



**BİLYALI DÖVME SONRASI ÇEŞİTLİ YÜZEY  
KAPLAMALARI İLE QSTE 690 VE S355J2  
ÇELİĞİNİN KOROZYON DİRENCİNİN  
İNCELENMESİ**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Burhan OĞUZ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**BİLYALI DÖVME SONRASI ÇEŞİTLİ YÜZEY KAPLAMALARI İLE QSTE  
690 VE S355J2 ÇELİĞİNİN KOROZYON DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

**Burhan OĞUZ**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Şubat 2023**

Burhan OĞUZ tarafından hazırlanan “BİLYALI DÖVME SONRASI ÇEŞİTLİ YÜZEY KAPLAMALARI İLE QSTE 690 VE S355J2 ÇELİĞİNİN KOROZYON DİRENCİNİN İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR

.....

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/02/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ali GÜNEN (İSTE)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Burhan OĞUZ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **BİLYALI DÖVME SONRASI ÇEŞİTLİ YÜZEY KAPLAMALARI İLE QSTE 690 VE S355J2 ÇELİĞİNİN KOROZYON DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

**Burhan OĞUZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Şubat 2023, 69 sayfa**

Bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş iki farklı kalite (X ve Y) çelikleri ve bu iki kaliteye herhangi bir dövme işlemi uygulanmamış halleri üzerine uygulanan kaplamalar (kataforez, çinko nikel) ile korozyon dirençleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bilyalı dövme işlemi S230 çelik bilyalar kullanılarak 13 dakika tamburlu kumlama makinasında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu çelik plakalar endüstriyel uygulama şartlarında kataforez kaplama ve alkali çinko nikel kaplama prosesine alınmıştır. Yüzey kaplamaları gerçekleştirilen numunelerin, kaplama kalınlıkları x-ray ile belirlenmiş ve adhezyon testleri DIN EN ISO 2409 standardına göre belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemine tabi tutulan numunelerin kataforez kaplama kalınlıklarının bilyalı dövme uygulanmaya numunelere göre daha düşük kaplama kalınlıklarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Numunelere tuz sisi testi ASTM B 117 / DIN EN ISO 9227 metoduna uygun olarak %95 nem içersinde, 35C sıcaklıkta, sodyum klorür çözeltilisi ihtiva eden tuz sisi ile 1008 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon testinin sonuçlarına göre bilyalı dövme işlemine maruz kalan parçaların katoferez sonrası korozyon dayanımları düşmüş alkali çinko nikel kaplananların korozyon dayanımları ise artmıştır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda bozulan yüzey kalitesi katoferez kaplamayı korozyon direnci bakımından olumsuz etkilemiştir.

Bilyalı dövme yapılmış parçaların kesit yüzeyleri incelendiğinde yapıda çukurcuklar şeklinde girinti ve çıkıntılar meydana geldiği buna bağlı olarak kataforez prosesinde bekleme sürelerinin ,bilyalı dövme uygulanmamış daha düzgün yüzeyli olan saclara göre yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Bilyalı dövme (shot peening), kataforez, Alkali çinko nikel,  
Korozyon

**Bilim Kodu** : 91510

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF CORROSION RESISTANCE OF QSte 690 AND S355J2 STEELS COATED WITH CATAPHORESIA AND ALKALINE ZINC NICKEL COATED BY BALL FORGING**

**Burhan OĞUZ**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**February 2023, 69 pages**

Experimental studies were carried out using two different grades of steel with shot peening and steel materials without shot peening. Shot peening was carried out in a drum shot blasting machine for 13 minutes using S230 steel balls. Then these steel plates were taken into the cathodization coating and alkaline zinc nickel coating process under factory conditions. The coating thicknesses of the samples with surface coatings were measured and given as a table. It was determined that there was a decrease in the coating thickness of the ball forged ones in the cathodization coated parts. Then, surface adhesion tests of these parts after cathodization coating were carried out.

The corrosion test was carried out in salt water in accordance with ASTM B 117 / DIN EN ISO 9227 method for 1008 hours. According to the results of the corrosion test, the corrosion resistance of the parts exposed to the ball forging process decreased after

cataphoresis and the corrosion resistance of the alkali zinc nickel coated parts increased. The deteriorated surface quality as a result of the ball forging process negatively affected the cataphoresis coating in terms of corrosion resistance.

When the ball forged parts are viewed in the horizontal plane, the waiting times in the cataphoresis process may be insufficient for the filling of the pits, indentations and protrusions formed in the horizontal plane compared to the sheets with smoother surfaces. If an additional process has been performed on such parts, it is absolutely necessary to evaluate the parts after the phosphate bath and create a process design according to the results

**Key Word** : Shot peening, Cataphoresis, Alkali zinc nickel, Corrosion.

**Science Code** : 91510



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa YAŞAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında ekipmanlarından yararlandığım, KARAKAYA 86 Katoferez Yüzey Kaplama Sanayi TİC.A.Ş. Yönetim kuruluna, ve Ar-Ge Laboratuvarı personellerine destek ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bana destek veren, yardımlarını esirgemeyen sayın Tolga ŞİMŞEK, Melih DOĞAN ve Nurullah ŞAHİN'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, manevi desteklerini, sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Halime OĞUZ, çocuklarım Yusuf OĞUZ, Süeda OĞUZ ve Zeynep OĞUZ'a ayrıca bugünlerime gelmemde üzerimde büyük emekleri olan babam Mehmet OĞUZ'a, annem Nazmiye OĞUZ'a, abim Orhan OĞUZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
ÇELİKLER .....	3
2.1. QSTE 690 TM (TERMOMEKANİK OLARAK HADDELENMİŞ İNCE TANELİ ÇELİKLER) ÇELİKLERİ .....	4
2.2. S355J2 YAPI ÇELİKLERİ .....	4
BÖLÜM 3 .....	6
YÜZEY İŞLEMLERİ .....	6
3.1. BİLYALI DÖVME İŞLEMİ VE AMACI .....	6
3.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN UYGULAMA ALANLAR .....	8
3.3. BİLYALI DÖVME MAKİNELERİ .....	10
3.4. BİLYALARIN SINIFLANDIRILMASI.....	11
3.5. BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİ .....	13
BÖLÜM 4 .....	17
KATAFOREZ KAPLAMA .....	17
4.1. YÜZEY ÖN HAZIRLAMA.....	20

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.2. YAĞ ALMA.....	21
4.3. DURULAMA .....	23
4.4. AKTİVASYON.....	24
4.5. FOSFATLAMA .....	26
4.5. PASİVASYON.....	28
4.6. DEİYONİZE DURULAMA .....	29
4.7. KATAFOREZ (ELEKTRO KAPLAMA).....	30
4.8. KATAFOREZ KAPLAMA MEKANİZMASI .....	31
4.9. KATAFOREZ BANYO BİLEŞENLERİ.....	35
4.9.1. Katyonik Polimer Emülsiyon (Reçine).....	36
4.9.2. Pigment pasta.....	36
4.9.3. Solventler.....	38
4.10. KATAFOREZ KAPLAMAYI ETKİLEYEN PARAMETRELER .....	38
4.10.1. Voltaj .....	39
4.10.2. Kaplama Süresi.....	39
4.10.3. İletkenlik.....	40
4.10.4. Banyo Sıcaklığı.....	40
4.10.5. Katı, Kül ve P/B oranı .....	41
4.10.6. Ph.....	42
4.11. FIRINLAMA.....	43
4.12. ALKALİ ÇİNKO NİKEL KAPLAMA.....	44
BÖLÜM 5 .....	46
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	46
5.1. ÇELİK NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI .....	46
5.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİ .....	46
5.3. KATAFOREZ VE ALKALİ ÇİNKO NİKEL KAPLAMA.....	48
5.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ .....	50
5.5. KOROZYON.....	52
5.6. YAPIŞMA (ÇİZİK) TESTİ.....	52
BÖLÜM 6 .....	54
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	54

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.1. KAPLAMA KALINLIKLARI.....	54
6.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ.....	55
6.3. KOROZYON.....	56
6.4. YAPIŞMA TEST SONUCU .....	60
BÖLÜM 7 .....	64
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR .....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	69

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. (a) Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu .....	6
Şekil 3.2. Bilyalı dövme işlemi .....	7
Şekil 3.3. Bilya çeşitleri .....	8
Şekil 3.4. Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi.....	9
Şekil 3.5. Formula 1 aracı .....	9
Şekil 3.6. Bilyalı dövme makinaların sınıflandırılması .....	10
Şekil 3.7. Hava püskürtmeli bilyalı dövme cihazı .....	11
Şekil 3.8. Bilya tipleri ve sınıflandırılması .....	11
Şekil 3.9. Çelik bilyaların sınıflandırılması .....	12
Şekil 3.10. Bilya çarpma açısı.....	14
Şekil 3.11. Almen test şeriti ve boyutları.....	15
Şekil 3.12. Almen testi ölçümü a) cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi, b) doyum noktası eğrisi.....	15
Şekil 3.13. Yüzey örtme oranı yüzdeleri.....	16
Şekil 4.1. Kataforez banyosu .....	19
Şekil 4.2. Kataforez kaplama prosesi.....	20
Şekil 4.3. Yağ Partikülünün Yüzeyden Ayrılma Süreci .....	21
Şekil 4.4. Aktivasyon olmadan fosfat kaplama.....	26
Şekil 4.5. Aktivasyon yapılarak fosfat kaplama.....	26
Şekil 4.6. Kataforez hattı.....	30
Şekil 4.7. Boya filmi kalınlığı ile uygulanan voltajın ilişkisi .....	32
Şekil 4.8. Kaplama süresi ile akım geçişi ilişkisi.....	33
Şekil 4.9. Kataforez kaplama sonrası durulama işlemleri.....	35
Şekil 4.10. Kataforez boya banyosundaki maddelerin oranları .....	36
Şekil 4.11. Pigment örnekleri.....	37
Şekil 4.12. Fenoksi katkılı ve normal film karşılaştırması.....	38
Şekil 4.13. Film yırtılması.....	39
Şekil 4.14. Kaplama süresi – Film kalınlığı ilişkisi .....	40
Şekil 4.15. Banyo sıcaklığının film kalınlığına etkisi .....	41

## **Sayfa**

Şekil 4.16. Düşük P/B oranı .....	42
Şekil 4.17. Yüksek P/B oranı .....	42
Şekil 4.18. Kurlenme penceresi (metal sıcaklığı) .....	44
Şekil 5.1. (a) S355J2 yapı çeliğinin işlemsiz plaka, (b) S355J2 yapı çeliğinin bilyalı dövme işlemi uygulanmış. ....	47
Şekil 5.2. QSte TM 690 çeliğinin, (a) işlemsiz ve (b) bilyalı dövme işlemi uygulanmış.....	47
Şekil 5.3. İşlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış plaka.....	48
Şekil 5.4. Numunelerin kaplama öncesi.....	49
Şekil 5.5. Numunelerin kaplama sonrası.....	49
Şekil 5.6. Numunelerin askı durumu.....	50
Şekil 5.7. Surfrest SJ-210 yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı.....	50
Şekil 6.1. İşlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM ve S355J2 çeliklerinin kataforez ve alkali çinko nikel kaplama sonrası korozyon yüzey görüntüsü.....	56
Şekil 6.2. İşlemsiz QSte 690 TM çeliğin (a) alkali çinko nikel kaplama ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri... ..	57
Şekil 6.3. Bilyalı dövme işlemi uygulanan QSte 690 TM çeliğin (a) alkali çinko nikel kaplama ve (b) kataforez kaplama sonucu korozyon numuneleri. .	58
Şekil 6.4. İşlemsiz S355J2 çeliğinin (a) alkali çinko nikel kaplamalı ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri.....	59
Şekil 6.5. Bilyalı dövme işlemi uygulanan S355J2 çeliğinin (a) alkali çinko nikel kaplamalı ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri .....	59
Şekil 6.6. İşlemsiz QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.....	60
Şekil 6.7. Bilyalı dövme uygulanmış QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.....	61
Şekil 6.8. İşlemsiz S355J2 çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.....	62
Şekil 6.9. Bilyalı dövme uygulanmış S355J2 çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.....	62

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. DIN normuna göre çelik ve dökme demirlerin kısaltılması.....	3
Çizelge 2.2. QSte 690 TM çeliğinin mekanik özellikleri.....	4
Çizelge 2.3. QSte 690 TM çeliğinin kimyasal analizi.....	4
Çizelge 2.4. S355J2 Yapı çeliğinin kimyasal analizi. ....	5
Çizelge 3.1. Çelik bilya boyutları.....	12
Çizelge 3.2. Almen Şeritlerinin standartlaştırılmış özellikleri .....	15
Çizelge 4.1. Kataforez banyosunun çalışma parametreleri .....	19
Çizelge 4.2. Spreyle ve daldırma ile yağ alma banyolarının çalışma parametreleri	23
Çizelge 4.3. Yağ alma sonrası durulama banyolarının çalışma parametreleri .....	24
Çizelge 4.4. Fosfat sonrası durulama banyolarının çalışma parametreleri.....	24
Çizelge 4.5. Sıvı ve toz aktivasyon malzemesinin karşılaştırması.....	25
Çizelge 4.6. Fosfat banyosunun çalışma parametresi.....	27
Çizelge 4.7. Pasivasyon banyosunun çalışma parametreleri .....	29
Çizelge 4.8. Deiyonize durulama banyosunun çalışma parametresi. ....	30
Çizelge 4.9. Kaplama prosedürü. ....	32
Çizelge 4.10. Kataforez banyo bileşenleri ve özellikleri .....	35
Çizelge 5.1. S230 çelik bilyanın kimyasal bileşimi. ....	46
Çizelge 5.2. Surfrest SJ-210 cihazının özellikleri. ....	51
Çizelge 5.3. Aynı Ra kalitesine sahip bazı yüzey kesitlerinin şematik çizimleri....	51
Çizelge 5.4. Yapışma testi sonrası yüzey değerlendirme tablosu. ....	53
Çizelge 6.1. Kataforez ve Alkali Nikel Çinko kaplama kalınlıkları.....	54
Çizelge 6.2. Numunelerin Ra ve Rz ölçü değerleri .....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- StE : çekme sınırı verilen yapı çeliği  
GG : lamelli grafitli dökme demir  
GK : kokil döküm  
GS : çelik döküm  
QSte : Termomekanik Olarak Haddelenmiş İnce Taneli Çelikler  
St : Alaşimsız yapı çeliği  
Cu : bakır  
C : karbon  
Mn : mangan  
Mo : molibden  
Fe : demir  
Ca : kalsiyum  
Mg : magnezyum  
V : vanadyum  
HRC : rockwell sertlik birimi  
UF : ultrafiltrasyon  
Ra-Rz: pürüzlülük ölçü değeri



## **KISALTMALAR**

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

ANSI : American National Standards Institute ( Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)

SAE : American Association of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Derneği)

VDA : Verband der Automobilindustrie ( Alman Otomotiv Endüstrisi Birliği)

JIS : Japanese Information Standard ( Japon endüstriyel standardını)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

2021 Dünya çelik üretimi verilerine göre yılda 1,95 milyar ton çelik üretilmektedir [1]. Ancak, soymetaller haricindeki metallerin kaçınılmaz problemi korozyon olduğundan günümüzde demir-esaslı ürünlerin yenilenmesi ve/veya onarımı sebebiyle çeliklerden imal edilen malzemelerde korozyon kaynaklı önemli maddi kayıplar meydana gelmektedir. Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği'nin (NACE) 2016 yılında yayınladığı korozyon teknolojisinin (IMPACT) önlenmesi, uygulanması ve ekonomisine ilişkin uluslararası önlemler hakkındaki raporuna göre, 2,5 trilyon ABD doları (dünyanın gayri safi hasılasının neredeyse %3,4'üne eşdeğer), dünya çapında korozyon koruması için harcanmaktadır [2]. Çeliğin korozyona karşı direncinin artırılması, mali kayıpların önlenmesinin yanı sıra çeşitli kazalara yol açabileceğinden oldukça önemlidir. Korozyon olayının genellikle başlangıç noktası ortam ile temas halinde bulunan yüzeydir. Bu amaçla çelik yüzeyinde yüksek korozyon direncine sahip bir yüzey modifikasyonu veya kaplama uygulaması, çeliğin korozyon direncini artırmada alışılmamaya nazaran daha maliyet etkenli bir yaklaşım sağlar.

Metal malzemeleri korozyona karşı korumak için yaygın olarak, çinko ve çeşitli alaşım kaplamalar kullanır. Bu kaplamalar genellikle korozyona karşı iyi bir direnç gösterirler. Ancak bu kaplamalara alternatif olarak kataforez yöntemide (maliyet etkenli, yüksek uygulama hızı, kompleks yüzeylerde düzgün ve yeterli kaplama, düşük çevre kirliliği, yangın ve sağlık riski vb...) üstünlüklerinden dolayı sık tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Kataforez kaplama, otomotiv, beyaz eşya, havacılık ve denizcilik sektöründe metal yüzeylerde kullanılan ilk kat (astar) kaplamadır. Elektrokimya prensiplerine dayanarak metal yüzeylere yapılan su bazlı astar kaplamadır. Bu kaplama yöntemi iletken özellik gösteren tüm metal yüzeylere uygulanabilir.

Malzeme üretim süreçleri birçok üretim sürecinden meydana gelmesi sebebiyle malzemeler bir miktar kalıntı gerilmesi içerebilirler. Malzemede ki kalıntı gerilmelerinin yok edilmesi, malzemenin mekanik özelliklerinde (darbe, yorulma, sürütme vb.) iyileşme sağlar. Yorulma ömrünün iyileştirilmesi için birçok mekanik yöntem kullanılmaktadır. Bilyalı dövme işlemi artık kalıntı gerilmesi ve yorulma üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bilyalı dövme işlemi uygulamanın önemli avantajlarından biride makine elemanlarının hizmet ömrünü uzatmak ve yorulma çatlaklarının büyümesini engellemektir. Bilyalı dövmenin yüzeyi temizleme ve yorulma mukavemetini iyileştirme gibi olumlu özelliklerine karşın, yüzey kalitesinin bozulması gibi olumsuz yönleri de vardır.

Bu tez çalışması kapsamında otomotiv imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan iki farklı kalitede QSte 690 TM ve S355J2 çelik malzemeye tamburlu bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelere kataforez kaplama ve alkali çinko-nikel kaplama işlemleri uygulanmış. Bilyalı dövme işleminin kataforez kaplama ve alkali çinko-nikel kaplamaların fiziksel, mekanik özellikler ve korozyon dirençlerine etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kaplamaların karakterizasyonu kaplama kalınlıklarının ölçülmesi, yüzey pürüzlülüklerinin tespiti, kuru yüzey yapışma testi ve tuzlu sisi içerisinde 1008 saat ASTM-B114 korozyon testine tabi tutulması ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda genel değerlendirme ve öneriler sonuç olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre korozyona bağlı yaşanabilecek kayıpların önlenmesi ya da süre olarak geciktirilmesi doğru bir yüzey kaplama yöntemi ile mümkün olacaktır.

## BÖLÜM 2

### ÇELİKLER

Gelişen üretim olanakları ve gelişen teknoloji sayesinde farklı kalite ve ebatlardaki çelik konstrüksiyonlar artık daha kolay üretilebilmektedir. Ancak yüksek dayanımlı çelikler kullanılırken malzemeyi etkileyen gerilmelerin neden olduğu titreşim genlikleri ve deformasyon için öngörülen toleransların da dikkate alınması gerekmektedir [1].

Çeşitli alaşımlama yöntemleri ile, imalatta kullanılan çeliklerin kullanım özelliklerinin (manyetik özellikler, süneklik, aşınma direnci, tokluk, sertleşebilirlik, vb.) ayrıca imalat vasıflarının (korozyon direnci, tane küçültme etkisi, elektrik direnci, yüksek sıcaklık direnci vb.) olumlu yönde geliştirilmesi mümkün olabilir [1].

Alman standardı (DIN) daha çok çelik mukavemetini dikkate alır. "St" işareti, DIN normunda tipik olarak kısa bir adı olan çelikleri belirtmek için kullanılır. Ondan sonraki rakamlar 37, 42 gibi malzemenin çekme dayanımını temsil etmektedir [2].

Çizelge 2.1. DIN normuna göre çelik ve dökme demirlerin kısaltılması [2].

Tanımlama Harfi	Anlam
S355J2 (St)	Alaşımsız yapı çeliği
StE	Çekme sınırı verilen yapı çeliği
GG	Lamelli grafitli dökme demir
GK	Kokil Döküm
GS	Çelik Döküm
GZ	Savurma Döküm

## 2.1. QSTE 690 TM (TERMOMEKANİK OLARAK HADDELENMİŞ İNCE TANELİ ÇELİKLER) ÇELİKLERİ

Mükemmel akma dayanımına sahip soğuk şekillendirme çelikleridir. Elastikiyet, plastisite, sertlik, mukavemet, darbe tokluğu, yorulma mukavemeti ve kırılma tokluğu birincil mekanik niteliklerdir [3].

Çizelge 2.2. QSte 690 TM çeliğinin mekanik özellikleri [3].

Verim $R_{p0.2}$ (MPa)	Çekme $R_m$ (MPa)	Darbe KV/Ku (J)	Uzama A (%)	Sertlik ( HBW)
694	463	34	34	232

Çizelge 2.3. QSte 690 TM çeliğinin kimyasal analizi[3].

% Kimyasal Bileşim											
C	Mn	Si	P	S	Mo	Al	Ti	Ni	Cu	Cr	Fe
0,09	2,14	0,60	0,02	0,005	0,15	0,03	0,11	0,1	0,3	0,2	96,7

## 2.2. S355J2 YAPI ÇELİKLERİ

DIN17100 kapsamında DIN standartlarına uygun yapı çelikleri olarak adlandırılır. Kısaltılmış gösterimde DIN normunun önünde bulunabilen tek malzeme çeliktir. Köprü, bina, levha, sac ve profil çelik konstrüksiyonlarında kullanılan çeliklerdir. Yapısal çeliğin belirtilen mukavemet değerleri, sıcak veya soğuk haddelemenin malzemeye verdiği şekil için geçerlidir. Yapı çeliği torna veya frezeden talaş kaldırılarak inceltirse ortaya çıkan dayanım değerleri katalogta verilen dayanım değerlerinden önemli ölçüde düşük olabilir. Çünkü yapı çeliklerinin içindeki dayanım değerleri, dışarıdaki dayanım değerlerinden oldukça düşüktür. Bu nedenle yapı çelikleri, delme ve kesme işlemleri dışında ısıl işleme veya talaş kaldırma işlemine tabi tutulamaz [4].

Çekme gerilmesi ve akma sınır değerleri dikkate alındığında, çekme mukavemetine göre ifade edilen yapı çelikleri, çelik konstrüksiyonlar, köprü inşaatları ve ekipmanları,

makine imalat ve otomotiv sanayisinde tercih edilmektedir. Bu çelikler düşük sıcaklıklarda tokluk, akma ve çekme mukavemeti ile bilinirler [4].

Alaşımız yapı çeliklerinin genel özellikleri;

- Uygun akma sınırı ve çekme dayanımı,
- Uygun darbe dayanımı,
- Gevrek kırılma direnci,
- İyi işlenebilirlik,
- İyi kaynaklanabilirlik,
- İyi şekillendirilebilirlik olarak verilebilir.

Genellikle alaşımsız çelikler olarak adlandırılan bu çelik grupları, mevcut karbon miktarından daha çok etkilenen mekanik özelliklere sahiptir, ancak özellikle hammaddelerde ve imalat süreçlerinde bulunan manganez, silikon, bakır ve kükürt gibi elementlerin yanı sıra azot ve fosfor gibi elementlerde çok faydalıdır. Çeliğin sertliği 140-190(HB)dir.

Çizelge 2.4. S355J2 Yapı çeliğinin kimyasal analizi.

Çelik Sembolü		Kimyasal Bileşim (%)							
Eski	Yeni	C	P	S	Mn	Si	Cu	Al	Fe
St 52-3	S355J2-G3	0,18	0,01	0,005	1,38	0,23	0,03	0,06	98,0

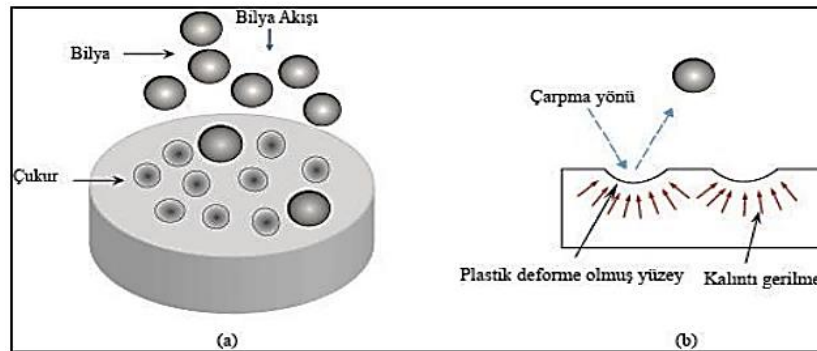
## BÖLÜM 3

### YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüzey işlemlerinin üç temel kategorisi termal, mekanik ve termo-mekaniktir. Bu tez çalışması kapsamında uygulanan bilyalı dövme, mekanik yüzey hazırlıkları olarak adlandırılır.

#### 3.1. BİLYALI DÖVME İŞLEMİ VE AMACI

Yüksek dayanımlı çelikler, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, mekanik özellikleri ve yorulma performansının iyileştirmesi amacıyla yüzey modifikasyon tekniği olarak sıklıkla bilyalı dövme işleminin tabii tutulurlar. Bu yüzey modifikasyon işleminin bir sonucu olarak, tipik yüzey topografyası, dislokasyon yoğunluğu, yüzeye yakın alanlarda artık gerilmeler ve yollarındaki çatlakları durduran yüzey katmanlarının oluşumu artar. Sonuç olarak, metalik malzemelerin yorulma ömrü büyük ölçüde artar. Bilya dövme işlemi sırasında, metal yüzeyi küçük çaplı bilyalardan oluşan bir akıma maruz bırakmak için basınçlı hava kullanılarak bir yüzey modifikasyon işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.1, yüzeyde bilyalı dövme işleminden kaynaklanan plastik deformasyonu ve artık gerilmeleri şematik olarak göstermektedir [5, 6].



Şekil 3.1. (a) Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu [7].

Yüzeyin sadece alt kısımlarında elastik deformasyona maruz kalan bölgeleri, bilya yüzeye kuvvetli bir şekilde çarptığında deforme olmuş bölgelerin genişlemesini durduracaktır. Malzemenin iç kısımlarında genleşmeyi önlemek için, elastik deformasyon alanları çekme gerilmesine maruz bırakır, bu da yüzeyde ve yüzeyin hemen altında, bilya dövmeden etkilenen alanlara sıkıştırma artık gerilmesi ile sonuçlanır. Metalik yüzeyin hemen altına geri yüklemeye çalışan basınç gerilimi, yüzeyde bir çukur oluşmasına neden olan çekme geriliminden kaçınmaya çalışır. Bu nedenle metal, yüzeyin hemen altında yoğun bir şekilde sıkıştırılır. Örtüşen çukurların altında, sıkıştırmaya bağlı artık çekme profili gelişir. Şu anda sadece elastik gerinimler gerilim olarak düşünülebilir. Sonuç olarak metallerde bilye dövme sonrasında elastik sınırın ve altında gelişen gerilmeler kalıcı gerilmelerdir. Başka bir deyişle, daha fazla plastik deformasyonu önlemek için artık gerilmeler akma dayanımı değerini aşmamalıdır. Sonuçlar, bilyalı dövme işlemini takip eden artık gerilmelerin, o metalin minimum ve maksimum akma dayanımlarına neredeyse eşit olduğunu göstermektedir [8]. Çatlaklar, sıkıştırma kalıntı gerilimi ile izlerinde durdurulur. Bilyalı dövmenin sıkıştırma gerilimi makine parçalarının ömrünü uzatır, çünkü tüm yorulma ve çekme korozyon hasarı yüzeyde başlar [9]. Şekil 3.2'de dişli bir parçanın dövülmüş bilya görüntüsü görülebilir.

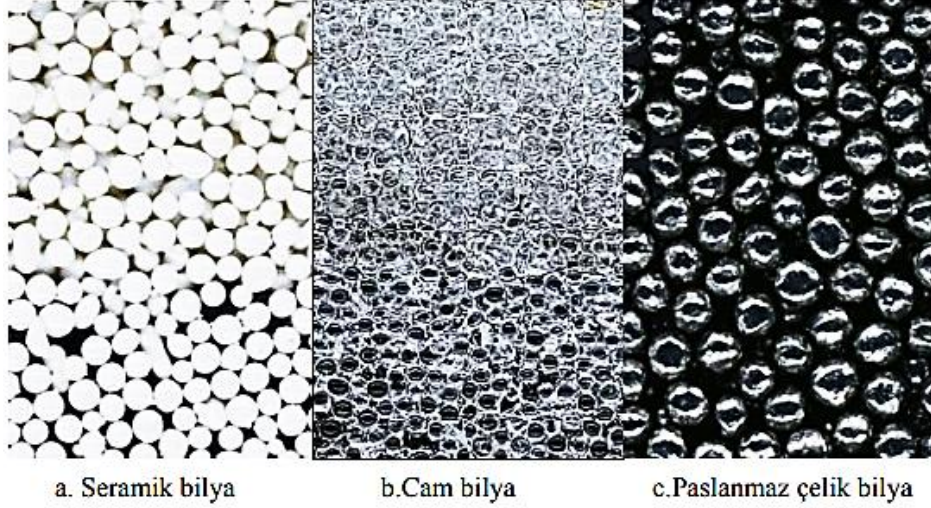


Şekil 3.2. Bilyalı dövme işlemi [10].

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, bir top metalik bir yüzeye her çarptığında, metalin yüzeyi plastik deformasyona uğrar ve tüksekler ve çukurlar oluşturur [11]. Yüzey plastik deformasyonu, yüzey pürüzlülüğünün ve malzeme sertliğinin artmasına neden olur [7]. Bilyalar, bilya dövme işleminin en temel bileşenidir. Dökme demir, paslanmaz



çelik, cam, seramik veya kesme tel, bilya dövme işleminde kullanılan tipik küresel bilyaları yapmak için kullanılabilir malzemeler arasındadır. Topun türü ve boyutu, hedef malzemenin yüzey özelliklerine ve yüzeyde istenen etkiye göre seçilebilir [12]. Malzemeyi yenecek topraklar, metalin yüzeyine plastik olarak kalıcı olarak deforme edecek oranlarda püskürtülmelidir.

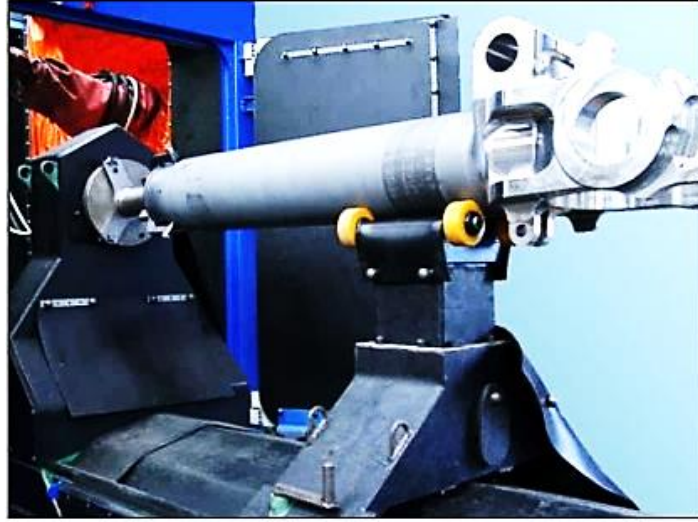


Şekil 3.3. Bilya çeşitleri [9].

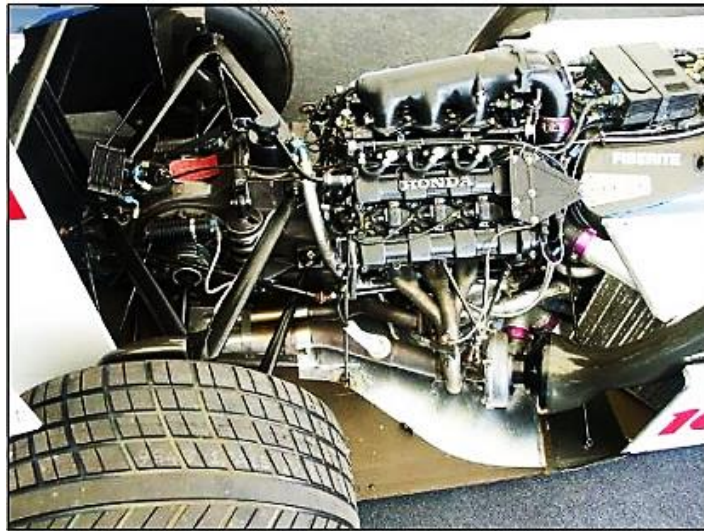
### 3.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN UYGULAMA ALANLAR

Çok sayıda endüstriyel uygulamada bilyalı dövme tekniği kullanılır. Üzerinde durulması gereken çalışma konularından biri de bilyalı dövme tekniği ile yüzey sertleştirilmesidir. Bu mekanik yüzey işleminin önemli bir uygulaması, ısıl işleme iyi yanıt vermeyen malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerini geliştirmektir. Bilyalı dövme, makine parçalarının yorulma direncini güçlendirmek, çekme korozyon hasarı ilerlemesini yavaşlatmak, çatlak ilerlemesini durdurmak veya yavaşlatmak, kavite hasarını ertelemek ve çeşitli malzemelerden oluşan parçaları birleştirmek için kullanılır [9, 13]. Günümüzde bu yöntem, mikro sertliklerini artırmak için dövme yüzeylerine de uygulanmaktadır. Çekme profili artık bilye dövme tekniğinin en başarılı olduğu yorulma mukavemeti geliştirme sürecini açıkça tanımlayabilir. Çeşitli türlerdeki işleme ve işleme dışı teknikler kullanılarak oluşturulan parçalarda artık gerilimler her zaman mevcut olmalıdır [6].

Bilyalı dövme işlemi, otomotiv imalatı ve hava araçları endüstrilerinde bazı makine parçalarının yorulma dayanımını artırmak için kullanılır. Havacılık endüstrisinde bilya dövme işleminin en sık kullanılan bileşenleri arasında türbinler ve türbin kanatları, iniş takımları, havalandırma kanatları ve pervaneler bulunur. Bilyalı dövme genellikle otomobil endüstrisinde dişliler, eksantrik milleri, krank milleri, yük altındaki yaylar, silindir blokları gibi parçaların imalatı için kullanılır [10, 12]. Havacılıkta kullanılan iniş takımları için bilya dövme prosedürü Şekil 3.4'te [10] gösterilmiştir. Şekil 3.5, şiddetli stres altında aracın kilit bölgelerine bilye dövme uygulanmış bir Formula 1 aracını göstermektedir [10].



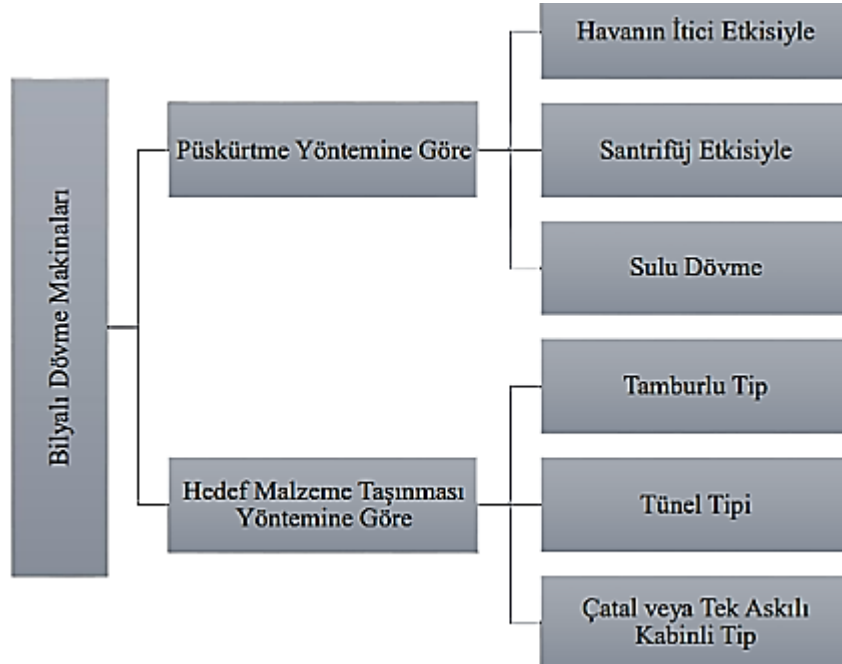
Şekil 3.4. Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi [10].



Şekil 3.5. Formula 1 aracı [10].

### 3.3. BİLYALI DÖVME MAKİNELERİ

Çok sayıda bilyalı dövme makinesi olmasına rağmen, analiz için iki gruba ayrılabilirler. Bilya savurma ve hava basıncı gibi işlem değişkenlerinin otomatik ya da manuel olmasına bağlı olarak, birçok türde bilyalı dövme makinesi mevcuttur. Örneğin, küçük parçalar için döner tablalı bilyalı dövme makineleri ve kaba malzemeler için tambur tipi bilyalı dövme ekipmanları ve sarmal yaylar kullanılmaktadır. Bilyalı dövme işleminde kullanılacak parçanın malzemesinin özellikleri ve bilya dövme kalitesinin istenilen düzeyde olması kullanılacak makineyi belirleyecektir. Bilyalı dövme makinelerinin farklı özellikleri ve türleri Şekil 3.6'da [14, 15] kategorize edilmiştir.



Şekil 3.6. Bilyalı dövme makinaların sınıflandırılması [10].

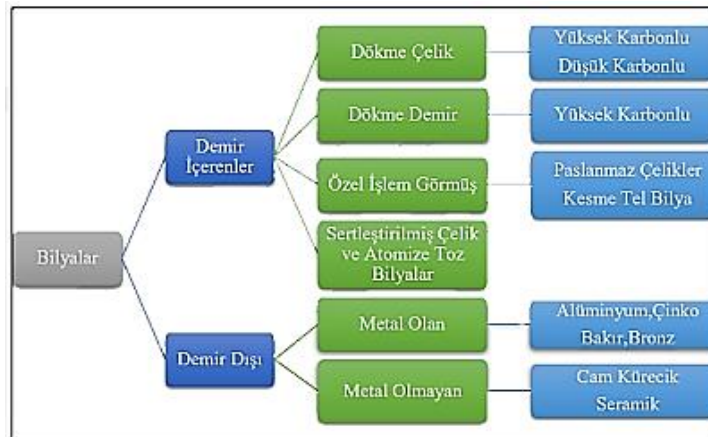
Hava basıncı, bilya besleme odasındaki bilyaların bir meme kullanılarak bilya dövme işlemi sırasında malzeme yüzeyine nasıl fırlatılacağını kontrol eder. Hava jetli bilyalı dövme makinesi Şekil 3.7'de görülmektedir. Birkaç seçkin faaliyet için, bu tip bilya dövme makinesi ekonomik olarak avantajlıdır. Hava jetli bilyeli dövme makineleri, geleneksel bilyeli dövme makinelerinden daha iyi performans gösterir [9].



Şekil 3.7. Hava püskürtmeli bilyalı dövme cihazı [9].

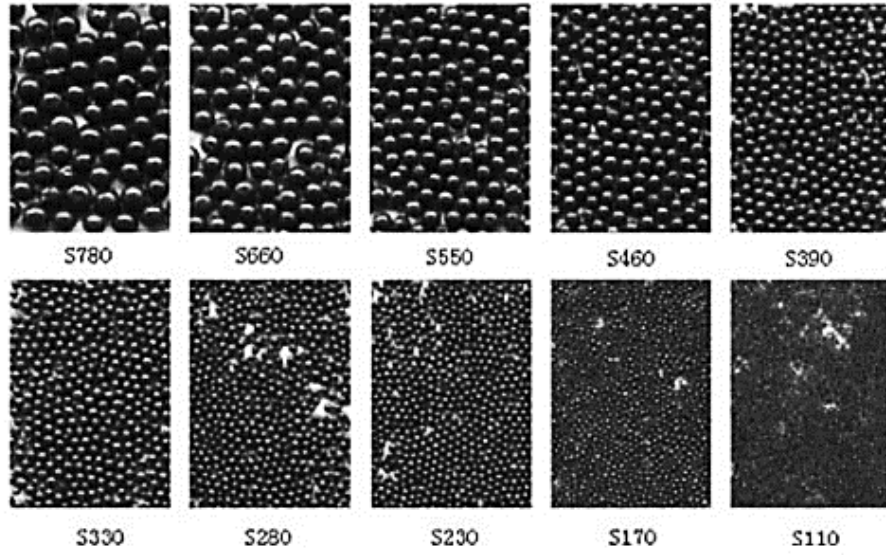
### 3.4. BİLYALARIN SINIFLANDIRILMASI

Demir esaslı ve demir dışı topraklar, toprakların ayrıldığı iki temel kategoridir. İstenilen etkiyi yaratmak için malzeme üzerine yüksek basınçlar püskürten bilyalı dövme işleminin birincil bileşeni bilyalardır. Hasarlı ve kırılmış toprakların bir daha kullanılmaması çok önemlidir, çünkü bunların sürekli kullanımı istenen sonuçları etkiler [12]. Bilya dövme işleminde kullanılan farklı bilya türleri Şekil 3.8'de listelenmiştir [10].



Şekil 3.8. Bilya tipleri ve sınıflandırılması [10].

Otomotiv Mühendisleri Derneği veya "SAE" tarafından oluşturulan standartlar, bilye tiplerinin sınıflandırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bilyalar, tanımda "S" harfi ile belirtildiği gibi çelikten yapılmıştır. SAE J444 standardına göre çelik bilyeler boyutlarına göre S70 ile S1320 arasında değerlere sahiptir. Topun inç cinsinden çapı bu sayıların on binde biri ile gösterilir [15,16]. Örneğin, S550'nin tane büyüklüğü 1,4 mm'dir ( $550 \times 25,4 / 10000 = 1,4$  mm). Bilya dövme işlemlerinde kullanılan çelik bilyelerin boyutları Şekil 3.9'da verilmiş olup, Tablo 3.1'de bilyaların tane boyutları listelenmiştir [10].



Şekil 3.9. Çelik bilyaların sınıflandırılması [10].

Çizelge 3.1. Çelik bilya boyutları [10].

SAE	Tane Boyutu (mm)
S-70	0,20-0,40
S-110	0,30-0,60
S-170	0,40-0,70
S-230	0,60-0,90
S-280	0,70-1,00
S-330	0,90-1,20
S-390	1,00-1,40
S-460	1,20-1,70
S-550	1,40-2,00
S-660	1,70-2,40
S-780	2,00-2,40

### 3.5. BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİ

Bilyalı dövme, onu etkileyen pek çok değişken olduğu için zor bir süreçtir. İş parçası ve süreç koşulları, topun kategorize edilebileceği iki geniş kategoridir. Topların boyutu, şekli, malzemesi ve hızı top parametreleridir. İş parçasının geometrik şekli ve malzeme özellikleri, iş parçası parametrelerine örnektir. Partikül akış hızı, hava basıncı, darbe açısı, nozul çıkışı ile iş parçası arasındaki ayırım ve diğer faktörler proses parametreleri olarak kabul edilir [17].

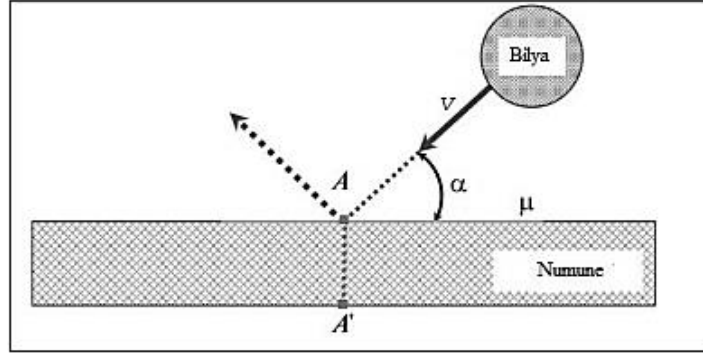
En büyük fayda için, bilya dövme işleminin uygun şekilde yönetilmesi ve tekrarlanabilir olması gerekir. Bunu yapmak için tüm süreç parametreleri oluşturulmalı ve yönetilmelidir. Bilya dövme işlemi, çok çeşitli temel değişkenlerden etkilenir. Aşağıdakiler en tipik olanlardır [10]:

- Dövme işleminin şiddeti
- Bilyaların sertliği ve boyutları
- Nozulların genel özellikleri (çap, sapma açısı, uzunluk)
- Hava akımının basıncı
- Bilyaların çarpma açıları
- Bilyalı dövme işlem süresi
- Parçasının nozula göre doğrusal ve dönme hızı
- Yüzey örtme oranı

Top dövme işleminin standart tarzda ve yeterli kalitede yapılabilmesi için “dövme şiddeti” büyüklüğü geliştirilmiştir. Dövme yoğunluğunu etkileyen kriterler top özellikleridir (top tipi, boyutu, sertliği ve hızı). Top dövme işleminde kullanılan top boyutu, dövmenin ne kadar şiddetli olacağını büyük ölçüde etkiler. Dövme işlemi, boyut dağılımı ne kadar geniş olursa o kadar çeşitlidir. Malzeme yüzeyinin oyulmasında en etkili parametre bilye dövme işleminde kullanılan bilyanın sertliğidir. Bilyalı dövme işlemi yapılan çelik malzeme toplardan daha sert olursa bilyelerin işlem boyunca malzeme yüzeyindeki tesirinin düşük oranda olduğu bildirilmiştir [10,12].

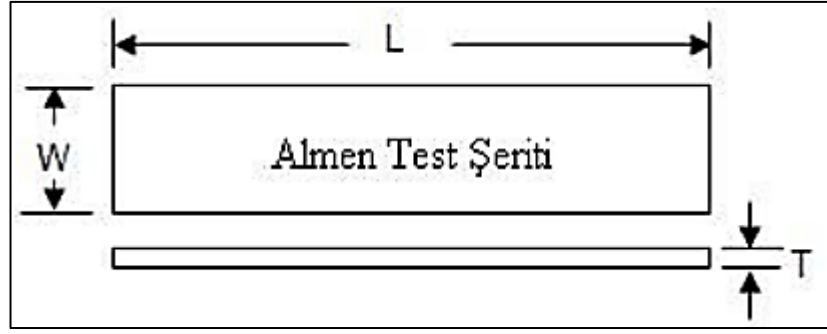
Bilya hızı, vektör büyüklüğüne sahip farklı bir parametredir. Skaler boyuta ve yönelime sahiptir. Püskürtme basıncı, bilye hızı üzerinde en büyük etkiye sahip olan ve belirleyen işlem değişkenidir. Püskürtme basıncı arttıkça topun hızı artar ve yüksek basınç değerlerinde yüksek dövme yoğunluğu değerlerinin elde edilmesini sağlar [12].

Bilya çarpma açısı, vuruş sonucunda hareket ettiği yön olarak tanımlanır. Darbe açısının sinüs değerine göre dövmenin derecesi değişmektedir. Bilya çarpma açısı 18, meme konumu ve parça geometrisindeki değişikliklerin bir sonucu olarak değişir [12]. Şekil 3.10'da, bilya çarpma açısının şematik bir gösterimini göstermektedir. [18].



Şekil 3.10. Bilya çarpma açısı [10].

1943'te John Almen tarafından oluşturulan Almen Testi, endüstride bir top öncesi püskürtme kontrol tekniği olarak hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Top püskürtme öncesi parametrelerin uygunluğuna bu test malzemesine (SAE 1070 yay çeliği) tercih edilecek proses parametreleri ve kendine özgü Almen şeridi olarak bilinen ölçüm aparatına uygulanarak elde edilecek kantitatif ve grafiksel veriler ışığında karar verilir [19]. Alman şeritleri üniformdur ve yaklaşık 45 HRC sertliğe sahiptir. Almen Şeritlerinin standardize edilmiş özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Almen çizgileri, her biri inceden kalına değişen N, A ve C harfleriyle tanımlanan üç farklı çeşitte gelir. Şekil 3.11, Almen çizgilerinin boyutlarını göstermektedir [13].

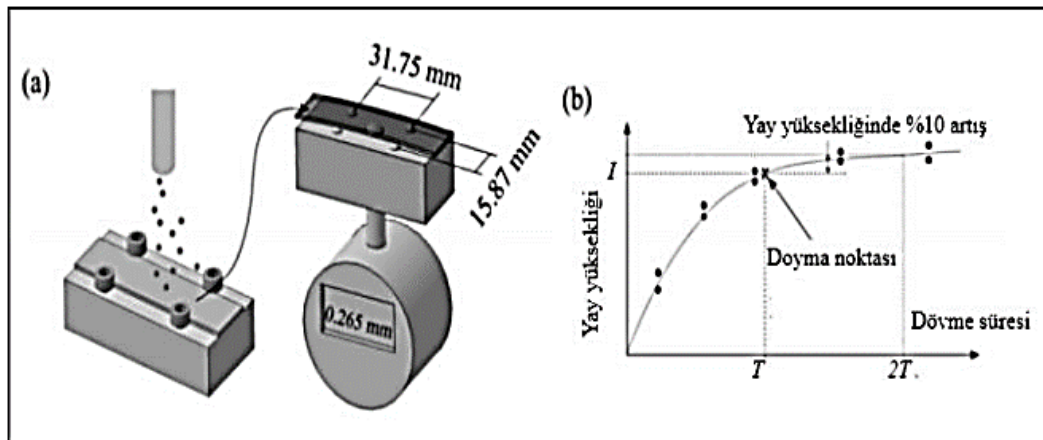


Şekil 3.11. Almen test şeriti ve boyutları [9].

Çizelge 3.2. Almen Şeritlerinin standartlaştırılmış özellikleri [9].

Şerit Adı	Standart	Düzlemsellik	Sertlik	Kalınlık
C	AMS-S 13165	+/- 0,038 mm	44-50HRC	2,39 mm
A	SAE J442	+/- 0,025 mm	44-50HRC	1,29 mm
N	SAE AMS 2432	+/- 0,013 mm	45-58HRC	0,76 mm

Dövme işlemleri, çeşitli koşullar altında bilya dövme işlemleri sırasında çeşitli aşamalarda gerçekleştirilir ve ilgili doyma noktası eğrileri ile birlikte Almen yoğunluğu keşfedilir. Almen testinin şematik gösterimi ve doyum noktası eğrisi Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bilya dövme süresi iki katına çıktığında yay yüksekliğindeki artışın %10'dan az olduğu ilk nokta doyma noktası (T) olarak bilinir (Şekil 3.12(b)). Doyma noktasında [10, 15] elde edilen yayın yüksekliği, Almen yoğunluğunun bir ölçüsüdür.

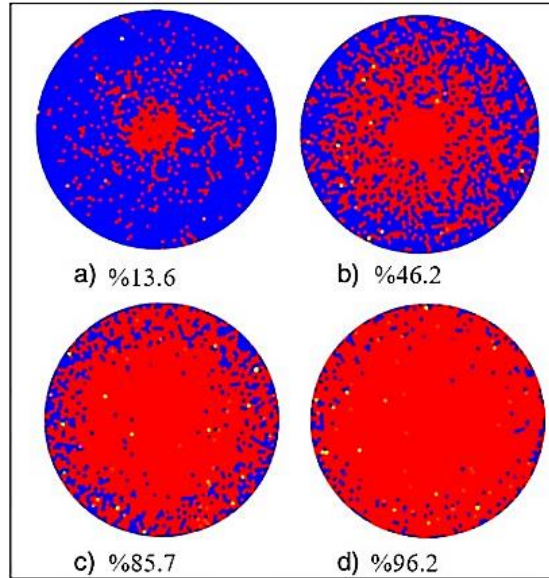


Şekil 3.12. Almen testi ölçümü a) cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi, b) doyum noktası eğrisi [10].



İşlenmiş tüm yüzey alanının, girinti ve bilye dövme sonrası çukur tarafından kaplanan alana oranı, yüzey kaplama oranı olarak bilinir. Artık gerilim tabakasının kalınlığı ve ayrıca işlenmiş yüzeyin güvenliği ve homojenliği, yüzey kaplama oranından önemli ölçüde etkilenir. Bilyalı dövme işleminde, birkaç tümsek ve üst üste binen girintiler, yüzey kaplama oranını oluşturur. Yüzey kaplama hızı bilyenin boyutu, hızı, çarpma açısı ve dövme süresinden etkilenir. Yüzey kaplama oranı deneysel olarak üç farklı yöntemle belirlenebilir. Bunlara kopyalama, mavi mürekkep ve görsel inceleme dahildir. Pratik olarak, %98 veya daha fazla bir yüzey kaplama oranı %100 tamamlanmış olarak kabul edilir. Topların yüzeylerini %100'den daha fazla kaplayacak bir hızda dövülmesiyle gerçekleştirilir, bu, yüzeylerini %98 oranında kaplamak için olduğundan daha uzun sürer [17].

Ghost View görüntü işleme programını kullanan Van Bo Nguyen ve meslektaşları, yüzey kaplama oranını nesnel olarak değerlendirdi. Yüzey kaplama oranının yüzdeleri Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Görüntülerde ayak basılmamış kısımlar mavi, dövülmüş kısımlar ise kırmızı ile gösterilmiştir [17].



Şekil 3.13. Yüzey örtme oranı yüzdeleri [17].

## BÖLÜM 4

### KATAFOREZ KAPLAMA

Metal yüzeyli bir maddenin elektrokimyası, kataforez kaplama olarak bilinen su bazlı kaplama tekniğinin temelini oluşturur. Elektroosmoz, parçacık hareketinden ziyade bir elektrik alanının neden olduğu sıvı hareketini tanımlamak için kullanılan terimdir. Kataforez, herhangi bir metal yüzeyi iletkenlikle kaplamak için kullanılabilir. Kataforez kaplama, kaplamanın özelliğinden dolayı literatürde kataforez boya veya astar olarak da bilinmektedir. Kataforez sırasında meydana gelen katodik süreç, fenomene adını veren şeydir. Metal yüzeylerde paslanmayı önlemek için kataforez kaplama kullanılmaktadır. Kataforez, özellikle çelik, galvanizli çelik, alüminyum ve dökme demir olmak üzere metalik yüzeylerde organik kaplama uygulamasının en popüler yöntemlerinden biridir. Bu yaklaşım, bir kimyasal madde karışımının bir elektrik alanında iyonlaşması esasına dayanır. Bir kaplama ile korunacak olan daldırılmış bir eleman üzerine su bazlı boyanın bırakılmasından oluşur. Bu eleman, elektrik alan çizgileri boyunca hareket eden pozitif yüklü boya moleküllerini çeken negatif bir elektrot (katot) oluşturur. Polimer reçineler, çoğunlukla epoksi veya akrilik olanlar, mikroskobik dayanıklı misellerin koloidal solüsyonunu oluşturdukları hafif asidik sıvı fazda çözülür. Pozitif bir yük kazanırlar ve negatif yüklü nesneye doğru hareket ederler. [20,21,22].

Kataforez kaplama bir çok alanda yaygın olarak kullanılmakta özellikle beyaz eşya imalatı, inşaat sektörü, otomotiv imalatı ve yedek parçalarda kullanılmaktadır. Otomobil sektöründe, metal yüzeye başlangıç tabakası (astar) olarak kataforez kaplama uygulanmaktadır. Ancak kataforez kaplama, otomotiv tedarik sektörlerinin büyümesiyle geniş çapa yayıldı ve aynı zamanda çeşitli hacim aralıklarında (1 ton ila 500 ton) fason üretimde de kullanıldı. Metal eşyaların korozyonunu önlemek ve ömrünü uzatmak için en iyi sistemlerden biri bu kaplama tekniğidir. Katodik kataforez

kaplama, dünya çapında kullanılan kataforez kaplama hacminin yaklaşık %70'ini oluşturur ve bu harika bir kullanımdır.

Kataforez kaplamanın genel olarak dört ana faydası vardır. Faydaları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Uygulama
- Performans
- Ekonomik
- Çevresel

Kataforez kaplamanın geleneksel kaplama tekniklerine göre dört temel faydası aşağıda belirtilmiştir:

- Homojen film kalınlığı (akma ve sarkmanın olmaması)
- Yüksek üretim hızı
- Kompleks yüzeylerde düzgün ve yeterli kaplama
- Düşük çevre kirliliği, yangın ve sağlık riski

Performans açısından, aşağıda listelenen üç ana fayda vardır.

- Korozyon dayanımı sağlama
- Kimyasal direnç sağlama
- Mekanik özellikleri destekleme

Kataforez kaplamanın mali faydalarının bir listesi aşağıda verilmiştir.

- % 95 -99 geri dönüşüm olması
- Otomatik çalışma yapısına sahip olma
- Tam kaplama
- Yüksek verimlilik

Aşağıda, kataforez kaplamanın çevresel faydalarının bir listesi bulunmaktadır.

- Düşük uçucu organik bileşenler (12 g/l maksimum)
- Havayı kirleten madde barındırmaması
- Çok ufak miktarlarda katı atık ihtiva etmesi
- Su bazlı yapıya sahip olmasından dolayı yanma ve parlama riskinin olmamasıdır.



Şekil 4.1. Kataforez banyosu [20].

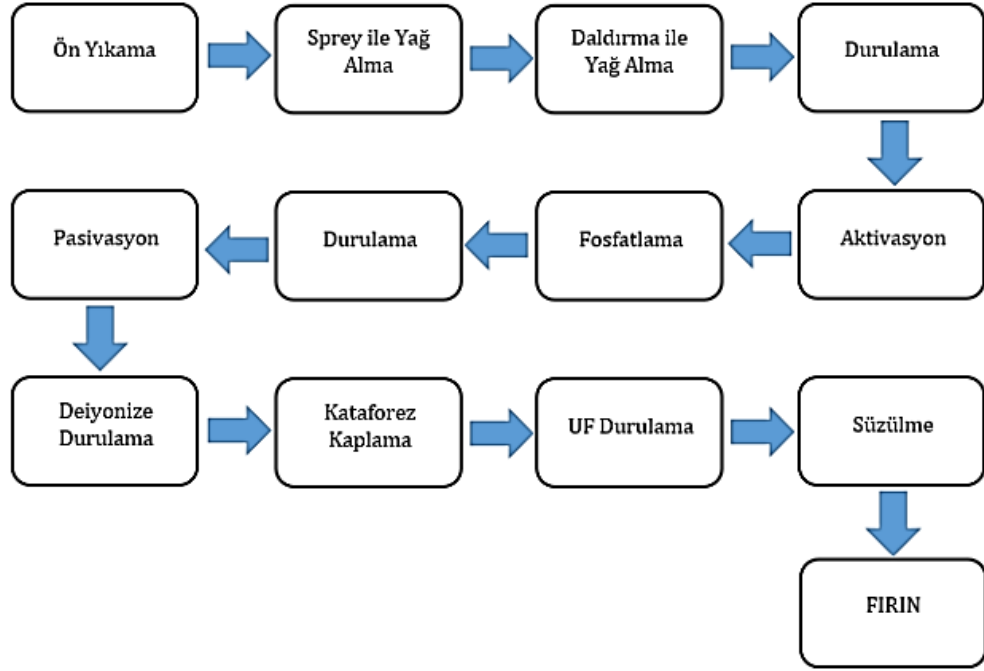
Çizelge 4.1. Kataforez banyosunun çalışma parametreleri [20].

<b>Banyo Parametreleri</b>	<b>Kataforez Havuzu</b>
<b>Sıcaklık (°C)</b>	32 - 34
<b>Katı (%)</b>	13,0 - 16,0
<b>Kül (%)</b>	0,1 - 0,13
<b>P/B (%)</b>	1,0 - 1,6
<b>pH</b>	5,2 - 5,6
<b>İletkenlik (µS/cm)</b>	900 - 1500
<b>Uygulanan Voltaj</b>	150 - 320

Kataforez kaplama süreci;

- İlk olarak “yüzey hazırlama” aşaması,
- İkinci olarak elektro kaplama ,
- Son olarak fırınlama aşamasından oluşmaktadır [10].

Şekil 4.2' de kataforez kaplamanın şematik gösterimi verilmiştir



Şekil 4.2. Kataforez kaplama prosesi [21].

#### 4.1. YÜZEY ÖN HAZIRLAMA

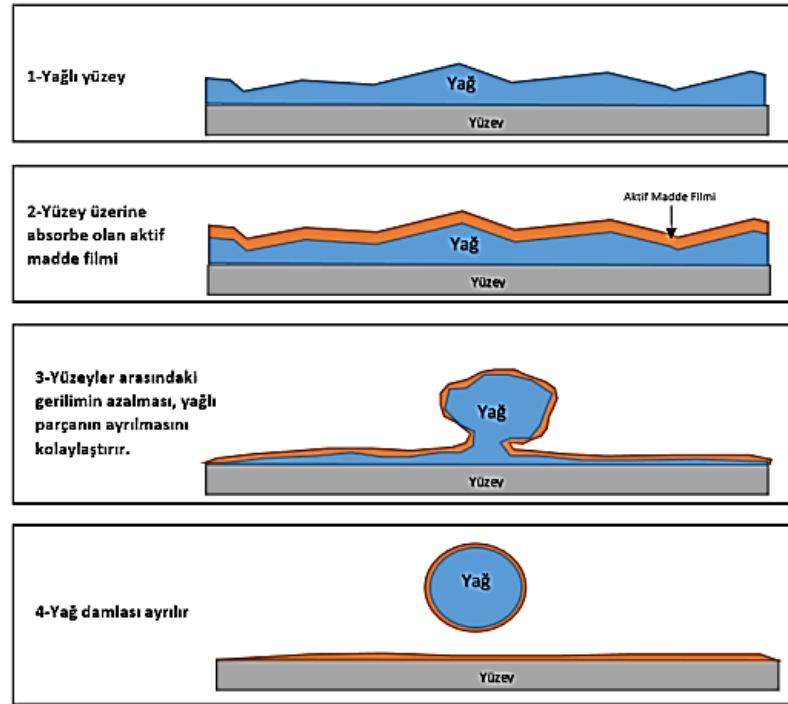
İster boya ister kataforez kullanılacak olsun, yüzey hazırlığı en önemli işlem aşamalarından biridir. Kusursuz ve hatasız bir yüzey hazırlama işlemi ile kaplama veya boyanın yapışması ve kalitesi artırılabilmektedir. Fosfatlama, yıkama, pasivasyon, aktivasyon ve DI durulamayı içeren yüzey ön hazırlık aşamasından oluşmaktadır [24, 25].

Yüzey hazırlama işleminin başlıca nedenleri;

- Malzeme yüzey temizliğini sağlamak
- Kaplamanın yüzeye tutunmasını artırmak
- Malzeme ile kaplama arasında oluşacak reaksiyonları azaltmak
- Korozyona karşı dayanımı artırmak

## 4.2. YAĞ ALMA

Yağ giderme prosedürünün amacı, boyanacak veya kaplanacak metalden yağ ve metal tozu gibi kaplamayı ve boyamayı engelleyebilecek her türlü kirleniciyi uzaklaştırmaktır. Proseste artan hassasiyet ve temizlik ile malzeme yüzeyine yapışma performansı artar. Yüzey işleminin ilk aşaması yağ gidermedir. Fosfat kaplamanın daha etkili olması için yağ alma havuzlarında bulunan eşyaların en mükemmel biçimde yüzey temizliği yapılmalıdır. Pasın kataforez tabakasının altında işlemini ve kaplamanın şişmesini önlemek için yağ giderme işlemi kusursuz olmalıdır. Havuza girmeden önce yağlanma sürecinin başarılı olduğu doğrulanmalıdır [23,26]. Yağ partikülünün yüzeyden uzaklaştırılmasına yönelik yöntem Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Yağ Partikülünün Yüzeyden Ayrılma Süreci [20,21].

Kataforez kaplama hatlarını yağdan arındırmak için kullanılan alkali temizleyicilerin yapımında sıvı ve toz olmak üzere iki farklı kimyasal kullanılmaktadır. Sıvı kimyasalların içinde genellikle iki paket sürfaktan ayırıcı ve bileşen bulunur. Toz ürünler de paketlenmiş ürünler olarak karşımıza çıkıyor. Üç bölümde, yağ giderici

formülasyonun inorganik bileşeni, organik bileşeni ve kompleks oluşturucu bileşenin tümü incelenir. Sürfaktanlar organik maddelerden, yağ giderme maddeleri ise inorganik tuzlardan yapılırlar. Bileşenlerin birincil işlevi, metal tanecikleri, kaynak renkleri ve inorganik malzemeler gibi boya kirletici maddelerin boya ve metal ile temas etmesini önlemektir. Sürfaktanların görevi metali yağ, gres ve organik atıklardan temizlemektir [26].

Hidroksit, fosfat, silikat ve borat inorganik maddelerdir. Noniyonik, anyonik, katyonik ve amfoterik bileşikler organik maddelerdir [23]. İnorganik malzemelerin temizliği için sırasıyla NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> alkali çözeltileri kullanılır. Bunlar alkaliliği kontrol altında tutanlardır. Fosfat yağdan arındıran, kompleks oluşturan ve yağdan arındıran üç farklı biçimde gelir: ortofosfat, pirofosfat ve tripolifosfat. Beyaz noktaları önlemenin yanı sıra, silikatlar ve boratlar büyük inhibitörlerdir ve yüksek pH seviyeleri için tampon görevi görürler [23, 24].

Yüzey aktif maddeler, alkanolaminler, hidrotroplar, korozyon inhibitörleri, köpük gidericiler ve kompleks oluşturma, organik bileşikler için diğer kategorilerdir. Yüzey aktif maddeler yağlı ve kirli yüzeylerde yüzey gerilimini düşürerek ıslatma etkisini artırır ve temizlik maddesinin yüzeye temasını sağlar. Ek olarak, yağların ve kirleticilerin emülsiyonlaşmasını ve dağılmasını garanti eder. Yağ ve kirletici maddeler, temizleme solüsyonunda küçük sıvı parçacıklar halinde yayılır ve emülsifikasyon işlemi bunları yüzeyden uzaklaştırır. Bu teknikler, suda çözünmeyen yağları çözünür hale getirmek için onlar gibi yüzey aktif maddeler kullanır [23].

Daldırma ve püskürtme banyoları, yağ giderme banyosunu oluşturan iki banyodur. Sprey yağ giderme banyoları, birincil çalışma yöntemi olarak yağı çıkarmak için mekanik bir etki kullanır. Sonuç olarak banyonun içinde sprey nozulları vardır.

Sprey uygulamanın avantajları aşağıdaki gibidir [11].

- Uygulama zamanı kısadır,
- Basit şekilli parçalara elverişlidir,
- Partikülleri uzaklaştırmak için çok iyidir,

- Düşük sıcaklık uygulamaları açısından sınırlıdır. Yüzey aktif maddeler düşük sıcaklıkta köpürme eğilimindedir,
- Mekanik temizleme ile beraber kullanılabilir.

Daldırma banyolarının püskürtme nozulları yoktur ve daldırılarak yağ giderme havuzunda bekletilerek mekanik olarak giderilemeyen yağ, gres ve diğer kirliliklerden parçaları uzaklaştırmak için tasarlanmıştır. Daldırma yağ alma banyoları, sprey yağ alma banyolarına göre mekanik etki olmadığı için daha yüksek konsantrasyonlarda ve sıcaklıklarda çalıştırılır [24].

Daldırma uygulamalarının üstün yönleri aşağıdaki gibidir [11].

- Bağlantılı parçalarda karmaşık alanların temizlenmesi için çok uygundur, (kutu kesiti, kenar bağlantısı)
- Sprey uygulama yöntemiyle karşılaştırıldığında yüksek konsantrasyon ve uygulama zamanı gereksinimi vardır,
- Büyük banyo hacmi gerektiğinden dolayı stabilitesi fazladır,
- Yağ alma çözeltilisinin kontrolü çoğu zaman titrasyon yöntemiyle yapılır.

Çizelge 4.2. Spreyle ve daldırma ile yağ alma banyolarının çalışma parametreleri [20].

<b>Banyo Parametreleri</b>	<b>Spreyle Yağ Alma</b>	<b>Daldırma ile Yağ Alma</b>
<b>Serbest alkalite (ml)</b>	3,5 - 8,0	17,0 - 24,5
<b>Toplam alkalite (ml)</b>	5,0 - 11,2	22,0 - 33,6
<b>pH</b>	10,0 - 12,5	10,0 - 11,5
<b>Sıcaklık (°C)</b>	55 - 65	55 - 65

### **4.3. DURULAMA**

Durulama prosedürlerinin amacı, aşağıdaki prosedürler sırasında banyolara taşınan yağ giderme maddelerinin miktarını azaltmaktır. Alkaliden tuzları ve herhangi bir malzeme kalmışsa diğer maddeleri uzaklaştırarak yüzeyi fosfata hazır hale getirmektir. Ayrıca yüzey kurumalarının önlenmesi de durulama havuzlarının kullanılması için bir



başka sebeptir. Yağ alma maddesi alkali olduğundan ve kir içeriği yüksek olduğundan, kiri diğer banyolara yayar ve malzemeyi olumsuz etkiler. Sonraki banyolar da kötü performans gösterebilir ve kimyasal etki bile azalabilir.

Fosfatlamadan önce gerçekleştirilen durulamalar tipik olarak şehir suyu veya kuyu suyu ile yapılabilir. Durulama suyundaki klorür ve sülfat (SO<sub>4</sub>) konsantrasyonları sırasıyla 50 mg/l ve 40 mg/l'den az olmalıdır. Durulama banyoları herhangi bir kimyasal içermez [27, 28].

Çizelge 4.3. Yağ alma sonrası durulama banyolarının çalışma parametreleri [20].

Banyo Parametreleri	Durulama Havuzu	DI Su ile Durulama Havuzu
İletkenlik (µS/cm)	< 2000	< 500
pH	7,0 – 10,0	7,0 – 10,0

Yağdan arındırılmayan yüzeylerde uygun fosfat kaplama uygulanamaz [23]. Kullanılacak sonraki işlemler, yüzey hazırlığında önemli bir role sahiptir. Fosfatlama işleminden sonra yüzey durulama suyu ile tamamen temizlenerek kataforez kaplamaya hazırlanır. Durulama işlemlerinde kullanılacak banyo suyu için deiyonize su kullanılmalıdır. Pasivasyon işlemlerinden sonra havuzun kirlenmemesi için aynı zamanda pasivasyon çıkışında durulama banyosu bulunmalıdır. Fosfat havuzu da dahil olmak üzere sonraki tüm banyoları oluşturmak için kullanılan sudaki klorür konsantrasyonu 50 mg/l'den az olmalıdır [28].

Çizelge 4.4. Fosfat sonrası durulama banyolarının çalışma parametreleri [20].

Banyo Parametreleri	Durulama Havuzu	DI Su ile Durulama Havuzu
İletkenlik (µS/cm)	< 2000	< 600
pH	4,5 – 7,0	-

#### 4.4. AKTİVASYON

Fosfattan önce aktivasyon banyosu çok önemlidir. Kristal oluşumuna yol açan reaksiyon için katalizör görevi görür. Kaplama malzemesinin yüzey üzerindeki

ağırlığının azaltılmasını mümkün kılar. Kristal yapısından dolayı homojen ve kapanan bir kristal tabakası sunar [24,27]. Aktivasyon banyoları için deiyonize su kullanılmalıdır. Aktivasyon işleminde kullanılan malzemelerin genel özelliklerinin bir listesi aşağıdadır.

- Birim yüzeylerdeki fosfat kristal sayısını arttırmak.
- Kaplamanın homojen olması ve kristallerin küçük olmasını sağlamak.
- Fosfat kaplama ağırlıklarının düşürülmesi.
- Fosfat kaplamanın süre olarak kısaltması

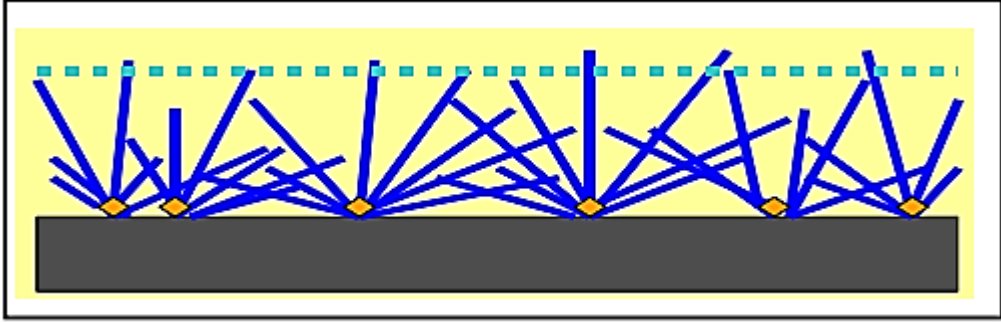
Aktivasyon banyosunu hazırlamak için deiyonize su kullanılmalı veya 50 mg/lt'den fazla klorür içermeli. Banyo sıcaklığı 10 ila 30 °C arasında olmalıdır. Banyonun pH'ı 8 ila 9 arasında değişmektedir. Banyonun püskürtme basıncı 0,7 ila 2,5 bar arasında değişmektedir. Aktivasyon banyosunda toz veya sıvı malzemeler kullanılabilir [28].

Çizelge 4.5. Sıvı ve toz aktivasyon malzemesinin karşılaştırması [20].

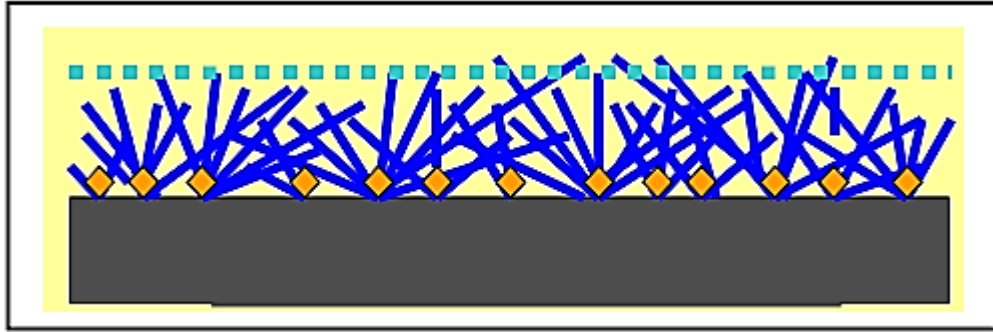
<b>Aktivasyon Parametreler</b>	<b>Sıvı Aktivasyon</b>	<b>Toz Aktivasyon</b>
<b>Ürün stabilitesi</b>	Kötü	İyi
<b>Banyo stabilitesi</b>	İyi	Kötü
<b>Dozlama</b>	İyi	Kötü
<b>Parçacıklar (çözülmemiş)</b>	Orta/ İyi	Orta
<b>Tüketim</b>	İyi	Kötü
<b>Toz</b>	İyi	Kötü
<b>Performans</b>	Orta/İyi	İyi

Tablo 4.5, sıvı veya toz aktivasyon malzemelerinin kullanılmasının diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği durumları listeler. Banyolarda avantaj ve dezavantajlarına göre toz veya sıvı aktivasyon kullanımı tercih edilebilir. Sektör genellikle daldırma türünden bir aktivasyon tekniği kullanır. Bir sonraki işlem olan fosfatlama, daldırma yoluyla aktivasyon sayesinde fosfatın yüzeye daha kararlı bir şekilde yapışmasından yararlanır. Bu aktivasyon prosedürü için tankın ortam sıcaklığı kullanılır. Ortalama 1-2 dakika kadar sürerler.

Yüzeylerde kristal oluşumu, uyarıcı olmadığında düzensiz ve minimaldir. Düzenli aktivasyona uğrayan yüzeylerde, kristal büyümesi düzgün, yoğun ve örtücüdür. Fosfat kaplama, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, aktivasyon olmadan oluşturulduğunda, mevcut birkaç birim kristal vardır, ancak Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, fosfat kaplama fosfatlamadan önce yapıldığında, daha fazla birim kristal mevcuttur. Yüzey aktivasyonu arttıkça fosfat miktarı artar.



Şekil 4.4. Aktivasyon olmadan fosfat kaplama [20].



Şekil 4.5. Aktivasyon yapılarak fosfat kaplama [20].

#### 4.5. FOSFATLAMA

Bugün birçok insan bu tekniği benimsemektedir. Tipik olarak, boya bir temel koruma katı olarak uygulanır. Uygulama teknikleri daldırma ve püskürtmeyi içerir. Yüzeydeki demiri parçalayarak, yağ alma ve aktivasyon sonrası uygulanan fosfatlama işlemi çinko fosfat kristallerinin oluşmasını sağlar. Korozyonu önleme söz konusu olduğunda fosfat kaplama en iyi performansı gösterir [23, 25]. Çinko fosfat kaplama ve demir fosfat kaplama iki farklı fosfat kaplama türüdür. Manganez fosfat kaplama farklı bir kaplama tekniğidir ancak yüzeyleri boyaya hazırlamak için kullanılmaz. Manganez

fosfat kaplama uygulama prosedürü tipik olarak dişli bileşenlerde veya sürtünmeye eğilimli yerlerde kullanılır [29].

Fosfat kaplamaların temel amaçları, bir konveyör akışının durması durumunda pas oluşumunu önlemek, çıplak metal yüzeylerde korozyon performansını artırmak, boyanın yapışma kalitesini artırmak, boya yapılan yüzeylerde kabarcıklanmayı düşürmek, boyalı yüzeylerin korozyon direncini artırmaktır [29].

Satın alınabilirliği, hızlı çalışması, olağanüstü korozyon ve aşınma direnci, iyi yapışma ve yağlama özellikleri ve yüksek çalışma hızı nedeniyle fosfat kaplama, özellikle otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alt kristal yüzeyinin geliştirilmesi, fosfat kaplamanın üretiminde ilk adımdır. Bu alt kristalin yüzeyi hızla fosfat kristalleri oluşturur. Zamanla, belirli miktarda fosfat kristali üretilir. kristal boyutu ve şekli; yüzey ön hazırlık teknikleri, sıcaklık ve banyo içeriği dahil olmak üzere çok çeşitli değişkenlere bağlı olarak değişir. Fosfat banyosunun çalışma parametresi Tablo 4.6'da listelenmiştir.

Çizelge 4.6. Fosfat banyosunun çalışma parametresi [20].

<b>Banyo Parametresi</b>	<b>Fosfat Havuzu</b>
<b>Sıcaklık (°C)</b>	44-55
<b>Serbest asit (ml)</b>	1,2-1,8
<b>Toplam asit (ml)</b>	20-28
<b>Çinko (g/lt)</b>	1,0-1,6
<b>Gaz noktası (ml)</b>	2-4
<b>Çamur miktarı (ml / L)</b>	<1
<b>SiF<sub>6</sub><sup>-2</sup> kompleks flor (g/lt)</b>	1,4-2
<b>Kaplama ağırlığı (g/m<sup>2</sup>)</b>	1,5-4,2

Kaplama havuzundaki düşük çinko seviyeleri, kaplama ağırlığının düşmesine ve ince bir fosfat yapısının oluşmasına neden olur. Yüksek konsantrasyonda çinko olduğunda malzemenin ağırlığı artar ve yüzeyde kalın, yumuşak bir fosfat tabakası oluşur.

Fosfat tabakasının kalınlığı, kristaller arası boşluklar, fosfat kaplama kalınlığı ve ağırlık göz ardı edilirse ve yüzeyin tamamen homojen olduğu varsayılırsa ölçülebilir. Fosfat kaplamaların kalınlığı, türüne bağlı olarak 1 ila 50 mikrometre arasında değişmektedir. Kalınlığa sıklıkla kaplama ağırlığı denir ve tipik olarak birim alan başına düşen ağırlık olarak belirlenir. Kaplama ağırlığı, fosfat sektöründe kalite izleme için yaygın bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, korozyon performansı, fosfat kaplamanın ağırlığı ile ters orantılı değildir. Fosfat kaplamanın ağırlığı, yalnızca kaplamanın kalitesinin bir ölçüsü olarak hizmet eder. Diğer fosfat kaplama kalitelerinin yanı sıra kaplama kalınlığı, viskozitesi, yapının homojenliği vb. gibi hususlar da dikkate alınmalıdır [28].

Kaplama gözenekliliği, kaplamanın kimyasal yapısına, banyoda ne kadar demir bulunduğuna, ne kadar süreyle uygulandığına ve kullanılan fosfat solüsyonunun türüne göre değişir. Yüzey sadece fosfat kaplıysa, kaplamanın gözenekliliği, korozyonu ne kadar iyi önlediği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bazı durumlarda, fosfat kaplamaların gözenekliliği çok büyük bir avantajdır. Çünkü fosfat kaplamanın boşlukları önemli bir rezervuar görevi görür ve kataforez ve toz boya gibi organik malzemelerin oluşumuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Boya filminin yapışmasını iyileştirdiği için toz boya ve kataforez öncesi yüzey hazırlama işleminde homojen kristal fosfat kaplamalar tercih edilir. Ek olarak, yağlanacak ve verniklenecek malzemeleri işlerken kaba kristalli fosfat kaplamalar tercih edilir [26].

#### **4.5. PASİVASYON**

Pasivasyon, yüzeyde kalan iyonları azaltmak ve korozyon direncini artırmak için kullanılır. Pasivasyon uygulamasının bir diğer amacı da yüzeyde fosfat kaplanmamış pas oluşumuna yol açabilecek alanlardan kaçınmaktır.

Pasivasyon prosedürü, korozyon direncini artırmak ve yüzey kalıntılarında geride kalan iyonlardan kurtulmak için kullanılır. Fosfat kaplı olmayan yüzeyleri pasifleştirmek ve yüzeyde pas oluşumunu önlemek, pasivasyon işleminin diğer iki amacıdır. Kaplama işlemleri uygulandıktan sonra ve yine pasivasyon işlemi sırasında metal bileşenlerin yüzeyleri durularak kaplama kimyasalları reaksiyona girmemiş

yüzeiden uzaklaştırılır. Başarılı bir son durulama prosedürünün uygulanması, yüksek kaliteli bir fosfatlama oluşturmanın son aşamasıdır. Metal yüzeydeki fosfat kaplama, krom içeren solüsyonlar veya kromsuz üretim teknolojileri kullanılarak kapatılır ve/veya pasifleştirilir.

Pasivasyon uygulaması ile pasivasyonsuz hatlara göre korozyon ve nem direnci 2 ile 10 kat arasında arttırılabilmektedir. Birim yüzey alanı başına kaplama ağırlığı, işlem süresi, banyo sıcaklığı, banyo konfigürasyonu ve ana metal yüzey kalitesine bağlı olarak değişir. Tipik olarak, 0,5 ila 1 g/m<sup>2</sup>'lik okumalar kaydedilir. Aralık ayı açık mavi ve mavi-yeşilin orta tonları ile kaplama rengi grimsi tonlardan mavi tonlara kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Fosforik asit kullanımıyla, daldırma prosedürlerinde çok düşük bir serbest asitliğin korunması tavsiye edilir. Püskürtme sistemlerinde pH'ın uygun şekilde düzenlenmesi gerekir [23,28].

Çizelge 4.7. Pasivasyon banyosunun çalışma parametreleri [20].

<b>Banyo Parametreleri</b>	<b>Pasivasyon Havuzu</b>
<b>İletkenlik (µS/cm)</b>	< 600
<b>pH</b>	4,2-4,8
<b>Toplam asit</b>	4-7

Zirkonyum bazlı pasivasyon işlemlerinde pasivasyon içeriği ve asit çözeltileri birleştirildiğinde, çözünmeyen bileşenlerin çökmesi sonucu fosfat yüzeyindeki ikincil fosfat kristallerinin bozunduğu ve fosfat yüzeyindeki gözenek boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. Bunu yapmanın korozyonun ilerlemesini durdurduğu kaydedilmiştir [24].

#### **4.6. DEİYONİZE DURULAMA**

Kataforez kaplamadan önce, kaplama banyosuna Ca, Mg ve V eklendiğinden deiyonize su ile durulanır. Bu işlem iyonların taşınmasını durdurmak için yapılır. Kataforez kaplamanın ardından yapışma performansı, bu iyonlar fosfat kristalli yüzeyler üzerinde kaldığında olumsuz etkilenir. Kaplama ünitelerinde tercih edilen deiyonize su iletkenliği 20 °C'de 40 s/cm'den az olmalıdır (Tablo 4.8.). Banyo sonrası

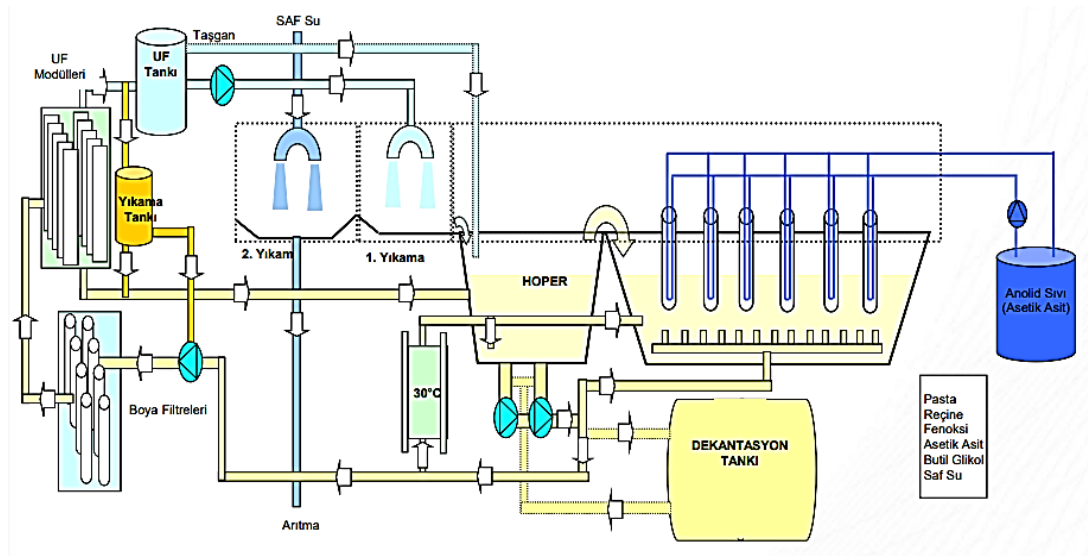
kurutmadan, fosfat ve magnezyum gibi iyonların geçişini engelleyen kataforez kaplama, banyo tuzu ile banyoda tutulan kataforez gibi iyonların geçişini engelleyerek boyanın tutunmasından sonra oluşabilecek olası reaksiyonları bloke ederek boyanın kaybolması önlenir [24,28].

Çizelge 4.8. Deiyonize durulama banyosunun çalışma parametresi.

Banyo Parametreleri	Durulama Havuzu
İletkenlik ( $\mu\text{S/cm}$ )	< 40
pH	5,5-7,5

#### 4.7. KATAFOREZ (ELEKTRO KAPLAMA)

Ultrafiltrasyon (UF) durulama ve filtreleme aşamalarının yanında kataforez hattındaki ecoat tankında kaplamadan oluşturmaktadır [27]. Dekontamine edilmiş iş parçaları bir karşı elektrotlu bir boya banyosuna daldırıldığında, galvanik kaplama işlemini gerçekleştirmek için iş parçası ile elektrot arasında bir doğru akım sağlanır. Bir elektrik alanı, boyayı kaplandığı bileşene çeker. Boyalı kısım daha sonra sudan çıkarılır, fazla olan kaplanmamış boyadan kurtulmak için durulanır ve boyayı pişirmek için fırınlanır [28].



Şekil 4.6. Kataforez hattı.

Kataforez hattı üniteleri aşağıdaki ünitelerden oluşmaktadır (Şekil 4.6.).

- Kataforez tankı ve sirkülasyon sistemi: Boya karıştırma mükemmelliği sağlar.
- Anot ünitesi: Banyoda elektrolizi gerçekleştirerek, kaplama esnasında açığa çıkan asit iyonlarını sistemden uzaklaştırır.
- Sirkülasyon: Boya karıştırma mükemmelliği ile boyayı askıda tutabilmek, pompalama ve kaplamada oluşan ısıyı uzaklaştırmak ve kaplama esnasında ve sürecinde oluşan gaz çıkışlarını tahliyesini sağlar.
- Ultrafiltrasyon (UF) ünitesi: Durulama için su üretim ve boya kalıntılarını yarı geçirgen bir zar yardımı ile geri kazanımını sağlar.
- Filtrasyon: Kir parçacıklarının alınmasını sağlar.
- Elektrifikasyon: DC elektrik yükü sağlar.
- Transfer Sistemleri: Parça nakil işlemlerini sağlar.
- Fırın: Parçaların kürlenmesini sağlar.

#### **4.8. KATAFOREZ KAPLAMA MEKANİZMASI**

Zıt kutupların birbirini çektiği fikri, galvanik kaplamanın temelini oluşturur. İş parçası galvanik kaplama banyosuna yerleştirilerek ve elektrotlar arasından bir elektrik akımı geçirilerek boya uygulanır. Bu uygulamada kullanılan doğru akımdır. Çalışma elektrotları ve iş parçası, voltaj uygulandığında biri negatif katot, diğeri pozitif anot olacak şekilde zıt kutuplara sahip olacaktır [23,26]. Tablo 4.8'de kataforez kaplama mekanizması açıklanmıştır. Kaplama işleminde kaplama işlemi kendi kendini sınırlayan bir yapıya sahip olduğu için kaplama işlemi sırasında elektriksel olarak izole edilirse kaplama işlemi yavaşlar hatta durur. Kaplama işlemine başlamadan önce, iyonlaştırıcı kaplama veya boya, malzemenin karşı elektrot yakınındaki bölgelerine saldırır. Boya daha sonra, bu alanlar kapatılıp elektriksel olarak izole edildikten sonra daha fazla girintili yerlere doğru hareket etmeye başlar ve ardından kaplama işlemi, açıkta kalan metal kısımları tamamen kaplamak için ilerler [24,28]. H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> sırasıyla kataforez banyosunun katodunda ve anodunda salınır. Anotta H<sup>+</sup> oluştuğu için asit reaksiyonu, katotta OH oluştuğu için alkalın reaksiyonu gerçekleşir. Anotta üretilen hidrojen iyonu, bir asit oluşturmak üzere negatif yüklü asit grubu ile etkileşime girer. Anolit sistemi sayesinde üretilen bu asit ortamdan uzaklaştırılır. Pozitif yüklü boya

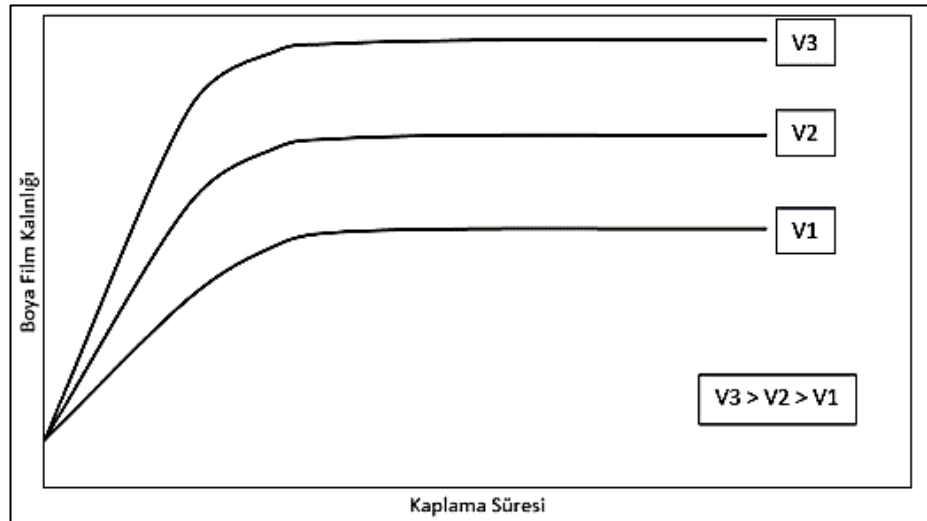


partikülleri katoda doğru göç edip OH<sup>-</sup> iyonları ile etkileşime girdikçe kaplanacak yüzeyde topaklaşmaya başlar. Ürün veya malzeme katot olarak kullanılır ve kaplama işleminin gerçekleşmesi için voltaj sağlamak üzere elektrik akımı verilir. Elektroliz işlemi sırasında elektrotlarda su parçalanır. Katot üzerinde alkali bir ortam gelişir [29].

Çizelge 4.9. Kaplama prosedürü.

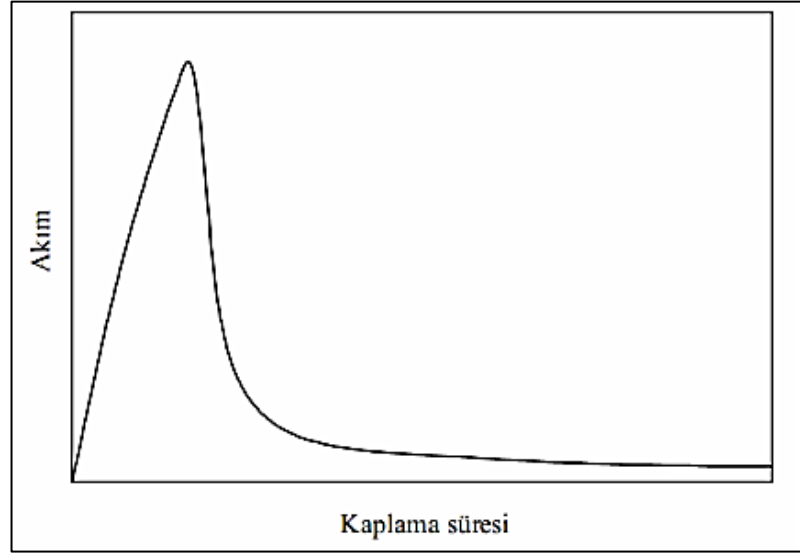
Kaplama	Katod (-)	Anot (+)
<b>Kutuplardaki hareketler</b>	Katyonik reçinenin hareketi	Organik asit gruplarının hareketi
<b>Elektrokimyasal reaksiyon</b>	Suyun elektrolizi sonucunda OH <sup>-</sup> ve H <sub>2</sub> gaz çıkışı	Suyun elektrolizi sonucu H <sup>+</sup> ve O <sub>2</sub> gaz çıkışı
<b>Kimyasal reaksiyon</b>	Katyonik reçine OH <sup>-</sup> ile nötralize olarak, suda çözünme özelliğini kaybeder.	Asit grupları H <sup>+</sup> ile serbest asitleri oluşturur.
<b>Film oluşumu</b>	Suda çözünemeyen reçine yüzeye hızla çöker	Serbest asitler sistemden uzaklaştırılır.

İş parçası üzerine uygulanan gerilim yükü, parçanın yüzeyinde oluşan boya kalınlığı için birincil kontrol değeridir (Şekil 4.7) [11].



Şekil 4.7. Boya filmi kalınlığı ile uygulanan voltajın ilişkisi [21].

Kaplanmış yüzeydeki boya tabakası, boya uygulandığında bir direnç veya yalıtkan görevi görür. Ohm yasasına göre, kaplanan kısımlarda elektrik direnci yükseldikçe elektrik akımı düşmektedir. Galvanik kaplamanın kendi kendini sınırlama özelliği, karmaşık formlara sahip malzemelere sabit bir kaplama kalınlığı uygulamayı mümkün kılar. mg/coulomb'un tanımı uygulanan boya miktarıdır. Kaplama işlemi, kaplama direnci içinden akım geçmesini engelleyecek bir kalınlığa ulaşana kadar devam eder (Şekil 4.8) [24,29].



Şekil 4.8. Kaplama süresi ile akım geçişi ilişkisi.

Birincil reaksiyonlara ek olarak, kaplama sırasında meydana gelebilecek ek yan etkiler vardır. Bunlardan biri, özellikle anodik elektrotlarda, metalin elektrokimyasal parçalanmasıdır. Yukarıda bahsedilen yan reaksiyon  $Fe_2O_3$  oluşumuna yol açmıştır.  $H_2O$ 'da bulunan karakteristik kırmızı demir oksit (pas) sarı lekelerine neden olur. Katodik galvanik kaplamada bu lekelerin çok az olması, onun hızla benimsenmesine katkıda bulunan başka bir faktördür [28]. Bu da korozyon direnci performansını sınırlayan önemli bir husustur.

Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra elektriksel olarak yapışmayan veya malzeme üzerinde tutunamayan boya durulama işlemi kullanılarak uzaklaştırılır. Banyoda yüzeye yapışan boyadan daha yoğun olan, bu malzemeye yapışmayacak olan boyadır. Bu durulama sistemleri, kapalı devre sistemlerde kaplanmış boyayı malzemedan

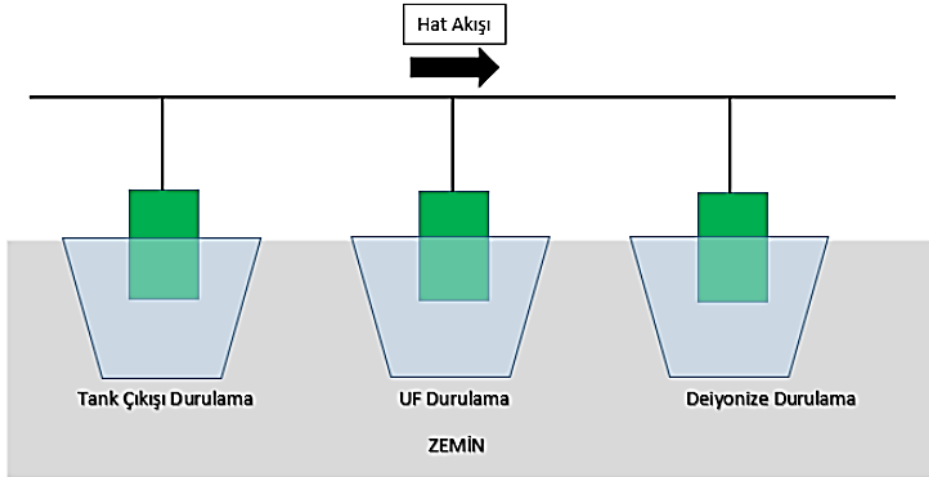
uzaklaştırır ve boya tankına geri döndürür. Bu kapalı sistemler %99 verimlilik seviyeleri sağlar. Sonuç olarak yıkama mekanizması çok önemli olsa da malzeme defalarca durulanır [24].

Kaplanan malzeme kaplama tankından ilk çıktığı anda tank üzerinde bulunan nozullar yardımıyla durulanır. Bu, tank çıkışı durulama prosedürüdür. Yıkama tankında bulunan pompa ve üzerine monte edilmiş debimetre tank çıkışındaki nozulları beslemektedir. Ultrafiltreden geçen akışın %80'i akış ölçer için gereken akış hızı olmalıdır. Durulama işlemi için seçilen nozullar, 0,5 bar basınçta dakikada 1-6 litre arasında boşaltma yapabilmelidir. Havuz verimliliğinin en önemli yönlerinden biri nozül seçimidir [24].

Ultrafiltreden geçen su deposundaki bir pompa kullanılarak ultrafiltre yıkama iş parçasındaki fazla boyayı giderir. Su, pratik bir sırayla düzenlenmiş nozüllerden geçirilir. Bu şekilde iş parçası 45 ila 60 gün süreyle suya maruz bırakılarak başarılı bir geri kazanım sağlanır. Fırına giren malzemelerde temizlik işlemi kalite açısından çok önemlidir. Bu bölümde yıkanamayan veya iş parçasından çıkarılamayan malzeme pişirim sonrası yüzey kalitesi sorunlarına neden olabilir. Bu prosesin çalışma şekline kapalı devre sistem de diyebiliriz çünkü diğer proseslerde olduğu gibi durulanan kataforez artığı tanka geri döner [24].

Kataforez ve deiyonize durulama kaplamadan sonra, estetik çekiciliği önemli olan malzemeleri durulamak için sıklıkla deiyonize su kullanılır. Bir tanktan bir pompa ve deiyonize su kullanılarak, maddeye püskürtme tekniği uygulanır. Bu durulama tekniği, malzemenin yüzeyinde hala mevcut olabilecek herhangi bir filtrat tortusunu gidermeyi amaçlar. Şekil 4.9'da Bu teknik, görsel olarak mükemmel öğelerin pişirmeden önce üretilmesini garanti eder [24].

Malzeme gerekli temizlik işlemlerinden geçirildikten sonra havuzda köpük oluşması beklenir. Bu köpük oluşumunu en aza indirmek için köpüğü yakalamak için mekanik adımlar kullanılır. Durulama işlemi tamamlandıktan sonra malzeme üzerine damlamaları önlemek için hava duşu olarak bilinen bir cihaz vasıtasıyla malzemeye basınçlı hava da verilir [24].



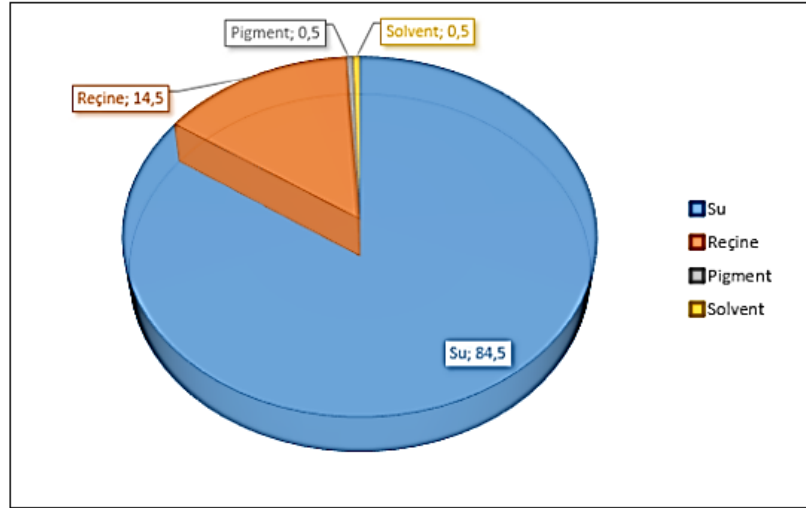
Şekil 4.9. Katarforez kaplama sonrası durulama işlemleri [21].

#### 4.9. KATAFOREZ BANYO BİLEŞENLERİ

Anodik veya katodik kaplamalarda kullanılan bileşenler, diğer boya bileşimlerine benzer genel yapıya sahiptir. Hatta çarpıcı benzerlikler sergilerler. Su bazlı bir havuz olan katarforez havuzunun banyo bileşenlerini emülsiyon (reçine), pigment pastası, solvent, asit ve demineralize su oluşturmaktadır. Katarforez banyosunun bileşenleri ve nitelikleri Tablo 4.9'da listelenmiştir ve Şekil 4.10 banyo bileşenlerinin oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4.10. Katarforez banyo bileşenleri ve özellikleri [23].

<b>KATAFOREZ BANYO BİLEŞENLERİ</b>	
<b>POLİMERLER (REÇİNELER)</b>	Yüksek/düşük viskoziteli
	Sıvı halde
	Boya içindeki oranı: % 40 -70
<b>PİGMENTLER</b>	Organik/inorganik pigmentler
	Dolgular
	Geniş renk skalası
	Boya içindeki oranı: % 5-50
<b>SOLVENTLER</b>	Sıvı halde
	Petrokimya ürünleridir
	Boya içindeki oranı: % 5-60
<b>KATKILAR/YARDIMCILAR</b>	Sıvı/katı halde
	Çok geniş bir yapıdadırlar
	Boya içindeki oranı: % 0.1-10



Şekil 4.10. Kataforez boya banyosundaki maddelerin oranları [20].

#### 4.9.1. Katyonik Polimer Emülsiyon (Reçine)

Bitmiş boya filminin en önemli bileşenlerinden biri, ona boyaya özgü korozyon direncini ve UV direncini veren reçinedir. Reçine ve polimer karışımlarından oluşur. Boya üreticileri tarafından seçilen formülasyonlarla, her bileşen, ürünün beklenen kalitesine, maliyetine ve çevresel sonuçlarına katkıda bulunur. Epoksi, akrilik, reçine veya her ikisini içerebilir. Akrilik polimerler, UV direnci ve renk yönetimi ile dikkat çekerken, epoksi reçine polimerleri, korozyon ve kimyasal direnç açısından mükemmeldir. Epoksi esaslı olanlar yüksek korozyon direnci sağlar. Bahsedilen niteliklerin tümü, akrilik ve epoksi durumunda birleştirilir. ED hatlarında kullanılan malların reçinesinin iyonlaşması, boya benzeri bileşiklerin içeriği önemli ölçüde farklı olmadığında bile önemli değişikliklere neden olur. Kaplamayı oluşturmak için reçine reaksiyonu başlatır. Sonuç olarak kaplama elastikiyet ve direnç kazanır. Saklama koşulları 5 – 30 °C arasında değişmektedir [29].

#### 4.9.2. Pigment pasta

Kaplama veya boya filmi, aynı zamanda kaplamanın esnekliğini artıran pigment pastasından uygun rengi alır. Dolgu maddeleri, içerdikleri çok sayıda kimyasal sayesinde boyaya daha fazla dolgu gücü verir ve kaplama tepkisini hızlandırır. Dolguları sistemi pasifleştirir ve korozyona karşı korur. Pigmentler ve dolgu maddeleri

gibi oldukça rafine katı parçacıklar, boya reçineleri tarafından çözülemez. Bu örnek pigmentler Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Yardımcı ve katkı maddeleri yardımıyla pigmentler ve dolgu maddeleri reçine ile birleştirilir, belirli bir tane boyutuna indirilir ve daha sonra öğütme millerinden geçirilir. Kataforez boya, hem organik hem de inorganik pigment türleri ile yapılabilir.  $TiO_2$  ve karbon siyahı kullanılan iki ana pigmenttir. Öte yandan, dolgu maddeleri farklı silikat bileşikleri ve farklı inorganik elementler içerir. Silikat maddeler parça yüzeyine homojen ve düzgün bir görünüş kazandırır. Fiziksel stabilite, pigment pastasının viskozitesi ile garanti edilir ve kataforez tankı da pompalama sistemine uygun olarak kurulur. Kataforez havuzuna aktarmadan önce keke yeterince demineralize su eklemek çok önemlidir. Boya reçineleri, çeşitli yardımcı maddeler ve çözücüler yardımıyla pigmentlerin ve dolgu maddelerinin kaplanmasını veya sarılmasını destekler. Depolama için sıcaklık aralığı 5 ila 30 °C aralığındadır. Ortama ve özelliklerine bağlı olarak, pigment pastanın katılım oranı %45 ila %60 arasında değişir [23,24].

Bütil glikol, fenoksipropanol ve arıtılmış su, kataforez sisteminde çözücü olarak kullanılır. Pigment macunu banyo için bütil glikol sağlar ve reçine fenoksi sağlar. Ayrıca banyo, buharlaşma ve reaksiyonlar sonucunda indirgenmiş çözücü ve su ile beslenir.



Şekil 4.11. Pigment örnekleri.

### 4.9.3. Solventler

Banyoda nispeten küçük miktarlarda bulunan kataforez çözücülerini çok önemli işlevleri yerine getirir. Reçinelerin sulu ortam uyumunu garanti eder ve filmin kalınlığını ve dağılımını düzenler. Bütilglikol, fenoksipranol, hegzilglikol ve su kullanılan kimyasal çözücülerdir. Kullanılan pigmente bağlı olarak, birkaç solvent kullanımı vardır. Bütil glikol, boyanın etkili bir şekilde nüfuz etmesini ve kalın bir kaplama oluşturmasını sağlar. Ayrıca reçine ve pigment pastasının sulu ortamda karışmasını kolaylaştırır. Öte yandan fenoksi, bütil glikol, su ve spesifik bir reçineden oluşan benzersiz bir çözücü/katkı maddesidir. Suda bütil glikol kadar iyi çözünmez. Pürüzsüz bir film görünümü ve yüzey yayılımı elde etmek için fenoksi film yapısına girerek reaksiyona girer (Şekil 4.12) [23,24].



Şekil 4.12. Fenoksi katkı ve normal film karşılaştırması [20].

Pasta ve reçinede bir miktar çözücü vardır, ancak kataforez tankına dışarıdan verilir. Aslında kaplama için gerekli olan ana bileşenler olan macun ve reçine de kataforez havuzuna verilir. Bileşime bağlı olarak, çözücüler önemli miktarda su ve %5-10 glikol eteri içerir [23].

### 4.10. KATAFOREZ KAPLAMAYI ETKİLEYEN PARAMETRELER

Kataforez kaplamaya etki eden faktörler şunlardır.

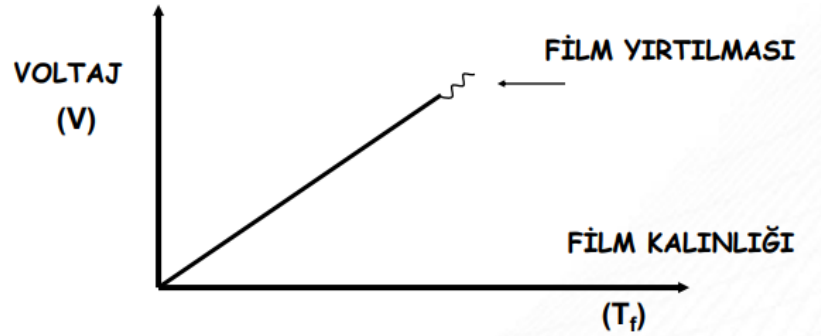
- Voltaj (V)
- Kaplama süresi (t)
- İletkenlik
- Banyo sıcaklığı (T)
- Katı, kül ve P/B oranı

- PH değeridir.

#### 4.10.1. Voltaj

Voltaj, kataforez kaplama işleminde çok önemli bir faktördür ve kaplamayı doğrudan orantılı olarak etkiler. Voltaj, istenen kataforez kalınlığına bağlı olarak film kalınlığını hızla ayarlayabilir. 20 V artışla yüzeylerde kalınlık doğrudan yaklaşık 3  $\mu\text{m}$  artar. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi gerilim ve film kalınlığı doğru orantılı olarak büyür. Bununla birlikte, yüksek voltajlarda oluşan kaplamalar çok güçlü bir elektrik alanıyla karşılaşacağından, yüzeylerde, özellikle katotta eşit olmayan bir kaplamaya işaret eden bir "film yırtılması" ortaya çıkacaktır.

Aynı kaplama kalınlığını korumak için katodun voltajı yüzey alanıyla orantılı olarak artırılmalıdır [29].



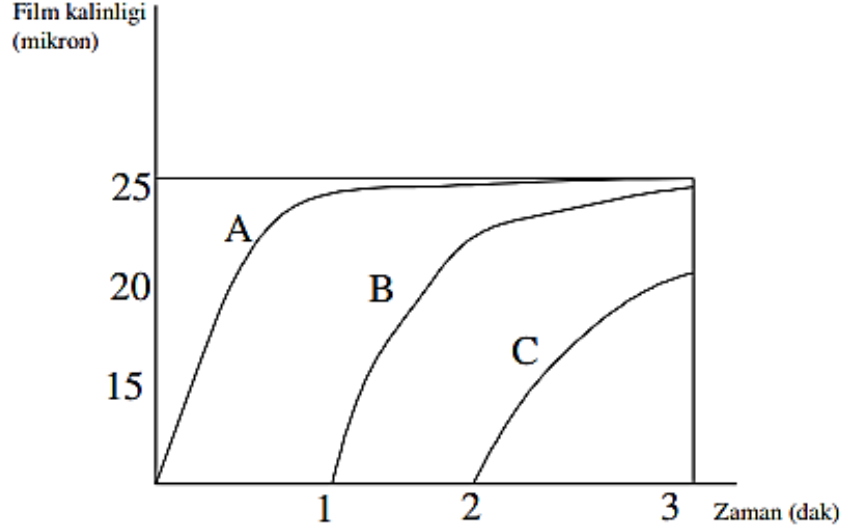
Şekil 4.13. Film yırtılması [20].

#### 4.10.2. Kaplama Süresi

Kaplamanın ne kadar sürdüğü (t) ile doğrudan ilgilidir. Kaplama süresi arttıkça kaplama kalınlığı da artacaktır (Şekil 4.14). Konveyör hızına bağlı olarak zemin kaplama işlemi iki ila dört dakika sürer. Konveyör hızının çok yavaş veya hızlı olduğu tesislerde kalınlık voltaj ile değiştirilebilir [23].



Kaplama süresini uzatarak, Şekil 4.14'teki C bölgesinin kalınlığını arttırmak mümkündür. Uzun kaplama süresine rağmen, A bölgesinin ne yüzey kalitesinin ne de film kalınlığının önemli ölçüde kötüleşmediği gözlenmelidir [29].



Şekil 4.14. Kaplama süresi – Film kalınlığı ilişkisi [20].

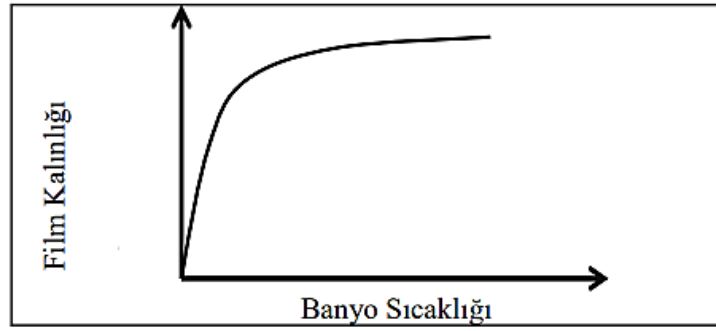
#### 4.10.3. İletkenlik

Kaplama, banyo direnci ile ters, iletkenlik ile doğrudan ilişkilidir. Boyanın iletkenliği, akımı ne kadar iyi taşıyabileceğinin bir ölçüsüdür. Oluşan çözünür tuzlar, polarize çözücüler ve asitler nedeniyle çalışma banyosundaki iletkenlik her zaman artma eğilimindedir. Özellikle, fosfat havuzundan daha fazla iyon getirildikçe banyonun iletkenliği yükselir. Asit iyonlarının sistemden atılması veya UF atılımı iletkenliği dengeler. Kaplama kalınlığı iletkenlikle birlikte büyür. Ölçüm için kalibre edilmiş bir iletkenlik ölçüm cihazı kullanılır. Aralık ayı için iletkenlik 800-2500 ms aralığında olmalıdır. [23,29].

#### 4.10.4. Banyo Sıcaklığı

Banyo sıcaklığı kaplamayı önemli ölçüde etkiler, bu nedenle banyonun stabilitesini garanti etmek için bir soğutucu ve ısı eşanjörü yardımıyla kontrol edilmelidir. Kaplama prosedürü ve sirkülasyon pompaları, kataforez banyosunda ısı üreten iki faktördür.

Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, kaplama banyo sıcaklığı ile tam orantılıdır ve sıcaklık arttıkça ve zamanla sabit kaldığı için kalınlık artmaz. Kataforezin türüne bağlı olarak, banyo sıcaklığı 28 ila 34 °C arasında değişir. Banyodaki sıcaklık yükseldikçe, sıcaklığı kabul edilebilir ayar aralığında tutmak için soğutucu kullanılmalıdır. Sirkülasyon pompaları ve kaplama banyonun sıcaklığını yükselteceği için kataforez sisteminde ısıtma ünitesine gerek yoktur. UF modülü, yüksek sıcaklıklara karşı tehlikeli derecede hassastır. Düşük sıcaklıklar filmin kalınlığını değiştirir ve banyonun çözünürlüğünü azaltır [23].

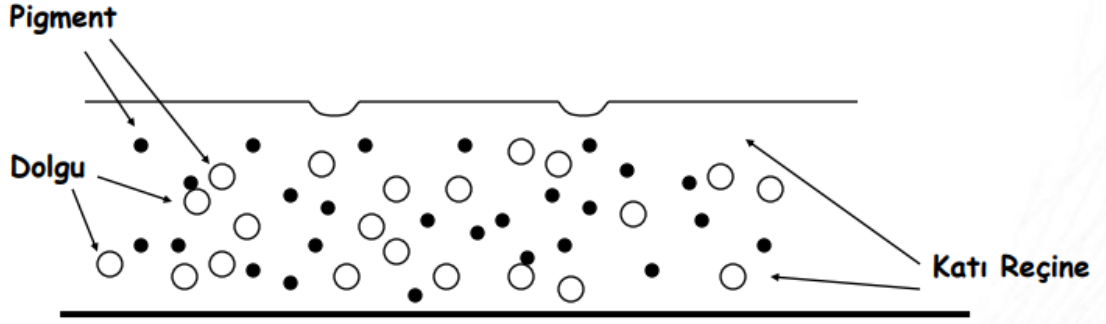


Şekil 4.15. Banyo sıcaklığının film kalınlığına etkisi [20].

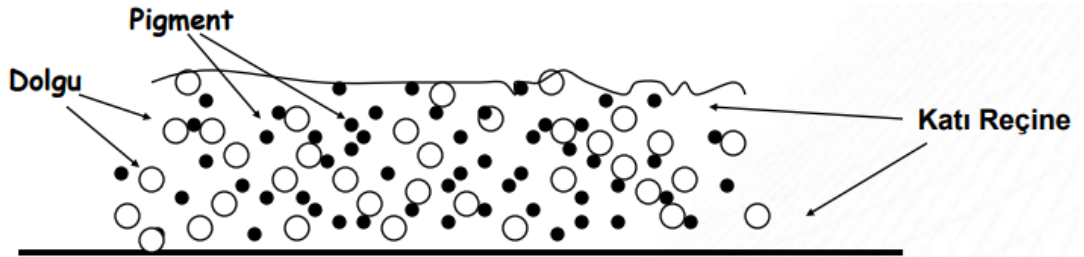
#### 4.10.5. Katı, Kül ve P/B oranı

Kaplama sonucunda banyodaki reçine ve pigment pasta miktarı azalacaktır. Numunenin katı ve kül oranları hesaplanır ve P/B oranı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır. %100 P/B oranı  $(\text{Kül}/\text{Katı}-\text{Kül}) \cdot 100$  olan bir formülasyonda sunulmaktadır. Tuvalet gerekli P/B aralıklarında çalışmalıdır. Tank beslemeleri oluşturulurken P/B oranı dikkate alınır. Kaplamanın dağılımı, daha yüksek veya daha düşük bir P/B oranından etkilenir. Reçine sarılı pigmentler, kaplama sırasında yüzeye yerleşir. Banyoya kıyasla, kaplama daha büyük bir pigment-reçine oranına sahiptir. Banyo belirtilen P/B limitleri dahilinde çalışmalıdır; yüksek P/B oranları yüzeyde tozlanmaya neden olurken (Şekil 4.17), düşük P/B oranları ise yüzeyde açıklıklar veya delikler oluşmasına neden olur (Şekil 4.16). Filmin kalınlığı, katı, kül ve katı kül oranı (P/B) ile doğrudan ters orantılıdır. Miktar arttıkça kaplama kalınlığı da artar [23,29].

Banyodaki katı da asit ve solvent indirgenmesine uğrar. Banyo bileşenlerinin birbirine oranları günlük kaplama kapasitesine göre değişmektedir. İlaveler yapılırken analiz sonuçları dikkate alınmalıdır. Malzeme azalmaları her gün aynı oranda gerçekleşmeyebileceğinden, eklemelerde sürekli olarak aynı oranlar kullanılamaz [29].



Şekil 4.16. Düşük P/B oranı [20].



Şekil 4.17. Yüksek P/B oranı [20].

#### 4.10.6. Ph

Kataforez tankının pH'ı günde en az iki kez ölçülmelidir. Reçine ve pigment pastası ilavesi ile tankın pH seviyesi yükselir. pH seviyesi yükseldiğinde, emülsiyonun stabilitesi bozulur ve reçine çözünürlüğü azalır, bu da boyanın tankta, filtrelerde ve membranlarda topaklanmasına neden olur. Bir çözeltideki asitlik ve alkalilik yoğunluğunu belirlemek için kullanılan ölçü birimi hidrojen potansiyelidir. 0 ila 14 arasında bir ölçekte ölçülür. Bir Tuzağın pH'ı, asit ve bazik grupların ne kadar eşit dağıldığını belirler. Kataforez boyanın pH değeri 5,2 ile 60 arasındadır. Borularda korozyon nedeniyle pH değeri düştüğünde ortama demir iyonları salınır. Membran tıkanıklıkları da beraberinde gelir. İşlem sırasında katot yüzeyinde pH'ın yükselmesine

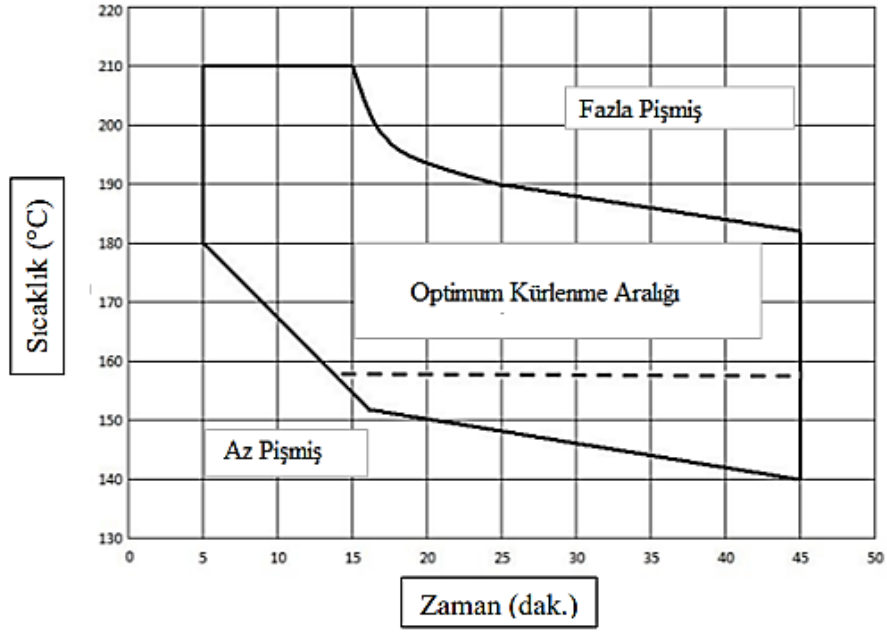
neden olan hidroksil gruplarının (OH) oluşumu, kataforez sisteminin neden bu kadar yoğun bir şekilde pH'a bağlı olduğunu açıklar.

Sonuç olarak, boya yığını parçalanır ve yüzeye yapışır. Kataforez tankının pH'ı günde en az iki kez ölçülmelidir. Reçine ve pigment pastası ilavesi ile tankın pH seviyesi yükselir. Aralık ayında asit ilavesi ile pH uygun düzeye getirilir. pH seviyesi düşük olduğunda, anolit tankından biraz anolit sıvısı uzaklaştırılır daha sonra atılan sıvıya eşit miktarda dışardan su verilir [23,29].

#### **4.11. FIRINLAMA**

Kürleme prosedürünü tamamlamak için kataforez kaplama işlem malzemesinin ısıtılması gerekir. Son adımlarda gerçekleşen temizleme ve durulama işlemlerinden sonra ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Fırınlara konveksiyonlu fırınlarda ısıtılır. Kuruma prosedürü boya film tabakasının yapışma değeri solvent sıvısının uçuşmasıyla artar. Kataforez kaplamanın uygun kurutma işlemi yapılmadan yapılan astarlama işlemlerinin, bir korozyon testi olan tuz sisinde köpürme veya süre direncinde azalmaya neden olduğu kaydedilmiştir. Ürünler fırımlandığında, yüksek performans elde etmek için ısıyla sertleşen reçineler çapraz bağlanır. Küçük moleküller kimyasal olarak birleşerek çapraz bağ olarak bilinen, çözücüye ve sert saldırılara karşı bağışık olan tek bir pürüzsüz yüzey oluşturur. Kullanılan galvanik kaplama ürününe bağlı olarak, farklı sıcaklıklar ve süreler gereklidir [23,24].

Kürleme süresi Şekil 4.18'de gösterildiği gibi 175 °C'de 15 dakika veya 160 °C'de 20 dakika olarak hesaplanabilir. Fırın 180 °C'ye ayarlanmıştır ve önceden belirlenen değeri korumak için parçaların 30 dakika kürlenmesi gerekir. Pişirme prosedürü çok önemlidir. Yetersiz pişirme, ürünlerde soyulma ve boya çıkması gibi sorunlara yol açacaktır. Pişmiş malzemelerin pişip pişmediğini belirlemek için metal sıcaklığını tespit etmek için bir termograf cihazı kullanılır [23].



Şekil 4.18. Kürlenme penceresi (metal sıcaklığı) [20].

Kaplamanın sertleşmesi için uygun metal sıcaklıklarının yeterince uzun süre muhafaza edildiğinden emin olmak için bir termograf ekipmanı kullanılmalıdır. Termograf aparatı ve probu ölçü almak için kaplanacak metale takılır. Ölçüm sonucunun grafiği çizilerek tüm metal problemlerin gerekli kürleşme sıcaklığı ve süresinde olup olmadığı görülebilmekte ve bir sorun varsa fırın sıcaklığı arttırılmaktadır [23].

Kurutma işlemlerinin üç aşaması incelenebilir. Doymamış bileşenlerin oksidasyonu bu fazların ilkidir. Bileşenlerin polimerizasyonu ikinci adımdır. Koloidal sistemlerin organizasyonu ve jel yapısının oluşturulması üçüncü aşamayı oluşturur. Kurutma sırasında oksidasyon süreci hızlı olsa da henüz bitmemiştir. Bu süreç kaplama süresince yavaş da olsa devam eder [24].

#### 4.12. ALKALİ ÇİNKO NİKEL KAPLAMA

Elektro kaplamalı çinko, genellikle çelik alt tabakaları korozyona karşı korumak için kurban kaplamalar olarak kullanılır. Ancak yüksek sıcaklık ve zorlu ortamlarda korozyon direnci yetersizdir. Literatüre göre, çinko alaşımı kaplamalar, saf çinko kaplamalara göre daha yüksek korozyon direnci sağlayabilir. Bu, çinkonun Fe, Co ve Ni gibi Fe grubu metallerle alaşımlandırılmasıyla elde edilir. Son yıllarda, kadmiyum

kaplamaların yerine, çevre dostu özelliklerinden dolayı, Zn-Ni alaşımlarına olan ilgi artmaktadır. Ek olarak, Zn-Ni alaşım kaplamalar, yüksek sıcaklıkta ve şiddetli oksitleyici koşullarda mükemmel korozyon direnci nedeniyle havacılık ve enerji üretiminde büyük ilgi görmüştür. Zn-Ni kaplamaların özellikleri ve karakteristikleri esas olarak mikro yapıları ve faz bileşimleri tarafından belirlenir. Zn-Ni alaşım kaplamaların korozyon direncinin 8 ile 14 arasında olduğu bildirilmektedir [30].

Çinko-nikel alaşımlı kaplamalar, çinko ve diğer çinko alaşımlı kaplamalara kıyasla daha yüksek korozyon direncine ve daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları için çok ilgi çekmiştir. Çinko-nikel kaplamalar, nispeten agresif ortamlarda çelikler için geliştirilmiş korozyon koruması sağlar. Nikel içeriğinin %12 ile %15 arasında olması ile maksimum koruma kabiliyetine ulaşılabileceği tespit edilmiştir [31].

Çinko-nikel alaşımı biriktirme işlemleri banyoların pH aralığına göre yani asit tipi ve alkali tipi olmak üzere iki türe ayrılabilir. Asit banyosundan kaplanan çinko-nikel kaplamaların nikel içeriği, katot akım yoğunluğunun değişimine karşı daha hassastır. Bu nedenle asit çinko-nikel kaplamalar sadece basit şekilli çelik parçalar için kullanılabilir ve endüstriyel uygulamaları sınırlıdır. Aksine, alkali çinko-nikel banyoları, kaplamalarda daha homojen nikel içeriği sağlayabilir. Ek olarak, alkalin çinko-nikel biriktirme prosesi, asit prosesine göre ekipmanda daha az korozyon ve daha düşük ürün maliyeti gibi başka birçok avantaja sahiptir [31].

Zn-Ni alaşımları genellikle asit, alkalin siyanür ve alkalin siyanür olmayan (zinkat tipi ve zayıf alkali tipi) banyolardan elektro depolanır. Zn-Ni alaşım biriktirme için kullanılan ticari alkali banyosunun insan sağlığına toksik ve kanserojen olan siyanür içerdiği ve düşük akım verimi, (%60- %80) elde edildiği belirtilmektedir. Bu nedenle, yüksek akım verimliliğine sahip çevre dostu bir alkali banyo geliştirmek gerekli ancak zordur [30].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez kapsamında QSte TM 690 ve S355J2 yapı çeliklerine işlem görmemiş formda ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış formda kataforez ve alkali çinko nikel kaplama yapılarak bilyalı dövmenin kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, kaplamaların adhezyonu ve korozyon dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

#### 5.1. ÇELİK NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Bu tez kapsamında deneysel çalışmalarda, 11,9 cm x 2,9 cm x 0,8 cm ölçülerinde çelik plakalar kullanılmıştır. Çelik plakalar lazer kesim tezgahlarında kesilmiştir.

#### 5.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİ

Bilyalı dövme işlemi, S230 çelik bilyalar kullanılarak 13 dakika tamburlu kumlama makinasında gerçekleştirilmiştir.

S230 çelik bilya boyutları 6-9 mm arasındadır. 40-50 HRC kullanım sonrası sertliğe sahip ve beynitik mikroyapıdadır. Çelik bilyanın kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. S230 çelik bilyanın kimyasal bileşimi.

% Kimyasal Bileşim					
Fe	C	Mn	Si	S	P
<b>Kalan</b>	0,10 – 0,20	1,00 – 1,50	0,10 – 0,25	max. 0,035	max. 0,035

Şekil 5.1 (a)’da işlemsiz S355J2, Şekil 5.1 (b)’de S355J2 yapı çeliğinin bilyalı dövme işlemi uygulanmış plakalar gösterilmiştir.



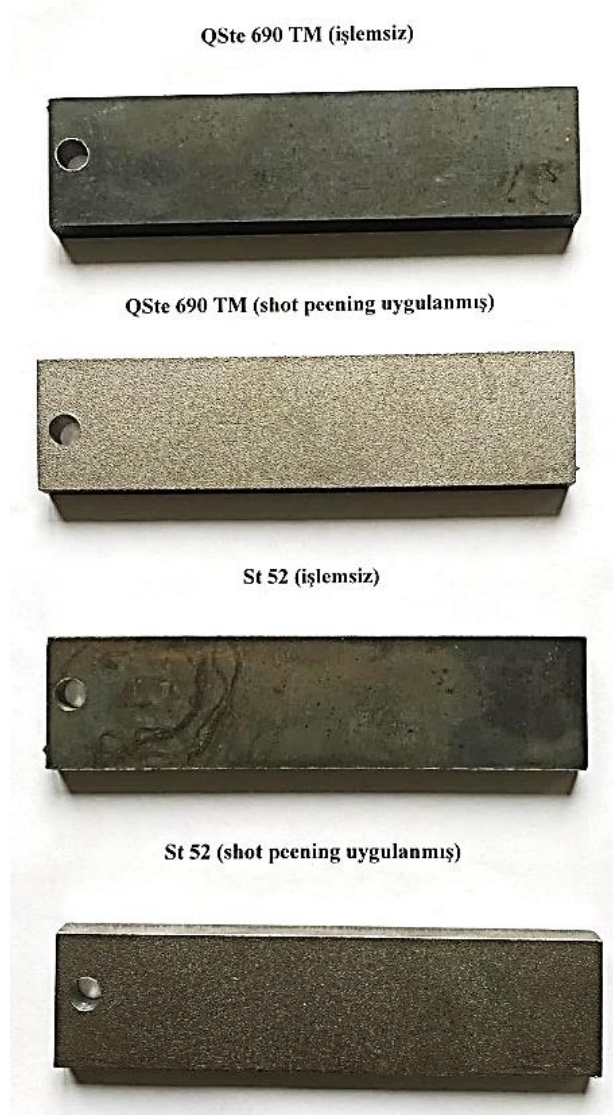
Şekil 5.1. (a) S355J2 yapı çeliğinin işlemsiz plaka, (b) S355J2 yapı çeliğinin bilyalı dövme işlemi uygulanmış.



Şekil 5.2. QStE TM 690 çeliğinin, (a) işlemsiz ve (b) bilyalı dövme işlemi uygulanmış.

Şekil 5.3'te işlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler aynı görüntü üzerinde gösterilmiştir.



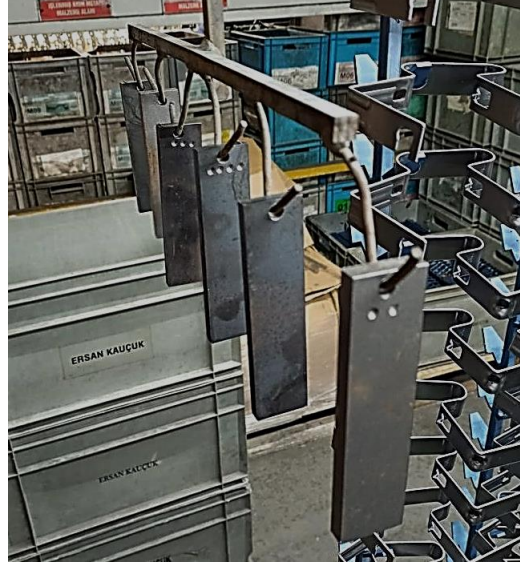


Şekil 5.3. İşlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış plaka.

### 5.3. KATAFOREZ VE ALKALİ ÇİNKO NİKEL KAPLAMA

Kataforez kaplama ve alkali çinko nikel kaplama fabrika şartlarında imalat bandının standart üretim akış şeması izlenerek uygulanmıştır. Numunelere özel farklı bir işlem yapılmamıştır. İşlem sırası şu şekilde uygulanmıştır. Ön yıkama, daldırma ile yağ alma, durulama, yüzey aktivasyon, fosfatlama, durulama, pasivasyon, durulama, kataforez kaplama, durulama, süzülme ve fırınlama işlemleri yapılmıştır.

Şekil 5.4 numunelerin kaplama öncesi, Şekil 5.5 kaplama sonrası ve Şekil 5.6 askılama durumlarını göstermektedir.



Şekil 5.4. Numunelerin kaplama öncesi.



Şekil 5.5. Numunelerin kaplama sonrası.



Şekil 5.6. Numunelerin askı durumu.

#### 5.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ

Test parçalarının yüzey pürüzlülük ölçümleri Surftest SJ-210 [mm]"R2 $\mu$ m; 0,75mN" cihazla 0,5 mm/sn hızında ve 12 mm uzunluğu boyunca yapılmıştır (Şekil 5.1). Surftest SJ-210 yerinde ölçüm için taşınabilir olarak tasarlanmış, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıdır.



Şekil 5.7. Surftest SJ-210 yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı.

Kullanılan cihazın bazı özellikleri çizelge 5.2’de verilmiştir.

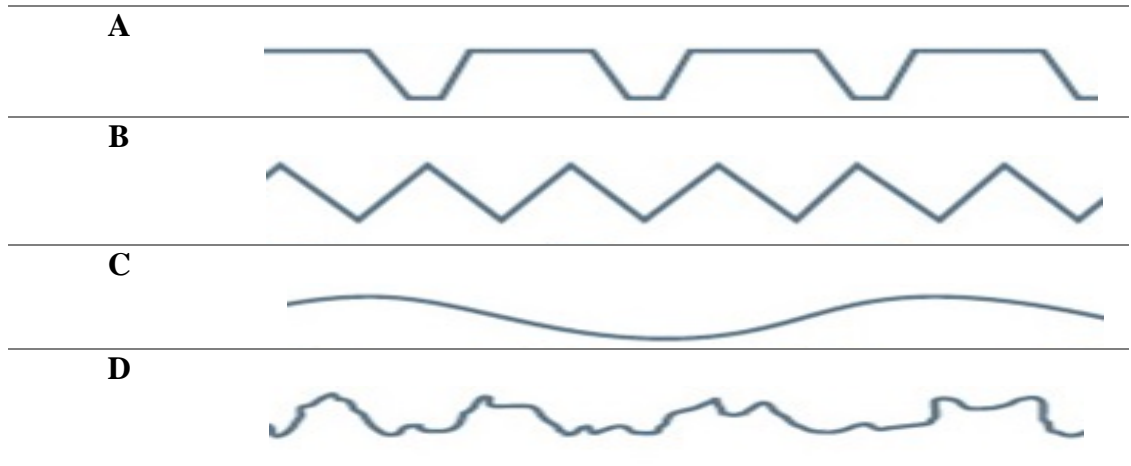
Çizelge 5.2. Surfrest SJ-210 cihazının özellikleri.

Özellikler	Değerleri
Ölçüm aralığı:	16 mm - 4,8 mm [S-tip]
Hareket :	17,5 mm - 5,6 mm [S-type]
Stylus Ucu açısı:	60°
Stylus Ucu radyüsü:	2 µm
Pürüzlülük standartları:	EN ISO, VDA, JIS, ANSI and customize settings
Örnekleme uzunluğu:	x 1, x 3, x 5, x L

Ra Yüzey Pürüzlülüğü: Ra yaygın olarak kullanılan bir pürüzlülük parametresidir. Malzemenin merkezinden yukarı doğru uzanan profil dalgalanmalarının mutlak aritmetik ortalaması, Ra yüzey pürüzlülüğü olarak bilinir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için en sık kullanılan parametredir.

Rz Profilin en yüksek yükseklik değerlerinin ortalaması. Örnekleme uzunluğundaki en yüksek beş tepe ile en derin beş vadi arasındaki ortalama mesafedir. Rz veya yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki dikey mesafe, yüzey pürüzlülüğü ile ilgili y koordinat aralıklarının ölçülmesini sağlar. Tablo 5.3, aynı Ra profiline sahip çeşitli yüzey profillerinin diyagramlarını gösterir.

Çizelge 5.3. Aynı Ra kalitesine sahip bazı yüzey kesitlerinin şematik çizimleri.



## **5.5. KOROZYON**

Numunelere tuzlu su içerisinde ASTM B 117 / DIN EN ISO 9227 metoduna uygun olarak korozyon testi 1008 saat olarak yapılmıştır. ASTM B 117 / DIN EN ISO 9227 metodunda ISO 4628-2 standardına göre malzemede blister oluşumu, ISO 4628-8 standardına göre çizik çevresindeki korozyonu ve ISO 4628-1 standardına göre kenar korozyonu belirlenmiştir. Böylece korozyon dayanımları belirlenmiş olup kullanıma uygunluğuna onay verilmiştir. Belirtilen standarta göre pas ilerlemesi 2 mm'den düşük olması durumunda korozyon direnci yüksek olarak tanımlanabilmektedir. ISO 4628-8 standardında 3 farklı durum söz konusudur. Bunlar, 1.seviye (çok hafif-korozyon dayanımı yüksek), 2.seviye (hafif-korozyon dayanımı orta) ve 3.seviye ( ağır-korozyon dayanımı düşük)'dir.

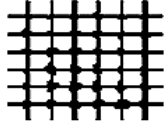

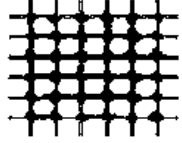

## **5.6. YAPIŞMA (ÇİZİK) TESTİ**

Kesici bir alet kullanılarak incelenecek kaplanmış yüzey, kaplanmamış yüzeye inene kadar sürekli bastırılarak düz ve belirgin bir şekilde çizilir. Dilimlenen alan yapışkan bantla (TESA 4657) kapatılır. Yapıştırılan bant yüzeyden elle yukarıya doğru itilerek hızlı bir şekilde uzaklaştırıldıktan sonra yüzey görünümü ve yüzey değerlendirmeleri kriterlere uygun olarak incelenir.

Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 Standart, kaplamaya dik bir açıyla alt tabakaya bir kafes modeli kesildiğinde, boya kaplamalarının ve verniklerin (ahşap lekeleri dahil) alt tabakalardan soyulmaya ne kadar iyi direnç gösterdiğini belirlemek için bir test prosedürünü tanımlar. Kaplamanın önceki kaplamaya veya alt tabakaya yapışması, bu ampirik test işlemi tarafından belirlenen özelliği etkileyen unsurlardan biridir.

Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 standardına göre yapılmış olup ve aşağıdaki verilen Çizelge 5.4'te verilen tanımlara göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.4. Yapışma testi sonrası yüzey değerlendirme tablosu.

Sınıflandırma	Tanımı	Gösterimi
<b>Ad0</b>	Kesik kenarlar mükemmel bir biçimde düzdür; karelerde boya kalkması yok.	---
<b>Ad1</b>	Kesişme noktalarında kırılmış küçük parçalar; karelenmiş yüzeyden %5 kalkma	
<b>Ad2</b>	Karelerin kesişme noktalarında veya karelenmiş yüzeyden %5 den fazla, %15'ten az kalkma	
<b>Ad3</b>	Kesik kenarlar boyunca kırılmanın kısmi veya karelenmiş yüzeyden %15'ten fazla %35'ten az kalkma	
<b>Ad4</b>	Geniş şeritler veya tek karelerden tamamen veya karelenmiş yüzeyden %35'ten fazla %65'ten az kalkma	

Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 numaralı şartnamesine göre yapılmış ve değerlendirilmiştir. Testin başarılı olabilmesi için Ad0 olmalıdır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. KAPLAMA KALINLIKLARI

Çizelge 6.1. Katalforez ve Alkali Nikel Çinko kaplama kalınlıkları.

Numuneler	Katalforez Kaplama	Alkali Çinko Nikel Kaplama
İşlemsiz QSte 690 TM	31,33 mikron	23,80 mikron
Bilyalı Dövme Uygulanmış QSte 690 TM	28,31 mikron	31,21 mikron
İşlemsiz S355J2	31,36 mikron	23,29 mikron
Bilyalı Dövme Uygulanmış S355J2	28,29 mikron	27,33 mikron

Çizelge 6.1’de görüldüğü üzere işlemsiz QSte 690 TM ve S355J2 numunelerinde katalforez kaplama sonrası elde edilen kalınlık değeri (sırasıyla 31,33 ve 31,36 mikron), alkali nikel çinko kaplamaya göre (sırasıyla 23,80, 23,29 mikron) daha yüksektir.

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM çelikte alkali nikel kaplama sonucu 31,21 mikron kaplama kalınlığı elde edilmişken, katalforez kaplama sonucu 28,31 mikron kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış S355J2 çelikte katalforez kaplama sonucu elde edilen kaplama kalınlık değeri (28,29 mikron), alkali çinko nikel kaplamaya (27,33 mikron) göre daha yüksektir.

Bilyalı dövmenin kaplama kalınlığına etkisine bakılacak olursa, QSte 690 TM çeliğinin işlemsiz formda katalforez kaplama kalınlığı 31,33 mikrondan, bilyalı dövme sonucu katalforez kaplama kalınlığı 28,31 mikrona düşmüştür. Ancak işlemsiz formda alkali çinko nikel kaplama kalınlığı 23,80 mikrondan, bilyalı dövme sonucu alkali çinko nikel kaplama kalınlığı 31,21

mikrona artmıştır. S355J2 çeliğinin işlemsiz formda kataforez kaplama kalınlığı 31,36 mikrondan, bilyalı dövme sonucu kataforez kaplama kalınlığı 28,29 mikrona düşmüştür. Ancak işlemsiz formda alkali çinko nikel kaplama kalınlığı 23,29 mikrondan, bilyalı dövme sonucu alkali çinko nikel kaplama kalınlığı 27,33 mikrona artmıştır.

Burada her iki farklı kalite çelik içinde bilyalı dövme sonucu kataforez kaplama kalınlıklarının düşmesi, alkali çinko nikel kaplama kalınlığının artması ile bilyalı dövme işlemi uygulanmış alkali çinko nikel kaplanmış numunelerde korozyona karşı daha yüksek dayanımın olması beklenmektedir. Bunun sebebi ise işlemsiz çeliğin çinko nikel kaplama kalınlıklarının düşük iken bilyalı dövme işleminden sonra daha kalın bir kaplama elde edilmesidir. Bununla birlikte bilyalı dövme işlemi uygulanan QSte 690 TM çeliğinin 31,21 mikron çinko nikel kaplama kalınlığı, bilyalı dövme işlemi uygulanan S355J2 çeliğinde 27,33 mikron çinko nikel kaplama kalınlığı ölçüldüğünden bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM çeliğinin korozyon dayanımının diğer numunelere göre daha yüksek olması beklenmektedir. Bu beklentinin sebebi ise daha yüksek olan kaplama kalınlığının daha uzun korozyon dayanımı performansı gösterecek olmasındandır.

## 6.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre numune parçaların Ra ve Rz ölçü değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Numunelerin Ra ve Rz ölçü değerleri.

Sıra No	Parça adı	Ra $\mu\text{m}$ ortalama ölçüm	Rz $\mu\text{m}$ ortalama ölçüm
1	QSte 690	1,226	6,697
2	QSte 690 İşlemlili (shot peening)	3,925	18,517
3	S355J2	2,613	14,639
4	S355J2 İşlemlili (shot peening)	6,037	28,083

Çizelgede görüldüğü üzere Ra değerleri düşünüldüğünde, QSte 690 işlemsiz numunenin yüzey pürüzlülük değerinin bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneye



göre daha düşük (1/3 oranında) olduğu tespit edilmiştir. ani diğer bir ifade ile, bilyalı dövme işlemi QSte 690 çeliğinin Ra pürüzlülük değerinin 3 kat artırmıştır. Diğer bir incelen numune olan S355J2 işlemsiz numunesi ile bilyalı dövme uygulanmış olan numune Ra değerleri arasındaki oran yaklaşık olarak 1/2 olarak görülmektedir. Bu sonuçlara göre QSte 690 TM numunesinin, bilyalı dövme işlemi sonucunda oransal olarak daha fazla yüzey kalitesi bozulmuştur. S355J2 işlemlili olan numune ise en yüksek yüzey pürüzlülük değerine sahiptir ama oransal olarak QSte 690 TM numunesine göre daha az yüzey kalitesi bozulmuştur.

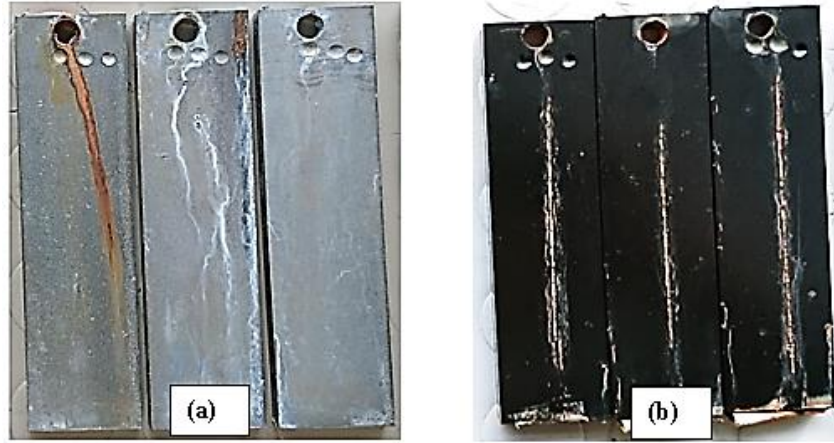
### 6.3. KOROZYON

Şekil 6.1’de işlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM ve S355J2 çeliklerinin kataforez ve alkali çinko nikel kaplama sonrası korozyon yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil 6.1’de açık, beyaz kontrasttaki numuneler işlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM ve S355J2 çeliklerinin alkali çinko nikel kaplama sonrası korozyon yüzey görüntüsü, koyu kontrasttaki numuneler işlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM ve S355J2 çeliklerinin kataforez kaplama sonrası korozyon yüzey görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.1. İşlem görmemiş ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM ve S355J2 çeliklerinin kataforez ve alkali çinko nikel kaplama sonrası korozyon yüzey görüntüsü.

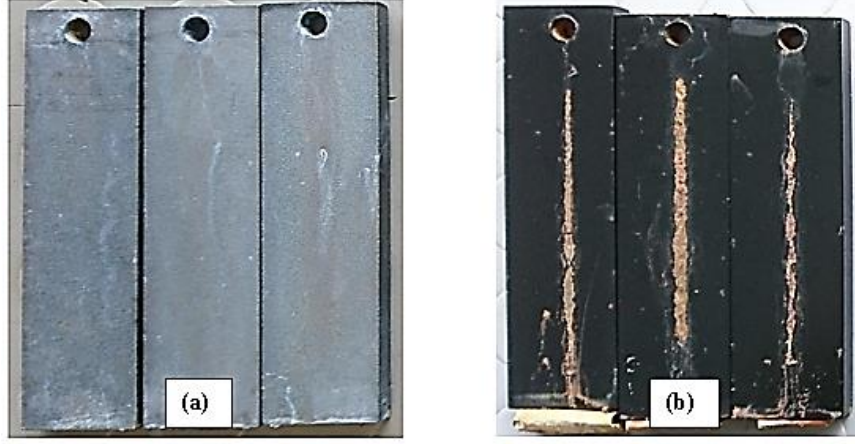
İşlemsiz QSte 690 TM çeliğinin Şekil 6.2 (a)'da alkali çinko nikel kaplamalı, Şekil 6.2 (b)'de kataforez kaplamalı numunelerin korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.2 (a)'da görüldüğü üzere işlemsiz QSte 690 TM çeliğinin alkali çinko nikel kaplama sonrası ana metalde korozyon meydana gelmemiştir. Numunede 240 saat sonrasında beyaz pas oluşumu görülmüştür. Şekil 6.2 (a)'da soldaki parçadaki pas oluşumu askı deliği kaynaklıdır. Soldaki ve sağdaki numune korozyona karşı dirençli olduğu, kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.2 (b)'de kataforez kaplı numunenin korozyon testi sonrası yüzeyi gösterilmiştir. ISO 4628-2 standartına göre numunede blister oluşumu gözlenmemiştir. ISO 4628-8 standartına göre çizik çevresinde korozyon 1.seviye (çok hafif) olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte 0.5 mm pas ilerlemesi meydana gelmiştir. ISO 4628-1 standardına göre kenar korozyonu görülmemiştir.



Şekil 6.2. İşlemsiz QSte 690 TM çeliğinin (a) alkali çinko nikel kaplama ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri.

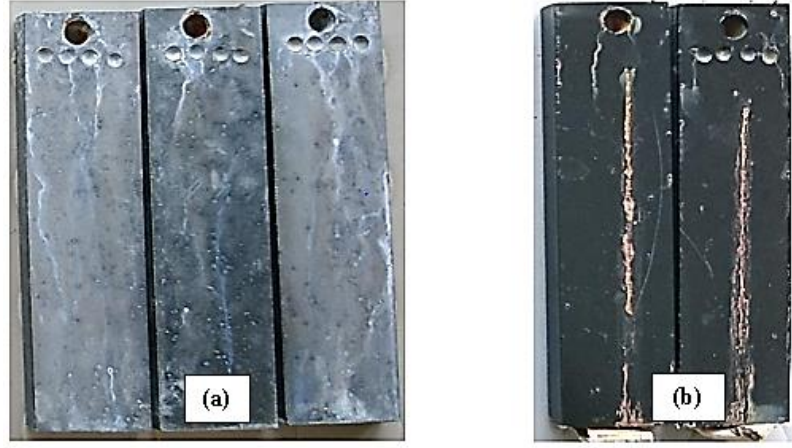
Bilyalı dövme işlemi uygulanan QSte 690 TM çeliğinin şekil 6.3 (a)'da alkali çinko nikel ve (b)'de kataforez kaplamalı numunelerin korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Alkali çinko nikel kaplama sonrası şekil 6.3 (a), ana metal korozyona uğramamıştır. Şekil 6.3 (a)'da soldaki parçada küçük ölçekte kırmızı pas oluşumu meydana gelmiştir. Bu nedenle ortadaki ve sağdaki numune kullanıma uygundur. 240 saat sonrasında beyaz pas oluşumu görülmüştür. Kataforez kaplama sonrası şekil 6.3 (b), ISO 4628-2 standardına göre blister oluşumu görülmemiştir. Ancak, numunede 2.5 mm pas ilerlemesi meydana geldiği tespit edilmiştir. ISO 4628-8 standardına göre

çizik çevresinde 2.seviye (hafif) korozyon meydana gelmiştir. Bu nedenle kullanıma uygun değildir. ISO 4628-1 standardına göre kenar korozyonu görülmemiştir.



Şekil 6.3. Bilyalı dövme işlemi uygulanan QSte 690 TM çeliğin (a) alkali çinko nikel kaplama ve (b) kataforez kaplama sonucu korozyon numuneleri.

İşlemsiz S355J2 çeliğinin Şekil 6.4 (a)'da alkali çinko nikel, Şekil 6.4 (b)'de kataforez kaplamalı numunelerin korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Alkali çinko nikel kaplı numunelerde ana metalde korozyon meydana gelmemiştir. Numunede 240 saat sonrasında beyaz pas oluşumu görülmüştür. Şekil 6.4 (a)'da ortadaki parçada küçük ölçekte kırmızı pas oluşumu meydana gelmiştir. Şekil 6.4 (a)'da soldaki ve sağdaki parçalar korozyona karşı dayanıklı olup, kullanıma uygundur. Şekil 6.4 (b)'de kataforez kaplama sonucu gösterilmiştir. ISO 4628-2 standardına göre blister oluşumu gözlenmemiştir. Kataforez kaplı numunelerde pas ilerlemesi 1.5 mm olup ISO 4628-8 standardına göre çizik çevresinde korozyon 1.seviye (çok hafif) olarak belirlenmiştir. ISO 4628-1 standardına göre kenar korozyonu görülmemiştir.



Şekil 6.4. İşlemsiz S355J2 çeliğinin (a) alkali çinko nikel kaplamalı ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri.

Bilyalı dövme işlemi uygulanan S355J2 çeliğinin Şekil 6.5 (a)'da alkali çinko nikel , Şekil 6.5 (b)'de kataforez kaplamalı numunelerin korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Alkali çinko nikel kaplı numunelerde ana metalde korozyon meydana gelmemiştir. Numunede 240 saat sonrasında beyaz pas oluşumu görülmüştür. Şekil 6.5 (a)'da üç parçada korozyona karşı dayanıklı olup, kullanıma uygundur. Şekil 6.5 (b)'de kataforez kaplama sonucu gösterilmiştir. ISO 4628-2 standardına göre blister oluşumu gözlenmemiştir. Kataforez kaplı numunelerde pas ilerlemesi 3.5 mm olup ISO 4628-8 standardına göre çizik çevresinde korozyon 3.seviye (çok ağır) olarak belirlenmiştir. ISO 4628-1 standartına göre kenar korozyonu görülmemiştir.



Şekil 6.5. Bilyalı dövme işlemi uygulanan S355J2 çeliğinin (a) alkali çinko nikel kaplamalı ve (b) kataforez kaplamalı numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri

Bilyalı dövme ile yüzey pürüzlü hale geldiğinden, bu yüzeyin çinko fosfat kaplamasının parça yüzeyindeki girintileri doldurmasını aslında zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kumlama yapılmış parçalarda yüzeyde kumdan gelen kirliliklerin tespiti ve yüzey pürüzlük değerinin kaplama öncesi kontrol edilmesi ve ona göre proses tasarımı oluşturulması gerekmektedir.

Bilyalı dövmenin yüzeyi temizleme ve yorulma mukavemetini iyileştirmesinin yanında, yüzey kalitesinin bozulması gibi olumsuz yönleri de vardır. Kataforez kaplama öncesi bilyalı dövme işlemi uygulandığı zaman, yüzey pürüzlü hale geliyor, bu işlem yüzeyin fosfat kaplamasının parça yüzeyindeki girintileri doldurmasını zorlaştırıyor. Kataforez öncesi bozulan yüzey kalitesi, kaplama kalınlığını düşürüp, korozyon direncini olumsuz yönde etkiliyor. Bunun yanında alkali çinko nikel kaplamada fosfatlama prosesi olmadığı için bilyalı dövülmüş parçalarda kaplama kalınlığına olumlu etki yapmıştır. Bu durumda korozyon direncinin artmasını sağlamaktadır. Bu tür parçalarda kataforez ön yüzey işlemleri (yağ alma, çinko fosfat) ve reçetesiz bilyalı dövme yapılmış parçalara göre özel olarak yapılması uygun olacaktır.

#### 6.4. YAPIŞMA TEST SONUCU

Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da kataforez kaplama sonrası numunelerin yapışma test yüzeyleri verilmiştir.



Şekil 6.6. İşlemsiz QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.

Şekil 6.6'daki ilk numune bilyalı dövme işlemi yapılmamış QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplamadan hemen sonra kuru yapışma testi uygulanmış görselidir. Çizelge 5'de verilen tanımlara göre, kesik kenarlar mükemmel bir biçimde düzdür; karelerde boya kalkması yoktur. QSte 690 TM işlemsiz çeliğin kataforez kaplama kalınlığı 31,33 mikron, yüzey pürüzlülük ortalama değeri ise Ra 1,226  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir. Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 standardına göre Ad0 (Bkz – Çizelge 5) olarak değerlendirilmiştir. Kaplama kalınlığında ve yapışma testinde bir olumsuzluk görülmemiştir.



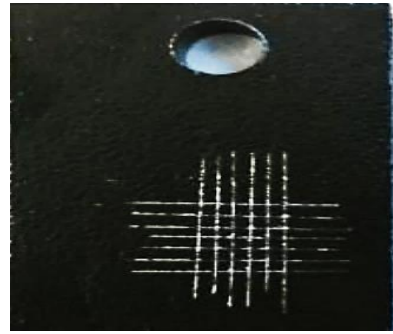
Şekil 6.7. Bilyalı dövme uygulanmış QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.

Şekil 6.7'deki ikinci numune bilyalı dövme işlemi uygulanmış QSte 690 TM çeliğinin kataforez kaplamadan hemen sonra kuru yapışma testi uygulanmış görselidir. Çizelge 5'de verilen tanımlara göre kesik kenarlar mükemmel bir biçimde düzdür; karelerde boya kalkması yoktur. QSte 690 TM işlemlili çeliğin kataforez kaplama kalınlığı 28,31 mikron, yüzey pürüzlülük ortalama değeri ise Ra 3,925  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir. Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 standardına göre Ad0(Bkz – Çizelge 5) olarak değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri artmış, kaplama kalınlığında bir miktar düşüş olmasına rağmen yapışma testinde bir olumsuzluk görülmemiştir.



Şekil 6.8. İşlemsiz S355J2 çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.

Şekil 6.8'deki üçüncü numune bilyalı dövme işlemi yapılmamış S355J2 çeliğinin, kataforez kaplamadan hemen sonra kuru yapışma testi uygulanmış görselidir. Çizelge 5'de verilen tanımlara göre kesik kenarlar mükemmel bir biçimde düzdür; karelerde boya kalkması yoktur. S355J2 işlemsiz çeliğin kataforez kaplama kalınlığı 31,36 mikron, yüzey pürüzlülük ortalama değeri ise Ra 2,613  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir. Kuru yapışma testi DIN EN ISO 2409 standardına göre Ad0 (Bkz – Çizelge 5) olarak değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri, kaplama kalınlığı ve yapışma testinde bir olumsuzluk görülmemiştir.



Şekil 6.9. Bilyalı dövme uygulanmış S355J2 çeliğinin kataforez kaplama sonrası yapışma test yüzeyi.

Şekil 6.9'daki bilyalı dövme işlemi uygulanmış S355J2 çeliğinin kataforez kaplamadan hemen sonra kuru yapışma testi uygulanmış görselidir. Çizelge 5'de verilen tanımlara göre kesişme noktalarında kırılmış küçük parçalar; karelenmiş yüzeyden %5 kalkma vardır. S355J2 işlemlenmiş çeliğin kataforez kaplama kalınlığı 28,29 mikron, yüzey pürüzlülük ortalama değeri ise Ra 6,037  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir. Kuru

yapışma testi DIN EN ISO 2409 standardına göre Ad1(Bkz – Çizelge 5) olarak değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri artmış, kaplama kalınlığında bir miktar düşüş gözlemlenmiş son olarak test numunelerinin arasında kataforez yapışma değeri kötü performans sergilemiştir.Yüzey pürüzlülük değeri en yüksek parça olduğu için, pürüzlülük değerinin boya yapışma kalitesine etkisinin ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.



## BÖLÜM 7

### GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında otomotiv imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan iki farklı kalitede QSte 690 TM ve S355J2 çelik malzemeye bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, işlemlenmiş ve işlemlenmemiş olarak kateforez ve alkali çinko-nikel kaplaması yapılmıştır. Kaplamaların karakterizasyonu kaplama kalınlıklarının ölçülmesi, yüzey pürüzlülüklerinin tespiti, kuru yüzey yapışma testi ve tuzlu sivi içerisinde 1008 saat ASTM-B114 korozyon testine tabi tutulması ile gerçekleştirilmiştir.

Bu sonuçlara göre elde edilen veriler ve öneriler şu şekilde sıralanabilir.

- QSte 690 TM işlemlenmemiş çeliğin kateforez kaplama kalınlığı 31,33 mikron, alkali çinko-nikel kaplama kalınlığı 23,80 mikron ölçülmüştür. Bu çeliğin kaplama öncesi yüzey pürüzlülük değeri ise ortalama olarak Ra değeri 1,226  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir.
- QSte 690 TM çeliğin bilyalı dövme işleminden sonraki kateforez kaplama kalınlığı 28,31 mikron, alkali çinko-nikel kaplama kalınlığı 31,21 mikron ölçülmüştür. Bu çeliğin yüzey pürüzlülük değeri ise ortalama olarak Ra değeri 3,925  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir.
- S355J2 işlemlenmemiş çeliğin kateforez kaplama kalınlığı 31,36 mikron, Alkali çinko-nikel kaplama kalınlığı 23,29 mikron ölçülmüştür..Bu çeliğin yüzey pürüzlülük değeri ise ortalama olarak Ra değeri 2,613  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir.
- S355J2 çeliğin bilyalı dövme işleminden sonraki kateforez kaplama kalınlığı 28,29 mikron, Alkali çinko-nikel kaplama kalınlığı 27,33 mikron ölçülmüştür. Bu çeliğin yüzey pürüzlülük değeri ise ortalama olarak Ra değeri 6,037  $\mu\text{m}$  ölçüm değeridir.

- Bilyalı dövme işleminin yüzeyi temizleme ve yorulma mukavemetini iyileştirme faydası yanında, kataforez kaplamada oluşturabileceği olumsuzluklar da olmaktadır. Bu nedenle kataforez ön yüzey işlemleri (yağ alma, çinko fosfat) reçetesiz bilyalı dövme yapılmış parçalara özel olarak yapılmalıdır.
- Bilyalı dövme yapılmış parçalarda malzeme yüzeyinde çelik bilyalardan gelen kirliliklerin tespiti ayrıca yüzey pürüzlük değerinin kaplama öncesi kontrol edilmesi ve bu sonuçlara göre proses tasarımı oluşturulması gerekmektedir.
- Bilyalı dövme yapılmış parçalara kesit yüzeyinden bakıldığında oluşmuş çukurların dolması için kataforez fosfat prosesinde bekleme süreleri, işlemsiz parçalara göre yetersiz kalmış olabilir. Böyle parçalarda ek bir işlem yapılmış ise mutlak suretle parçaların fosfat banyosu sonrası değerlendirilmesi gerekir.
- Yüzey kalitesi kötü olan parçaların kataforez kaplamadaki olumsuzluklarından dolayı, bu tür parçalara ilk kat astar olarak alkali çinko nikel kaplama uygulanması korozyon direncini arttıracak için tercih edilmesi daha uygun olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: Çelik İhracatçıları Birliği, “Türkiye İhracatı Sektörler – 2021”, <https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html> (2021).
2. Srikanth, M., Annamalai, A. R., Muthuchamy, A. and Jen, C. P., “A review of the latest developments in the field of refractory high-entropy alloys”, *Crystals*, 11 (6): 612-626 (2021).
3. Adar, M., “Hardox-500 ile St-52 çeliğinin kaynak edilebilirliğinin mekanik testler ve istatistiksel yöntemlerle araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2019).
4. İnternet: Makine Eğitimi, “Çeliklerin DIN Normuna Göre Sınıflandırılması”, <https://www.makinaegitimi.com/celiklerin-din-normuna-gore-siniflandirilmasi> (2022).
5. İnternet: Steel Stores, “SEW QSTE 690 TM SEW 092”, <https://www.steelestores.com/grade/sew-qste-690-tm-sew-092.html#mechanical> (2022).
6. İnternet: Karadeniz Technical University Research Information System, “Çeliklerin Sınıflandırılması”, <https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/kursaticin?key=c84a4408-c528-418a-af3f-1286beadaf81> (2022).
7. Mhaede, M., “Influence of surface treatments on surface layer properties, fatigue and corrosion fatigue performance of AA7075 T73”, *Materials & Design*, 41 (1): 61-66 (2012).
8. Schulze, V., “Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects”, *Wiley-VCH*, New Jersey, (2006).
9. Maleki, E., Unal, O. and Amanov, A., “Novel experimental methods for the determination of the boundaries between conventional, severe and over shot peening processes”, *Surfaces and Interfaces*, 13 (1): 233-254 (2018).
10. Varol, R. ve Sarıtaş, S., “Bilyalı dövme işleminin demir esaslı T/M parçaların yorulma özellikleri üzerine etkisinin araştırılması”, *I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 407-418 (1996).
11. Ünal, O., “Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın (2011).

12. Çubuk, A. B., “Bilyalı dövme işleminde bilya çarpma açısı ve bilya boyutunun AA7075 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli (2020).
13. Varol, R., “2024 alüminyum alaşımının yorulma ömrü üzerine farklı bilyalı dövme işlem parametrelerinin etkisi”, Doktora Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya (1990).
14. Yalçınkaya, A., “Bilyalı dövme prosesi uygulanan tank palet pimlerinin yorulma analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2019).
15. Ganesh, B. K. C., Sha, W., Ramanaiah, N. and Krishnaiah, A., “Effect of shotpeening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys”, **Materials & Design (1980-2015)**, 56 (1): 480-486 (2014).
16. Savaş, S., “Monitoring variation of surface residual stresses in the shot-peened steel components by magnetic barkhausen noise method”, Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2010).
17. Balyalı, H. A., “Metalik malzemelerin bilyalı dövme uygulaması sonrası tribolojik davranışının deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2015).
18. Başaran, A., “Toz metal parçalara ısı ve mekanik yüzey işlemlerinin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta (2007).
19. Nguyen, V. B., Poh, H. J. and Zhang, Y. W., “Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations”, **Powder Technology**, 256 (1): 100-112 (2014).
20. Ahmadi, M., Sadeghi, B. M., Irani, M. and Rahimi, F., “Finite element simulation of shot peening of an aluminum alloy considering hardening models”, **Russian Journal of Non-Ferrous Metals**, 57 (6): 565-571 (2016).
21. Karahan, B. ve İnce, U., “Bilya püskürtmenin (Shot Peening) teknik-teknolojideki yolculuğu ve soğuk dövme prosesine adaptasyonu”, **Derin**, 1 (1): 74-90 (2015).
22. Sayaroğlu, S., “Kataforez kaplama prosesi sonrası fırınlanan parçaların yüzeyinde gözlenen ultrafiltrasyon akıntılarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gebze (2019).
23. Beller, İ. C., “Zırh çeliğinin kataforez kaplama sonrası fiziksel özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Mersin (2021).

24. Darowicki, K., Ślepski, P. and Szociński, M., “Novel application of dynamic electrochemical impedance monitoring to a cathoretic coating process”, *Progress in Organic Coatings*, 149 (1): 1-6 (2020).
25. Sheng, X., Xia, Q., Cheng, X. and Lin, L., “Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (2): 261-267 (2012).
26. Bek, N., “Peening uygulamaları”, *Yüzey İşlem Kuşlama Dergisi*, 7 (1): 26-28 (2009).
27. Gariépy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P. and Lévesque, M., “On the effect of the orientation of sheet rolling direction in shot peen forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (6): 926-938 (2013).
28. Kılınç, M., “Kataforez kaplama üzerine solvent bazlı ve su bazlı lamelli kaplama uygulamaları ile oluşacak dubleks kaplamanın korozyon ve ömür testine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2019).
29. Kılınç, M. ve Akyalçın, L., “Kataforez kaplamalı çelik yüzeylere uygulanan dubleks kaplamanın korozyon dayanım performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (1): 68-78 (2022).
30. Özçanak, T., “Kataforez kaplama öncesinde yüzey hazırlama, kurutma ve kaplama proseslerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2008).
31. Tekkalmaz, N., “Kataforez kaplamada yatay yüzeylerde oluşan görüntü bozukluğu nedenlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2010).
32. Feng, Z., Li, Q., Zhang, J., Yang, P., Song, H. and An, M., “Electrodeposition of nanocrystalline Zn–Ni coatings with single gamma phase from an alkaline bath”, *Surface and Coatings Technology*, 270 (1): 47-56 (2015).
33. Li, G. Y., Lian, J. S., Niu, L. Y. and Jiang, Z. H., “Investigation of nanocrystalline zinc–nickel alloy coatings in an alkaline zincate bath”, *Surface and Coatings Technology*, 191 (1): 59-67 (2005).

## ÖZGEÇMİŞ

Burhan OĞUZ ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı; Karabük Endüstri Meslek Lisesi, Metal Eğitimi Bölümü'nden mezun olduktan sonra 1995 yılında ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'ne girdi; 1999'da mezun olduktan sonra Adapazarı Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Metal Teknolojisi Alanında Öğretmen olarak göreve başladı, halen öğretmenlik görevine devam etmektedir. 2021 yılında başlamış olduğu yüksek lisans programını, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı altında sürdürmektedir.