geri Dönüşüm

Alüminyum geri dönüşümü, enerji verimliliği ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Alüminyumun ikincil üretimi, birincil metalin cevherden üretimi için gereken enerjinin sadece %5'ini kullanır. Çevresel faktörler ve sürdürülebilir bir ekonomi oluşturma hedefi doğrultusunda, son 20 yıl içinde geri dönüştürülmüş alüminyum tüketimi önemli ölçüde artmıştır (Vargel, 2020: 163-170 ; Yılmaz, 2003: 38-42).

2.2.7.Korozyon

Alüminyum, atmosferle temas ettikten sonra yüzeyinde hızla ince bir oksit film tabakası oluşur. Bu oksit tabakası, zarar görse dahi kendini hızla yenileyebilme özelliğine sahiptir. Oksit tabakasının kalınlığı genellikle 1-8 nanometre arasındadır ve alüminyumun alümina bileşiği genellikle amorf olarak kabul edilir. Alüminyum endüstrisi, bu oksit film tabakasının varlığına borçludur, çünkü yüzeyindeki doğal oksit film, metali korozyona karşı korur. Ancak, pasifleştirilen diğer metallerde olduğu gibi, alüminyum da halojenür iyonlarına karşı kararsızdır ve bu da lokal korozyon ve çukurlaşmaya yatkın hale gelmesine neden olabilir (Vargel, 2020: 163-170).

Alüminyum ve alaşımlarının genel korozyon davranışı, iki ana faktöre bağlıdır: birincisi, malzemenin faaliyet gösterdiği çevre koşulları, ikincisi ise malzemenin metalürjik ve kimyasal yapısıdır. Çevresel faktörler atmosferik, toprak altı ve çeşitli kimyasal ortamlar gibi

farklı koşullarda olabilir. Ayrıca, yüksek sülfat ve klorür yoğunluğuna sahip endüstriyel ve deniz ortamları, alüminyum ve alaşımlarını tehdit eden en tehlikeli ortamlardan biridir. Alüminyumun saflığı azaldıkça ve alaşım elemanları eklendikçe, korozyon direnci de azalır. Bakır, korozyon direncini en çok etkileyen alaşım elementidir (Vargel, 2020: 163-170).

Alüminyumun korozyonu, metal ile sulu çözelti arasındaki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu gelişir ve bu süreç, metalin atomik yapısına dayalı karmaşık elektrokimyasal etkilerle ilerler. Metal-çözelti arayüzünde, elektrik yüklerinin taşınması, elektrokimyasal etkilere yol açar. Alüminyum, havayla temas girdiğinde yüzeyinde koruyucu bir doğal oksit film oluşur; bu film, alüminyumu kalıntılara karşı korur ve normal hava koşullarına maruz kaldığında korozyonu engeller. Taneler arası korozyon direncini en üst düzeye çıkarmak ve korozyonu sınırlamak için alaşım elementlerinin seçimi, ısıl işlemler ve koruyucu kaplamalar titizlikle yapılmalıdır (Vargel, 2020: 163-170 ; Yılmaz, 2003: 38-42).

2.2.8.İletkenlik

Alüminyum, hafifliği ve yüksek iletkenlik özellikleri nedeniyle, yüksek gerilim iletim hatları, dağıtım baraları ve yerel bina güç dağıtım sistemleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Alüminyum, aynı zamanda mükemmel bir ısı iletkenidir ve termal iletkenliği, bakırın yaklaşık %60'ı kadar olup, bu özelliği onu ısı iletimi gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme yapar. Alüminyum alaşımlarının termal iletkenliği, yalnızca kimyasal bileşenlerine değil, aynı zamanda şekillendirme ve ısıl işlem koşullarına da bağlıdır. 19. yüzyılın sonlarına doğru, bu özellik, alüminyum alaşımlarının ev ve profesyonel mutfak gereçlerinde kalaylı bakırın yerini almasına neden olmuştur. Alüminyum, ısı eşanjörleri gibi birçok uygulamada da kullanılır; bunlar arasında arabalar, buzdolapları, klimalar ve radyatörler gibi çeşitli ürünler bulunmaktadır (Vargel, 2020: 163-170).

2.3.Alüminyum Alaşımları Sınıflandırılması

Temel üretim süreçlerine göre alüminyum alaşımlar, döküm alaşımlar ve dövme alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Dövme alüminyum ve alaşımları alüminyuma eklenen alaşım elementlerine göre dört basamakla tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırmada sistemin ilk rakamı alüminyuma eklenmiş olan ana alaşım elementini göstermektedir. 2xxx serisinden ana 7xxx gruplarına kadar her grup en yoğun alaşım elementinin adını almıştır. Dövme alaşımların ana imalat sürecinde düz veya biyet şeklinde dökülen alaşımlar plastik şekillendirme işleminde

ürüne dönüştürülür. Döküm alaşımlar adına sıvı metal tüm olası performans parametrelerine ve bileşimlere sahiptir bu sebeple doğrudan ürün şekillerine dökülmektedirler. Tablo 2.1.'de gösterildiği gibi dövme ve döküm alaşımlar, element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır (Vargel, 2020: 192-205).

Tablo 2.1. Dövme ve döküm alaşımların sınıflandırılması.

Dövme Alaşımlar		
1xxx	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Mg içeriyorsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li, Sn, Zr veya B	Yaşlandırılabilir
Dökme Alaşımlar		
1xx.x	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2xx.x	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları yaşlandırılabilir
4xx.x	Al-Si	Yaşlandırılmaz
5xx.x	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
7xx.x	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xx.x	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

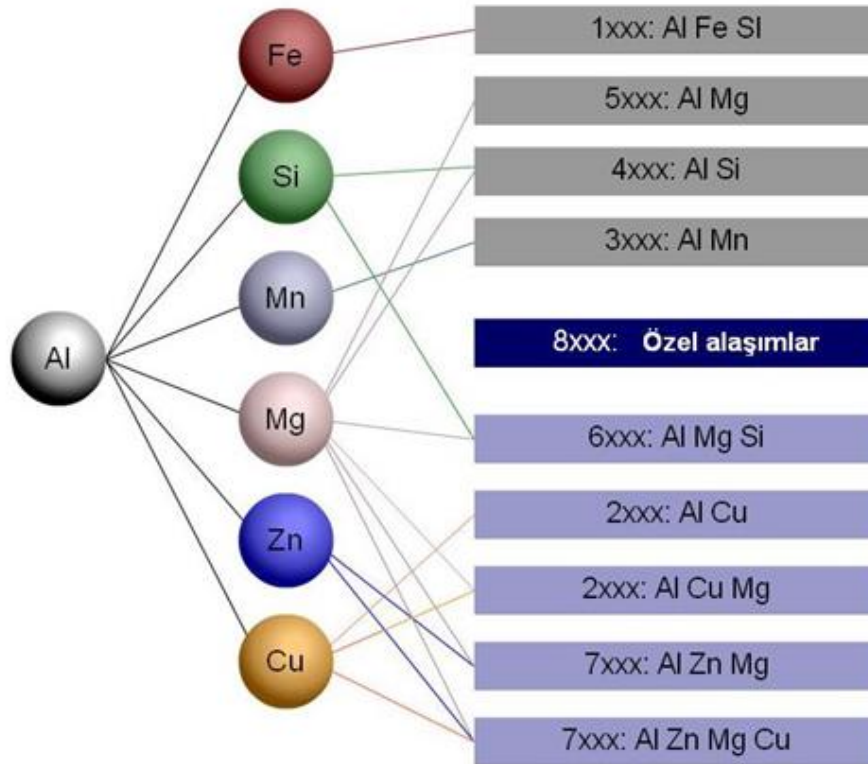
Kaynak: (Ünal, 1987: 29-33)

2.3.1.Dövme Alüminyum Alaşımlar

Bu alaşım türü isminden de anlaşılacağı üzere dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi plastik şekillendirme işlemleri aracılığıyla üretilir. Dört basamaklı tanımlamanın ilk basamağı hangi temel alaşım elementinin alüminyum alaşımını bünyesinde bulundurduğunu gösterir. 1xxx saf alüminyum (%99,00) göstermektedir. Tanımlamanın son 2 hanesi %99 değer noktasından sonra gelen sayıyı temsil etmektedir. 2xxx ve 8xxx arasında bulunan alüminyum alaşımları adına, ilk hane alaşım serilerine gelirken ikinci hane ise modifikasyon yani değişimdir. Son iki hanenin özel bir anlamı bulunmamaktadır. Alaşımı serideki diğer alaşımlardan ayırt edebilmek adına çeşitli seri numaraları kullanılmıştır (Al Saadi S & Tunay, 2017: 515-527).

Dövme alüminyum alaşımları sınıflandırılırken çoğu zaman alaşım elementlerinin özellikleri kullanılsa da bu alaşımlar yaşlanmaya olan uygunluğunu da ele alır.

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi mor ve mavi renkli seriler yaşlandırılmaya uygunken gri renkli seriler uygun değildir (Al-Saadi & Tunay, 2017: 515-527).



Şekil 2.1. Temel alüminyum alaşımları.

Kaynak: (Gökhan Tımaç, 2006: 16-34)

Alüminyum alaşımları, genellikle belirli bir sınıflandırma sistemine göre gruplanır ve bu sistem, dövme alaşımlarının farklı gruplarını tanımlar. Her bir grup, benzersiz özelliklere ve kullanım alanlarına sahiptir. Dövme alaşımlarının genel özellikleri, her bir grubun içeriğine ve mekanik özelliklerine dayanarak çeşitlenir. Aşağıda, dövme alaşımlarını temsil eden ana sınıfların özellikleri açıklanmıştır (Al-Saadi & Tunay, 2017: 515-527).

2.3.1.1. 1xxx Serisi Alaşımlar

%99.00 veya daha yüksek saflıktaki alüminyum, özellikle elektrik ve kimya sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yüksek saflık seviyesindeki alüminyum, mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, düşük mekanik özellikler ve çok iyi işlenebilirlik gibi özelliklerle tanınır. Alüminyumun mukavemeti, gerilme sertleştirilmesi yöntemiyle orta derecede artırılabilir. Bu saf alüminyum türündeki başlıca safsızlıklar ise demir ve silisyumdur (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.2. 2xxx Serisi Alaşımlar

2xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi bakırdır ve genellikle magnezyum ikinci element olarak eklenir. Bu alaşımlar, en iyi özelliklerini elde etmek için çözümlenme ısıl işlemine ihtiyaç duyarlar. Çözümlenme işleminden sonra, mekanik özellikler düşük karbonlu çeliğin özelliklerine yakın hale gelir ve bazen bu özellikleri aşabilir. Bazı durumlarda, mekanik özellikleri daha da iyileştirmek için çökelme ısıl işlemi (yaşlandırma) uygulanır. Bu işlem, akma dayanımını artırırken, malzemenin uzama oranında bir azalmaya yol açar; çekme dayanımına etkisi ise daha sınırlıdır. 2xxx serisi alaşımlar, çoğu diğer alüminyum alaşımına göre daha düşük korozyon direncine sahip olup, belirli koşullarda intergranüler korozyon (sınır içi korozyon) riski taşır. Bu yüzden, levha formundaki bu alaşımlar genellikle yüksek saflıkta alüminyum, 6xxx serisinden bir magnezyum-silisyum alaşımı veya %1 Zn içeren bir alaşımla kaplanır (Hatch, 1984: 154-183).

2xxx serisi alüminyum alaşımlar, özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda son derece uygundur. Bu alaşımlar, genellikle aşağıdaki alanlarda kullanılır: kamyon ve uçak tekerlekleri, kamyon süspansiyon parçaları, uçak gövde ve kanat kaplamaları, yapısal bileşenler ve 150 °C (300 °F) kadar olan sıcaklıklarda yüksek mukavemet gerektiren parçalar. Bu serinin alaşımları, bu tür zorlu koşullarda mükemmel performans

gösterdiği için, taşıma ve havacılık endüstrilerinde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.3.3xxx Serisi Alaşımalar

Magnezyum, 3xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementidir. Bu alaşımlar, ısıl işlem ile sertleştirilemezler, ancak 1xxx serisine kıyasla yaklaşık %20 daha yüksek mukavemete sahiptirler. Alüminyuma eklenebilecek magnezyum miktarı genellikle %1.5 civarındadır, bu yüzden magnezyum yalnızca birkaç alaşımdan birinin başlıca bileşeni olarak kullanılır. Bu alaşımlar arasında en yaygın olanlardan biri olan 3003, orta derecede mukavemet gerektiren ve yüksek işlenebilirlik isteyen genel amaçlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.4.4xxx Serisi Alaşımalar

4xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi silisyumdur. Silisyum, alüminyuma eklenerek erime aralığını belirgin şekilde düşürebilir (yaklaşık %12'ye kadar), ancak bu ekleme alaşımın kırılma dayanımına neden olmaz. Bu özellik, alüminyum-silisyum alaşımlarını özellikle alüminyumları birleştirmek amacıyla kullanılan kaynak telleri ve sert lehimleme alaşımları için ideal hale getirir. Bu tür uygulamalarda, alaşımın erime noktası, temel metalin erime noktasından daha düşük olmalıdır. 4xxx serisindeki çoğu alaşım ısıl işlemle sertleştirilemez, ancak bazı durumlarda kaynak işlemi sırasında ısıl işlem yapılabilir alaşımlar kullanıldığında, bu alaşımlar belirli bir dereceye kadar ısıl işleme yanıt verebilirler (Hatch, 1984: 154-183).

Ayrıca, silisyum içeren bu alaşımlar, anodize oksit kaplama uygulamalarında koyu gri ile kömür rengi arasında bir renk alır, bu da onları mimari uygulamalarda talep gören bir seçenek haline getirir. Öne çıkan bir alaşım olan 4032, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek aşınma direnci özelliklerine sahiptir, bu da onu dövme motor pistonu üretimi için ideal bir malzeme yapar (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.5.5xxx Serisi Alaşımalar

Magnezyum 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana elementidir. Magnezyum bu alaşımlarda çeşitli durumlarda tek başına veya manganez ile kullanılarak sertleşebilen ve orta-yüksek mukavemet özelliğine sahip alaşımlar oluşturur. Sertleştirici özelliği göz önünde bulundurulduğunda magnezyum manganeze nazaran çok daha etkili bir element olarak ön plana

çıkar. Örneğin %1.25 manganeze eşdeğer olarak %0,8 magnezyum kullanılabilir. Bu seride bulunan alaşımlar deniz ortamlarında mükemmel korozyon direnci özelliklerinin yanı sıra iyi kaynak özelliği göstermeleriyle de bilinir. (Hatch, 1984: 154-183)

Ancak içeriğinde yaklaşık %3,5 ve üzerinde magnezyuma sahip alaşımlar belirli kısıtlamalara sahiptir. %3,5 ve üzerinde magnezyuma sahip alaşımlarla çalışma yapılırken ~65 °C (150 °F) ve üstü sıcaklıklarda gerilme-korozyon çatlamasına yakın olduğu için güvenli çalışma sıcaklıklarına ve işleme miktarlarına dikkat edilmelidir. Bu nedenle bahsi geçen türdeki alaşımlarla çalışma yapılırken sıcaklık değerleri şartlarla sınırlandırılmalı ve belirli sıcaklık aralıklarıyla kullanım sınırlandırılmalı gerçekleştirilmelidir (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.6.6xxx Serisi Alaşımlar

Magnezyum silikidinin (Mg_2Si) oluşumunu sağlayan, magnezyum ve silisyum içeren bu bileşenler 6xxx serisi alüminyum alaşımlar olarak adlandırılır. Bu özellik sayesinde ısı ile işleme alaşımların sertleştirilmesi mümkün hale gelir. 6xxx serisi alaşımların özellikleri arasında kaynak yapılabilirlik, işlenebilirlik, şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci gibi önemli önemli avantajlar bulunsun da 7xxx ve 2xxx serilerindeki alaşımların sahip olduğu kadar yüksek mukavemet değerleri yoktur. 6xxx serisindeki alaşımlar yalnızca orta seviyede mukavemet sunmaktadır (Hatch, 1984: 154-183).

6xxx serisindeki alaşımlar, ısı ile işleme şekillendirilebilir ve T4 sertliğine ulaşabilirler; yani, çözümlü ısı işleme yapılmış ancak çökelme ısı işleme uygulanmamıştır. Şekillendikten sonra, bu alaşımlar çökelme ısı işleme ile güçlendirilerek, T6 sertliği elde edebilir, yani tam olarak yüksek mukavemet özelliklerine ulaşabilirler. Bu özellikleri, 6xxx serisi alaşımları, inşaat, otomotiv ve diğer endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir seçenek yapmaktadır (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.7.7xxx Serisi Alaşımlar

7xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi çinkodur ve bu alaşımlar, çinkonun %1 ile %8 arasında değişen miktarlarda, daha küçük bir magnezyum oranıyla birleşmesiyle yüksek mukavemetli ısı ile işleme yapılabilir alaşımlar ortaya çıkar. Bu alaşımlar, bazen bakır ve krom gibi diğer elementlerin küçük miktarlarda eklenmesiyle daha da geliştirilir. Ayrıca, nadiren skandiyum da eklenerek alaşımın özellikleri daha da iyileştirilebilir (Hatch, 1984: 154-183).

7xxx serisi alaşımlar, özellikle uçak gövde yapıları, mobil ekipmanlar ve yüksek gerilim altında çalışan diğer parçalar için kullanılır. Ancak, daha yüksek mukavemete sahip 7xxx alaşımları, gerilme korozyon çatlamaına karşı daha düşük bir direnç gösterir. Bu nedenle, genellikle daha iyi mukavemet, korozyon direnci ve kırılma tokluğu kombinasyonlarını sağlamak amacıyla hafif aşırı yaşılandırılmış bir sertlikte kullanılırlar. Bu, alaşımların daha iyi performans göstermesini sağlarken, korozyon ve çatlama risklerini azaltmaya yardımcı olur (Hatch, 1984: 154-183).

2.3.1.8.8xxx Serisi Alaşımlar

8xxx serisi alüminyum alaşımları, çok çeşitli kimyasal bileşimlere sahip olup, farklı özellikler sağlamak için çeşitli elementlerin kombinasyonları kullanılır. Örneğin, Al-Fe-Ce alaşımları (örneğin, 8019) veya Al-Fe-V-Si alaşımları (örneğin, 8009), gelişmiş yüksek sıcaklık performansı sağlamak için tercih edilir. Diğer taraftan, lityum içeren alaşımlar (örneğin, 8090) daha düşük yoğunluk ve daha yüksek sertlik özellikleri sunar (Hatch, 1984: 154-183).

8090 alaşımı, çökelme sertleştirmesi ile güçlendirilebilen bir alaşımdır ve özellikle uçak ve uzay uygulamalarında, özellikle helikopter bileşenlerinde, orta-yüksek mukavemetli 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlarının yerine kullanılmaktadır. Bu tür alaşımlar, yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılır ve genellikle hafiflik ve dayanıklılık özellikleri ile tercih edilir (Hatch, 1984: 154-183).

2.4.Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum Yeri ve Payı

Otomotiv endüstrisi ve alüminyum tarihi konularının birbirlerine olan etkileri sonucu bağlantılı oldukları bir gerçektir. Bu iki konunun birlikte geçirmiş olduğu ortak geçmiş günümüzde ortalama kategorisinde bulunan bir otomobilde çeşitli alüminyum parçaların mevcut olmasına vesile olmuştur. Bu parçalar yan çarpma çubukları, koltuk rayları, tamponlar, radyatörler, dişli kutuları ve jantlar gibi parçalardır. Araçta bulunan bu parçaların aracın toplam kütlelerine oranı yaklaşık %10'dur. Alüminyum elementinin dayanıklı ve hafif oluşu sayesinde otomotiv endüstrisinde daha ekonomik ve verimli araçlar üretilebilmektedir (Yıldız, 2011: 19-23).

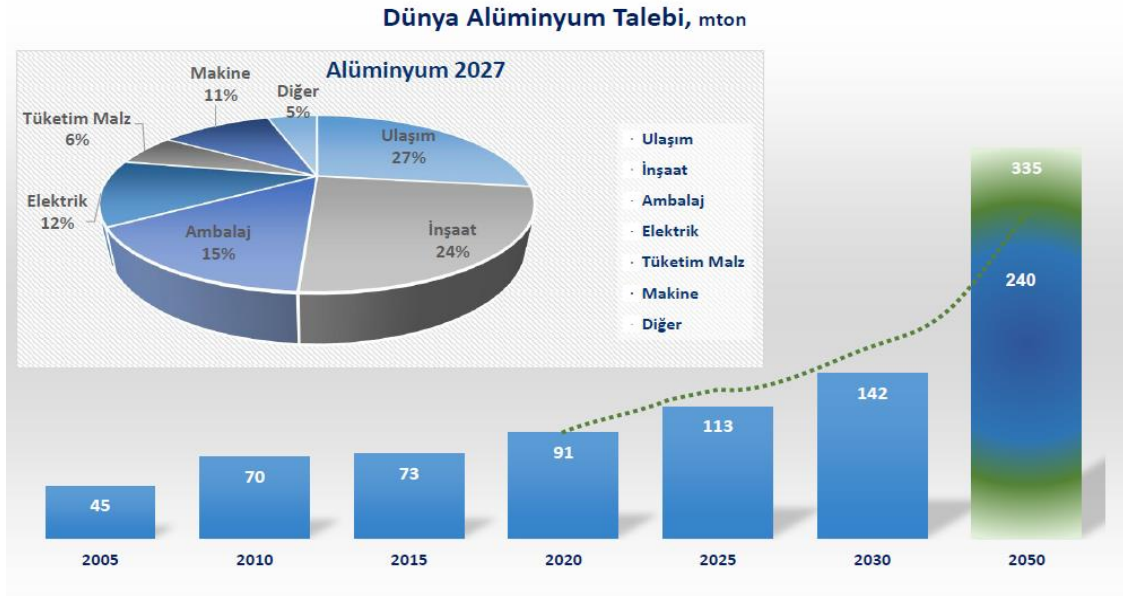
Günümüz tarihinde ulusların birbirleri içerisinde bulunduğu ekonomik rekabet ve artan çevresel kaygılar karşısında yürürlüğe alınan düzenlemeler otomotiv endüstrisini etkileyen faktörler arasındadır. Taşıt üreten kuruluşlar emniyet ve konfor gibi etmenleri de gözeterek,

çevreye daha az zarar veren, geri dönüştürülmesinin yapılabildiği araçlar üretme durumuyla karşı karşıyadır. Bununla birlikte bahsettiğimiz uluslararası rekabet sebebiyle maliyetleri düşürerek verimliliği arttırmaları gerekmektedir. Bu bağlamda, alüminyum gibi geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması konusunda önem arz etmektedir (Yıldız, 2011: 19-23).

Otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımının faydalarından biri de malzemenin hafif oluşudur. Genellikle aracın toplam ağırlığı, aracın kullanmakta olduğu yakıt miktarıyla orantılıdır. Örnek vermek gerekirse ortalama bir aracın ağırlığı 100 kilogram kadar azaltılabilirse, araç 100 kilometrelik bir yolda yaklaşık olarak 0,6 litre kadar daha az yakıt harcamaktadır. Aracın daha az yakıt tüketmesi demek, daha az miktarda düşük egzoz emisyonlarının çevreyi kirleteceği ve işletme maliyetlerindeki azalmadır (Yıldız, 2011: 19-23).

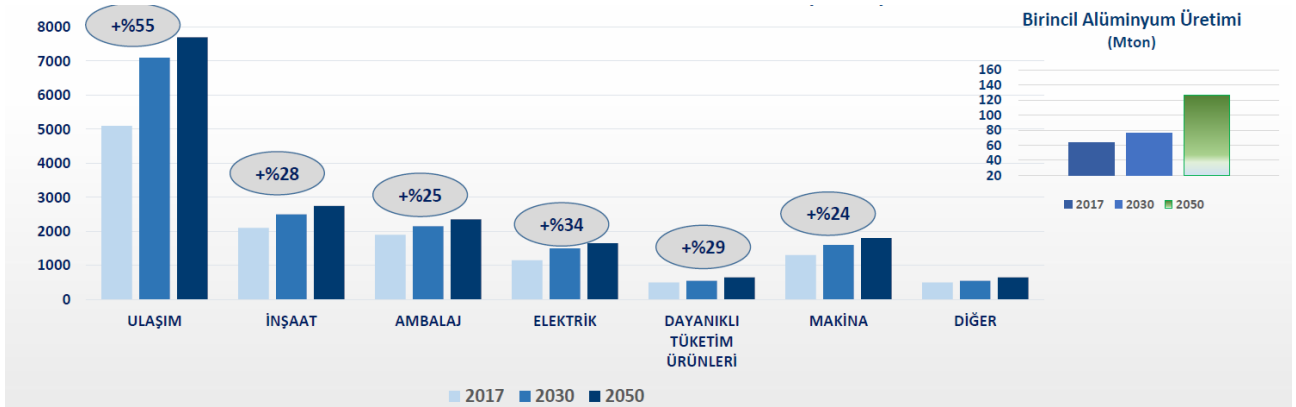
Alüminyumun kalitesinden önemli ölçüde bir şey kaybetmeyerek geri dönüştürülebilir olması malzemenin hurda değerini yükseltir ve geri dönüşüm oranını neredeyse %95'lere çıkarır. Hurda alüminyumun geri dönüştürülmesi sonucunda, malzeme maliyetleri düşer ve çevre üzerinde meydana gelen olumsuz etkiler azalır (Yıldız, 2011: 19-23).

Yol tuzlama çalışmaları sonrası parçalara gelen tuz ve suya karşı alüminyumun dayanıklı olması, aracın parçaları için büyük bir avantaj sağlar. Alüminyumun korozyona karşı direncinin yüksek olması sebebiyle kaplamasız veya boyasız olsa bile çelik gibi paslanmadan kullanılabilir. Ayrıca alüminyum çeşitli plastik malzemeler gibi UV ışınları, çöl sıcaklığı veya kuzey soğuğu karşısında kırılma geçirmez ve zayıflık göstermez. Bu özellikleri sebebiyle otomotiv sektörü ve alüminyumun uzun ve ortak bir geçmişi vardır (Yıldız, 2011: 19-23).



Şekil 2.2. Dünyada artan alüminyumun talebi ve sektör bazlı grafiği.

Kaynak: (TALSAD (Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği), 2022)



Alüminyum üstün özellikleri nedeniyle önümüzdeki yıllarda daha fazla kullanılan ve tercih edilen bir malzeme olmaya devam edecektir. Alüminyum talebinin özellikle elektrikli araçlara geçiş döneminde büyük bir talep artışı getireceği beklenmektedir. Bu nedenle en büyük talep artışı %55 ile ulaşım sektöründen gelecek olup, ikinci sırayı %28'lik artış beklentisi ile inşaat sektörü oluşturmaktadır. 2050 yılında toplam birincil alüminyum talebinin 120 milyon tonun üzerine çıkacağı beklenmektedir.

Şekil 2.3. Sektörlere göre Avrupa'da alüminyum talebi (Mton)

Kaynak: (TALSAD (Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği), 2022)

3.KOROZON

Günümüzde kullanılan işlenmiş metaller, iletken ortamlara (su, toprak, atmosfer gibi) maruz kaldığında elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu metalik özelliklerini kaybedebilir. Bu olaya korozyon denir. Saf metaller doğada genellikle oksitlenmiş formda ve mineraller halinde bulunurlar. Bu mineraller, fabrikalarda işlenerek yüksek enerji kullanılarak metal haline getirilir. Ancak, bu metaller iletken ortamlara girdiğinde, üretim sürecinde kazandıkları enerjiyi geri vermek amacıyla tekrar oksitlenip mineral haline dönüşmeye çalışırlar. Bu enerji kaybı, metalin korozyona uğramasına ve oksit minerallerinin oluşmasına yol açar. Korumasız metal yüzeyleri, korozyon etkilerinden daha fazla zarar görür. Şekil 3.1’de korozyona uğramış bir metal resmi görülmektedir.(Karabacak & Karakaya, 2023: 6-13)



Şekil 3.1. Korozyona uğramış bir metal.

Kaynak: (Karabacak & Karakaya, 2023)

3.1.Korozyon Reaksiyonları

Korozyon, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşen bir fenomendir. Bu reaksiyonlar, elektron alışverişi ile meydana gelir. Metal yüzeyindeki elektronlar, daha yüksek negatif yüklü bölgelerden daha düşük negatif yüklü bölgelere doğru hareket eder, bu hareket de elektrik akımını oluşturur. Aynı zamanda, iletken bir ortamda iyonlar hareket eder ve elektrik akımını taşıyan bu iyonlar, metalin korozyon sürecinde önemli bir rol oynar (Beckman, 1997: 302-315).

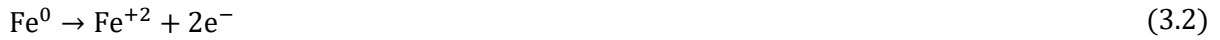
Metallerin bulunduğu iletken çözeltiler (su, toprak gibi) korozyona yol açabilir. Aynı ortamda yer alan farklı metal malzemelerinin korozyona uğrama hızları, her bir metalin yapısal

özelliklerine göre değişiklik gösterir. Aktifliği daha yüksek olan bir metal, daha hızlı korozyona uğrar. Yani, aktiflik oranı ne kadar yüksekse, metalin korozyona uğrama oranı da o kadar fazla olacaktır. Bu nedenle, daha aktif metaller, çevresel etkilere daha duyarlı olup, daha kolay bir şekilde korozyona uğrarlar (Beckman, 1997: 302-315).

Korozyon, oksidasyon ve redüksiyon adlı iki elektrokimyasal sürecin aynı anda gerçekleşmesiyle ortaya çıkar. Oksidasyon reaksiyonu, anot tarafında meydana gelirken, redüksiyon reaksiyonu katot tarafında gerçekleşir. Oksidasyon sırasında, demir atomu iki elektron kaybeder ve Fe^{2+} veya Fe^{3+} iyonuna dönüşür. Anodik korozyon oluşumunda da demir, oksijen ve nem etkisiyle elektron kaybederek oksitlenir. Bu sürece oksidasyon denir. Öte yandan, indirgenme sürecinde oksijen molekülleri veya hidrojen iyonları elektron kazanarak reaksiyona girer. Bu durumu gösteren kimyasal reaksiyonlar Denklem (3.1) – Denklem (3.4)'deki gibidir (Beckman, 1997: 302-315). Denklem (3.1)'de görüldüğü gibi indirgenme reaksiyonunda demir atomu iki elektron kaybeder.



Anodik reaksiyon Denklem (3.2)'de ve katodik reaksiyon Denklem (3.3)'te görülmektedir.



Denklem (3.4)'te ise toplam reaksiyon görülmektedir.

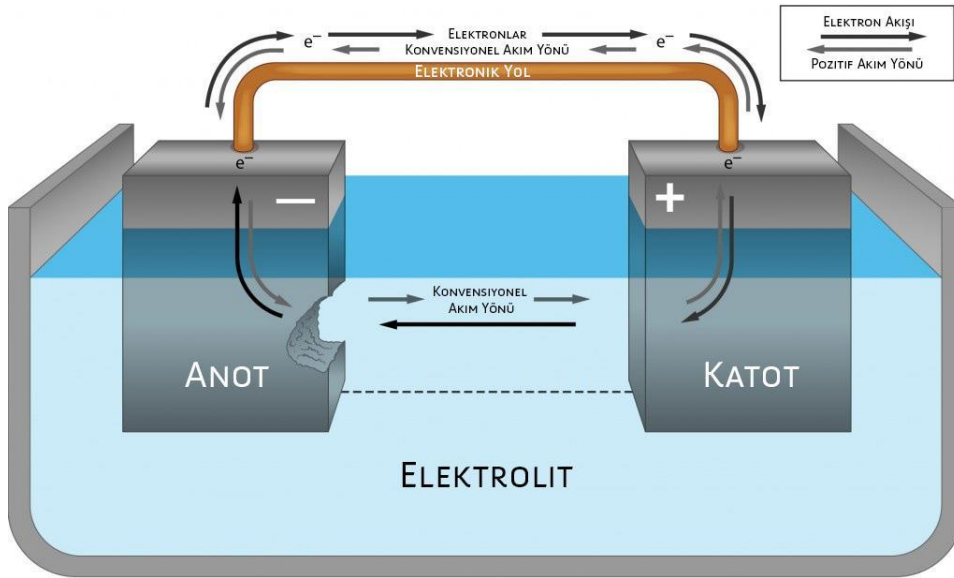


Bu reaksiyonlar, metal (özellikle demir) su ve hava gibi ortamlarda kimyasal tepkimelere girerek demir oksit oluşumuna yol açar ve bu süreç metalin korozyona uğramasına neden olur. Bir elektrot, diğer elektrot ile arasındaki potansiyel farkına bağlı olarak elektrokimyasal bir korozyon hücresinde ya anot ya da katot haline gelir. Bu potansiyel fark, korozyonun oluşmasına sebep olur. Elektriksel olarak daha negatif veya daha aktif olan elektrot anot olarak görev yaparken, daha az negatif olan elektrot katot olur. Korozyona uğramayan ve korunan bölge katot kısmıdır. Elektrolit ortam, korozyon hücresinin oluşabilmesi ve iyon akışının sağlanabilmesi için gerekli olan bir yapıyı oluşturur. Anot ve katot elektrotları bu elektrolit ortamında yer alır. Bu ortamda, anottan iyonlar çıkar ve katota iyonlar girer. Anot ile

katot arasındaki elektriksel bağlantı sayesinde korozyon hücresinin elektriksel devresi tamamlanır ve bu şekilde akım akışı sağlanır (Karabacak & Karakaya, 2023: 6-13).

3.2.Korozyon Hücresi

Atmosferdeki, sulu ortamlardaki ve toprak altındaki metallerin yüzeylerinde su veya su filmi bulunabilir. Atmosferdeki su buharı, hava bileşeni olan oksijenle karışarak belli bir oranda suda çözünür. Suda çözünen oksijen, metal yüzeyinde elektron alarak (redüksiyon) iyonik hale gelmeye çalışır. Redüksiyon için gerekli olan elektronlar metalden sağlanırsa, metal elektronlarını oksijene vererek oksitlenir ve atomlar sulu iyonlara dönüşür. Bu süreç sonucunda metal, kimyasal bir değişime uğrar ve korozyona yol açar (Davis, 2000: 283-301). Şekil 3.2’de temel korozyon hücresi verilmiştir.



Şekil 3.2. Temel korozyon hücresi.

Kaynak : (BMS Mühendislik, 2024)

Korozyonun gerçekleşebilmesi için, korozyon hücresinin kesintisiz olarak çalışması gerekmektedir. Anot tarafındaki kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan metal iyonları çözeltiliye geçerken, bu süreçte meydana gelen elektronlar elektriksel iletkenlik aracılığıyla katoda taşınır. İyonların çözeltili içinde hareketiyle, katot ve anot arasındaki elektriksel akım oluşur. Negatif yüklü iyonlar anoda, pozitif yüklü iyonlar ise katoda doğru hareket eder. Bu şekilde, korozyon hücresinin döngüsü tamamlanır ve korozyon süreci devam eder. Ohm

Yasası'na göre bir korozyon hücresi akımı (i_c) Denklem (3.5)'te ki gibi bulunur (Davis, 2000: 283-301).

$$i_c = \frac{(E_a - E_c)}{(R_m + R_a + R_c)} \quad (3.5)$$

i_c : Korozyon hücresi akımı (Amper)

E_a : Başlangıçtaki anot potansiyeli (V)

E_c : Başlangıçtaki katot potansiyeli (V)

R_m : Metal direnci (Ω)

R_c : Katot direnci (Ω)

R_a : Anot direnci (Ω)

Anot ile katot arasında gerçekleşen korozyon, metal malzemenin kütlelerinde kayıplara yol açar. Bu kaybın miktarı, Faraday Elektroliz Kanunu ile hesaplanabilir. Anot ve katot arasındaki dirençler, metalin direnci (R_m) sabit kaldığı sürece, döngüden geçen akıma orantılı olarak zamanla artar. Bu artış, korozyon sürecinin ilerlemesiyle birlikte metalin kütlelerinde meydana gelen azalmanın daha belirgin hale gelmesine neden olur (Davis, 2000: 283-301).

$$m = \frac{(A I t)}{(F n)} \quad (3.6)$$

A: Metal atom kütlesi (Fe:56)

m: Serbest hale gelen metalin kütlesi (g/m^2)

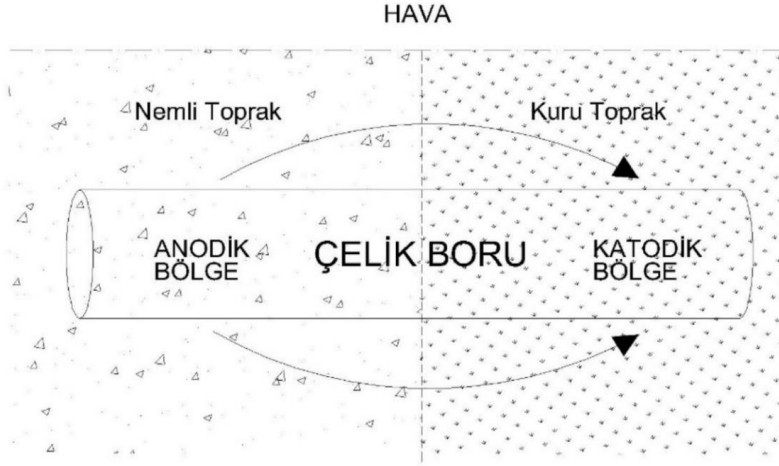
I: Akım yoğunluk değeri (A/m^2)

t: Zaman (s)

F: Faraday sabiti (96500, Coulomb/mol)

n: Değerlik sayısı

Denklem (3.6)'daki formül baz alınarak hesaplama yapıldığında 1 amperlik bir korozyon akımı yaklaşık 9 kg çeliği iyon haline dönüştürür. Şekil 3.3'te elektrokimyasal korozyon hücresi oluşumu görülmektedir.



Şekil 3.3. Yeraltı boru hattının hücresi.

Kaynak: (Karabacak & Karakaya, 2023: 6-13)

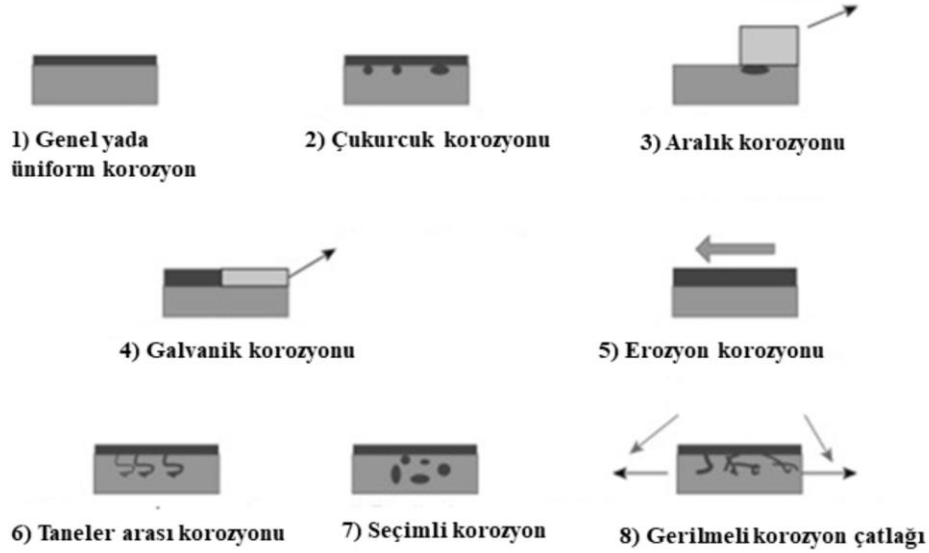
3.3.Korozyon Çeşitleri

Metallerin standart potansiyelleri, iki metal arasındaki korozyon akımının hangi yönde gerçekleşeceğini ve metallerin birbirlerine temas ettiğinde hangi metalin korozyona uğrayacağını belirler. Standart elektrot potansiyeli daha negatif olan metal, anot olarak görev yapar ve bu metal korozyona uğrar. Diğer taraftan, daha pozitif potansiyele sahip olan metal ise katot olarak kalır ve korozyondan etkilenmez. Bu potansiyel farkı, korozyon sürecinin yönünü ve şiddetini belirleyen temel faktördür (Karabacak & Karakaya, 2023: 6-13).

Farklı ortamlarda, çeşitli etki ve mekanizmalar sonucu farklı korozyon türleri meydana gelir. Bu çeşitlilik, korozyonun önlenmesi için uygulanacak koruma yöntemlerinin de farklılık göstermesine neden olur. Bu yüzden, bir malzemedeki meydana gelen korozyonun türünün belirlenmesi, korozyona karşı etkili bir mücadele stratejisi geliştirilmesinde büyük önem taşır. Korozyonun türüne göre alınacak önlemler ve uygulanacak yöntemler, malzemenin ömrünü uzatmak ve zararları minimize etmek açısından kritik rol oynar (Zarras & Stenger, 2014: 3-28).

Literatürde korozyon, üç ana sınıflandırma ile kategorize edilmiştir. İlk sınıflandırma, aşındırıcı ortamın doğasına göre ıslak ve kuru korozyon olarak yapılır. İkinci sınıflandırma, korozyonun mekanizmasını göz önünde bulundurarak elektrokimyasal ve kimyasal korozyon şeklinde yapılır. Üçüncü sınıflandırma ise, aşınmış metalin görünümüne bakarak üniform ve lokalize korozyon olarak ayrılır. Pratikte, korozyonun birden fazla kategoriye girebileceği durumlar olsa da, korozyon problemlerinin araştırılması ve çözülmesi açısından ıslak korozyon çeşitleri sekize ayrılmıştır. Bunlar; üniform/genel korozyon, çukur (pitting) korozyonu,

galvanik korozyon, aralık korozyonu, taneler arası korozyon, erozyon korozyonu, seçimli korozyon ve gerilmeli çatlak korozyonudur. Sekiz farklı korozyon türüne ait temsili görseller Şekil 3.4’te gösterilmektedir (Zarras & Stenger, 2014: 3-28).



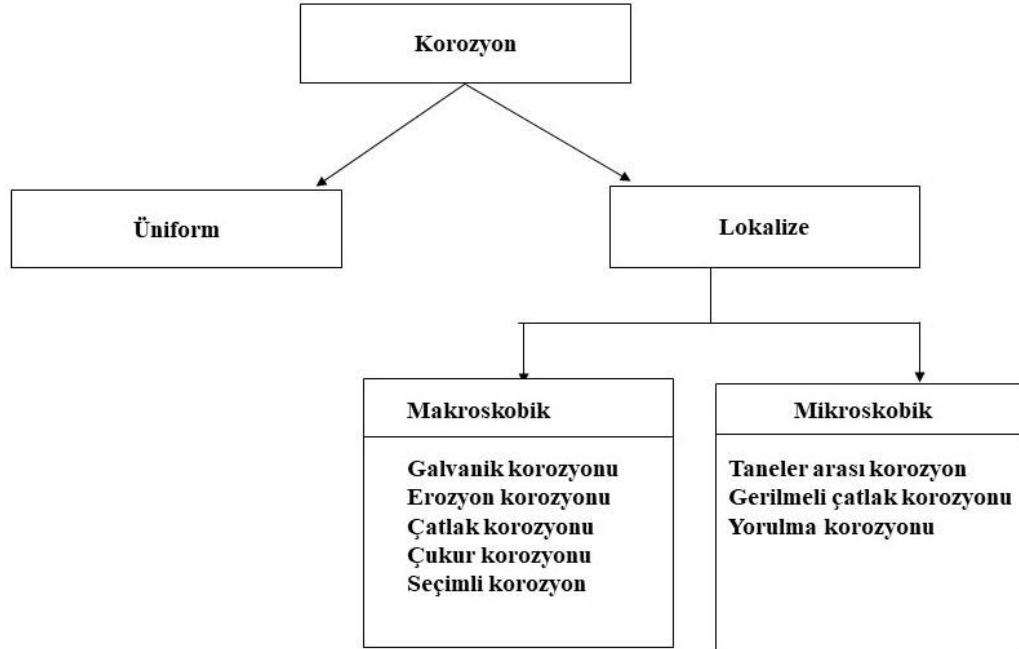
Şekil 3.4. Islak korozyon türlerinin temsili görseller.

Kaynak: (Zarras & Stenger, 2014: 3-28).

Buna ek olarak, taneler arası korozyon türüne pul pul dökülme (exfoliation) korozyonu, erozyon korozyonuna ise kavitasyon/sürtünme korozyonu, gerilmeli çatlak korozyonuna ise yorulma korozyonu ve hidrojen kırılabilirliği gibi korozyon çeşitleri de dâhildir. Bu türler, metal yüzeylerinde meydana gelen korozyonun farklı şekillerde ortaya çıkmasına neden olur ve her biri, belirli çevresel koşullar ve stres durumlarına bağlı olarak metal malzemelerin dayanıklılığını etkiler. Bu çeşitlerin anlaşılması, malzeme mühendisliği ve korozyon kontrolü açısından önemlidir çünkü her bir korozyon türü, farklı korunma yöntemleri ve stratejileri gerektirir (Zarras & Stenger, 2014: 3-28).

Korozyon çeşitleri, korozyona uğrayan metalin dış görünümünü dikkate alınarak üniform ve lokalize olarak sınıflandırılmaktadır ve bu sınıflandırma korozyonun incelenmesi için önemli bir temel sağlar. Bu bağlamda, literatürde yer alan çeşitli korozyon türlerinin üniform ve lokalize olarak nasıl sınıflandırıldığı, korozyonun yayılma biçimini ve etkilerini daha iyi anlamaya yardımcı olur. Şekil 3.5’te, bu sınıflandırmanın görsel bir temsili sunulmaktadır, burada üniform korozyon, malzemenin tüm yüzeyine yayılmış şekilde eşit olarak gerçekleşirken, lokalize korozyon türleri (örneğin, çukur korozyonu) belirli bir alanda

yoğunlaşan korozyon olaylarını temsil eder. Bu tür sınıflandırmalar, korozyonun daha verimli bir şekilde analiz edilmesine ve korunma yöntemlerinin seçilmesine olanak tanır (Zarras & Stenger, 2014: 3-28).



Şekil 3.5. Lokalize korozyonun makroskobik ve mikroskobik formlarının sınıflandırılması.

Kaynak: (Davis, 2000: 3-28)

Şekil 3.5'teki korozyonun makroskobik türleri (galvanik, erozyon, çatlak, çukur ve seçimli korozyon) metal yüzeyinin daha geniş bir alanını etkileyerek meydana gelen hasarı gözle görülür hale getirir. Öte yandan, mikroskobik korozyon türlerinde (taneler arası, gerilmeli çatlak ve yorulma korozyonu) metaldeki aşınma daha azdır. Mikroskobik korozyon türlerinde, gözle görülür hasar oluşmadan önce metalde bir bozulma başlamakta olup, bu durum metalin korunması için alınacak tedbirlerde zorluklar yaratabilir ve ilerleyen dönemlerde ciddi korozyon sorunları yaşanmasına yol açabilir (Davis, 2000: 3-28) (Zarras & Stenger, 2014: 6-13) (Kaya, 2023: 28-44).

3.3.1.Genel-Üniform Korozyon

Bu, aynı zamanda uniform korozyon ya da kuru korozyon olarak bilinir; çıplak metal yüzeyinin hemen hemen eşit bir şekilde aşındığı bir korozyon türüdür. Yüzeyin tamamında aynı hızda ilerleyen bir korozyon olarak tanımlanabilir. Oksijen, bu tür korozyonun başlıca sebebi olarak rol oynar. En fazla genel korozyona uğrayan malzemeler arasında dökme demir ve çelik yer alır. Bu malzemeler, nemli bir ortamda pas benzeri bir görünüm kazanırlar (Davis, 2000: 3-28).

Kuru metallerin davranışı üzerine yapılan deneyler, sülfürik asit ile temas ettiklerinde korozyon oluşmadığını ve su ile temas ettiklerinde ise sadece yüzeysel korozyon gözlemlendiklerini ortaya koymuştur (Davis, 2000: 3-28) (Zarras & Stenger, 2014: 6-13) (Kaya, 2023: 28-44).

3.3.2.Çukurcuk Korozyon

Çukur korozyonu, metal yüzeyinin dar ve belirli bölgelerinde yoğunlaşarak çukur şeklinde bir hasar meydana getiren lokalize bir korozyon türüdür. Bu tür korozyon, genellikle tespit edilmesi zor olup, zamanla çukurun büyümesi sonucu metalin delinmesine neden olabilir. Bu özellikleri nedeniyle, çukur korozyonu tehlikeli bir korozyon türü olarak kabul edilir. Literatürde, alüminyum alaşımlarının çukur korozyonuna karşı duyarlı olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle 2024 tipi alüminyum alaşımının, lokalize korozyon saldırılarına karşı en yatkın alaşımlardan biri olduğu belirtilmektedir (Davis, 2000: 3-28) (Zarras & Stenger, 2014: 6-13) (Kaya, 2023: 28-44).

3.3.3.Aralık/Çatlak Korozyonu

Bu korozyon türü, metal yüzeyindeki çatlakların veya metal-metal ara yüzeylerine sızmış elektrolitin çevresindeki daha yüksek oksijen konsantrasyonunun çözeltisi ile meydana gelir. Çatlakların içinde veya etrafında oluşan bu korozyon, çok küçük çatlaklarda, hatta milimetrenin binde biri kadar dar olan çatlaklarda bile oluşabilir (Ök, 2021: 13-16).

3.3.4.Galvanik Korozyon

İki farklı metalin korozyonu olarak bilinen bu tür korozyon, sıklıkla karşılaşılan ve ciddi sonuçlar doğurabilen bir korozyon türüdür. Farklı metaller, aynı elektrolitik ortamda bulduklarında, hangi metalin korozyona uğrayacağı, metallerin standart potansiyellerine göre

belirlenir; bu da galvanik seri olarak adlandırılır. Standart potansiyeli daha negatif olan metal, korozyona uğrar ve bu olaya galvanik korozyon denir (Davis, 2000: 3-28) (Zarras & Stenger, 2014: 6-13) (Kaya, 2023: 28-44).

3.3.5.Erozyon/Hız Etkili Korozyon

Akışkanlar içinde meydana gelen korozyon türü, akışın hızına bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkar. Akışın daha yavaş olduğu bölgelerde erozyon korozyonu meydana gelirken, akışın daha yüksek hızlara ulaştığı bölgelerde ise kavitasyon korozyonu oluşur. Bu korozyon türleri, akışkanın metal yüzeyine uyguladığı mekanik etkileşimler nedeniyle meydana gelir (Ök, 2021: 13-16).

3.3.6.Taneler Arası Korozyon

Taneler arası korozyon, metallerin tane sınırlarında seçici olarak çözünme sonucu gözle görülür sınır çizgilerinin olduğu lokalize bir korozyon türüdür. Bu korozyon türü, tane sınırındaki safsızlıkların etkisiyle ortaya çıkar. Tane sınırındaki alaşım elementlerinden birinin yokluğu veya diğer elemente göre daha yüksek konsantrasyona sahip olması, korozyonun gerçekleşmesine neden olur. Sonuç olarak, metal alaşımının mukavemeti ve sünekliği azalır. Taneler arası korozyon, özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında sıkça karşılaşılan bir korozyon türüdür ve bu nedenle uçak yapılarında arızalara yol açabileceği raporlanmıştır. Bu korozyon tipi genellikle hızlı bir şekilde ilerler ve metal alaşımının derinliklerine nüfuz eder (Ök, 2021: 13-16).

3.4.Korozyondan Korunma Yöntemleri

Korozyonu önlemek veya yavaşlatmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Ancak, metalin bulunduğu ortamın şartlarını değiştirmek genellikle mümkün olmadığı için, ortam koşullarına daha dayanıklı metal seçimleri yaparak uygun bir sistem tasarlanması gereklidir. Bunun ardından, metal bir koruyucu kaplama ile kaplanabilir ve diğer elektrokimyasal yöntemlerle de koruma sağlanabilir. Metale kaplama yapılması, pasif koruma olarak adlandırılır. Diğer kimyasal veya elektrokimyasal yöntemlerle yapılan koruma ise aktif koruma yöntemleridir. Aktif koruma yöntemleri arasında ise en yaygın ve etkili olanı katodik korumadır (Karabacak & Karakaya, 2023: 3-28).

3.4.1. Malzeme Seçimi

Metallerde korozyon oluşumunu önlemek için ilk adım, metallerin kullanılacağı yer ve ortam için en uygun metal veya alaşımın seçilmesidir. Bu seçimlerde belirli kurallara uyulması gerekmektedir. Aşağıda, bu kurallardan bazıları belirtilmiştir (Karabacak & Karakaya, 2023: 3-28).

- İndirgeyici yani yükseltgenmeyen ortamlarda (asit veya sulu çözeltiler gibi) genellikle bakır, nikel gibi alaşımlar tercih edilmelidir.

- Oksitli ortamlarda, kullanılacak alaşımda krom içeren malzemeler tercih edilmelidir.

- Oksitlik derecesi çok yüksek olan koşullarda, titanyum veya titanyum alaşımları kullanılmalıdır.

Alaşımların içerdiği malzemeler, korozyona karşı dirençli metallerden oluşuyorsa, bu alaşımların korozyona karşı dayanıklılığı artacaktır. Ancak, alaşım işlemi ile korunma sağlamak genellikle ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmez. Korozyon, metallerin yüzeyinde meydana gelir, ancak alaşım oluşturulurken, alaşımdaki malzemelerin yapının tüm kısmına homojen bir şekilde dağılması gerekir. Alaşımların içindeki malzemelerin korozyona dayanıklı metallerden seçilmesi, maliyeti önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, bir alaşım tasarlanırken hem ekonomik olması hem de korozyona karşı dayanıklı olması hedeflenir. Tablo 3.1’de hangi malzemelerin hangi korozyon ortamlarında kullanılabileceği görülmektedir (Karabacak & Karakaya, 2023: 3-28).

Tablo 3.1. Korozyon ortam çeşitlerine göre malzemelerin kullanılabilirlik durumları.

Metal	Ortam
Paslanmaz Çelik	Nitrik asit
Alüminyum	Atmosfer (hava)
Nikel ve alaşımları	Kostik
Çelik	Derişik Sülfürik Asit
Kalay	Damıtık Su
Titanyum	Kuvvetli Oksitleyici Çözelti
Kurşun	Seyreltik Sülfürik Asit

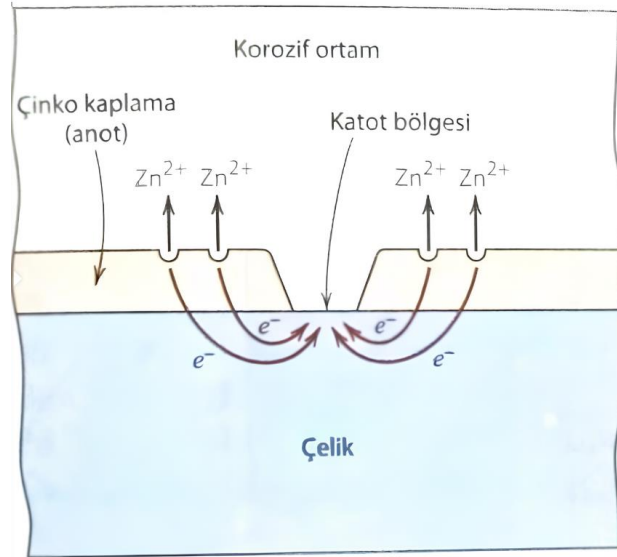
Kaynak: (Topal, 2016: 22-28)

3.4.2. Anodik Koruma

Anodik koruma, katodik korumaya benzer bir sistemle metalin korunmasıdır ve genellikle elektrokimyasal pasifleştirme yöntemi olarak bilinir. Katodik korumada olduğu gibi, dışarıdan bir akım uygulanarak metal malzeme korunur. Ancak anodik koruma için, metalin pasifleşme özelliğine sahip olması gerekir. Pasifleşme sağlandığında, anodik potansiyele yakın olan metaller, korozif akımın düşük seviyede ve pasif durumda tutulmasıyla korunur. Eğer korunacak metal, aktif hale doğru kayarsa, metalde tekrar korozyon oluşacaktır. Bu nedenle, anodik koruma sistemlerinde dikkatli ve sürekli kontrol gereklidir (Özdemir, 2019: 12)

3.4.3. Katodik Koruma

Korozyonun önlenmesi için en etkili önlemlerden biri katodik korumadır. Katodik koruma, neredeyse tüm korozyon türlerine karşı etkili olabilir ve bazen bu yöntemle korunacak parça korozyona karşı tamamen korunmuş olur. Katodik koruma iki şekilde uygulanabilir. İlk olarak, korunacak metal katot haline getirilir ve bir galvanik pil oluşturulur (Şekil 3.6'da gösterildiği gibi). Bu durumda, diğer metal kurban anot olarak seçilir ve oksitlenen metal, kurban anot olarak adlandırılır. İkinci yöntem ise doğru akım güç kaynağının kullanıldığı sistemdir. Bu sistemde, korunacak metal, güç kaynağının katodu haline gelir ve böylece korozyon engellenmiş olur. (Özer, 2021: 12-28)



Şekil 3.6. Çinko kaplama ile galvanik olarak korunan metal.

Kaynak: (William D. Callister & David G. Rethwisch, 2020: 427-496).

3.4.4.Yüzey Kaplama

Korozyondan korunmada yüzey kaplama ile yapılan koruma yöntemlerinde temel olarak üç çeşit kaplama türü vardır: organik, inorganik ve metalik kaplamalar. Organik kaplama tekniğinde, boyalar kullanılır ve bu boyalar, pigment adı verilen ince partiküller ile taşıyıcı maddelerden oluşur. Pigmentler, metal yüzeyi ile reaksiyona girerek tutunan ve zamanla değişmeyen koruyucu tabakalar oluştururlar. Metal yüzeylere organik kaplamaların uygulanabilmesi için, metalin bulunduğu ortamda korozyona karşı bir direnç gösteriyor olması gerekir. Eğer metalin korozyon direnci yoksa, kaplamanın hasar görmesi sonucu boşluklar oluşabilir veya zamanla dökülmeler meydana gelebilir, bu da korozyonun başlamasına yol açar (Ök, 2021: 12-16).

3.4.4.1.Organik Kaplamalar

Organik kaplamada, organik bileşenlerden oluşan boyalar kullanılır ve bu boyalar, pigment adı verilen ince partiküller ile pigmentleri askıda tutan taşıyıcılardan meydana gelir. Pigmentler, metalin yüzeyi ile reaksiyona girerek kalıcı, koruyucu tabakalar oluştururlar. Organik kaplamaların uygulanabilmesi için, metalin bulunduğu ortamda korozyona karşı direnç göstermesi gereklidir. Eğer ortamda yeterli korozyon direnci yoksa, kaplama zamanla hasar görebilir ve korozyon oluşumu başlayabilir (Kakani & S.L. ve Kakani, 2004: 382-394).

Endüstride yaygın olarak kullanılan ve araştırma konularından biri olan kataforez, toz boya ve çinko lamelli kaplamalar, organik kaplama türlerine örnek teşkil etmektedir (Kakani & S.L. ve Kakani, 2004: 382-394).

3.4.4.2.İnorganik Kaplamalar

İnorganik kaplamalar, metallerin yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan koruyucu oksit ve tuz tabakalarıdır. Bu tür kaplamaların en bilinen örneklerinden biri, alüminyum elementinin özel kaplama yöntemi olan eloksal kaplamadır. Elokshal kaplama, alüminyum yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak, korozyona karşı dayanıklılığı artırır (Kakani & S.L. ve Kakani, 2004:382-394).

Kimyasal reaksiyonlar sonucunda metallerin yüzeylerinde oluşan koruyucu tuz ve oksit tabakaları, inorganik kaplamalar kategorisine girer. Bu tür kaplamalar, metal yüzeyini koruyarak korozyonu engellemeye yardımcı olur. Bu bağlamda, elokshal kaplama en bilinen inorganik kaplama türlerinden biridir. Elokshal kaplama, özellikle alüminyum yüzeylerde

yapılan bir oksidasyon işlemidir ve metalin yüzeyinde ince, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak, korozyona karşı dayanıklılığı artırır (Ök, 2021: 12-16).

3.4.4.3.Metalik Kaplamalar

Metal ve alaşımların yüzeyini korozyona karşı dayanıklı hale getirmenin en yaygın yöntemlerinden biri, metalin ikinci bir metalle kaplanmasıdır. Elektrokimyasal olarak metal kaplamaları, soy kaplamalar ve aktif kaplamalar olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür. Kaplanacak metale göre soy ve aktif kaplamaların seçimi, galvanik seriden yararlanılarak yapılır. Örneğin, çeliğe göre gümüş, bakır, kalay, kurşun ve pasif tutumları nedeniyle nikel ve krom soy kaplamalar olarak bilinirken, çinko ve kadmiyum ise aktif kaplamalar olarak bilinir (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Soy kaplamaların koruma gücü, metal ile saldırgan ortam arasında etkin bir engel oluşturmasına bağlıdır. Ancak, kaplama boşluklar veya çatlaklar gibi hatalar içeriyorsa, bu noktalar korozyonun yerelleşmesine ve metalin kaplama altında korozyona uğramasına yol açabilir. Diğer yandan, aktif kaplamaların koruma gücü, içerdikleri hatalardan etkilenmez çünkü sağladıkları koruma temelde katodik koruma üzerine kuruludur. Bu nedenle, aktif kaplamalar korozyona uğradıkça, harcanan galvanik anotlarla paralel bir şekilde korozyon önlenmiş olur. Kaplama çözünebileceği sürece, korozyonun metal yüzeyinde yerelleşmesi engellenmiş olur (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Sıcak Daldırma: Sıcak daldırma, en eski ve yaygın kaplama yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, genellikle ergime sıcaklığı düşük metaller (çinko, kalay, kurşun, alüminyum) kullanılır. Örneğin, galvanizli demir, düşük karbonlu çelik sacın 450°C'de ergimiş çinko banyosuna daldırılmasıyla elde edilir. Galvaniz kaplamanın ömrü, çinko tabakasının kalınlığı ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. Oksijenin varlığı ile çinko, hidroksit formunda koruyucu bir tabaka oluşturarak koruma sağlar. Sıcak daldırma yöntemiyle yapılan çinko kaplamalar genellikle 50 µm'den daha kalındır ve deniz suyu gibi iletken ortamlar için uygundur. Ancak, normal suyun iletkenliği sınırlı olduğundan, çinkonun sağladığı katodik korumanın etkisi sınırlı mesafelere ulaşır, bu yüzden kaplamanın düzgün ve boşluksuz olması çok önemlidir. Çelik üzerine uygulanan çinko kaplamanın alt tabakasında %20-27 Fe içeren çinko-demir alaşımı bulunur. Bu alaşım, saf çinkoya göre korozyon direnci açısından benzer olmasına rağmen, aşırı gevrekliği nedeniyle ince parçaların soğuk şekillendirilmesi sırasında çatlayıp dökülebilir. Ancak, daldırma süresinin kısaltılması ve banyoya alüminyum

eklenmesiyle bu sorun en aza indirilebilir (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Sıcak Püskürtme: Tel ve toz püskürtme yöntemi, sıcak püskürtme olarak bilinir ve genellikle ergime sıcaklığı düşük metallere, özellikle çinko ve alüminyum gibi metallerle uygulanır. Bu yöntemde, oksijen-asetilen veya propan kullanılarak üretilen alev, beslenen tel veya tozu eritip ince parçacıklara ayırarak bu parçacıkları kaplanacak yüzeye püskürtür. Elde edilen kaplamalar genellikle boşluklu olup, bu boşluk oranı, püskürtülen metalin ergime sıcaklığıyla doğru orantılı olarak artar. Sıcak püskürtme yöntemi, karmaşık şekilli parçaların kaplanmasında ve zamanla bozulmuş kaplamaların onarımında özellikle etkilidir. Yüksek ergime sıcaklıklarıyla ilgili zorluklara rağmen, paslanmaz krom-nikel çeliklerden yapılan kaplamalar bu yöntemle sıklıkla üretilir. Ayrıca, alüminyum püskürtülerek boşluk oranı düşürülebilir ve bu da kaplamaya 800°C'ye kadar oksidasyona karşı daha yüksek dayanıklılık sağlar (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Difüzyonla Kaplama: Difüzyonla kaplama yöntemi, korunacak metali ikinci bir metalle alaşımlayarak korozyon ve özellikle oksidasyon dayanımını artırmayı amaçlar. Bu yöntemde, kaplanacak parçalar, kaplayıcı metali toz halinde içeren uygun bir karışıma yerleştirilir ve hava girişine izin vermeyen bir ortamda ısıtılır. Üst yüzeyin alaşımlanması, katı hal difüzyonu ile gerçekleştiğinden, sistemin kaplayıcı metalin ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta ısıtılması gerekir. Kaplamanın kalınlığı ve etkinliği, uygulanan sıcaklık ve ısıtma süresine bağlı olarak değişir. Difüzyonla yapılan kaplamaların en yaygın örnekleri arasında çinkolama, kromlama ve alüminyumlama bulunmaktadır. Özellikle alüminyumlama işlemi ile elde edilen kaplamaların üst yüzeyinde oluşan ince alümina (Al_2O_3) tabakası, ek bir koruma sağlayarak oksidasyona karşı direnç kazandırır (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Akımsız Kaplama: Elektrik akımı kullanılmadan, metal atomlarının oto-katalitik kimyasal indirgenme yöntemiyle taban metal yüzeyine kaplandığı teknik, akımsız kaplama olarak bilinir. Bu kaplama türü, bir güç kaynağına ihtiyaç duymaması ve altlık malzemesi olarak metal kullanma zorunluluğu bulunmaması dışında, elektrolitik kaplamalara oldukça benzer özellikler taşır. Akımsız metal kaplamalar arasında en yaygın olanı nikel kaplamalardır, bunun yanı sıra altın, kalay ve bakır kaplamalar da ticari olarak uygulanmaktadır. Bu kaplamalar, özellikle korozyon ve aşınmaya karşı yüksek dirençlerinin yanı sıra, sertlikleri, süneklikleri ve lehimlenebilirlikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Nikel kaplamalar, saf nikel olarak veya bor, fosfor ve tantal gibi alaşım

elementleri ile güçlendirilerek aşınma ve korozyon dayanımını artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Elektrolitik Kaplama: Bir metal nesne, aynı metal veya farklı bir metalin tuzunu içeren sulu bir çözeltiye yerleştirildiğinde, güçlü bir katodik elektrik potansiyeli kullanılarak elektrolitik kaplama yapılır. Bu işlemde, metal çözüldüğü ve katodik reaksiyonlar sırasında hidrojen veya oksijen çıkar. Elektrolitik kaplamalar, katodik reaksiyonlardan dolayı genellikle hidrojen zengini olma eğilimindedir. Bu durum, kaplamada mikroyapı sorunlarına, özellikle kırılabilirliğe yol açabilir. Bir diğer sorun ise elektrolitik kaplamaların üniform olmamalarıdır. Kaplamanın daha hızlı ve kalın olduğu alanlar, özellikle köşeler, kenarlar ve çıkıntılarda meydana gelir, çünkü burada elektrik alanı daha yoğun olur. Eğer üniform kaplama süresine dikkat edilmezse, bu bölgelerde daha kalın kaplamalar oluşabilir (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

Çok ince elektrolitik kaplamalar, tek bir tabaka olarak uygulanabileceği gibi, farklı metallere çok katlı veya alaşım kaplamalar şeklinde de yapılabilir. Örneğin, otomobil tamponları için önce bir kat bakır, ardından korozyona karşı dayanıklılık sağlayacak bir kat nikel ve son olarak parlaklık kazandırmak için bir kat krom kaplama yapılır. Elektrolitik kaplamaların kalitesi, kaplama koşullarına oldukça duyarlıdır. Kaplama banyosunun bileşimi, sıcaklık ve akım yoğunluğu, kaplamanın özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir. Bu koşulları kontrol ederek, istenilen sertlik ve parlaklıkta kaplamalar elde edilebilir. Banyo sıcaklığı arttıkça, kaplama daha yumuşak hale gelir ve parlaklık azalır, ancak çatlaksız ve düzgün kaplamalar elde edilebilir. En yaygın elektrolitik kaplama metallere bazılarını krom, nikel, kalay, çinko ve kadmiyumdur (Tuna, 2013: 37-49) (Batchelor & Chandrasekaran, 1999: 297-312).

4.FOSFAT KAPLAMA

Metal yüzeylere püskürtme, daldırma veya başka bir yöntem ile çözünmeyen bir fosfat tabakası kazandırma işlemine “fosfat kaplama” adı verilmektedir. Fosfat kaplama metal yüzeylere sürtünme önleyici özelliklerini iyileştirmek, boya yapışması adına daha iyi bir yüzey alanı sağlamak ve korozyona karşı dirençlerini arttırmak gibi getirileri kazandırmak adına yapılan bir işlemdir (Narayanan, 2022: 73-112).

4.1.Fosfat Kaplama Karakterizasyonu

Metal substratın yüzeyine yapışan ince kristalli fosfat bileşik katmanları fosfat kaplamaları meydana getirir. Fosfat kaplama türleri üçe ayrılmaktadır, demir, manganez veya çinko kaplama. Fosfat kristallerinin gözenekli yapısı sayesinde çinko, manganez veya demir, fosfat çözeltilerinden meydana getirilebilir. Bahsi geçen üç tür kaplama arasında kristal boyutu ve kaplama kalınlığı gibi nitelikler sebebiyle farklı özellikte fosfat kaplamalar meydana gelir. Bu kaplamalar çoğu zaman düşük alaşımlı çeliğe, dökme demire ve karbon çeliklerine uygulanır (Zimmermann, Muñoz, & Schultze, 2003: 7-9).

Alt tabakanın, kaplama işlemine yardımcı olan diğer kimyasallarla birleştirilmiş seyreltik fosforik asit çözeltisine püskürtülmesi veya daldırılmasıyla kaplama meydana gelir. Fosfat kaplamalar çinko, alüminyum, kadmiyum, galvanizli çelik ve kalay gibi malzemelere de uygulanabilir fakat genellikle fosforik aside karşı direnç gösterebilen yüksek alaşımlı malzemelere uygulanması zor olduğu için tercih edilmez (Özcanak, 2008: 72-85)

Bir fosfatlama çözeltisinin ana bileşenleri şunlardır:

- Fosforik asit (H_3PO_4)
- İki değerlikli metallerin iyonları (katyonları): Zn^{2+} , Fe^{2+} Mn^{2+}
- Hızlandırıcı – kaplama işlem hızını artıran ve tortunun tane boyutunu azaltan bir oksitleyici reaktif (nitrat, nitrit, peroksit).

Fosfat kaplamanın gösterdiği özellikler, kaplamanın spreyci veya daldırma yöntemiyle uygulanmasına, banyo sıcaklığına, banyonun karıştırılma hızına ve fosfat çözeltisinin fosforik asit, metal iyonları ve hızlandırıcıları gibi ana bileşenlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Özcanak, 2008: 72-85).

Alt kristal yüzey tabakasının oluşumu ile fosfat kaplamanın oluşumunun başladığı kabul edilir. Zamanla oluşan fosfat kristalleri sayısı sabitlenerek homojen bir kristal yüzeyi meydana getirir. Fosfat kristallerinin boyutu ve homojen yapısı; sıcaklık, yüzey ön hazırlama metodu ve banyo ana bileşimlerine bağlı olarak değişir. Bu değişimleri daha stabil kontrol edebilmek adına bir çok enstrümental yöntem geliştirilmiştir. Bu metotlar kimyasal analizlerin yürütüldüğü Elektron Spektroskopisi (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) ve X-Işını Kırınımı (XRD) ile Enerji Dağıtıcı Spektroskop (EDS)'tir. XRD analizleri raporlarına göre, fosfolitlerin ($Zn^2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$) ve hepoitlerin $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ demir üzerine çinko fosfat kaplamada önemli bileşenler olduğu tespit edilmiştir. Temel metale temas halinde bulunan yüzeylerde fosfolit oluşmaktadır. Fosfat çözeltisinin içeriğinde bulunan toplam demir miktarına bağlı olarak fosfolit veya hepoitlerin metal yüzeyindeki miktarları değişir. Çözeltide bulunan Fe(II) miktarı arttığında demir $Fe_5H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$ formunda yer alır. Demirin zararlı etkileri olduğundan dolayı sahip olduğu kaplama içerisindeki miktar oranı önemlidir, bu sebeple fosfat çözeltisinde bulunan demir oranının belirli periyotlarla ölçülmesi gerekmektedir (Özcanak, 2008: 72-85).

4.2.Fosfat Kaplamanın Kalınlığı Ve Kaplama Ağırlığı

Fosfat tabakasının kaplama kalınlığının ölçülebilmesi için kristallerin homojen olduğu ve kristaller arası boşlukların ihmal edildiği kabulü gerçekleştirilmelidir. Fosfat kaplamanın çeşidine göre kalınlık 1 ila 50 μm arasında değişiklik gösterir. Kaplama kalınlığı genellikle kaplama ağırlığı olarak adlandırılır ve birim alan başına düşen ağırlığı hesaplayarak elde edilir. Kaplama ağırlığı ve kaplama kalınlığı arasında bulunan oran Lorin'e göre çoğu endüstriyel fosfat türü için 1.5 μm ila 3.5 μm arasında değişiklik göstermektedir. Düşük ve orta ağırlıklı kaplama türlerinde 1,0 μm kalınlık yaklaşık 2 g/m^2 'ye eşdeğerdir (Kojima, 1982: 55-365) (Kılınç & Akyaçım, 2022: 10-15).

Kaplama ağırlığı testi, tahrip edici bir yöntemdir. Bu testte, önce fosfat kaplanmış standart bir test plakası tartılır. Ardından plaka üzerindeki fosfat kaplama, inhibitör olarak 20 g/L antimon trioksit içeren konsantre kromik asit çözeltisi (%5) ya da sodyum hidroksit çözeltisi (%15) kullanılarak sökülür. Kaplaması tamamen temizlenen plaka yeniden tartılır ve kaplamalı ile kaplamasız plaka arasındaki ağırlık farkı hesaplanır (Kojima, 1982: 55-365) (Kılınç & Akyaçım, 2022: 10-15).

Kaplamada tahribata yol açmadan kaplama ağırlığının tayin edilebilmesi için Cheever tarafından Specular Reflectance Infrared Absorption (SRIRA) yani speküler yansıma kızılötesi emilimi cihazı geliştirilmiştir. Cihaz metal üzerinde bulunan kaplama kalınlığını doğrudan ölçerek ölçüm metodundan gelen eksiklikleri giderir (Kojima, 1982: 55-365) (Kılınç & Akyalçın, 2022: 10-15).

Fosfat kaplamasının ağırlığı yüzey korozyon performansı ile doğrudan ilişkilendirilemez, bunun yerine kaplama ağırlığı yalnızca kaplamanın kalitesini değerlendirirken göz önünde bulundurulabilir. Kaplama kalınlığı, yapı, homojenlik, viskozite vb. gibi fosfat kaplamanın diğer karakteristik özellikleriyle birlikte yorumlanmalı ve hepsi bir bütün halinde dikkate alınmalıdır (Kojima, 1982: 55-365) (Kılınç & Akyalçın, 2022: 10-15).

4.3.Boya İçin Baz Olarak Fosfat Kaplama

Boyalı metal bir parçanın kullanım ömrünü asıl etkileyen faktörler organik kaplamanın bizzat kendi dayanıklılığı ve kaplamanın uygulandığı yüzeye ne düzeyde yapıştığıdır. Herhangi bir koruyucu boya kaplamasının ana görevi, kaplamanın içerisinde bulunacağı ortama karşı metalin korozyonunu olabildiğince önlemesidir. Bu görevi gerçekleştirebilmesi için metal yüzeyinin aktivitesi azaltılmalıdır, aktivitenin azaltılması sonucunda metal ve boya arasındaki arayüzde alt film korozyonu önlenir. Fosfat kaplamalar boya filmleri için bir baz olarak kullanıldığında boyanın yüzeye iyi yapışmasına olanak tanır. Buna ek olarak filmlerin suya batırılmaya ve neme karşı direncini artırarak daha sonra oluşması muhtemel bir korozyonun yayılmasını büyük ölçüde yavaşlatır. Günümüzde fosfat kaplama konusunda yapılan çalışmalar boya ile ilgili yapılan çalışmalardan önemli ölçüde fazladır. Bu çalışmaların arasında üç fosfatlı kaplamalar da bulunmaktadır. Kataforez kaplama öncesi ön işlem proseslerinde üç katyonlu çinko fosfat kaplamanın çinko fosfat kaplama yerine geliştirilmesinin sebepleri aşağıdaki gibi verilebilir; (Narayanan, 2022: 167-189)

i) Fosfat kaplamanın gözenekliliğinin azaltılması; kataforez kaplama sürecinde su hidroksil iyonlarına parçalanarak fosfat kaplamasının ayrışmasına sebep olur. Çeşitli araştırmacılar da yüksek pH ortamının fosfat tabakasını çözebileceğini doğrulayıp, kataforez kaplamanın da yaklaşık %40 oranında çözünebileceğini belirtmiştir. Bu çözünmeye de fosfat kaplamanın yüksek kaplama gözenekliliğinin sebep olduğu gözlemlenmiştir (Narayanan, 2022: 167-189).

ii) Kataforez kaplamasının krlenmesi için gerekli scklk ve zaman değerleri sırasıyla 180 °C’de 20 dakikadır. Kojima, Sugaya ve Kondo yaptıkları çalışmada belirtilen scklk değerinde fosfat kristallerinin yapılarında bir değişimin meydana geldiğini ve bu değişimin fosfat kaplamada bir ağırlık kaybı meydana getirdiğini bildirmişlerdir. Bu ağırlık kaybı %15’ten daha az olmak şartıyla kısıtlanmazsa fosfat kaplamasının bozunarak korozyona karşı gösterdiği direnci azaltmaktadır (Kojima, 1982: 55-365).

iii) Fosfolit içeriği zengin fosfat kaplama elde etme: Kataforez kaplamasının pişirme şartları ve fosfat kaplamasının scklk stabilitesi göz önünde bulundurulmuştur. Bu durum sonucunda fosfat kaplamasının yüzeyinde fosfolit bihidrat ve hepoit kristalleri oluşacaktır. Kaplamasının ıslak adezyon özelliklerini belirlemek adına fosfolit bihidrat ve hepoit rehidratasyonu oldukça önemlidir. Fosfolit halce en zengin olan ve kürlenme, kataforez kaplama ve kullanım koşulları altında en uygun olan fosfattır. En zengin fosfat kaplamalar elde edilmek isteniyorsa fosfatın formülasyonu modifiye edilmelidir (Kojima, 1982: 55-365).

iv) Hipoit formu bakımından zengin olmayan çinko ve çinko alaşım kaplamalı çelikler üzerinde zengin olmayan fosfat tabakası elde etme: Fosfat kaplamasının stabilitesinde meydana gelen sorunların çözülme gerekliliği kaplamasının otomobillerin iskeletinde çinko ve çinko alaşım kaplamalı çelikler gibi önceden kaplanan çeliklerin kullanılmasıyla daha da önemli hale gelmiştir. Fosfat kaplamada çinko fosfat banyosu kullanılırsa, çinko ve çinko alaşım kaplamalı elik yüzeyler üzerinde yalnızca hepoit forumda fosfat kaplama oluşmaktadır. Daha öncesinde belirtildiği gibi hepoite zengin olan fosfat kaplamalar, kaplama ardından gelen kataforez işlemi için istenmemektedir. Bu sebepten ötürü fosfat kaplamasının formülasyonunda hepoite zengin olmayan kaplama kimyasal ürünlerine yönelinmelidir (Kıln & Akyalçın, 2022: 10-18).

Ana metalin tüm yüzeyinde bulunan aktif katot ve anot merkezleri fosfat kaplamasının sürünme miktarını geciktirmesi sayesinde izole olur çünkü kaplama bu merkezleri izole eden bir dielektrik filmidir. Bu alanları yalıtması sayesinde yüzey korozyonunu çeşitli şartlarda durdurur, durduramaz ise bile büyük miktarda yavaşlatır (Kıln & Akyalçın, 2022: 10-18).

4.4.Kristal Boyutunun Etkileri Ve Gözenekliliğin Sonuçları

Fosfat kaplamasının kimyasal olarak bağlanmış kristal yapısı sonraki boya veya yağ filmleri için iyi bir temel oluşturur. Boyanın olağanüstü yapışma kabiliyeti göstermesine ve yapıya nüfuz etmesine olanak tanıyan etmen kristaller arasında bulunan gözenekliliktir. Kristal

yapının boşlukları yağ pas önleyici olduğunda yağ tutucu rezervuar olarak işlev görür. Boşlukların daha ince ve tane boyutunun daha küçük olduğu durumda fosfat kaplama boya veya yağ yapışmasıyla korozyona karşı olan dirençte daha başarılıdır (Sugaya and Kondo, 1963: 36-283; Kojima, 1982: 55-365).

Optimum boya yapışması ve korozyona karşı direnç elde edilmesi için çinko fosfat işlemlerine kristal boyutunu azaltan organik katkı maddeleri, kalsiyum veya özel hızlandırıcılar eklenir. Bu yolla mikrokristal bir yapı sağlanır ve bahsi geçen özellikler kaplamaya kazandırılmış olur. Boya veya yağ için yaygın olarak kullanılan kaplamalardan biri de çinko fosfat kaplamalardır. Boya filminde istenilen bir parlaklık varsa bunu elde etmenin yolu ince bir homojen kristalden geçer. Kaba kristal yapılar genellikle düzgün ve kabul edilebilir bir kapsama alanı elde etmek için tercih edilir, donukluğu arttırır ve daha kalın bir boya tabakasına ihtiyaç duyulur. Şayet yağlamayı sağlamak için bir kaplama uygulanacaksa kaba bir kristal tercih edilebilir (Sugaya and Kondo, 1963: 36-283; Kojima, 1982: 55-365).

Demir fosfat kaplamalar görünüş olarak amorf olup genel olarak ince bir yapıdan oluşur. Bu kaplamalarda ince bir yapı istenmektedir, bunun sebeplerinden biri metalin metalik olmayan bir yüzeye bağlanması için yardımcı bir kaplama olmasıdır. Demir fosfat kaplamalarının asıl sorunu kaplama ağırlığı veya kristal boyutundan yanısıra toz halinde olması ve yapışma olayıdır (Sugaya and Kondo, 1963: 36-283; Kojima, 1982: 55-365).

Manganez kaplamalar genelde ek bir yağ filmi içerdiğinden ve yağlama nitelikleri için kullanıldığından ağır ve kabadır. Ayrıca bu tür kaplamalarda sürekli bir kaplama zorunluluğu olmayabilir. Kaplamanın istenilen özelliği gösterebilmesi adına film kalınlığı işlem süresi parametresiyle kontrollü olarak değiştirilebilir. Kaplama yapılacak yüzeyin şartlarına göre kaplama kalınlığı ve kristal boyutu kontrol edilir. Genellikle ağır metal fosfat içeren tescilli kristal artıcılar mevcuttur, fosfatlamadan önce su durulamada kullanılırlar (Sugaya and Kondo, 1963: 36-283; Kojima, 1982: 55-365).

Yukarıda bulunan metinleri özetlemek gerekirse, kaplama özellikleri üzerinde kritik rolü olan etki kristalin boyutudur. Kaba kristalli bir kaplama korozyon korumasını düşüren, boya ve yağın yapışmasını azaltan daha az yoğun bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte büyük gözeneklerin yağa yüksek afinitesinin bir sonucu sebebiyle yağlama özellikleri artmıştır. İnce kristaller ise daha yüksek korozyon direnci önleyebilecek özelliklere, boyaya ve yağ yapışma kabiliyetleri bulunduran küçük boşluklu yoğun bir yapıya sahiptir. Manganez fosfattan daha

küçük bir kristal boyutuna sahip çinko fosfat kaplamalar korozyona karşı direnç konusunda daha yoğun olarak tercih edilir (Sugaya and Kondo, 1963: 36-283; Kojima, 1982: 55-365).

4.5.Fosfat Kaplamanın Reaksiyon Mekanizması

Bir malzemenin fosfat kaplanma sürecinin ilk adımı serbest fosforik asit ile metal yüzeyinin aşındırılmasıdır. Aşındırma reaksiyonunun hızlandırılması için fosfat kaplama banyosuna hızlandırıcı eklenmektedir. Bu işlem meydana gelen hidrojeni oksitleyerek uzaklaştırmak ve banyoda biriken demiri iki değerlikten üç değerlikli hale getirip çöktürerek gerçekleştirilir. Hidrojen iyonunun harcanması metal yüzeyine komşu difüzyon yüzeyinin pH değerinde değişikliğe sebep olmaktadır. Bu durum gerçekleştiğinde çözünürlük sınırı aşıldığı için çinko fosfat çökelmektedir. Çinko kaplı çelik tabakasından, alüminyum yüzeylerden ve soğuk haddelenmiş çelik tabakasından 0,5-2,0 g/m² arasında metal aşınır (Kılınç & Akyalçın, 2022: 15-21).

Çinko fosfat çözeltileri genellikle çinkonun dehidrojen fosfatlarını, mangan, nikel, serbest fosforik asit, florosilik asit, sodyum nitrat ve bir veya birkaç oksidasyon bileşiğinden nitro benzen, asetaldoksim, N-metilmorpholin-N-oksit (NMMO), nitroguadinin, sodyum klorat, hidroksilamin, hidrojen peroksit ve sodyum nitrit gibi) oluşmaktadır (Kılınç & Akyalçın, 2022: 15-21).

Mn, Ni, Zn ve çelik yüzeylerden gelen Fe⁺² iyonları fosforik asit ile birlikte yüzey oluşumunda görev almaktadır. Diğer kimyasalların ise banyo ve film stabilizasyonu, kimyasal aşındırma, indirgeme, hızlandırma gibi işlevleri bulunmaktadır (Kılınç & Akyalçın, 2022: 15-21).

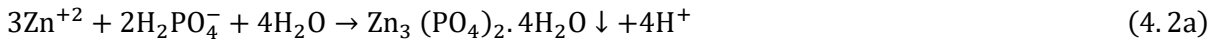
Çelik yüzeyler üzerindeki fosfat reaksiyonu aşağıda 4.1 4.2, 4.3 denklemlerinde verilmiştir.

Çelik yüzey üzerindeki fosfat reaksiyonu

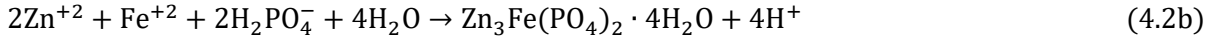
Pickling reaksiyonu



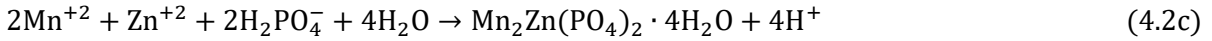
Kaplama oluşumu



Hepoit

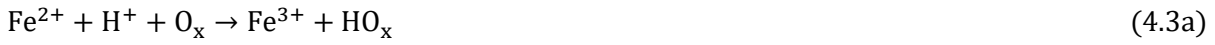


Fosfolit



Zn-Mn Fosfat

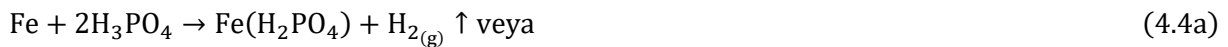
Çamur Oluşumu



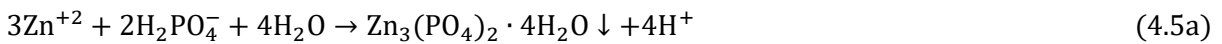
Alüminyum ve çelik fosfatlama proseslerinde kullanılan fosfat banyoları flor içermektedir. Fosfat banyosunda bulunan flor miktarı spreyci veya daldırma uygulamalarına ve proses değişikliklerine 50-250 ppm aralığında değişmektedir. Gündelik yaşamda düşük çinkolu fosfat proseslerinin çalışma çözeltilerinde bulunan Zn-PO oranı 1:20-1:100 arasında değişirken literatür kaynaklarında bu oran 1:12-1:120 arasına verilmektedir. Fosfat kaplı yüzeyin %1'i gözenektir ve fosfat kristalleri yalıtıcıdır. Bu durum kataforez kaplama prosesi adına oldukça önemli bir ön koşuldur (Eren, 2020: 13-19).

Çinko kaplı çelik sac üzerindeki fosfat reaksiyonları 4.4 ve 4.5 denklemlerinde verilmiştir (Eren, 2020: 13-19).

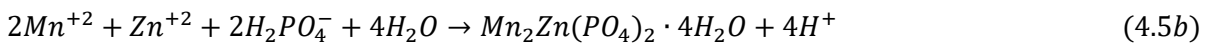
Pickling reaksiyonu



Kaplama oluşumu



Hepoit



Zn-Mn Fosfat

Alüminyum yüzeyler üzerindeki fosfat reaksiyonları 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 denklemlerinde verilmiştir.

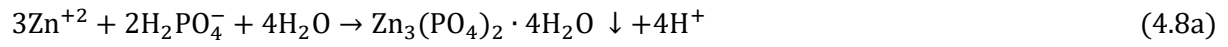
Pikling reaksiyonu



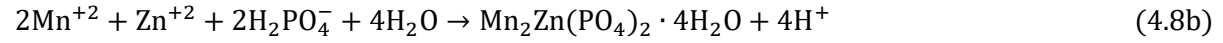
Kompleks oluşumu



Kaplama oluşumu



Hepoit



Zn-Mn Fosfat

Çamur oluşumu



Cryolite (çamur)



Elpasolit (çamur)

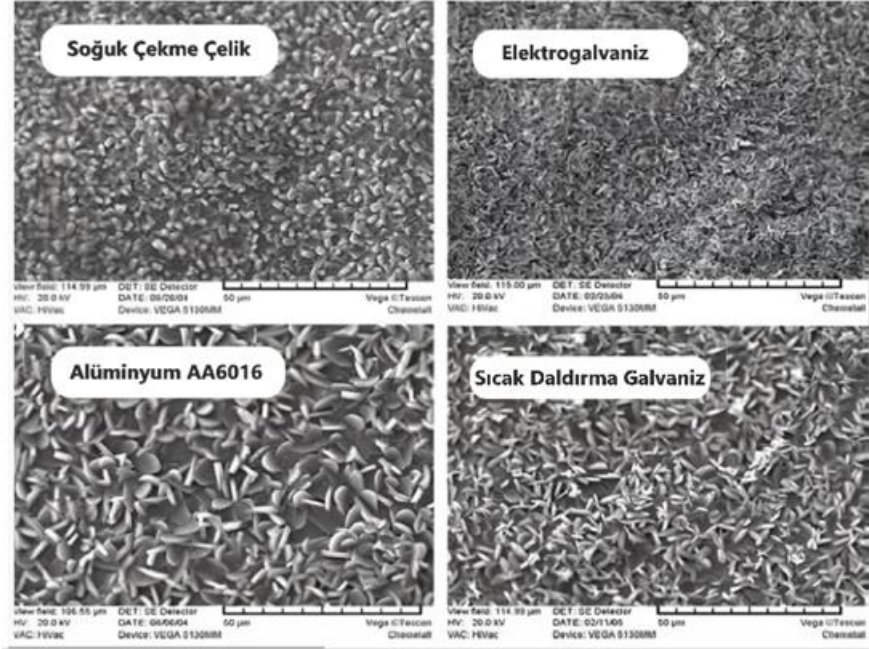
Fosfat kaplamalı yüzeylerin kendine özgü kompozisyonu, çinko, çelik ve alüminyum yüzeyler için farklıdır ve Tablo 4.1' de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Çelik, çinko, alüminyum yüzeyler üzerindeki kompozisyon ve çinko fosfat kaplamalar.

	%Zn	%Ni	%Mn	%Fe	%P ₂ O ₅
Soğuk Çekme Çelik	31	0,9	2,2	6,5	41
Elektro galvanizli Çelik	45	0,9	5	-	40
Alüminyum	44	0,9	9	-	42

Kaynak: (Eren, 2020: 13-19).

Alüminyum, çinko ve çelik yüzeyler üzerinde bulunan çinko fosfat kaplamalarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Kaplanan metalin çeşidine göre morfoloji de değişmektedir fakat elektro kaplama boyalarındaki adezyonlar benzerlik gösterir.



Şekil 4.1. Soğuk çekme sac, elektrogalvanizli sac, sıcak daldırma galvanizli sac, alüminyum sacın düşük çinkolu fosfat kaplamalarının kristal morfolojileri.

Kaynak: (Zimmermann ve diğerleri, 2003)

Fosfat kaplama prosesi sonucunda oluşan çamur kaplanan yüzeyin kaplama performansının stabilitesinin sağlanması adına çamur filtrasyon yöntemi ile birlikte uzaklaştırılmalıdır (Zimmermann , 2003: 3267-3277).

Günümüzde uygulanan tri-kasyonlu fosfat kaplama proseslerinde nitrit hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Sodyum nitrit her ne kadar yangın teşvik edici, zehirli ve suda yaşayan canlılara karşı tehlike oluştursa da teorik açıdan ideal bir hızlandırıcı olarak sınıflandırılmaktadır (Zimmermann , 2003: 3267-3277).

4.6.Metal Kompozisyonunun Fosfat Kaplama Özellikleri Üzerine Etkisi

Kapanacak malzemenin sahip olduğu kimyasal yapı ve bünyesindeki alaşım elementlerinin varlığı fosfat kaplamanın performansını değiştirmektedir. Çoğu zaman

paslanmaz çelikler; nikel, krom, molibden ve vanadyum gibi fosfat kristali oluşumuyla bağlantılı metaller bulundurur (Kılınç ve Akyaçın, 2022: 16-21).

Çeşitli miktarlarda bakır, nikel, krom içeren soğuk çekme çeliklerin fosfatlanabilirliği Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı miktarlarda bakır, krom, nikel içeren soğuk haddelenmiş çeliklerin fosfatlanabilirliği.

Malzemenin Adı	Cu+Ni+Cr (ppm)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (mm)	Fosfatlanabilirliği	Kaplama Ağırlığı (g/m ²)	
				Merkezde	Kenarda
CRS-A	300	<0.8	1	4.32	3.87
CRS-B	200	>1.2	1	4.04	5.39
CRS-C	800	<0.8	5	2.86	3.09
CRS-D	1000	>1.2	4	3.54	3.59

Kaynak: (Kılınç & Akyaçın, 2022: 16-21).

Fosfatlanabilirlik incelenirken görsel görünüm temel alınmıştır. Tablonun fosfatlanabilirliği adı altında bulunan sütundaki rakamlar için 1-İyi, 5-Zayıf'ı temsil etmektedir (Kılınç & Akyaçın, 2022: 16-21).

Bakır, nikel ve kromun toplam konsantrasyonu 200-300 ppm civarlarında olduğunda altlığın fosfatlanabilirlik özelliğinin etkilenmediği Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Aynı metallerin toplam konsantrasyon seviyesi 800 ppm'e ulaştığı veya bu değeri aştığı zaman fosfatlanabilirliğin yüksek oranda bundan etkilendiği görülmüştür (Kılınç & Akyaçın, 2022: 16-21).

Mangan, kükürt, fosfor, karbon ve silisyum miktarları çelikte fazla olduğunda fosfatlanabilirlik değerinin yine olumsuz olarak etkilendiği saptanmıştır. Yüksek kalitede kaplamalar elde edilebilen çeliğin kolaylıkla fosfatlanabilme özelliği gösteren düşük karbonlu çelik olduğu görülmüştür. Kaplanacak çelik materyalin karbon içeriğindeki artışın fosfatlamayı yavaşlattığı ve sonuç olarak yüzeydeki kristalleri büyüttüğü gözlemlenmiştir (Kılınç & Akyaçın, 2022: 16-21).

5.NANO KAPLAMALAR

5.1.Nano Kaplama

5.1.1.Nanoteknoloji ve Nano Kaplama Nedir?

İçeriği nano boyutlu (10^{-9}) yapılardan meydana gelen bir tabaka ile malzemenin yüzeyinin kaplanması işlemine nano kaplama adı verilir. Makro boyutlarda görülemeyen kimyasal ve fiziksel değişimler nano boyutlu taneciklerde görülebilir. Nano boyuttaki taneciklerin kaplanacak yüzeye düzenli sıralanışı ile başarılı kaplamalar elde edilebilmektedir (Avcı, 2009: 48-49).

5.1.2.Nano Kaplamaların Özellikleri

Dayanıklı, ucuz, uygulaması kolay ve çevre dostu bir kaplama türü olan nano kaplama, seramik, beton, kağıt, plastik ve metal gibi yüzeylere yüzeylerin kimyasal bileşimleri belirlendikten sonra kaplanabilir (Ağaçdelen, 2021: 8-10).

Günümüzde çoğu malzeme yüzeylerine kaplanan malzemeler vasıtasıyla daha iyi bir görüntüye veya mekanik özelliklere sahip olabilir. Ayrıca dış ortam koruması, darbe ve çürümeye karşı direnç de kazandırılmaktadır (Avcı, 2009: 48-49).

Nano kaplamalar, yüzeylerine kaplama uygulanan malzemelere daha uzun ömürlü ve geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Nano kaplama uygulaması sayesinde yüzeylere kendini temizleme, korozyona karşı direnç, leke tutmama, antibakteriyel olma, çizilme dayanımı, su tutmama vb. özellikler kazandırılmaktadır (Ağaçdelen, 2021: 8-10).

5.1.3.Nano Kaplamaların Uygulama Alanları

5.1.3.1.Boya Öncesi Uygulanan Nano Kaplamalar

Titanyum veya zirkonyum esaslı nano kaplamalar çeşitli metal ve alaşımları ile uyumlu olarak çalışabilir. Boya öncesi işlemde boya yapışmasına bir alternatif olarak kullanılan nano kaplamalar, minimum düzeyde çamur oluşturan, çevreyle uyumu yüksek ve bünyesinde ağır metal bulundurmeyen yüzey işlem kimyasallarıdır (Avcı, 2009: 48-49).

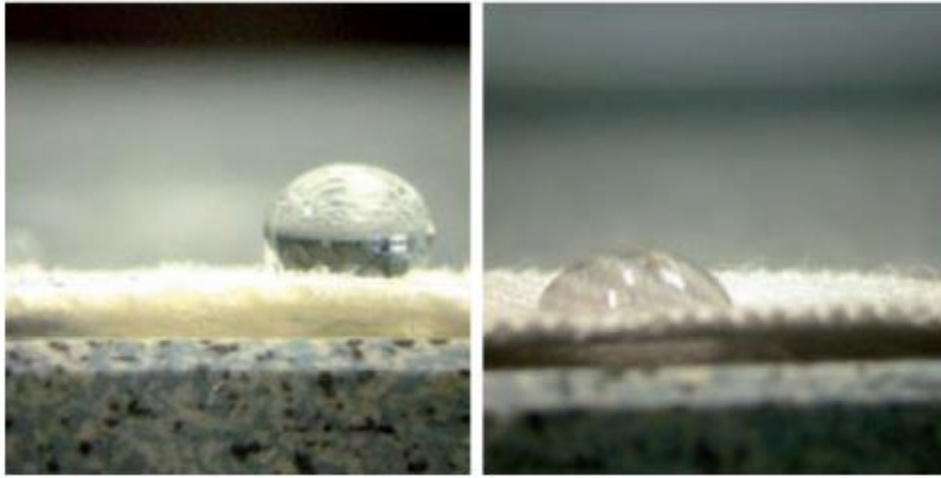
Nano kaplamaların metal ile boya arasındaki işlevi ince bir film tabakası oluşturarak boyanın metal yüzeyine güçlü bir şekilde tutunmasıdır. Nano kaplamalar sağladıkları enerji

tasarrufu ile avantaj sağlamalarının yanı sıra ortam sıcaklığında da çalışabilmektedir (Avcı, 2009: 48-49).

Fosfat bünyesinde uçucu organik bileşikler (VOC) gibi kimyasalları içermez. Aynı zamanda ağır metal içermemesi ve çamur oluşturmaması da avantajlarından ikisi olup, arıtma prosesinden gelen iş yükünü azaltır. Proseste, çinko fosfat banyosuna kıyasla daha düşük sayıda banyo ile kaplama işlemini gerçekleştirmektedir (Avcı, 2009: 48-49).

5.1.3.2.Su Tutmaz Kaplamalar

Su damlacıkları düşük yüzey enerjili malzemelere temas ederken boncuk şeklini alır ve yüzeyi çok ıslatmadan yuvarlanarak uzaklaştırılır. Bu özelliğin kazandırılması istenen malzeme, nano kaplama uygulamasına tabi tutulur ve hidrofobik bir yapıya dönüştürülür. Bu tip kaplamalarda kaplama malzemesi metil grubu içeren silan esaslı ya da floralkilsilan esaslı olmaktadır. Seramik, tekstil, cam, plastik, metal gibi her türlü yüzeyde su itici özelliği olan bir yüzey kazanmak nano kaplama ile mümkündür (Avcı, 2009: 48-49).



Şekil 5.1. Hidrofobik ve hidrofil yüzeylerde su damlacıkları.

Kaynak: (Avcı, 2009: 48-49)

5.1.3.3.Kendi Kendini Temizleyen Kaplamalar

Günümüzde yüksek katlı yapıların cam ve pencerelerinin temizlenmesi hala tam olarak bir yöntemle dönüştürülememiştir. Genel uygulama iskele ve halat sistemleri ile camları temizleyecek personelin katlar dışında taşınması veya kısa periyotlarla camların içeriden

mıknatıslı bezlerle silinmesidir. Bu günlerde nano kaplama mevcut probleme alternatif bir çözüm olarak ön plana çıkar (Avcı, 2009: 48-49).

Camların nano boyuta sahip TiO_2 ile kaplanarak güneş ışığı altında aktifleşmesi sağlanmıştır, bu özellik sayesinde kendi kendilerini temizleyebilmektedirler (Avcı, 2009: 48-49).

5.1.3.4.Çizilme Dayanımını Artırıcı Kaplamalar

Estetik görünümü ön planda olan malzemelerin kolay çizilebilir olması doğal olarak tercih edilmemektedir. Bunun sebebi malzemenin işlevselliğini artık yerine getiremeyecek olması veya dekoratif kaygılardan kaynaklanmaktadır. Bu malzemelere polimerler ve ahşap malzemeler örnek olarak verilebilir (Avcı, 2009: 48-49).

Nanosilikat tanecikleri içeren kaplamalar sayesinde malzeme yüzeyleri çizilmeye ve kırılmaya daha dirençli hale getirilir ve hem kullanım ömürleri hem de kullanım alanları arttırılmış olur (Avcı, 2009: 48-49).

5.1.3.5.Korozyon Önleyici Nano Kaplamalar

İçinde buldukları ortam koşulları sebebiyle metallerin kimyasal veya elektrokimyasal tepkimeler sonucunda yapılarında bozunmalar ve kayıplar meydana gelmesine korozyon adı verilir. Açık atmosfer ve su şartlarına maruz kalan çoğu malzeme ve cihaz korozyon problemiyle işlevlerini olması gerektiği gibi yapamama problemiyle karşılaşır. Çeşitli yöntemlerle korozyonun önlenmesi gerekmektedir çünkü korozyon hem malzemeye zarar verip maliyet oluşturur, kullanıldığı sektöre bağlı olarak direkt olarak insan yaşamını tehlikeye atabilir (Avcı, 2009: 48-49).

Organik-inorganik bir kaplama tabakası uygulanarak malzemelere korozyona karşı direnç kazandırılması son yıllarda nano kaplama ile daha mümkün ve etkili hale gelmiştir (Avcı, 2009: 48-49).



Şekil 5.2. Nano kaplama yapılmış ve yapılmamış örnekler.

Kaynak : (Avcı, 2009: 48-49)

Kolay leke bırakan gıdalara maruz kalan seramik malzemelerde temizlenmesi zor leke veya izler oluşmaktadır. Bu gıdalar (salça,kahve,kızartma yağı vb) seramiğin yapısında bulunan çeşitli boyutlardaki gözeneklere dolarak seramiğin temizlenmesini oldukça zorlaştırabilir (Avcı, 2009: 48-49).

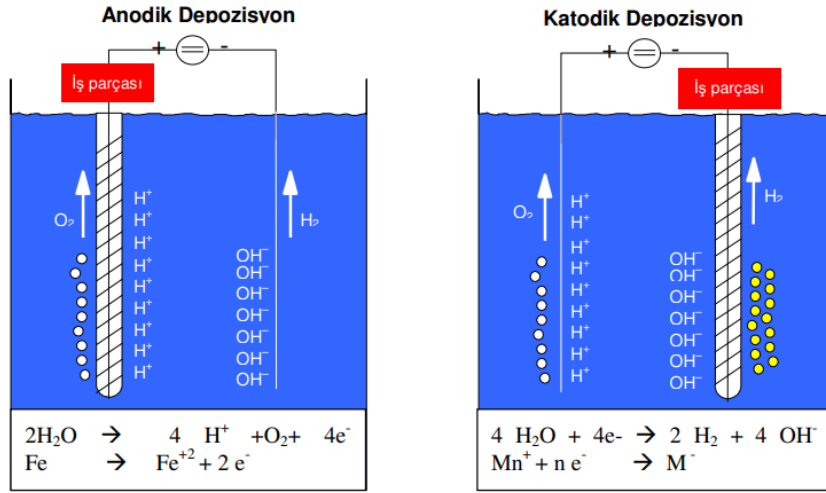
Nano kaplama uygulamasıyla seramik yüzeylere hidrofobik, ince camsı yapılı bir silika tabaka kaplanır ve gözeneklerin kapanması sağlanır. Kapanan gözenekler gıdalardan veya olası kirleticilerden korunmuş olduğu için daha uzun ve verimli bir kullanım evresi sunar (Avcı, 2009: 48-49).

6.KATAFOREZ KAPLAMA

6.1.Kataforez Kaplama Tanımı

Günümüz dünyasında üretimi gerçekleştirilen otomobillerin yaklaşık olarak %98'lik kısmı elektro kaplama (kataforez) ile astarlanmaktadır. Bunun sebebi astarlanan yüzeye korozyona, pasa ve çizilmelere karşı direnç kazandırmaktır. Fabrikada üretimi tamamlanan araç için pastan korunma süresi elektro kaplama ile 12 ila 15 yıla kadar çıkmaktadır (Özçanak, 2008: 1-5).

Tanımı yapılan bu kaplama yönteminin iki farklı uygulaması mevcuttur. Boyanacak eşya elektrik devresinde katot haline getirilirse, yürütülen sürece “kataforez”, süreç sonunda elde edilen kaplamaya ise “kataforetik elektro kaplama” ya da “katodik elektro kaplama (CED)” denir (Şekil 6.1.) Boyanacak eşyanın elektrik devresinde anot haline getirilmesi durumunda ise oluşan sürece “anofrez”, süreç sonrasında elde edilen kaplamaya “anoforetik elektro kaplama” veya “anodik elektro kaplama (AED)” adı verilir (Özçanak, 2008: 1-5).



Şekil 6.1. Elektro kaplama uygulaması.

Kaynak: (Özçanak, 2008: 1-5).

- Anodik ED: Kaplanacak parça anot'tur. Reçine ise katyon verir.
- Katodik ED: Kaplanacak parça katot'tur. Reçine anyon verir.

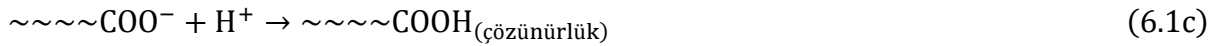
Pozitif yüklü metal parçaların negatif yüklü boya parçacıkları ile kaplanması işlemine “anodik elektro kaplama” denir. Yüksek parlaklık ve renk kontrolü sayesinde anodik elektro kaplama, ekonomik bir kaplama uygulamasıdır. Ancak uygulama sürecinde metal iyonlarının

çözünmesine sebebiyet vererek bu iyonların kaplanmakta olan boya filmi bünyesinde hapsolmasına neden olmaktadır. Boya filmi içerisinde hapsolan metal iyonları kaplamanın korozyona karşı direncini olumsuz yönde etkileyerek istenen performanslara ulaşılmasını zorlaştırır (Özçanak, 2008: 1-5).

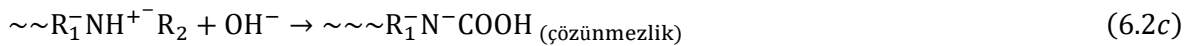
Katodik kaplamada ise negatif yüklenen iş parçaları pozitif yüklü boya parçacıklarını kendine çeker. Bu süreçte kaplanan film tabakası içeriğinde daha az demir bulunur. Böylece anodik kaplamada karşılaşılan metal iyonlarının boya filmi içerisinde hapsolması engellenerek korozyon dayanımı arttırılır. Yüksek korozyon dayanımı istenen parçalarda katodik kaplama beklenildiği üzere anodik kaplamaya tercih edilmektedir (Özçanak, 2008: 1-5).

Aşağıda Anodik ED ile Katodik ED tepkime dizisi 6.1 ve 6.2 numaralı denklemlerle sırasıyla verilmiştir (Özçanak, 2008: 1-5) :

Anodik ED dizisi:



Katodik ED dizisi:



Katodik elektro kaplama, performans bakımından anodik kaplamadan daha iyi olduğu için 1960'larda anodik elektro kaplamayla başlayan süreç 1970'lerde katodik elektro kaplamanın yaygınlaşması ve yüksek kullanımıyla günümüze kadar devam etmiştir. Elektro

kaplama karmaşık geometrik şekillerde üretilen metal parçaların boyanmasıyla korozyon direnci kazanması adına çok etkili bir yöntemdir ve son yıllarda otomatik endüstrisi haricinde beyaz eşya, savunma sanayi gibi farklı endüstriyel alanlarda da yaygınlaşmaktadır (Özçanak, 2008: 1-5).

6.1.Kataforez Kaplama Proses Akışı

Kataforez kaplama işlemi aşağıda da detaylandırıldığı üzere yüzey hazırlama prosesiyle başlayan, kataforez kaplama ve kürlenme prosesini içeren üç farklı aşamadan oluşur.

Yağ Alma	Durulama	Aktivasyon	Fosfat Kaplama	Nano Kaplama	Durulama	Pasivasyon	Deiyonize Durulama	Kataforez Kaplama	Ultrafiltrant Durulama	Piştirme
YÜZEY HAZIRLAMA PROSESİ							ELEKTRO KAPLAMA PROSESİ		KÜRLENME PROSESİ	

Şekil 6.2. Kataforez kaplama proses akışı.

Yüzey işlemi boya uygulaması sonrasında ürünün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Boya uygulama prosesinde yağ alma ön işlemi imalattan kaynaklanan malzeme üzerindeki yağ, kirlilik, kaynak pisiği ve benzeri kirliliklerin solvent, asidik veya alkali kimyasallar uygulanarak giderilmesini sağlar. Yüzey temizlendikten sonra dönüşüm kaplamaları uygulanarak koruyucu boya katmanının malzemenin yüzeyine tutunması sağlanır. Bu işlemler uygulanarak yüzey hazırlama prosesi tamamlanır.

Elektro kaplama prosesi uygulanarak, boyanın uygulandığı yüzeye korozyona karşı direnç ve pas dayanımı kazandırılması amaçlanır.

Kürlenme prosesi belirlenen süre ve sıcaklıkta uygulanarak boya içerisindeki bağlayıcı reaksiyonun tamamlanması sağlanır.

6.3.Kataforez Kaplamanın Yüzey Hazırlama Prosesi

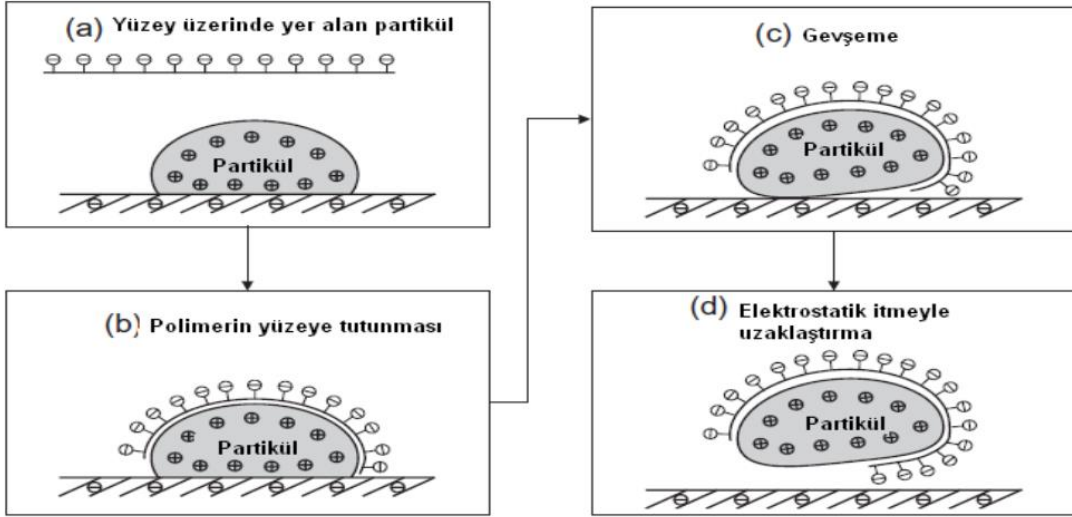
6.3.1.Yağ Alma

Boya uygulama prosesinde yağ alma ön işlemleri imalattan kaynaklanan malzeme üzerindeki yağ, toz, pas ve benzeri kirliliklerin solvent, asidik veya alkali kimyasalların ve sıcaklığın etkisiyle parça yüzeyinden uzaklaştırılmasıdır (Kılınç & Akyağın, 2022: 4-7).

Kataforez kaplama sürecinin yağ alma hatlarında kullanılan alkali temizleyiciler toz veya sıvı şekilde kimyasallardan oluşmaktadır. Araçların iskeletinde bulunan kirliliklerin giderilmesi için kullanılan alkali yağ almalar standarttır. Yüzey aktif maddeler organik kimyasallardan meydana gelirken, bileşenler inorganik tuzlardan meydana gelir. Bileşenlerin başlıca görevi inorganik maddeleri, kaynak renginden kaynaklı boyar kitletici malzemeleri ve metal taneleri kaplanacak yüzeyden uzaklaştırmaktır (Kılınç & Akyağın, 2022: 4-7).

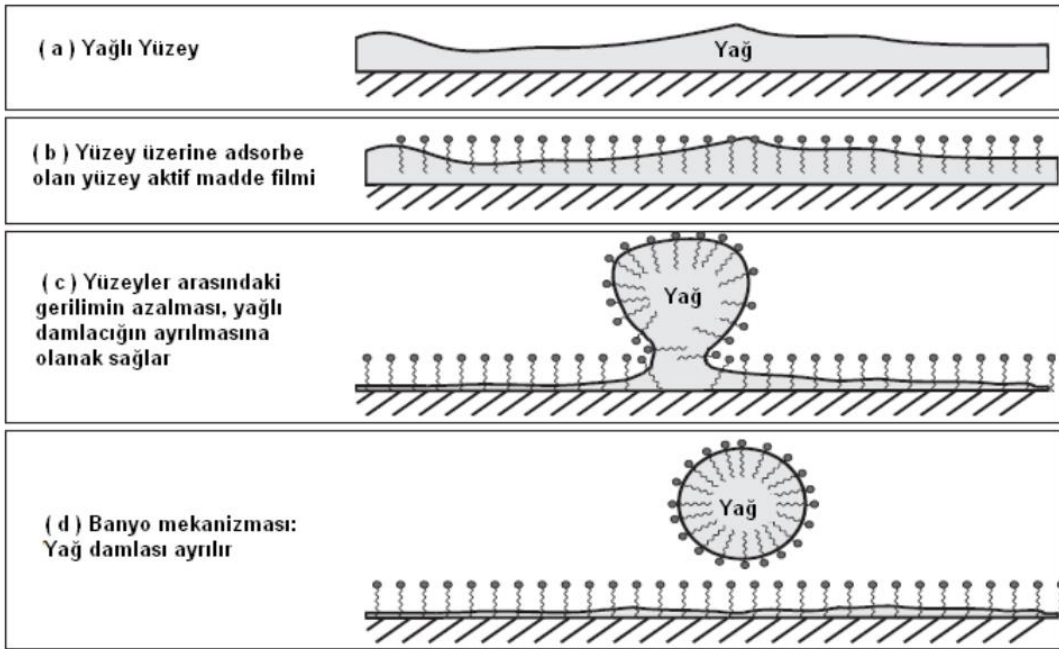
Alkali temizleyiciler içerisinde kullanılan tipik bileşenler aşağıda verilmiştir.

- NaOH, KOH, Na₂CO₃, K₂CO₃, → İyonlaşarak alkaliliğin sürekliliğini sağlayan bileşenler.
- Silikatlar → Partikül uzaklaştırma, inhibitör, tampon
- Orthofosfat → Temizleme
- Yoğunlaştırılmış Fosfatlar → Yağ alma + kompleks oluşumunda görev alır.
- Kompleks ajanları → Kompleks oluşumu yüzey aktif maddeler hidrofilik ve hidrofobik gruplar içerir. Bunlar;
 - Hidrofilik gruplar propoksi (PO) molekülünün zinciri veya etoksi (EO)'nin uzun zinciridir.
 - Hidrofobik gruplar özel uzun bir alkali zinciridir. Yüzey aktif maddeler anyonik, katyonik, iyonik olmayan ve amfoter yüzey aktif maddeler olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 6.3. Partiküllerin yüzeyden ayrılma mekanizmasının gösterilmesi.

Kaynak: (Kılınç & Akyağın, 2022: 4-7).



Şekil 6.4. Yağın yüzeyden ayrılma mekanizması.

Kaynak: (Kılınç & Akyağın, 2022: 4-7).

Yağ alma çözeltileri daldırma ve sprey olarak iki farklı şekilde uygulanabilir.

Sprey uygulamanın avantajları aşağıdaki gibidir.

- Uygulanma süresi kısadır.
- Kompleks geometrik parçalar için uygulanması önerilmese de basit geometrik şekilli parçalarda uygulanması önerilir.
- Parça üzerindeki partikülleri uzaklaştırmak adına mükemmel görev yapar.
- Düşük sıcaklıkta banyo ve parça için olumsuz sonuçlar yaratabildiğinden uygulama aralığı sınırlıdır.
- Mekanik temizlik operasyonu yardımıyla da kullanılabilir.

Daldırma uygulamaların avantajları aşağıdaki gibidir.

- Parçaların birbirine bağlandığı kutu kesiti ve kenar bağlantısı gibi zor alanların temizlenmesinde başarılıdır.
- Uygulama zamanı konusunda sprey uygulamaların gerisinde kalmaktadır, çünkü daha uzun bir uygulama gereksinimi vardır. Ayrıca sprey uygulamalarına nazaran daha yüksek konsantrasyon gereksinimi bulunur.
- Banyo hacminin büyüklüğünden kaynaklı stabilitesi yüksektir (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

6.3.2.Durulama

Durulama işleminin yapılmasındaki amaç metal yüzeyde kalan kimyasal ve kirliliklerin sonraki kimyasal banyolarına aktarılmasını engellemektir (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

6.3.3.Aktivasyon

Aktivasyon işleminin amacı birim yüzey alanına düşen fosfat kristali sayısını artırarak sonrasında yapılacak fosfat kaplama için homojen bir yüzey oluşturmaktır. Aktivasyon pH'ı 7 ila 11 aralığında olan titanyum orto fosfatın sulu dispersiyonlarından oluşur (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

Sulu dispersiyon içerisinde bulunan kolloid yapılar küresel tanecikli ve $Na_4TiO(PO_4)_2 - 7H_2O$ kompozisyonuna sahiptir. Bu tanecikler kolloidal dispersiyon ile metal yüzey boyunca fiziksel olarak tutunur. Aktivasyonu gerçekleştirilen metal malzeme çinko fosfat banyosuna daldırıldığında fosfat çözeltisi içerisinde bulunan çinko iyonları ile titanyum fosfat yüzeyinde bulunan sodyum iyonları ile bir iyon değişimi gerçekleştirir. İyon değişimine

uğrayan parçacıklar çinko fosfat kristalleri adına kristalleşme ajanı gibi işlev görmeye başlar. Fosfat kaplamanın kristal oluşma hızı aktivasyon ile birlikte fark edilir şekilde artar (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

Aktivasyon banyosunun verimliliği ve etkinliği aktivasyon banyosuna daldırılan malzeme miktarından bağımsız olarak zamanla azalmaktadır. Banyo etkinliğini ürün formülasyonuna bağlı olarak da değiştirmek mümkündür. İki veya üç değerlikli katyonlarla indirgenen titanyum fosfat kolloidi negatif yüklü hale gelir. Çoğu aktivatör ürün çift değerlikli iyonlarla indirgenmeyi azaltmak adına katyonlar ile kompleks oluşturabilen derişik poli-fosflatları barındırır. Aktivasyon banyolarının saf su ile faaliyet göstermesi özellikle önerilmektedir. Aktivasyon banyosu kaplama ağırlığına, oluşması istenen kristal boyutuna, banyoda meydana gelen kirlenme seviyesine ve aktivatör ürüne göre belirli periyotlarla kimyasal ilavesi yapılarak iyileştirilmelidir. Bu işlemin yanı sıra banyonun çözeltisinin boşaltılarak yeniden doldurulması da banyonun istenilen özelliklere tekrar kavuşması adına uygulanabilecek bir yöntemdir. Sıvı aktivatörler yüksek viskoziteli olduğundan dolayı tank içerisine doğrudan beslenirken özel pompalara ihtiyaç duymaktadır (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

Toz ürünler ise çalışan banyo içerisine dozajlanmadan önce %0,5-1 oranlarında ön karıştırma tanklarında hazırlanır. Aktivasyon banyosunun sürekli olarak karıştırılmasıyla titanyum fosfat dispersiyonunun çökmesi engellenebilir.

Aktivasyon banyolarında karıştırma işlemleri iki şekilde gerçekleşebilir. Bunlar;

- Hava karıştırmalı,
- Pompa yardımı ile karıştırmadır.

Karıştırma işlemi doğrudan fosfat kristali yapısı üzerinde değişim meydana getirdiği için pompa ile karıştırma yapılırken banyo maksimum 5 devir/saat olarak dönmelidir. Hava ile karıştırma uygulamasında ise hava basıncı 3 ila 5 bar aralığında olmalı ve bu aralığı geçmemelidir, aksi halde fosfat kristallerinin yapısı istenmeyen şekilde değişime uğrayabilir (Kılınç & Akyaçın, 2022: 4-7).

6.3.4.Dönüşüm Kaplama (Fosfat Ve Nano Kaplama)

Bu tür dönüşüm kaplamalar, fosfat kaplama, nano kaplama ve kromsuz (chrome free) kaplamalardan oluşmaktadır. Boyanın yapışma mukavemetini arttırmak amacı ile uygulanan ince film tabakası oluşturan kaplamalarıdır (Kılınç & Akyalçın, 2022: 4-7).

6.3.5.Durulama

Bu aşamada yapılan durulamanın görevi öncelikli olarak bir sonraki adımda gerçekleşecek pasivasyon işleminin etkinliğinin korunmasıdır. Genel amaç fosfat veya nano banyodan çıkan metalin yüzeyinde bulunan toz ve artık kimyasalların takip eden adımlarda bulunan banyolarda birikmesini engellemektir (Kılınç & Akyalçın, 2022: 4-7).

6.3.6.Pasivasyon

Pasivasyon işlemi fosfat kaplanan metal malzemenin korozyona karşı olan dayanımını bir adım daha ileri taşımak için yapılmaktadır. Pasivasyon banyosu; krom(III), krom(IV) veya hiç krom içermeyen çözeltilerden meydana gelmektedir. Günümüzde krom(VI) pasivasyonlarının yerini zehirli olmalarından kaynaklı olarak zirkonyum temelli pasivasyonlar almaktadır (Satake & Nagahiro, 1990: 72-85; Zimmermann , 2003: 33-47).

Zirkonyum temelli pasivasyon prosesleri asit çözeltileri ve pasivasyon ajanları ile fosfat yüzeyinde bulunan ikincil fosfat kristallerini aşındırmaktadır. Ayrıca çözünemeyen bileşenlerin çökelemesine bağlı olarak fosfat yüzeyinde bulunan gözenekli yapıların boyutlarını azalttığı ve korozyona sebep olan etmenlerin ilerlemesini engellediği gözlemlenmiştir (Satake & Nagahiro, 1990: 72-85; Zimmermann , 2003: 33-47).

6.3.7.Deiyonize Durulama

Deiyonize durulama yapılmasındaki amaç kaplama banyolarına Mg ve Ca gibi iyonların taşınarak banyoların etkinliğini azaltmasını engellemektir. Deiyonize suyun iletkenliğinin 20°C' de 15 ila 50 $\mu\text{s cm}^{-1}$ olması istenmektedir (Özçanak, 2008: 50-53).

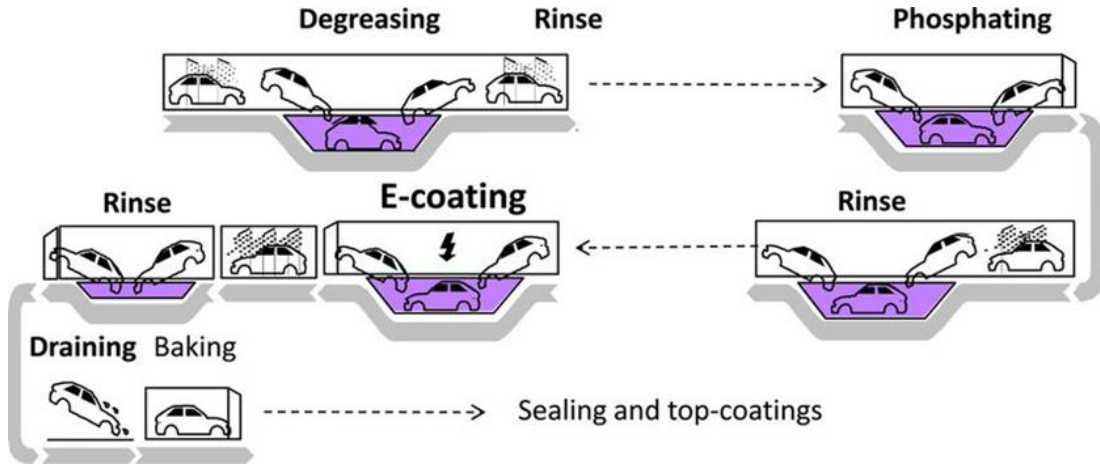
Durulama banyosundaki iletkenliğin düşük olmasının en önemli sebeplerinden biri durulamaya taşınan iyonların banyo içerisinde tutunmaları sonucu kataforez sonrasında oluşacak kaplamada olası tuz reaksiyonlarını engellemek ve boyanın yapışma kaybını önlemektir (Özçanak, 2008: 50-53).

Elektro kaplama prosesi kapsamında, kataforez kaplama sisteminde kataforez kaplama banyosu, ultrafiltrasyon banyoları ve anot sistemi bulunmaktadır.

6.4.Elektro Kaplama Prosesi

6.4.1.Kataforez Kaplama Banyosu

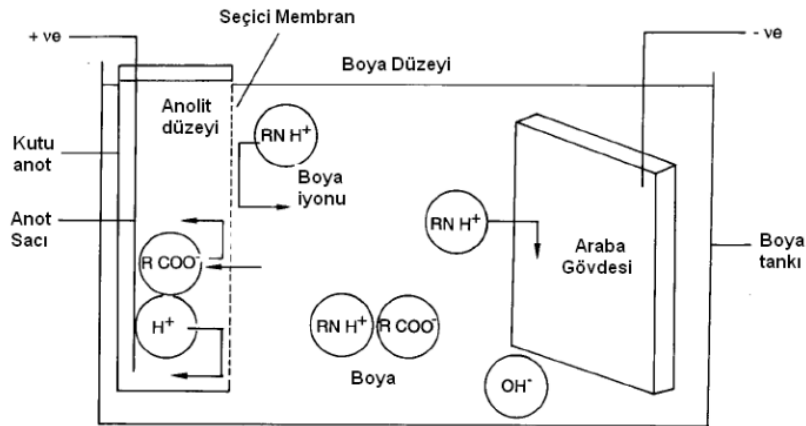
Kataforez kaplama prosesi aşağıdaki Şekil 6.5'te gösterildiği gibi olmalıdır.



Şekil 6.5. Kataforez kaplamada gerçekleştirilen reaksiyonlar.

Kaynak: (Song, 2011: 252-258)

Bu proseste kataforez kaplamada gerçekleştirilen reaksiyonlar gösterimi ise Şekil 6.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 6.6. Kataforez kaplama banyosunda meydana gelen reaksiyonlar.

Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 21)

Kataforez banyosunda anot ve katot üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

Film oluşturucunun çözülmesi.

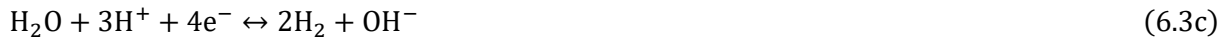


Film Oluşturucu (çözünmez amintuzu)	Çözücü Asit	Çözünmüş pozitif yükü polimer
--	----------------	-------------------------------------

Elektroliz ;



Katottaki dönüşüm;

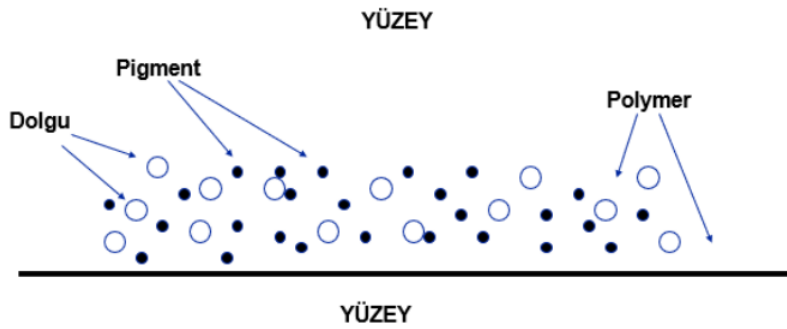


Çözülür polimer	Yüzey üzerinde pıhtılaşma
--------------------	---------------------------------

Anottaki oksidasyon (dönüşüm)



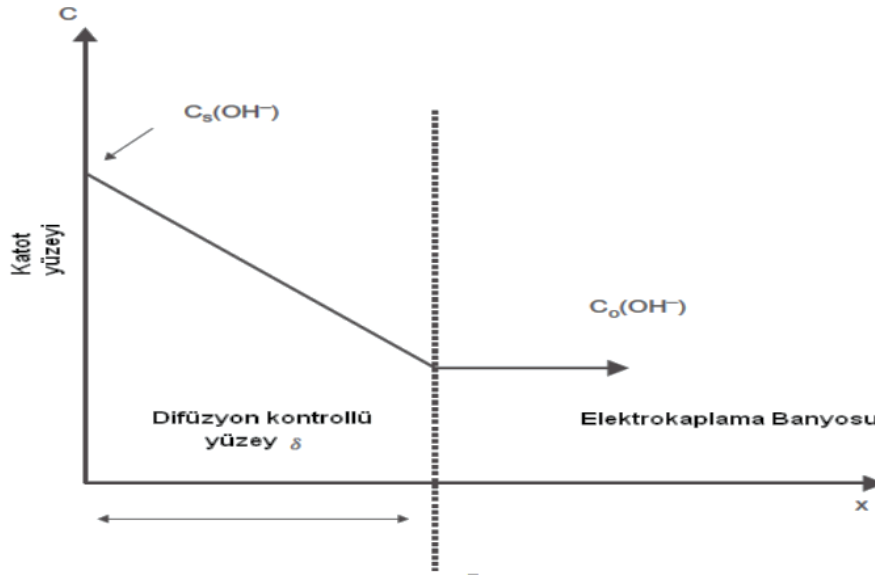
Parça yüzeyinde meydana gelen film tabakası Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Kataforez kaplama kimyasalların hareketi.

Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 22)

Difüzyon kontrol yüzeyindeki pH'ın değişimi elektro kaplama prosesleri için en önemli faktördür. Difüzyon kontrol yüzeyindeki pH'ın değişimi Şekil 6.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8. Katarforez kaplama süresince elektrottaki OH⁻ konsantrasyonunun profili.

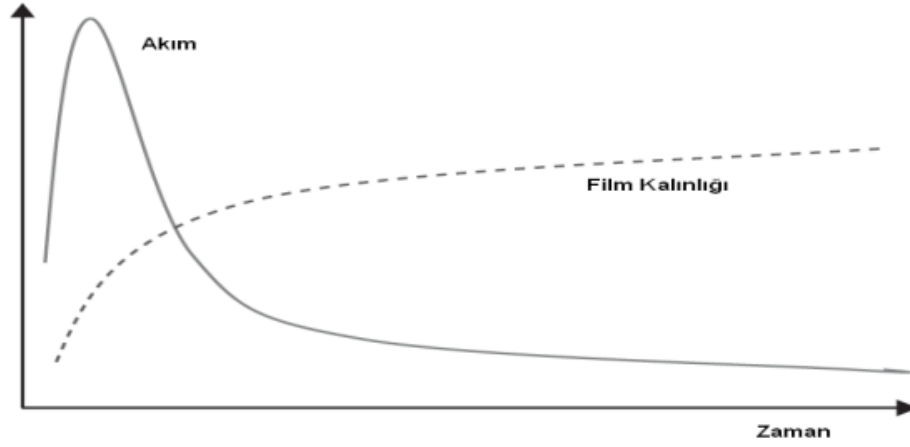
Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 23)

Beck tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elektro kaplama prosesleri için katot ve anotta meydana gelen temel reaksiyonlar ortaya konulmuştur. Elektrottaki hidroksil ve hidrojen iyonlarının konsantrasyonu yardımıyla çözeltinin pH'ı Fick yasaları ve Faraday yasaları ile hesaplanabilmektedir (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117)(Beck, 1976: 42-51).

Standartlaştırılmış katarforez kaplama tankına uygulanacak voltajın büyüklüğü, akım yoğunluğu, elektrot mesafesi ve elektrot alanı ile belirlenmektedir (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).

İyon konsantrasyonunun kritik düzeyi oluşturması ile akım artışı sağlanırken, akımdaki azalma filmin öz direnciyle orantılı olarak değişmektedir (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).

Katarforez kaplama banyosundaki uygulanan voltaj süresince boyanın dispersiyon parçacıkları, geciktirici sürtünme ve elektriksel çekim kuvvetleriyle etkileşerek, yaklaşık 10^{-4} ve $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sabit hızda, difüzyon kontrol yüzeyindeki elektriksel alanda, yüklerine göre aktarılır. Boya bir dakika içerisinde 20 μm film kalınlığına ulaşılabilir. Şekil 6.9'da da gösterildiği üzere kaplanacak malzemenin verilen akıma göre yüzeyde oluşacak kaplama film kalınlığı görülebilmektedir (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).



Şekil 6.9. Kataforez kaplama potansiyostatik denemelerinde akım-zaman eğrileri.

Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 24)

Katı miktarı, çözücü miktarı ve pH

Kataforez kaplama tanklarında kül miktarı, katı miktarı, çözücü miktarı, pH ve sıcaklık kontrolleri yapılırken tankın yapısına göre banyo içerisindeki sirkülasyon hızı da göz önünde bulundurulmalıdır (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).

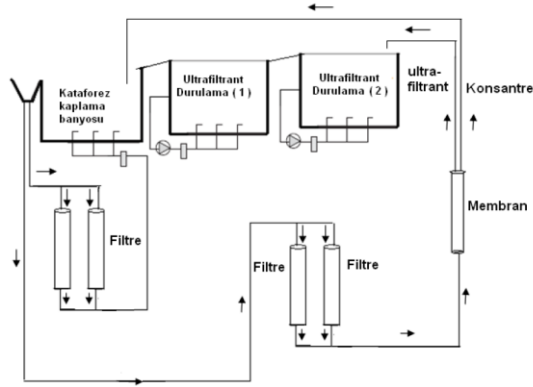
Yukarda bahsi geçen etmenler kataforez prosesindeki birkaç farklı parametreyi çeşitli yollarla aynı anda etkileyebilmektedir. Örneğin kül miktarında veya katı miktarında meydana gelen değişim uygulanan voltajın davranışını, boyanın iletkenliğini ve kaplamanın kalınlığını etkilemektedir. Kataforez kaplama kimyasalları üzerinde en çok etkili parametre çözücü miktarıdır. Her çözücü aynı etkiye sahip değildir. Oluşan film üzerinde çözücüler çok az etkilidir. Sıcaklık ise kaplama kalınlığını etkilemektedir. Kataforez kaplama tankındaki boya akış hızı 0.3 ms^{-1} 'den daha hızlı ve sabit akış hızında olmalıdır (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).

Akış hızının iki etkisi vardır. Birincisi kaplanacak malzeme yüzeyinde kataforez kaplama prosesi için yeterli ısı transferini sağlamak ve ikincisi boyanın çökmesini engellemektir. Yüksek akış hızı kataforez kaplama prosesini etkilemektedir. Akış hızı arttıkça kaplama kalınlığında azalma meydana gelmektedir (Satake & Nagahiro, 1990: 110-117).

6.4.2.Ultrafiltrasyon Banyoları

Kataforez kaplama tesislerinde yaygın olarak kullanılan ve bir ayırma sistemi olan Ultrafiltrasyon banyolarında boyayı ayırmak için polimerik malzemeden oluşan membranlar kullanılmaktadır. Bu membranlar 30 ila 300 nanometre boyutunda gözeneklere sahiptir.

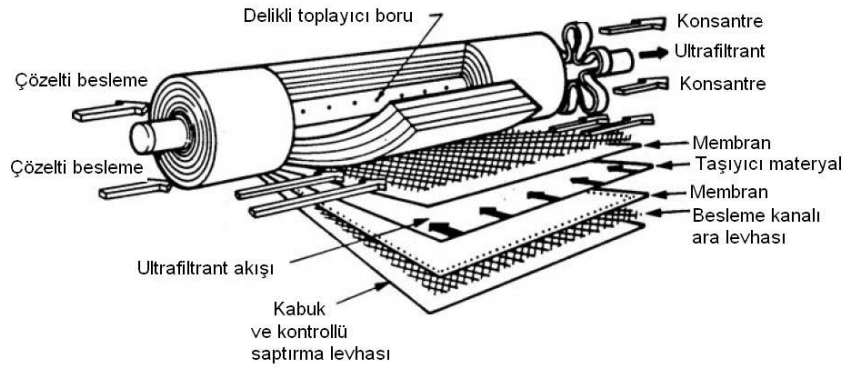
Katodik elektrolitik Kaplamalarda; sıvı içerisindeki çözücüler, su, düşük molekül ağırlıklı reçineler ve moleküller membrandan geçerek boyadan ayrılır. Bunlara ultrafiltrate ve permeate denir. Bu teknoloji sayesinde boya ve ultrafiltrat birbirinden ayrılarak boyanın kazanımı sağlanır. Ultrafiltrat aşağıdaki gibidir (Kılınç & Akyalçın, 2022: 25).



Şekil 6.10. Ultrafiltrat membran çalışma düzeni.

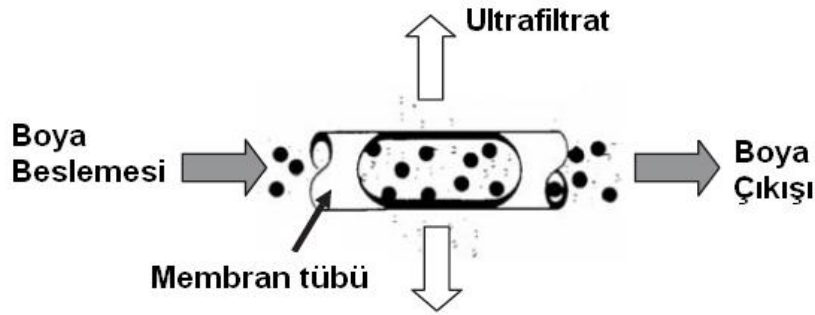
Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 25)

Katabolik kaplama çalışırken ultrafiltrat durulama banyosunun katı miktarı sürekli artış göstermektedir. Bunun sebebi katabolik kaplanan parça yüzeyine elektrostatik kuvvetlerle tutunmamış boyanın ultrafiltrat durulama (1 ve 2) banyolarına taşınmasıdır. Bu veriminin %100'e yakın olabilmesi için ultrafiltrat (1) banyosundaki katı miktarının %1-2 arasında olması ve ultrafiltrat durulama (2) banyosundaki katı miktarının da %0,5-1,0 arasında olması gerekmektedir. Elektro kaplama prosesinin yukarıdaki şekilde olması durumunda ultrafiltrasyon durulamalarının belirtilen katı içerik değerlerinde tutulmaktadır. Bu sistem sayesinde katabolik banyosundaki katı miktarı artırılır ve ultrafiltrasyon durulama banyosundaki katı miktarı azaltılmış olur. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de membran sisteminin yapısını ve çalışma prensibini göstermektedir (Kılınç & Akyalçın, 2022: 25).



Şekil 6.11. Kataforez kaplamanın ultrafiltrasyon biriminde kullanılan özel sarınlı membranların konfigürasyonu.

Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 26)

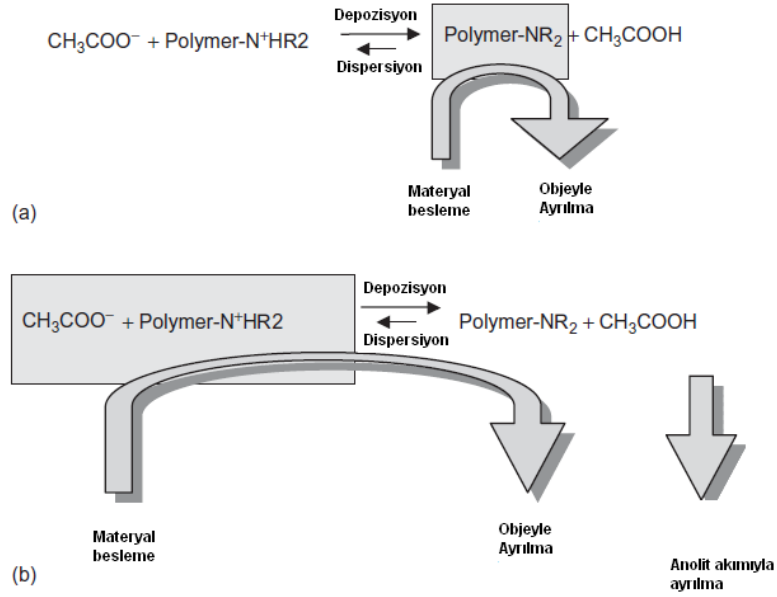


Şekil 6.12. Boru şeklinde membranla ultrafiltratın ayrılma prosesi.

Kaynak: (Kılınç & Akyalçın, 2022: 26)

6.4.3. Anot Sistemi

Kataforez kaplama banyolarında oluşan fazladan asidi uzaklaştırmak gerekmektedir. Fazladan oluşan bu asidi uzaklaştırmak için anot hücreleri kullanılmaktadır. Bir standart anot hücresi öncelikle plastik kutu içerisine yerleştirilmiş paslanmaz çelik ve plastik kutuyu örten anyon değiştirici membrandan oluşmaktadır. Anot içerisinde bulunan membran, kataforez kaplama prosesi boyunca iyon geçişine izin verir. Anyon değiştirici membranların yapısı katyonik yüklere sahiptir ve katyonları geçirmezler. Asit baz dengesi Şekil 6.13'te de gösterdiği gibi sağlanmış olur (Kılınç & Akyalçın, 2022: 27-28).

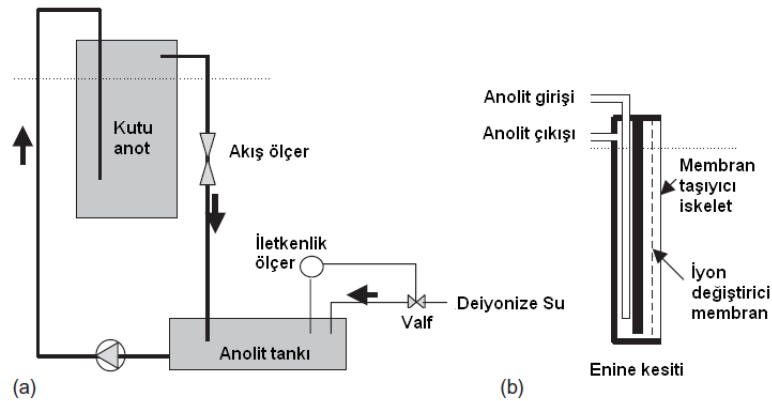


Şekil 6.13. Katarofrez kaplamanın yenilenme proseslerindeki asit baz dengesi.

Kaynak: (Kılınç & Akyağın, 2022: 27-28).

- Alt nötralizasyon
- Tam nötralizasyon

Anot hücrelerinde kullanılan paslanmaz çelik malzeme, Alman DIN Standardına göre 1-4404, 1-4429 veya 1-4439 gibi klor iyonuna dayanıklı olmalı ve yüksek derecede paslanmaz alaşım olmalıdır. Anodun kullanım ömrü anot alanı boyunca sistemden geçen akıma bağlı olarak değişir. Anot yapısı ve devresi Şekil 6.14'te gösterilmektedir (Kılınç & Akyağın, 2022: 28).



Şekil 6.14. (a) Anot devresi (b) Kutu Anot

Kaynak: (Kılınç & Akyağın, 2022: 28)

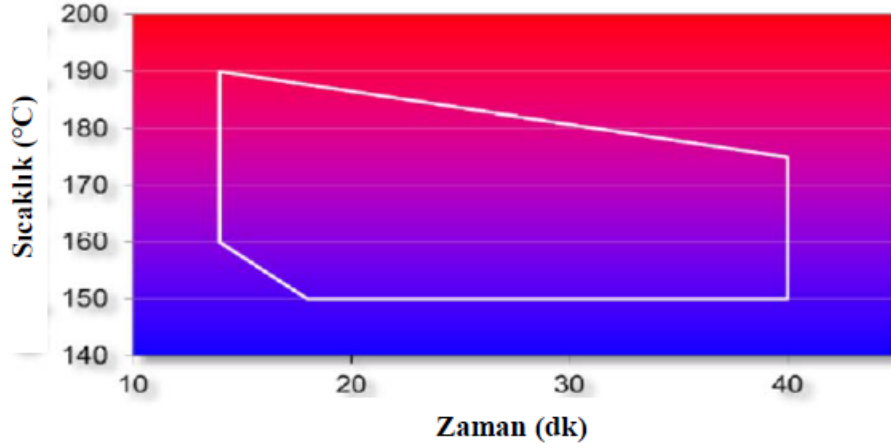
Anolit tankında bulunan sıvının iletkenliği en büyük etkenlerden biridir. Anolit sıvısının iletkenliğinin 700 ve 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında olması gerekmektedir. Bu sıvının iletkenliği üst değere ulaştığında kontrol vanası yardımıyla sıvı içerisine deiyonize suyun girmesi sağlanır. Anot akış hızının min 4 L/dk olması gerekmektedir. Akış kontrolü görsel ve akış metrelerle olmalıdır. Anotta herhangi bir sızıntı olması durumunda bu sızıntı önlenmelidir. nlenmediği takdirde membranın iç kısmı kaplanmakta ve asit akışı engellenmektedir. Kolay muhafaza edilmesi yerleştirilebilmesi ve değiştirilebilmesi sebebi ile günümüzde kutu anot hücreleri yerine tp şeklindeki anot hücreleri kullanılmaktadır. Anot sisteminde aside dayanıklı çeliklerden yapılmış sirkülasyon pompaları tercih edilir. Anot sisteminin tamamı topraklanmalıdır (Kılınç & Akyalçın, 2022: 28).

6.5.Kürlenme Prosesi

Kataforez kaplamada malzemelerin kaplama işlemleri tamamlandıktan sonra ısıtılarak krlenmesinin yapılması gerekmektedir. Son durulama aşamasından sonra pişirme fırınlarına alınarak kürlenme tamamlanır. Isıtma işleminde kullanılan konveksiyonel fırınlar , IR (Infra-Red) fırınlarla karşılaştırıldığında enerji verimliliği yönünden daha verimsizdir. Konveksiyonel fırınlar , pişirme proseslerinde kürlenme işleminin tamamlanması için zorunludur (Murphy, 2005: 549-583).

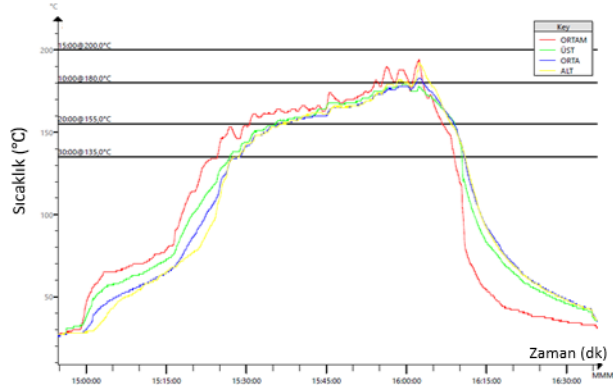
Modern fırınlara ‘A’ sınıfı fırın denilmektedir. Böyle fırınların giriş bölgesinde malzemeler belirli bir seviyeye kadar yükselir, fırın boyunca sabit ilerler ve fırın çıkışında malzemeler başlangış yksekliliğine ulaşır. ‘A’ sınıfı fırınlar böyle tasarlanmıştır. ‘A’ sınıfı fırının bu şekilde olmasının avantajı sıcak hava sürekli fırının st kısmında hareket ettiği için, enerji kaybında dikkate değer derecede azalma olur. Bu sayede sıcak hava kolay kaçamaz fırın içerisinde muhafaza edilir (Murphy, 2005: 549-583).

Malzemelerin askıda asılma konumuna bağlı olarak sıcaklık zaman grafikleri farklılıklar göstermektedir. Teorik olarak kataforez kaplamanın kürlenme diyagramı şekil 6.15 ile pratik gerçekleşen kürlenme diyagramı şekil 6.16’da gösterilmektedir. Bu sebeple pratikte gerçekleşen termograf sonuçlarının teorikte gerçekleşen kürlenme penceresi içerisinde olacak şekilde fırının hız ve sıcaklık değerlerinin ayarlanması gerekir (Murphy, 2005: 549-583).



Şekil 6.15. Kataforez kaplamanın teorik kürlenme diagramı.

Kaynak: (Murphy, 2005: 549-583).



Şekil 6.16. Gerçekte ölçümü alınmış fırın sıcaklık-zaman diagramı.

Kaynak: (Murphy, 2005: 549-583).

Çoğu elektro kaplama malzemesi için ağırlık kaybının, elektro kaplamanın çeşidine göre %8 ile %18 değer aralığında olduğu göz önünde bulundurulursa, fırın havası içerisindeki organik emisyon derişiminin her metre küp için birkaç gram olduğu bulunur. Dünyanın birçok yerinde belirtilmiş bu limit değerinin üstündedir. Bu nedenle atık hava önceden ısıtılmış taze hava ile yerdeğıştirmelidir. Bu da uçucu organik (VOC) emisyon tüzüğüne uygun şekilde yakma birimine gönderilmelidir. Isı üretimi için genellikle hidrokarbon yakıtlı kazanlar kullanılır. İstenen sıcaklığa ulaşabilmek için gereken ısı, ısı değıştirici sistemler ile aktarılır. Eğer doğal gaz kullanılmakta ise sıcak yakıt gazları doğrudan fırının içerisine verilir. Fırının içerisine doğrudan beslenen yanma gazları primer yüzeylerde adezyon yetersizliğı gibi film performansında olumsuz durumlara yol açabilmektedir (Murphy, 2005: 549-583).

7.LİTERATÜR TARAMASI

Kılınç & Akyalçın (2022) çalışmasında kataforez ve çinko lamelli kaplamalar üzerine son kat kaplama denemeleri yaparak bu proseslerin performans testlerine etkileri ve birbirleri ile olan ilişkilerini değerlendirmiştir. Bu çalışmada en uygun çalışma parametreleri ve proses akışları belirlenerek bu çalışma parametleri ve akışına göre kaplanan malzemelerin performans testleri değerlendirilmiştir. Sonuç kısmında uygunluklar değerlendirilerek kataforez kaplamanın üzerine uygulanan su bazlı çinko lamelli kaplamanın kataforez kaplama ile uygun olmadığını performans testlerinden kaldığını tespit etmiştir. Bunun sebebinin kataforez kaplamanın hidrofobik özellikte olup çözücüsü su olan çinko lamelli kaplamanın kataforez kaplama ile uygun reaksiyon olarak yorumlamıştır (Kılınç & Akyalçın, 2022).

Ök (2021), Çalışmasında otomotiv sektöründe yaygınlaşarak kullanılan seçmiş olduğu alüminyum yüzeyler üzerine kataforez kaplama , çinko lamelli kaplama ve toz boya kaplama uygulayarak otomotiv performans testlerine dayanıklılığını test etmiştir.Yapılan denemelerde malzeme yüzeylerine kuru yapışma testi, CASS testi ve çevrimsel korozyon testi yapılmıştır. Sonuçlara göre, çinko lamelli yapılan tüm denemelerin kuru yapışma testleri uygunsuz çıkmıştır ve devamında yapılması gereken çevrim testi ve CASS testleri başlatılmamıştır. Kataforez ve toz boya yapılan denemelerde ise 5005 için 1. deneme 5754 için 3. deneme kuru yapışma sonucu uygun çıkmıştır. Bu uygunluk doğrultusunda çevrim testi ve CASS testi başlatılmıştır. Başlatılan bu testler sonucunda sadece 5754 için 3. deneme toz boya uygun değildir. Diğer deneme sonuçları uygun tespit edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda 5005 ve 5754 alüminyum magnezyum alaşımlı malzemeler üzerine yapılacak olan kataforez ve toz boya kaplama sonucunda en kaliteli ve en uygun ürünün kataforez kaplama olduğu tespit edilmiştir (Usta, Yılmaz, Gül, Can, & Gül, 2024).

Özçanak (2008) kataforez kaplama prosesinde, kaplamadan önce kaplanmasında ve kaplamadan sonra prosesleri incelemiş, tasarımı ve hesaplama yöntemlerini açıklamıştır. Tüm üretim süreçler de olduğu gibi kaplamada da yatırım ve işletme maliyetleri de büyük önem taşımaktadır. Özçanak, kataforez tesislerinin yatırım ve işletme maliyetlerini inceleyerek diğer proseslerle karşılaştırarak ekonomik bir analiz yapmıştır.

Eren (2020) çalışmasında döküm ve sıcak dövme malzemeler üzerine asitli çinko, alkali çinko, çinko nikel kaplamaları ve onların üzerine duble kaplama olacak şekilde kataforez kaplama yapmıştır. Farklı iki tür kaplama olan çinko kaplama ve kataforez kaplamayı biraraya

getirerek iki proses sonucunda daha dayanıklı bir kaplama elde etmiştir. Bunların arasından en dayanıklı kaplama türü belirlenerek. Su direnci, mürekkep, hogobom, şok testi, tuz sisi, çevrimsel korozyon, taş çarpma ve scap korozyon performansları değerlendirilmiştir (Eren, 2020).

Ulubayrak (2020) endüstriyel alanda metal kullanımının artması ile birlikte metalin korozyonu kullanım ömrünün artması ve korunması ile ilgili yaptığı çalışmasında metal üzerine lamelli kaplamaların uygun olmadığı durumlarda alternatif yüzey temizliği işleminde fosfat kaplamanın kullanılabilirliğini incelemiştir. Lamelli öncesi uygulanan fosfat sırasında ph ve aktivasyon süresi değiştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucuna göre ortamın pH değeri arttıkça kötü yönde etkilenmiş ve fosfat kristal yapısından dolayı yüzeylerde lekelenmeler gözlemlenmiştir. Yüksek ph değerinde ise fosfat kristallerinin homojen olmadığı gözlemlenmiştir. Plakaların Korozyon dirençleri incelendiğinde fosfat kaplı plakalar iki kat çinko lamelli kaplama uygulandığında yüksek korozyon direnci sağladığı görülmüştür.

Eren (2020) otomotivde kullanılan döküm malzemelerin korozyon performansını arttırmak için çalışmasında çinko+kataforez kaplamaları birlikte uygulayarak düşük mikronda korozyon direnci yüksek döküm malzeme elde edilmesi sağlamıştır. Döküm malzemelerin verilerine göre asitli-çinko kaplama üzerine kataforez kaplanan parçaların uygun korozyon değeri sağladığı, beklendiği şekilde düşük maliyetli kaplamanın yapılabileceği görülmüştür.

8.MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada en çok kullanılan alüminyum alaşımları olan AL5754, AL6061 ve AL7075 olmak üzere üç tip alüminyum alaşımına ön işlem fosfat ve ön işlem nano uygulamaları yapılarak aşağıdaki metotlar doğrultusunda kataforez kaplanmıştır.

- ✓ AL5754 malzeme üzerine fosfat + kataforez kaplama
- ✓ AL5754 malzeme üzerine nano + kataforez kaplama
- ✓ AL6061 malzeme üzerine fosfat + kataforez kaplama
- ✓ AL6061 malzeme üzerine nano + kataforez kaplama
- ✓ AL7075 malzeme üzerine fosfat + kataforez kaplama
- ✓ AL7075 malzeme üzerine nano + kataforez kaplama

Aynı zamanda bu çalışmada uygulanan fosfat kaplama, fosfat içeren her bir adım için farklı üç flor değerinde (500-700-900 ppm) uygulanmıştır. Nano kaplama da ise üç farklı tip nano kaplama kullanılmıştır.

Öncelikle alüminyum plakaların bünyesinde bulunan alaşımların tespiti için el tipi X-RF cihazı ile ölçüm yapılmıştır. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların SEM cihazı ile kristal yapısı incelenmiştir. Daha sonra kataforez kaplanan alüminyum plakalarda kuru yapışma testleri yapılarak boyanın yüzeye tutunabilirliği gözlenmiştir. Kuru yapışma testinden geçen alüminyum alaşımlarına CASS testi ve çevrimsel korozyon testi uygulanmıştır. Daha sonra bu çalışmalar karşılaştırılmıştır.

Tablo 8.1. Çalışmada kullanılan alüminyum çeşitlerinin X-RF cihazı analizleri.

Alüminyum Grubu	Element	Min	%
AL5754	Al	92	96,35
	Mg	2,2	2,98
	Cr	0,15	0,18
	Si	0	0,06
	Ti	-	0,03
	Mn	0	0,09
	Fe	0	0,21
	Cu	0	0,08

Tablo 8.1. Devamı

AL6061	Al	97	99,09
	Cu	0,15	0,2
	Cr	0,04	0,14
	Mn	0	0,1
	Fe	0	0,38
	Co	-	<LOD
	Ni	-	0,02
	Zn	0	0,07
	AL7075	Al	82
Zn		6,3	6,36
Mg		2,4	3
Cu		1,6	1,86
Cr		0,18	0,19
Si		0	<LOD
Ti		0	0,03
Mn		0	0,03
Fe		0	0,03

Elementin miktarı LOD değerinin altındaysa (<LOD), bu, cihazın bu elementi güvenilir bir şekilde tespit edemediği veya miktarının çok düşük olduğu anlamına gelir.

8.1.Kuru Yapışma (Cross Cut) Testi

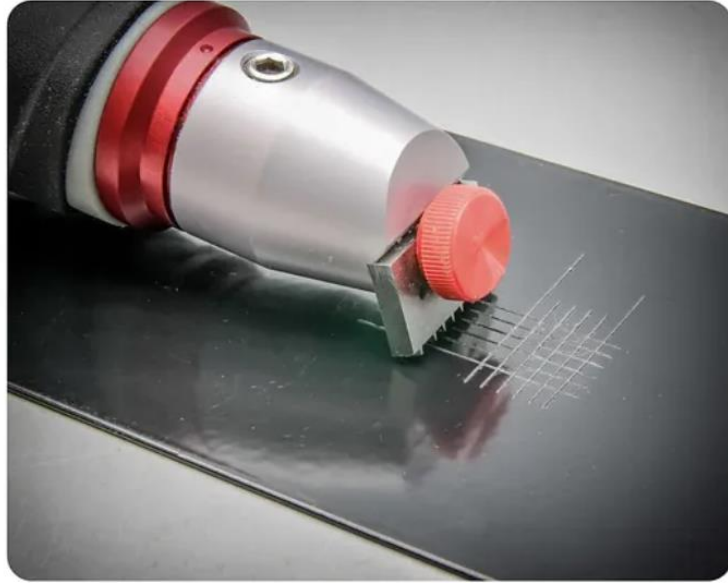
Cross-Cut testi, boya veya kataforez kaplanmış yüzeylerde kaplamanın yapışma dayanımını tayin etmek amacıyla uygulanan mekanik bir yüzey tayin yöntemidir. Test çoğunlukla metal yüzeylere uygulanan kataforez, boya, koruyucu veya kaplama filmlerinin alt tabaka ile yapışma kuvvetini belirlemek adına yapılmaktadır. Kuru yapışma testi ASTM D3359 ve ISO 2409 gibi uluslararası standartlara dayanmaktadır (Topaloğlu, 2023: 37-59). Bu çalışmada ISO 2409 standardı kullanılmıştır.

Test kaplama üzerinde belirli standartlar doğrultusundaki derinliklerde, multi bıçaklı test aparatı yardımı ile çapraz kesikler oluşturularak başlar. Çizik aralıkları yüzeye yapılan kaplamanın kalınlığına bağlı olarak seçilir. Doğru sonuçların elde edilmesi için bahsi geçen kesiklerin oluşturulması sırasında kesiklerin kaplamanın tabanına kadar ulaştığından emin olunması gerekir. Daha sonra standarta uygun yapışma kuvvetine sahip bir yapışkan bant testin yapıldığı yüzeye yapıştırılır. Yapıştırılan bant belirli bir hız ve sabit bir açı ile hızlıca yüzeyden çekilir. Cross-Cut CC100 cihazı ile kesiklerin oluşturulduğu bölgede bulunan kaplamanın ne düzeyde soyulduğu gözlemlenerek, istenilen standartlara göre değerlendirmeleri yapılır (Topaloğlu, 2023: 37-59).



Şekil 8.1. Cross Cut test ekipmanları.

Kaynak: (Karkimya, 2024)



Şekil 8.2. Cross Cut test ekipmanları.

Kaynak: (Karkimya, 2024)



Şekil 8.3. Özel yapışma bandının kullanılması.

Kaynak: (Karkimya, 2024)

Tablo 8.2. Yapışma testinin ISO 2409 göre değerlendirme kriterleri.

Derecesi	Açıklaması	Görünüşü
Gt0	Kesik olan kenarlar çok iyi derecede düzdür. Karelerde ise kaplamanın kalması görülmez.	---
Gt1	Karelerin kesişme bölgelerinde ufak kırık parçalar mevcuttur. Karelenmiş bölgede %5 daha az kalkma.	
Gt2	Karelerin kesişme bölgelerinde küçük kırık parçalar mevcuttur. Karelenmiş bölgede %5 - %15 arası kalkma.	
Gt3	Karelerin kesişme kenarları boyunca kırılma mevcuttur. Karelenmiş bölgede %15 - %35 arası kalkma.	
Gt4	Büyük şeritler halinde ve kare içlerinde tamamen kopmalar vardır. Karelenmiş bölgede %35 - %65 arası kalkma.	

Kaynak : (DIN Deutsches Institut für Normung , 2007: 14)

8.2.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzemelerin mikroyapılarını, yüzey morfolojisini ve kimyasal kompozisyonlarını incelemek üzere kullanılan yüksek çözünürlüklü bir analiz cihazıdır. Geleneksel optik mikroskopların çalışma mantığından farklı olan SEM, yüzeyin yüksek çözünürlüklü görüntüsünü elde etmek için elektron demeti kullanır. Bu şekilde malzemelerin yüzey özellikleri, nanometre ve mikrometre düzeyinde hassas bir şekilde analiz edilebilir. SEM, akademik çalışmalarda ve endüstride özellikle yüzey hatalarının tespiti, kaplama kalınlığı tayini ve malzemelerin yapısına ilişkin bilgilerin elde edilmesi adına kullanılır. Özellikle kataforez kaplamalarda yüzey üzerinde meydana gelen olası kusurların saptanmasında ve kaplamanın homojenlik analizinde kullanılır (Volvo Car Standard VSC 5740, 2011: 15).

SEM, elektron tabancasından saçılan yüksek enerjili elektron demetini numune yüzeyine odaklayarak çalışır. Elektromanyetik bir mercekle yardımıyla ince bir ışın demeti haline getirilen elektronlar ölçümün yapılacağı yüzey üzerine noktasal olarak tarama hareketi ile gönderilir. SEM görüntülerinde, kaplama ve alt tabaka arasındaki sınır net bir şekilde gözlemlenerek kalınlık nanometre veya mikron hassasiyeti ile ölçülür (Volvo Car Standard VSC 5740, 2011: 15).

Fosfat kaplama yapılan alüminyum alaşımlı plakaların kataforez öncesi fosfat kristal yapısı, homojenliği ve kristal boyutu SEM cihazı ile incelenmiştir. Cihaza konulan alüminyum plakaya 1000x büyütme yapılır ve incelenir. Aynı parçaya 3000x büyütme yapılarak kristal büyüklükleri incelenir. Bu sayede plaka yüzeyindeki fosfat kaplamanın örtücülüğünün ve kristal büyüklüğünün standarda uygun olup olmadığı incelenir. Tez çalışmasında HITACHI marka TM-1000 modeli elektron mikroskobu kullanılmıştır (Volvo Car Standard VSC 5740, 2011: 15).



Şekil 8.4. SEM Cihazı.

Kaynak: (Exapro, 2024: 17)

8.3.CASS Testi

CASS (Copper Accelerated Acetic Acid Salt Spray) testi, kaplama uygulanan yüzeylerin korozyon dirençlerini değerlendirmek adına kullanılan hızlandırılmış bir korozyon testidir. Adını test esnasında kullanılan bakır klorür (CuCl_2) ve asetik asit çözeltisinden alır (DIN Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011: 1-17).

CASS testinin temel çalışma prensibi, tuzlu, yüksek nemli ve asidik bir ortam oluşturarak kaplanan yüzeylerde hızlandırılmış korozyon etkisi oluşturmaktır. DIN 50 021 standardına göre yapılan CASS testi çözelti hazırlığı ile başlar. İlk olarak, sodyum klorür çözeltisine litre başına 1 gr Bakır (II) Klorür, $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, eklenir. Daha sonra pH değeri, asetik asit kullanılarak ayarlanır ve böylece hem püskürtülecek çözelti hem de toplanan çözelti 23 ± 2 °C’de 3,1 ila 3,3 pH değerine sahip olması sağlanır. Ph değeri cam elektrot kullanarak ölçülür. Toplanan çözelti, litre başına 50 ± 2 g sodyum klorür konsantrasyonuna sahip olacaktır. Daha sonra test kabini ortamı için test örnekleri CASS test kabine yerleştirilir. Kabinin iç sıcaklığı 50 ± 2 °C’ye ayarlanır (DIN 50 021,1988) ve çözelti buharlaştırılarak kaplama yüzeyine püskürtülür. Test genellikle 24, 48, 72 veya 120 saat gibi sürelerde uygulanır. Sürekli püskürtme koşullarında kaplama yüzeyinde hızla korozyon oluşumu gözlemlenir. Test edilecek malzemenin türüne ve istenilen standartlara göre süre koşulları değişim gösterebilir. Test süreci sonunda kaplamaların korozyona karşı dirençli olup olmadığı, kaplama yüzeyinde oluşan soyulma, paslanma ve çatlama miktarına bakılarak değerlendirme yapılır. (DIN Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011: 1-17). Bu çalışmada hedeflenen CASS testi dayanım süreleri Merceces DBL 7391 standartına uygun olacak şekilde, kataforez kaplama için 168 saat olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında, CASS testinde ASCOTT markasının CC1000IP modeli kullanılmıştır.

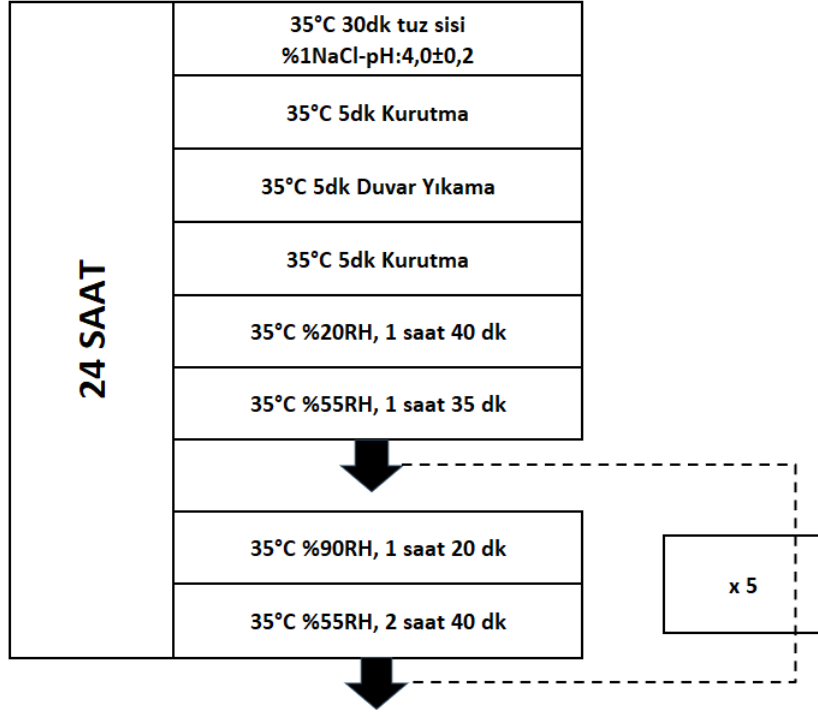
8.4.Çevrimsel Korozyon Testi

Malzemelere gerçek ortamlarda maruz kalacağı korozyon koşullarını hızlandırılmış bir şekilde laboratuvar ortamında simüle etmek için çevrimsel korozyon testi uygulanır. Geleneksel tuz püskürtme testleri genellikle tek tip korozyon etkisi oluşturur, fakat çevrimsel korozyon testi malzemeleri farklı nem, sıcaklık ve tuz spreyi döngülerine maruz bırakarak gerçek yaşam ortamlarına daha yakın sonuçlar sunar. Bu test özellikle denizcilik, otomotiv ve metal kaplama endüstrilerinde malzemelerin performanslarını değerlendirmek amacıyla yapılır (47-01-000-E, 2015: 2-33).

Tuz spreyi aşamasında öncelikle test numuneleri %5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisinin ince bir sis halinde yüzeye püskürtüldüğü bir ortama yerleştirilir. Yüzeye temas eden sodyum klorür tuzu sisi yüzeyde elektrokimyasal reaksiyonlar başlatır ve ilk korozyonun etkilerini oluşturur. Tuz spreyi sonrasında test kabınınin sıcaklığı genellikle 40°C-60°C, bağıl nem ise %95-%100 seviyelerinde tutulur. Bu aşamada tuz kalıntıları ve nem sayesinde korozyon ilerler ve oksidasyon reaksiyonları hız kazanır. Yüksek nem adımıandan sonra kabin içerisindeki nem seviyesi kurutma döngüsü için düşürülür. Sıcaklık değeri nemli yüzeyin neminden tamamen kurtulana kadar buharlaşmasını sağlayacak bir dereceye ayarlanır. Bu süreç sonunda buharlaşan nemin ardından tuz kristalleri yüzeyde kendini gösterir ve sonraki aşamalarda oluşacak korozyon için daha agresif bir ortam oluşturur (47-01-000-E, 2015: 2-33).

Belirlenen periyotlarda yukarıda belirtilen adımlar sürekli olarak tekrarlanır. Bu döngülerin tekrarlanması ile malzemeler, nemlenme, kurutma ve termal stress gibi doğal ortam koşullarına maruz bırakılır. Testin uygulanma süresi istenen standartlara veya malzeme türüne göre değişim göstermektedir (47-01-000-E, 2015: 2-33).

Bu çalışmada çevrimsel testler, D17-2028 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu testte, Renault 47-01-000-E standardına göre bir çevrim süresi 24 saat oluşmaktadır. Bu çalışma sonrası hedeflenen çevrimsel korozyon dayanımı süresi kataforez kaplama için Renault 47-01-000-E standardına göre 35 çevrim olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında, çevrimsel korozyon testinde ASCOTT markasının CC1000IP modeli kullanılmıştır.



Şekil 8.5. Renault 47-01-000-E standartına göre 1 çevrim (24 saat)'de gerçekleştirilen test aşamaları.

Kaynak : (47-01-000-E, 2015: 2-33).



Şekil 8.6. ASCOTT CC1000 IP çevrimsel korozyon test kabini.

Kaynak: (47-01-000-E, 2015: 2-33).

8.5.El Tipi XRF Cihazı

XRF analiz cihazları ülkemizde ve dünyada çoğunlukla metal alaşımı sektörlerinde kullanılan fakat cevher ve maden alanlarında, otokatalitik konvertörlerde değerli metal tespitlerinde, plastik malzemelerde ağır metal limit kontrollerinde, farklı türde malzemelerin hem nitel hem de nicel olarak kimyasal analizini yapmak adına kullanılan analiz cihazlarıdır. XRF'in açılımı X-Ray Fluorescence yani X-Işını Floresansı'dır (Repamet, 2024). X ışını floresanı üretmek için X ışını kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde X ışını kaynağı üretmek için farklı iki yöntem uygulanmaktadır:

1. Radyoaktif Atom
2. X-Işını Üreten Elektronik Düzenek

Bir numuneye X ışını gönderildiğinde yüzeye çarpan ışınların etkisiyle numunede bulunan atomların yörüngelerinde bulunan bazı elektronlar atom yörüngelerinden ayrılarak serbest hale gelir. Çekirdeklerine yakın elektronlarını kaybeden atomlar ise kararsız hale gelmektedir bu sebeple iyonlaşmış elektron sebebiyle boşaltılan yeri bir veya iki üst yörüngedeki elektronlar doldurmaktadır. Çekirdekten uzak yörüngelerde bulunan elektronlar, çekirdeğe daha yakın yörüngede bulunan boşluklara ulaştıklarında dışarıya bir enerji yayılmaktadır. Bu yayılan enerjiye ise X-Işını Floresansı (XRF) denir. Her elementin kendine özgü ve birden fazla enerjiye sahip XRF enerjisi bulunmaktadır (Repamet, 2024).

X-ışını kaynağı, bir atomun farklı enerji seviyelerindeki elektronları yerinden çıkararak XRF sinyalleri oluşturur. XRF analiz cihazları genellikle atomun K, L ve M yörüngelerinden yayılan XRF enerjilerini ölçmektedir. Bu yörüngeler sırasıyla 1., 2. ve 3. enerji seviyelerini temsil eder. Çekirdeğe yaklaştıkça enerji seviyesinin artması, aynı oranda çekirdeğe daha yakın yörüngelerdeki elektron değişimlerinin daha yüksek XRF enerjisi yaymasına neden olur. Bu nedenle, K (α) enerjisi L (α) enerjisinden, L(α) enerjisi de M(α) enerjisinden daha yüksektir. (Repamet, 2024)

XRF analiz cihazları, element tespitinde öncelikle K (α) ve K (β) XRF enerji değerlerine odaklanır. Ancak, daha hassas ölçümler yapılabilmesi için Niton gibi ileri XRF analiz cihazları, L (α), L (β), M (α) ve M (β) enerji değerlerini de analiz ederek hesaplama yapmaktadır (Repamet, 2024).

Taşınabilir XRF analiz cihazları, el tipi olduklarından dolayı X ışını tüp güçlerinin belirli sınırların altında kalması gerekmektedir. Bu durum, periyodik tablo dikkate alındığında

taşınabilir XRF cihazlarının 12. element olan magnezyumdan başlayarak 92. element olan uranyuma kadar olan elementlerin hem nitel hem de nicel analizini gerçekleştirebilmesini sağlar. Ancak atom numarası küçüldükçe elementlerden yayılan XRF enerji değerlerinin azalması, düşük atom numaralı elementlerin taşınabilir XRF cihazları ile tespitini zorlaştırmaktadır (Repamet, 2024).

XRF analiz yöntemi, tek bir elementin ölçümünden çoklu analizlere kadar geniş bir uygulama alanına sahip olup, herhangi bir donanımsal eklenti gerektirmemesi nedeniyle kısa süre içinde metal alaşım analizlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji, özellikle geri dönüşüm sektöründe faaliyet gösteren metal hurda işletmeleri için kritik bir araç haline gelmiş, firmaların malzeme türlerini ve alaşım bileşimlerini saniyeler içerisinde hızlı ve doğru bir şekilde ayırt etmelerini mümkün kılmıştır. Üstelik tahribatsız bir analiz yöntemi olması, cihazların kullanımını çok daha pratik ve verimli hale getirmiştir. (Repamet, 2024)



Şekil 8.7. El tipi Bruker XRF S1 TITAN 600 cihazı.

Kaynak: (Repamet, 2024)

Bu çalışmada El tipi Bruker XRF S1 TITAN 600 cihazı kullanılarak alüminyum çeşitlerinin elementel analizi yapılmıştır.

9.DENEYSEL YÖNTEMLER VE SONUÇLAR

9.1.Deneysel Yöntemler

Bu çalışmada dövme alüminyum alaşımlarından Al-Mg içerikli 5754, Al-Mg-Si içerikli 6061 ve Al-Zn-Mg içerikli 7075 alüminyum türleri kullanılarak farklı flor değerlerinde fosfat ön işlem kaplama ve üzerine kataforez kaplama uygulaması yapılmıştır. Aynı alüminyum alaşımları kullanılarak farklı üç tür nano ön işlem kaplanmış ve üzerine kataforez uygulaması yapılmıştır.

Farklı flor değerleri kullanılarak fosfat ön işlem kaplama yapılırken, fosfat ve aktivasyon süresi sabit tutulmuştur. Farklı alüminyum türleri için yapılan deneysel çalışmalar Tablo 9.1’de verilmiştir. Alüminyum plakalar üzerine yapılan fosfat ön işlem çalışmasında kullanılan flor miktarları ve kaplama süresi Tablo 9.2’de, yine plakalar üzerinde yapılan nano ön işlem çalışmasında kullanılan Zirkonyum, Krom ve Oxilan bazlı Nano çeşitleri (nZr, nCr, nOx) ve süreler Tablo 9.3’te verilmiştir.

Tablo 9.1. Farklı alüminyum türleri için yapılan deneysel çalışmalar.

Alüminyum Türü	Kaplama Çeşidi	İçerik	Kaplama Şekli
AL5057	Fosfat	500 ppm Flor değeri	Kataforez
		700 ppm Flor değeri	
		900 ppm Flor değeri	
	Nano	nZr	
		nCr	
		nOx	
AL6061	Fosfat	500 ppm Flor değeri	Kataforez
		700 ppm Flor değeri	
		900 ppm Flor değeri	
	Nano	nZr	
		nCr	
		nOx	
AL7075	Fosfat	500 ppm Flor değeri	Kataforez
		700 ppm Flor değeri	
		900 ppm Flor değeri	
	Nano	nZr	
		nCr	
		nOx	

Tablo 9.2. Farklı tipteki alüminyum plalar üzerinde yapılan fosfat ön işlem çalışmasında kullanılan flor miktarı ve süreler.

Alüminyum Tipi	Çalışma Seviyesi	Flor Miktarı (ppm)	Fosfat Kaplama Süresi (dk)	Aktivasyon Süresi (sn)	Kataforez Kaplama Süresi (dk)
AL5057	1	500	10	75	3
	2	700	10	75	3
	3	900	10	75	3
AL6061	1	500	10	75	3
	2	700	10	75	3
	3	900	10	75	3
AL7075	1	500	10	75	3
	2	700	10	75	3
	3	900	10	75	3

Tablo 9.3. Farklı tipteki alüminyum plakalar üzerinde yapılan nano ön işlem çalışmasında kullanılan nano çeşitleri ve süreler.

Alüminyum Tipi	Çalışma Seviyesi	Nano Çeşidi	Nano Kaplama Süresi (sn)	Aşındırma Süresi (dk)	Kataforez Kaplama Süresi (dk)
AL5057	4	nZr	120		
	5	nCr	100	5.5	3
	6	nOx	150		
AL6061	4	nZr	120		
	5	nCr	100	5.5	3
	6	nOx	150		
AL7075	4	nZr	120		
	5	nCr	100	5.5	3
	6	nOx	150		

9.1.1. Fosfat Banyo Parametreleri

Farklı alüminyum plakalar üzerine uygulanan kataforez kaplamalar öncesinde yapılacak olan fosfat kaplama ön işleminde fosfat banyosunun çalışma parametreleri Tablo 9.4.'te verilmiştir. Fosfat kaplama sırasında ölçülen deneysel değerlerin teorik değerler aralığında olduğu görülmektedir.

Tablo 9.4. Fosfat kaplama deneysel ve teorik çalışma parametreleri.

Proses	Parametre	Teorik Değer	Deneysel Değer
Sıcak Yağ Alma	Sıcaklık °C	50-80	65
	Konsantrasyon (gr/L)	%4- %6	%5
Aktivasyon	pH	8,5-10	9
Aktivasyon	Süre (sn)	30-90	60
Fosfat	Toplam Asit (mL)	17-25	21
Fosfat	Serbest Asit (mL)	1,2-2	1,5
Fosfat	Hızlandırıcı (mL)	1,5-3	2,2
			500
Fosfat	Toplam Flor (ppm)	500-900	700
			900
Fosfat	Serbest Flor (ppm)	50-150	75
Fosfat	Nikel (gr/L)	0,6-1,1	0,85
Fosfat	Çinko (gr/L)	0,6-1,2	1,0
Fosfat	Mangan (gr/L)	0,2-0,5	0,4
Fosfat	Demir (ppm)	max 20	0
Pasivasyon	Titrasyon Noktası (mL)	1,7-6.9	4,5
Pasivasyon	İletkenlik (µS)	max 900	500

Fosfat Kaplama

9.1.2. Nano Ön İşlem Banyo Parametreleri

Farklı alüminyum plakalar üzerine üç farklı tür nano ön işlem kullanılarak kataforez kaplanmıştır. Nano banyolarının çalışma parametreleri Tablo 9.5'te verilmiştir. Nano kaplama sırasında ölçülen deneysel değerlerin teorik değerler aralığında olduğu görülmektedir.

Tablo 9.5. Nano kaplama deneysel ve teorik çalışma parametreleri.

Proses	Parametre	Teorik Değer	Deneysel Değer
Sıcak Yağ Alma	Sıcaklık °C	50-80	65
	Konsantrasyon (gr/L)	%4- %6	%5
	Süre (dk)	5-15	10
Aşındırma	Toplam Asit (gr/L)	8-10	9
	Süre (dk)	1-10	5,5
nZr	Konsantrasyon (gr/L)	7-35	25
	pH	4,5-5,5	4,9
	Sıcaklık (°C)	45-65	50
	Süre (sn)	30-240	120
nCr	Toplam Asit (mL)	3,5-8	5,5
	Krom (gr/L)	15-50	30
	pH	4-4,5	4,2
	Sıcaklık (°C)	20-35	25
	Süre (sn)	20-120	100
nOx	Toplam Asit (mL)	3,5-5	4,25
	pH	4,6-5,2	5
	Sıcaklık (°C)	20-40	25
	Süre (sn)	30-240	150

9.1.3. Kataforez Kaplama Banyo Çalışma Parametreleri

Fosfat kaplamalı ve nano kaplamalı alüminyum plakaların üzerine uygulanan kataforez kaplamanın çalışma parametreleri Tablo 9.6.'da verilmiştir. Çalışmada deneysel değerlerin teorik değer aralığında olduğu görülmektedir.

Tablo 9.6. Kataforez kaplama proses parametre değerleri.

Proses	Parametre	Teorik Değer	Deneysel Değer
Kataforez	Süre (dk)	3-5	3,05
	Sıcaklık (°C)	30-33	32
	Katı miktarı (%)	14-16	15,2
	p/B oranı	0,12-0,16	0,14
	pH	5-5,8	5,4
	İletkenlik (µS)	1000-1600	1200
Ultrafiltrasyon	Süre (dk)	1-10	1
	pH	5,4-5,8	5,7
	İletkenlik (µS)	500-1500	750
	Süre (sn)	min 10	20
Deiyonize Su	pH	5,5-7,5	7
	İletkenlik (µS)	10-250	90
Anolit	İletkenlik (µS)	1500-3000	2400
Kürlenme	Sıcaklık (°C)	155±20	165
	Süre (sn)	min 20	20

9.2.Deneysel Sonuçlar

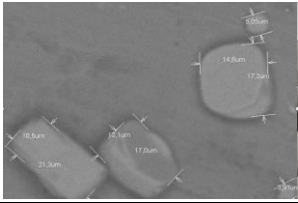
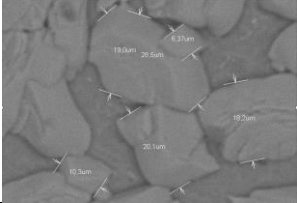
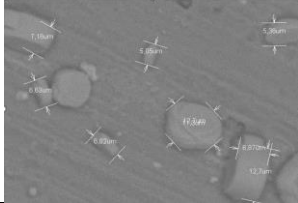
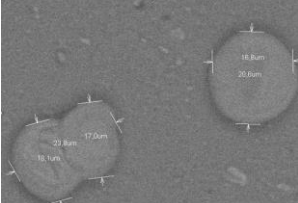
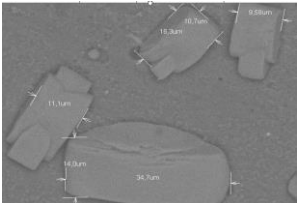
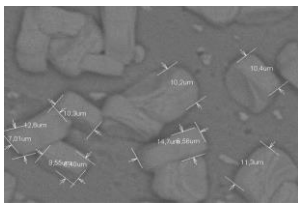
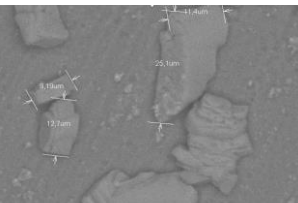
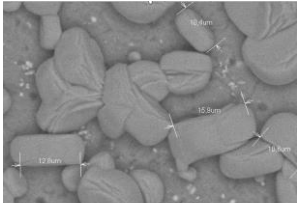
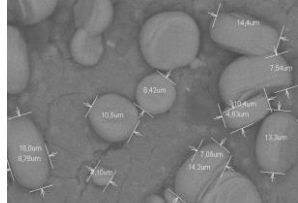
9.2.1.SEM Cihazı İle Fosfat Kristal Görüntüleri

Fosfat kaplama sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM cihazı) ile 3000x'de incelenen AL5754, AL6061 ve AL7075 tipi alaşımlı alüminyum yüzeyler üzerindeki fosfat kristal görüntüleri Tablo 9.7'de gösterilmiştir.

Aşağıdaki tablodan da anlaşıldığı gibi 500 ppm flor değerinde çalışan alüminyum plakalarda fosfat kristallerinin yapısına bakıldığında dağınık bir yapı olduğu ve uygun kristal taneciklerinin oluşmadığı gözlenmiştir. 700 ppm flor değeri için AL5754 ve AL7075 alaşımlı

plakalarda kristallerin yoğunluğunun ve homojenliğinin uygun, AL6061’de ise uygun olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Üçüncü çalışma olan 900ppm flor değerinde AL6061 ve AL7075’in uygun kristal yapısına sahip olduğu fakat AL5754’ün kristal homojenliğinin ve yoğunluğunun yeterli olmadığı gözlenmiştir.

Tablo 9.7. Farklı alaşımlardaki alüminyum plakalara uygulanan farklı flor değerlerinin fosfat kaplama sonrası SEM görüntüleri.

Alüminyum Türü	Çalışma 1	Çalışma 2	Çalışma 3
	Flor Değeri		
	500 ppm	700 ppm	900 ppm
AL5754			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN	UYGUN DEĞİL
AL6061			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN DEĞİL	UYGUN
AL7075			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN	UYGUN

9.2.2. Ham Ve Nano Kaplanmış Alüminyum Plakların XRF Sonuçları

Aşağıdaki tablolarda AL5754 (Şekil 9.1), AL6061 (Şekil 9.2) ve AL7075 (Şekil 9.3) tipi alüminyum alaşımlarına ait ham ve kaplanmış plakaların XRF ölçümleri verilmiştir.

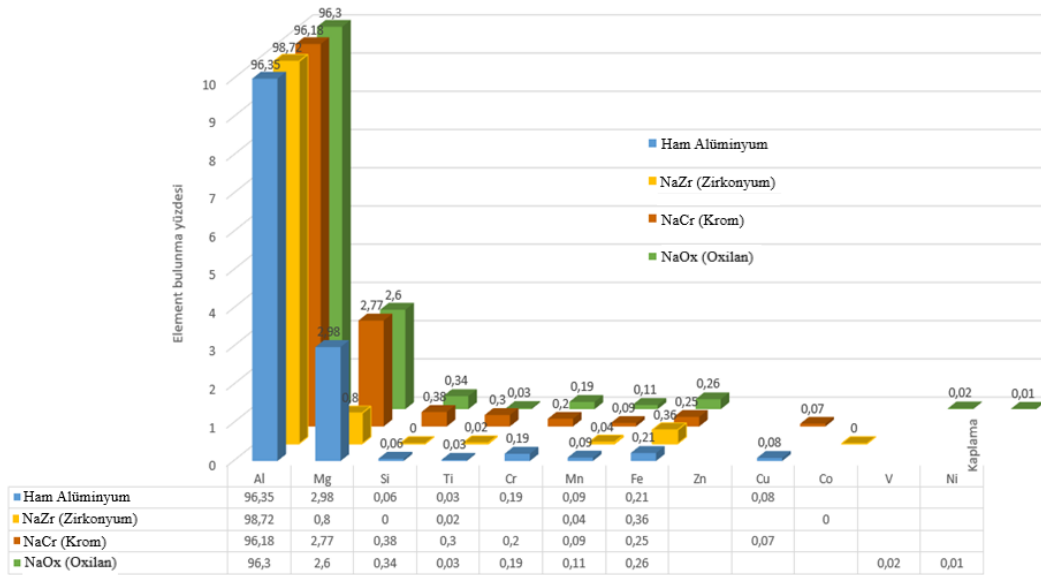
Magnezyum oranı üç alaşımda da önemli bir bileşendir. AL7075 alaşımının yapısı %3’lük magnezyum yüzdesi ile en yüksek magnezyum içeriğine sahiptir. Daha sonra %2,98’lik bir oranla AL5754 gelir. En az magnezyum yüzdesinin ise %0,58’lik bir yüzde ile AL6061 alüminyum alaşımı olduğu görülmektedir. Alüminyum malzeme içerisindeki magnezyum elementinin miktarındaki artış, fosfat kristal oluşumunu engellemektedir.

Silisyum oranı AL6061'de belirgin (0,67%) ve AL7075'te düşüktür (0,12%). AL5754'te ise Si oranı neredeyse yok denecek kadar azdır. Silisyum, alaşımanın döküm özelliklerini iyileştiren bir elementtir. Ancak alüminyum malzeme içeriğindeki silisyum artışı ile fosfatlanabilirlik düşmektedir.

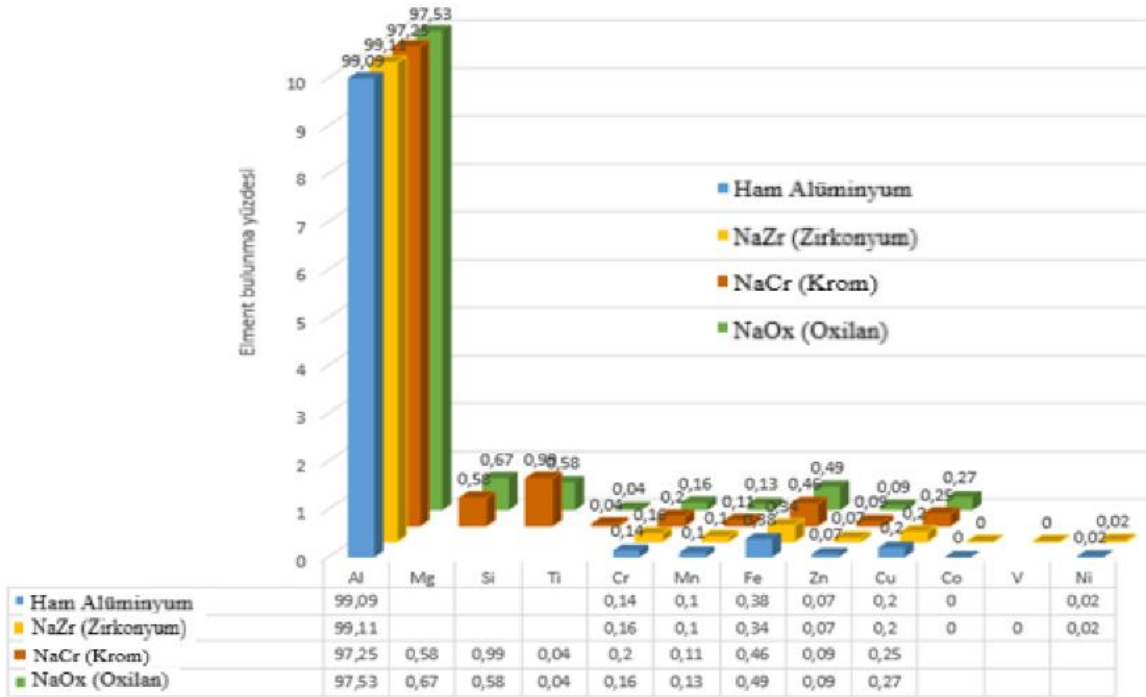
Çinko oranı AL7075'te (%6,36-9,57) çok yüksekken, diğer alaşımlarda (AL5754 ve AL6061) yok denecek kadar azdır. Havacılık ve savunma sanayinde kullanılan AL7075 alüminyum alaşımı yapısında bulundurduğu yüksek çinko yüzdesi ile yüksek dayanım kazanmaktadır.

Bakır elementi dayanım artırıcı bir element olmasının yanı sıra alaşımlara daha iyi mekanik özellikler kazandırmak için de kullanılır. AL7075 alaşımında bulunan bakır oranı (%1,92-3,15), neredeyse bünyesinde bakır bulundurmeyen AL5754 ve AL6061'e göre oldukça yüksektir.

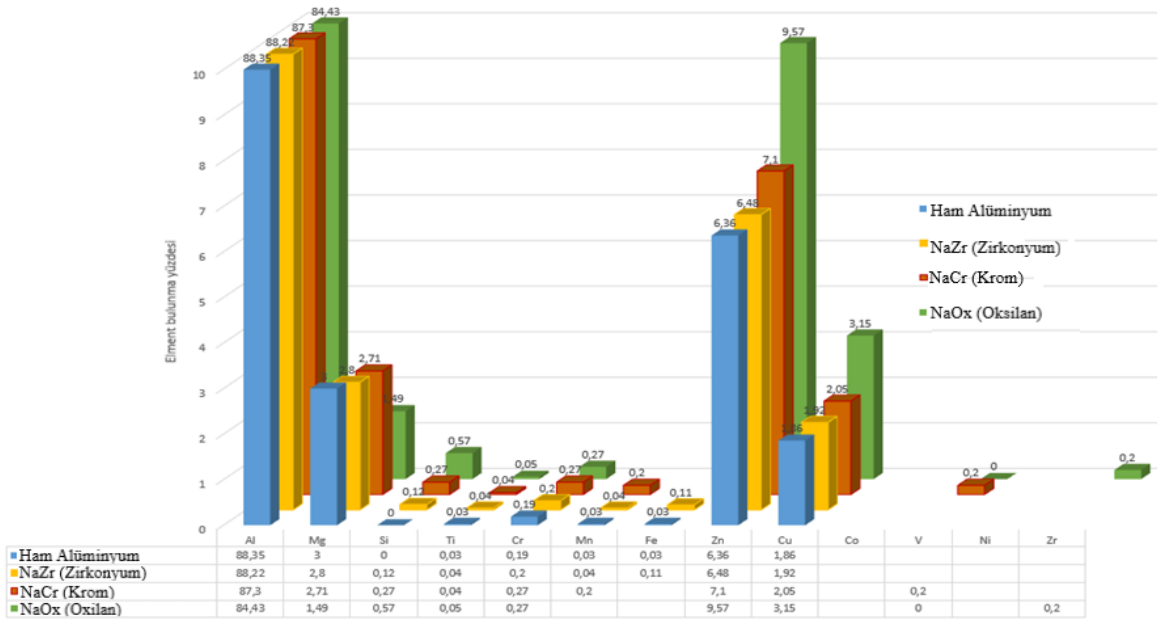
Fe oranı her üç alaşımda da düşüktür, ancak AL7075'te biraz daha yüksektir (%0,19). Bu, istenmeyen bir safsızlık olarak yorumlanabilir. Ayrıca tüm alaşımlarda Ti ve Cr miktarları oldukça düşüktür. Alüminyum malzeme içeriğindeki çinko, bakır, demir, titanyum ve krom oranları ile istenen malzeme özellikleri sağlanılırken, kaplama öncesi uygulanan fosfatlanabilirlik açısından sorun oluşturmamaktadır.



Şekil 9.1. Alüminyum 5754 alaşımasının XRF ölçümleri.



Şekil 9.2. Alüminyum 6061 alaşımının XRF ölçümleri.



Şekil 9.3. Alüminyum 7075 alaşımının XRF ölçümleri.

9.2.3.Kuru Yapışma Testi Sonuçları

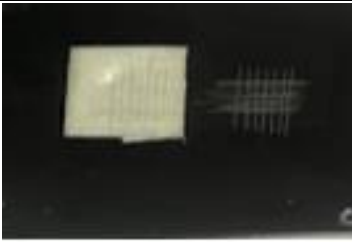

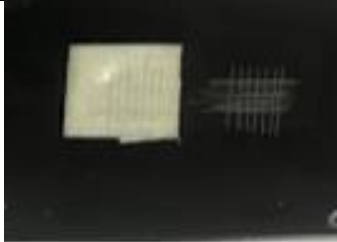
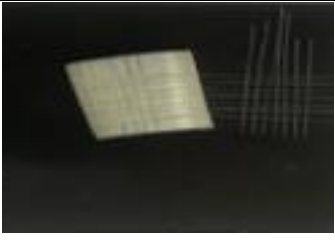


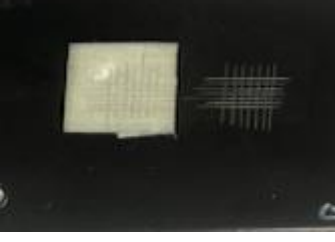


Fosfat ön işlem üzerine kataforez kaplanmış ve nano ön işlem üzerine kataforez kaplanmış farklı tip alüminyum alaşım plakalara uygulanan yapışma testi sonrası bant çekme işlemi yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki tablolarda (Tablo 9.8, Tablo 9.9) verilmiştir.

Kuru yapışma test sonuçları, ISO2409 değerlendirme kriterinde Gt1 derecesine göre değerlendirilmiştir.

500 ppm flor değerinde yapılan çalışmada tüm alüminyum alaşımları kuru yapışma testleri sonrası çekilen bant işlemi sonucunda uygunsuz olarak sonuçlanmıştır. 700 ppm flor değerinde yapılan çalışmalarda AL5754 ve AL7075 tipi alüminyum alaşımı uygun sonuçlanmış, AL6061 tipi ise uygun sonuçlanmamıştır. 900 ppm flor değerinde yapılan çalışmalarda ise yalnızca AL5754 ve AL7075 tipi alaşımlar uygunsuz sonuçlanırken, AL6061 tipi alüminyum uygun sonuçlanmıştır.





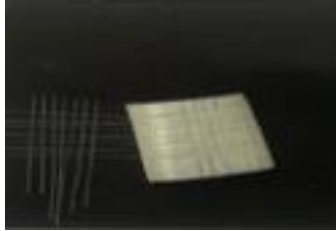
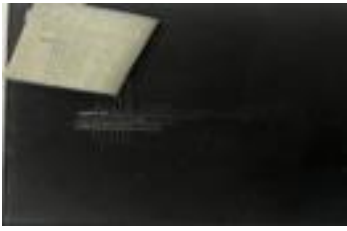
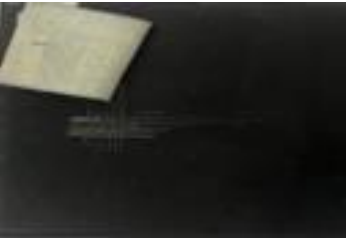


Yapışma testinden uygun sonuç alamayan plakalara CASS Testi ve Çevrim Testi uygulanmamıştır.

Tablo 9.8. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında kuru yapışma test sonuçları.

Fosfat Kaplama			
	Çalışma 1 Flor 500 ppm	Çalışma 2 Flor 700 ppm	Çalışma 3 Flor 900 ppm
AL5754			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN	UYGUN DEĞİL
AL6061			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN DEĞİL	UYGUN
AL7075			
	UYGUN DEĞİL	UYGUN	UYGUN DEĞİL

Farklı çeşit nanolar ile kataforez kaplanan alüminyum parçaların tümü kuru yapışma testini geçmiştir. Testi geçen bu parçalara ayrıca CASS Testi ve Çevrim Testi uygulanmıştır.

Tablo 9.9. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında kuru yapışma test sonuçları.

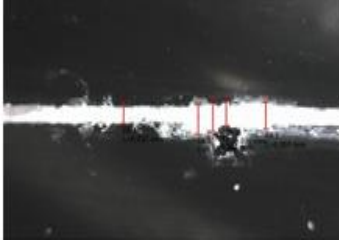
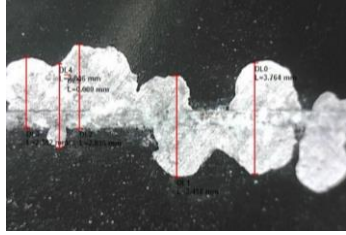
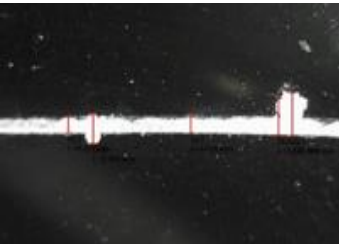
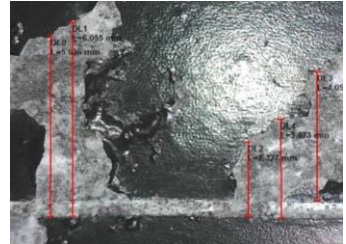
Nano Kaplama			
	Çalışma 3 nZr	Çalışma 4 nCr	Çalışma 5 nOx
AL5754			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN
AL6061			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN
AL7075			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN

9.2.4.CASS Testi Sonuçları

Kuru yapışma testinden geçemeyen denemelere CASS testi uygulanmamıştır. Farklı flor ppm değerleriyle kataforez kaplanan 3 tip alüminyum alaşımının test sonuçlarında, 700 ppm flor değeri içeren kaplama çeşidi için AL5754 ve AL7075 alaşımları testi geçerken, AL6061 alaşımı testi geçememiştir. 900 ppm flor değeri içeren kaplama çeşidi için AL6061 ve AL7075

alaşımlarının CASS testi sonuçlarının uygun olmadığı gözlemlenirken, AL5754'ün uygun olduğu test edilmiştir.



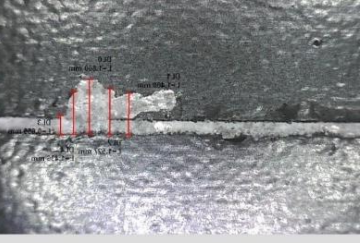

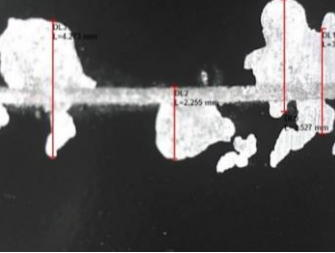

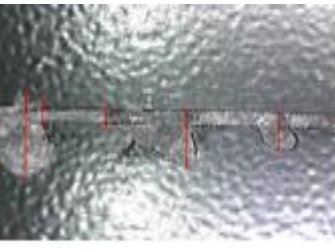
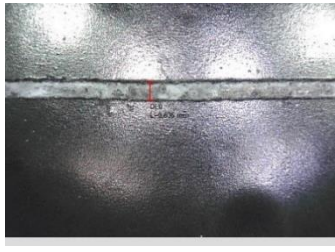

Tablo 9.10. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında CASS testi sonuçları.

		Fosfat Kaplama		
		Çalışma 1 Flor 500 ppm	Çalışma 2 Flor 700 ppm	Çalışma 3 Flor 900 ppm
AL5754	Kuru yapışma testinden kaldığı için CASS testi uygulanmamıştır.			Kuru yapışma testinden kaldığı için CASS testi uygulanmamıştır.
	TEST UYGULANMADI	UYGUN		TEST UYGULANMADI
AL6061	Kuru yapışma testinden kaldığı için CASS testi uygulanmamıştır.		Kuru yapışma testinden kaldığı için CASS testi uygulanmamıştır.	
	TEST UYGULANMADI	TEST UYGULANMADI		UYGUN DEĞİL
AL7075	Kuru yapışma testinden kaldığı için CASS testi uygulanmamıştır.			
	TEST UYGULANMADI	UYGUN		UYGUN DEĞİL

Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında yapılan CASS testleri sonuçları Tablo 9.10'da görüldüğü gibi, AL6061 alaşımı nCr nano kaplaması testi geçmemiş, diğer tüm alüminyum alaşımları ve nano türleri CASS testini uygun olarak tamamlamıştır. CASS testi sonrası optik mikroskop ile korozif ilerlemeler incelenmiştir. Test standardına göre 2 mm'den daha büyük olan ilerlemeler testten kalmıştır. 2 mm altında ilerleme olan numuneler testten geçirilmiştir.

AL6061'in 900 ppm flor değerindeki ilerleme büyüklükleri 2,382 mm, 2,835 mm, 3,418 mm ve 3,764 mm olduğu için testten kalırken, aynı flor değerindeki AL7075 ise 6,055 mm, 5,636 mm, 3,073 mm gibi ilerleme büyüklükleri sebebiyle testten kalmıştır.

Tablo 9.11. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında CASS testi sonuçları.


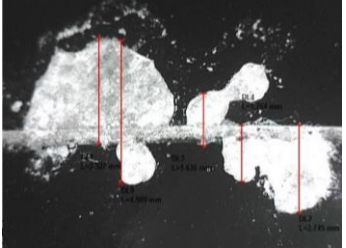
Nano Kaplama			
	Çalışma 3 nZr	Çalışma 4 nCr	Çalışma 5 nOx
AL5754			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN
AL6061			
	UYGUN	UYGUN DEĞİL	UYGUN
AL7075			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN

AL6061 plaka üzerinde uygulanan nCr nano kaplama üzeri kataforez kaplama sonrası CASS testi sonucunda 4,273 mm, 2,255 mm, 3,527 mm ilerleme seviyelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilerleme seviyeleri testi geçme şartı olan 2 mm'lik ilerlemeden fazla olduğu için CASS testi olumsuz sonuçlanmıştır.


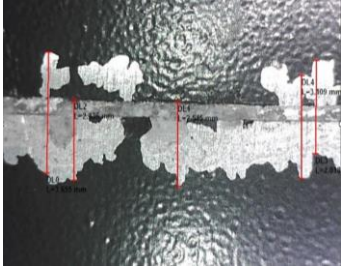
9.2.5.Çevrim Testi Sonuçları

Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçları Tablo 9.12’te verilmiştir. Buna göre AL5754 ve AL7075 alaşımları 700 ppm flor değerinde yapılan fosfat kaplamanın ardından kataforez uygulanmış plakaların çevrim testini geçtiği görülmüştür. Fakat AL6061 ve Al7075 alaşımlarının 900 ppm flor değerinde yapılan çalışmadaki çevrim testini geçemediği görülmüştür. CASS testinde olduğu gibi çevrim testi sonrası ilerlemeler optik görüntüler ile incelenmiştir. Yine benzer 2 mm’yi geçen ilerlemeler testen bırakılmıştır.

Tablo 9.12. Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçları.

		Fosfat Kaplama		
		Çalışma 1 Flor 500 ppm	Çalışma 2 Flor 700 ppm	Çalışma 3 Flor 900 ppm
AL5754	Kuru yapışma testinden kaldığı için çevrim testi uygulanmamıştır.		Kuru yapışma testinden kaldığı için çevrim testi uygulanmamıştır.	
	TEST UYGULANMADI	UYGUN	TEST UYGULANMADI	
AL6061	Kuru yapışma testinden kaldığı için çevrim testi uygulanmamıştır.	Kuru yapışma testinden kaldığı için çevrim testi uygulanmamıştır.		
	TEST UYGULANMADI	TEST UYGULANMADI	UYGUN DEĞİL	


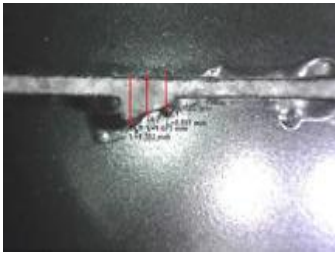

Tablo 9.12 Devamı

AL7075	Kuru yapışma testinden kaldığı için çevrim testi uygulanmamıştır.		
		TEST UYGULANMADI	UYGUN


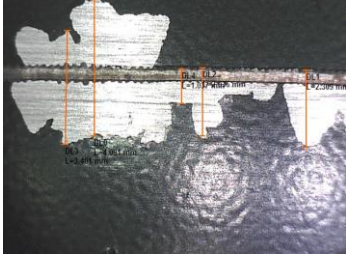



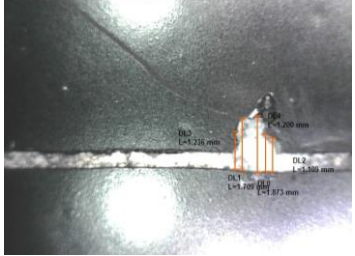
AL6061 ve AL7075 fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçlarının ilerleme seviyeleri sırasıyla 3,327 mm, 2,745 mm, 4,509 mm ve 2,545 mm, 2,436 mm, 3,655 mm, 3,109 mm olduğu için 2 mm'lik maksimum ilerleme şartını aştığı ve testten kaldığı gözlemlenmiştir.

Aşağıdaki tabloda farklı alüminyum alaşımlarına nano kaplanarak son kat kataforez işlemi uygulanmış plakaların çevrim testi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre Çalışma 3 ve Çalışma 5'te bulunan tüm alaşım tipleri testi geçerken, Çalışma 4'te AL5754 ve AL7075 çevrim testini geçmiş fakat AL6061 alaşımının çevrim testini geçemediği görülmüştür.

Tablo 9.13. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçları.

Nano Kaplama			
	Çalışma 3 nZr	Çalışma 4 nCr	Çalışma 5 nOx
AL5754			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN

Tablo 9.13 Devamı

AL6061			
	UYGUN	UYGUN DEĞİL	UYGUN
AL7075			
	UYGUN	UYGUN	UYGUN

AL6061 plaka üzerinde uygulanan nCr nano kaplama üzeri kataforez kaplama sonrası çevrim testi sonucunda 3,401 mm, 4,091 mm, 2,309 mm ilerleme seviyelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilerleme seviyeleri testi geçme şartı olan 2 mm'lik ilerlemeden fazla olduğu için çevrim testi olumsuz sonuçlanmıştır.

10.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AL5754, AL6061 ve AL7075 tipi alüminyum alaşımlı plakalar üzerine üç farklı flor değerinde fosfat ön işlemi uygulanarak kataforez kaplanmıştır. Bu üç farklı tip alüminyum alaşımlı plakalar üzerine üç farklı nano ön işlem uygulanarak üzerine kataforez kaplanmıştır. Toplamda 18 adet farklı deneme yapılmıştır.

Bu çalışmada fosfat ön işlem kaplanan alüminyum plakaların yüzeyleri SEM cihazı ile incelendiğinde alüminyum alaşımlarına fosfat kristallerinin yeterli boyutlarda ve yoğunlukta oluşum göstermediği gözlenmiştir. 500 ppm flor değeri incelendiğinde fosfat kristallerin yok denecek boyutta olduğu, 700 ppm değerinde ise kristal taneciklerin oluşmaya başladığı, 900 ppm’de de taneciklerin bozunduğu gözlemlenmiştir.

Tüm çalışmalara yapışma testi uygulandığında farklı flor değerlerinde fosfat ön işlem kaplanan kataforez kaplamalı plakaların yapışma testinde 700 ppm flor değerinde yapılan çalışmalarda AL5754 ve AL7075 tipi alüminyum alaşımı uygun sonuçlanmış, AL6061 tipi ise uygun sonuçlanmamıştır. 900 ppm flor değerinde yapılan çalışmalarda ise yalnızca AL5754 ve AL7075 tipi alaşımlar uygunsuz sonuçlanırken, AL6061 tipi alüminyum uygun sonuçlanmıştır. Farklı çeşit nanolar ile kataforez kaplanan alüminyum parçaların tümü kuru yapışma testini geçmiştir. Testi geçen parçalara CASS ve çevrim testi uygulanmıştır.

Yapılan CASS testi sonucunda 700 ppm flor değeri içeren kaplama çeşidi için AL5754 ve AL7075 alaşımları testi geçerken, AL6061 alaşımı testi geçememiştir. 900 ppm flor değeri içeren kaplama çeşidi için AL6061 ve AL7075 alaşımlarının CASS testi sonuçlarının uygun olmadığı gözlenmiştir. Nano kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında yapılan CASS testleri sonuçlarına göre AL6061 alaşımı nCr nano kaplaması testi geçmemiş, diğer tüm alüminyum alaşımları ve nano ön işlemleri CASS testini uygun olarak tamamlamıştır.

Fosfat kaplanan alüminyum plakaların kataforez kaplama sonrasında çevrim testi sonuçlarına göre AL5754 ve AL7075 alaşımları 700 ppm flor değerinde yapılan fosfat kaplamanın ardından kataforez uygulanmış plakaların çevrim testini geçtiği görülmüştür. Fakat AL6061 ve AL7075 alaşımlarının 900 ppm flor değerinde yapılan çalışmadaki çevrim testini geçemediği görülmüştür.

Farklı alüminyum alaşımlarına nano ön işlemi sonrası kataforez işlemi uygulanmış plakaların çevrim testi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre Çalışma 3 ve Çalışma 5’te

bulunan tüm alaşım tipleri testi geçerken, Çalışma 4'te AL5754 ve AL7075 çevrim testini geçmiş fakat AL6061 alaşımının çevrim testini geçemediği görülmüştür.

Bu çalışmada farklı tip alüminyum alaşımlarına iki farklı ön işlem yapılarak bu ön işlemlerin kataforez kaplama sonucundaki performansları değerlendirilmiştir. Buna göre fosfat ön işlem yapılan alüminyum plakalar üzerinde büyük oranda fosfat kristallerinin beklenen performansta oluşmadığı gözlenmiştir, bunun sonucunda yapışma testlerinin de uygun olmadığı görülmüştür. Yapışma testi uygun olmayan bu fosfat ön işlem çalışması için CASS testi ve çevrim testleri devam ettirilmemiştir, az da olsa oluşan fosfat kristalleri sonucunda yapışma testi uygun çıkan alüminyum plakaların da devam ettirilen çalışmalardaki CASS testi ve çevrim testi sonuçlarının uygun olmadığı görülmüştür.

Nano ön işlem yapılan alüminyum plakalar üzerine yapışma testleri uygulandığında tamamının yapışma testinden uygun sonuç aldığı görülmüştür. Yapışma testi uygun olan bu nano ön işlem görmüş alüminyum plakalara sırasıyla CASS testi ve çevrim testi uygulanmıştır. CASS testi sonuçlarına göre yalnızca AL6061 alaşımının “nCr” nano ile ön işlem gördükten sonra kataforez kaplandığı plakanın geçer sonuç alamadığı görülmüştür.

Yaptığımız gözlemler sonucunda, nano ön işlem görmüş alüminyum alaşımlarının, fosfat ön işlem görmüş alüminyum alaşımlarına kıyasla daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.

Ayrıca fosfat ön işlem banyolarının içerdiği kanserojen maddeler nedeniyle otomotiv sektörü de dahil olmak üzere gelecek dönemde uygulanacak yönetmeliklerle kullanımı tamamen durdurulması gündemdedir. Bununla birlikte nano ön işlem banyolarının aksine fosfat ön işlem banyolarında fosfat çamuru oluşarak ekstra iş yükü ve zaman kaybına sebep olmaktadır. Oluşan fosfat çamurunun temizlenmesi ve çevreye zarar vermemesi için depolanması hem yüksek enerji hem de zaman kaybına neden olmaktadır. Nano ön işlem banyolarında bu gibi problemler olmadığı ve performans değerlerine bakıldığında fosfat ön işlem banyolarından daha iyi sonuçlar verdiği için güçlü bir alternatif olmaktadır. Ayrıca bu tür ön işlemlerin farklı kaplama teknikleri öncesinde uygulanması kaplamalara ek özellikler kazandırabilir. Bu tür etmenler değerlendirildiğinde bu tür ön işlemler hem endüstriyel ortamda kullanılabilir hem de akademik anlamda farklı çalışmalara ışık tutacaktır.

KAYNAKÇA

- Ağaçdelen, Z. (2021).** Motor Parçalarında Nano Kaplamalar ve Yüzey Aşınmalarına Etkileri. İstanbul. (Yüksek Lisans Tezi)
- Andrew J. Batchelor, & M. Chandrasekaran. (1999).** Materials Degradation and Its Control by Surface Engineering. In Materials Degradation and Its Control by Surface Engineering. Singapore: World Scientific Yayıncılık.
- Avcı, G. G. (2009).** *İşlevsel Nano Kaplamalar*. Bilim Teknik Dergisi İSTANBUL.
- Beck, F. (1976).** Process in Organic Coatings,4 (Makale) 1-60 0 Elsevier Sequoia S-A., Lausanne-Printed in the Netherlands Fundamental Aspects Of Electrodeposition Of Paint.
- Beckman, W. V., S. W. , P. W. (1997).** Handbook of Cathodic Corrosion Protection,. USA: Gulf Professional Publishing.
- BMS Mühendislik. (2024, December 21).** Katodik Koruma Ölçümü. Retrieved 10 December 2024, from <https://bmsmuhendislik.com/katodik-koruma-olcumu/> (Makale)
- Bünyamin Eren. (2020).** Döküm Malzemelerin Performans Dayanımını Artırmaya Yönelik Kaplama Araştırması. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı. (Yüksek Lisans Tezi)
- Christian Vargel. (2020).** Corrosion of Aluminium - Christian Vargel. In Google Books (İkinci Baskı). Amsterdam: Elsevier. (El Kitabı)
- Davis, J. R. (2000).** Corrosion: Understanding the Basics (İlk Baskı; Joseph R. Davis, Ed.). Materials Park, OH: ASM International. (El Kitabı)
- DIN Deutsches Institut für Normung (DIN). (2011).** DIN 50 021 – Salt Spray (Corrosion) Testing. Berlin, Germany. (Standart Doküman)
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 2409: Paints and varnishes - Cross-cut test. , Pub. L. No. DIN EN ISO 2409, Beuth Verlag GmbH (2007).** Almanya.
- Doğan. (2023, February).** 6xxx Serisi Alüminyum Dövme Alaşımlarının Yaşlanma Parametrelerinin Korozyon Davranışına Etkisi | Avesis. (Yüksek Lisans Tezi)
- Emre Özdemir. (2019).** Korozyon İnhibitörü Olarak Kullanılan Bazı N-Süstitüe Amino Asitlerin Kuantum Mekaniksel Olarak İncelenmesi. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. (Yüksek Lisans Tezi)

- Esma Yeliz Kaya.** (2023). Grafen Oksit/Polietersülfon Nanokompozit Kaplamanın Korozyon Direnci Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. (Yüksek Lisans Tezi)
- Exapro.** (2024, December 21). Hitachi TM1000- Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM). (Web Sitesi)
- Gökhan Tımaç.** (2006). Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İSTANBUL. (Yüksek Lisans Tezi)
- Hakan Yıldırım.** (2006). Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/c22119e2-2c57-4645-922a-89010accb04e/download>
- Hatch John.** (1984). Aluminum : Properties and Physical Metallurgy - ASM International Aluminum : Properties and Physical Metallurgy - ASM International Publisher : Aluminum Association Inc . and ASM International. 424. (Kitap)
- Hayder Isam Abdulzahra Al-Saadi, & Recai Fatih Tunay.** (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. Journal of Engineering Sciences and Design, 5(3), 515–527.
- I. Sugaya and S. Kondo.** (1963). -. J. Japanese Soc. Colour. Mater, 36(283). (Akademik Makale)
- İbrahim Ök.** (2021). Bursa Teknik Üniversitesi ❖ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Şubat 2021 5xxx Alüminyum Alaşımları Üzerine Uygulanacak Fosfatlama İşlemi Ve Organik Kaplamalar İle Cass Testi Ve Çevrimsel Korozyon Direncini Artıran Proses Geliştirilmesi. Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa. (Yüksek Lisans Tezi)
- Kakani, & S.L. ve Kakani.** (2004). Material Science (S.L. ve Kakani, Ed.). (Kitap)
- Karabacak, N., & Karakaya, A.** (2023). Using solar energy in galvanic anode cathodic protection systems. International Journal of Energy Applications and Technologies, 10(1), 6–13. <https://doi.org/10.31593/ijeat.1245454>
- Karkimya.** (2024, December 21). Cross-Cut (Çapraz Kesme) Testi- CC3000. (Web Sitesi)
- Kılınç, M., & Akyalçın, L.** (2022). *Kataforez Kaplamalı Çelik Yüzeylere Uygulanan Dupleks Kaplamanın Korozyon Dayanım Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 68–78. <https://doi.org/10.31796/OGUMMF.981120>

- Kübra TOPALOĞLU.** (2023). Akrilik ve Toz Boyalı Saclarda Polipirrolün Korozyondan Koruma Etkisi. Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Çorum.
- Lawrance, J. D.** (1963). Electroplating Engineering El Kitabı (4th ed.). New York .
- M. Yılmaz.** (2003). Alüminyum Sektöründe Yeni Kullanım Alanları. II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi. Seydişehir.
- Michael Murphy.** (2005). Metal Finishing: Organic Finishing Guidebook and Directory. New York, NY: Elsevier Science Inc.
- M.Satake, & T. Nagahiro.** (1990). Modern dictionary: Physical chemistry. New Delhi: Discovery Yayınevi.
- Narayanan, T. S. N. S.** (2022). Phosphate Conversion Coatings. Conversion Coatings for Magnesium and Its Alloys, 73–112. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89976-9_4 (Kitap)
- Nazife Özer.** (2021). Yapı Malzemelerinde Korozyon ve Korozyondan Korunma Yöntemleri. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 1159–1178. <https://doi.org/10.17482/uumfd.796947> (Akademik Makale)
- Nedret Tuna.** (2013). Çinko ve Nikel Kaplanmış Düşük Karbonlu Çelik Plaka ve Vidaların Korozyon Davranışının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. (Yüksek Lisans Tezi)
- P. K. Mallick.** (2020). Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition). Cambridge, UK: Woodhead Yayınevi (Elsevier). <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02071-5>
- R. Kojima, K. N. and Y. U.** (1982). Phosphate Coating. J. Japanese Soc. Colour. Mater., 55(365). (Akademik Makale)
- RENAULT, 47-01-000/--E.** (2015). Protection Against Ambient Corrosive Attack of Metal Parts and Assemblies Fitted Together on The Vehicle on Assembly. (Standart)
- Repamet.** (2024). XRF Cihazı ve Çalışma Prensibi. (Web sitesi)
- Song, G. L.** (2011). A dipping E-coating for Mg alloys. Progress in Organic Coatings, 70(4), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.09.028> (Akademik Makale)
- TALSAD (Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği).** (2022). Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum: 2022 Yılı Raporu (Özet). In TALSAD. İstanbul.
- Tolga Özçanak.** (2008). Katarforez Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlama, Kurutma ve Kaplama Proseslerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)

- Topal, E.** (2016). Alüminyum İçin Korozyon İnhibitörü Olarak Kullanılan Bazı Proton Pump İnhibitörlerinin Kuantum Kimyasal Olarak İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
- Tufan Yıldız.** (2011, December). *Metalurji Malzeme ve Seramik Mühendisliği Öğrenci Dergisi*. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, *Cilt 9, Sayı 9, 19–23*.
- Ünal, N.** (1987). Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemleri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya – Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Usta, İ., Yılmaz, O., Gül, M., Can, A., & Gül, H.** (2024). Effect of Adhesion and Corrosion Performance of Geomet Basecoat (321)- Topcoat (ML Black) Applications on Cathoretic Coating. *Sakarya University Journal of Science*, 28(1), 220–236. <https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.1345904>. (Makale)
- Volvo Car Standard VSC 5740, 1049,** (2011). Phosphating, Y 1049. (Standart)
- William D. Callister, & David G. Rethwisch.** (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th Edition). Hoboken, NJ: Wiley. (El Kitabı)
- Zarras, P., & Stenger-Smith, J. D.** (2014). Corrosion processes and strategies for prevention: an introduction. *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, 3–28. <https://doi.org/10.1533/9780857096883.1.3>. (El Kitabı)
- Zimmermann, D., Muñoz, A. G., & Schultze, J. W.** (2003). Microscopic local elements in the phosphating process. *Electrochimica Acta*, 48(20–22), 3267–3277. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00385-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00385-2). (Akademik Makale)