

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

**AA7075 VE AA5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK KROMSUZ
KAPLAMA ÜZERİNE KATAFOREZ KAPLAMANIN KOROZYON
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OĞUZ YILMAZ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ÇAĞLAYAN AÇIKĐÖZ

BİLECİK, 2025
10706569

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

**AA7075 VE AA5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK KROMSUZ
KAPLAMA ÜZERİNE KATAFOREZ KAPLAMANIN KOROZYON
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OĞUZ YILMAZ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ÇAĞLAYAN AÇIKGÖZ

BİLECİK, 2025
10706569

BEYAN

AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanacak Kromsuz Kaplama Üzerine Kataforez Kaplamanın 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:			

OĞUZ YILMAZ

.../.../2025

İmza

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yapılmasında her türlü desteği sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Çağlayan AÇIKGÖZ'e çok teşekkür ederim.

Eğitimim süresince bütün gerekli imkanları sunan Sayın Yahya BEYCE'ye teşekkür eder saygılarımı sunarım. Bu tez çalışmasına başlamamı ve devam ettirmemi teşvik eden ve sağlayan Uzman Kataforez Yüzey Kaplama Sanayi Ticaret A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarıma yardımcı olan İbrahim USTA, Bünyamin EREN, Minel TAŞDEMİR, Gülcan ÖZYURT ve Bora ÖNÇEKEN'e teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek olan annem Veliye YILMAZ, babam Rasim YILMAZ ve ablam Büşra ULUOĞLU'na teşekkür ederim.

Oğuz YILMAZ

2025

ÖZET

AA7075 VE AA5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANACAK KROMSUZ KAPLAMA ÜZERİNE KATAFOREZ KAPLAMANIN KOROZYON PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Geleneksel kataforez kaplama işleminde, metal altlık kullanıldığında boyanın parçaya tutunması fosfatlama işlemiyle sağlanmaktadır. Ancak, alüminyum altlık kullanıldığında fosfatlama işlemi uygulanamamaktadır. Bunun başlıca sebebi, altlık olarak kullanılan alüminyum malzemenin fosfat banyosu içinde uzun süre bekletildiğinde yüzeyinin bozulmasıdır. Alüminyum alaşımında bulunan silisyum, fosfatın yüzeye tutunmasını engelleyen en önemli faktördür. Alüminyum alaşım türüne bağlı olarak silisyum miktarı değişmekte, silisyum oranı arttıkça da fosfatlanabilirlik azalmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımlar için, otomotiv sektörü için ucuz ve yaygın olarak kullanılan kataforez kaplama yönteminde yapışma ve korozyon direncini artırmak amacıyla fosfatlama ön işlemi yerine ticari ürün EcoAL 20A çözeltisi kullanılarak kromsuz ön işlemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda; aşındırma süresi (5 dk) ve sıcaklık (25 C⁰) sabit tutularak bu iki alüminyum türüne kataforez öncesi uygulanan farklı EcoAL 20A konsantrasyonlarında (%0,75 , %1 ve %1,25) ve daldırma sürelerinde (45 sn, 60 sn ve 75 sn) kromsuz ön işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra kataforez kaplama yapılarak elde edilen numunelere; Kuru Yapışma, Su Direnci, Nem Direnci, Çevrim testi, CASS testi, Taş Çarpma testleri uygulanmıştır. Bu test sonuçlarına göre; her iki alüminyum serisi için de en iyi kromsuz konsantrasyonu değerinin %1,25 ve ön işlem süresinde 75 saniye olduğu belirlenmiştir. Çalışmada fosfatlama işlemi yerine kromsuz basamağının eklendiği yeni bir proses geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler; Kataforez, Fosfat, Kromsuz, Korozyon, Alüminyum

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CHROME-FREE PRETREATMENT PRIOR TO CATAPHORESIS COATING ON THE CORROSION PERFORMANCE OF AA7075 AND AA5754 ALUMINIUM ALLOYS

In the traditional cathoporesis process, paint adhesion to metal substrates is achieved by phosphating. However, it is not possible to use a phosphating process when aluminium substrates are used. The main reason for this is that the surface of the aluminium material used as a substrate deteriorates when kept in the phosphate bath for a prolonged period. Silicon in aluminium alloys is the main reason phosphate cannot stick to the surface. The amount of silicon changes depending on the type of aluminium alloy, and higher silicon levels make phosphating less effective. AA5754 and AA7075 aluminium alloys, widely used in the automotive industry, were used in this study. In order to improve adhesion and corrosion resistance in the cost-effective and widely used cathoporesis process in the automotive sector, a chrome-free pretreatment using the commercial product EcoAL 20A solution was applied instead of the phosphating pretreatment. In the experimental work, the etching time (5 minutes) and temperature (25°C) were kept constant. Chrome-free pretreatments were applied to these two types of aluminium at different concentrations of EcoAL 20A (0.75%, 1% and 1.25%) and immersion times (45 seconds, 60 seconds and 75 seconds) prior to the cathoporesis. The coated samples were then subjected to tests such as dry adhesion, water resistance, humidity resistance, cycle testing, CASS testing and stone chip testing. Based on the results of these tests, the optimum chrome-free concentration was determined to be 1.25% and the optimum pretreatment time was determined to be 75 seconds for both aluminium series. In this study, a new process was developed by incorporating a chrome free step in place of the phosphating process.

Keywords; Cataphoresis, Phosphate, Chrome-free, Corrosion, Aluminium

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KOROZYON	3
2.1. Korozyonun Tanımı ve Önemi	3
2.2. Korozyon Çeşitleri.....	4
2.3. Korozyonun Etkileri	5
3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	7
3.1. Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	7
3.2. Alüminyum Alaşımlarının Çeşitleri	9
3.2.1. Alüminyum Dövme Alaşımları	9
3.2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları	10
3.3. Önemli Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri	11
3.3.1. 1XXX Serisi Alaşımlar	11
3.3.2. 2XXX Serisi Alaşımlar	11
3.3.3. 3XXX Serisi Alaşımlar	12
3.3.4. 5XXX Serisi Alaşımlar	12
3.3.5. 6XXX Serisi Alaşımlar	12
3.3.6. 7XXX Serisi Alaşımlar	12

3.4. Alüminyumun Korozyon Davranışı ve Korunma Yöntemleri	13
3.4.1. Kaplama ve Koruyucu Yüzey İşlemleri.....	13
3.4.1.1. Eloksal Kaplama	13
4. ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA TEKNOLOJİSİ.....	15
4.1. Elektrokimyasal Kaplamanın Tanımı ve İlkeleri.....	15
4.2. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Elektrokimyasal Kaplama Türleri	15
4.2.1. Katarforez Kaplama	15
4.2.2. Çinko Kaplamalar	15
4.2.3. Elektrostatik Toz Boya	16
4.2.4. Lamelli Kaplamalar	17
5. KATAFOREZ KAPLAMA.....	18
5.1. Katarforez Kaplama Tarihçesi	18
5.2. Katarforez Kaplama İlkeleri ve Tanımı	18
5.3. Katarforez Kaplama Sürecindeki Temel Adımlar	19
5.3.1. Yüzey Hazırlama Prosesi.....	19
5.3.1.1. Yağ Alma	19
5.3.1.2. Durulama.....	22
5.3.1.3. Aktivasyon	22
5.3.1.4. Fosfatlama	23
5.3.1.5. Durulama.....	24
5.3.1.6. Pasivasyon.....	24
5.3.1.7. Deiyonize Durulama	24
5.3.2. Elektro-kaplama Prosesi	25
5.3.2.1. Katarforez Kaplama Mekanizması ve Banyosu	25
5.3.2.2. Ultrafiltrasyon Banyoları	30

5.3.2.3. Anot Hücreleri.....	32
5.3.3. Kürlenme Prosesi.....	33
5.4. Kataforez Kaplamanın Uygulama Alanları	34
6. FOSFATLAMA ALTERNATİFLERİ.....	36
6.1. Kromsuz	36
6.2. Nano kaplamalar.....	37
7. LİTERATÜR.....	38
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
8.1. Malzemeler	41
8.2. Yöntem	43
8.3. Kaplama Sonrası Uygulanan Analiz ve Testler.....	46
8.3.1. Kuru Yapışma Testi (Fiat 50461 Şartnamesi)	46
8.3.2. Nem Direnci (Fiat 50184 Şartnamesi).....	47
8.3.3. Su Direnci (Fiat 50470 Şartnamesi).....	47
8.3.4. Çevrim Testi (SAE J2334 Şartnamesi).....	47
8.3.5. CASS Testi (ISO 9227 Şartnamesi).....	48
8.3.6. Taş Çarpma Testi (SAE J400 Şartnamesi)	49
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
9.1. AA5754	52
9.2. AA7075	60
KAYNAKÇA	71

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. %99,5 saflıktaki alüminyum metalinin genel özellikleri	8
Tablo 3.2. Alüminyum dövme alaşımlarının gösterimi.....	10
Tablo 3.3. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimleri	11
Tablo 8.1. Deneysel Çalışma	41
Tablo 8.2. Alüminyum türleri element içeriği.....	42
Tablo 8.3. Kullanılan malzeme, kimyasal ve tedarikçileri.....	42
Tablo 8.4. Kullanılan Test Ekipman Listesi.....	43
Tablo 8.5. Kataforez kaplamanın detaylı parametreleri.....	45
Tablo 8.6. Kuru yapışma sınıflandırılması	47
Tablo 8.7. Çevrim testi sonrası korozyon değerlendirme sistemi	48
Tablo 8.8. CASS Testi Çalışma koşulları.....	49
Tablo 8.9. Taş çarpma değerlendirme kriterleri	50
Tablo 8.10. Taş çarpma değerlendirme skalası	51
Tablo 9.1. Genel sonuç tablosu	69

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Korozyon mekanizmalarında gerçekleşen reaksiyonlar	3
Şekil 2.2. Farklı ortamlarda oluşan korozyon olaylarının gösterimi.....	4
Şekil 5.1. Kataforez kaplama aşamaları.....	19
Şekil 5.2. Partikülün yüzeyden ayrılma mekanizması	20
Şekil 5.3. Yağın yüzeyden ayrılma mekanizması	21
Şekil 5.4. Elektro Kaplama Uygulamaları	25
Şekil 5.5: Kataforez kaplama prosesi	26
Şekil 5.6. Kataforez kaplama banyosunda gerçekleşen reaksiyonlar	26
Şekil 5.7. Kaplama süresince elektrottaki OH ⁻ konsantrasyon değişimi	27
Şekil 5.8. Kataforez kaplamada akım – zaman eğrileri	28
Şekil 5.9. Kataforez banyosu içerisinde bulunan kimyasallar	28
Şekil 5.10. Fenoksi katkılı boya filmi görünümü.....	30
Şekil 5.11. Ultrafiltrasyon çalışma prensibi.....	31
Şekil 5.12. Kataforez kaplamanın ultrafiltrasyon biriminde kullanılan özel sarınlı membranlarının konfigürasyonu	31
Şekil 5.13. Boru şeklindeki membranla ultrafiltratın ayrılma prosesi	32
Şekil 5.14. Kataforez kaplamanın yenilenme proseslerindeki iki çeşidinin asit baz dengesi a) Alt nötralizasyon b) Tam nötralizasyon	32
Şekil 5.15: (a) Anolit Devresi (b) Kutu Anot	33
Şekil 5.16. Kataforez kaplamanın ideal teorik kürlenme diagramı.....	34
Şekil 5.17. Gerçekte ölçümü alınmış fırın sıcaklık-zaman diagramı.....	34
Şekil 8.1. Üretim Akış Şeması.....	43
Şekil 8.2. Alüminyum,chrome-free ve kataforez kaplamanın kesit modeli.....	46
Şekil 8.3. Çevrimsel korozyon test döngüleri.....	48

Şekil 9.1. Kuru yapışma test sonuçları.....	53
Şekil 9.2. Su direnci test sonuçları.....	54
Şekil 9.3. Nem direnci test sonuçları	55
Şekil 9.4. %0,75'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	56
Şekil 9.5. % 1'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	57
Şekil 9.6. %1,25'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	58
Şekil 9.7. Taş çarpma testi sonuçları.....	59
Şekil 9.8. CASS testi sonuçları	60
Şekil 9.9. Kuru yapışma test sonuçları.....	61
Şekil 9.10. Su direnci test sonuçları.....	62
Şekil 9.11. Nem direnci test sonuçları	63
Şekil 9.12. %0,75'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	64
Şekil 9.13. %1'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	65
Şekil 9.14. %1,25'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları.....	66
Şekil 9.15. Taş çarpma testi sonuçları.....	67
Şekil 9.16. CASS testi sonuçları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Å	: Angstrom
cm³	: Santimetreküp
dk	: Dakika
g	: Gram
J	: Joule
L	: Litre
lt	: Litre
m	: Metre
m²	: Metrekare
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
N	: Newton
ohm	: Direnç Birimi
ppm	: Milyonda Bir
sn	: Saniye
v	: Volt
µm	: mikrometre
µS	: Mikrosiemens
°K	: Kelvin
°C	: Santigrat
AED	: Anodik Elektro Kaplama
ASTM	: American Standart Test Method
CASS	: Bakırla Hızlandırılmış Asetik Asit Tuzu Püskürtme Testi
CED	: Katodik Elektro Kaplama

DIN	: Deutsche Institute Norm
DKP	: Karbon Çelik Sac
HV	: Vickers Sertliği
IR	: Infra-Red
ISO	: International Organization for Standardization
PVC	: Poli Vinil Klorür
SEM	: Scanning Electronic Micrographs
UF	: Ultrafiltrant
UV	: Ultraviyole
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
DKP	: Düşük Karbonlu Sıcak Çelik

1. GİRİŞ

Alüminyum, yeryüzünde yaklaşık %8 oranında bulunan, genellikle hidroksitleri ($\text{Al}(\text{OH})_3$ ve AlOOH) aracılığıyla üretilen bir metaldir. Endüstriyel ölçekte alüminyum üretimi, çoğunlukla Bayer yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemde, boksit cevheri sodyum hidroksit (NaOH) ile zenginleştirilerek alüminyum oksit (Al_2O_3) elde edilir. Alüminyum oksit, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülüne sahip bir bileşik olarak çözeltilen ayrılır. Alüminyumun saflığı arttıkça, metalin süneklik özellikleri de artar. Çok saf alüminyumun çekme dayanımı, tavlama işlemiyle 35-60 N/mm², soğuk haddeleme ile 110-130 N/mm² arasında değişir. Ancak, bu değerlerin üzerine çıkmak zordur. Ayrıca, alüminyumun uzama miktarı oranı %5,5 ile %40-50 arasında değişim gösterebilmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Saf alüminyum, günlük yaşamda geniş bir kullanım alanına sahiptir; ev araç-gereçlerinden, demir-çelik sektörüne, alüminyum boyalarından tanklar ve depolara kadar pek çok farklı sektörde tercih edilmektedir. Elektrik iletimi için de akım rayları ve kabloların yapımında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, saf alüminyumun kullanımı yukarıda belirtilen alanlarla sınırlıdır. Çoğu endüstride ise alüminyum alaşım olarak tercih edilmektedir (Hirsch, 1997). Alüminyum alaşımlarının kullanılmasının ana sebepleri arasında mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, korozyona karşı direncin artırılması, döküm özelliklerinin geliştirilmesi ve akışkanlığın yükseltilerek yırılma sıcaklığının azaltılması yer almaktadır. Alüminyum parçaların fosfat kaplaması, özellikle silisyum içeriğiyle ilişkilidir. Alüminyum türüne göre içerisindeki silisyum miktarı değişkenlik göstermekte ve silisyum miktarı arttıkça fosfatlanabilirlik azalmaktadır.

Alüminyumun kimyasal özellikleri de oldukça önemlidir. Özellikle oksijenle reaksiyona girerek yüzeyinde oksit tabakası oluşturur. Bu ince alüminyum oksit tabakası, metali daha fazla oksidasyondan korur. Alüminyum aynı zamanda kükürt, klor ve karbon gibi elementlerle bileşikler oluşturabilme yeteneğine sahiptir. Örneğin, alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) su arıtımında yabancı maddelerin uzaklaştırılması için yaygın olarak kullanılırken, alüminyum klorür (AlCl_3) katalizör üretimi ve organik kimyada reaktif olarak kullanılmaktadır (Hem ve Hogenesch, 2007).

Son yıllarda, otomotiv sektöründe giderek daha yaygın hale gelen kataforez kaplama yöntemi alüminyum işleme süreçlerinde tercih edilmeye başlanmıştır. Bu yöntem, çevreye minimum etki sağladığı, hızlı bir şekilde uygulanabildiği ve düşük maliyetli olduğu için

oldukça popülerdir. Kataforez kaplama, iletkenlik özelliğine sahip tüm metallere uygulanabilmektedir. Özellikle otomotiv alt endüstrisinin gelişimiyle birlikte, bu kaplama teknolojisi önemli bir yere sahiptir.

Bu şekilde, çevre dostu kaplama teknolojileri ve sürdürülebilir üretim süreçleri konusundaki önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan kromsuz kaplama yöntemlerinin, geleneksel krom kaplamalarla kıyaslandığında çevresel ve sağlık açısından daha güvenli bir alternatif sunduğu gözlemlenmiştir. Yapılan testler, kataforez öncesi özellikle yüksek konsantrasyonlu kromsuz ön işlemlerinin yüksek çevresel dayanıklılık ve yapışma direnci ve optimal performans sağladığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, endüstriyel üretimde çevre dostu çözümlerin benimsenmesinin, yalnızca çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda performans açısından da yüksek standartları karşıladığını göstermektedir. Bu çalışma, alüminyum alaşımlarının kaplama süreçlerinde kullanılan alternatif kimyasal yöntemlerin verimliliğini ve etkinliğini inceleyerek, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu alandaki gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik önemli bir temel sunmaktadır.

Bu çalışmada, fosfata alternatif olarak kromsuz kaplama kullanılmıştır. Bu yeni süreçle birlikte, fosfat kaplamanın yerine kromsuz aşaması eklenmiş ve iki farklı alüminyum türünün korozyon dayanımları test edilmiştir. Yapılan performans testleri sonrasında, hangi alüminyum türünün kromsuz kaplama sonrası daha yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

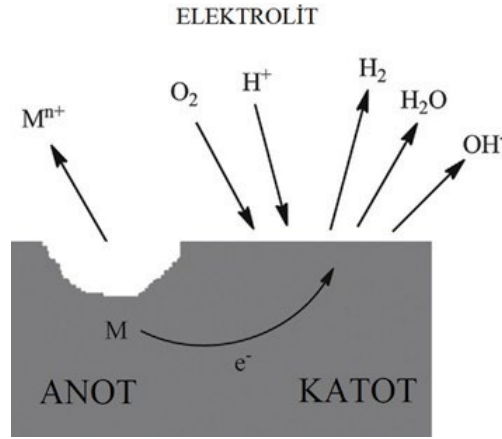
2. KOROZYON

2.1. Korozyonun Tanımı ve Önemi

Korozyonun tanımı birçok farklı şekilde yapılabilmektedir. Genel bir tanım yapmak gerekirse korozyon bozulma anlamına gelmektedir. Korozyon kelimesi Latince'den gelen kemirilmek anlamında kullanılan "corrodere" kelimesinden türetilmiştir. Korozyon, ISO 8044:2020 standardına göre metallerin fonksiyonlarını büyük ölçüde kaybetmeleri olarak da tanımlanmaktadır (Groisman, 2010).

Metaller birçok sebepten aşınır ve bozulurlar. Bunlar genel olarak fiziksel, kimyasal, mekaniksel veya elektrokimyasal nedenler olabilir.

Kimya biliminin ana dallarından biri, elektrokimya'dır. Elektrokimyanın uğraşlarından biri de bir elektrolit ve elektrotun ara yüzeyindeki elektriksel yüklerin transferini içeren kimyasal yüklerdir. Korozyonun mekanizmaları da elektrokimyanın prensiplerine dayanmaktadır. Elektron yüklerinin transferi yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile sağlanmaktadır (Piontelli ve Pedferri, 1968). Anotta indirgenme, kattotta yükseltgenme reaksiyonları gerçekleşir ve kattotaki indirgenme reaksiyonu sayesinde metal iyonları elektrolitik çözeltiliye geçiş yapar. Bu olay **Şekil 2.1**'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.1. Korozyon mekanizmalarında gerçekleşen reaksiyonlar

Kaynak: (Gaidis, 2004).

Demir göz önünde bulundurulduğunda demirin oksijenle etkileşime geçmesi ile gerçekleşen redoks reaksiyonları şu şekildedir:

Anotta (demir yüzeyi) olan yükseltgenme reaksiyonu:



Katotta gerçekleşen indirgenme reaksiyonu;



Genel korozyon reaksiyonu:

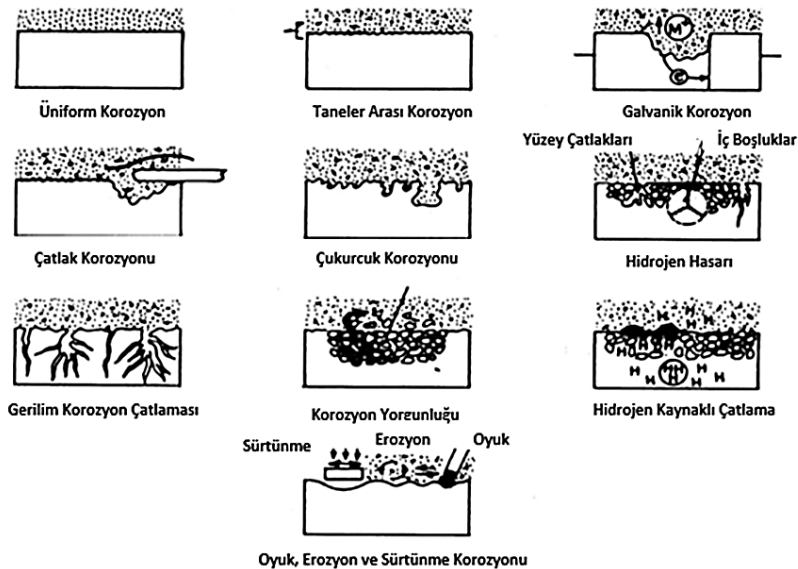


Korozyon süreci çoğunlukla birbirinden bağımsız hareket etmeyen çok sayıda faktöre bağlıdır. Korozyonun hızını ve dağılımını belirleyen faktörler iç ve dış faktörler olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Gaidis, 2004). Dış faktörler korozyonun kimyasal yapısı, sıcaklık veya basınç gibi korozyon koşullarına bağlıdır. İç faktörler ise metalin kendisine bağlı olan faktörlerdir. En önemli iç faktör metalin kimyasal doğasıdır.

2.2. Korozyon Çeşitleri

Korozyonun sınıflandırılması elektrokimyasal ve kimyasal olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Kimyasal korozyon, yüzeyin dış ortamdaki maddelerle reaksiyonu nedeniyle oluşur. Elektrokimyasal korozyon, Metallerin veya alaşımların su veya tuzlu su gibi bir elektrolite maruz kaldığında bozunmasıyla meydana gelir.

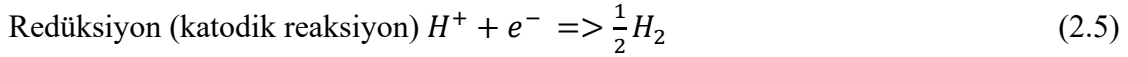
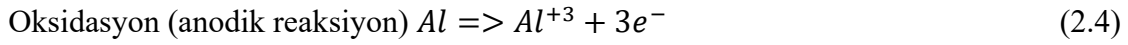
Değişik ortamlarda oluşan korozyon olaylarının birbirinden oldukça farklı gösterimleri Şekil 2.2’de verilmiştir (Chaturvedi, 2009).



Şekil 2.2. Farklı ortamlarda oluşan korozyon olaylarının gösterimi

Kaynak: (Chaturvedi, 2009).

Korozyon, istenmeyen bir redoks tepkimesidir. Sulu çözültideki herhangi bir korozyon reaksiyonunu metalin oksidasyonu ile sonuçlanır. Örneğin alüminyumun sudaki korozyonu aşağıdaki yarı tepkimelerle ifade edilebilir (Cao vd., 2016):



Tüm korozyon reaksiyonları, korozyon ürünleri adı verilen yan ürünler üretir. Bunlar, örneğin, aşınmış metalin yüzeyinde filmler oluşturan çözünmeyen hidroksitler, karbonatlar, oksitler, sülfidler, silikatlar ve boratlardır. Filmlerin bazıları gözenekli ve gevşek olduğundan metal yüzeye ve metal yüzeyden difüzyona izin verir. Gözlenen bu tür korozyonlar en kolay ölçülebilir ve öngörülebilir formlarından biridir. Metal kaybı tüm yüzey üzerinde eşit ve düzgün dağılımlıdır. (Seiji Sugimura ve Liao, 2016).

Korozif bir ortamda bir metalin başka bir iletken malzemeyle temasından kaynaklanan galvanik korozyon, en yaygın korozyon türlerinden biridir. Birbiriyle elektriksel temas halinde olan iki farklı iletken malzeme bir elektrolite maruz bırakıldığında galvanik akım adı verilen bir akım birinden diğerine akar. Galvanik korozyon, böyle bir çiftin anodik elemanında meydana gelen korozyonun bir parçasıdır (Revie ve Uhlig, 2011).

Yüzey korozyonu normalde pul pul dökülme veya yüzeyde çukurlaşma veya her ikisinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkar. Yüzey korozyonu çoğu durumda farklı metallerin (örneğin kaplamalar veya bağlantı elemanları) ve tuzlu su gibi olumsuz ortamların varlığı nedeniyle başlar. Renk değişimi, metalin zayıflaması, matlaşma yüzey korozyonunun belirtileri arasındadır. Yüzey korozyonunun önlemek veya korozyonu tedavi etmek malzemenin güvenliği sağlamak, ömrünü uzatmak ve ekonomik değerini kaybetmemesi için önemlidir. En etkili yöntemlerden biri metal yüzeylerin kataforez, çinko, fosfat gibi koruyucu katmanlarla kaplanmasıdır. Eğer bir yüzey korozyona uğramışsa yüzey yeniden temizlenip kaplanabilir (Hinton, 1995).

2.3. Korozyonun Etkileri

Korozyon hayatımızı arabalarımızda sıkışan bir somunun yarattığı rahatsızlıktan jet uçağı motorundaki ateşleme odasının çatlaması sonucu oluşan felakete kadar çeşitli şekillerde etkileyebilir. Güvenlik, korozyonun önlenmesinde birinci derecede dikkate alınan bir faktördür, ancak ekonomik faktörler de büyük önem taşır. Metallerin cevherlerinden elde edilmesi için

enerji girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji, pahalı bir kaynaktır ve bu nedenle korozyonun önlenmesi, bir metal ürününün ömrünü uzatır ve dolayısıyla erken değiştirme maliyetlerini önler. Günümüzde korozyonun küresel maliyeti yaklaşık olarak 2.5 trilyon ABD doları olarak tahmin edilmektedir (Ulubayrak, 2020).

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

3.1. Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Alüminyum yeryüzünde %8 oranında bulunur ve çoğunlukla hidroksitlerinden ($Al(OH)_3$ ve $AlOOH$) üretilen bir metaldir. Bayer yöntemi, alüminyumun endüstriyel ölçekte üretiminde kullanılan bir proses yöntemidir. Bu yöntem genellikle boksit cevherinden alüminyum oksit üretmek için kullanılır. Bu yöntemde NaOH ile zenginleştirilen boksit, $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ formülüne sahiptir. Hidrat suyu içeren alüminyum oksitlere örnek olarak jipsit ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) ve diyasporit ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) verilebilir. Ancak alüminyum üretiminde değer taşımazlar. Alüminyum aktif bir metal olması dolayısıyla havayla kolayca etkileşime girer ve bu etkileşim yüzeyinde pasif bir Al_2O_3 katmanı meydana getirir. Bu katman ince olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bile korozyonun etkilerine karşı koruma sağlar.

Alüminyum tozu, alüminyum metalinin ince parçacıklar halinde öğütülmesi veya parçalanmasıyla elde edilen bir malzemedir. Havayla hızlıca etkileşime girer ve yanar, ek olarak KOH ve NaOH içinde kolay şekilde erir. Alüminyum kükürt oksitlere (SO_x) karşı minimum kimyasal tepkime vermektedir. Erime süresince hacmi büyür. Bu büyüme, %99,65 alüminyum içeren metalde %6,25 civarında, %99,75 alüminyum içeren metalde de %6,60 oranındadır. Alüminyumun katı ve sıvı halinde yoğunluğu, saflık derecesinin artışıyla ters orantılıdır. %99,25 alüminyum içeren metalin yoğunluğu $2,727 \text{ kg/m}^3$ iken, %99,40 alüminyum içeren metalin yoğunluğu $2,706 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Ayrıca, metalin saflığı arttıkça elektrik ve ısı iletkenliği de doğru orantılı olarak artmaktadır (F. Sarsılmaz, 2012).

Teknik saflıktaki alüminyum, yüksek saflıktaki alüminyuma göre daha sert ve kırılımandır. Ayrıca mekanik dayanıklılığı daha yüksektir. Örneğin %99,25 saflığa sahip bir alüminyumun elastisite modülü 71000 N/mm^2 iken çok daha saf bir alüminyumun elastisite modülü 67000 N/mm^2 'dir. Alüminyumun saflığı artınca, sertliği düşmektedir. %99,8 saflığı olan alüminyum metalinin sertliği de 19-41 Brinell iken Alüminyum oranı % 99,2 olan metalin sertliği 24-54 Brinell arasında değişmektedir. Araştırmalar sonucunda, alüminyumun çekme mukavemetinin saflığı arttıkça azaldığı anlaşılmıştır. Yüksek saflığa sahip alüminyumda (> %99,9) kesit yüzeyinin kopma anındaki küçülmesi en fazladır. Bu demektir ki alüminyumun saflığı arttıkça metal daha sünek hale gelmektedir. Çok saf alüminyumun çekme dayanımı değeri tavlama işlemi görmüşse, $35-60 \text{ N/mm}^2$, soğuk haddeleme ile sağlandıysa $110-130 \text{ N/mm}^2$ arasındadır. Bu değerlerin üstüne çıkılamamaktadır. Uzama miktarı oranı da %5,5'den

%40-50 arasında değişebilmektedir (Hirsch, 1997). Alüminyumun genel özellikleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1. %99,5 saflıktaki alüminyum metalinin genel özellikleri

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda Sıcaklığında)	2,7 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23,5 µm m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül Isısı	0,224 cal/g (100 °C'de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm ²
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm ²
Elastisite Modülü	72 x 10 ³ N/cm ²
% Uzama	45
% Kopma Uzama	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm ²
Elektrik İletkenliği	%59,5 IACS
Elektrik Direnci	2,65 x 10 ⁻⁸ ohm/m
Katılma Esnasında Kendini Çekme	%6,7
Yansıtıcılık	Tungsten flamadan gelen beyaz ışık için %90

Kaynak: (F. Sarsılmaz, 2012).

Saf alüminyum, genellikle ev araç-gereçlerinin paketlenmesinden demir-çelik sektörüne, alüminyum boya işlerine, tanklara ve depolara, dekorasyon işlerine kadar bir sürü alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, elektrik iletimi için akım raylarının ve kabloların ve kabloların yapımında tercih edilmektedir.

Saf alüminyumun kullanımı belirtilen alanlar dışında limitlidir. Çoğu endüstride alüminyum alaşım olarak tercih edilmektedir (Hirsch, 1997).

Alüminyumun alaşımın haline getirilmesinin ana nedenleri şu şekilde açıklanabilir:

- Mekanik özelliklerini iyileştirebilmek
- Korozyona karşı direncini artırmak
- Döküm özelliklerini artırmak
- Akışkanlığını yükseltip yıtılma sıcaklığını azaltmak

Alüminyumun en önemli kimyasal özelliklerinden biri oksijenle reaksiyona girmesidir. Alüminyum, havaya maruz kaldığında yüzeyinde metali daha fazla oksidasyondan koruyan ince bir alüminyum oksit tabakası oluşturur. Alüminyumun bir başka kimyasal özelliği de kükürt, klor ve karbon dahil olmak üzere çok çeşitli element ve bileşiklerle bileşikler oluşturma yeteneğidir. Örneğin, alüminyum sülfat $Al_2(SO_4)_3$ su arıtımında yabancı maddeleri uzaklaştırmak için yaygın olarak kullanılırken, alüminyum klorür ($AlCl_3$) katalizör üretiminde ve organik kimyada reaktif olarak kullanılır (Hem ve Hogenesch, 2007).

3.2. Alüminyum Alaşımlarının Çeşitleri

Alüminyum alaşımları ürünlere şekil verme yöntemlerine göre iki grupta incelenebilmektedir.

- Dövme alüminyum alaşımları
- Döküm alüminyum alaşımları

Sınıflandırmada farklı türlerde standartlar kullanılabilir. Alüminyum Birliğinin standardı standartlar arasında en fazla tercih edilendir. Ayrıca DIN 1713, ALCOA, ASTM, Fransız standartları gibi standartlar da kullanılabilir. Bütün bu standartların ortak özelliği hepsinde alüminyum alaşımlarının yukarıda belirtildiği gibi dökme ve dövme şeklinde incelenmesidir.

3.2.1. Alüminyum Dövme Alaşımları

Alaşımların gösterimi için Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen simgeleme metodu en sok kullanılan metoddur. Dört rakamdan oluşan bu methoda ilk rakam , temel alaşım elementinin hangi elementlerden oluştuğunu gösterir. Son iki rakam da %99 oranının noktadan sonraki iki basamağını gösterir. Dövme alaşımlarının detaylı gösterimi **Tablo 3.2**'de görülebilmektedir: (Ünal, 1987). 1050 alüminyum alaşımı örnek alınırsa sondan iki basamak alüminyumun %99.50 saflıkta olduğunu, baştan iki basamağınsa safsızlığa etki eden elemetleri göstermektedir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan gösterimde ilk rakam alaşım türünü, ikinci

rakam ise alaşımındaki elementlerin oranlarını göstermektedir. Sondaki iki rakam ise değişik alaşımları göstermek amacıyla gösterilmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Tablo 3.2. Alüminyum dövme alaşımlarının gösterimi.

Alaşımsız Alüminyum	1xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Bakır Alaşımı	2xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Mangan Alaşımı	3xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Silisyum Alaşımı	4xxx	Yaşlandırılmaz
Alüminyum Magnezyum Alaşımı	5xxx	Yaşlandırılmaz
Alüminyum Silisyum Magnezyum Alaşımı	6xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Çinko Alaşımı	7xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Ve Diğer Elementler (Lityum Vb.)	8xxx	Yaşlandırılabilir

Kaynak: (Ünal, 1987).

Başka metaller alüminyuma eklendiğinde alüminyumun mekanik özelliklerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Örneğin, ticari alüminyum alaşımlarında bulunan küçük oranlardaki yapı kirleticileri, literatürde görülebileceği gibi, alüminyumun mukavemetini saf alüminyuma kıyasla %50'ye kadar artırılabilir. Mangan, çinko, silisyum, magnezyum, bakır gibi metaller alüminyumun alaşımlarında en çok görülen metallerdir. Bu metaller, istenilen nitelikteki ürünü elde edebilmek için alüminyum alaşımına tek başlarına veya bir arada ilave edilebilir. Soğuk işleme, hadde alaşımlarının çekme mukavemetini önemli ölçüde artırır. Alaşımlandırma işlemi sırasında bazı ilaveler malzemenin yoğunluğunu artırırken, diğer alaşımlarda ise daha hafif olabilir. Örneğin, %10-13 oranında silisyum içeren alaşımların yoğunluğu yaklaşık olarak 2,65 g/cm³tür (Oguz, 1990).

3.2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları

Döküm alaşımlarının simgelenmesi de dört rakam kullanılarak yapılmaktadır. Ek olarak üçüncü rakamdan sonra bir nokta koyulmalıdır. **Tablo 3.3**'te döküm alüminyum alaşımlarının simgeleme yöntemi gösterilmiştir. Burada, 1xxx serisi için ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun ondalık kısmındaki saflık derecesini, noktadan sonraki rakam ise ürünün formunu gösterir. Ürün formları ve karşılık gelen sayısal değerler **Tablo 3.3**'te verilmiştir:

- Döküm
- İngot
- Modifiye edilmiş ingot

2xx.x ile 9xx.x arasındaki alüminyum alaşımlarında ise ikinci ve üçüncü rakamlar yalnızca sıralama numaralarını belirtmektedir.

Tablo 3.3. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimleri

SİMGE	TEMEL ALAŞIM ELEMENTİ
1xx.x	Minimum %99 Alüminyum
2xx.x	Al-Cu
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si
4xx.x	Al-Si
5xx.x	Al-Mg
6xx.x	Kullanılmayan Dizi
7xx.x	Al-Mg-Zn
8xx.x	Al-Sn
9xx.x	Diğer Elementler

Kaynak: (Eruslu, 1990).

Döküm alüminyum alaşımları genellikle pres ve kum dökümü ile sabit kalıplama yöntemleriyle üretilebilir. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özelliklere sahip olabilir ve aynı zamanda işlenmeye uygun özellikler gösterebilirler. Döküm alüminyum alaşımları kaynak da yapılabilir. Isıl işlemler, dövme alüminyum alaşımlarında olduğu gibi, bazı döküm alüminyum alaşımlarında da başarıyla uygulanmaktadır. Bu özelliklerin yanı sıra, mukavemet ve korozyon direnci de oldukça yüksek olabilir.

3.3. Önemli Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

3.3.1. 1XXX Serisi Alaşımlar

Alüminyum oranı %99'dan daha yüksektir. Elektrik ve ısı iletkenliği ile korozyona karşı direnci çok yüksektir. Mekanik özellikleri çok iyi değildir. Folyo, levha şeklinde bulunabilirler. Özellikle kimya ve elektrik endüstrilerinde kullanılmakta ve cephe kaplamada ve düşük mukavemetli korozyon dirençli araçların yapımında kullanılır.

3.3.2. 2XXX Serisi Alaşımlar

Alaşım elementi bakırdır. Çökeltmeyle sertleştirme işlemlerine çelikle kıyaslanabilecek kadar dayanabilir. 2000 serisi alaşımları genellikle %2-%10 arası bakır ve küçük oranlarda başka elementleri içerir. Ekstürizyon ve dövme alüminyum şeklinde bulunabilir. Isıl işlem görebilen en yüksek mukavemetli alaşımlar arasında 2000 serisi alaşımlar vardır .

3.3.3. 3XXX Serisi Alaşımlar

Ana alaşım elementi mangandır. Genel amaçlı bir alaşımdır, orta seviye mukavemetleri ve yüksek işlenebilirlikleri ile bilinirler. Manganez gerinim sertleşmesi durumunda bile yalnızca orta düzeyde bir mukavemet artışı sağlar, ancak nispeten yüksek şekillendirilebilirlik, sūneklik ve hemen hemen tūm ortamlarda korozyona karşı çok yüksek direnç sağlar. 3xxx serisi alaşımlar kolayca kaynaklanabilir ve lehimleme ve lehimleme uygulamaları için en iyiler arasındadır. Karton kutular ve eęri boruların imalatında kullanılır.

3.3.4. 5XXX Serisi Alaşımlar

Alaşım elementi magnezyumdur. Isıl işlem gōrmeyen en yüksek mukavemetli alaşımlar arasında yer alır. Bu alaşımlar aynı zamanda son derece sağlamdır, kırılma sırasında çok fazla enerji emer ve bu nedenle ūstūn tokluğun hayati ōnem taşıdığı kritik uygulamalarda kullanılabilir. 5xxx serisi alaşımlar ticari prosedūrlerle kolaylıkla kaynak yapılır. Genel olarak 5xxx alaşımları hava ve deniz suyu korozyonuna karşı da mūkemmел dirence sahiptir, dolayısıyla çeşitli deniz ortamlarında ve gemi sanayisinde kullanılmaktadır.

3.3.5. 6XXX Serisi Alaşımlar

Alařım elementleri magnezyum ve silikondur. Hem magnezyum hem de silikonun mevcut olmasıyla alūminyum, magnezyum-silisyum sistemi ile ikili bir bōlūm oluřturur ve bu da mūkemmел ōkeltme-sertleřme kapasitesi saęlar. Bu, genel olarak mūkemmел korozyon direnciyle birlikte, ısıl iřlem gōrmeyen alařımlarla mūmkūn olandan biraz daha yüksek dayanımlarla sonuçlanır. 6xxx serisi alařımlar, ekstrūde edilmesi en kolay alūminyum alařımları arasındadır ve bu nedenle bu řekilde ūretilen karmařık (ōrneęin, çok oyuklu veya kanatlı) řekiller için yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yüksek korozyon direncinin yanı sıra nispeten yüksek mukavemetleri ile de bilinirler ve bu da onu altyapı ve mimari projeler için tercih haline getirir.

3.3.6. 7XXX Serisi Alaşımlar

Çinko içeren alūminyum alařımları. En yaygın olarak havacılık endūstrisinde bulunan 7xxx serisi alūminyum alařımları, atmosferik kořullara karřı būyūk direnç sergileyen, inanılmaz derecede yüksek mukavemetli bir alařımlardır. 7xxx serisi alūminyum alařımlarında çinko, magnezyum, bakır ve krom gibi birçok farklı element alařımlara eklenmiř olarak

bulunabilir ve bu eklemelerle tüm seriler arasındaki en yüksek mukavemete sahip olmasını sağlar (Kaufman ve Rooy, 2004).

3.4. Alüminyumun Korozyon Davranışı ve Korunma Yöntemleri

Alüminyum, yüzeyinde doğal olarak oluşan ince oksit tabakası sayesinde korozyona karşı oldukça dirençli bir metal olarak kabul edilir. Ancak, belirli şartlar altında diğer metaller gibi korozyona uğrayabilir. Korozyondan korunmak amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır; Bunlar arasında yüzey kaplamaları, pasivasyon ve katodik koruma yer alır. Katodik koruma, bu yöntemler arasında etkili bir çözüm sunar. Temel prensibi, koruma altındaki metalin anod olarak davranmasını engelleyerek korozyon hızını azaltmaktır. Bu, dış bir güç kaynağıyla sağlanan aktif katodik koruma veya galvanik anotlar aracılığıyla gerçekleşen pasif katodik koruma ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, alüminyumun ömrünü uzatmak ve yapısal bütünlüğünü korumak için kritik öneme sahiptir (Pedferri, 1996; Usta, 2022; Usta vd., 2023).

Alüminyum kuru havalarda korozyona karşı dirençlidir, ancak asidik veya alkali ortamlara girdiklerinde korozyon dirençleri dikkate değer ölçüde azalır. Ayrıca yüzeyindeki oksit tabakasının kalitesi veya zarar görmesi ile sıcaklık ve nem gibi koşullar alüminyumun korozyon direncini etkileyen faktörler arasındadır.

Alüminyumun doğal oksit tabakası her zaman kendi başına yeterli değildir, alüminyumu korozyona karşı korumak amacıyla kullanılan yöntemlerin başında ucuzlukları nedeniyle kaplama ve koruyucu yüzey işlemleri gelir.

3.4.1. Kaplama ve Koruyucu Yüzey İşlemleri

Boyama ile anotlama gibi yüzey işlemlerinin ve koruyucu kaplamaların bütünlüğü ve kalitesi korozyonu önlemede kritik bir öneme sahiptir. Koruyucu yüzey işlemlerinin alüminyum alaşımlarının korozyon direncini kayda değer bir seviyede arttırdığı gözlemlenmiştir .

3.4.1.1. Eloksal Kaplama

Eloksal kaplama, “Anodizasyon” ya da “Anodik Oksidasyon” olarak da isimlendirilir. Eloksallama, alüminyum ve alüminyum alaşımları için kullanılan önemli bir yüzey kaplamadır. Eloksal kaplama, elektrolit çözeltisi (elektrokimyasal yöntem) kullanılarak gerçekleştirilir. Eloksal uygulanacak alüminyum, oluşabilecek safsızları önlemek amacı ile iyice temizlenir ve

elektrolit banyosuna daldırılır. Katot, anotlama haznesinin içine yerleştirilir. Alüminyum banyoya daldırıldığında, anodu oluşturur (Aerts ,2001, Wang v.d., 2006).Anot ve katot arasından geçen doğru elektrik akımı elektrolitik banyodan salınan oksijen iyonlarının alüminyuma doğru hareket etmesine sebep olur ve oksijen iyonları alüminyum atomlarıyla birleşerek alüminyum oksit oluşturur. Sonuç olarak parçanın yüzeyinde anodik bir oksit katman oluşmuş olur.

Eloksal kaplama tipleri aşağıda verilmiştir.

Tip 1 Eloksal Kromik asitle kaplama:Tip 1 eloksal kaplamada kromik asit kullanılır. Kromik asit ile eloksal kaplama yapıldığında ince bir tabaka oluşur ve renk emilimi düşük seviyede sağlanır. Tip 1 eloksal kaplamanın aşınma ve korozyona olan direnci düşük olduğu için yaygın olarak kullanılmaz.

Tip 2 Eloksal Sülfürik asitle kaplama:Tip 2 eloksal kaplama sülfürik asit temelli bir kaplama türüdür. Yaklaşık 8 ile 13 µm kalınlığında tabaka oluşturur ve daha iyi renk emilimine sahiptir. Tip 2 eloksal kaplama iyi korozyon direncine sahip olması sebebiyle en yaygın kullanılan eloksal kaplama tipidir.

Tip 3 Eloksal Sert kaplama:Tip 3 eloksal kaplamada da sülfürik asit kullanılır, ancak daha düşük sıcaklıklarda karakterize edilir. Sert eloksal kaplama 30 ile 51 µm aralığında tabaka oluşturarak alüminyum parçaların aşınmaya karşı çok daha yüksek dirence sahip olmasına olanak sağlar (Stepniowski vd., 2016) .

Alüminyum hidroksit tabakasının alüminyum oksite dönüşümü aşağıdaki gibidir.

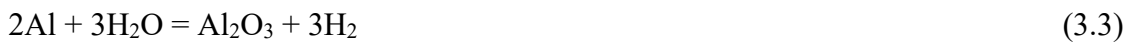
Anot Reaksiyonu:



Katot Reaksiyonu:



Net Reaksiyon:



4. ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA TEKNOLOJİSİ

4.1. Elektrokimyasal Kaplamanın Tanımı ve İlkeleri

Elektrokimyasal kaplama, bir elektrik akımı kullanarak metal iyonlarının bir yüzeye metalik bir kaplama tabakası olarak indirgendiği bir süreçtir. Bu işlemde kaplama yapılan nesne, katot olarak adlandırılır ve elektrik akımı aracılığıyla yüzeyine metal iyonları çekilir. Bu yöntem, özellikle çeşitli metal kaplamaların kalitesini artırmak ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Elektrokimyasal kaplama sayesinde, kaplama işlemi sırasında metalin yüzeyde homojen bir şekilde dağılması sağlanır, bu da kaplamanın dayanıklılığını ve estetik görünümünü artırır.

Elektrokimyasal kaplama, otomotiv, elektronik ve inşaat sektörleri gibi birçok alanda hem fonksiyonel hem de estetik açıdan kullanılır. Ayrıca, korozyon direncini artırmak, aşınma dayanımını geliştirmek ve yüzeyin elektriksel iletkenliğini iyileştirmek gibi avantajları vardır. Bu teknik, çinko, nikel, gümüş ve altın gibi birçok metalin kaplanmasında tercih edilmektedir. (Gu vd., 2017).

4.2. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Elektrokimyasal Kaplama Türleri

4.2.1. Kataforez Kaplama

Kataforez kaplama, çevreye minimum etki sağladığı, hızlı bir şekilde gerçekleştirilebildiği ve düşük maliyetli bir süreç olduğu için oldukça tercih edilmektedir. Bu kaplama yöntemi, iletkenlik özelliğine sahip tüm metallere uygulanabilir. Özellikle otomotiv alt endüstrisinin gelişimiyle birlikte kataforez kaplama giderek daha yaygın hale gelmiştir. Bu yöntem, kaplama işlemi sırasında elektrik akımı kullanarak metal yüzeyin homojen bir şekilde kaplanmasını mümkün kılar. Otomotiv endüstrisinde, araçların metal parçalarının dayanıklılığını artırmak ve uzun ömürlü kaplamalar sağlamak için sıkça tercih edilmektedir. (Skotnicki ve Jedrzejczyk, 2021; Usta, Yılmaz, vd., 2024).

4.2.2. Çinko Kaplamalar

Alkali çinko ve çinko alaşım kaplama işlemi, üç temel aşamadan oluşur: (i) yüzey hazırlığı, (ii) elektro kaplama ve (iii) pasivasyon. Yüzey hazırlama sürecinin ilk adımı olan alkali sıcak yağ alma yöntemi, metal yüzeyindeki yağ ve kirleri etkili bir şekilde temizler. Kaplama sürecinin her adımının ardından durulama işlemi yapılır. Durulamanın ardından elektrolitik temizleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde, çözünmeyen bir elektrot ile

temizlenecek metal parça arasında doğru akım uygulanarak yüzeydeki safsızlıklar giderilir. Elektrolitik temizleme sırasında, yüzeyde oluşan oksijen veya hidrojen gazı kabarcıkları, yüzeydeki kirleri uzaklaştırarak etkili bir temizlik sağlar. Asidik yağ alma işlemi ise kaplama öncesinde metal yüzeyin temizlenmesi ve hazırlanması için kritik bir aşamadır. Bu işlemde kullanılan asidik çözelti, metal yüzeyindeki kirleticilerin türüne ve yoğunluğuna göre seçilir. Çözeltinin yüksek derişimlerde kullanılması, yağ ve pas temizliğini hızlandırırken, düşük derişimlerde işlem süresi uzar. Bu işlem sırasında kullanılan maddeler, metal yüzeyin aşınmasını önleyerek kaplama işleminin olumsuz etkilerini en aza indirir (Sierka, 2015).

Çinko-nikel alaşımları, siyanür içermeyen asit veya alkali çözeltiler kullanılarak kaplanabilir. Asit çözeltiler genellikle %10-14 aralığında nikel içeriği sağlarken, siyanürsüz alkali çözeltiler %5-8 veya %10-17 arasında nikel içeriği sunabilir. Nikel oranı %17'ye ulaştığında korozyon direnci önemli ölçüde artar; ancak bu seviyeyi aşan nikel içeriği, çinko-nikel kaplamanın korozyon önleyici özelliklerini kaybetmesine ve alt tabakadan daha asal hale gelmesine yol açar. Çinko-nikel alaşımlı kaplama işlemi, diğer çinko alaşımlı kaplama yöntemlerine göre daha maliyetlidir; ancak sağladığı yüksek korozyon direnci, bu maliyet farkını dengeler. Kaplama işleminin son adımı olan pasivasyon, çinko kaplı yüzeylerde parmak izi oluşumunu önlemek, estetik bir görünüm kazandırmak ve korozyon direncini artırmak amacıyla uygulanır. Çinko kaplamanın tuzlu suya karşı dayanıklılığını artırmak için yüzeyin kromat tabakası ile kaplanması işlemi, pasivasyon olarak adlandırılır. Bu adım, çinko kaplamanın uzun ömürlü ve daha dayanıklı olmasını sağlar (Can, 2019).

4.2.3. Elektrostatik Toz Boya

Herhangi bir çözücü içermeyen, elektrokimyasal kaplama prensipleriyle çalışan katı bir kaplama türüdür. Mükemmel uygulama performansı ve çevre dostu özellikleri nedeniyle, metal kaplama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan kaplamalar genellikle, aşırı sıcak ve nemli koşullarda metallerin korozyonunu önlemek için yapılır. Elektrostatik toz boya ise sıklıkla kullanılan kaplama yöntemlerinden biridir (Wicks, Jr. vd., 1993).

Elektrostatik toz boyama, elektriksel yük taşıyan parçacıkların, karşıt yükle yüklü yüzeylere doğru çekilmesi prensibine dayanarak çalışan bir kaplama yöntemidir. Yüksek kalınlıkta bile homojen bir kaplama olanağı sağlar. Yüksek enerji tasarrufu ve verimliliği, tesis yatırım maliyetinin düşük olması ve metalik olmayan yüzeyin de boyanabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca, yüzeye yapılacak kaplamanın müşteri isteğine göre sonsuz

denebilecek düzeyde bir renk seçeneği sunar. Ancak en büyük dezavantajı ince film elde etmenin zorluğudur; çünkü toz boyalı bir yüzeyde oluşan kaplamanın kalınlığı minimum 40-50 mikron civarında olup, 300 mikrona kadar çıkabilir (Fedrizzi vd., 2007.; Övündür, 2015.).

Elektrostatik toz boyama, reçine türüne göre termoplastik ve termoset olmak üzere iki farklı sisteme sahiptir. Termoset toz boyalar; termoset reçine, pigment, dolgu maddesi, kürlenme ajanı ve katkı maddeleri içerirken, termoplastik toz boyalar ise farklı olarak termoplastik reçine, plastikleştirici ve stabilizatör içerir. Termoset kaplamalar epoksi reçinesi, poliester reçinesi ve akrilik reçinesi ile üretilirken, termoplastik kaplamalar ise polietilen, poliamid, polivinil klorür (PVC) ve politriflorovinil klorür gibi malzemelerden üretilir (Dogan vd., 2013.; Takeshita vd., 2012).

4.2.4. Lamelli Kaplamalar

Lamelli kaplamalar lamelli mikro şekilleri olan, akım olmadan gerçekleşen bir kaplama çeşididir. Üzerinde yapılan değişikliklerle istenilen korozyon direnci, renk, dayanım ve sürtünme katsayısı gibi özellikler verilebilir.

Çinko kaplama korozyona karşı dirençli olan, bu nedenle de uzun yıllardır kullanılan bir kaplama türüdür. Çinko kaplamanın içeriğine alüminyum elementi eklenmesiyle çinko lamelli kaplama oluşur (S Sugimura vd., 2016). Bu kaplama, elektrolit olarak uygulanmayıp çinko ve alüminyum lamellerinin kürlenmesiyle metal altlığa inorganik bağlayıcıların yardımıyla kaplanarak uygulanır (Can, 2019). Yüksek korozyon, kimyasal ve sıcaklık direnci, düşük elektrik iletkenliği lamelli kaplamanın kullanılmasının avantajlarından (Ulubayrak, 2020). Aynı zamanda hidrojen gaz çıkışının olmaması elektro kaplama işlemlerine alternatif olarak kullanılmasına katkı sağlar (Vu, 2012).

Üç çeşit çinko lamelli kaplama bulunur; Cr (VI) içeren çinko lamelli kaplamalar, çözücü bazlı Cr (VI) içermeyen çinko lamelli kaplamalar ve su bazlı Cr (VI) içermeyen çinko lamelli kaplamalardır. Cr (VI) içeren çinko lamelli kaplamalar, daha ince kaplamaya rağmen daha fazla korozyon direnci sağlar. Ancak yapılan araştırmalar sonucunda kansorejen olduğu ortaya çıkmış ve bu nedenle kullanımı yasaklanmıştır (Holmes vd., 2008). Çözücü bazlı Cr (VI) içermeyen çinko lamelli kaplamalarda, sıvı haldeki kimyasallar çözücü yardımıyla , su bazlı Cr (VI) içermeyen çinko lamelli kaplamalar ise deiyonize su yardımıyla istenilen viskozite değerine getirilerek kullanılır (Can, 2019).

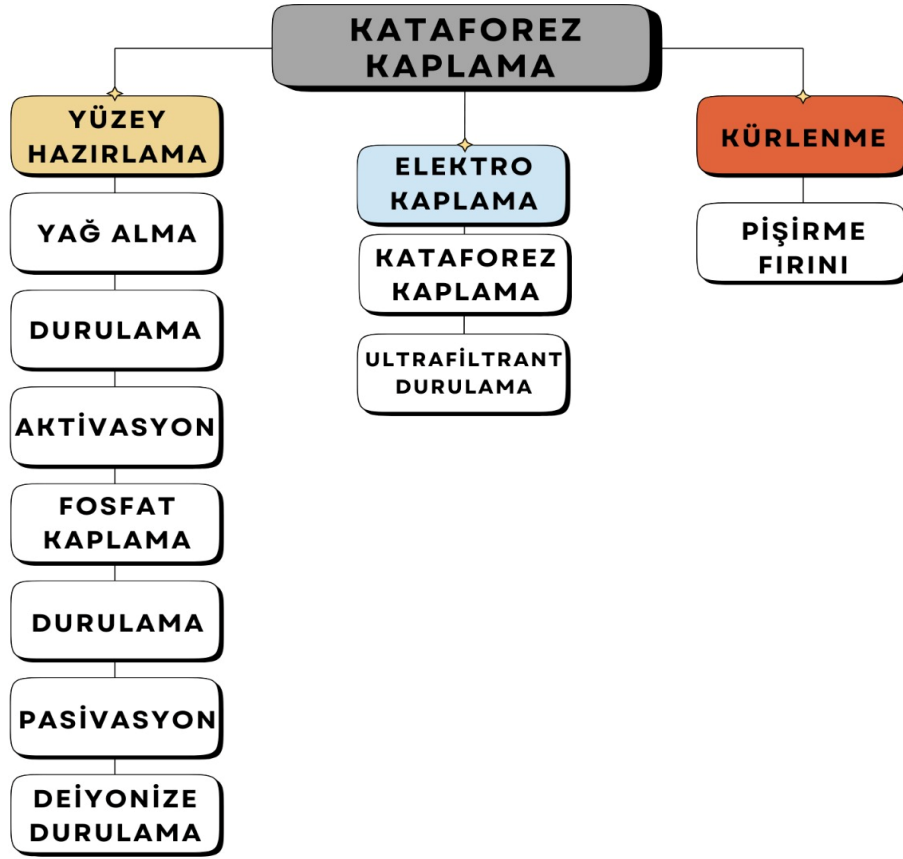
5. KATAFOREZ KAPLAMA

5.1. Kataforez Kaplama Tarihçesi

Literatüre bakıldığında elektrolitik boyaların ilk kullanımları 1910'lu yılların sonlarına dayandığı görülmektedir. Zamanla yaşanan gelişmeler ve Ford Motor Company'nin arabaların kaplanabilmesi için yaptığı araştırmalarla beraber 1950'lerde elektrolitik yüzey kaplama prosesleri şimdiki halini alması halini almıştır. İlk ticari anodik kaplama sistemi 1963'te başlamıştır. Katodik kaplamaların ilk patenti 1965'te alınmış ve endüstride kullanılmaya başlanması 1975 yılını bulmuştur. Günümüzde dünyadaki elektrodepozisyon kullanımlarının %70'i katodik elektrodepozisyon yöntemidir. Bu konuda geliştirilmiş en iyi yöntem olduğu ve araba iskeletinin ömrünü yıllarca uzattığı söylenebilir (Skotnicki ve Jedrzejczyk, 2021).

5.2. Kataforez Kaplama İlkeleri ve Tanımı

Elektroforez, kataforez olarak da bilinir ve elektrik yüklü parçacıkların bir akışkan içinde elektrik alan etkisiyle hareket etmesi olarak tanımlanabilir. Eğer sıvı yerine parçacıklar hareket ediyorsa (örnek olarak sabit bir diyafram aracılığıyla), bu olay elektroozmoz olarak adlandırılır. Elektroforez, kolloidleri, protein gibi, analiz etmek ve ayırmak veya elektron tüplerinde kullanılan kaplamaları biriktirmek için kullanılır. Kataforez kaplamanın aşamaları **Şekil 5.1**'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.1. Kataborez kaplama aşamaları.

5.3. Kataborez Kaplama Sürecindeki Temel Adımlar

5.3.1. Yüzey Hazırlama Prosesi

5.3.1.1. Yağ Alma

Yağ alma işlevi her türlü kirliliği uzaklaştırmak için yapılmaktadır. Kataborez kaplama hatlarında kullanılan alkali temizleyiciler, toz veya sıvı haldeki kimyasallardan oluşur. Sıvı kimyasallar genellikle yüzey aktif madde ayırıcı ve bileşenlerden oluşan iki ayrı paket üründür. Diğer yandan, toz halindeki ürünler tek bir paket üründür. Araç iskeletinin temizliği için kullanılan alkali yağ alma işlemleri standarttır. Bileşenlerin temel görevi, metal taneleri, kaynak kalıntıları gibi pigment ve inorganik kirliticileri metalden uzaklaştırmaktır. Yüzey aktif maddeler ise yağ, gres ve diğer organik atıkları metalden temizler.

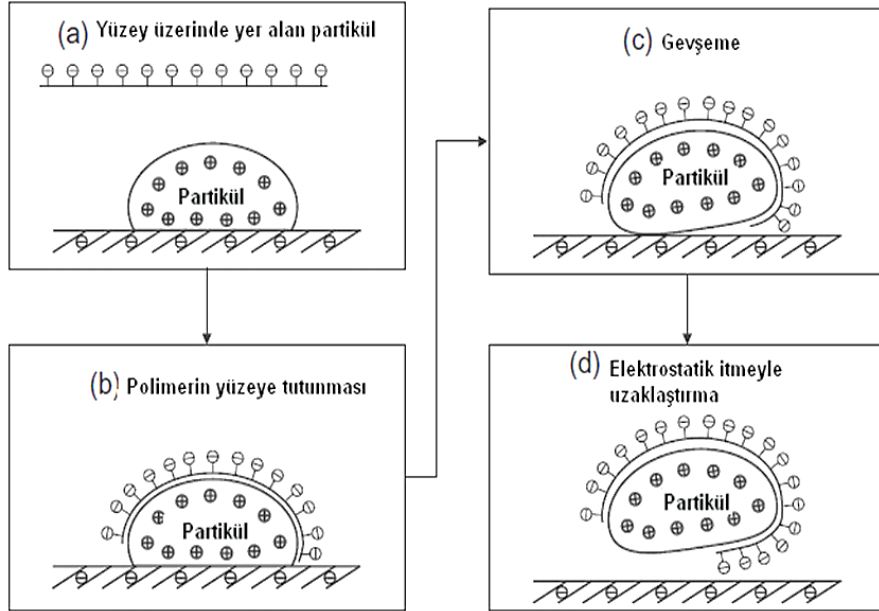
Alkali temizleyiciler içinde yaygın olarak kullanılan tipik bileşenler şunlardır:

- NaOH, KOH, Na₂CO₃, K₂CO₃: Alkaliliği sağlayıcılar
- Silikatlar: Partikül uzaklaştırma, inhibitör, tampon (buffer)

- Ortofosfat: Temizlik sağlama
- Yoğunlaştırılmış Fosfatlar: Yağ alma ve kompleks oluşumu
- Kompleks ajanları: Kompleks oluşturma

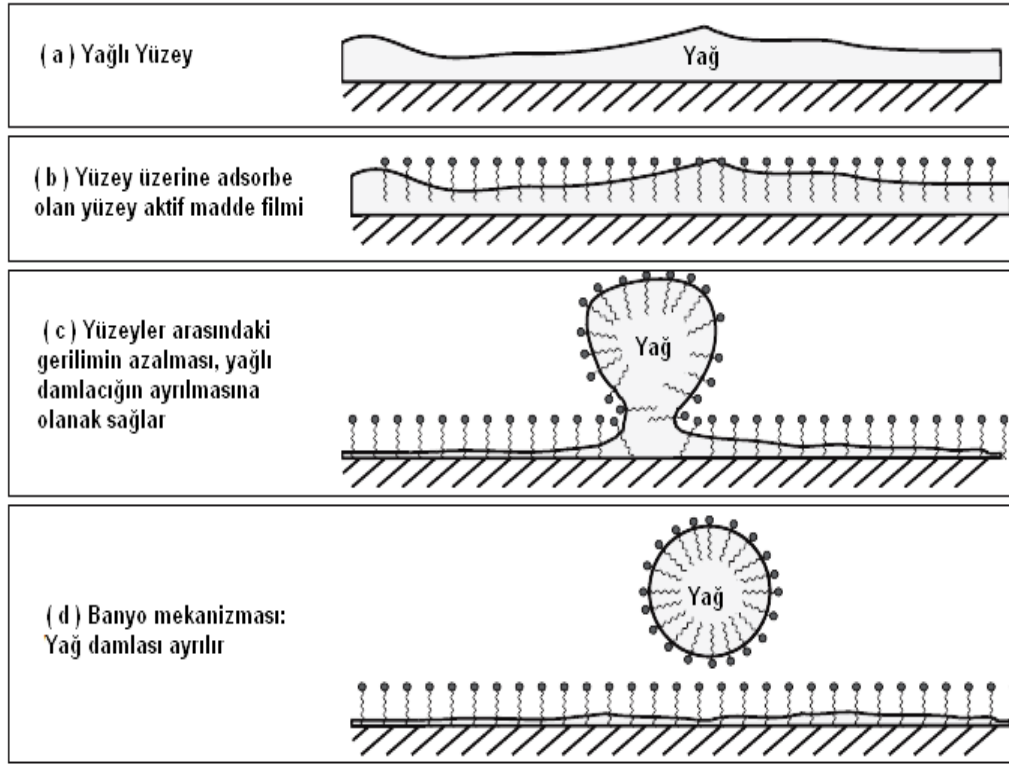
Yüzey aktif maddeler, hidrofilik ve hidrofobik gruplar içerir. Hidrofilik gruplar genellikle etoksi (EO) uzun zincirleri veya propoksi (PO) molekül zincirlerini içerir. Hidrofobik gruplar ise genellikle uzun alkil zincirleridir. Yüzey aktif maddeler, anyonik, katyonik, non-iyonik ve amfoterik yüzey aktif maddeler olarak sınıflandırılabilir (Can, 2019).

Kataforez kaplama proseslerinde çevresel uyumu kuvvetli olan çeşitli iyonik olmayan yüzey aktif maddeler yüzey aktif madde olarak tercih edilmektedir. Yağın ve partikülün yüzeyden ayrılma mekanizmaları, sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmiştir (Can, 2019).



Şekil 5.2. Partikülün yüzeyden ayrılma mekanizması

Kaynak: (Can, 2019).



Şekil 5.3. Yağın yüzeyden ayrılma mekanizması

Kaynak: (Can, 2019)

Hem sprey hem de daldırma yöntemi, yağ alma çözeltilerine etkin bir şekilde uygulanabilir.

Sprey Uygulamanın Avantajları:

- Kısa uygulama süresi sunar.
- Basit geometriye sahip parçalar için idealdir.
- Partikülleri uzaklaştırmak için oldukça etkilidir.
- Fırçalama işlemleriyle birlikte kullanılabilir.

Daldırma Uygulamanın Avantajları:

- Zor erişilebilen alanların mükemmel şekilde temizlenmesini sağlar.
- Sprey uygulamalara göre daha yüksek konsantrasyon ve uygulama süresi gerektirir.
- Büyük banyo hacmi sayesinde stabilitesi yüksektir.

- Yağ alma banyosunun kontrolü genellikle titrasyon yöntemiyle yapılır; toplam ve serbest alkalinite farklı titrasyon metotlarıyla belirlenir.

Alüminyum ve çinko kaplı çelik yüzeyler, alkali yağ alma banyolarında aşınabilir. Bu nedenle, borat ve silikat gibi inorganik inhibitörler, aşınmayı önlemek için kullanılır. Bu inhibitörlerin eksikliği veya yetersizliği, yerel aşınmalara ve beyaz lekelerin oluşumuna yol açabilir. Sonuç olarak hem spreyci hem de daldırma yöntemleri, farklı uygulama alanlarına ve parça geometrilerine göre avantajlar sunarak etkili yağ alma çözümleri sağlamaktadır.

5.3.1.2. Durulama

Durulama işleminin amacı metalin üzerinde birikmiş bulunan kimyasalları ve kirleri metalden arındırmak ve kimyasalların sonraki aşamalara aktarımını önlemektir. Eğer yüzeyde kimyasal kalırsa ilerleyen aşamalarda istenmeyen sonuçlar oluşabilir.

5.3.1.3. Aktivasyon

Aktivasyon, metal yüzeyinde oluşan kristal çekirdeklerin sayısını artırır. Bu işlem sonrasında birim alanda bulunan fosfat kristali sayısı artış gösterir. Bu işlem, yüzeyi düzgün yapıli kristallerle kaplayıp, uygulandığı alandaki fosfat kaplamanın ağırlığını azaltıp fosfatlama adımının verimini artırır.

Aktivasyon çinko fosfatlama adımından önce yapılmaktadır, bu demektir ki aktivasyon için pH'ı 7-11 arası olan titanyum orto fosfatların sulu dispersiyonları kullanılmaktadır. Titanyum fosfat aktivatörleri piyasada sıvı ve toz halinde bulunabilirler.

Sulu çözelti içerisinde bulunan kolloidler yuvarlak şekilli olup $\text{Na}_4\text{TiO}(\text{PO}_4)_2 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ formülüne sahiptir. Kolloidal parçacıklar dispersion uygulaması süresince metalin yüzeyine fiziksel olarak tutunmaktadır. Aktivasyonu tamamlanmış malzeme (aktif substrat) çinko-fosfat banyosu ile etkileşime girdiği zaman fosfat çözeltisi içerisindeki çinko iyonları ile titanyum fosfat üzerindeki sodyum iyonları arasında iyon alışverişi olur. İyon alışverişinde bulunan parçacıklar çinko fosfat kristalleri için çekirdekleşme ajanı olarak rol almaktadır. Yüzeye uygulanmış aktivasyon sayesinde fosfat kaplamanın çekirdekleşme hızı ileri seviye artar.

Aktivasyon banyosunun etkinliği sahip olduğu işlem büyüklüğünden bağımsız olarak zamana azalır. Ayrıca, ürünün içeriğine bağlı olarak da değişmektedir. Titanyum fosfat kolloidi iki ve üç yüklü katyonlarla (özellikle Ca^{2-} ve Mg^{2-} iyonları) indirgeniği için negatif yüklüdür. Aktivatörler yukarda bahsedilen katyonlarla kompleks oluşturması için derişik polifosfatlar

içerir, bu sayede iki değerlikli iyonlarla indirgenme oranı azaltılmış olur. Aktivasyon banyolarının kurulmasında saf su kullanılması ve kayıp durumunda aynı kalitede su ile eski durumuna getirilmesi önerilir. Aktivasyon banyosu belli zaman aralıklarında dörtte biri oranında atılıp kimyasal ilavesi yapılmalı veya banyo baştan tekrar kurulmalıdır. Bu işlemi yapmadan önce aktivatör ürününe, banyo içeriğinin ideal durumundan sapma miktarına, hedeflenen kristal boyutu ve kaplama kütlelerini göz önünde bulundurarak planlama yapılmalıdır.

Sıvı aktivatör ürünler tank içerisine direkt olarak eklenmektedirler. Akışkanlığa karşı yüksek dirençli olduklarından dolayı dozajlama işlemi özel pompalarla yapılmalıdır. Toz aktivatörler ise karıştırma tanklarında %0,5-1'lik olarak hazırlanır ve içerisinde ürün olan aktivasyon banyosunun içine dozajlanır. Titanyum fosfat çözeltisinin çökelti oluşturmasının önüne geçmek için aktivasyon banyosu sürekli karıştırılmalıdır. Bu banyolarda karıştırma işlemi iki şekilde gerçekleşebilir:

Hava karıştırılmalı ve pompa ile karıştırma.

Karıştırma sırasında karıştırma hızı doğrudan fosfat kristalinin yapısını etkilediğinden karıştırma hızı önem arz etmektedir. Pompa kullanılarak karıştırma yapılıyorsa banyo dönüş sayısı saatte en fazla beş dönüş olmadır. Hava ile karıştırma işleminde ise havanın basıncı 3-5 bar arasında olmalıdır (Can, 2019).

5.3.1.4. Fosfatlama

Kataforez boya proseslerinin yaygınlaşmasıyla beraber çinko fosfatlama metal bitirme endüstrisinde talep edilmeye başlanmıştır. Bunun sebebi kullanılabilir diğer materyallere göre (örneğin demir fosfatlama) daha yüksek bir korozyon direnci sağlaması ve boyanın yapışmasını kolaylaştırmasıdır. Bu işlemin yapılacağı iş parçası çeşitliliği oldukça geniştir. Alüminyum, galvanize, DKP (düşük karbonlu sıcak çelik) malzemeler üzerinde kullanılabilir. Tipik bir çinko fosfat banyosu şunları içermektedir:

- Asit içinde çözülmüş metal iyonları (Çinko, nikel, mangan, kobalt)
- Fosforik asit
- Hızlandırıcı görevi gören oksidanlar (nitrik asit, sodyum nitrat)

Metal iyonları, tüm yüzey boyunca kaplamaya dahil olmaktadır. Bu metal iyonları çinko (Zn^{+2}) iyonunun yerini alarak $Zn_2Me(PO_4)_2$ oluşturur. Burada Me; nikel, kobalt, mangan gibi

metalleri ifade etmektedir (Gül vd., 2024; Usta, vd., 2024). Çözelti içerisindeki çözülmüş metal fosfatları zamanla kaplamanın bir parçası olmaktadır, bu sebeple banyo kontrol değişkenleri çinko fosfatlamada demir fosfatlamaya göre daha çok kontrol edilmelidir. Fosfat banyosu için yapılan ölçümler şunlardır:

- Serbest asit ölçümü
- Hızlandırıcı ölçümü
- Toplam asit ölçümü

Bu ölçümler zor değildir ve hata oranı düşüktür, anca fosfat kaplamayı tam olarak açıklayamazlar. Kristal boyutu, görünüş, porluluk oranı, kaplanma yoğunluğu gibi bileşenler prosesin verimliliğini yorumlamaya katkı sağlar. Kaplamanın işlevselliğini anlayabilmek için bu işlemlerin hepsinin yapılması gerekmektedir, yoksa işlevsellik tam olarak anlanamamaktadır (Özçanak, 2008).

5.3.1.5. Durulama

Durulama, fosfatlama banyosu sonrası ileriki adımları etkileyebilecek istenmeyen maddelerin (çamur, kimyasal gibi) kaldırılması ve materyal üzerinden temizlenmesidir. Bunun gerçekleşmediği durumda pasivasyon banyosunun verimi azalmaktadır.

5.3.1.6. Pasivasyon

Korozyona karşı dayanıklılığını artırmak için fosfat kaplanmış metale ve kaplanmış metal saca pasivasyon uygulanmaktadır. Pasivasyon banyosu içerisinde Cr^{4+} ve Cr^{3+} değerlikli iyonları veya kromsuz çözeltileri bulunur. Eskiden Cr^{4+} da yoğun olarak kullanılırken toksikliği sebebiyle onun yerini Zr kullanılan pasivasyonlar almıştır (Zimmermann vd., 2003).

Güney Kore ve Japonya'da bulunan otomatik üreticileri pasivasyon işlemi yerine ard arda birden çok kere saf su ile ürünü yıkamaktadırlar. Günümüzde Avrupa'daki otomatik sektöründe de bu yöntem yaygınlaşmıştır ve pasivasyon adımı pasif bir duruma geçmiştir.

5.3.1.7. Deiyonize Durulama

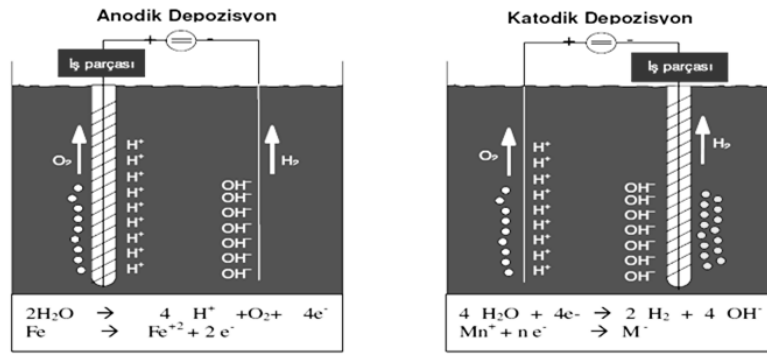
Bu işlemin asıl amacı kataforez banyosuna başka banyolardan iyon (kalsiyum, magnezyum gibi) geçişini engellemektir. Eğer bu iyonlar kaplama banyosunda fosfat kristalli yüzeylerde kalabilir ve durum kaplamanın yapışma performansını doğrudan etkilemektedir. Hatlardaki deiyonize suyun iletkenliğinin 20 °C de 15–50 μ S/cm arasında bulunması

gerekmektedir. İstenen iletkenliğin düşük seviyededir; çünkü bu sayede durulamalar ve fosfatlama sırasında taşınan kalsiyum ve magnezyum gibi iyonların banyodan çıkmasını ve katofrez banyosuna geçişini engelleyip olası tuzlaşma tepkimelerini engelleyip boyanın yapışma verimini yükseltmektir (Can, 2019).

5.3.2. Elektro-kaplama Prosesi

Bu yöntem iki farklı şekilde uygulanabilmektedir.

1. Boyanacak malzeme devrede anotsa bu yöntem “anofrez” olarak adlandırılır. Kaplama bu şekilde elde edilmişse "anodik elektro kaplama" (AED) ya da "anoforetik elektro kaplama" olarak adlandırılır (Şekil 5.4).
2. Boyanacak malzeme elektrokimyasal pilin katoduna yerleştirilirse bu işleme “kataforez” sonucunda elde edilen kaplamaya ise "kataforetik elektro kaplama" veya "katodik elektro kaplama" (CED) denir (Özçanak, 2008).



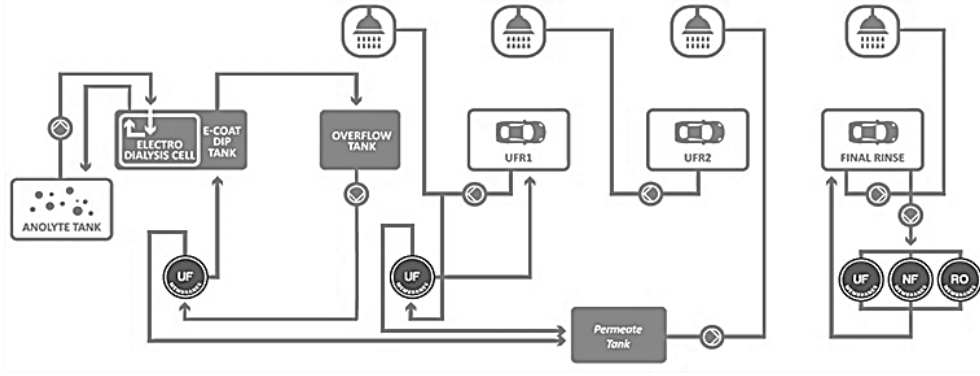
Şekil 5.4. Elektro Kaplama Uygulamaları

Kaynak: (Özçanak, 2008).

- AED: Kaplanan parça anottadır. Reçine sisteme katyon verir.
- CED: Kaplanan parça katottadır. Reçine sisteme anyon verir (Özçanak, 2008).

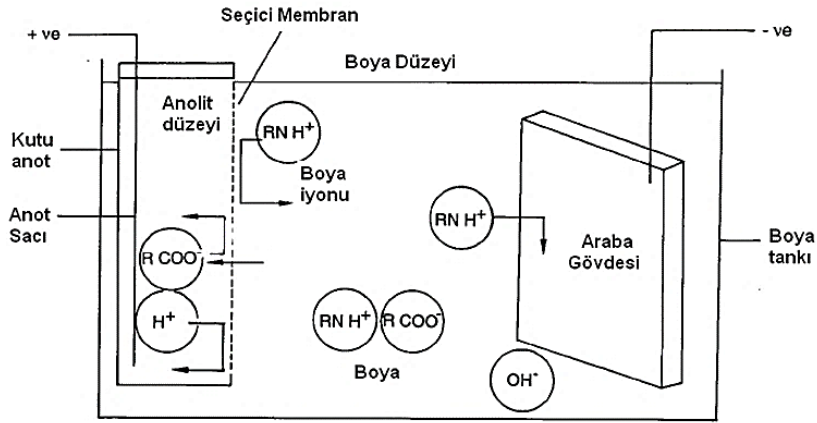
5.3.2.1. Kataforez Kaplama Mekanizması ve Banyosu

Kataforez kaplama prosesi şematik olarak aşağıda görüldüğü gibidir (Şekil 5.5). Bu proseste gerçekleşen reaksiyonlar ise Şekil 5.6’da sunulduğu gibidir.(Satake, 1990).



Şekil 5.5. Katalofrez kaplama prosesi

Kaynak: (Stm Coatech, 2018).



Şekil 5.6. Katalofrez kaplama banyosunda gerçekleşen reaksiyonlar

Kaynak: (Satake, 1990).

Katalofrez banyosunda katot ve anotta gerçekleşen reaksiyonlar şu şekildedir.

- Film oluşturucunun çözülmesi,



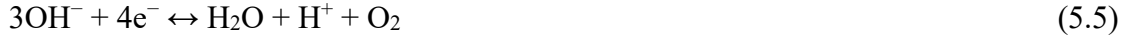
- Elektroliz,



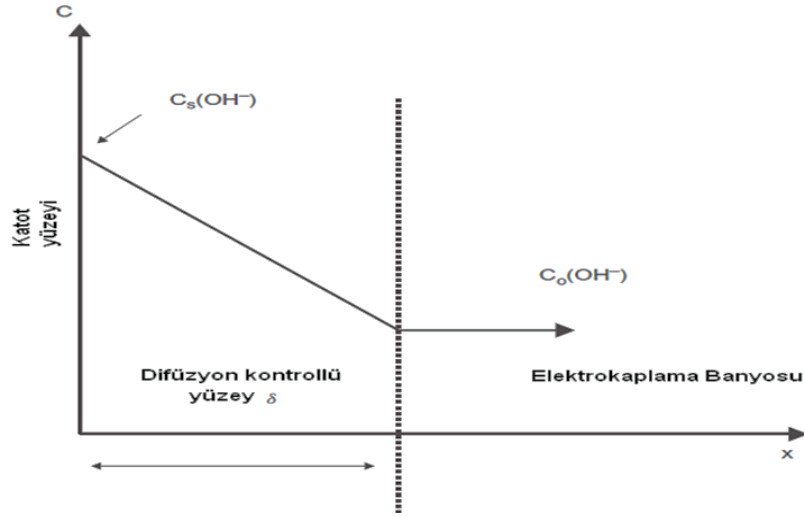
- Katottaki Dönüşüm,



- Anottaki Yükseltgenme



Difüzyon kontrol yüzeyindeki pH değişimi yüksek akım ve düşük akım bölgeleri oluşturarak kaplama kalınlığında farklılıklar oluşturduğu için elektro kaplama prosesleri için en önemli faktördür. Difüzyon kontrol yüzeyinde pH'ın değişimi **Şekil 5.7**'deki gibidir:



Şekil 5.7. Kaplama süresince elektrottaki OH⁻ konsantrasyonu değişimi

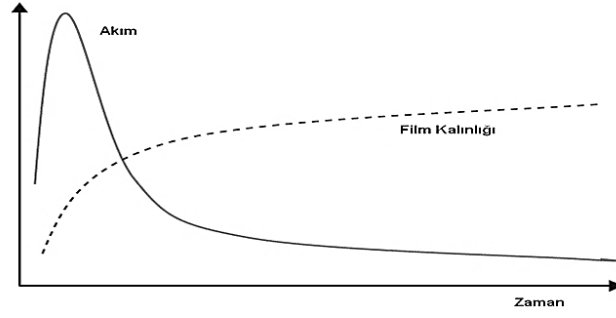
Kaynak: (Satake, 1990).

Elektro kaplama proseslerinde anot ve katotta oluşan temel reaksiyonlar Beck'in araştırmalarıyla tespit edilmiştir. Fick ve Faraday kanunlarına dayanarak elektrotun pH'ı ve Elektrottaki C_H⁺, C_{OH}⁻ derişimleri hesaplanabilir (Satake, 1990).

Kataforez banyosuna uygulanacak gerilim aşağıdaki değişkenlerle belirlenebilir:

- Akımın yoğunluğu
- Elektrotun alanı
- Elektrotların birbirine olan uzaklığı

Bir noktadan sonra akım azalmaktadır. Akımda azalma filmin öz direncine, artış işe iyon derişiminin oluşturduğu kritik düzeye bağlı olarak değişir. **Şekil 5.8**'de kataforez kaplamada akımın zamana bağlı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8. Kataforez kaplamada akım – zaman eğrileri

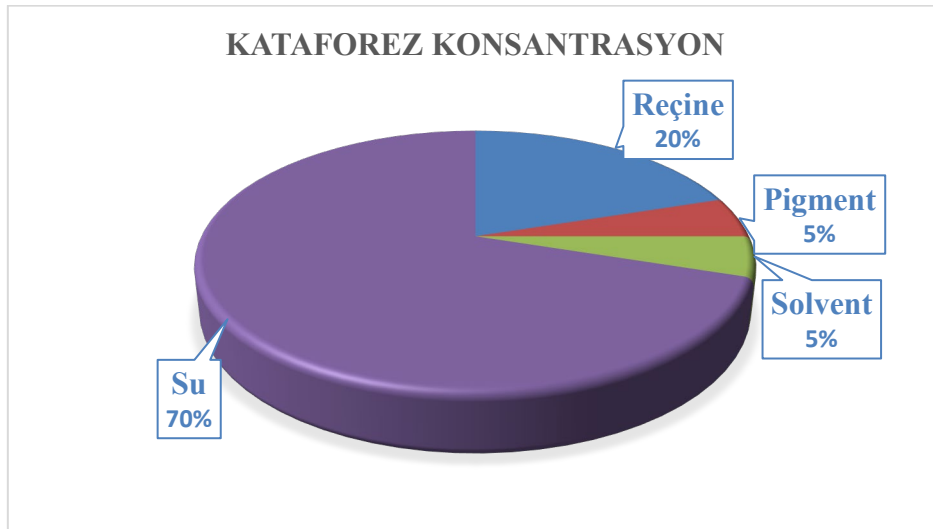
Kaynak: (Satake, 1990).

Kataforez kaplama banyolarında aşağıdaki kontroller yapılmaktadır:

- katı miktarı,
- kül miktarı,
- solvent miktarı,
- sıcaklık,
- pH

Bu kontroller yapılırken ve banyo tasarlanırken banyonun sirkülasyon hızı da bir etken olarak değerlendirilmelidir (Satake, 1990).

Kataforez banyosunun içerisinde bulunan kimyasalların yüzdeleri **Şekil 5.9'**da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.9. Kataforez banyosu içerisinde bulunan kimyasallar

Kaynak: (Özçanak, 2008).

Reçine boya filminin en önemli parçası olup boyadan sağlanan UV dayanıklılığı ve korozyon direnci özelliklerini gerçekleştirir. Grafikte görülen kimyasalların her biri üründen istenen nitelikleri gerçekleştirmek için (çevreyle etkileşimi, kaplama kalitesi, maliyet) boyanın üreticileri tarafından ayarlanır. Boyalar genellikle akrilik veya epoksidir, bazı durumlarda her ikisini de içerebilir. Epoksi polimerlerinin kimyasal dayanıklılığı ve korozyon direnci yüksektir, öte yandan akrilik polimerleri ise renk kontrolü ve UV dayanıklılığı ile ön plana çıkarlar. Belirtilen polimerlerin birleşimi de özelliklerinin bir karışımını sunar. Birleşim olarak boyamsı maddelerden çok bir farkları yoktur ancak ED hatlarında kullanılan ürünlerin reçinesi iyonlaşabilen reçineler olduğundan diğerlerinden daha farklıdır .

Renk pigmentleri boya filminin parlaklık ve rengine etki eder ve korozyon dayanıklılığı sağlar. Dolgular boyanın doldurma gücünü artırır ve kimyasal yapısı sebebiyle kaplama reaksiyonunu hızlandırır. Ayrıca dolgular kataforez sistemindeki boru, vana gibi parçalara pasivize eder ve korozyona karşı korunum kazandırmış olur. Kataforez boyada kullanılan pigmentler organik ya da inorganik olabilir. En yaygın kullanılan pigmentler titanyum oksit ve karbon siyahıdır. Dolgular ise silikat bileşikli ya da inorganik olabilir. Silikat bileşikleri yüzeye düzgün bir görünüş verirler (Özçanak, 2008).

Kataforez hattında solvent olarak:

- saf su
- bütül glikol
- fenoksipropanol bulunur.

Fenoksipropanol banyoya reçineden, bütül glikol ise pigment pastadan gelir. Ayrıyeten çevresel etkilerden azalan solvent ve su besleme yolu ile banyoya ilave edilir (Özçanak, 2008).

Solventlerin miktarı banyoda çok düşük seviyede olmasına rağmen önemleri çok fazladır. Örneğin bütül glikol sayesinde boya metale daha iyi nüfuz eder ve yüksek film verir. Ayrıca reçine ve pigment pastanın çözünmesine yardımcı olur. Fenoksipropanol ise içerisinde bütül glikol ve su olan özel bir solventtir ancak çözünürlüğü bütül glikol kadar yüksek değildir. Fenoksi reaksiyonları film yapısının içinde gerçekleşir ve pürüzsüz bir görünüm sağlayarak yüzey yayılımını sağlar. Normal ve fenoksi katkılı filmin karşılaştırılması aşağıda **Şekil 5.10**'da görüldüğü gibidir (Özçanak, 2008):



Şekil 5.10. Fenoksi katkılı boya filmi görünümü

Kaynak: (Özçanak, 2008).

Fenoksinin suda çözünürlüğü düşüktür. Bu sebeple temiz ultrafiltrasyon tankından ya da reçine pompasından banyoya verilmelidir (Özçanak, 2008).

Elektro kaplama banyosunun en büyük bileşenine banyonun %80-%90'ını kapsayan deiyonize su denilebilir. Deiyonize su, kataforez banyosunun içinde kimyasallar için taşıyıcı rolü üstlenir.

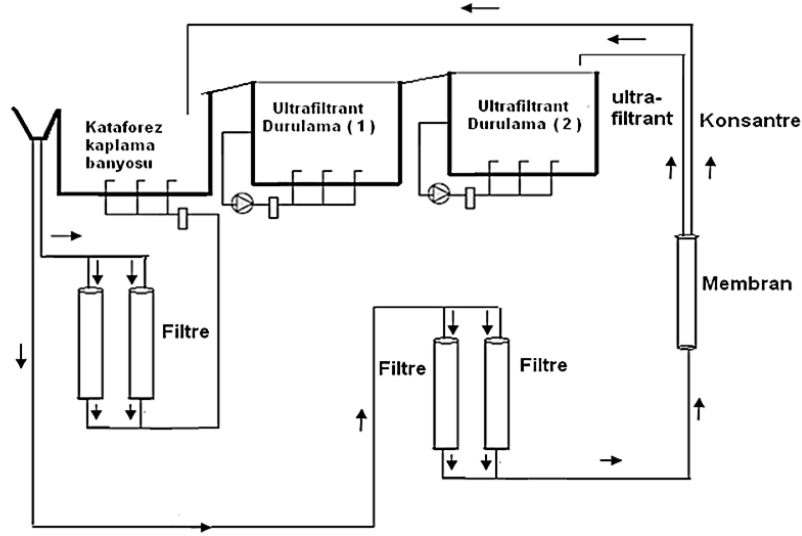
Kataforez kaplama tankının içinde bulunan boyanın akış hızı, 0,3 m/s den daha hızlı, sabit akışı sürdürecektir şekilde olmalıdır. Kaplama malzemelerinin ise borular ve tank üzerinde hızı 3,0 m/s'den fazla olmamalıdır. Genel olarak toplam tank hacmini saatte maksimum 5 kere hareket ettirecek şekilde akış ayarlanmalıdır. Akış hızı şunlara etki etmektedir:

- Boyanın homojenleşmesi
- Kaplama için gerekli ısı transferinin sağlanması

Sıcaklık ve pH kataforez kaplama kalınlığını etkileyen en önemli parametrelerdendir (Satake, 1990). Akış hızının ideal durumda olmaması kaplamayı etkiler. Örneğin akış hızı yüksekse kaplama kalınlığı azalır (Satake, 1990).

5.3.2.2. Ultrafiltrasyon Banyoları

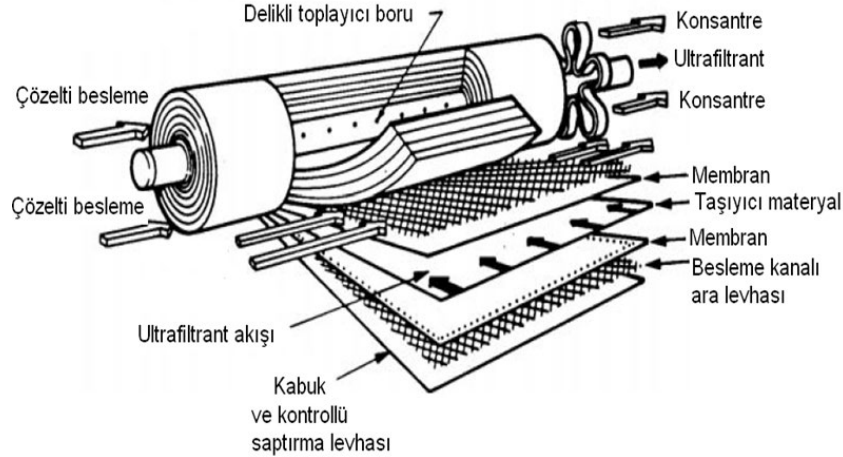
Ultrafiltrasyon bir çeşit ayırma sürecidir. Membranlar 30-300 nm arası tanecik boyutuna sahiptir. Kataforez kaplamalarda su, çözülmüş solventler, elektrolitler gibi maddeler membrandan geçip kataforez boyadan ayrılmaktadır. Bu ayrılmadaki maddeler permeate veya ultrafiltrant olarak adlandırılmaktadır. Membranlar sayesinde permeate ve boya birbirinden ayrılmaktadır. Tipik bir ultrafiltrasyon sisteminin çalışma prensibi **Şekil 5.11**'de görüldüğü gibidir (Can, 2019):



Şekil 5.11. Ultrafiltrasyon çalışma prensibi

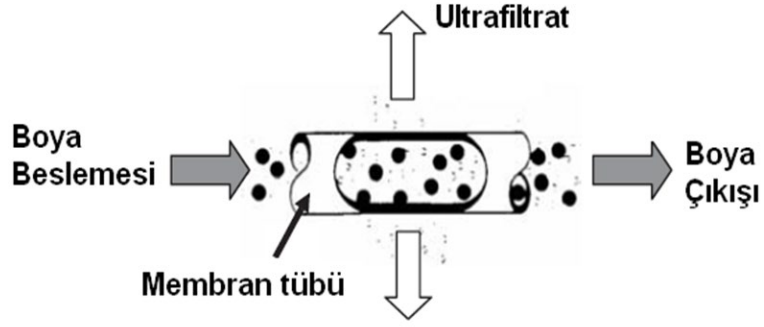
Kaynak: (Can, 2019).

Kataforez kaplama süresince elektrokimyasal prensiplerle metale tutanamamış boya ultrafiltrant durulama 1 ve ultrafiltrant durulama 2 banyolarına taşınmaktadır bu sebeple kataforez hattı çalışırken ultrafiltrat banyolarından katı miktarı sürekli artar. Boya kaybı olmaması ve maksimum verime sahip olabilmek için ultrafiltrat durulama 1 banyosundaki katı miktarının %1-2 aralığında, ultrafiltrat durulama 2 banyosunda ise %0.5-1 aralığında olması gerekir. Katı miktarını bu seviyelerde tutabilmek için membranın ve prosesin **Şekil 5.12** ve **Şekil 5.13**'de görüldüğü gibi olması gerekmektedir.



Şekil 5.12. Kataforez kaplamanın ultrafiltrasyon biriminde kullanılan özel sarımlı membranlarının konfigurasyonu

Kaynak: (Can, 2019)

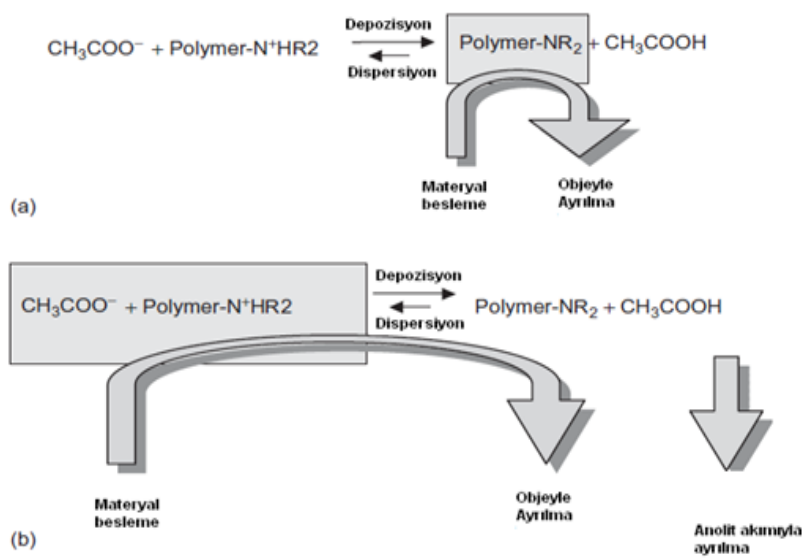


Şekil 5.13. Boru şeklindeki membranla ultrafiltratın ayrılma prosesi

Kaynak: (Can, 2019).

5.3.2.3. Anot Hücreleri

Anot hücreleri katarforez banyosunda artık gerek duyulmayan asitleri uzaklaştırmak için kullanılır. Genel bir anot hücresi, plastik bir kutu ve bu kutu içerisinde bulunan paslanmaz çelik ve kutunun üstünü kaplayan anyon değiştirici membrandan meydana gelir. Bu membran proses süresince anot hücresine asit geçişine tek taraflı olarak izin verir. Anot hücresindeki membran katyonları geçirmez. Membrandaki ayırma işlemi Şekil 5.14’de görüldüğü gibidir.

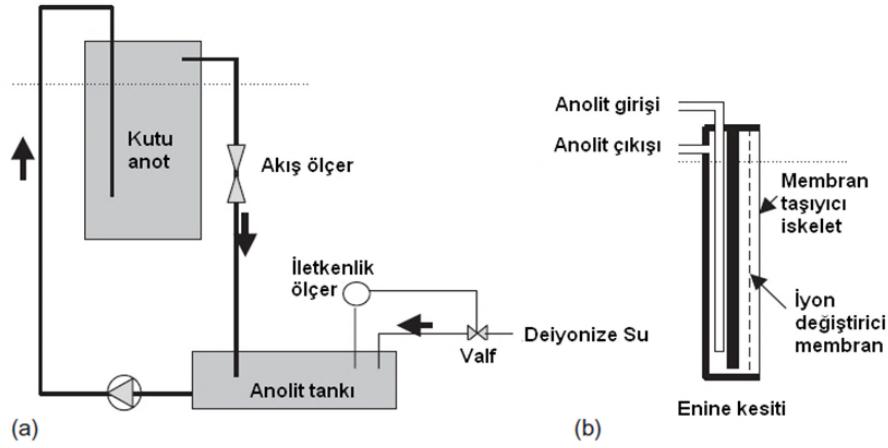


Şekil 5.14. Katarforez kaplamanın yenilenme proseslerindeki iki çeşidinin asit baz dengesi

a) Alt nötralizasyon b) Tam nötralizasyon

Kaynak: (Can, 2019).

Anot hücresinde kullanılan sac, DIN şartnamelerine göre 1-4404,1-4429 veya 1-4439 gibi klor iyonuna dayanıklı yüksek derece paslanmaz çelik alaşım olmalıdır. Ömrü anot alanı boyunca geçen akıma bağlıdır (Şekil 5.15) (Can, 2019).



Şekil 5.15: (a) Anolit Devresi (b) Kutu Anot

Kaynak: (Can, 2019).

Anolit sıvısının iletkenliğinin 700 ve 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında olacak şekilde ayarlanması gerekir. İletkenlik referans aralığının üstüne çıktığında valf açılır ve deiyonize su devrenin içine girer. Sistemin rutin çalışmasını devam ettirmesi için hacimsel akışın dakikada en az 4 litre olması gerekmektedir. Akışmetreler ve gözlemle bu durum kontrol edilebilmektedir.

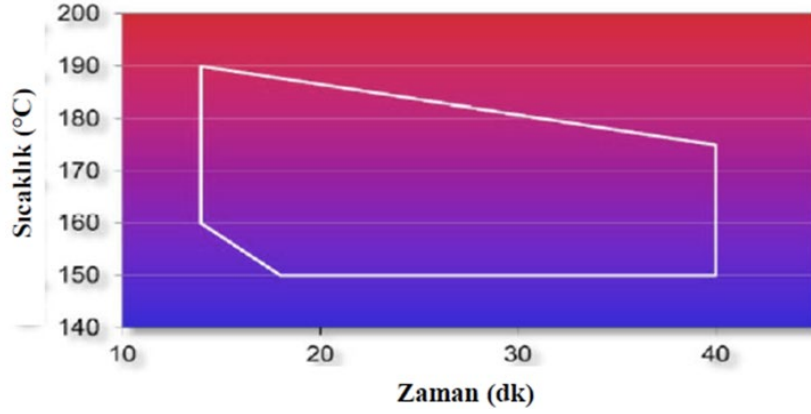
5.3.3. Kürlenme Prosesi

Kataforez havuzundan çıkmış malzemeler son yıkama işlemlerinin ardından direkt olarak pişirme fırınına gönderilirler. Kullanılan fırınlar her ne kadar IR fırınlara kıyasla düşük enerji verimliliğine sahip olsa da kürlenme aşaması için zorunludur .

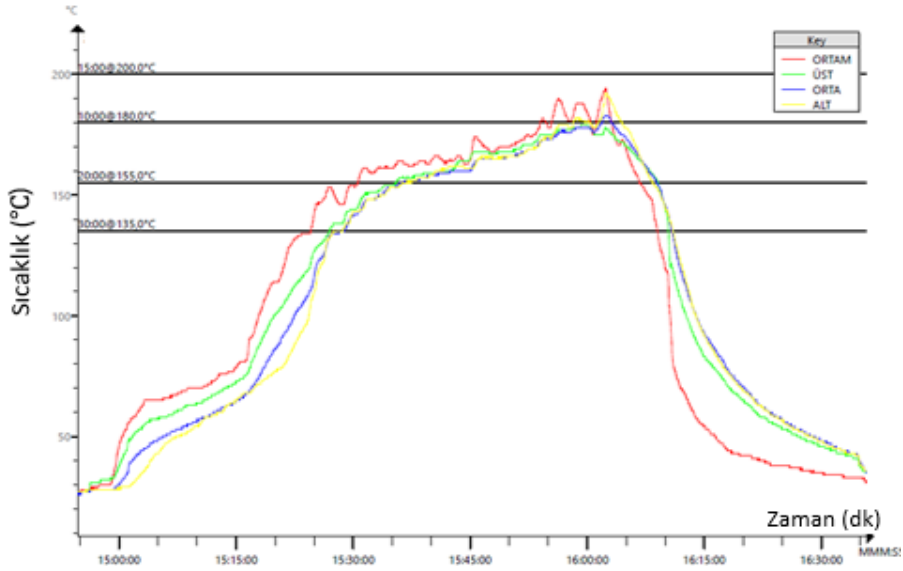
Günümüzde kullanılan fırınlara “A” sınıfı fırınlar denir. Bu fırınlara giren malzemeler ilk olarak yükselir, fırın boyunca sabit ilerler ve çıkış bölgesinde başlangıç yüksekliğine geri döner. Bunun avantajı sıcak havanın hep yukarıda hareket etmesi prensibini kullanarak sıcak havanın kaçmamasının sağlanması ve enerji kaybını minimize etmektir .

Malzemelerin fırındaki yüksekliğine bağlı olarak sıcaklık-zaman eğrileri farklılık göstermektedir. Kataforez kaplamanın teorik fırınlanma diyagramı Şekil 5.16 ve pratikte gerçekleşen fırınlanma diyagramı Şekil 5.17 birbirinin aynısı değildir. Bu sebeple boya fırın sıcaklığı kaydedicisinin (termograf) teorik sonuçları baz alınarak pratik sonucu için sıcaklık ve hız değerleri ayarlanmalıdır.

İstenen film performansını garanti altına almak için bu verileri sürekli kontrol etmek ve tüm noktalardaki metal sıcaklığına ulaşabiliyor olmak gerekmektedir (150 °C'nin üzerinde minimum 15 dakika).



Şekil 5.16. Kataforez kaplamanın ideal teorik kürlenme diagramı.



Şekil 5.17. Gerçekte ölçümü alınmış fırın sıcaklık-zaman diagramı.

Fırının ısısı için kullanılan kazan genellikle petrol ya da doğalgaz kaynaklıdır. Isı eşanjörleri ile ısı aktarımı sağlanır. Doğalgaz kullanılmakta ise yakıt gazları direkt fırının içerisine de verilebilir. Ancak bazı durumlarda bu işlemin film performansında adezyon yetersizliği gibi verimi düşürücü etkiler yarattığı gözlemlenmiştir.

5.4. Kataforez Kaplamanın Uygulama Alanları

Otomobil üreticileri, kataforez kaplama tekniğini şasi, tampon ve kapı kolları gibi çeşitli metal parçalar üzerinde koruyucu ve dekoratif bir kaplama sağlamak için yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bu işlem, kaplamanın yüzeye eşit şekilde dağılmasını ve mükemmel bir yapışma sağlanmasını temin ederek, zorlu hava koşullarına ve korozyona dayanıklı bir yüzey elde edilmesini mümkün kılar. Kataforez kaplama, otomobil gövdeleri ve parçaları için tercih edilen bir yöntemdir, çünkü bu kaplama aracılığıyla otomotiv parçalarının ve araba gövdesinin dayanıklılığı artırılır. Sonuç olarak, kataforez kaplama, araçların ömrünü uzatırken kullanım verimliliğini de artırmaktadır (Yargıç vd., 2023).

Denizcilik endüstrisi de ayrıca gemi gövdelerinin, pervanelerin ve diğer su altı bileşenlerinin korunması için kataforez kaplamadan yararlanmaktadır. Kaplama, tuzlu suyun neden olduğu korozyona karşı bir bariyer oluşturarak metalin bozulmasını önler ve ekipmanın ömrünü uzatır.

Kataforez kaplanmış malzemeler koruyucu ve dekoratif özellikleri nedeniyle mimari ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaatlarda kullanılan alüminyum alaşımlarına dayanıklılık ve korozyon direncini artırmak için kataforez kaplama yapılması buna bir örnektir.

Baskılı devre kartları ve diğer elektronik bileşenler nem, ısı gibi çevresel etkenlerden korunmak amacıyla kaplanır. Kataforez kaplama, hassas elektronik bileşenlerin korozyona karşı korunmasını sağlayarak ömrünü uzatır ve işlevselliğini korur (Kaykaç, 2022).

6. FOSFATLAMA ALTERNATİFLERİ

6.1. Kromsuz

Alüminyum ve diğer hafif alaşımlarda kromsuz kaplamalar, boyaların ve verniklerin yüzeye daha iyi tutunmasını sağlayarak korozyona karşı koruma sağlar. Geçmişte bu kaplamalar, altı değerlikli krom bazlı Cr^{+6} kaplamalarla yapılmaktaydı, ancak bu yöntemler toksik ve çevreye zararlı olması nedeniyle artık kabul edilemez hale gelmiştir. Bu durum, alüminyum alaşımlarının yapısal uygulamalarda kullanılmadan önce krom içermeyen (chrome-free) yüzey işlemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. (Salman vd., 2007; Zhao vd., 2001). Kromsuz kaplamalar; çevre dostu, tek bileşenli, korozyona karşı dirençli ve artırılması daha kolay olup daldırma şeklinde kullanılabilen sıvı bir kimyasaldır. pH aralığı 2.4-3.2 arasındadır (Berger vd., 2007).

Kromsuz kaplama tipleri

- Zirkonyum bazlı kaplamaları
- Titanyum bazlı kaplamaları
- Silanyum bazlı kaplamaları
- Seryum bazlı kaplamaları

Geleneksel krom bazlı kaplamalara alternatif olarak, özellikle endüstride yaygın olarak kullanılan altıflorozirkonyum/altıflorotitanyum (Ti/Zr) bazlı işlemler (Andreatta vd., 2007; Nordlien vd., 2002; Smit vd., 2004; Verdier vd., 2006) ve nadir toprak elementleriyle yapılan işlemler geliştirilmiştir. Ancak, Ti/Zr bazlı kaplamalar, zayıf korozyon direnci ve kaplamanın renksiz oluşu gibi dezavantajlara sahiptir. Bu durum, üretim hattında işlenmiş ve işlenmemiş yüzeylerin ayrımını zorlaştırmakta ve dolayısıyla bu kaplamaların endüstriyel uygulamalarını sınırlandırmaktadır.

Bu zorlukları aşmak amacıyla, önceki bir çalışmada Ti/Zr çözeltisine tanen asidi ekleyerek altın renkli bir kaplaması elde edilmiştir. Tanen asidi, polifenol yapısında bulunup orto pozisyonunda yer alan hidroksil (OH) grupları sayesinde metal iyonlarıyla etkileşime girerek metal-organik kompleksler oluşturabilir. Bu özellikleri nedeniyle tanen asidi, metal yüzeylerinde korozyon direncini artırmak için kullanılmaktadır (Chen vd., 2008; Singh ve Yadav, 2008). Son yıllarda bilim insanları, alüminyum ve alaşımlarında dönüşüm kaplamaları oluşturmak için tanen asidine artan bir ilgi göstermektedir. Ancak bu kaplamaların alüminyum alaşımlarındaki oluşum mekanizması halen tam olarak anlaşılmamıştır ve endüstriyel

uygulamalarda kullanılabilir kadar hızlı oluşmamaktadır. Bu nedenle alüminyum yüzeyine uygulanan fosfatlama alternatifini uygulamaların araştırılması gerekmektedir.

Silan bazlı kaplamalar, metal yüzeylere güçlü yapışma sağlayarak ve çapraz bağlı polimerler oluşturarak güçlü kaplamalar oluşturur. Başlangıçta yapışmayı artırmak için geliştirilen bu teknoloji, zamanla metallerin korozyona karşı korunması amacıyla da kullanılmıştır. Silan kaplamalarının uygulanması, metal yüzeylerde korozyon direncini önemli ölçüde artırır ve bu sistemde, kromat bazlı kaplamaların yerine yüksek çapraz bağlı silan polimerleri kullanılır. Çeşitli silan bağlayıcı ajanlar, çelik ve alüminyum alaşımları üzerinde yüzey işlemi olarak kullanılmaktadır (De Graeve vd., 2007; Montemor ve Ferreira, 2007; Zucchi vd., 2007).

Seryum bazlı dönüşüm kaplamaları, alüminyum alaşımlarına uygulanan ve metale üstün özellikler kazandıran bir yüzey işlem yöntemidir. Bu kaplamalar, seryum elementinin alüminyum yüzeyinde oluşturduğu bir reaksiyon tabakası sayesinde, metali korozyona karşı korur, boya tutunmasını artırır ve yüzeye belirli bir estetik görünüm kazandırır. Geleneksel krom bazlı kaplamalar kanserojen olarak nitelendirildiği için alternatif olarak geliştirilmişlerdir (Twite ve Bierwagen, 1998).

6.2. Nano kaplamalar

Nanokaplama, bir substrat üzerine 100 nm kalınlığında ince bir tabakanın yerleştirilmesi işlemidir ve belirli özellikleri geliştirmek veya yeni işlevsellik kazandırmak amacıyla yapılır. Geleneksel kaplamalarda kaplama katmanı ile altlık arasındaki uygun yapışmama, az esneklik, dayanıklılık kaybı, zayıf aşınma direnci ve düşük dayanıklılık sorunları olabilmektedir. Nano boyutlarda gerçekleşen çıplak gözle görülemeyen tepkimelerle beraber nano kaplamaların yüzeylere düzgünce sıralanması ile verimli nano kaplamalar elde edilebilir (Bagal vd., 2018; Tamilselvi vd., 2015).

Sol-jel kaplama, bir sol-jel işlemi ile üretilen ince ve homojen kaplamalardır. Sol-jel, genellikle metal oksitler (örneğin, silika, titanyum dioksit, alüminyum oksit gibi) veya diğer inorganik bileşiklerin su, alkoller veya asidik çözeltiler ile kimyasal reaksiyonlara girerek jel haline gelmesiyle elde edilir. Bu kaplamalar, yüksek sıcaklık, enerji veya vakum koşulları olmadan oda sıcaklığında uygulanabilir. Sol-jel teknolojisi, nanoteknolojiyle de ilişkili olup, çok ince kaplama ve yüksek yüzey özellikleri sunar. Sol-jel kaplamaların iletkenliğini arttırmak için SiO₂ ve ZnO kullanılır.

7. LİTERATÜR

Chen ve ark. AA6063 alüminyum alaşımı üzerine, krom içermeyen potasyum hekzaflorozirkonat (K_2ZrF_6) bazlı çözelti oda sıcaklıklarında pasivize etmişlerdir. Elde edilen kaplama mikrokristalin yapıya ve gri renge sahiptir. Mikro kristalin yapı, mekanik kilitlerin oluşması nedeniyle boyama işlemi için istenilen bir özelliktir ve bu durum boyanın yüzeye daha iyi yapışmasını sağlamaktadır. Bu durum geleneksel zirkonyum ve titanyum kaplamalara göre büyük bir avantaj sağlar, çünkü bu kaplamalar organik boyalara çok iyi yapışma sağlayamaz. Aynı zamanda kaplamanın gri renkte olması kaplama kalitesinin görsel olarak değerlendirilmesini sağlar. Bu durum da renksiz olan zirkonyum ve titanyum bazlı kaplamalara göre önemli bir avantajdır (Chen vd., 2011).

Zhang ve ark. magnezyum-lityum alaşımı üzerine fosfat-permanganat çözeltisi ile kromsuz bir kaplama gerçekleştirilmiştir. Korozyon direncinin gözlemlenmesi için kaplamasız alaşım, kromat kaplamalı alaşım ve fosfat permanganat kaplamalı alaşım %3,5 NaCl içeren çözeltiye daldırılarak daldırma testi yapılmıştır. 1 saatin sonunda kaplamasız alaşımın tüm yüzeyinde korozyon ürünleriyle kaplandığı, kromat kaplamasında ise noktasal korozyonun olduğu ancak, fosfat-permanganat kaplamasında yoğun bir yapı olduğu ve korozif ortama karşı bir bariyer işlevi gördüğü gözlemlenmiştir. Kromat kaplaması, magnezyum-lityum alaşımını bir ölçüde koruyabilirken, fosfat-permanganat kaplaması, alt tabakayı iyi bir şekilde korumuş ve Cl^- iyonlarının alt tabakaya geçişini etkili bir şekilde engellemiştir (Zhang vd., 2008).

Ganesan ve ark. yaptığı çalışmada, Çinko bazlı kaplamalar üzerine, SEM analizleri, fosfat kaplanmış döküm parçaların istenen görünüme sahip olduğunu ve fosfat kristal boyutlarının 3-6 μm arasında değiştiğini göstermiştir. Fosfat kristallerinin, çinko ve kataforez kaplamaların birbirine yapışmasını sağladığı, Bazik çinko kaplamalarda yatay, Asidik çinko kaplamalarda ise dikey konumlandığı tespit edilmiştir. Son aşamada, fosfat kaplamanın üzerine kataforez kaplama uygulanmış ve çekme yapışma testlerinde fosfat kaplamanın kataforez kaplamalara iyi bir yapışma sağladığı doğrulanmıştır. Buna karşın, bu kaplamalar taş çarpma testinden başarılı bir şekilde geçmiş ayrıca döngüsel/çizik korozyon ve tuz püskürtme testlerini başarıyla tamamlamıştır. Döküm parçaların yüzey pürüzlülüğü, bu yüzeylere biriken alkali çinko ve fosfat kaplamalardaki kristallerin homojen olmaması ve kristal kaplamanın istenilen seviyede olmaması nedeniyle istenilen yapışma, darbe ve korozyon direnci sağlanamamıştır.

Kaplama kalınlığı arttıkça performans özelliklerinin bozulduğu ve gerekli performans testlerinin yalnızca alkali ortamda 5-8 µm nikel ilaveli kaplama uygulandığında başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Ganesan vd., 2014).

Ying ve ark. yaptığı çalışmada ise 7075-T6 alüminyum alaşımı üzerinde uygulanan çinko fosfat kaplama süreci, Titanyum kolloid ön işlem, pH ayarı, florür katkısı ve ZnO/H₃PO₄ oranı düzenlemeleriyle fosfat kaplama süreci geliştirilmiştir. 7075-T6 alüminyum alaşımı için ZnO + H₃PO₄ içeren bir kaplama banyosu temel alınarak bir fosfat kaplama prosedürü geliştirilmiştir. ZnO/H₃PO₄ oranı 0,205 ve 0,256 olan banyolarla optimum kaplamalar elde edilmiştir. SEM incelemesi, bu düzenlemelerin yüksek örtücülüğe ve küçük tanecik boyutlarına sahip kristalin bir kaplama tabakası oluşturduğunu göstermektedir. Alüminyum alaşımlarında çinko kromatın yerine fosfatın korozyon önleyici kaplama olarak kullanılması hem endüstriyel hem de çevresel açıdan büyük bir öneme sahiptir. Fosfatlama süreci, kaplama öncesinde titanyum kolloid ön işlemi ve kaplama banyosundaki florür katkı maddeleri, nihai kaplama üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla bağımsız olarak incelenmiştir. Kaplama banyosundaki florür katkı maddesinin kaplama tabakasındaki çinko ve fosfat içeriğini iyileştirici etkisi olduğu belirlenmiştir. Alüminyum alaşımı üzerine fosfat içermeyen bir çinko bileşimi uygulanmış ancak daha düşük bir örtücülük elde edilmiştir. Bu çalışmada, kristalin kaplama oluşumu için optimum koşulların, Zn_x(PO₄) benzeri bir bileşim elde etmek için optimum koşullardan biraz farklı olduğu belirtilmiştir. Yüksek oranda gözenekli, ince taneli kristalin kaplama tabakasının üretilmesinin amacı, boya yapışmasını artırmaktır. Aynı zamanda, Zn_x(PO₄) benzeri bir bileşimin, korozyon direnci açısından faydalı olduğu belirtilmiştir (Ying vd., 1996).

Heung ark. yaptığı çalışmada çeşitli Zn/P oranlarına sahip kaplama banyoları, AA6061 alüminyum alaşımı üzerinde çinko fosfat kaplama tariflerini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Normal-çinko ve düşük-çinko olmak üzere 2 ayrı çalışmaya fosfat kaplama yapılmıştır. Bu iki numunenin SEM görüntüleri, fosfatlama süreçlerinde nispeten büyük kümeler oluştuğunu ve çekirdeklenmenin özellikle mekanik parlatma çiziklerinde gerçekleştiğini göstermektedir. Genel olarak, bu iki numune için kaplama yüzeyleri benzer görünse de morfoloji açısından farklılıklar bulunmaktadır. Normal-çinko fosfat kaplama uygulanan numunede, daha düzgün ve homojen bir fosfat kristalleşmesi gözlemlenmiş, bu da kaplamanın daha tutarlı bir yüzey yapısı oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, normal-çinko kaplamanın morfolojisinin düşük-çinko kaplamaya göre daha belirgin ve düzgün kristal yapılar

sergilediği, bu da normal-çinko fosfat kaplamaların mekanik özellikler ve korozyon direnci açısından daha avantajlı olmasına olanak sağladığı sonucuna varılmıştır. Düşük-çinko kaplamada ise daha küçük ve düzensiz kümeler oluştuğu, bu da daha düşük bir kaplama kalitesi ve tutarsızlık yarattığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, saf alüminyum, AA5754 alaşımı ve AA7075 alaşımı için kaplama koşulları daha iyi seviyede olsa da havacılık ve deniz platformları uygulamalarında önemli olan AA6061 alaşımının fosfatlanmasıyla ilgili olumlu çalışmalar vardır (Heung vd., 1994).

Reboul ve ark. yaptığı çalışmada ise 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde fosfat kaplamanın etkisi incelenmiştir. Fosfat kaplama sürecinin, alaşım mikro yapısına, özellikle ikinci faz partiküllerinin varlığı ve dağılımına bağlı olarak güçlü bir şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. Mekanik olarak parlatılmış 2024-T3 alaşımında, Al-Cu-Mg ve Al-Cu-Fe-Mn gibi intermetalik bileşiklerin ortaya çıkması, elektrokimyasal olarak heterojen bir yüzey oluşturur. Bu heterojen yüzeyde çinko fosfat kaplaması, özellikle Al-Cu-Mg ikinci faz çökeltilerinde, Al-Cu-Fe-Mn çökeltilerine kıyasla daha belirgin bir şekilde başlar. Ayrıca, kristal çinko fosfat kaplamalarının çekirdeklenmesi, ikinci faz partiküllerinin merkezinden ziyade kenarında gerçekleşir. Bu bulgular, oksit çözünmesinin etkinliğinin ve alaşım elemanlarının oksit tabakasındaki varlığının, kaplamanın özelliklerini ve koruyuculuğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Fosfat kaplama işlemi sonucunda, yüzeyde oluşan kristal çinko fosfat kaplamalar, alaşımın korozyon direncini artırırken, daha pürüzlü yüzeylere sahip 2024-T3 alaşımı üzerinde daha iyi kaplama örtücülüğü sağlanmıştır. Bununla birlikte, amorf kaplama, ayna parlaklığında parlatılmış numunelerde hala mevcut olabilir ve kaplama kalınlığı, altta yatan mikro yapıya bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Reboul vd., 1996).

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımlar altlık olarak kullanılmıştır. Katarforez kaplama öncesi kullanılan fosfatlama ön işlemi yerine bu çalışmada ticari ürün EcoAL 20A (kromsuz) kullanılmıştır. EcoAL 20 A, Al ve alaşımları için fosfatlama alternatifi olarak kullanılan (pasivasyon amaçlı) bir kimyasaldır. EcoAL 20 A ile elde edilen tabaka, boya tutunmasını artıran ideal bir yüzey oluşturmaktadır. Bu kaplamalar Heksaflorotitanat (H_2TiF_6) ve asitten oluşmaktadır. EcoAL 20 A altlık yüzeyinde nano tabaka sağlayarak katarforez kaplamanın yüzeye fosfatlama ön işleminden daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. En iyi yapışma mukavemetini sağlayabilmek için aşındırma süresi (5 dk) ve sıcaklık ($25^{\circ}C$) de sabit tutularak farklı konsantrasyonlarda (% 0.75, % 1 , % 1.25) EcoAL 20 A ve farklı daldırma sürelerinde (45, 60 ve 75 sn) deneysel sürecin parametrik optimizasyonu sağlanmıştır. **Tablo 8.1**'de deneysel çalışmaların numune kodlarıyla birlikte deneysel parametreleri verilmiştir.

Tablo 8.1. Deneysel Çalışma

Deneme Kodu	Konsantrasyon (%)	Süre (sn)
1.1	0,75	45
1.2	0,75	60
1.3	0,75	75
2.1	1,00	45
2.2	1,00	60
2.3	1,00	75
3.1	1,25	45
3.2	1,25	60
3.3	1,25	75

8.1. Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan altlıklar, 5754 ve 7075 serisi alüminyum alaşımlarından 10x10 cm boyutlarında ve 2 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır. **Tablo 8.2**'de, alüminyum altlıkların elemental dağılımı sunulmuştur. Bu dağılımda, özellikle fosfatlama kabiliyetini

olumsuz yönde etkileyebilecek silisyum içeriğine dikkat edilmelidir. 7075 alüminyum alaşımında silisyum içeriği yüksek olup, bu durum fosfatlama yeteneğini düşürür.

Tablo 8.2. Alüminyum türleri element içeriği.

	Silisyum %	Demir %	Mangan %	Magnezyum %	Bakır %	Titanyum %	Krom %	Çinko %
5754	0,056	0,226	0,135	2,82	0,014	0,004	0,018	0,024
7075	0,12	0,26	0,12	2,6	1,5	0,02	0,21	5,6

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzeme ve kimyasal malzemelerin listesi Tablo 8.3'de ve kullanılan cihazlar Tablo 8.4'de sunulmuştur.

Tablo 8.3. Kullanılan malzeme, kimyasal ve tedarikçileri.

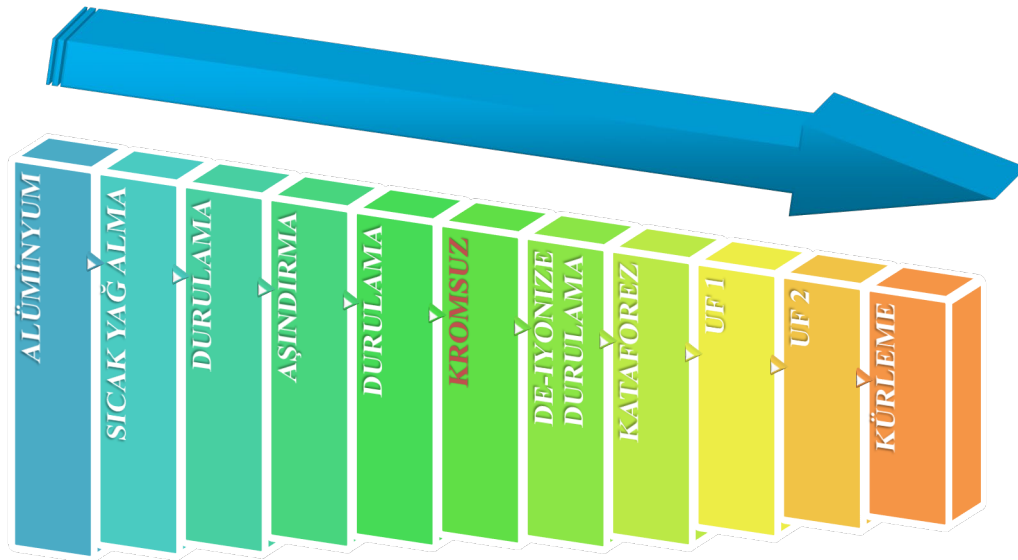
5754 Alüminyum	Alta Metal
7075 Alüminyum	Alta Metal
ALUKLEEN CV (Yağ Alma)	Borakim
ALUKLEEN 2008 AC (Aşındırma)	Borakim
ECOAL-20A (Kromsuz)	Borakim
Kataforez boyası	PPG

Tablo 8.4. Kullanılan test ekipman listesi

Test Adı	Standart	Cihaz-Ekipman
Kuru Yapışma	Fiat 50461	Cross Cut Bıçağı
Su Direnci	Fiat 50470	Nüve marka BM 30
Nem Direnci	Fiat 50184	Nüve marka BM 30
Çevrim	SAE J2334	Asscott CC450IP
Taş Çarpma	SAE J400	Gravelometer
CASS	ISO 9227	Asscott CC450IP

8.2. Yöntem

DeneySEL çalışmalara başlamadan önce altlık malzemeler, **Şekil 8.1**'de belirtilen ön işlemlerden geçirilmiştir.



Şekil 8.1. Üretim Akış Şeması.

İlk adım olarak, yüzeydeki kir, pas ve yağın temizlenmesi amacıyla sıcak yağ alma işlemi uygulanmıştır. Yağ alma işleminden sonra numuneler durulanmıştır. Bu şekilde kaplama öncesi uygulanan bir sonraki kimyasal işleme geçmeden önce kimyasal taşınımı engellenmektedir ve banyonun daha uzun süre kullanılabilirliği sağlanmaktadır. Bu nedenle durulama işlemi önemli bir prosestir. Bu taşınımı engellemek için her bir işlem sonrası numuneler durulama banyosuna daldırılmıştır.

Alüminyum alaşımlarında fosfatlama işleminin zorlukları nedeniyle, kataforez kaplama öncesinde kromsuz bir işlem uygulanmıştır. Bu işlem, ön aşındırma işlemi sonrası uygulanmaktadır. Bu işlem sonrası kromsuz işlemine geçilmiş ve ardından numune yüzeyinde kataforez kaplamalar oluşturulmuştur. Kataforez kaplama işleminden sonra, parça yüzeyindeki fazla boya uzaklaştırılmak ve fazla kalan boyayı geri kazanabilmek için çift aşamalı bir filtrasyon uygulanmıştır. Son olarak, kaplama işlemi kürlenme fırınında tamamlanmıştır. Bu yöntemler, kaplama sürecinde yüksek verimlilik ve kaliteyi sağlamak için dikkatlice uygulanmıştır.

Tablo 8.5'da, tüm ön işlem ve kaplama proseslerinin kimyasal konsantrasyonları, pH, süre, sıcaklık gibi çalışma parametreleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. Sıcak yağ alma işlemi, 65°C'de 5 dakika boyunca uygulanmıştır. Aşındırma banyosu, 55-60°C arasında tutulmuş ve 10 dakika boyunca, chrome-free işleminden önce gerçekleştirilmiştir. Kromsuz işlemde, ECOAL 20 A kullanılmış olup, farklı konsantrasyonlar (0.75, 1.00 ve 1.25) ve süreler (45, 60 ve 75 saniye) uygulanmıştır. Ön işlemler ve kaplama prosesi sonrasında, 170°C'de 15 dakika süreyle kürlenme yapılmış ve kataforez kaplamalar üretilmiştir. Bu optimizasyon çalışması, özellikle kaplamaların korozyon performansını iyileştirmek amacıyla yürütülmüştür. Farklı parametrelerle uygulanan kromsuz ön işlem sonrası, kataforez kaplamanın yapışma direnci ve korozyon performansları değerlendirilmiştir.

Tablo 8.5. Kataforez kaplamanın detaylı parametreleri.

İŞLEM	PARAMETRE	TEORİK	İŞLEM	PARAMETRE	TEORİK
SICAK YAĞ ALMA (ALUKLEEN CV)			DI SU TANKI		
Sıcaklık (°C)	65	50-80	Ph	7	5,5-7,5
Konsantrasyon (%)	5	4-6	İletkenlik (µS)	50	Max 80
Süre	5	1-20	Süre (sn)	15	Min 10
Ph	9	8,5-10			
AŞINDIRMA (ALUKLEEN 2008 AC)			ANOLİT TANKI		
Konsantrasyon	%2	%1-3	Ph	3	2,5-3,5
pH	2	1-2	İletkenlik (µS)	3600	2500-5000
Sıcaklık	45 °C	30-60 °C			
Süre	5 dk	1-10 dk			
CHROME FREE (ECOAL 20A)			ULTRAFİLTASYON (UF1- UF2)		
Konsantrasyon EcoAl20A	%0,75 %1 %1,25	0,75-1,25 %	Süre (dk.)	3	1-3
Yoğunluk	1,05 g/ml	1,05 g/ml	İletkenlik (µS)	850	500-1500
Sıcaklık	25 °C	20-30°C	Ph	5,9	5,6-6
Süre	45-60-75 sn	20-90			
Ph	3	2,8 ± 0,4			
KATAFOREZ			KÜRLENME SICAKLIĞI		
Konsantrasyon			Süre (dk.)	15	Min. 15
Katı Miktarı (%)	17	14-20	Sıcaklık (°C)	170	Min. 155
Kül Miktarı (%)	2	1,2-2,5			
P/B Oranı	0,13	0,11-0,16			
Sıcaklık (°C)	32	29-35			
Süre (dk)	3,05	3-5			
Ph	5,8	5,6-6,1			
İletkenlik (µS)	1400	1000-2000			

Şekil 8.2’de alüminyum malzeme üzerine uygulanan kromsuz ve kataforez kaplamanın kesit modeli verilmektedir. Bu kesit modelin yanında ise kromsuz ve kataforez kaplamanın bağlanma reaksiyonu sunulmaktadır.







Şekil 8.2. Alüminyum, kromsuz ve kataforez kaplamanın kesit modeli.

8.3. Kaplama Sonrası Uygulanan Analiz ve Testler

8.3.1. Kuru Yapışma Testi (Fiat 50461 Şartnamesi)

Kuru yapışma testi cross cut bıçağı ile parça yüzeyine belli bir basınç kare kesitler şeklinde malzeme yüzeyine kadar çizerek uygulama sonrasında TESA 4657 test bandı uygulaması ile yapışma direnci değerlendirilen bir test yöntemidir. **Tablo 8.6'** de verilen görsele göre sınıflandırılarak değerlendirilir. Değerlendirme kataforez kaplama sonrası cross cut bıçağı ile çizik atılarak yapışma bandına yapışan parça yüzeyinden ayrılan kataforez boyanın miktarsal olarak değerlendirilmesi ile de kaplamanın yapışma mukavemeti tespit edilebilir (Fiat 50461, 2005).

Tablo 8.6. Kuru yapışma sınıflandırılması

Sınıflandırma	Tanımı	Gösterimi
0	Kesik kenarlar mükemmel bir biçimde düzdür; karelerde boya kalkması yok.	---
1	Kesişme noktalarında kırılmış küçük parçalar; karelenmiş yüzeyden %5 kalkma	
2	Karelerin kesişme noktalarında veya kesik kenarlar boyunca düzen bozukluğu	
3	Kesik kenarlar boyunca kırılmanın kısmi veya toplam, geniş şeritlerde ve trimlerde tek parçalanmanın kısmi veya toplam	
4	Geniş şeritler veya tek karelerden tamamen veya kısmen trim kırılmalarının %65 olması	
5	Karelenmiş yüzeylerden %65'den fazla kalkmanın olması	---

8.3.2. Nem Direnci (Fiat 50184 Şartnamesi)

Nem direnci testi Termostatik Nüve marka BM 30 nem banyosunda 40⁰ C’de 240 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Test verilen değerlerde deiyonize su buharına maruz bırakılmaktadır. Nem testi sonunda parçalara yapışma testi uygulaması yapılır. Uygulama kuru yapışma testi ile aynı şekildedir. Değerlendirme **Tablo 8.6**’ya göre kataforez kaplama sonrası cross cut bıçağı ile çizik atılarak yapılmaktadır. Bant çekme işleminden sonra parça yüzeyinden ayrılan kataforez kaplamanın miktarsal olarak değerlendirilmesi ile de kaplamanın yapışma mukavemeti tespit edilebilir(Fiat 50184, 1997).

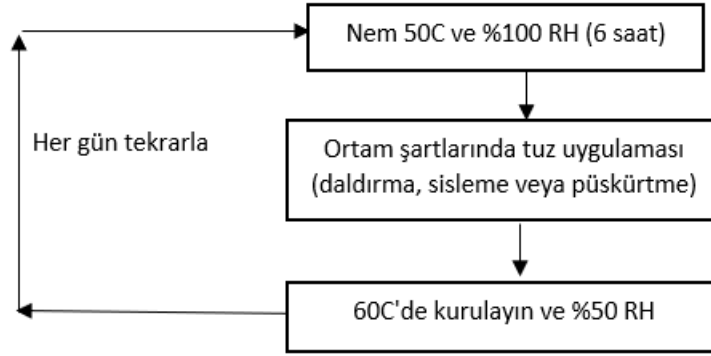
8.3.3. Su Direnci (Fiat 50470 Şartnamesi)

Su direnci testi Termostatik Nüve marka BM30 su banyosunda 40⁰ C’de 48 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Test verilen değerlerde parçaların direkt olarak su içerisinde deiyonize suya maruz kalması ile uygulanmaktadır. Su direnci testi sonlandığında parçaların değerlendirilmesi için yapışma uygulaması gerçekleştirilir. (Fiat 50470, 2005).

8.3.4. Çevrim Testi (SAE J2334 Şartnamesi)

Çevrim testi tuz sisi, sıcaklık ve nem gibi değişken değerlerin otomatik olarak bir döngü içerisinde değişimi ile uygulanan korozyon direnci testidir. Çeşitli iklim şartlarına karşı parçanın korozyon direncinin değerlendirilmesini sağlar. Test döngüsünde uygulanan tuz sisi aşamasında püskürtmek için çevrim testi kabininin tankına %5’lik tuzlu su çözeltisi

hazırlanmaktadır. Test 180 cycle(gün) süre ile **Şekil 8.3**'de verilen değerler altında gerçekleşmektedir (SAE J2334, 2016).



Şekil 8.3. Çevrimsel korozyon test döngüleri.

Kaynak: (Usta, Yılmaz, vd., 2024).

Test sonucunda parçaların değerlendirilmesi, parça yüzeyinde oluşan pas ve kabarcıkların üzerinden **Tablo 8.7**'de verilen sınıflandırmaya göre yapılmaktadır.

Tablo 8.7. Çevrim testi sonrası korozyon değerlendirme sistemi

Değer	Tanım
0	Korozyon yok
1	Çatlaklarda, bağlantı noktalarında veya boya kırıntılarında hafif pas
2	Hafif boya kabarması ve/veya orta pas
3	Orta derecede boya kabarması ve/veya ağır pas
4	Şiddetli boya kabarması (kabuklanma), boya soyulması, şiddetli kırmızı pas
5	Perforasyon; bileşenin bir kısmı kırılmış veya işlevini kaybetmiş

8.3.5. CASS Testi (ISO 9227 Şartnamesi)

CASS testi **Tablo 8.8**'de verilen değerler altında gerçekleştirilir. CASS, bakırla hızlandırılmış asetik asit tuz püskürtme yöntemidir. Alüminyum alaşımlarının korozyon direncini belirlemek için uygulanan agresif bir korozyon testidir.

Test çözeltisi yeterli miktarda bakır (II) klorür dihidrat ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) %5'lik tuz çözeltisine eklenerek hazırlanır. Çözeltinin konsantrasyonu $0,26 \text{ g/l} \pm 0,02 \text{ g/l}$ (litre başına $0,205 \pm 0,015 \text{ g CuCl}_2$ 'ye denk) şeklinde elde edilir (ISO 9227, 2006).


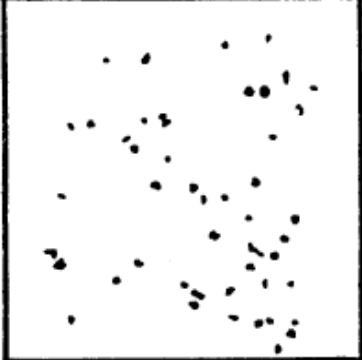


Tablo 8.8. CASS Testi Çalışma koşulları

Test Yöntemi	Nötral Tuz Spreyi	Asidik Asit Tuz Spreyi	Bakır Hızlandırılmış Asidik Asit Tuz Spreyi
Sıcaklık	35°C ± 2°C	35°C ± 2°C	50°C ± 2°C
80 cm ² 'lik yatay toplama alanı için ortalama toplama hızı	1.5 ml/h ± 0,5 ml/h		
Sodyum klorür konsantrasyonu (toplanan çözelti)	50 g/l ± 5 g/l		
Ph (toplanan çözelti)	6,5 ile 7,2	3,1 ile 3,3	3,1 ile 3,3
Çizik üzerinde kopan boyanın max. İlerleme derecesi			1 mm

8.3.6. Taş Çarpma Testi (SAE J400 Şartnamesi)

Taş çarpma testi için Gravelometer marka cihaz kullanılmıştır. Test, farklı boyut ve ağırlıklara sahip taşlar (çipler) ile belirli bir basınç altında parça yüzeyine uygulanan çarpmalarla gerçekleştirilmiştir. Parçanın dış etkenlere karşı dayanıklılığını ölçülendirmek için uygulanmıştır. Test sonrası elde edilen veriler, **Tablo 8.9**'da belirtilen ölçüm kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları **Tablo 8.10**'a göre sınıflandırılır (SAE J400, 2002).

Tablo 8.9. Taş çarpma değerlendirme kriterleri

	
Derece 7A 10-24 taş izi <1 mm	Derece 5B 50-74 taş izi 1-3
	
Derece 3C 100-149 taş izi 3-6 mm	Derece 1D >250 taş izi >6 mm

Tablo 8.10. Taş çarpma değerlendirme skalası

Referans Numarası	5x5 cm lik numunedeki taş izi sayısı
1	>250
2	150-250
3	100-149
4	75-99
5	50-74
6	25-49
7	10-24
8	5-9
9	2-4
10	1
Referans Harfi	5x5 cm lik numunedeki taş izi genişliği
A	<1 mm
B	1-3 mm
C	3-6 mm
D	>6 mm

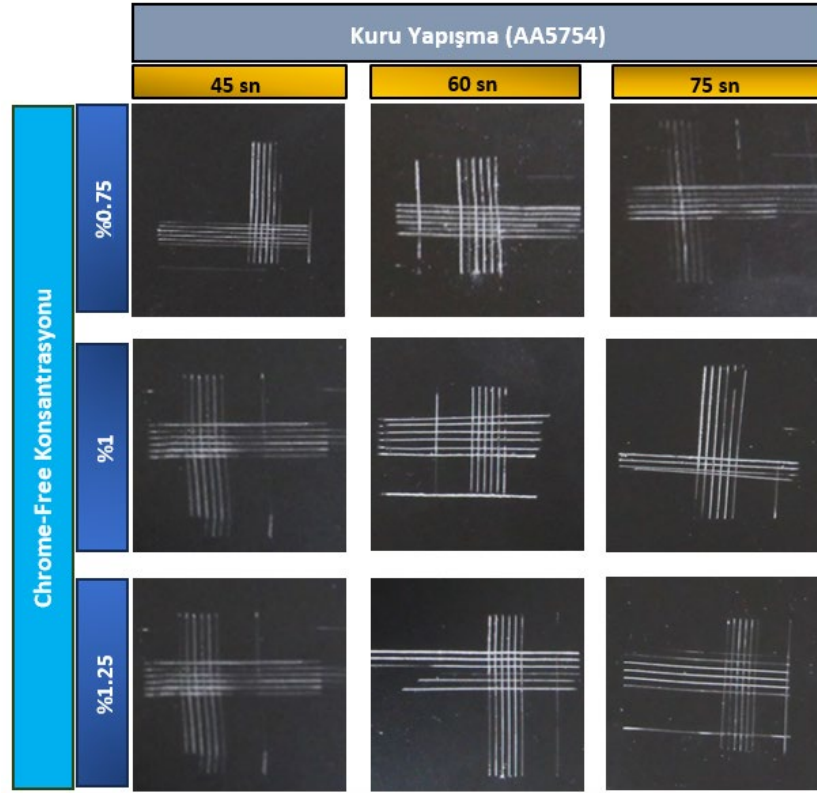
Değerlendirme için kaplama yüzeyinde 5x5 bir alan belirlenir, bu alandaki çarpma sonucu oluşan taş izlerinin sayısı ve genişlikleri belirlenerek sınıflandırılır. Bu çıkan sonuç, standardına göre kabul sınırları içerisinde olup olmadığına karar verilir. Bu çalışmada 7A standardı yani 1 mm den küçük genişliğe sahip olan 5x5 lik kaplama yüzeyinde 10 ila 24 arasında taş izi bulunan numuneler geçti olarak kabul edilmiştir. Genişliği 1 mm'den büyük olan izler ve taş izi sayıları 24'ün üzerinde olan numuneler ise bu testte başarısız olmuştur.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. AA5754

Şekil 9.1'de, AA5754 serisi alüminyum alaşımlarına dış etkenlere maruz bırakılmadan (kuru ortamda) uygulanan cross cut testine ait görseller yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, tüm kromsuz konsantrasyonları ve uygulanan işlem sürelerinin, cross cut testi ile uyumlu olduğu görülmektedir. Cross cut testi sonrasında bantla çekilmiş dikey ve yatay çizgiler arasında kalan bölmelerde herhangi bir kusur veya kopma belirtisi gözlemlenmemiştir. Bu nedenle optimum konsantrasyon ve kaplama sürelerinin belirlenebilmesi için daha korozif testler gerçekleştirilmiştir. Cross cut test sonuçlarına göre AA5754 serisi alüminyumlar için kuru ortamda herbir numune için iyi bir yapışma direnci elde edilmiştir.

Kataforez kaplamaların yapışma performansını değerlendirmek ve kaplama kalitesini doğrulamak için Cross cut testleri yapılmıştır. Cross cut testi için kaplama yüzeyine, belli aralıklarla kesikler yapılarak ve üzerine yapışkan bant uygulandıktan sonra, bu kesiklerin bantla çıkarılmasına dayanır. Sonuç olarak, kaplama yüzeyindeki herhangi bir kopma, soyulma veya kusur tespit edilebilir. **Şekil 9.1'**de sunulan cross cut testine ait görsellerde, AA5754 serisi alüminyum alaşımlarına uygulanan tüm kromsuz konsantrasyonlarının ve işlem sürelerinin, cross cut testi ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yani, kaplamaların metal yüzeylere olan yapışma kuvveti oldukça güçlüdür ve bu test sırasında herhangi bir kopma, soyulma veya kusur gözlemlenmemiştir. Bu, kataforez kaplamanın kuru ortamda, uygulama sırasında yeterli yapışma sağladığını ve kaplamanın dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ancak, bu sonuçlar yalnızca kuru ortamda yapılan testlere dayanmaktadır ve daha fazla güvenilirlik için kaplamanın özellikle nemli ve korozif ortamlarda da test edilmesi gereklidir. Bu nedenle, optimum konsantrasyon ve kaplama sürelerinin belirlenebilmesi için daha korozif testler yapılmıştır. Bu, kaplamanın sadece kuru ortamda değil, aynı zamanda nemli ve aşındırıcı koşullarda da dayanıklı olup olmadığının belirlenmesi açısından önemlidir.

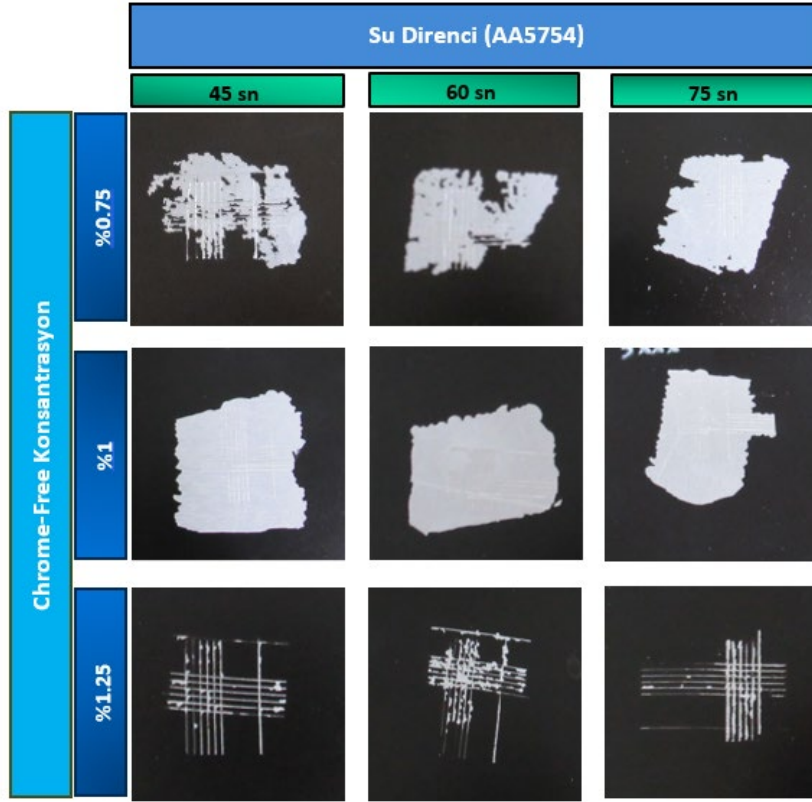


Şekil 9.1. Kuru yapışma test sonuçları

Şekil 9.2'de, 40 °C'de 48 saat boyunca gerçekleştirilen su direnci testinden sonra elde edilen cross cut görüntüleri sunulmuştur. AA5754 alüminyum alaşımlarına uygulanan bu test sonrasında, %0,75 ve %1 konsantrasyona sahip numunelerde, %65'ten fazla yüzeyde boya kopması gözlemlenmiştir. Bu, kaplamanın suya karşı yeterli dayanıklılığı sergileyemediğini ve bu numunelerin su direnci testinden başarısız olduğunu gösterir.

%1,25 kromsuz konsantrasyonunda, daha düşük konsantrasyonlara göre su direnci sonrası daha iyi bir yapışma mukavemeti sağlandığı net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu, yüksek konsantrasyonun kaplamanın suya karşı dayanıklılığını artırdığı ve bu tür kaplamaların suyun etkisiyle soyulma veya kopma gibi olumsuz sonuçları daha iyi engellediği anlamına gelir. Ancak, %1,25 konsantrasyonunda, farklı işlem süreleriyle yapılan testlerden sadece 75 sn'lik uygulama süresine sahip numune başarıyla geçmiştir. 45 sn ve 60 sn'lik uygulama sürelerinde ise testten başarısız olmuştur. Bu durum, yalnızca yüksek konsantrasyonun değil, aynı zamanda işlem süresinin de su direnci testine etki ettiğini göstermektedir. Bu testin sonuçları, su direnci konusunda başarılı sonuçlar elde etmek için yalnızca doğru konsantrasyonun değil, aynı zamanda doğru işlem sürelerinin de kritik olduğunu göstermektedir. %1,25 kromsuz konsantrasyonu ve 75 sn işlem süresi en iyi performansı göstererek su direnci testini başarıyla

geçmiştir. Bu, kaplamanın suya karşı dayanıklılığının artması için hem uygun bir konsantrasyonun hem de optimal bir uygulama süresinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.



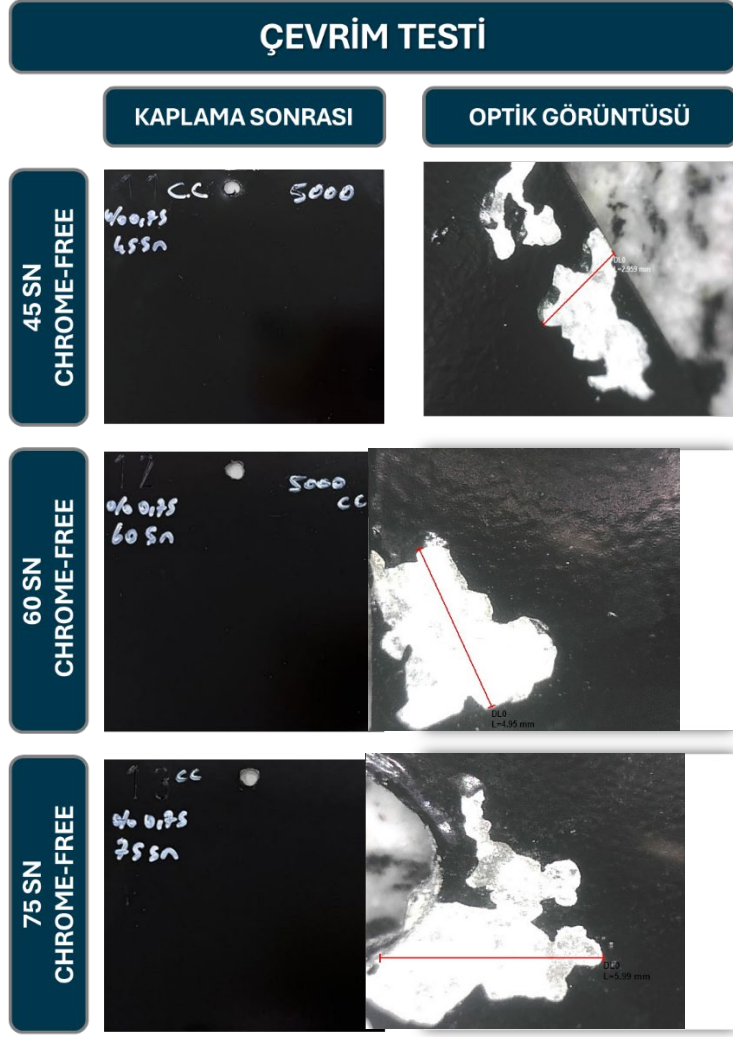
Şekil 9.2. Su direnci test sonuçları

Şekil 9.3’de nem direnci test sonuçları verilmiştir. Bu tür testler, özellikle kaplama ve koruyucu yüzey işlem uygulamalarında, ürünlerin uzun süreli dayanıklılıklarını ve çevresel koşullara karşı gösterdikleri performansını anlamak için yapılır. Test için numuneler üzerine 40 °C’de 240 saat boyunca buhar salınımı uygulanmış ve ardından numunelerin yüzeyindeki yapışma direnci cross cut yöntemi ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, tüm numunelerin başarıyla nem direnci testini geçtiğini göstermektedir. Nem direnci testinin yapılma gerekçesi, numunelerin nem gibi çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını ölçmektir.

		Nem Direnci (AA5754)		
		45 sn	60 sn	75 sn
Chrome-Free Konsantrasyon	%0.75			
	%1			
	%1.25			

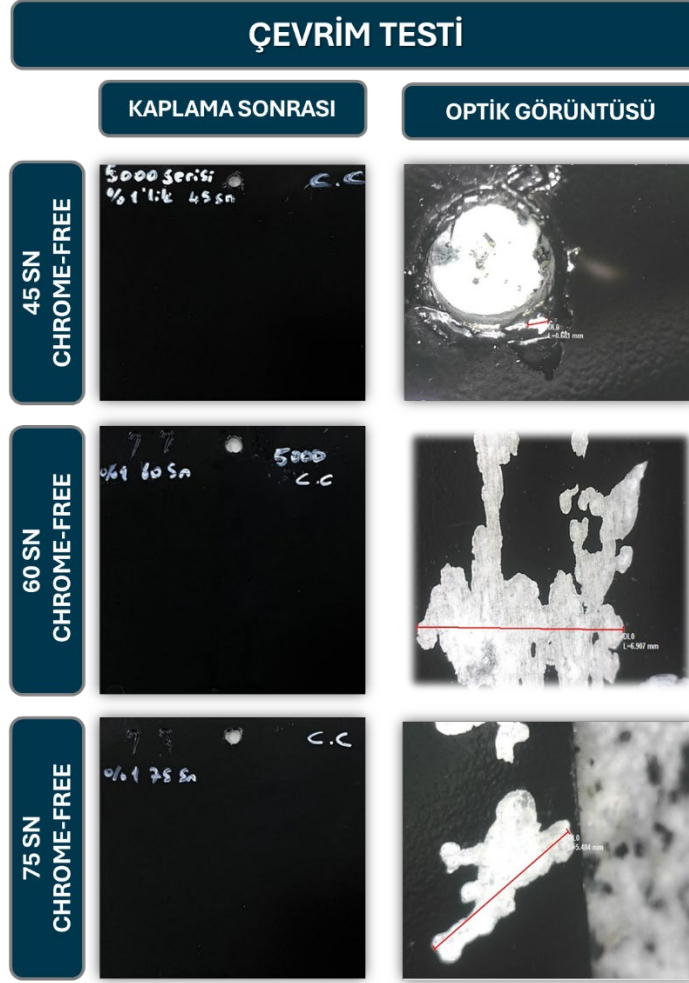
Şekil 9.3. Nem direnci test sonuçları

Korozif çevrim testleri, özellikle kaplama ve yüzey işlem endüstrisinde, bir ürünün çevresel koşullara karşı dayanıklılığını ölçmek amacıyla son derece önemlidir. Bu testler, bir ürünün nem, su, asidik ve alkali ortamlar gibi çeşitli çevresel etmenlere karşı ne kadar dayanıklı olduğunu gösterir. **Şekil 9.4**'te yer alan %0,75'lik konsantrasyonlara ve farklı kaplama sürelerine sahip çevrim testi verilerine göre, **Tablo 8.7**'ye göre 4. derece olumsuz sonuçlar göstermektedir. Bu sonuçlar, şiddetli boya kabarması (kabuklanma) ve boya soyulmasına bağlı olarak kırmızı pas oluşumunu içermektedir. %0,75 konsantrasyonuna sahip tüm numunelerde yüksek oranda boya soyulması gözlemlenmiş ve bu durum, gelecekte su ve nem gibi çevresel etmenlerin etkisiyle korozif ürünlerin oluşma riskini göstermiştir. Bu, kırmızı pasın meydana gelmesine yol açabilecek önemli bir faktördür. Bu bulgular ışığında, %0,75 konsantrasyona sahip numunelerde her bir ön işlem süresi göz önünde bulundurularak, kaplamaların performansı dikkatle değerlendirilmiştir. Kaplama sürelerinin, boya soyulmasını ve buna bağlı olarak korozif etkileri minimize edecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 9.4. %0,75'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları

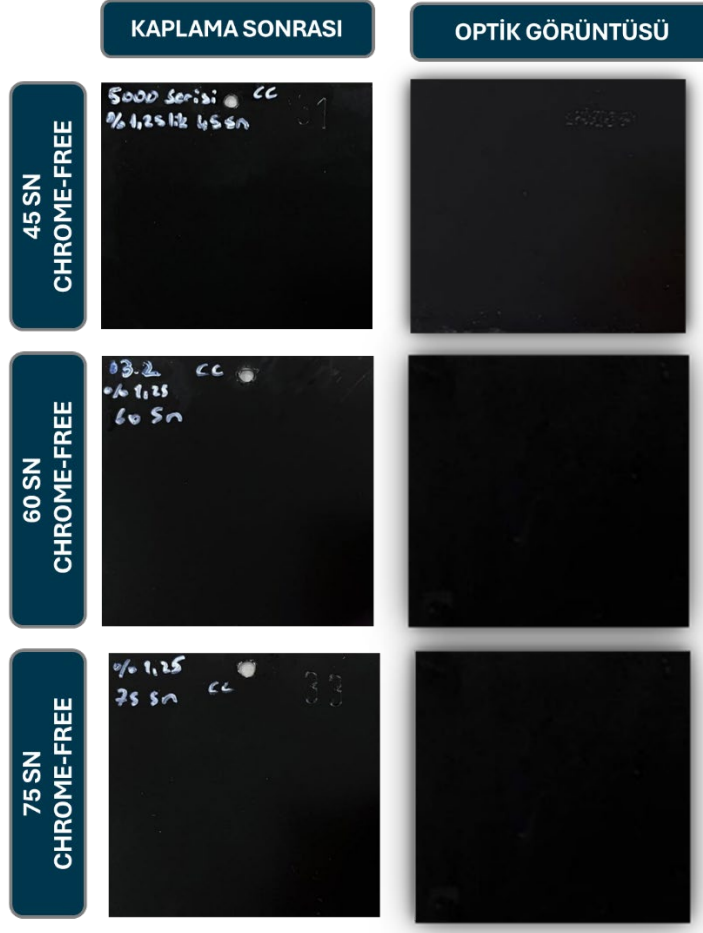
%1 konsantrasyona sahip kromsuz konsantrasyonu ile gerçekleştirilen işlemler sonrasında uygulanan kataforez kaplamaların çevrim test sonuçları Şekil 9.5'de sunulmuştur. Tablo 8.7'e göre, tüm uygulanan kromsuz sürelerinde korozyon derecesi 3 olarak belirlenmiş ve bu durum çevrim testinden başarısız olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, kaplamaların çevresel etmenlere karşı beklenen dayanıklılığı sağlamadığını ve korozyon riski taşıdığını göstermektedir. Bu olumsuz sonuç, kromsuz kaplama uygulamalarının çevresel koşullar altında daha iyi performans gösterebilmesi için daha yüksek pasivasyon konsantrasyonlarının kullanılması gerektiğini göstermiştir.



Şekil 9.5. % 1'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları

%1,25 konsantrasyonunda gerçekleştirilen krom içermeyen işlemler sonrasında uygulanan kateforez kaplamaların çevrim testi sonuçları Şekil 9.6'da sunulmuştur. Tablo 8.7'ye yer alan veriler, bu konsantrasyonla işlem gören numunelerde korozyon derecesinin 0 olduğunu (korozyon bulunmadığını) ve çevrim testinin tamamen olumlu sonuçlandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu konsantrasyonun hem yüzey koruması hem de kaplama performansı açısından optimal bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

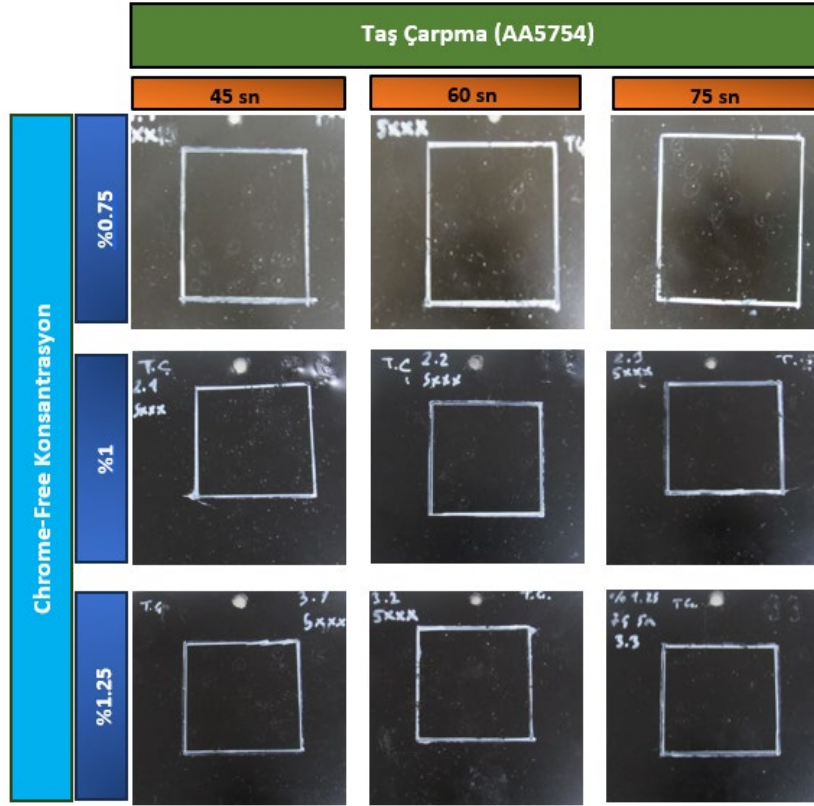
Test edilen diğer konsantrasyonlara kıyasla, %1,25 konsantrasyona sahip krom içermeyen işlemin, 5754 serisi alüminyum alaşımlarında üstün performans gösterdiği ve çevrim testi gerekliliklerini karşılayan tek seçenek olduğu görülmüştür. Bu sonuç, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve zararlı kimyasalların kullanımını en aza indiren bir yaklaşımın, endüstriyel gereksinimlerle uyumlu olabileceğini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 9.6. %1,25'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları

Taş çarpma testi, özellikle otomotiv uygulamalarda kullanılan kataforez kaplamalarının dayanıklılığını test etmek amacıyla sıklıkla tercih edilen bir testtir. Taş çarpma testi araçların farklı yol koşullarında karşılaşılabileceği taş ve diğer sert cisimlere karşı ne kadar dirençli olduğunu, kromsuz konsantrasyon ve sürelerindeki optimum değerini belirlemek için yapılmıştır. Bu test, kaplamanın fiziksel hasarlara karşı dayanıklılığını ve uzun ömürlü olup olmadığını ortaya koyar. Testte numunelere uygulanan taş çarpma, kaplamada herhangi bir çatlama, soyulma veya deformasyon olup olmadığını belirler. Bu sonuçlar, kaplamanın dayanıklılığının belirlenmesinde önemli bir göstergedir. Şekil 9.7'deki sonuçlar, numunelere uygulanan taş çarpma testi sonrasında elde edilen verileri sınıflandırarak **Tablo 8.10** skalası üzerinden değerlendirilmiştir. Konsantrasyonu %0,75 olan tüm numuneler ve %1 lik 45 saniye boyunca uygulanan numune, taş çarpma testini geçememiştir ve 6B olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, kaplamanın taş çarpma testine karşı yeterli dayanıklılığı göstermediği anlamına gelir. %1 lik 60,75 sn ve %1,25 lik numuneler ise 7B ve 7A olarak değerlendirilmiş ve testi

geçmişlerdir, bu da bu numunelerin taş çarpma testine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

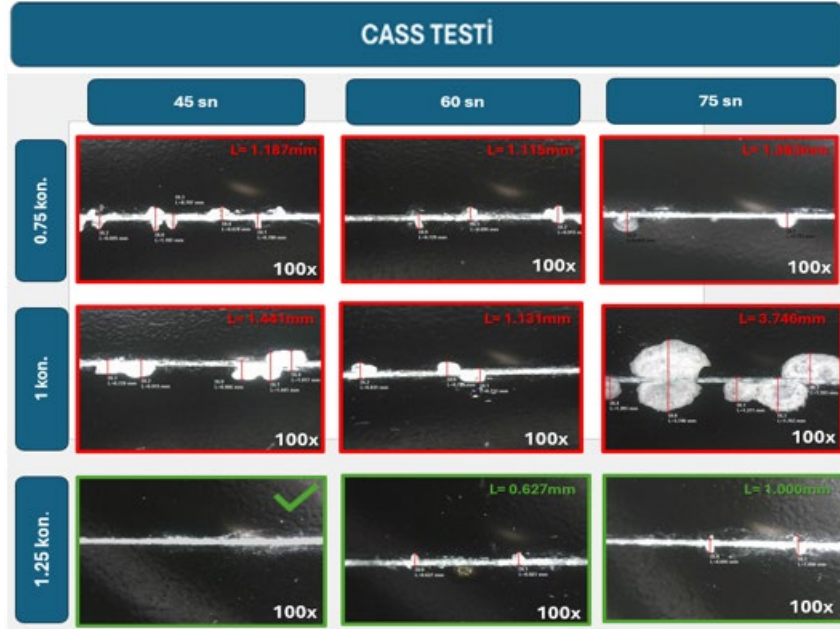


Şekil 9.7. Taş çarpma testi sonuçları

Çalışmada CASS testi, kromsuz sonrası uygulanan kataforez kaplama sistemlerinde boya ve kaplama kalitesini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. CASS testi, test edilen numunelerin, nemli ortam ve yüksek sıcaklık altında boya yüzeylerinde meydana gelen kopma, soyulma ve diğer bozulmaları gözlemlmek için kullanılmıştır. Test, kaplamaların uzun vadeli dayanıklılığını simüle etmek için belirli koşullar altında yapılır ve yüksek kaliteli kaplamaların performansını garanti altına alır.

CASS testine tabi tutulan numunelerde, boya kopmalarının 1 mm'yi geçmemesi istenmektedir. Bu, kaplamanın hem estetik hem de işlevsel olarak uzun süre dayanabilmesi için önemli bir kriterdir. Şekil 9.8'de CASS testi sonuçları verilmiştir. Şekle göre, konsantrasyonu %0,75 ve %1 olan numunelerde, boya kopmaları 1 mm'yi geçmiş veya 1 mm'ye yakın olmuştur, bu nedenle bu numuneler testten başarısız olmuştur. Ancak konsantrasyonu %1,25 olan numunelerde, boya kopması gözlenmemiştir. Bu durum, yüksek kromsuz konsantrasyonun CASS testi için daha uygun olduğunu ve bu seviyenin kaplamanın dayanıklılığını artırdığını

göstermektedir. Sonuç olarak, CASS testinde başarı sağlanabilmesi için, kromsuz konsantrasyonun yeterince yüksek olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu da, yüksek konsantrasyonlu kataforez kaplamaların, çevresel koşullara karşı daha dayanıklı olduğunu ve uzun vadede korozyon öncesi performanslarını daha iyi koruyabildiğini göstermektedir.

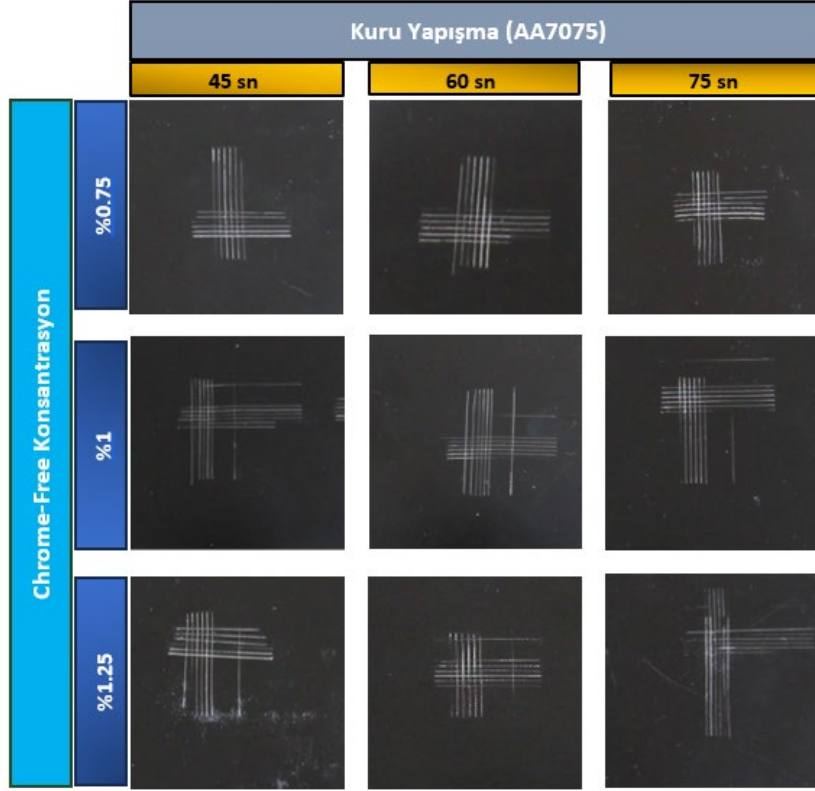


Şekil 9.8. CASS testi sonuçları

9.2. AA7075

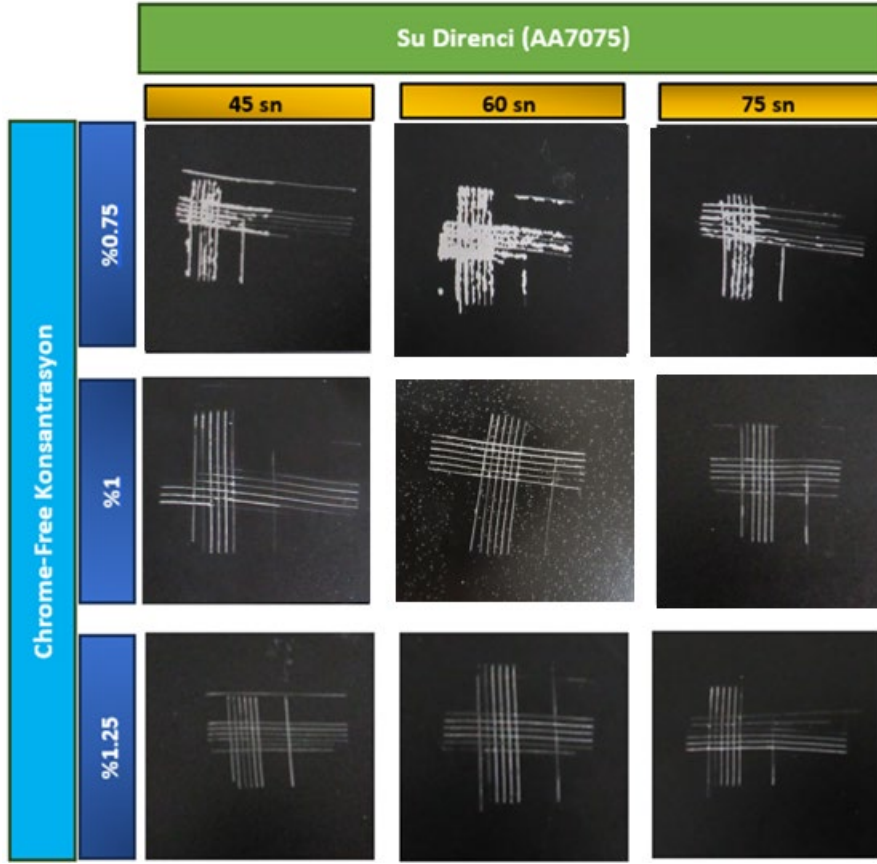
Şekil 9.9'da, AA7075 serisi alüminyum alaşımlarına dış etkenlere maruz bırakılmadan uygulanan cross cut testine ait görseller yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, tüm kromsuz konsantrasyonları ve uygulanan işlem sürelerinin cross cut testi ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Test sonrasında, bantla çekilen dikey ve yatay çizgiler arasında kalan bölmelerde herhangi bir kusur, kopma veya ayrılma belirtisi gözlemlenmemiştir. Bu, kaplamaların kuru ortamda mükemmel bir yapışma direncine sahip olduğunu ve kaplama kalitesinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Ancak, optimum konsantrasyon ve kaplama sürelerinin belirlenebilmesi amacıyla, daha zorlu ve korozif testler gerçekleştirilmiştir. Cross cut testi sonuçları, AA7075 serisi alüminyum alaşımlarının kuru ortamda iyi bir performans sergilediğini gösterse de, kaplama sistemlerinin daha geniş çevresel koşullarda nasıl performans gösterdiğini tam olarak değerlendirebilmek için ek testler gereklidir.



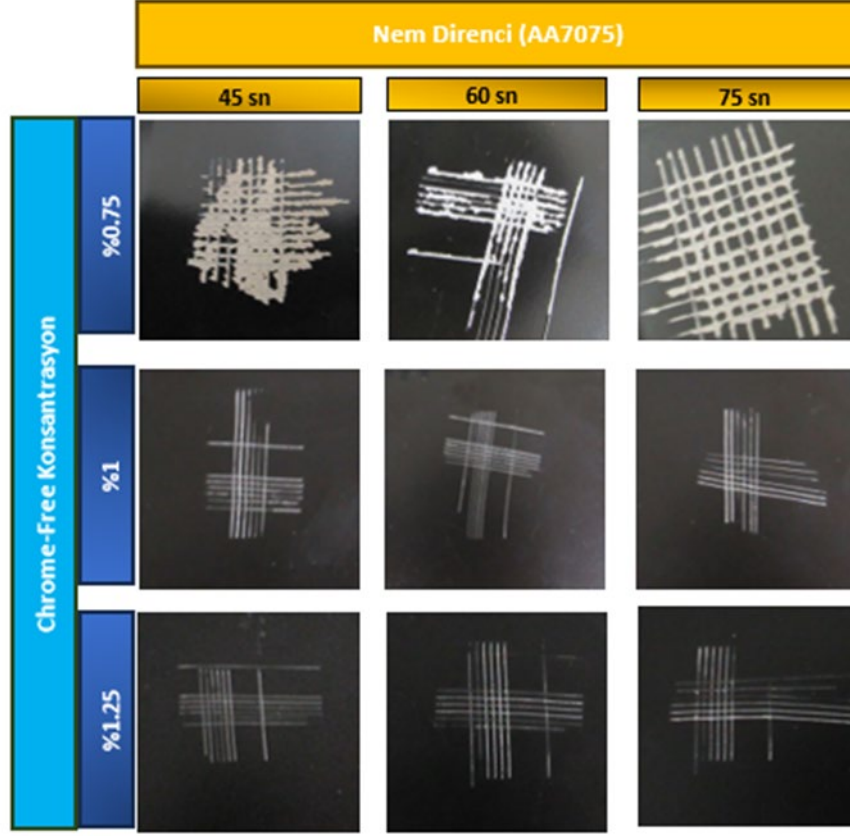
Şekil 9.9. Kuru yapışma test sonuçları

Şekil 9.10'da, 40°C'de 48 saat süreyle gerçekleştirilen su direnci testinin ardından elde edilen cross cut görüntüleri sunulmuştur. AA7075 serisi alüminyum alaşımlarına uygulanan bu test sonrasında, %0,75 konsantrasyona sahip numunelerde yüksek oranda boya kopması meydana gelmiş ve bu numuneler testten başarısız olmuştur. Ancak, %1 ve %1,25 kromsuz konsantrasyonlarında su direnci testi sonrası daha iyi bir yapışma mukavemeti gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, bu konsantrasyonların kaplama kalitesinin ve dayanıklılığının daha yüksek olduğunu ve suya karşı daha güçlü bir koruma sağladığını açıkça göstermektedir.



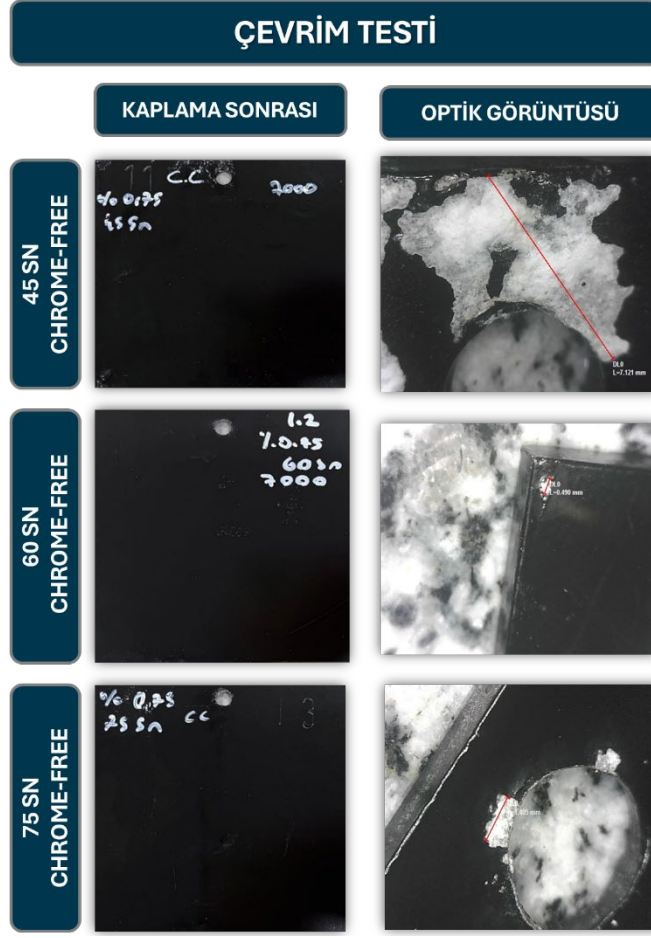
Şekil 9.10. Su direnci test sonuçları

Şekil 9.11'de nem direnci test sonuçları sunulmuştur. Bu testte, numuneler 40°C'de 240 saat boyunca buhara maruz bırakılmış ve süre sonunda yüzeydeki yapışma direnci cross-cut yöntemiyle değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelere göre, tüm numuneler arasında yalnızca %0,75 konsantrasyonda işlem görenlerin nem direnci testini geçemediği tespit edilmiştir. Değerlendirme Tablo 8.6'ya göre yapılmıştır.. Bu durum, düşük konsantrasyon seviyelerinin yüzey dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

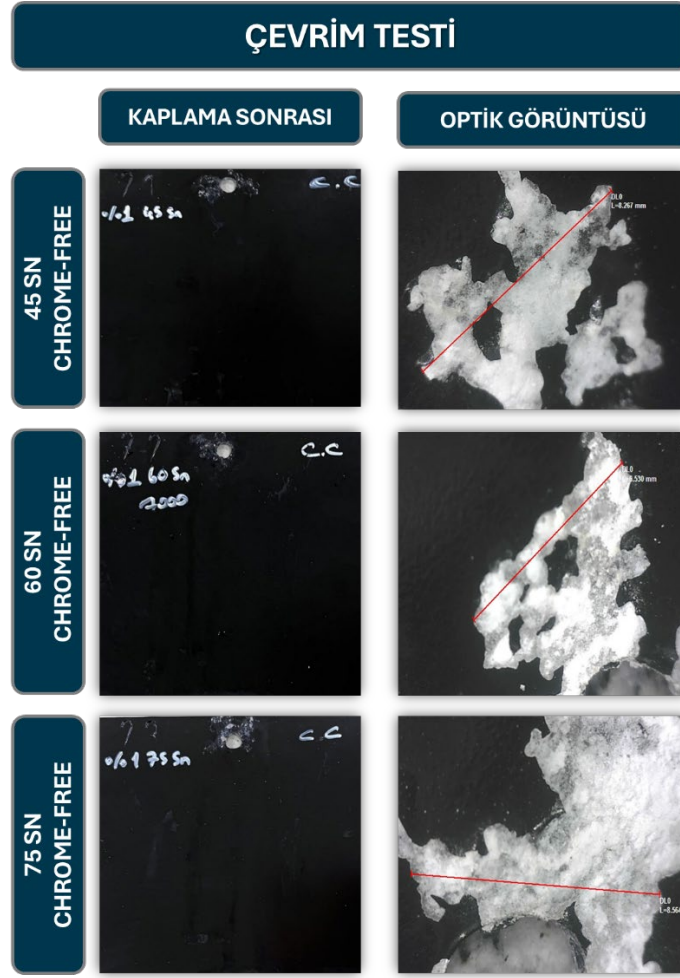


Şekil 9.11. Nem direnci test sonuçları

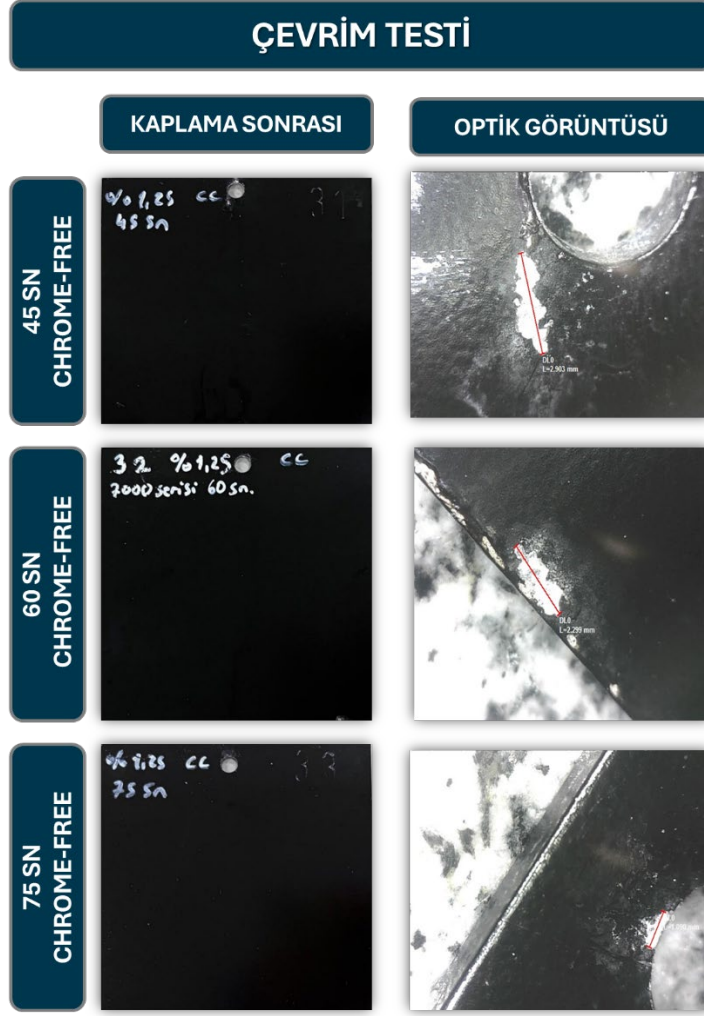
Şekil 9.12 ve **Şekil 9.13**'de yer alan çevrim testi sonuçları, %0,75 ve %1 konsantrasyonlarda, **Tablo 8.7**'ye göre 4. derece olarak değerlendirilmiş; bu da şiddetli boya kabarması, boya soyulması ve yoğun kırmızı pas oluşumu nedeniyle testlerin başarısız sonuçlandığını göstermiştir. **Şekil 9.14**'de sunulan %1,25 konsantrasyonda ise 45 ve 60 sn lik numuneler **Tablo 8.7**'ye göre 3. derece olarak sınıflandırılmış; bu seviyede orta dereceli boya kabarması gözlemlenmiştir, dolayısıyla test 75 saniyelik kromsuz işlemin dışında yine olumsuz sonuçlanmıştır. AA7075 serisi için yalnızca %1,25 konsantrasyon ve 75 saniyelik daldırma süresiyle işlem gören numune çevrim testini başarıyla geçebilmiştir. Bu bulgu, kataforez öncesi uygulanan kromsuz konsantrasyonunun ve daldırma süresinin çevrim testindeki performansı doğrudan etkileyen kritik faktörler olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 9.12. %0,75'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları



Şekil 9.13. %1'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları



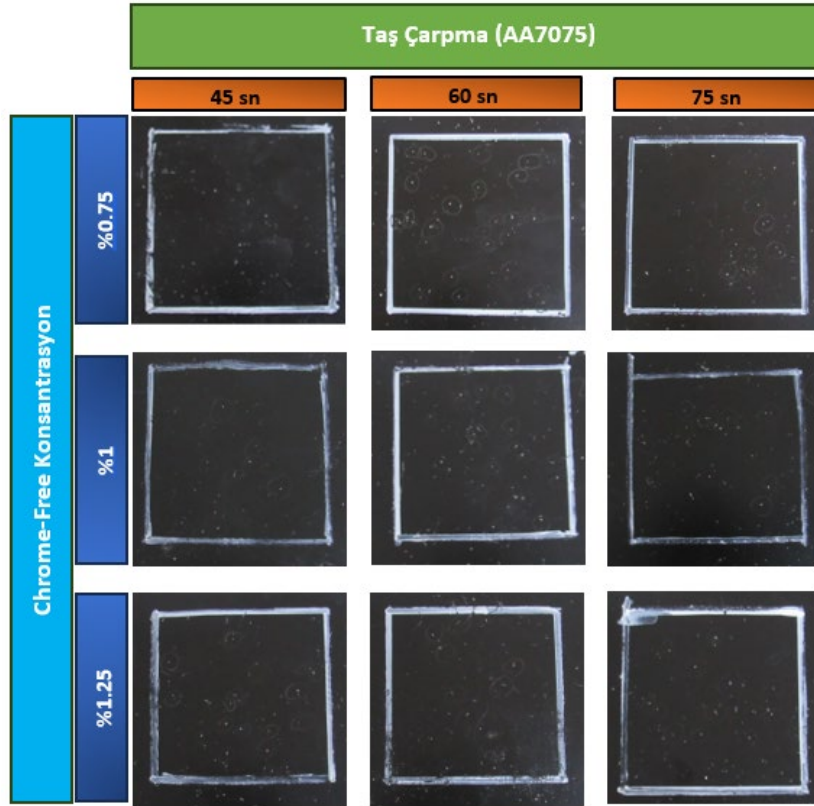
Şekil 9.14. %1,25'lik konsantrasyonlara ait test sonuçları

Şekil 9.15'de, AA7075 serisi numunelere uygulanan taş çarpma testi sonrasında elde edilen görseller sunulmuştur. Bu test sonuçları **Tablo 8.10**'a göre sınıflandırılmış ve her bir numunenin testi geçip geçmediği bu tablo doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Değerlendirme sonuçlarına göre, %0,75 konsantrasyonda işlem gören ve 45 saniye ile 60 saniye süreyle daldırılan numuneler 6B olarak sınıflandırılmış ve testi başarısız olarak sonuçlandırmıştır. Bunun aksine, diğer numuneler 7B ve 7A seviyelerinde değerlendirilmiş olup, bu sınıflandırmalar testi başarıyla geçtiğini göstermiştir.

Bu sonuçlar, kaplama performansının konsantrasyon ve işlem süresiyle doğrudan ilişkili olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Özellikle 7B ve 7A seviyelerine ulaşan numuneler, taş çarpma testine karşı üstün dayanıklılık sergilemiş, optimize edilmiş işlem parametrelerinin yüzey korumasında kritik bir rol oynadığını kanıtlamıştır. Bu bulgular, endüstriyel

uygulamalarda doğru işlem parametrelerinin seçiminin sadece kaliteyi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda uzun vadeli dayanıklılığı da sağladığını vurgulamaktadır.



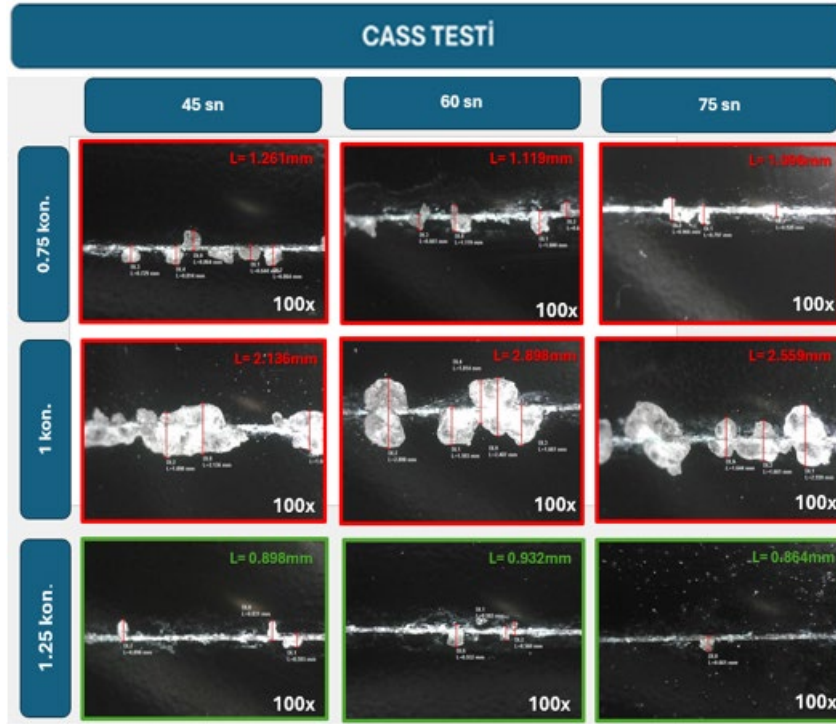
Şekil 9.15. Taş çarpma testi sonuçları

Şekil 9.16'da, AA7075 serisi numunelere uygulanan CASS testi sonrasında elde edilen görüntüler ve ölçüm sonuçları sunulmuştur. Bu testte, boya kopmalarının 1 mm'yi aşmaması beklenmektedir. Bu değeri aşan test sonuçları başarısız sayılmıştır.

Değerlendirme sonuçlarına göre, %0,75 ve %1 konsantrasyonda işlenen numunelerde boya kopmalarının 1 mm'yi aştığı tespit edilmiş ve bu nedenle bu numuneler testi geçememiştir. Öte yandan, %1,25 konsantrasyonda işlem gören numunelerde boya kopmasının ya hiç olmadığı ya da kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.

Bu bulgular, CASS testi gereksinimlerini karşılamak için daha yüksek konsantrasyonların kritik önem taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek konsantrasyonun, yüzey korumasında optimum performansı sağladığı ve kaplama bütünlüğünü koruyarak uzun ömürlü dayanıklılık sunduğu görülmektedir. Sonuç olarak, %1,25 konsantrasyon seviyesinin, özellikle korozyon direnci gereksinimlerini karşılamak ve kaplama kalitesini artırmak için en uygun çözüm olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışma, konsantrasyon optimizasyonunun endüstriyel

standartlara uyum ve ürün performansı açısından hayati bir rol oynadığını bir kez daha doğrulamaktadır.



Şekil 9.16. CASS testi sonuçları

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm testlerin sonuçları uygun olanlar yeşil renk, test sonuçları uygun olmayanlar kırmızı renkle işaretlenerek **Tablo 9.1**'de özetlenmiştir. Çalışmanın en önemli bulgularından biri, her iki alüminyum serisi için de yüksek konsantrasyon seviyelerinde çalışmanın gerekli olduğudur. Konsantrasyon artışının, özellikle kaplama bütünlüğünü koruma, korozyon direncini artırma ve dayanıklılığı optimize etme açısından kritik olduğu görülmüştür.

Ayrıca, elde edilen sonuçlar, her iki alüminyum serisinin belirli uygulama alanlarına göre farklı avantajlar sunduğunu göstermektedir. Örneğin, AA5754 serisi alüminyum, çevrim testinde üstün bir performans sergileyerek çevresel değişimlere karşı daha dayanıklı olduğunu kanıtlamıştır. Buna karşılık, AA7075 serisi alüminyum, su direnci ve taş çarpma testlerinde yüksek dayanıklılık göstermiş ve bu özellikleriyle mekanik darbelere ve dış etkenlere maruz kalabilecek uygulamalarda ideal bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Bu veriler, malzeme seçiminin yalnızca genel performansa değil, aynı zamanda kullanım amacına ve çevresel koşullara göre yapılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Yüksek konsantrasyonlarla işlem görmüş her iki alüminyum serisi de belirli alanlarda önemli avantajlar sunsa da, doğru malzeme seçimi, uygulamanın gereksinimlerine göre özelleştirilmiş bir çözüm sunma potansiyeli taşımaktadır.

Tablo 9.1. Genel sonuç tablosu

5754 Serisi Performans Testleri						
Numuneler	Kuru Yapışma	Nem Direnci	Su Direnci	Taş Çarpma	Çevrim	CASS
1,1(0.75 - 45sn)	GT0	GT0	GT5	6B	NOK	NOK
1,2(0.75 - 60sn)	GT0	GT0	GT5	6B	NOK	NOK
1,3(0.75 - 75sn)	GT0	GT0	GT5	6B	NOK	NOK
2,1(1 - 45sn)	GT0	GT0	GT5	6B	NOK	NOK
2,2(1 - 60sn)	GT0	GT0	GT5	7B	NOK	NOK
2,3(1 - 75sn)	GT0	GT0	GT5	7A	NOK	NOK
3,1(1.25 - 45sn)	GT0	GT0	GT2	7A	OK	OK
3,2(1.25 - 60sn)	GT0	GT0	GT3	7A	OK	OK
3,3(1.25 - 75sn)	GT0	GT0	GT1	7A	OK	OK
7075 Serisi Performans Testleri						
Numuneler	Kuru Yapışma	Nem Direnci	Su Direnci	Taş Çarpma	Çevrim	CASS
1,1(0.75 - 45sn)	GT0	GT3	GT4	6B	NOK	NOK
1,2(0.75 - 60sn)	GT0	GT3	GT5	6B	NOK	NOK
1,3(0.75 - 75sn)	GT0	GT3	GT4	7B	NOK	NOK
2,1(1 - 45sn)	GT0	GT0	GT1	7B	NOK	NOK
2,2(1 - 60sn)	GT0	GT0	GT1	7B	NOK	NOK
2,3(1 - 75sn)	GT0	GT0	GT1	7B	NOK	NOK
3,1(1.25 - 45sn)	GT0	GT0	GT0	7A	NOK	OK
3,2(1.25 - 60sn)	GT0	GT0	GT0	7B	NOK	OK
3,3(1.25 - 75sn)	GT0	GT0	GT0	7B	OK	OK

Sonuç olarak çalışma kapsamında, AA5754 ve AA7075 serisi alüminyum alaşımlarına uygulanan kromsuz işlemlerin kataforez kaplama sonrası yapışma direnci ve çevresel dayanıklılık performanları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan testler, farklı kromsuz konsantrasyonlarının ve işlem sürelerinin kaplama performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Özellikle cross-cut, su direnci, nem direnci, taş çarpma, korozif çevrim ve CASS testleri gibi geniş kapsamlı analizler, kaplama alt katmanının çevresel faktörlere karşı koruma sağlayan bir bariyer olarak etkinliğini değerlendirmeye odaklanmıştır. Bu kapsamda, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunabilmek adına geleneksel krom kaplama yöntemlerine alternatif arayışları desteklenmiştir.

%1,25 konsantrasyon ve 75 saniyelik işlem süresinin her iki alüminyum serisi için de optimal performans sağladığını göstermiştir. Bu parametreler, kaplamanın su, nem ve korozif

koşullara karşı dirençli bir yapı sergilemesini sağlamıştır. Öte yandan, daha düşük konsantrasyonlarda (%0,75 gibi), kaplamaların çevresel dayanıklılık özelliklerinde belirgin bir zayıflama gözlemlenmiştir. Özellikle korozif çevrim ve CASS testleri, düşük konsantrasyonlarda kaplamanın zamanla performans kaybı yaşadığını ve alt tabakanın koruyucu etkisini yitirdiğini ortaya koymuştur. Bunun yanında, yüksek konsantrasyonların ve işlem sürelerinin daha kalıcı ve homojen bir kaplama tabakası oluşumunu teşvik ettiği görülmüştür.

Çalışma, sürdürülebilir bir endüstriyel üretim süreci için kritik öneme sahip olan zararlı kimyasalların kullanımını azaltmaya yönelik güçlü bir katkı sağlamaktadır. Geleneksel krom içeren kaplamalar, çevresel ve sağlık riskleri açısından önemli sorunlar oluştururken, kromsuz alternatifler bu riskleri minimize etmekte ve endüstride daha çevre dostu süreçlerin benimsenmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen bulgular, yalnızca çevresel sorumluluk hedeflerini desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda yüksek performans standartlarını yakalayan bir çözüm sunmaktadır.

Bu bağlamda, çalışma sonuçları, alüminyum alaşımlarının kataforez kaplama süreçlerinde çevresel sürdürülebilirlik, etkinlik ve performans açısından önemli bir referans noktası olarak değerlendirilebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutacak şekilde, daha farklı malzeme grupları ve kaplama sistemlerinin bu yöntemle değerlendirilmesi, kromsuz teknolojisinin endüstriyel ölçüğe entegrasyonunu daha da hızlandıracaktır. Çevreye duyarlı kaplama çözümleri arayışında, doğru konsantrasyon ve işlem sürelerinin belirlenmesi, endüstriyel uygulamalardaki başarıyı garanti altına alacaktır.

KAYNAKÇA

- Aerts, T., Jorcin, J., Graeve, I. De, acta, H. T.-E.,** (2010). *Electrochimica acta, Elsevier.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001346861000294X>
- Andreatta, F., Turco, A., de Graeve, I., Terryn, H., de Wit, J. H. W., Fedrizzi, L.** (2007). *Surface and Coatings Technology, 201(18), 7668-7685.*
- Bagal, N. S., Kathavate, V. S., Deshpande, P. P.** (2018). *Electrochemical Energy Technology, 4(1), 47-54.*
- Berger, R., Bexell, U., Mikael Grehk, T., Hörnström, S. E.** (2007). *Surface and Coatings Technology, 202(2), 391-397.*
- Burhan Oguz.** (1990). "Demir Dışı Metallerin Kaynağı". *OERLIKON* Yayını.
- Can, A.** (2019). Alkali ve alaşımlı çinko kaplama üzerine solvent bazlı lamelli kaplama uygulaması ile oluşacak dubleks kaplamanın korozyon ve ömür testine etkisinin incelenmesi. [Erişim tarihi 16 Aralık 2024, <https://avesis.anadolu.edu.tr/yonetilen-tez/fea7b65a-c868-4988-8a25-1bcb7fa2a94f/alkali-ve-alasimli-cinko-kaplama-uzerine-solvent-bazli-lamelli-kaplama-uygulamasi-ile-olusacak-dubleks-kaplamanin-korozyon-ve-omur-testine-etkisinin-incelenmesi>]
- Cao, S., Tao, F. F., Tang, Y., Li, Y., Yu, J.** (2016). *Chemical Society Reviews, 45(17), 4747-4765.*
- Chaturvedi, T. P.** (2009). Ocak 1. An overview of the corrosion aspect of dental implants titanium and its alloys. *Indian Journal of Dental Research.*
- Chen, T., Li, W., Cai, J.** (2011). Formation of a chrome-free and coloured conversion coating on AA6063 aluminium alloy. *RSC Advances, 1(4), 607-610.*
- Chen, X., Li, G., Lian, J., Jiang, Q.** (2008). An organic chromium-free conversion coating on AZ91D magnesium alloy. *Applied Surface Science, 255(5), 2322-2328.*
- De Graeve, I., Vereecken, J., Franquet, A., Van Schaffinghen, T., Terryn, H.** (2007). *Progress in Organic Coatings, 59(3), 224-229.*
- Dogan, E.** (2013). *Elsevier.* [Erişim tarihi: 18.11.2024 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944012003086>]

Stmcoatech. (2018). *Electro (Cataphoresis) Coatings*. [Erişim tarihi: 11 Ekim 2024, <https://stmcoatech.com/electro-cataphoresis-coatings>]

Eruslu, N. (1990). *Alaşımlar Ders Notları*, İ.T.Ü Kimya- Metalurji Fakültesi , sf.86-97.

F. Sarsılmaz. (2012). The investigation of fatigue properties of AA6061/AA7075 couples by friction stir welding process. <https://doi.org/10.4149/km-2012-4-259>

Fedrizzi, L., Stenico, M., Deflorian, F., (2007). *Elsevier*. [Erişim tarihi: 26.11.2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944006001548>]

Fiat Auto Normazione 50184. (1997). *Metarial Standart* "Requirements for Nonmetals Environmental Tests for Paints".

Fiat Chrysler Automobiles 50461. (2016). Material Standard Adhesion Test Of Inorganic And Organic Trims By Squaring Off Any Printed Copy Is To Be Deemed As Unchecked; Therefore The Updated Copy Must Be Checked In The Appropriate Web Site Published By Satiz-Normazione.

Fiat 50470. (2005). "Material Standard Water Resistance Test For Decorations And Paints".

Gaidis, J. M. (2004). "Chemistry of corrosion inhibitors". *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 181-189.

Ganesan, S., Prabhu, G., Popov, B. N. (2014). "Electrodeposition and characterization of Zn-Mn coatings for corrosion protection". *Surface and Coatings Technology*, 238, 143-151.

Groysman, A. (2010). "Corrosion Mechanism and Corrosion Factors". *Corrosion for Everybody*, 1-51.

Gu, Y., Liu, J., Qu, S., Deng, Y., Han, X., Hu, W., Zhong, C. (2017). Electrodeposition of alloys and compounds from high-temperature molten salts. *Journal of Alloys and Compounds*, 690, 228-238.

Gül, M. (2024). "Effect Of Total Acid Content On Coating Morphology In The Phosphating Process". *International Journal Of New Horizons In The Sciences*, (2), 31-38.

Hem, S. L., Hogenesch, H. (2007). "Relationship between physical and chemical properties of aluminum-containing adjuvants and immunopotentiality". *Expert Review of Vaccines*, 6(5), 685-698.

- Heung, W. F., Yang, Y. P., Wong, P. C., Mitchell, K. A. R., Foster, T.** (1994). "XPS and corrosion studies on zinc phosphate coated 7075-T6 aluminium alloy". *Journal of Materials Science*, 29(5), 1368-1373.
- Hinton, B. R. W.** (1995). "Chapter 140 Corrosion prevention and control". *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, 21, 29-92.
- Hirsch, J.** (1997). Aluminium Alloys for Automotive Application. *Materials Science Forum*, 242, 33-50.
- Holmes, A., Wise, S.** (2008). Carcinogenicity of hexavalent chromium [Erişim tarihi: 14.11.2024 <https://journals.lww.com/ijmr/abstract/2008/28040>]
- ISO 9227.** (2006). BS EN ISO 9227-2006 Corrosion tests.
- Kaufman, J. G., Rooy, E. L.** (2004). *Aluminum Alloy Castings Properties, Processes, and Applications*. [Erişim tarihi: 09.11.2024 www.asminternational.orgwww.afsinc.orgwww.asminternational.org]
- Kaykaç, N. G.** (2022). *Investigation Of Process Parameters On Properties Of Epoxy Based Cathaphoretic Coatings*. [Erişim tarihi: 05.10.2024 <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/98621>]
- Kumar, S., Jb, K., Park, K.** (2012). An Overview on Taguchi Method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1, 11-18. [Erişim tarihi: 11.10.2024 <https://www.researchgate.net/publication/265282800>]
- Montemor, M. F., Ferreira, M. G. S.** (2007). Electrochemical study of modified bis-[triethoxysilylpropyl] tetrasulfide silane films applied on the AZ31 Mg alloy. *Electrochimica Acta*, 52(27), 7486-7495.
- Nordlien, J. H., Walmsley, J. C., Østerberg, H., Nisancioglu, K.** (2002). Formation of a zirconium-titanium based conversion layer on AA 6060 aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 153(1), 72-78.
- Övündür, M.** (2015). *Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Mikro Ark Oksidasyon Ve Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Karşılaştırılması*. polen.itu.edu.trM Övündürpolen.itu.edu.tr. [Erişim tarihi: 05.10.2024 <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/000b17c5-0bfc-45bf-bf85e1f455192bc/download>]

- Özcanak, T.** (2008). "*Kataforez Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlama, Kurutma ve Kaplama Proseslerinin İncelenmesi*". Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Pedefferri, P.** (1996). Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, 10(5), 391-402.
- Piontelli, R., Pedefferri, P.** (1968). Electrochemical Painting of Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 115(10), 1046.
- Reboul, M. C., Warner, T. J., Mayet, H., Baroux, B.** (1996). A Ten-Step Mechanism for the Pitting Corrosion of Aluminium. *Materials Science Forum*, 217-222(PART 3), 1553-1558.
- Revie, R., Uhlig, H.** (2011). *Uhlig's corrosion handbook*, 1253. [Erişim tarihi: 14.10.2024 https://books.google.com/books/Uhlig_s_Corrosion_Handbook.html]
- SAE J400.** (2002). "SAE j400 Test for Chip Resistance of Surface Coating".
- SAE J2334.** (2016). "Laboratory Cyclic Corrosion Test".
- Salman, S. A., Ichino, R., Okido, M.** (2007). Development of Cerium-based Conversion Coating on Magnesium Alloy. *Chemistry Letters*, 36(8), 1024-1025.
- Satake, M. N. T.** (1990). *Physical Chemistry, New Delhi*.
- Sierka, C.** (2015). *Industrial zinc plating processes*. [Erişim tarihi: 05.10.2024, <https://search.proquest.com/openview/079c51cfd68e60e85f5a3972059cbf50/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>]
- Singh, D., Yadav, S.** (2008). Role of tannic acid based rust converter on formation of passive film on zinc rich coating exposed in simulated concrete pore solution. *Surface and Coatings Technology*, 202(8), 1526-1542.
- Skotnicki, W., Jędrzejczyk, D.** (2021). The Comparative Analysis of the Coatings Deposited on the Automotive Parts by the Cataphoresis Method. *Materials 2021, Vol. 14, Page 6155*, 14(20), 6155.
- Smit, M. A., Hunter, J. A., Sharman, J. D. B., Scamans, G. M., Sykes, J. M.** (2004). Effects of thermal and mechanical treatments on a titanium-based conversion coating for aluminium alloys. *Corrosion Science*, 46(7), 1713-1727.

- Stępniewski, W. J., Moneta, M., Norek, M., Michalska-Domańska, M., Scarpellini, A., Salerno, M.** (2016). The influence of electrolyte composition on the growth of nanoporous anodic alumina. *Electrochimica Acta*, 211, 453-460.
- Sugimura, Seiji, Liao, J.** (2016). Long-term corrosion protection of arc spray Zn-Al-Si coating system in dilute chloride solutions and sulfate solutions. *Surface and Coatings Technology*, 302, 398-409.
- Taguchi, G.** (1985). "Quality engineering in japan". *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 14(11), 2785-2801.
- Takeshita, Y., Sawada, T., Handa, T.** (2012). "Influence of air-cooling time on physical properties of thermoplastic polyester powder coatings". Elsevier. Erişim tarihi: 14.11.2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03009440>]
- Tamilselvi, M., Kamaraj, P., Arthanareeswari, M., Devikala, S.** (2015). "Nano zinc phosphate coatings for enhanced corrosion resistance of mild steel". *Applied Surface Science*, 327, 218-225.
- Türkmen, I., Gül, R., Çelik, C.** (2008). A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. *Building and Environment*, 43(6), 1127-1137.
- Twite, R. L., Bierwagen, G. P.** (1998). Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys. *Progress in Organic Coatings*, 33(2), 91-100.
- Ulubayrak, S.** (2020). *Metal parçalar üzerine fosfat ve su bazlı lamelli kaplama araştırılması*. [Erişim tarihi: 25.11.2024, <http://acikkaynak.bilecik.edu.tr>]
- Usta, İ.** (2022). *Akımsız kaplama yöntemi ile çok alaşımlı Ni-W-P/Al₂O₂ kompozit kaplamaların geliştirilmesi*. [Erişim tarihi: 19.11.2024, <http://acikerisim.subu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.14002/1259>]
- Usta, İ.** (2024). "Effect Of Accelerator Concentration On Microstructure And Coating Thickness During The Phosphating Process". *International Journal Of New Horizons In The Sciences*, (2), 24-30.
- 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 Cathodic Coating". *Sakarya University Journal of Science*, 28(1), 220-236.

- Usta, İ., Yılmaz, O., Gül, M., Can, A., Gül, H.,** (2023). Effect of Different Passivation Treatments on Alkali Zn-Ni Coatings: Corrosion Resistance and Adhesion Performance of Geomet 321 and ML Black Coatings. *Open Journal of Nano*, 8(2), 84-98.
- Ünal, N.** (1987). "Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemleri, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.". (Bitirme Ödevi), İ.T.Ü..
- Verdier, S., van der Laak, N., Dalard, F., Metson, J., Delalande, S.** (2006). *Surface and Coatings Technology*, 200(9), 2955-2964.
- Vu, T.** (2012). "Selective dissolution from Zn-Al alloy coatings on steel". [Erişim tarihi: 19.11.2024, <https://theses.hal.science/tel-00839479>]
- Wang, H., Wang, H. W.** (2006). "Analysis on porous aluminum anodic oxide film formed in Re-OA-H₃PO₄ solution". *Materials Chemistry and Physics*, 97(2-3), 213-218.
- Wicks, Jr., Z. W., Jones, F. N., Peppas, S. P.** (1993). *Drying Technology*, 11(6), 1477-1477.
- Yargıç, A. Ş., Eren, B., Özbay, N.** (2023). *Journal of Polytechnic*, 1-1.
- Ying, J. F., Zhou, M. Y., Flinn, B. J., Wong, P. C., Mitchell, K. A. R., Foster, T.** (1996). *Journal of Materials Science*, 31(3), 565-571.
- Zhang, H., Yao, G., Wang, S., Liu, Y.,** (2008), "A chrome-free conversion coating for magnesium-lithium alloy by a phosphate-permanganate solution". *Surface and Coatings Technology*, 2008•Elsevier. [Erişim tarihi: 19.11.2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897207008559>]
- Zhao, J., Xia, L., Sehgal, A., Lu, D., McCreery, R. L., Frankel, G. S.** (2001). "Effects of chromate and chromate conversion coatings on corrosion of aluminum alloy 2024-T3". *Surface and Coatings Technology*, 140(1), 51-57.
- Zimmermann, D., Muñoz, A. G., Schultze, J. W.** (2003). "Microscopic local elements in the phosphating process". *Electrochimica Acta*, 48(20-22), 3267-3277.
- Zucchi, F., Grassi, V., Frignani, A., Trabanelli, G., Monticelli, C.** (2007). "Octadecyl-trimethoxy-silane film formed on copper in different conditions". *Materials Chemistry and Physics*, 103(2-3), 340-344.