



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HADDE MERDANELERİNİN ESD YÖNTEMİ İLE YÜZEY  
MODİFİKASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ OPTİMİZE  
EDİLMESİ

Mustafa BUĞDAY

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat - 2024

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa BUĞDAY tarafından hazırlanan "*HADDE MERDANELERİNİN ESD YÖNTEMİ İLE YÜZEY MODİFİKASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ OPTİMİZE EDİLMESİ*" adlı tez çalışması 12/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

**Başkan**

**Prof. Dr. Hüseyin KURT**

\_\_\_\_\_

**Danışman**

**Prof. Dr. Mehmet KARALI**

\_\_\_\_\_

**Üye**

**Prof. Dr. Hasan KOTAN**

\_\_\_\_\_

**Üye**

**Prof. Dr. Yusuf KAYALI**

\_\_\_\_\_

**Üye**

**Doç. Dr. Barış GÖKÇE**

\_\_\_\_\_

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU

FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221419003 nolu proje ile desteklenmiştir.

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mustafa BUĞDAY

Tarih: 12/02/2024

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### HADDE MERDANELERİNİN ESD YÖNTEMİ İLE YÜZEY MODİFİKASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ OPTİMİZE EDİLMESİ

Mustafa BUĞDAY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2024, 117 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Prof. Dr. Hasan KOTAN

Prof. Dr. Yusuf KAYALI

Doç. Dr. Barış GÖKÇE

Bu çalışmada Elektro Spark Deposition yöntemi ile WC/Co kaplamalar hadde merdanelerinin ana malzemesi olan küresel grafitli dökme demirler (GGG-60) üzerine biriktirilmiştir. Yüksek çalışma şartlarına bağlı olarak zamanla aşınma dirençleri düşen hadde merdanelerinin yüzeyinde oluşturulacak kaplamalar ile hem yüzey kaliteleri hem de aşınma davranışlarının iyileştirilmesi çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Optimum kaplama parametreleri Taguchi deneyi ile 132 V ve 1230 Hz olarak belirlenmiştir. Varyans, Doğruluk ve Regresyon analizleri ile elde edilen sonuçların kararlılık seviyesi artırılmaya çalışılmıştır. Deneysel numunelere ısıtma işlemi uygulanmış, 4 farklı varyasyonda sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kaplamaların tribolojik performansları aşınma testi ile belirlenmiştir. Mekanik özellikler ise çekme ve üç nokta eğme testi ile incelenmiştir. Kaplama karakterizasyonuna (element ve

bileşik dağılımlarına) SEM/EDS ve XRD ile bakılmıştır. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü 2D profilometre ile ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri sonucu altlık numunenin yüzey sertlik değeri  $270 \pm 5.6 \text{ HV}_{0,2}$ ' den  $1330 \pm 12.5 \text{ HV}_{0,2}$  ye yükseldi. İlk duruma göre yüzey sertlik değeri 5 kat arttı. Kaplamalar içerisinde  $W_2C$ , W ve  $WC_{1-x}$  ara fazların varlığına rastlandı. Bu da kaplama içerisinde oluşan dekarbürizasyon oluşma ihtimalini artırmıştır. Isıl işlem görmüş kaplamalı numunelerde WC oranı diğer kaplamalara göre daha fazla hesaplanmıştır. Bu durum hem mikrosertlik değerini, hem de aşınma direncini olumlu yönde etkilemiştir. SEM/EDS sonuçları da bu durumu destekler niteliktedir. Kaplama ve ısıl işlem aşınma direncini 5 kat artırırken sürtünme katsayısını ise 2,13 kat düşürdü. Çekme testinde maksimum gerilme  $778 \pm 29 \text{ MPa}$ , üç nokta eğme testinde maksimum gerilme  $1588 \pm 8 \text{ MPa}$  olarak hesaplandı. Deneysel ortamda kullanılan hadde merdanesine WC/Co kaplamalar başarılı bir şekilde uygulandı. SEM/EDS görüntülerinde kaplamalı bölgede W, Fe, C, Co ve Al elementlerine, kaplamasız bölgede ise Fe, C, ve Al elementlerin varlığına rastlandı. Yapılan literatür çalışmaları sonucu bir hadde merdanesinin kaplanması ve deneysel yünden incelenmesi çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro Kıvılcım Biriktirme, Hadde Merdaneleri, Kaplama, WC-Co

**ABSTRACT**

**PH.D THESIS**

**OPTIMIZATION OF SURFACE MODIFICATION AND WEAR  
BEHAVIOR IN ROLLING ROLL BY ESD METHOD**

**Mustafa BUĞDAY**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL  
ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Mehmet KARALI**

**2024, 117 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Mehmet KARALI**

**Prof. Dr. Hüseyin KURT**

**Prof. Dr. Hasan KOTAN**

**Prof. Dr Yusuf KAYALI**

**Assoc. Prof. Dr Barış GÖKÇE**

In this study, WC/Co coatings were coated on spheroidal graphite cast irons (GGG-60), which is the main material of rolling rolls, by Electro Spark Deposition method. The main subject of the study is to improve both surface quality and wear behavior with the coatings to be formed on the surface of the rolling rolls, whose wear resistance decreases over time due to high working conditions. The optimum coating parameters were determined as 132 V and 1230 Hz by Taguchi experiment. An attempt was made to increase the stability level of the results obtained through Variance, Accuracy and Regression analyses. Heat treatment was applied to the experimental samples, and the results were compared in 4 different variations. The tribological performances of the coatings were determined by the abrasion test. The mechanical effects were investigated by tensile test and three point

bending test. Coating characterization (element and compound distributions) was examined by SEM/EDS and XRD. The surface roughness of the coatings was measured with a 2D profilometer. As a result of microhardness measurements, the surface hardness value of the substrate sample increased from  $270 \pm 5.6 \text{ HV}_{0.2}$  to  $1330 \pm 12.5 \text{ HV}_{0.2}$ . Compared to the first case, the surface hardness value increased 5 times. The presence of  $W_2C$ , W and  $WC_{1-x}$  interphases was found within the coatings. This increased the possibility of decarburization occurring in the coating. WC ratio was calculated more in heat treated coated samples compared to other coatings. This had a positive effect on both the microhardness value and the wear resistance. SEM/EDS results also support this situation. Coating and heat treatment reduced the wear resistance by 5 times and the friction coefficient by 2.13 times. The maximum stress was calculated as  $778 \pm 29 \text{ MPa}$  in the tensile test, and the maximum stress was calculated as  $1588 \pm 8 \text{ MPa}$  in the three-point bending test. WC/Co coatings were successfully applied to a rolling roll used in the experimental environment. In the SEM/EDS images, the presence of W, Fe, C, Co and Al elements in the coated region and Fe, C, and Al elements in the uncoated region were found. As a result of the literature studies, the coating of a rolling roll and its experimental examination constitute the originality of the study.

**Keywords:** Coating, Electro Spark Deposition, Rolling Rolls, WC-Co

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen saygıdeğer Prof. Dr. Mehmet KARALI ve Prof. Dr. Şükrü TALAŞ hocalarıma en kalbi dileklerimi sunuyorum.

Deneysel çalışmalarına numune hazırlama sürecinde yardımcı olan Meşale Döküm' e, Cebeci Tasarım Merkezi' ne, Merkez Isıl İşlem' e teşekkürlerimi sunuyorum.

Haddeleme deneyinde çok kıymetli tecrübelerini benden esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Bilal ÇOLAK hocama ve Semih DOĞAN Bey' e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımı yapmamda bana yardımcı olan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi' ne (BİTAM) ve Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsü' ne (MARGEM) şükranlarımı sunuyorum.

Bu tezi, eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer anne ve babama, kıymetli eşime ayrıca minik oğluma ithaf ediyorum.

Mustafa BUĞDAY

KONYA-2024

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	IV
ABSTRACT .....	VI
ÖNSÖZ .....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	XI
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	XV
Bölüm 1. GİRİŞ .....	1
1.1. Kaplama Teknolojisi.....	3
1.1.1. Fiziksel Buhar Biriktirme İle Kaplama .....	3
1.1.2. Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama .....	4
1.1.3. Termal Sprey Kaplama .....	5
1.1.4. Sol-Jel Kaplama .....	6
1.1.5. Akımlı/Akımsız Kaplama .....	7
1.2. Kaynak Araştırması .....	9
1.2.1. W Alaşımli Kaplamalar .....	9
1.2.2. Al Alaşımli Kaplamalar .....	11
1.2.3. Ni Alaşımli Kaplamalar .....	11
1.2.4. Ti Alaşımli Kaplamalar.....	12
1.2.5. Diğer Alaşımli İle Yapılan Kaplamalar.....	13
1.3. Elektro Kıvılcım Biriktirme Teknolojisi.....	14
1.3.1. ESD Cihazı ve Çalışma Prensibi .....	15
1.3.2. ESD Parametreleri ve Kaplamaya Etkisi .....	15
1.3.2.1. Altlık Numune Türünün Etkisi.....	16
1.3.2.2. Elektrot Türünün Etkisi .....	19
1.3.2.3. Çevresel Etkiler.....	21
1.3.2.4. Elektriksel Etkiler .....	21
Bölüm 2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	28
2.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması.....	28
2.2. ESD Kaplama .....	30
2.2.1. Taguchi Deneyi .....	32

2.2.2. Varyans Analizi (ANOVA) .....	36
2.2.3. Doğruluk Analizi .....	37
2.2.4. Regresyon Analizi .....	38
2.3. Isıl İşlem .....	42
2.4. Deneysel Yöntem .....	43
2.4.1. Optik Mikroskop ve SEM/EDS Görüntüleri .....	44
2.4.2. XRD Analizi .....	45
2.4.3. Mikro Sertlik Analizi .....	46
2.4.4. Çekme ve Üç Nokta Eğme Testi .....	47
2.4.5. Aşınma Testi .....	47
2.4.6. Haddemeleme Testi .....	48
2.4.7. Yüzey Pürüzlülük Testi .....	49
<b>Bölüm 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>50</b>
3.1. Optik Mikroskop ve SEM/EDS Analizleri .....	50
3.1.1. Kesitten Alınan Optik Mikroskop Görüntüleri .....	50
3.1.2. Kesitten Alınan SEM Görüntüleri .....	52
3.2. XRD Analizleri .....	53
3.3. Sertlik Testi .....	55
3.4. Çekme Testi .....	56
3.5. Üç Nokta Eğme Testi .....	61
3.6. Aşınma Testi .....	65
3.7. Haddemeleme .....	71
3.7.1. Haddemeleden Sonra Yüzeyden Alınan SEM/EDS Görüntüleri .....	72
3.7.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü .....	78
3.8. Maliyet Analizi .....	80
<b>Bölüm 4. SONUÇLAR .....</b>	<b>82</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>100</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme İle Kaplama İşlemi (De Damborenea vd., 2007) .....	4
1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama İşlemi (Mori vd., 2006) .....	5
1.3 Termal Sprey İle Kaplama İşlemi (Joukar vd., 2017) .....	6
1.4 Sol-Jel İle Kaplama İşlemi (Tracton, 2006) .....	7
1.5 Akımlı Kaplama İşlemi (Reddy vd., 2014) .....	8
1.6 Akımsız Kaplama İşlemi (Zhang vd., 2018) .....	9
1.7 ESD Kaplama Yöntemi (Wang vd., 2023) .....	15
1.8 ESD Yönteminde Kaplamaya Etki Eden Faktörler .....	16
1.9 ESD Kaplamada Kullanılan R-C Devresi (Korkmaz, 2008) .....	22
1.10 ESD Pulse Akımının Zaman Evreleri .....	24
1.11 Kısa Devre Anında Osilogram Görüntüsü .....	26
2.1 Döküm Malzemeler .....	28
2.2 Çekme Testi Numune Ölçüleri .....	29
2.3 Üç Nokta Eğilme Testi Numune Ölçüleri .....	29
2.4 Aşınma Testi Numune Ölçüleri .....	29
2.5 Hadde Merdanesi Numune Ölçüleri a) Önden Görünüş b) Üstten Görünüş .....	29
2.6 Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Numuneler .....	30
2.7 ESD Kaplama Cihazı (SZ-3000) .....	30
2.8 GGG 60 Küresel Grafitli Dökme Demirin Optik Mikroskop Görüntüsü .	32
2.9 Ortalama Kaplama Kalınlığı S/N Değerleri .....	34
2.10 Numelerin Ortalama Kaplama Kalınlığı Optik Mikroskop Görüntüsü ...	34
2.11 Yüzey Sertliği S/N Değerleri .....	35
2.12 Ortalama Kalınlık Değerleri ( $\mu\text{m}$ ) .....	38
2.13 Yüzey Sertlik Değerleri ( $\text{HV}_{0,2}$ ) .....	38
2.14 Ortalama Kaplama Kalınlığının Voltaj Hat Uyumu .....	41
2.15 Ortalama Kaplama Kalınlığının Frekans Hat Uyumu .....	41
2.16 Yüzey Sertlik Değerlerinin Voltaj Hat Uyumu .....	42
2.17 Yüzey Sertlik Değerlerinin Frekans Hat Uyumu .....	42
2.18 Isıl İşlem Basamakları .....	43

2.19	Nikon MA100N Optik Mikroskop .....	44
2.20	Hitachi – SU 1510 SEM/EDS Cihazı .....	45
2.21	Bruker D8 Advance XRD Cihazı .....	46
2.22	Emcotest – Durascan G5 mikro Sertlik Cihazı .....	46
2.23	SHIMADZU AGS-X (100 kN) Çekme ve Üç nokta Eğme Test Cihazı ..	47
2.24	Tribometer T10/20 Aşınma Cihazı .....	48
2.25	Haddeleme Makinesi .....	49
2.26	Mitutoyo SJ-301 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı .....	49
3.1	a,c)Isıl İşlemsiz b,d) Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunelerin Kesit Görüntüleri .....	51
3.2	GGG Dökme Demirin Zaman Sıcaklık Dönüşüm Grafiği (Mrzygłód vd., 2017) .....	52
3.3	a,c) Kaplamalı b,d) Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunelerin SEM Görüntüleri .....	53
3.4	a) Isıl İşlemsiz ve Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunelerin XRD Grafikleri ..	54
3.5	Isıl İşlemsiz Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	57
3.6	Isıl İşlemsiz Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği ..	58
3.7	Isıl İşlemlili Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	59
3.8	Isıl İşlemlili Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği ..	60
3.9	Çekme Testi Kesitinden Farklı Büyütmelerde Alınan SEM Görüntüleri a) 1000X b) 500X c) 250X d) 100X .....	61
3.10	Isıl İşlemsiz Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	62
3.11	Isıl İşlemsiz Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	63
3.12	Isıl İşlemlili Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	63
3.13	Isıl İşlemlili ve Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği .....	64
3.14	a) Isıl İşlemlili b) Isıl İşlemsiz Kaplamasız Numunelerin SEM görüntüleri .....	68
3.15	Isıl İşlemsiz Kaplamasız Numunenin EDS (Mapping) Görüntüsü .....	69
3.16	a) Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunenin SEM görüntüsü .....	69
3.17	Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunenin EDS (Mapping) Görüntüsü .....	70
3.18	Numunelerin Sürtünme Katsayı Grafikleri .....	70
3.19	St 37 Lama Haddeleme İşleminde Sonra Yüzeyde Oluşan Çatlak .....	72

3.20 St 37 Lama Haddeme İşlemi Sonrası Yüzeyden Alınan SEM Görüntüsü .....	73
3.21 St 37 Lama İle Haddelenmiş Merdanenin a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri .....	73
3.22 Al 6035 Lama Haddeme İşleminde Sonraki Merdane .....	74
3.23 Kaplamasız ve Katmansız Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü .....	74
3.24 Kaplamasız ve Katmansız Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri .....	75
3.25 Kaplamasız ve Katmanlı Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü .....	75
3.26 Kaplamasız ve Katmanlı Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri .....	76
3.27 Kaplamalı ve Katmansız Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü .....	76
3.28 Kaplamalı ve Katmansız Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri .....	77
3.29 Kaplamalı ve Katmanlı Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü .....	77
3.30 Kaplamalı ve Katmanlı Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri .....	78
3.31 a) Isıl İşlemler b) Isıl İşlemler Kaplamalı Yüzeylerin Pürüzlülük Verileri ..	79
3.32 Haddeme işleminde Sonraki Yüzey Pürüzlülük Verileri .....	79

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 ESD Kaplamada Kullanılan Altlık Numuneler .....	18
1.2 Kaplamalarda kullanılan Elektrot Türlerinin Listesi .....	20
2.1 GGG 60 Sfero Dökme Demir Malzemesinin Kimyasal Yapısı .....	28
2.2 SZ-3000 ESD Kaplama Cihazının Teknik Özellikleri .....	31
2.3 Ortalama Kaplama Kalınlık Değeri Cinsinden S/N Değeri .....	33
2.4 Yüzey Sertlik Değeri Cinsinden S/N Değeri .....	35
2.5 Ortalama Kaplama Kalınlığının Yanıt Tablosu .....	36
2.6 Yüzey Sertliğinin Yanıt Tablosu .....	36
2.7 Ortalama Kaplama Kalınlığına Göre ANOVA Tablosu .....	37
2.8 Yüzey Sertliğine Göre ANOVA Tablosu .....	37
2.9 Ortalama Kaplama Kalınlığı Regresyon İstatistikleri .....	39
2.10 Yüzey Sertlik Değeri Regresyon İstatistikleri .....	39
2.11 Ortalama Kaplama Kalınlığı Sabit Katsayı Değeri .....	40
2.12 Yüzey Sertliği Sabit Katsayı Değeri .....	40
3.1 XRD Analizi Element/Bileşik Dağılımı .....	54
3.2 Yüzey Sertlik Testi Sonuçları .....	56
3.3 Çekme Testi Sonuçları .....	57
3.4 Eğilme Testi Sonuçları .....	65
3.5 Aşınma Hacim Kayıpları ve Oranları .....	66
3.6 Kaplamanın İşletmeye Sağladığı Getiri .....	81

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\mu\text{m}$ : Mikrometre

$^{\circ}\text{C}$ : Santigrat derece

2D: İki Boyut

A: Akım

AC: Alternatif Akım

Al: Alüminyum

Ar: Argon

B: Bor

Ca: Kalsiyum

Co: Kobalt

Cr: Krom

DC: Doğru Akım

dk: Dakika

Eu: Evropiyum

H: Hidrojen

He: Helyum

Hf: Hafniyum

Hz: Hertz

K: Kelvin

kHz: Kilohertz

kN: Kilonewton

kW: Kilovat

mJ: Milijoule

mm: Milimetre

Mo: Molibden

N: Azot

N: Newton

Nd: Neodimyum

P: Fosfor

Pa: Paskal  
Si: Silisyum  
Ta: Tantal  
Ti: Titanyum  
V: Vanadyum  
W: Tungsten  
WC: Tungsten Karbür  
Zr: Çinko

### **Kısaltmalar**

AISI: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü  
ASTM: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu  
ESD: Elektro Kıvılcım Biriktirme  
FBB: Fiziksel Buhar Biriktirme  
GGG: Küresel Grafitli Dökme Demir  
GPa: Gigapascal  
HV: Vickers Sertlik Testi  
KBB: Kimyasal Buhar Biriktirme  
MPa: Megapascal  
RPM: Revolution Per Minute (Dakikadaki dönüş hızı)  
SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu  
TTT: Zaman Sıcaklık Dönüşüm Grafiği  
XRD: X-Işını Kırınım Difraktometresi

## 1. GİRİŞ

Haddeleme, farklı geometrik şekillerin üretiminde kullanılan en etkin plastik şekil verme yöntemlerindedir. Farklı mekanik koşullarda hadde merdaneleri çeşitli çalışma şartlarına bağlı olarak basma, kayma, eğilme veya burulma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Merdane üzerinde oluşan bu şekildeki zorlamalar silindirik üzerinde aşınmaları artırırken nihai ürün kalitesini de etkilemektedir. Merdanenin kullanım ömrünü sınırlandıran bu tür durumların önüne geçmek yine merdane üzerinde yapılan iyileştirmelerle mümkündür.

Yüksek aşınma direnci, çekme mukavemeti, oksidasyon dayanımı gibi özelliklerinden dolayı sektörde küresel grafitli dökme demirden (Sfero Dökme Demir veya GGG olarak da adlandırılmaktadır) imal edilmiş hadde merdaneleri kullanılmaktadır (Faisal vd., 2019; Yang vd., 2013). Dökümden sonra merdanelere gerilim giderme tavlaması yapılmaktadır. Bu işlem soğuma sırasında ortaya çıkan iç gerilmeleri bertaraf edebilmek için uygulanmaktadır. Nihayetinde merdanelere uygulanan normalizasyon tavlaması ile iç yapının normal hale dönüşmesi sağlanmaktadır. Ancak zorlu çalışma koşulları bu tür malzemeden üretilen merdanelerin aşınma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde alaşım ilavesi gibi yöntemlerle aşınma performansının iyileştirilebileceği tavsiye edilse de bu durum malzemenin iç yapısındaki değişiklikler sonucu sünekliğinin ve şekil verilebilirliğinin azalmasına neden olmaktadır (Akroy, 2007).

Haddeleme işlemi sırasında yassılaşıma, termal bombeleşmeler, araya yabancı cisim girmesi sonucu yüzeyde istenmeyen izler merdane yüzeylerinde şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Bu gibi kusurlar merdane ömrünü önemli oranda etkilediği için, ilerleyen aşamalarda işletme maliyetlerini ciddi oranda artırmaktadır. Bu tür kusurlar işletme şartlarında ya merdane yüzeylerinin taşlanması ile ya da stokta sürekli yedeği bulundurulmuş bir diğer eşi ile değiştirilerek giderilmektedir. Değişimi sağlanan merdane de hurdaya ayrılmaktadır. Son dönemde bu problemlerin önüne kaplama teknolojileri ile geçmek mümkün hale gelmiştir. Hadde merdanesi üzerine yapılacak yüzey kaplama işlemi ile merdanenin mekanik özelliklerini artırabilmek mümkündür. Ancak, kaplama çalışmaları akademik olarak incelendi-

ğinde çalışmaların uygulamadan ziyade malzeme boyutunda kaldığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma ileride literatüre sağlayacağı katkıdan dolayı önem arz etmektedir.

Bu çalışmada yüzeyde oluşan deformasyonları onarmak ve ana malzemenin aşınma direncini artırmak için numuneler Elektro Kıvılcım yöntemi ile kaplanmıştır. Optimum kaplama parametrelerini belirleyebilmek için çeşitli girdilerde (voltaj, frekans) 9 farklı varyasyonda (104 V - 160 V, 720 Hz - 1740 Hz) altlık numune üzerine WC %12 Co malzemesi biriktirilmiştir. Optimum parametreler "Minitab" programında "Taguci deneyi" ile belirlenmiştir. 2 farklı parametrenin 3 sinyal seviyesindeki değişimini belirleyebilmek için L9 matrisi kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler sırası ile Varyans (ANOVA), Doğruluk ve Regrasyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum parametreler 132 V ve 1230 Hz olarak belirlenmiştir. İleride yapılacak olan deneysel çalışmalarda bu parametreler kullanılmıştır. Kaplamaların yüzeye daha iyi tutunabilmesi için deney numunelerine ısıtma işlemi uygulanmıştır. Deneyler ısıtma/ısıtılmama, kaplamalı/kaplamasız olmak üzere 4 farklı varyasyonda karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Çeşitli talaşlı imalat usullerine göre işlenen numuneler, deneysel çalışmalara (aşınma, çekme, 3 nokta eğme, haddeleme) uygun hale getirilmiştir. Aşınma testi sonucu ilk duruma göre numunelerin aşınma performanslarında bir artış gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayılarında ise bir düşüş meydana gelmiştir. Ortalama kaplama kalınlığı, optik mikroskopta  $30 \pm 8 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Yüzeyde biriktirilen sert kaplamalar, yüzey sertlik değerini artırmıştır. Isıtma işlemi ve kaplamalı numunenin yüzeyinden alınan XRD analizi sonucu WC bileşiğinin yoğunluğunda bir artış gözlemlenmiştir. Yüzeydeki WC oranının artmasına neden olan bu durum hem aşınma, hem de sertlik değerlerinin artmasına neden olmuştur. Mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için çekme ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlemi ve kaplama işlemi, maksimum çekme gerilmesini ve maksimum eğilme gerilmesinin artmasına neden olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda deneysel ortamda kullanılan bir çift ısıtma işlemi görmüş hadde merdanesinin yarısı kaplanmıştır. Haddeleme işlemi sonrası merdane yüzeyinde oluşan değişimler gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, merdane rijitliği ve yüzey bütünlüğü sert kaplamalar ile korunmaya çalışılmıştır. Ayrıca Yüzeyde oluşabilecek kusurlar kaplamalar ile modifiye edilmiştir. Tez sürecinde yapılan deneysel çalışmalar bu iddiaları destek-

lemekte olup alternatif bir yöntem olarak işletmelere tavsiye edilmektedir.

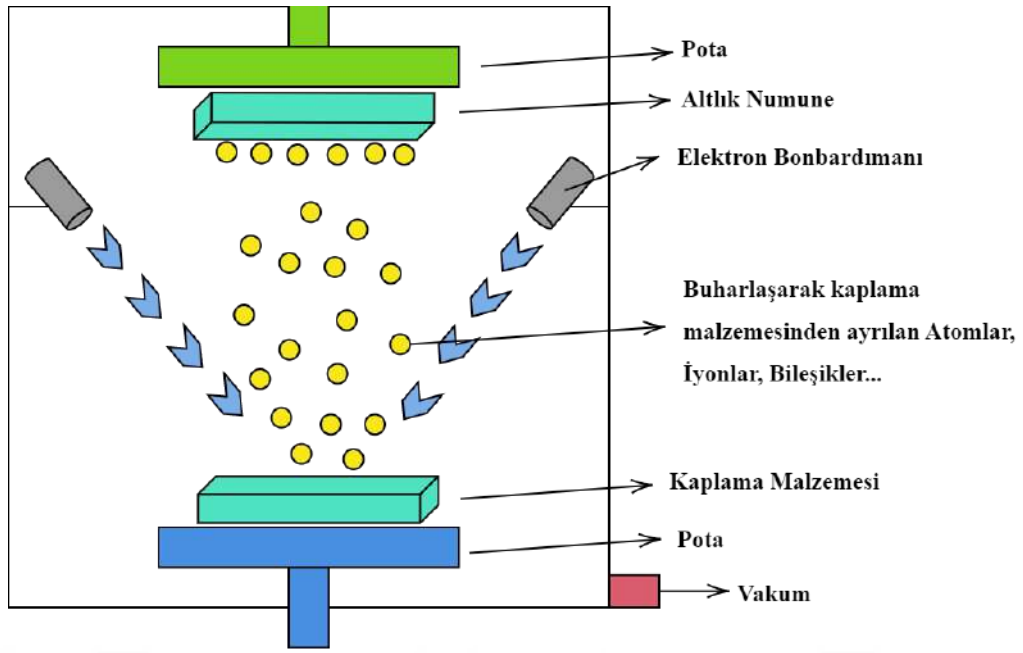
## **1.1. Kaplama Teknolojisi**

Kaplama, endüstrinin bir çok alanında parçaları zorlu ve aşındırıcı etkilere karşı korumak için tercih edilen bir yöntemdir. Fiziksel/kimyasal buhar biriktirme (Luo vd., 2011), Termal Sprey (Pawlowski, 2008), Sol-Gel (Dehghanhadikolaei vd., 2018), Akımsız/Akımlı (McCrea vd., 2003) gibi yöntemler kaplama türleri arasında yer almaktadır.

### **1.1.1. Fiziksel Buhar Biriktirme İle Kaplama**

Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB), vakum altında (genellikle 0,1-1 Pa) kaplanması istenilen atomların, iyonların veya moleküllerin altlık numuneler üzerine püskürtülmesi veya buharlaştırılması ile gerçekleştirilir. Bu yöntem ile yüzeyde ince koruyucu film tabakaları oluşturulabildiği için, yüksek hassasiyete sahip parçaların kaplanabilmesi mümkündür (Prengel vd., 1998). Çok katmanlı kaplamalar bu yöntemin en büyük avantajları arasındadır. Bu sayede kaplama katmanlarının mekanik, korozyon ve esnetik özellikleri ayarlanabilmektedir.

FBB ile kaplama süreci: buharlaştırma, taşıma, reaksiyon ve biriktirme olmak üzere dört adımdan oluşmaktadır. Altlık numune üzerine püskürtülecek malzeme öncelikle yüksek bir enerji kaynağı tarafından bombardımana zorlanır. Bu sayede kaplama malzemesi içerisinde bulunan atomik, iyonik ve moleküler yapılar buradan ayrılır ve buharlaşmaya başlar. Kaplama malzemesinden ayrılan bu yapılar kaplanacak yüzeye taşınır. En son biriktirme aşamasında, istenilen özellikteki filmler altlık numune üzerine kaplanmış olur. Şekil 1.1' de Fiziksel Buhar Biriktirme ile kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir.

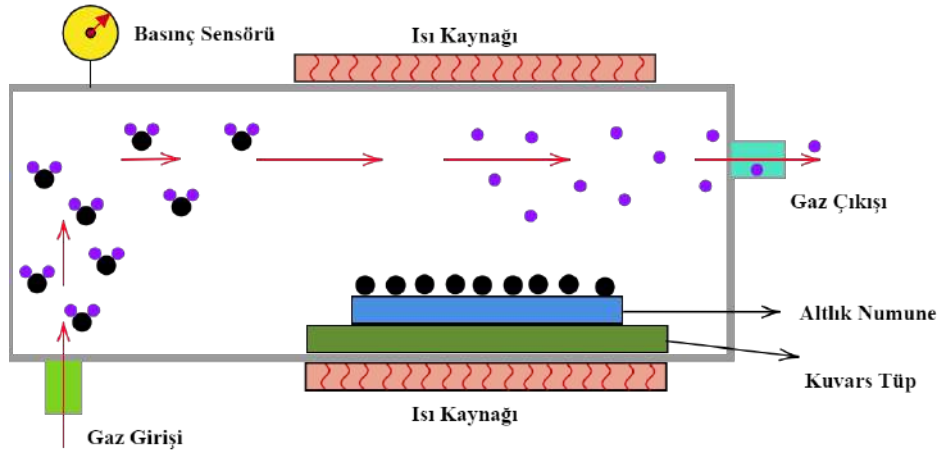


**Şekil 1.1. Fiziksel Buhar Biriktirme İle Kaplama İşlemi (De Damborenea vd., 2007)**

Ling ve arkadaşları WC-Co kesici uçlarını AlCrN malzemesi ile kaplayarak  $2.78 \mu\text{m}$  kalınlığa ve ortalama  $1108 \text{HV}_{0.2}$  sertliğine ulaşmayı başarmışlardır. Sonuçta kesme bölgesinde oluşan sıcaklık artışının takım ucuna olan etkilerini minimuma indirip takım ucunun aşınmaya karşı olan direncini artırmışlardır (Ling vd., 2022).

### 1.1.2. Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama

Kapalı bir ortamda taşınan kaplama malzemeleri kimyasal reaksiyonlar sonucu katı fazdan gaz fazına geçer. Taşıyıcı bir gaz ile altlık malzeme üzerinde kaplamalar biriktirilir. Kimyasal reaksiyonların daha rahat gerçekleştirilebilmesi için oda genellikle  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  tutulur. Altlık numune üzerinde oluşan sıcak ince film katmanları difüzyon bağı oluşturur. Bu yöntem ile FBB yöntemine kıyasla, ısıya dayanıklı altlık tabakalarda aşınmaya dirençli kaplamalar elde edebilmek mümkündür. Şekil 1.2' de Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) ile kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir.



**Şekil 1.2. Kimyasal Buhar Biriktirme İle Kaplama İşlemi (Mori vd., 2006)**

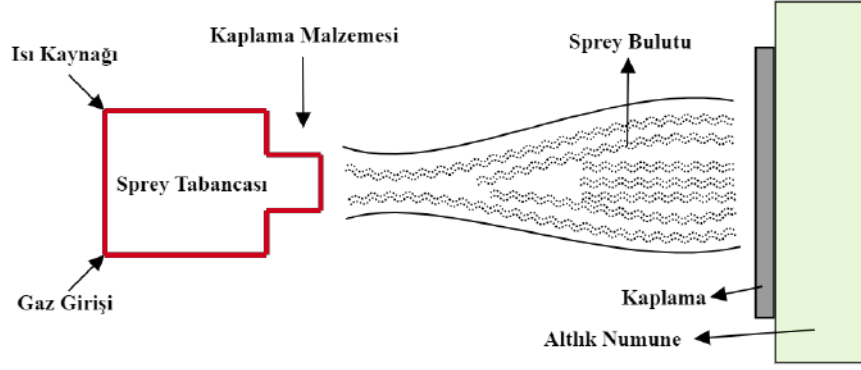
Hem FBB hem de KBB yöntemi ile yumuşak çelikler üzerine kaplamalar yapabilmek mümkündür. FBB kaplamada en az  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , KBB kaplamada ise en az  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  de biriktirme yapıldığı için her iki kaplama yönteminde de ısıya dayanıklı bir altlık numuneye ihtiyaç duyulmaktadır. Her iki yöntem de diğer kaplama türlerine göre pahalıdır. Kaplanacak parçaların boyutunu ve şeklini sınırlayan sızdırmaz, kontrollü bir gaz atmosferi yada vakumlu bir odaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Azhari ve arkadaşları semente karbür' ün (WC-Co) üzerini TiN, Zr(C,N), Ti(C,N,O),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile kaplamışlardır. Alt tabakada meydana gelen deformasyonun esas olarak WC ve Co fazlarının bileşimine bağlı olduğunu, *TiN* katmanının diğer katmanlara kıyasla dayanım ve deformasyon davranışlarının daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (El Azhari vd., 2020).

Yuan ve arkadaşları kesme takım ucu malzemesi olan WC-Co aşınma performansını artırmak için altlık numunelerin üzerini Elmas- $\beta$  SiC ile kaplamışlar ve elmas kaplamaların altlık numune yüzeyindeki gözenekli yapıları kapatarak aşınma performansını artırdığını söylemişlerdir (Yuan vd., 2021).

### 1.1.3. Termal Sprey Kaplama

Termal sprej kaplama, plazma, elektrik veya kimyasal ısı kaynağı kullanılarak eriyik hale getirilen kaplama malzemesinin yüzeye püskürtülmesi işlemidir. Metal dışı altlık numunelerinde yapılabilen bu yöntem yüksek biriktirme oranlarına sahiptir. Şekil 1.3' de Termal Sprej kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir.



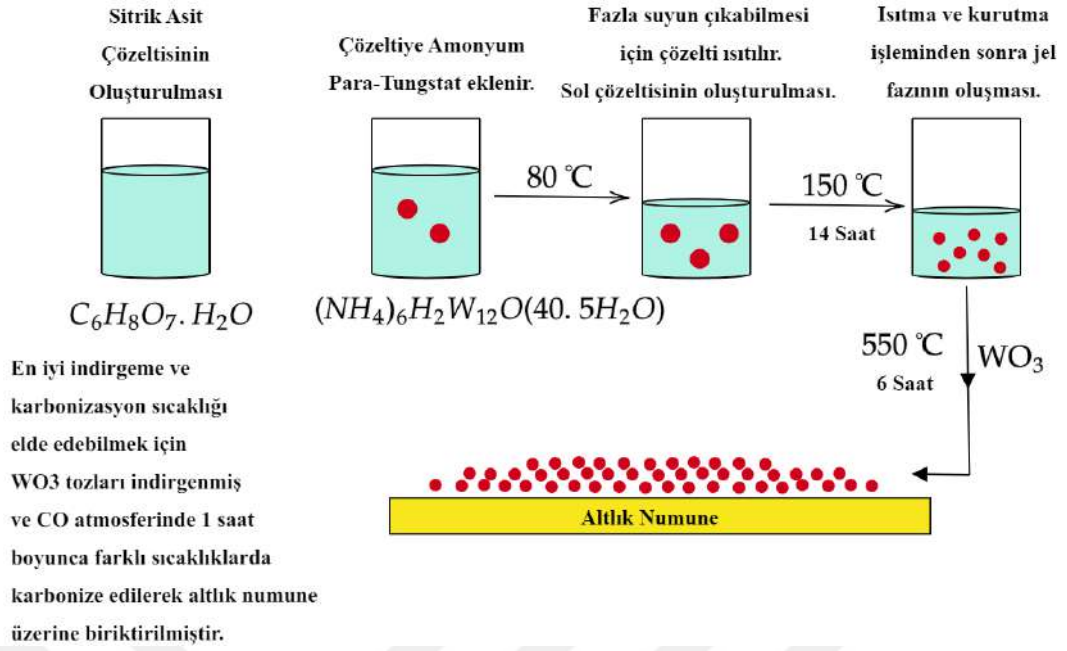
Şekil 1.3. Termal Sprey İle Kaplama İşlemi (Joukar vd., 2017)

Venturi ve arkadaşları WC-Co termal sprej tozuna %0,5 karbon nano tüpleri ilave ederek üç farklı püskürtme gücünde (48, 41 ve 34 kW) kaplama yapmışlardır. Karbon nano tüpleri kaplamaların mikrosertliğinde genel bir artışa ve kırılma tokluğunda azalışa neden olmuştur. Karbon nano tüpsüz orta güçte yapılan kaplamalarda daha iyi bir aşınma performansı ile karşılaşmışlardır. Karbon nano tüplerinin eklenmesi ise yüksek güçte kaplamaların aşınma performansını iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir (Venturi vd., 2021).

Medrano ve arkadaşları alev türü (redükleyici, nötr ve oksitleyici) ve püskürtme torcu nozulu çıkış alanında değişiklikler yaparak WC-Co-Cr kaplamalar yapmışlardır. Kaplama içerisinde (tüm koşullarda)  $W_2C$ , W ve  $Co_3W_3C$  dekarbürizasyon ürünlerine rastlamışlardır. Kaplamaların mikro yapısının genel anlamda torç alanından etkilendiğini ve homojen kaplamaların üstün aşınma performansı sergilediğini vurgulamışlardır (Méndez-Medrano vd., 2018).

#### 1.1.4. Sol-Jel Kaplama

Bu kaplama türünde "sol" ve "jel" kelimeleri iki ayrı yöntemi ifade etmek için kullanılmaktadır. Sol olarak adlandırılan çözelti, etanolü damıtılmış su içerisinde Kalsiyum Fosfor (CaP) gibi malzemelerin çözünmesi ile hazırlanır. Jel fazı elde edebilmek için hazırlanan karışım, çözeltinin sulu kısmının derişikliğini ayarlamak ve vizkositeyi istenilen seviyeye çıkartmak için farklı sıcaklıklarda ısıtmaya tabi tutulur. Sıvı bir çözülden jel fazına dönüşen bu faz Sol-Jel adını alır. Şekil 1.4' de Sol-Jel kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir (Ke vd., 2022).



**Şekil 1.4. Sol-Jel İle Kaplama İşlemi (Tracton, 2006)**

Sol-Jel çözeltisi hazırlandıktan sonra parçalar veya cihazlar çözelti içerisine sabit ve kontrollü bir hızda daldırılır. Bu işlem aynı malzemeden çok katmanlı bir kaplama elde edebilmek için tekrar edilebilir. Sıvı geçirgenliği nedeniyle bu yöntemde kaplama yüzeyinde oluşan gözenekli yapılar rahatlıkla kapatılabilir (Rezende vd., 2019).

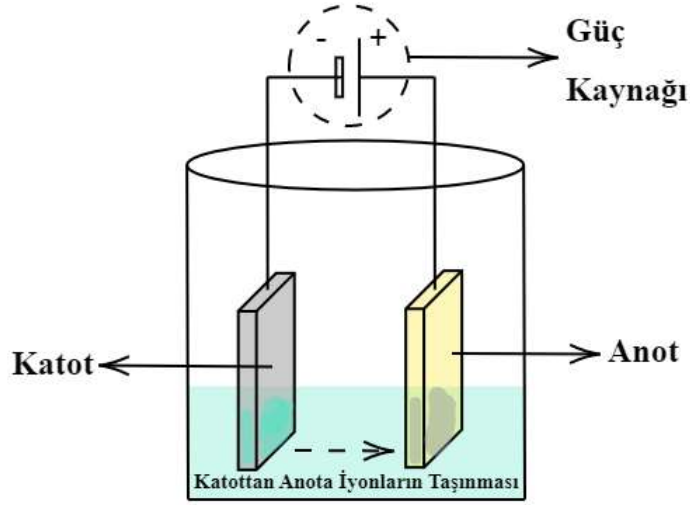
Rezende ve arkadaşları kesici uç takımının tribolojik davranışlarını iyileştirmek için  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  filmlerini WC altlık numunesi üzerine biriktirmişlerdir. Sonuçta kaplamaların aşınma direncini artırdığı ve takım ucuna düşen kesme kuvvetinin düştüğünü çalışmalarında belirtmişlerdir (Rezende vd., 2019).

Amousoltani ve arkadaşları ST-37 çeliği üzerini WC-%12 Co elektrotu ile kaplamışlardır. Kaplama kalınlığı ortalama  $14 \mu m$ , yüzey sertlik değeri ise  $1250 \pm 150 HV$  olarak hesaplamışlardır.  $400 \text{ }^\circ C$ ' de yapılan aşınma testi sonucu ağırlık kaybı 5 mg olarak ölçülmüştür (Amousoltani vd., 2019).

### 1.1.5. Akımlı/Akımsız Kaplama

Akımlı kaplama sırasında kullanılan elektrolitler, genellikle çözünebilen metal tuzlarından hazırlanır. Elektrolit içerisine daldırılan iletken veya yarı iletken pozitif yüklü çubuklar katyonları, negatif yüklü çubuklar ise anyonları oluşturmak-

tadır. Dışarıdan uygulanan bir akım ile katotta pozitif halde bulunan iyonlar anota, anotta negatif halde bulunan iyonlarda katota geçer. Sonuçta kaplama işlemi gerçekleşmiş olur. Şekil 1.5' de akımlı kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir.

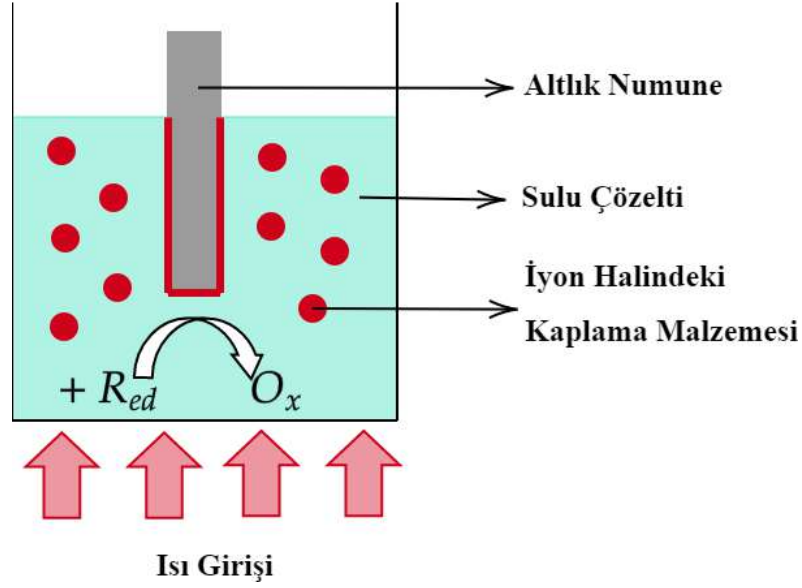


Şekil 1.5. Akımlı Kaplama İşlemi (Reddy vd., 2014)

Zheng ve arkadaşları magnezyum alaşımının yüzeyini süperhidrofobik malzemesi ile kaplamışlardır. Elektrolit olarak magnezyum nitrat ve steraik asidin etanol çözeltisini kullanmışlardır. 10:1 (steraik asit/magnezyum nitrat) elektrolit çözeltisinde hazırlanan kaplamaların korozyon davranışının diğer kaplamalara kıyasla daha üstün performansa sahip olduğunu vurgulamışlardır (Zheng vd., 2019).

Jiang ve arkadaşları sinterlenmiş mıknatısların (NdFeB) etkin çalışma ömrünü iyileştirmek için mıknatıs üzerlerine Ni-SiC kompozit malzemeleri biriktirmişlerdir. Kaplama ile altlık numune arasında kuvvetli bir bağ oluştuğunu ve korozyona olan direncin arttığını gözlemlemişlerdir (Jiang vd., 2018).

Akımsız kaplama, herhangi bir elektrik akımı kullanılmadan kaplama malzemelerinin kimyasal indirgeme yöntemi ile altlık numune üzerine biriktirilmesi yöntemidir. Şekil 1.6' de akımsız kaplamanın şematik görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 1.6. Akımsız Kaplama İşlemi (Zhang vd., 2018)

Luo ve arkadaşları Ni-P'a WC nano parçacıkları ekleyerek akımsız bir kaplama yapmışlardır. WC nano partüküllerinin varlığı kaplama mikro sertliğini artırdığını ve 40 gün sonra bile tipik bir Ni-P kaplamaya kıyasla korozyon direncinin iyi durumda olduğunu göstermiştir (Luo vd., 2015).

## 1.2. Kaynak Araştırması

ESD (Elektro Kivılcım Yöntemi), altlık numunenin aşınma direnci, korozyon direnci ve sertlik gibi özelliklerini yerel olarak iyileştirmek için çeşitli elektrot malzemelerinin yüzeye kaplanması ile gerçekleştirilen mikro kaynak yöntemidir. Bu bölümde ESD yöntemi ile yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

### 1.2.1. W Alaşımli Kaplamalar

Araştırmacılar daha iyi yüzey özellikleri elde edebilmek için ESD yöntemi ile sermet malzemelerin altlık numune üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tkachenko ve arkadaşları C45 çelik numuneler üzerini WC - Co sermet malzemesi ile kapladıklarında 8-13,7 GPa sertliğine sahip koruyucu bir tabaka elde etmişlerdir (Tkachenko vd., 2020). Burkov ve arkadaşları C35 numunesini %10-40 demir konsantrasyonlu WC - Co elektrot malzemesi ile kaplamışlardır (Burkov, 2016). Kaplama içerisinde demir oranı arttıkça kütle transfer hızı önce arttığını daha sonra

düşüğünü fark etmişlerdir. Podchernyaeva ve arkadaşları Al25 alaşımını WC-%8 Co sermet malzemesi ile kaplamışlardır. Kaplamalar kesici takımın aşınma direncini 1,5 ila 1,8 kat artırmıştır. Hava ortamında yapılan kaplama içerisinde  $W_2C$  ve  $Al_2O_3$  bileşiklerine rastlamışlardır (Podchernyaeva vd., 2012).

Yüksek sertlik ve mukavemet kombinasyonu nedeniyle, WC - Co malzemeler çelik üzerine sert kaplamalar yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2009; Zhao vd., 2006). Co matrisi, oksijen ile etkileşime girdiğinde kaplama içerisinde dekarbürizasyona neden olabilir. Bu nedenle kaplama içerisinde WC,  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$  bileşikleri bulunabilir. Oluşan katmanlardaki bu fazların miktarı, biriktirme koşullarına ve yöntemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Valarezo vd., 2010; Ding vd., 2011). Son yıllarda mikrosertliği artırılmış, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve korozyonuna sahip Tungstence zengin W - C - Co sistemleri araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır (E Silva vd., 2006; Vernhes vd., 2013). Zamulaeva ve arkadaşlar WC-%8Co elektrot malzemesi Aramco demiri üzerine püskürtmüşlerdir. Kaplamaların büyük oranda amorf bir faza sahip olduğu ve içerisinde  $W_2C$  bileşiğinin varlığı tespit edilmiştir (Zamulaeva vd., 2008). Burkov ve arkadaşları C45 çelik numuneleri üzerine amorf kaplamalar yerleştirmiştir. Kaplamaların mikrosertliği 10-15 GPa'lık artan bir sertliğe sahipken, aşınma dirençleri 1,6 – 3,3 kat artmıştır. Kaplamaların sürtünme katsayısı ilk duruma göre %13-30 daha düşüktür ve 0,27-0,31 aralığındadır. Kaplama içerisinde Tungsten ve Kobaltın demir bazlı amorf alaşımların direncini artırdığı, nikel ve molibdenin ise kaplamaların triboteknik davranışlarını kötü yönde etkilediği tespit edilmiştir (Burkov ve Krutikova, 2020). Tarelnyk santrüfüz vidalarını, aşınma dirençlerini artırabilmek için T15K6 (%15 Ti, %6 Co ve %79 WC) malzemesi ile kaplamışlardır. Sonuçta 7,3-10 GPa mikro sertlikte, %100 sünek ve 600 mikron kalınlığında kaplamalar elde edilmiştir. Kaplamaların aşınma direnci ise ilk duruma göre 7,5 kat artmıştır (Tarelnyk vd., 2020). Kayalı ve arkadaşları AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliği üzerini WC ve Ti6Al4V malzemeleri ile ayrı ayrı kaplamışlardır. Aşınma testleri paslanmaz çeliğin düşük yüzey sertliğine sahip olduğunu ancak aşınmaya dirençli kaplamaların bu özelliği iyileştirdiğini göstermiştir. Kaplamalar çeliğin aşınma direnci 3-10 kat artırmıştır. Yüzey sertlik değeri altlık numunede 232  $HV_{0,05}$  iken kaplamalarda en yüksek değer 978  $HV_{0,05}$  olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda da yüzey sertliği 4 kat artmıştır (Kayalı ve Talaş, 2019). Kostadinov ve arkadaşları X12 takım çeliği üzerini WC - TaC - Co -  $Al_2O_3$  ve WC - (Ti, Ta, Nb)C

- Co - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elektrot malzemeleri ile kaplamışlardır. Kaplamaların maksimum kalınlığı 3-12 mikron, Pürüzlülük değeri 0,8-2,2 mikron ve yüzey sertlik değeri 8,5-18 GPa olarak hesaplanmıştır (Kostadinov vd., 2019). Tkachenko ve arkadaşları WC, TiC ve TiB<sub>2</sub> malzemelerinden oluşan bir elektrotu C45 çeliği üzerini kaplamıştır. Kaplamalar 26-30 GPa sertliğe sahiptir. Oksidasyon dirençleri ise 5-9 kat artmıştır. T15K6 alaşımlı kaplamalara göre kuru sürtünme koşullarındaki aşınma direnci makine ve mekanizmaların hızla aşınan parçalarını güçlendirmek için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir (Tkachenko vd., 2015). Burkov ve arkadaşları Çelik 1035 numunesi üzerini farklı karbon oranlarına sahip WC - %10 Co ile kaplamışlardır. W/C oranının Tungsten Karbürün dekarbürizasyonu üzerindeki etkilerin incelemiştir. Kaplama sırasında WC dekarbürizasyon derecesinin, WC-Co elektrotlarındaki C oranına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Kaplamaların 1173 K' de tavlınması W<sub>2</sub>C' ün yeniden Tungsten Karbür olarak kristalleşmesine yol açmıştır. En büyük mikrosertlik ve aşınma direncine % 3,5 C lu kaplamalarda rastlanmıştır. Bu kaplamaların kalınlığı da diğer kaplamalara göre oldukça yüksek çıkmıştır (Burkov ve Pyachin, 2014).

### 1.2.2. Al Alaşımlı Kaplamalar

Alüminyum ve alaşımları altlık numunelerin aşınma, korozyon direncini ve mukavemet değerlerini artırmak için kullanılan elektrot malzemelerindendir (Enrique vd., 2020; Pyachin vd., 2013). Enrique ve arkadaşları eklemeli imalat ile üretilen parçaların zayıf yüzey kalitesini ve bileşenlerin ömrünü artırabilmek için Alüminyum alaşımlı bir elektrot ile yüksek sıcaklıkta oksidasyona direnç gösteren kaplamalar elde etmişlerdir (Enrique vd., 2019). Pyachin ve arkadaşları C35 çeliğinin üzerini Titanyum Alüminid ile kaplamışlardır. Hava ortamında yapılan kaplamaların içeriğinde Titanyum Nitrür ve Alüminyum Oksit bileşiklerine rastlanmıştır. Koruyucu kaplamalar ile altlık numunenin aşınma direnci 3-4 kat, ısı direnci ise 11-16 kat artmıştır (Pyachin ve Burkov, 2015). Konoval ve arkadaşları 40Kh çeliği üzerine Ni - Al alaşımları ve Titanyum-Krom Diborid bazlı sermet malzemeler püskürtmüştür. Optimum ESD parametreleri ile daha kararlı kaplamalar elde edilebileceğini çalışmalarında belirtmişlerdir (Konoval vd., 2014).

### 1.2.3. Ni Alaşımli Kaplamalar

Oksidasyon kinetiği, krom, alüminyum vb. elementlerin oksitlerinden oluşan bariyer katmanı ile belirlenir (Yun vd., 2014; Asteman vd., 2013; Hua vd., 2015). 800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda oksit tabakası  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  oksitlerinin karışımından oluşurken, sıcaklık 1000 °C ' ye çıktığı zaman bu oksitlerin yerini NiO ve  $NiCr_2O_4$  gibi oksitler alır (Sun vd., 2021). Alüminyum ile zenginleştirilmiş bir elektrotun altlık numune üzerine biriktirilmesi, Ni bazlı süper alaşımların yapısında ve mekanik özelliklerinden ödün vermeden oksidasyon direncinin artırılmasına katkı sağlayacaktır. Sheveyko ve arkadaşları EP741 nikel süper alaşımı üzerine çift katmanlı NiAlCrCoHf kaplama yerleştirmişlerdir. Kaplamalar 700 °C bir fırında ısıtıldığında katmanlarda CrCoNi ve  $Ni_2AlHf$  fazları ortaya çıkmıştır. Bu fazlar kaplamaların daha da güçlenmesine neden olmuştur. Kaplamalar 1000 °C ' de 5 saat ısıtıldığında yüzeyde 0,6 mikron  $Al_2O_3$  tabakası oluşmuştur. Sonuçta kompozit kaplama, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini artırmıştır (Sheveyko vd., 2022). Qi ve arkadaşları TC4 titanyum alaşımı üzerine kompozit bir TiZrNiCuBe metalik cam NiCrAl bentonit ile kaplamışlardır. Termal şok testi 600 °C ' de 10 dakikada yapılmış ve ardından kaplanmış numuneye soğuk su işlemi uygulanmıştır. Metalik cam tabaka üzerinde NiO, CuO,  $TiO_2$  ve  $ZrO_2$  gibi oksitler oluşmuştur (Qi vd., 2021). Storozhenko ve arkadaşları FeNiCrBSiC - %20  $TiB_2$  ve FeNiCrBSiC - %20  $CrB_2$  elektrot malzemelerini C45 çeliği üzerine biriktirmişlerdir. Kaplamaların mikrosertliği 10-14 GPa olarak hesaplanırken, aşınma dirençleri 2-3 kat artmıştır (Storozhenko vd., 2020). Kudryashov ve arkadaşları SPKhN-60 beyaz dökme demir numunelerini çift katmanlı STIM - 40NAOKn ( $TiC - NiAl + ZrO\ nano2$ ) ve STIM - 110Kn ( $TiB_2 - NiAl + ZrO\ nano2$ ) elektrot malzemeleri ile kaplamışlardır. 90-110 mikron kalınlığında ve 9,1-10,5 GPa yüzey sertliğinde kaplamalar elde edilmiştir. Nikel bir katmanın numune üzerine önceden biriktirilmesi STIM - 110Kn kaplamasının ısı direncini 8 kat artırmıştır. Sonuçta araştırmacılar merdanenin ömrünü 8 kat artırmayı başarmışlardır (Kudryashov vd., 2019). Cao ve arkadaşları süper alaşım malzemesi olan GH4169 numunesi üzerine NiCrAlY alaşımı ile kaplamışlardır. Optimum ESD parametrelerin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında Voltajın, kaplama özellikleri üzerinde Kapasitanstan daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır (Cao vd., 2018).

#### 1.2.4. Ti Alaşımli Kaplamalar

Yüksek özgül mukavemet, nemli ve tuzlu ortamlarda üstün korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı Titanyum kaplama, çalışmalarda tercih edilen elektrot malzemelerindendir (Kuptsov vd., 2021b; Shafyei vd., 2020; Xiang vd., 2017). Burkov ve arkadaşları Ti6Al4V altlık numuneyi Ti-Al intermetalik elektrodu ile kaplamışlardır. Kaplamalar sonrası mikro sertlik 6,4 GPa dan 9,4 GPa' a çıkmıştır. Ti oranı arttıkça, kaplamaların aşınmaya karşı direnci de artmıştır. 900 °C' de 100 saat boyunca yapılan korozyon testinde kaplamalar 1,1-3,4 kat daha az oksitlenmiştir (Burkov ve Chigrin, 2020). Rukanskis ve arkadaşları C45 çelik numunesinin üzerine Bronz, Molibden ve kombine Ti+Al+C malzemeleri ile kaplamışlardır. En iyi sürtünme direncine ve her iki yük altında da (300 N ve 600 N) en az aşınma, Molibden ve Bronz malzemeleri ile yapılan kaplamalarda gözlemlenmiştir (Rukanskis vd., 2021). Tkachenko ve arkadaşları TiC - (Fe - %9 Cr -%1,5 Si -%2 Al) elektrot malzemesi ile C45 çeliği üzerini kaplamışlardır. Kaplanmış numunelerinin faz bileşimi, sertliği ve oksidasyon direnci (900 °C de 35 saat) incelenmiştir. Kaplamaların mikro sertliği 8,5 GPa-14,5 GPa olarak hesaplanmıştır. Aşınma direnci ve oksidasyon direnci Co-Cr, Co-Ni ve Ni-Mo bağlayıcılarla TiC sert alaşımına kıyasla 2-3 kat daha yüksek olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir (Tkachenko vd., 2018). Kiryukhantsev ve arkadaşları 40Kh çeliğini TiC - NiCr elektrot malzemesine ek  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  ile kapladıklarında altlık numunenin sertliğinin ve mukavemet değerlerinin %25 değerinde arttığını ortaya koymuşlardır (Kiryukhantsev-Korneev vd., 2019).

#### 1.2.5. Diğer Alaşımlar İle Yapılan Kaplamalar

Metalik Camlar olarak bilinen amorf alaşımlar, yüksek mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle son zamanlarda tercih edilen elektrot malzeme türlerindedir. Kristal bir yapıya sahip olmayan Metalik Camlar aynı zamanda tatmin edici düzeyde aşınma ve korozyon direncine sahiptir (Inoue vd., 2015; Zhang vd., 2014a). Umanskyi ve arkadaşları C45 çeliği üzerini FTB20 (FeNiCrBSiC + %20  $\text{TiB}_2$ ) ve FCB20 (FeNiCrBSiC + %20  $\text{CrB}_2$ ) kompozit elektrot malzemeleri ile kaplamışlardır. İlk duruma göre kaplamaların mikro sertliği 10-12 GPa olarak hesaplanırken, aşınma dirençleri ise 4-5 kat artmıştır (Umanskyi vd., 2020). Bur-

kov ve arkadaşları AISI 1035 numunesi üzerini Ni – Cr – W – Mo – Co – C – B malzemesi ile kaplamıştır. Kaplamalar aşınma direncini ilk duruma göre 1,4 kat, sertlik değerlerini ise 5 kat artırmıştır (Burkov vd., 2018). Burkov ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir diğer çalışmada, kristal FeWMoCrBC malzeme AISI 1035 çeliği üzerine kaplanmışlardır. Metalik cam kaplamalar aşınma direncinin 2 kat artırırken düşük sürtünme katsayısına sahip kaplamalar elde edilmiştir. 1073 K’ de 12 saat boyunca yüksek sıcaklıktaki oksidasyon işlemi ilk duruma göre AISI 1035 çeliğinin direncini 36 kat artırmıştır. Son durumda kaplamaların mikrosertlik değeri 9,8 GPa ölçülmüştür (Burkov vd., 2017).

ESD yönteminde kullanılan elektrot malzemelerinden bir diğeri de Kromdur (Cao vd., 2019). Krom Karbürlü kaplamalar içerisinde en çok tercih edileni  $Cr_3C_2$  - NiCr - MoNb ve  $Cr_3C_2$  - NiCr - WC - Co bileşenleridir. Yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu üstün korozyon ve aşınma direnci bu bileşiklere olan rağbeti artırmıştır (Fantozzi vd., 2019; Matikainen vd., 2017). Korneev ve arkadaşları üç farklı yöntemde (Vakumlu Elektro Kıvılcım alaşımlama, darbeli katodik ark buharlaştırma ve magnetron püskürtme)  $Cr_3C_2$  - NiCr elektrot malzemesi ile kaplama yapmışlardır. Altlık numune üzerine üç kaplama türü de hibrit uygulandığında vakumlu kaplamaya göre korozyon ve oksidasyon direncinde en az 1,5 kat artış sağlanmıştır (Kiryukhantsev-Korneev vd., 2022).

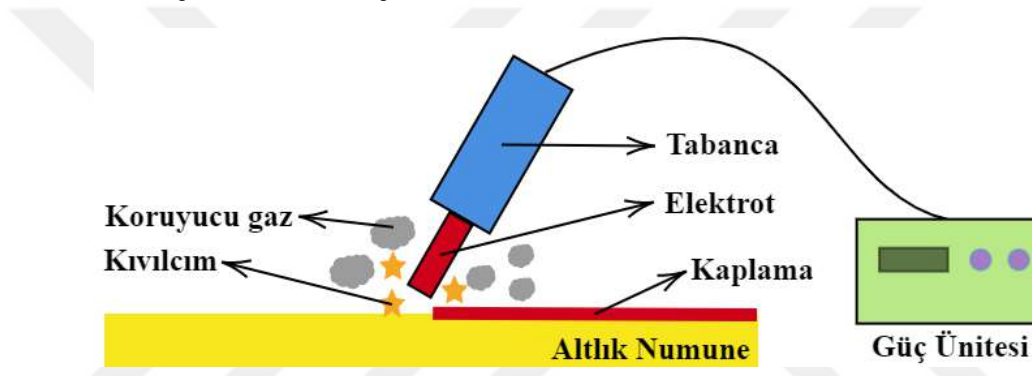
Geçiş metallerinin karbürleri ve güçlendirilmiş metal bazlı kompozit elektrotlar ile yapılan kaplamalar yüksek tribolojik özelliklere sahiptirler. Mesela yüzeyde oluşan  $Ta_2O_5$  filmi çeşitli asitlerde, tuzlu çözeltilerde ve organik kimyasallarda korozyona karşı yüksek bir dirence sahiptir. TaC yüksek sertliğe (1550 HV), aşınma, korozyon ve oksidasyon direncine sahiptir (Hu vd., 2019). Kuptsov ve arkadaşları AISI 304 paslanmaz çeliği üzerine farklı karbür bileşikleri üretebilmek için TaC - Mo - Ni ve TaC - ZrC - Mo - Ni elektrotları ile kaplama yapmışlardır. Kaplamalı numunelerin hem %3,5 NaCl hem de %3,5 NaCl+SiC solüsyonunda daha iyi sonuç vermiştir (Kuptsov vd., 2021a). Wang ve arkadaşları tek kristalli süper alaşımın (NiOCrAlYTa) yüksek sıcaklıktaki performansını iyileştirebilmek için elektrot malzemeye TaC bileşiği eklemiştir. Deneysel çalışmalarda TaC partiküllerinin kaplama içerisine homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Sonuçta süper alaşıma TaC bileşiğinin eklenmesi ile kaplamaların yüksek sıcaklıktaki performansı iyileştirilmiştir (Wang vd., 2021).

### 1.3. Elektro Kıvılcım Biriktirme Teknolojisi

Elektro Kıvılcım Biriktirme (ESD) yöntemi, çeşitli parametrelerde (pulse süresi, akım miktarı vs.) elektrot bir cubuğun (WC-Co gibi) altlık numune üzerine biriktirilmesi esasına dayanan mikro kaynak yöntemidir.

#### 1.3.1. ESD Cihazı ve Çalışma Prensibi

Cihazın iki ana bileşeni vardır. Bunlar, güç kaynağı ve elektrotu tutan aynı zamanda titreşim hareketi de sağlayan tabanadır. Tipik ESD kaplama yöntemi Şekil 1.7 'de şematize edilmiştir.



Şekil 1.7. ESD Kaplama Yöntemi (Wang vd., 2023)

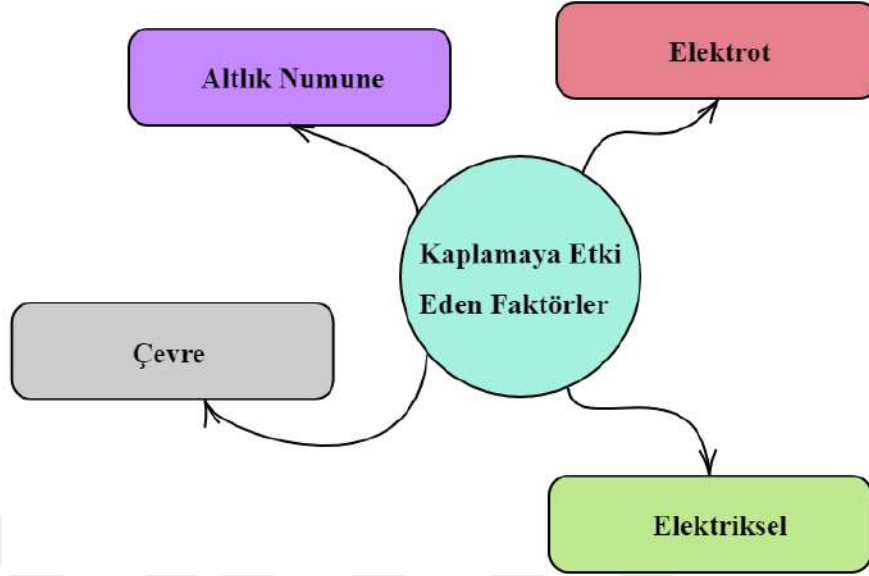
Güç ünitesi, elektrotun altlık numune üzerine boşalabilmesi için enerji üretir. Bu enerji altlık numune (katot) ile elektrot (anot) arasında arklar oluşturur. Sıcaklığın yükselmesine neden olan bu durum elektrotu plazma fazına dönüştürür. Sonuçta elektrot altlık numunede çarptığı noktalara birikmeye başlar. Kaplama bu döngülerin devam etmesi ile gerçekleşir (Johnson, 2002a).

Kaplama tabancasının yapmış olduğu titreşim hareketi elektrotun altlığa yapışmasını önlemektedir. Bu sayede daha düzgün kaplamalar elde edebilmek mümkündür.

#### 1.3.2. ESD Parametreleri ve Kaplamaya Etkisi

Kaplama çalışmaları genel anlamda, ana malzemeyi aşınma, korozyon gibi çevresel etkenlere karşı korumak için yapılmaktadır. ESD kaplama yöntemi parametrelerinde yapılan değişiklikler ile kaplamaları çeşitli çevre şartlarına karşı daha

dirençli hale getirebilmek mümkündür (Gould, 2011). Şekil 1.8’ de kaplamaya etki eden parametrelere yer verilmiştir. Bu parametrelerin herhangi birinde yapılacak değişiklik, kaplamaların kalitesini önemli ölçüde etkileyecektir.



Şekil 1.8. ESD Yönteminde Kaplamaya Etki Eden Faktörler

### 1.3.2.1. Altık Numune Türünün Etkisi

Kaplama çalışmalarında elektrot ile altık numunenin uyumu önem arz etmektedir. Bu uyuma kaplamalar üzerinde yapılacak olan deneysel çalışmalar sonucu karar vermek daha doğru olacaktır. İşlem, metal alt tabakalar üzerine biriktirebilecek malzemeler açısından geniş bir yelpazeye sahiptir. Burada iki önemli husus vardır. Birincisi hem elektrotun hem de altık numunenin elektriksel olarak iletken olması gerekmektedir. İkincisi her iki malzemenin de gaz fazına geçmeden elektrik arkında eriyebilme kapasitesine sahip olmasıdır (Burkov, 2016; Pyachin ve Burkov, 2015; Tkachenko vd., 2020; Rukanskis vd., 2021). Ayrıca kaplama kalınlığı, kaplama alanına bağlıdır. Sünek malzemeler, onarım veya biriktirme gibi küçük alanlarda birkaç milimetrik kaplama kalınlığına ulaşabilir. Öte yandan aynı malzemelerle daha geniş alanlarda 100  $\mu\text{m}$ ' a yakın kaplama kalınlığı elde edilebilir. Nedeni, biriktirilen kaplamanın tercihen elektrodun temas ettiği ilk noktaya birikme eğiliminde olmasındandır.

ESD sürecinin sürekli gelişimi birçok endüstriyel alanda da uygulanabilirliğini artırmıştır. Örneğin, nükleer uygulamalarda, nükleer bileşenlerin aşınma, sür-

tünme, korozyon, termal döngü ve ışınlanma hasarlarına karşı bu yöntem ile üstün koruma elde edilebilir (Johnson, 1984). Johnson ve arkadaşları patlama tabancası ve ESD ile yapılan kaplamaları karşılaştırmışlardır. Test sonuçları düşük temas gerilimlerinde her iki kaplamanında çok düşük aşınma oranı göstermiştir. Temas gerilimi arttıkça patlama tabancası ile yapılan kaplamalarda aşınma oranı hızla artarken ESD kaplamada bu oranın sabit kaldığını tespit etmişlerdir. Bu sonuca, ESD kaplama sırasındaki altlık numune ile kaplama arasında ki metalurjik uyumun, ince taneli ve homojen kaplamaların neden olduğunu vurgulamışlardır (Johnson, 2002b).

ESD işlemi aynı zamanda havacılık uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Türbin bileşenleri gibi yüksek değerli parçaların onarımı ve geri kazanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlarda titanyum subap gövdelelerini aşınma vs. karşı korumak için de yine ESD işlemleri uygulanmaktadır (Johnson, 2002b).

Chen ve arkadaşları direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot ucunun ömrünü artırabilmek için bakır elektrotun üzerini TiCp/Ni metal matris kompozit malzemesi ile kaplamışlardır. İlk zamanda Zn kaplı altlık numune pirinç alaşımları oluşturabilmek için Cu elektrotu ile reaksiyona girdiğinden elektrot ile altlık arasında yerel bir bağlanmaya neden olmuştur. Kaplamanın, Cu' ın Zn ile reaksiyona girmesini önlemek için başarılı bir şekilde bariyer görevi gördüğünü ve böylece elektrot ucunun ömrünün arttığını belirtmişlerdir (Chen ve Zhou, 2006). Tablo 1.1'de ESD ile kaplanmış altlık numunelerin genel listesine yer verilmiştir.

**Tablo 1.1. ESD Kaplamada Kullanılan Altlık Numuneler**

<b>Yüksek ve Düşük Alaşımli Çelikler</b>	<b>Nikel ve Kobalt Alaşımları</b>	<b>Refrakter Metaller (W, Re, Ta, Mo, Nb,)</b>
Paslanmaz çelikler (Kayali ve Talaş, 2019; Kuptsov vd., 2021a)	Ti Alaşımları (Kuptsov vd., 2021b)	Krom (Cao vd., 2019; Fantozzi vd., 2019)
Takım Çelikleri (Tkachenko vd., 2020; Burkov, 2016)	Al Alaşımları (Zhang vd., 2021)	Tantal (Kostadinov vd., 2019)
Zr Alaşımları (Kuptsov vd., 2021a)	Cu Alaşımları	Molibden (Burkov vd., 2018, 2017)

### 1.3.2.2. Elektrot Türünün Etkisi

Düşük ergime noktalarına ve termal kapasiteye sahip elektrotların altlık numune üzerine daha verimli taşındığı yapılan çalışmalarca ortaya konmuştur (Chen ve Zhou, 2006). Pirso ve arkadaşları WC-Co kaplamalarda Co malzemesinin etkisini incelemişlerdir. Elektrot içerisindeki Co elementinin yüzde oranı değiştirildiğinde kaplamaların aşınma dirençlerinin de önemli ölçüde değiştiğini gözlemlemişlerdir. Örneğin %6 Co içeriğine sahip bir kaplamadaki hacim kaybının %20 Co içeriğine sahip bir kaplamaya kıyasla hacim kaybının yarı yarıya olduğu bildirilmiştir. Bağlayıcı malzemenin elektrottan tamamen çıkartılması, karbür tanelerinin kırılma ve parçalanma yolu ile yüzeyden ayrılmasını kolaylaştırdığı için elektrot çubuğu içerisindeki karbür tanelerinin boyutunu küçültmek aşındırma dirençlerini iyileştirmenin bir başka yolu olarak tavsiye edilmiştir (Pirso vd., 2004).

Diğer kaynak işlerinde ile uyumsuz olduğu değerlendirilen malzeme kombinasyonları ile de ESD kaplama yapabilmek mümkündür (Chan vd., 2006; Tang, 2009). Alt tabaka üzerindeki malzemenin hızlı katılaşması farklı kombinasyonlardaki uyumsuzluğun giderilmesine katkı sağlamaktadır. Örneğin Bonović ve arkadaşları demir ve alüminyumdan oluşan bir elektrot malzemesinde, ağırlıkça % 10 alüminyumun üzerindeki kaynağın içerisinde çatlakların daha fazla olacağını bunun aksine ESD işlemiyle, alüminyum içeriğinin ağırlıkça % 35' e kadar olan paslanmaz çeliklerde çatlaksız alüminyum biriktirme yapılabileceğini belirtmişlerdir (Banovic vd., 1997).

Bazı elektriksel olarak iletken olan malzemeler ESD uygulaması için elverişli değildir. Örneğin Johnson ve arkadaşları Bizmut Tellür ( $\text{Bi}(\text{STe})_2$ ) veya Krom Silisit ( $\text{CrSi}_2$ ) biriktirmeyi başaramamışlardır. Her iki elektrotunda ark altında buharlaştığını veya ayrıştığını düşünmüşlerdir. Benzer şekilde grafit bir elektrotla da aynı sonuca varmışlardır. Grafitin atmosferik basınçta erimiş faza sahip olmadığı, dolayısı ile altlık numune üzerinde herhangi bir erimiş malzeme bulunamayacağı kanısına varmışlardır. Tablo 1.2' de ESD kullanılarak metal yüzeylere başarılı bir şekilde biriktirilen bazı elektrotlar listelenmiştir (Johnson, 2002b).

Tablo 1.2. Kaplamalarda kullanılan Elektrot Türlerinin Listesi

Aşınma Direncini Artıran Elektrotlar	Korozyon Direncini Artıran Elektrotlar	Yüzey Hassasiyetini Artıran Elektrotlar
W, Cr, Ti, Ta, Hf, Mo, Zr, V, Nb Sert Karbürleri (Ek olarak genellikle içeriklerinde %5-10 aralığında Ni veya Co elementi içerirler) (Tkachenko vd., 2020),	Paslanmaz Çelik ve Türleri (Demirbilek vd., 2022), (Johnson ve Sheldon, 1986)	Ni-Bazlı ve Co-Bazlı Süper Alaşımlar (Yun vd., 2014; Asteman vd., 2013; Hua vd., 2015)
Cr, Ti, Zr ve Ta Borürler (Tkachenko vd., 2018), (Kiryukhantsev-Korneev vd., 2019), (Umanskyi vd., 2020)	Fe, Ni ve Ti Alüminidler (Rukanskis vd., 2021), (Tkachenko vd., 2018), (Burkov vd., 2017)	Refrakter Alaşımlar (W, Ta, Mo, Nb, Re) (Hu vd., 2019; Kuptsov vd., 2021a)
İntermetalikler ve Sermetler (Podchernyaeva vd., 2012), (Wang vd., 2009), (Zhao vd., 2006)	FeCrAlY, NiCrAlY, CoCrAlY (Cao vd., 2019), (Wang vd., 2021)	Asil metaller (Au, Pt, Ag, Pd, Ir) (Benvenuti vd., 2004; Angelopoulos, 2001)

### 1.3.2.3. Çevresel Etkiler

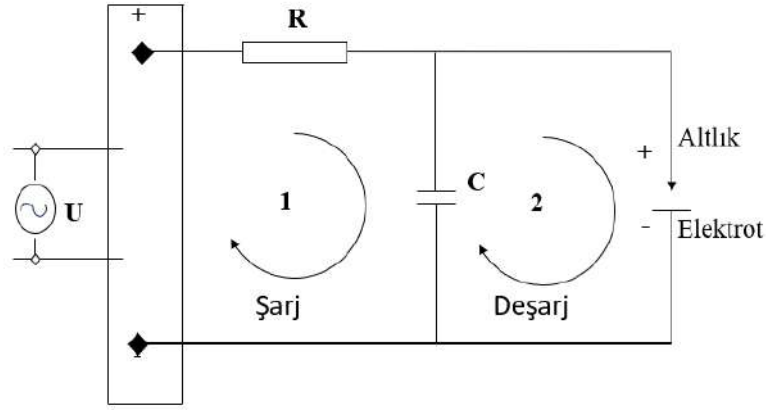
Kaplama sırasında kullanılan ortam gazı ( $H_2$ , Ar gibi) kütle transferini etkilemektedir. Koruyucu gazlar yüksek termal iletkenliğe sahip plazma fazı oluşmasına katkı sağlar. Bu gazlar, elektrot malzemesinin altlık numune üzerine damacıklar halinde birikmesine neden olur. Ayrıca malzeme transferinin küresel modu, Ar gazı ortamında açığa çıkmaktadır (Wang vd., 2004). Ar gazı altlık yüzeye koruma ve temizleme sağladığı gibi kaplama yüzey pürüzlülüğünün de korunmasına olanak sağlar. İnert bir gaz olan Ar, kaplama sırasında ortamdan oksijenin uzaklaşmasına dolayısı ile kaplamalar içerisinde oluşabilecek kusur yoğunluğunun (çatlak, gözenekli yapı) azalmasına katkı sağlamaktadır. Lesnjak ve arkadaşları iki tip altlık numunesi (takım çeliği ve östenitik paslanmaz çelik), iki tip koruyucu gaz (Ar,He), üç tip dolgu malzemesi (WC, TiC, Stellite 6) ile kaplama yapmışlardır. Sonuçta koruyucu gazın katman kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kanısına varmışlardır (Tušek vd., 2012).

Altlık numunenin veya kaplanacak parçanın geometrisi genellikle termal püskürtme işlemlerinde olduğu gibi ESD işlemini sınırlandırmaz. Bu yöntem ile valf gövdelerinin içleri, iç çaplar ve kör delikler de dahil olmak üzere elektrotun dokunabileceği her yüzey kaplanabilir. Örneğin, paslanmaz çelik bir borunun iç çapı ESD yöntemi ile başarılı bir şekilde kaplanmıştır (Malyshev vd., 2010). Başka bir çalışmada disk şeklindeki bir elektrot, görüş hattı olmayan başka bir geometriyi kaplamak için kullanılmıştır (Zhu vd., 2012).

### 1.3.2.4. Elektriksel Etkiler

ESD işlemi için en yaygın güç kaynağı, doğru akım (DC) doğrultucu ve deşarj devresidir. Burada amaç alternatif akım (AC) girişini bir dizi kapasitörü şarj etmek için kullanılan doğru akıma dönüştürmektir. Kaplama sırasında kullanılan şarj voltajı ve deşarj frekansı gibi elektriksel parametreler genellikle güç kaynağından ayarlanır. Çalışmada kullandığımız cihazda, kapasitörleri boşaltmak için güç kaynağı bir direnç kapasitörü (R-C) kullanılmaktadır. Elektrottan kopan parçalar R-C esaslı bir devrede üretilen kısa süreli yüksek akımlı pulse' ler sayesinde altlık numuneye transfer olmaktadır. Şekil 1.9' da kaplama cihazımıza ait R-C (direnç-

kapasitör) devresine yer verilmiştir (Korkmaz, 2008; Tang, 2009; Peterkin, 2017).



**Şekil 1.9. ESD Kaplamada Kullanılan R-C Devresi (Korkmaz, 2008)**

ESD prosesi sırasında kullanılan elektrot tutucu (aplikatör), iletken olmayan bir dış aksamdan ve elektrik motorundan oluşmaktadır. İletken olmayan tutucu operatör ile elektrot arasında hem elektriksel hem de ısı yalıtımının sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca tutucunun iç kısmındaki metalik kaplama mekanik stabilitenin sağlanmasını kolaylaştırmaktadır. Elektrik motoru, elektrot ile iş parçası arasındaki temasın kesilmesini gerektiren hareketi sağlamaktadır.

ESD işlem frekansı, tamamen titreşimli bir aplikatörün salınım frekansı veya dönen bir aplikatörün temasındaki kesintiler tarafından yüklenmektedir. Dönen bir elektrot veya yüksek frekanslı titreşimler bazı durumlarda güç kaynağının şarjından daha hızlı deşarj olabilmektedir. Bu durum, beklenenden çok daha düşük çıkış voltajlarına ve malzemeyi biriktirmek için potansiyel olarak yetersiz elektrik enerjisi ile sonuçlanmaktadır. Kapasitör deşarj voltajının kontrolü yüzeyde biriktirilen kaplamaların kalitesinin artmasına da katkı sağlamaktadır (Peterkin, 2017; Vizureanu vd., 2018; Ribalko ve Sahin, 2006).

ESD prosesinde kapasitörler, yüksek akımlı elektrik darbeleri veya transistörler tarafından tahrik edilen darbelere güç üretmek, aktarım sırasında üretilen gerilimi düzenlemek ve kontrolünü sağlamak için tercih edilmektedir. Kapasitörlerin şarj edilmesi için gerekli olan doğru akım (DC) gücünün üretilmesinde kullanılan transformatörün yanı sıra diyot köprülü doğrultucular, tek ve tam dalga doğrultucular gibi farklı doğrultucular, güç kaynağının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kapasitör tarafından depolanan ve boşaltılan enerji, elektriksel potansiyel farkı oluşturmak için güç kaynağının yaptığı iş ile karakterize edilmektedir (Korkmaz, 2008; Peterkin, 2017; Ribalko ve Sahin, 2006). Farad (F) cinsinden ölçülen

kapasitans, kapasitör elektrodu üzerindeki coulomb (q) yükünün elektrotlar arasındaki potansiyel farka (volt) olan oranıdır. Denklem 1.1’ de kapasitansın matematiksel hesabına yer verilmiştir. Denklem 1.2’ de ise bir kapasitörde depolanan enerjinin joule cinsinden nasıl hesaplandığı matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$C = \frac{q}{V} \quad (1.1)$$

Şekil 1.9’deki kapasitörde biriken şarj voltajını değiştirerek farklı varyasyonlarda kaplamalar elde edebilmek mümkündür. Ancak devrede kullanılan kapasitör sabit bir değere sahip olduğu için burada voltajı değiştirerek elektrik parametrelerini kontrol edebiliriz. ESD işleminde düşük voltaj değerleri, kapasitörde üretilen enerjinin düşmesine neden olmaktadır. Bu durum kıvılcım deşarjının oluşmasını ve sürekliliğinin devam etmesini sınırlandırmaktadır. Değişken voltaj yerine, voltajın sabit tutulup pulse uzunluğu üzerinden enerjiyi kontrol etmek daha avantajlı bir yöntem olabilir (Tang, 2009).

Elektriksel özelliklerin biriktirme kalitesi ve hızı üzerindeki etkisi diğer parametrelere göre daha fazladır. Kıvılcım (deşarj) enerjisindeki artış (Denklem 1.3) biriktirme oranının artmasına katkı sağlamaktadır. Kıvılcım enerjisi devrenin kapasitansı, şarj voltajı, endüktansı ve direnci ile kontrol edilmektedir. Kapasitans ve şarj voltajı sırası ile deşarj süresini ve tepe akımın değerini değiştirerek kıvılcım enerjisini değiştirmektedir. Şarj voltajı, kapasitöre giren akım miktarını kontrol eder. Kapasitans ne kadar yüksek olursa, belirli bir voltaj potansiyeli için deşarj süresi o kadar uzun olmaktadır. Devrenin direnci, devrenin akım akışını sınırlayarak kıvılcım enerjisinin kondansetörde depolanma süresini etkilemektedir. Kablo mesafesinin kısılması direnç etkisini minimuma indirebilir (Tang, 2009; Korkmaz, 2008).

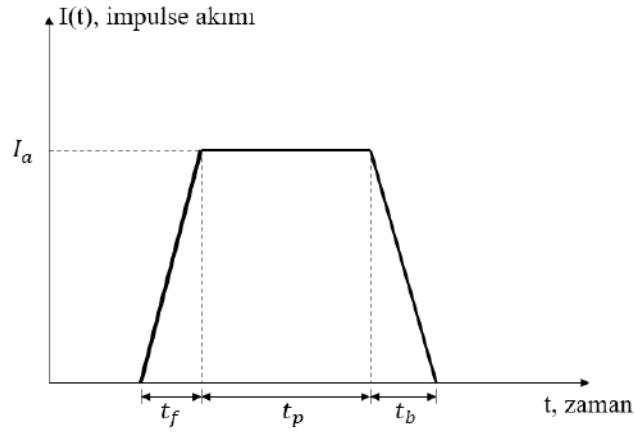
Kıvılcım süreleri birkaç mikrosaniyeden milisaniyeye kadar değişim göstermektedir. Bu diğer darbeli kaynak işlerinden üç kat daha kısadır. Kısa darbe süreleri sayesinde kaplama bölgesi ortam sıcaklığında ya da buna yakın kalmaktadır. Düşük net ısı girdisi ısıdan etkilenen bölgenin azalmasına, metalurjik değişimin ve alt tabakanın boyutsal değişiminin korunmasına katkı sağlamaktadır (Johnson ve Sheldon, 1986; Vizureanu vd., 2018).

Kütle transfer oranı, kıvılcım (deşarj) enerjisi ve deşarj impulse süresine bağlı olarak değişim göstermektedir. Isı iletim katsayısı yüksek elektrotlarla ya-

pılan kaplamalarda artan deşarj impulse süreleri altlık numune üzerinde biriken ergimiş fazın artması ile sonuçlanmaktadır. Isı iletim katsayısı düşük elektrotlarda ise benzer durumlarda buharlaşmalar daha fazla olmaktadır. Altlık numune üzerinde oluşan sıvı-buhar karışımı elektrot ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra yüzeyde kraterimsi yapıların oluşmasına neden olur. Kraterlerin geometrik şekli, elektrotun termal özelliğine ve kıvılcım enerjisine göre değişim göstermektedir (Tang, 2009; Korkmaz, 2008).

Düşük kıvılcım enerjilerinde yapılan kaplamaların avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz: kaplama yüzeyinde özel bir hazırlığa gerek yoktur; karmaşık parçaların üzerine kolayca uygulanabilmektedir; elektrot ile altlık arasında iyi bir bağ oluşur; hem saf metalleri hem de alaşımlarını elektrot olarak kullanma imkanı vardır; kaplama sırasında numuneleri ısıtılmaya gerek yoktur; çevre kirliliği minimum düzeydedir (Vizureanu vd., 2018; Ribalko ve Sahin, 2006).

ESD kaplama sırasında gerçekleşen elektriksel süreci şu şekilde tanımlayabiliriz. Pulse akımının zaman evrelerine Şekil 1.10' da yer verilmiştir. Burada " $t_p$ " darbe süresini, " $t_f$ " pulse oluşum süresinin ön kısmını ve " $t_b$ " pulse oluşum süresinin sona erdiği süreyi ifade etmektedir.



**Şekil 1.10. ESD Pulse Akımının Zaman Evreleri**

Grafiğin eğimi ( $\Delta I / \Delta t_f$ ) akımın artış hızını, işlem sırasında pulselerin arka arkaya tekrar etme sıklığı frekans (f), toplam pulse süresi  $T_p = t_f + t_p + t_b$  ile ifade edilmektedir (Şekil 1.10). İlerleyen aşamalarda enerjinin karakteristikleri şu adımlar ile belirlenir.

1. Öncelikle kapasitörde biriken enerji miktarının hesap edilmesi gerekmektedir. Burada şarj voltajı ( $V_W$ ) osiloskop ile belirlenir. Ölçülen şarj voltajı üzerinden

kapasitörde biriken elektrik enerjisi denklem 1.2 ile hesaplanabilir.

$$E_C = \frac{CV_W^2}{2} \quad (1.2)$$

2. Devamında osilaskoptan enerji parametreleri olan akım  $I(t)$ , voltaj  $V(t)$  değerleri ölçülebilir. Bu ölçümler üzerinden denklem 1.3' de kapasitans enerjisinin voltaja ve akıma göre nasıl değiştiği formülize edilmiştir.

$$E_p = \int_0^{t_p} V(t).I(t) dt \quad (1.3)$$

ESD kaplama ile yapılan birçok çalışmada yukarıda sıralanan yöntem tercih edilmiştir (Korkmaz, 2008; Ribalko ve Sahin, 2006; Aghajani vd., 2020).

Bu değerlerden sonra kıvılcım enerjisinin miktarı denklem (1.4)' e göre hesaplanabilir. Burada  $S_{up}$ , osilosgramdaki  $I(t)$  akım eğrisinin altında kalan alanı ifade etmektedir.

$$E_p = S_{up}V \quad (1.4)$$

Kısa devre akımı ( $I_{shc}$ , kısa devre) denklem (1.5) yardımı ile hesaplanabilir. Kısa devre akımının amplitude (genlik) değerini yine osiloskop yardımı ile ölçeriz.

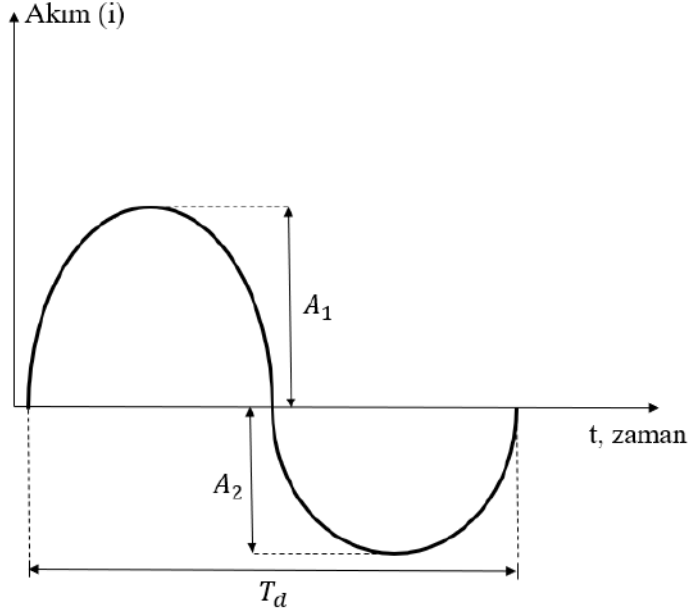
$$I_{shc} = \frac{I_{ashc}}{\sqrt{2}} \quad (1.5)$$

Akım pulse frekans (Hz) değerini ise denklem (1.6)' den hesaplayabiliriz. Burada T, pulselerin tekrar etme süresidir. Biriktirme frekansı 60 Hz ila 4kHz arasında değişebilir (Johnson ve Sheldon, 1986; Cadney ve Brochu, 2008).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.6)$$

Voltaj ve akım değerlerini belirlendikten sonra ESD ünitesinin deşarj devresindeki parametreleri belirlenebilir. Deşarj devresinin indükdansı aşağıdaki denklem (1.7) yardımıyla hesaplanabilir. Burada C, deşarj kapasitörün kapasitans değerini,  $T_d$ , periyot zamanını ifade etmektedir. Kısa devre anında osilogramdan görümlenen grafiğe Şekil 1.11' de yer verilmiştir.

$$L = \frac{T_d^2}{4\pi^2C} \quad (1.7)$$



**Şekil 1.11. Kısa Devre Anında Osilogram Görüntüsü**

Deşarj devresindeki aktif direnç şu şekilde hesaplanabilir (Denklem 1.8).

$$R = 2.\delta.L \quad (1.8)$$

Buradaki  $\delta$  sönümlenme (1/s) miktarı olup aşağıdaki denklem 1.9 kullanılarak hesap edilebilir.  $A_1$  ve  $A_2$  akım değerleri Şekil 1.11 üzerinden saptanabilir.

$$\delta = \frac{\ln(A_1/A_2)}{T/2} \quad (1.9)$$

Sistemin yüzde verimini ( $\eta$ ) sprak enerjisinin ( $E_p$ ) kapasitörde biriken enerjiye olan oranı üzerinden hesaplayabiliriz (Denklem 1.10).

$$\eta = \frac{E_p}{E_c} \cdot 100 \quad (1.10)$$

Literatürde ESD kaplamaların elektriksel etkileri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar şu şekildedir. Salmaliyan ve arkadaşları H13 çeliği üzerini WC-Co elektrotu ile kaplamışlardır. Düşük kıvılcım enerjisindeki kaplama çatlağının yüksek kıvılcım enerjisine göre farklı olduğu ayrıca kıvılcım enerjisinin artırılması ile kaplama kalınlığının ve sertliğinin arttığını tespit etmişlerdir (Salmaliyan vd., 2017). Çalışmalarında optimum kaplama parametreleri ile yapılan biriktirmelerin aşınmaya ve korozyona daha dirençli hale geleceğini vurgulamışlardır. Aghajani ve arkadaşları St52 çeliğinin üzerini WC/TiC/Co/Ni elektrotu ile kaplamıştır. ESD

parametrelerinin korozyona olan etkisini incelemişlerdir. ESD işleminin akım değerini 15 A, frekansını 11 KHz, görev çevrimini % 50, elektrot dönüş hızını 200 rpm ve kıvılcım enerjisini 1,46 mJ seçtiklerinde kaplamaların korozyona olan direncinin maksimum olduğunu gözlemlemişleridir (Aghajani vd., 2020). Korkmaz doktora çalışmasında düşük karbonlu St35 çeliği üzerini WC-% 8 Co sermet elektrotu ile kaplamıştır. Akım şiddeti 200-500 A ve pulse süresi 100-400  $\mu$ s aralığında ESD yöntemi ile kaplamalar yaparak yüzeydeki erozyon miktarını % 50 oranında artırmıştır. Pulse enerjisinin artması kaplama yüzey pürüzlülük değerini ve kütle transferini artırdığını çalışmasında belirtmiştir (Korkmaz, 2008).



## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması

GGG 60 (Sfero Dökme Demir) standardında dökümü gerçekleştirilen malzemelerin kimyasal formuna Tablo 2.1' de yer verilmiştir.

**Tablo 2.1. GGG 60 Sfero Dökme Demir Malzemesinin Kimyasal Yapısı**

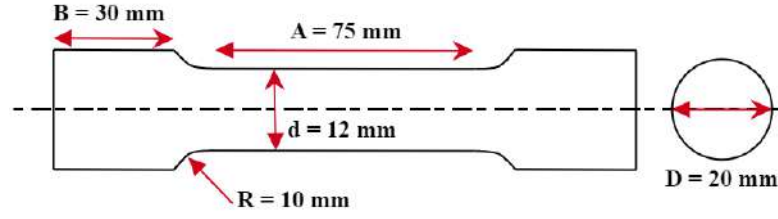
Element	C	Mn	P	Si	Cr	Cu
% İçerikleri	3.56	0.13	0.03	2.21	0.35	0.73

Talaşlı imalatta rahat işleme yapılabilmesi için malzemeler Şekil 2.1' de görüldüğü gibi silindirik ve lama şeklinde dökülmüştür. Dökülen parçalardan aşınma, çekme, üç nokta eğilme ve hadde merdanesi deneysel çalışmalara uygun bir şekilde işlenmiştir.



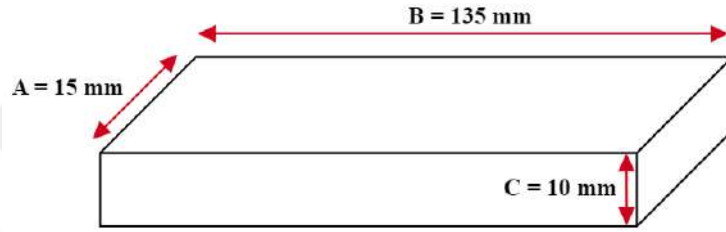
**Şekil 2.1. Döküm Malzemeler**

Çekme testi numunesi ASTM E 8M-04 standartlarında hazırlanmış olup numune ölçüleri Şekil 2.2 de gösterilmiştir.



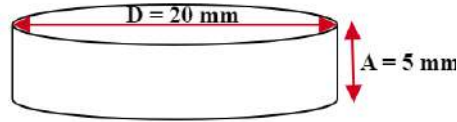
**Şekil 2.2. Çekme Testi Numune Ölçüleri**

3 Nokta Eğilme testi numunesi ASTM E190 standardına göre hazırlanmış olup Şekil 2.3' de numune ölçülerine yer verilmiştir.



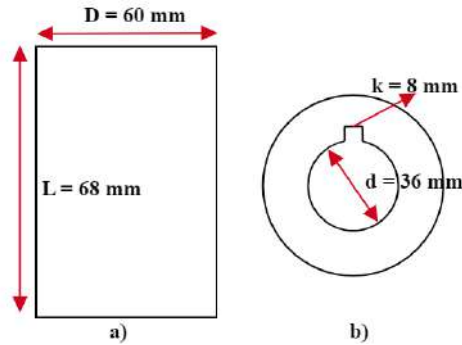
**Şekil 2.3. Üç Nokta Eğilme Testi Numune Ölçüleri**

Aşınma testi numuneleri ASTM G99-05 standartlarında hazırlanmış olup Şekil 2.4' de numune ölçülerine yer verilmiştir.



**Şekil 2.4. Aşınma Testi Numune Ölçüleri**

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan hadde merdanesinin ölçülerine Şekil 2.5 yer verilmiştir.



**Şekil 2.5. Hadde Merdanesi Numune Ölçüleri a) Önden Görünüş b) Üstten Görünüş**

Yukarıda belirtilen ebatlarda, GGG 60 dökme demir malzemesinden üretilen numunelere Şekil 2.6' da yer verilmiştir.

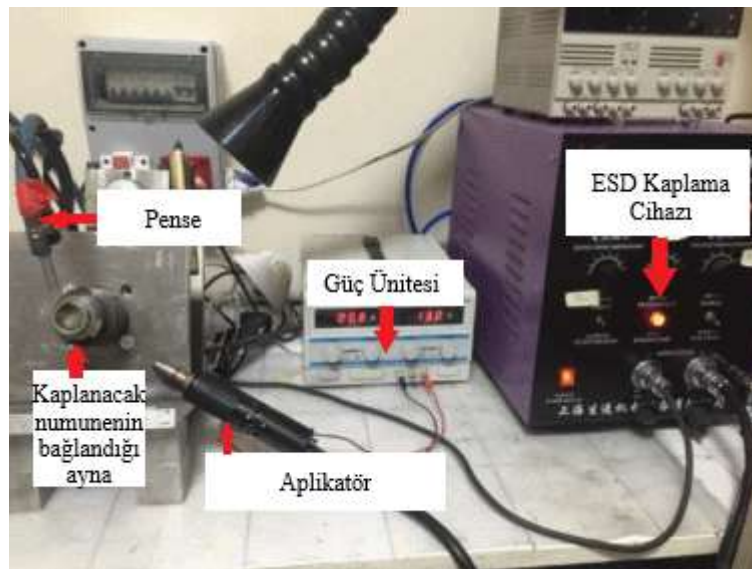


Şekil 2.6. Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Numuneler

## 2.2. ESD Kaplama

GGG60 numunesinin yüzeyi kaplama çalışmasından önce sulu zımpara kağıdı ile temizlenmiştir. Yüzeyde oksit tabakası oluşum riskini düşürmek için etil alkolle yıkanmış ve kurutulmuştur.

Kaplama işlemi sırasında altlığın dönmesi darbeli elektrik akımının üretilmesi için hazırlanan test düzeneğine ve kaplama makinesinin görüntülerine Şekil 2.7' de yer verilmiştir (Kayali ve Talaş, 2019).



Şekil 2.7. ESD Kaplama Cihazı (SZ-3000)

Kaplama sırasında kullanılan cihazın teknik özelliklerine Tablo 2.2' de yer verilmiştir.

**Tablo 2.2. SZ-3000 ESD Kaplama Cihazının Teknik Özellikleri**

Giriş Voltajı	AC 220V Tek Fazlı
Çıkış Voltajı	20V-160V
Maksimum Güç	3 kW
Maksimum Kapasitans	640 $\mu$ F
Frekans Aralığı	40-2100 Hz
Akım	<10 A
Kaplama Sırasında İş Parçasının Sıcaklığı	20-85 °C

Uniform bir kaplama elde edebilmek için elektrot dönüş hızı, voltaj ve frekans gibi kaplama parametrelerinin ayarlanması önem arz etmektedir. Kaplama sırasında elektrotun dönüş hızı 230 RPM' de, voltaj değeri 104 V - 160 V arasında, frekans değeri ise 720 Hz - 1740 Hz aralığında tutulmuştur. Cihaz sabit voltaj değişken akım değerlerinde ürettiği kapasitans enerjisini elektrota göndermektedir. Dönüş hızı ve frekans değeri elektrotun altlık numuneye yapışmasını önlemek için kullanılmaktadır. İşlem sırasında yüzeyde daha iyi ark oluşturabilmek ve kaplama içerisindeki gözenekliliği minimuma indirebilmek için argon gazı kullanılmıştır. ESD kaplama işlemi her bir numune için 2 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Denklem 2.1' de kaplama cihazında biriken kapasitans enerjisi hesaplanırken şarj voltajı 132 V, kapasitans 640  $\mu$ F olarak seçilmiştir. Burada;  $V_W$ : Şarj Voltajını, C: Maksimum Kapasitansı,  $E_C$ : Kapasitans Enerjisini ifade etmektedir.

$$E_C = \frac{CV_W^2}{2}$$

$$E_C = \frac{640 * 10^{-6} * 132^2}{2} \quad (2.1)$$

$$E_C = 5,576J$$

Kaplama sırasında oluşan maksimum kapasitans enerjisi 5,576 J olarak hesaplanmıştır. Çalışmamızda üretilen kapasitans enerjisi maksimum 8,192 J minimum 3,461 J olarak Denklem 2.1 üzerinden hesaplanmıştır. Literatürde kapasitans enerjisi 0,1 J ila 10 J arasında değişim göstermektedir (Johnson ve Sheldon, 1986).

Numuneler metalografik incelemeler için kesici disk yardımı ile kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonra sırası ile 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 Grid zımpara kağıdı ile sulu ortamda zımparalanarak 1 mikron  $Al_2O_3$  solüsyonu ile çuha üzerinde parlatılmıştır. Parlatılan numuneler % 2 Nital (% 98 Etil Alkol, % 2  $HNO_3$ ) sıvısında 10 saniye boyunca dağlanmıştır. Elde edilen mikro yapılar Nikon MA 100N optik mikroskopta görüntülenmiştir. GGG 60 malzemenin mikro yapısına Şekil 2.8' de yer verilmiştir.



**Şekil 2.8. GGG 60 Küresel Grafitli Dökme Demirin Optik Mikroskop Görüntüsü**

Şekil 2.8'de döküm sırasında küresel grafitlerin etrafını saran östenit faz, kaptılaşma süresi başladığında ferrit ve perlit fazlarına dönüşmüştür. Küresel grafitlerin etrafını saran açık renkli bölgeler ferrit fazı, küresel grafitlerin arasını dolduran ve nispeten daha koyu bir görünüme sahip olan bölgeler ise perlit fazı ifade etmektedir. Matris içerisinde karbon oranı düşük kaldığında mikro yapı daha çok ferritik, yüksek kaldığında ise daha çok perlitik bir görünüme sahip olmaktadır (Kayali ve Talaş, 2019).

### **2.2.1. Taguchi Deneyi**

Farklı voltaj ve frekans değerlerinde Minitab uygulamasında Taguchi deney metoduna göre optimum kaplama parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deney çıktısı olarak kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değeri belirlenmiştir. Taguchi yöntemi ile deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevirerek değerlendirmektedir (Goyal vd., 2012; Sahoo, 2009). Deney sayısını minimize ederek, daha az deneme ile daha etkili sonuçlara ulaşabilmek mümkündür. Tablo 2.3' de deney için seçilen

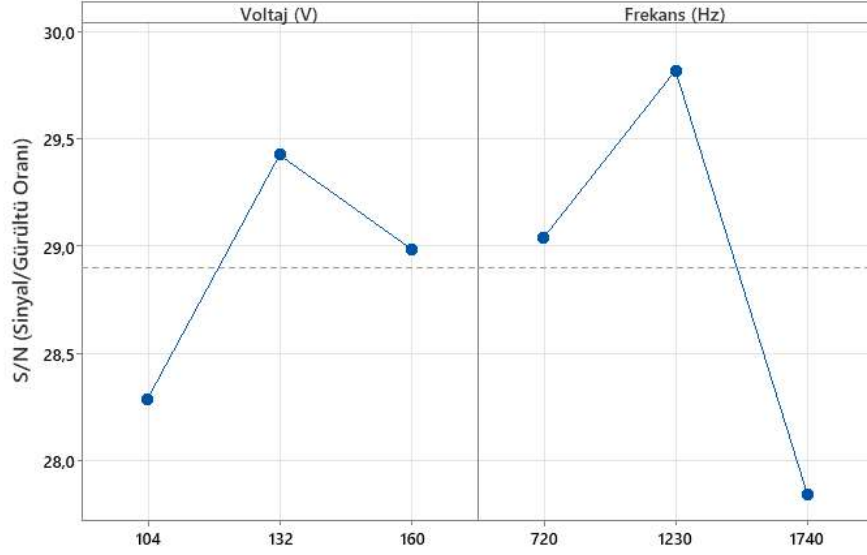
voltaj ve frekans değerlerine yer verilmiştir. 2 farklı parametrenin 3 sinyal seviyesindeki değişimini belirleyebilmek için L9 matrisi kullanılmıştır. Yine Tablo 2.3' de S/N gürültü oranı denklem 2.2' e göre hesaplanmıştır. Kaplama voltaj ve frekans parametrelerinin ortalama kaplama kalınlığına olan etkisinin Sinyal/Gürültü (S/N) değerlerine Şekil 2.9' de yer verilmiştir. Numelerin kesit görüntüleri üzerinden kaplama kalınlığı değerleri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri en az 15 ayrı yerden alınmış olup kalınlıkların ortalama değerleri hesap edilmiştir (Şekil 2.10).

$$N = -10 \log_{10}(1/n(y)^2) \quad (2.2)$$

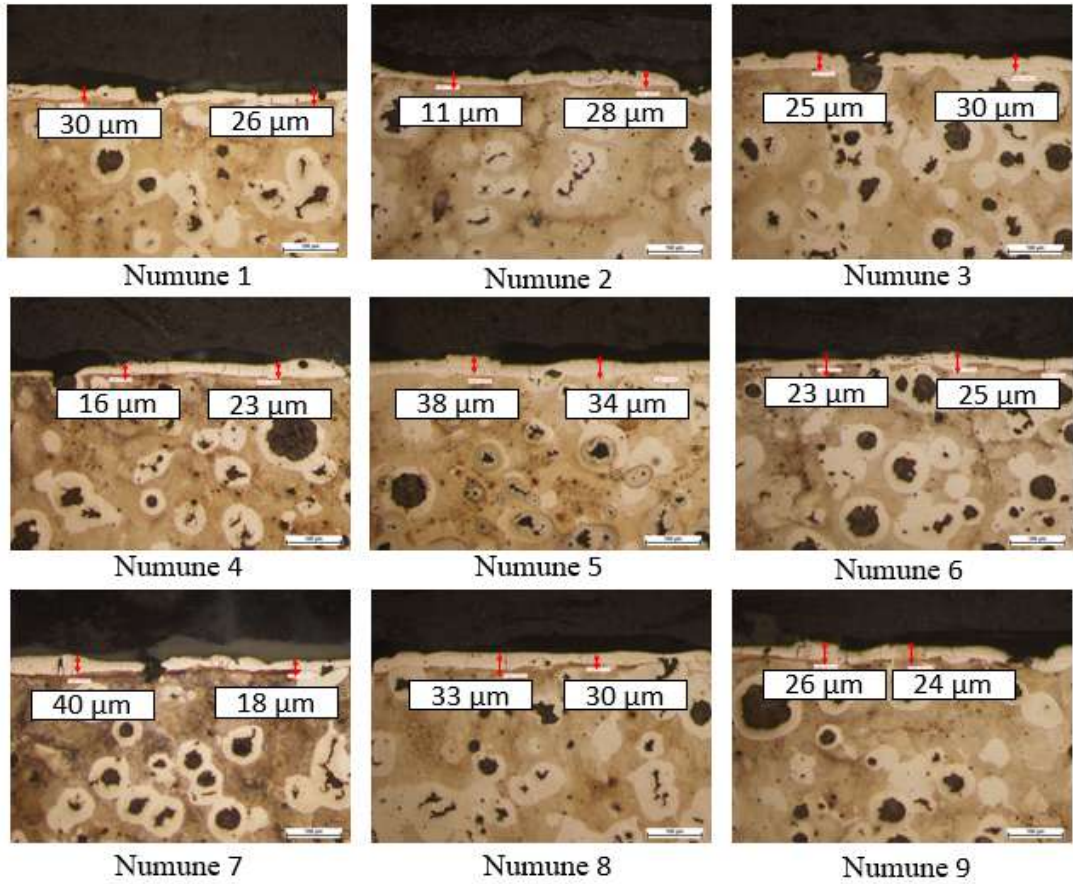
Burada, N; Sinyal/Gürültü oranını, n; deney sayısını, y; deney sonucu elde edilen değeri ifade etmektedir.

**Tablo 2.3. Ortalama Kaplama Kalınlık Değeri Cinsinden S/N Değerleri**

	Voltaj (V)	Frekans (Hz)	Ortalama Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	S/N (dB)
Numune 1	104	720	28	28,9432
Numune 2	104	1230	25	27,9588
Numune 3	104	1740	25	27,9588
Numune 4	132	720	30	29,5424
Numune 5	132	1230	36	31,1261
Numune 6	132	1740	24	27,6042
Numune 7	160	720	27	28,6273
Numune 8	160	1230	33	30,3703
Numune 9	160	1740	25	27,9588



Şekil 2.9. Ortalama Kaplama Kalınlığı S/N Değerleri



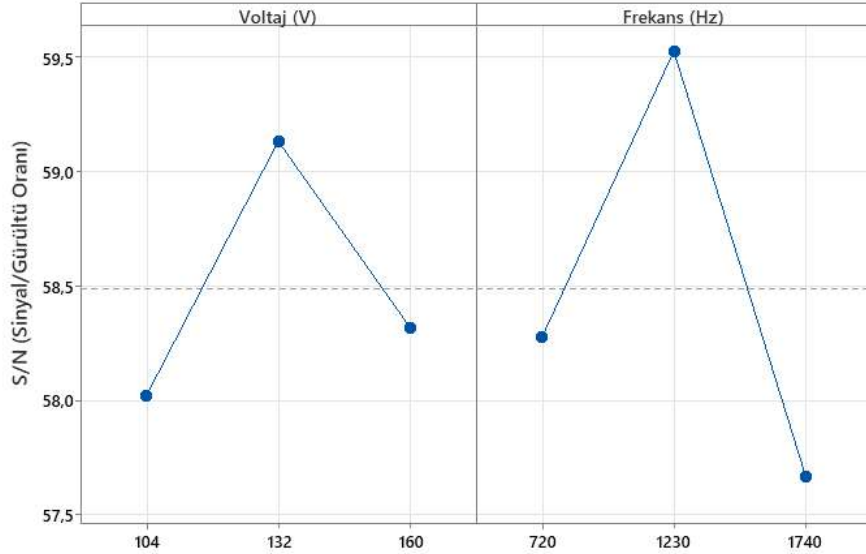
Şekil 2.10. Numelerin Ortalama Kaplama Kalınlığı Optik Mikroskop Görüntüsü

Daha sonra yine aynı metod ile kaplama parametrelerinin yüzey sertlik değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Tablo 2.4' de elde edilen Sinyal/Gürültü değerleri yine Denklem 2.2' e göre hesaplanmıştır.

**Tablo 2.4. Yüzey Sertlik Değeri Cinsinden S/N Değerleri**

	Voltaj (V)	Frekans (Hz)	Yüzey Sertlik Değeri (HV <sub>0,2</sub> )	S/N (dB)
Numune 1	104	720	840	58,4856
Numune 2	104	1230	775	57,7860
Numune 3	104	1740	775	57,7860
Numune 4	132	720	900	59,0849
Numune 5	132	1230	1107	60,8830
Numune 6	132	1740	744	57,4315
Numune 7	160	720	729	57,2546
Numune 8	160	1230	990	59,9127
Numune 9	160	1740	775	57,7860

Kaplama voltaj ve frekans parametrelerinin yüzey sertliğine olan etkisinin Sinyal/Gürültü (S/N) değerlerine Şekil 2.11’ de yer verilmiştir.



**Şekil 2.11. Yüzey Sertliği S/N Değerleri**

Yanıt tablosu, faktörlerin her düzeyi için seçilen özelliğin ortalamasını göstermektedir. Yanıt tablosu, etkilerin göreceli büyüklüğünü karşılaştıran Delta istatistiklerine dayalı sıralamayı göstermektedir. Delta istatistiği her faktör için en yüksek ortalamanın aynı faktör için en düşük ortalamasının çıkarılması ile elde edilir. Dereceler Delta değerine göre atanmaktadır. Sıralamada 1 en yüksek delta değerine, ikinci en yüksek delta değerine ise 2 atanır (Sahoo, 2009; Praveen vd., 2016). Ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değeri yanıt değerlerine Tablo 2.5 ve Tablo

2.6' de yer verilmiştir. Örneğin 132 Voltaj değerinde yapılan bir kaplamada 4, 5, 6 numaralı deneylerin Sinyal/Gürültü oranının ortalaması alınır. Ayrıca dokuz deneyin toplam Sinyal/Gürültü oranını denklem 2.4 ye göre hesaplanır. Toplam ortalama Sinyal/Gürültü oranı ortalama kaplama kalınlığında 28,9 dB yüzey sertliğinde ise 58,49 olarak hesap edilmiştir.

**Tablo 2.5. Ortalama Kaplama Kalınlığının Yanıt Tablosu**

Seviye	Voltaj (V)	Frekans (Hz)
1	28,29	29,04
2	29,42	29,82
3	28,99	27,84
Delta	1,14	1,98
Derece	2	1

**Tablo 2.6. Yüzey Sertliğinin Yanıt Tablosu**

Seviye	Voltaj (V)	Frekans (Hz)
1	58,02	58,27
2	59,13	59,53
3	58,32	57,67
Delta	1,11	1,86
Derece	2	1

Kaplama parametrelerinin ortalama kaplama kalınlığına (Şekil 2.9 ve Tablo 2.5) ve yüzey sertliğine (Şekil 2.11 ve Tablo 2.6) olan etkisi birlikte incelendiğinde 132 V ve 1230 Hz voltaj ve frekans değerleri ile yapılan kaplamaların ortalama S/N değeri üstünde olduğu görülmektedir. Analiz sonucu 132 V ve 1230 Hz değerleri optimum kaplama parametresi olarak belirlenmiştir.

### 2.2.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizinde, belirli bir yanıt üzerindeki faktörlerin etkisinin veya faktörlerin etkileşimin önem düzeyini ortaya çıkarabilmek için çok faydalı bir yöntemdir. Bu analizin amacı, Voltaj ve frekans parametrelerinin seçilen çıktı değerlerini (ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik) ne ölçüde etkilediğini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtığını belirlemektir. Analizde öncelikle Sin-

yal/Gürültü oranının toplam değişkenliğini belirten  $SS_T$  değeri hesaplanır. Analizde kullanılan matematiksel modelleme şu şekildedir (Denklem 2.3):

$$SS_T := \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (2.3)$$

Burada  $\eta_m$  ölçülen değerler üzerinden hesap edilen S/N oranını,  $\eta_i$  ölçülen değerler üzerinden hesap edilen S/N oranının ortalamasını, n toplam deney sayısını ifade etmektedir. Her faktörün ayrı ayrı hesaplanması sonucu elde edilen değerlere Tablo 2.7 ve Tablo 2.8' de yer verilmiştir.

**Tablo 2.7. Ortalama Kaplama Kalınlığına Göre ANOVA Tablosu**

	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	F Değeri	P Değeri
Voltaj (V)	2	24,22	%17,69	1,06	0,025
Frekans (Hz)	2	66,89	% 48,86	2,92	0,003
Hata	4	45,78	% 33,44		
Toplam	8	136,89	% 100		

**Tablo 2.8. Yüzey Sertliğine Göre ANOVA Tablosu**

	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	F Değeri	P Değeri
Voltaj (V)	2	23021	%17,58	0,93	0,01
Frekans (Hz)	2	58569	% 44,72	2,37	0,004
Hata	4	49387	% 37,71		
Toplam	8	130976	% 100		

ANAVO analizi sonucu, ortalama kaplama kalınlığı için deney güvenilirliği ( $R^2$ ) % 82 yüzey sertlik değeri için ise bu değer ( $R^2$ ) % 84 olarak hesap edilmiştir. Yapılan çeşitli çalışmalar % 85 seviyesindeki deneylerin güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca P değerinin 0,005 'in altında olması durumunda çalışmanın anlamlılık değeri artmaktadır (Sahoo, 2009; Praveen vd., 2016).

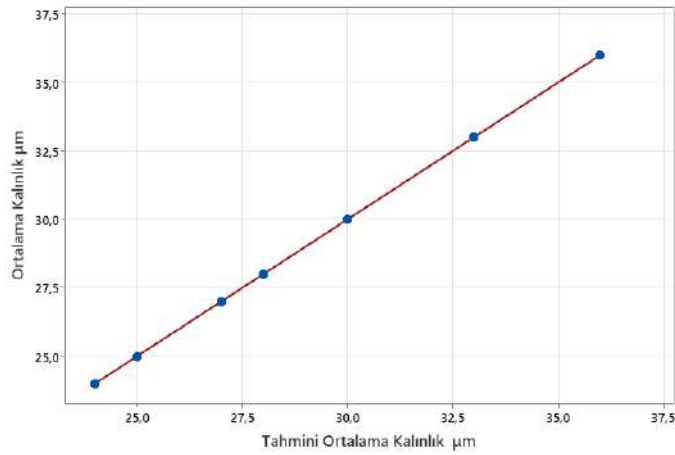
### 2.2.3. Doğruluk Analizi

Proses parametrelerinin optimal seviyesi belirlendikten sonra analizin doğruluğunu test edebilmek mümkündür (Sahoo, 2009). Tahmini S/N oranını şu şekilde

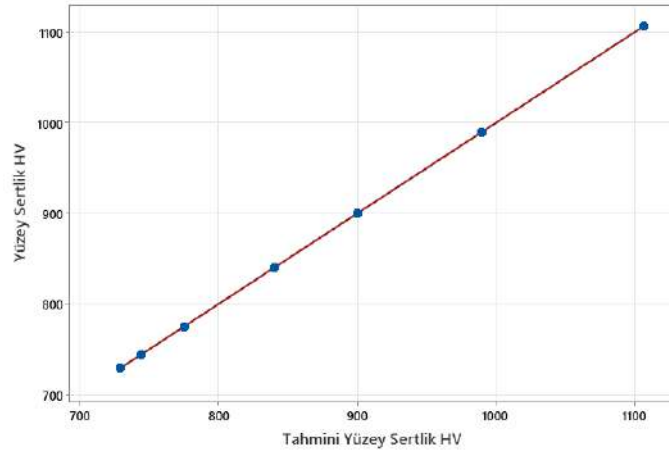
hesaplayabilmek mümkündür (Denklem 2.4):

$$\eta = \eta_m + \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m) \quad (2.4)$$

Burada;  $\eta_m$  ölçülen değerler üzerinden hesap edilen S/N oranını,  $\eta_i$  ölçülen değerler üzerinden hesap edilen S/N oranının ortalamasını, n ise deney sayısını ifade etmektedir. Şekil 2.12 ve Şekil 2.13' de ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerinin tahmin edilen ve gözlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum gösterdiği söylenebilir.



Şekil 2.12. Ortalama Kalınlık Değerleri (µm)



Şekil 2.13. Yüzey Sertlik Değerleri (HV<sub>0,2</sub>)

#### 2.2.4. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, sebep sonuç ilişkisi olan değişkenler arasındaki ilişkiyi tahmin etmeye yönelik istatistiksel bir tekniktir. Tek değişkenli regresyonun ana

odağı, bağımlı bir değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi analiz etmek ve bağımlı/bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişki denklemini formülize etmektir (Sachin vd., 2023; Dwivedi vd., 2022; Uyanık ve Güler, 2013). Bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişkenin yer aldığı regresyon modeline çoklu doğrusal regresyon adı verilmektedir. Burada, voltaj ve frekans arasındaki ilişki kaplamaların kalınlığını ve yüzey sertlik değerinin değişmesine neden olmaktadır. Dolayısı ile eşitliğin solunda yer alan kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değeri voltaj ve frekans değerlerine bağımlıdır. Eşitliğin sağında yer alan voltaj ve frekans değerleri diğer değişkenlerden etkilenmediği için bağımsızdır.

Ortalama kaplama kalınlığı üzerinden regrasyon analizi istatistiklerine Tablo 2.9' da yer verilmiştir. Burada  $R^2$  değeri 0,82 olarak hesaplanmıştır (Tablo 2.10). Yani bağımsız değişkenlerimizin (voltaj, frekans) değişmesi ile sonucun % 82 oranında doğruluğa yaklaştığını göstermektedir. Yüzey sertlik değerlerinin regresyon analizinde ise  $R^2$  değeri 0,84 olarak hesaplanmıştır. Bu da yine bağımsız değişkenlerin (voltaj, frekans) değişmesi ile yüzey sertlik sonucunun % 84 oranında doğruluğa yaklaştığını göstermektedir.

**Tablo 2.9. Ortalama Kaplama Kalınlığı Regresyon İstatistikleri**

Çoklu R	0,906
$R^2$	0.821
Ayarlı $R^2$	0.836
Standart Hata	0.897
Gözlem	9

**Tablo 2.10. Yüzey Sertlik Değeri Regresyon İstatistikleri**

Çoklu R	0,917
$R^2$	0.84
Ayarlı $R^2$	0.856
Standart Hata	0.884
Gözlem	9

Tablo 2.11'da Regresyon analizi sonucu ortalama kaplama kalınlığının sabit katsayı değerleri verilmiştir. Burada t değerinin sıfırdan farklı olması sonucun anlamlı olduğunu, P değerinin ise 0,05 ten küçük olması bağımsız değişkenlerin sonuç üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Sachin vd., 2023; Uyanık ve Güler,

2013). Benzer sonuçları Tablo 2.12’ deki yüzey sertlik sabit katsayı değerleri için de söyleyebiliriz.

**Tablo 2.11. Ortalama Kaplama Kalınlığı Sabit Katsayı Değerleri**

	Katsayılar	T-Stat	P-değeri
Kesişim	27.033	2.91	0.027
Voltaj	0.042	0.67	0.025
Frekans	-0.004	-1.06	0.033

**Tablo 2.12. Yüzey Sertliği Sabit Katsayı Değerleri**

	Katsayılar	T-Stat	P-değeri
Kesişim	836.97	2,661	0.0375
Voltaj	0.62	0.295	0.01
Frekans	-0.057	-0.497	0.004

Denklem 2.5’de bağımsız değişkenleri x ve bağımlı değişkeni y ifade etmek üzere en genel çoklu regresyon denklemine yer verilmiştir (Uyanık ve Güler, 2013).

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + e_i \quad (2.5)$$

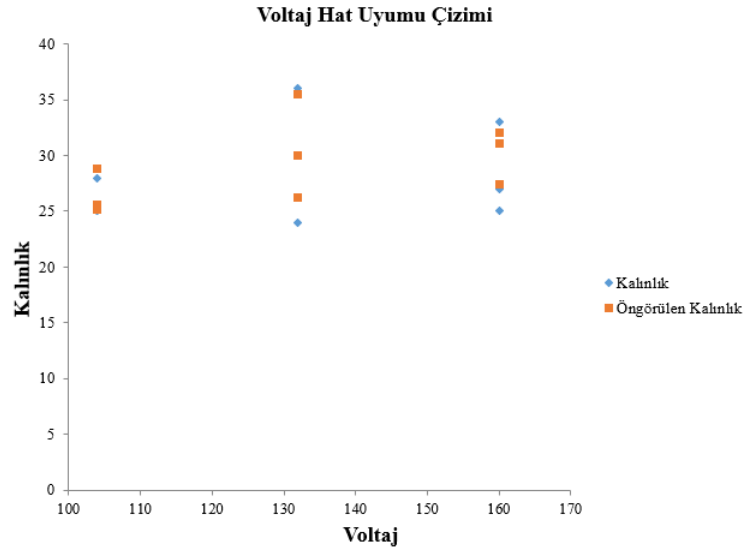
Yukarıdaki denklem 2.5’de  $a_0$ ’ a kesişim katsayısını,  $a_1$ ’ e voltaj katsayısını,  $a_2$ ’ ye frekans katsayı değerlerini ve  $e_i$ ’ ye de hata değerini yazarsak ortalama kaplama kalınlığı (denklem 2.6) ve yüzey sertlik (denklem 2.7) değerlerinin regresyon denklemlerini elde edebiliriz. Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ile başka bir deney yapılmadan ilgili voltaj ve frekans değerlerinin denklemde yerine konulması ile hesap edilebilmesi mümkündür. Ayrıca regresyon analizi elimizdeki denklemlerle deneysel çalışmalarda yapılan hataların minimuma indirgenmesine yardımcı olmaktadır (Sachin vd., 2023; Dwivedi vd., 2022).

$$OKK(\mu m) = 27,03 + 0,0417 \text{ Voltaj } (V) - 0,00359 \text{ Frekans } (Hz) \quad (2.6)$$

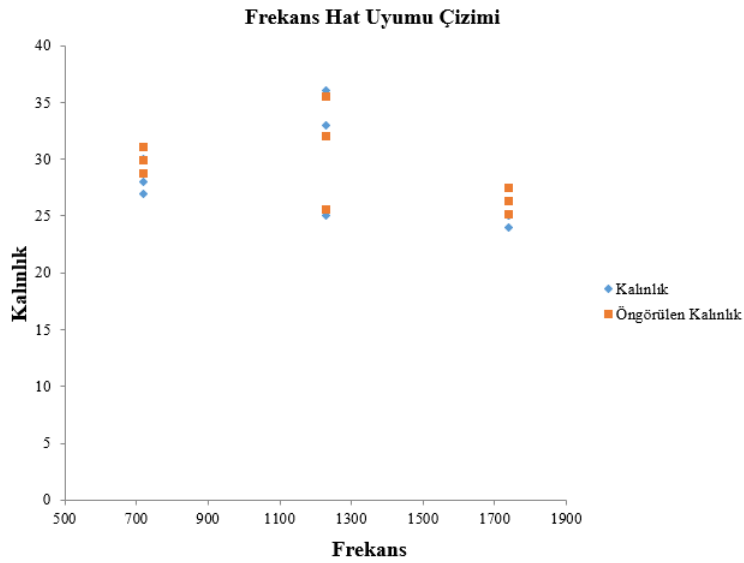
$$YS(HV_{0,2}) = 837 + 0,62 \text{ Voltaj } (V) - 0,057 \text{ Frekans } (Hz) \quad (2.7)$$

Regresyon analizinin son kısmında ortalama kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerinin voltaj ve frekans değerleri üzerinden hat uyumu grafiklerine ba-

kılmıştır. Ortalama kaplama kalınlığı voltaj (Şekil 2.14) ve frekans (Şekil 2.15) hat uyumu grafikleri aşağıda gösterilmiştir.



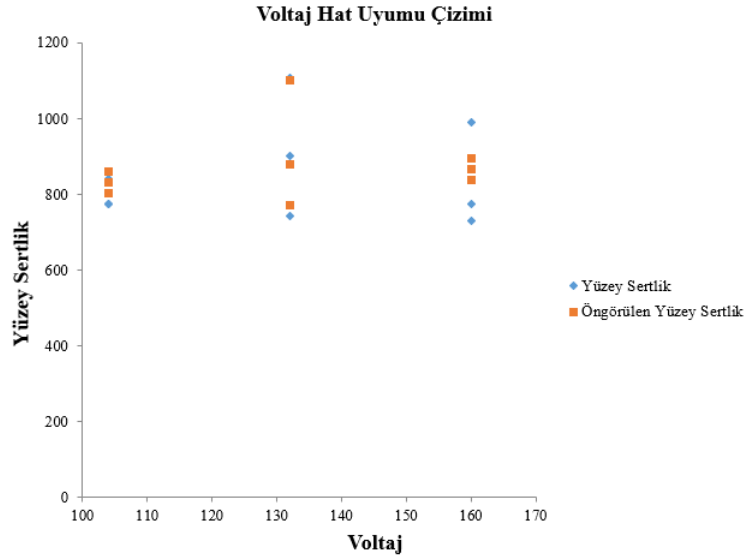
Şekil 2.14. Ortalama Kaplama Kalınlığının Voltaj Hat Uyumu



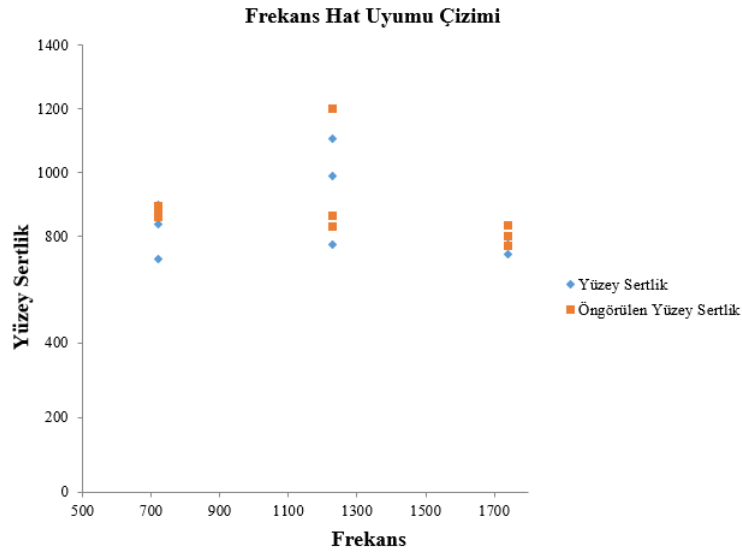
Şekil 2.15. Ortalama Kaplama Kalınlığının Frekans Hat Uyumu

Şekil 2.14' de 132 V değerinde ölçülen kalınlık ile ön görülen kalınlık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç 132 V ile yapılan kaplamalarda  $R^2$  değerinin diğer sonuçlara göre daha büyük çıkmasına neden olmaktadır. Benzer sonucu 1230 Hz ile yapılan kaplamalar için de söyleyebiliriz (Şekil 2.15).

Yüzey sertlik değerinin voltaj (Şekil 2.16) ve frekans (Şekil 2.17) hat uyumu grafikleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yüzey Sertlik Değerlerinin Voltaj Hat Uyumu



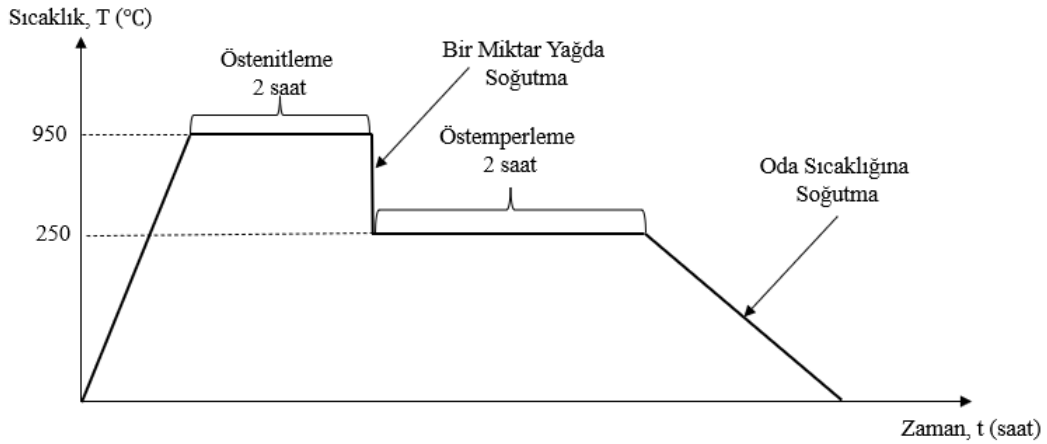
Şekil 2.17. Yüzey Sertlik Değerlerinin Frekans Hat Uyumu

Şekil 2.16' de 132 V değerinde ölçülen yüzey sertlik ile ön görülen yüzey sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak frekans değerleri için aynı varsayımlarda bulunamayız. Burada 720 Hz ve 1740 Hz ile yapılan kaplamaların ölçülen ve öngörülen değerlerin birbirine çok yakın olduğunu görülmektedir. Bu sonuç düşük ve yüksek frekansta yapılan kaplamaların, kalınlıklarının diğer parametrelere göre daha yüksek çıkmasından kaynaklanabilir. Grafikteki ölçülen ve öngörülen değerlerin birbirine çok yaklaşması standart sapma değerinin düşmesine neden olurken,  $R^2$  değerinin artmasına neden olmaktadır (Uyanık ve Güler, 2013; Ponomareva vd., 2022). Elde edilen sonuçların diğer analizlerle (Taguchi, Varyans, Doğruluk) tutarlı olduğu görülmektedir.

### 2.3. Isıl İşlem

Küresel grafitli dökme demirlere ısıl işlem uygulanırken östenitleme sıcaklığı genelde 900 - 950 °C' ye ayarlanmaktadır (Čatipović vd., 2018; Nofal, 2013). Isıl işlem sırasında malzeme içerisindeki grafit, östenit için sürekli karbon sağlamaktadır. Dolayısıyla östenit içerisindeki karbonun difüzyon hızı, grafit dağılımına ve grafitler arası mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Dökme demir içerisindeki grafit sayısı ne kadar fazla ise karbon difüzyonunda o denli hızlı olacaktır. Östenitleme sıcaklığı, malzemenin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için önemli bir etkidir. Soğuma hızının artması östenit sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Bu da daha yüksek bir karbon konsantrasyonuna yol açmakta ve malzeme içerisinde oluşan ferritik bölgelerin azalması ile sonuçlanmaktadır (Čatipović vd., 2018; Zhang vd., 2014b).

Çalışmamızda numuneler 950 °C' de 2 saat boyunca östenitlendirilmiştir. Yüzey sertlik değerini artırabilmek için numuneler devamında yağda soğutulmuştur. Daha sonra mikro yapı dönüşümünün tamamlanabilmesi için numunelere 250 °C' de 2 saat boyunca östemperleme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Isıl İşlem Basamakları

## 2.4. Deneysel Yöntem

### 2.4.1. Optik Mikroskop ve SEM/EDS Görüntüleri

Optimum parametrelerde kaplanan yuvarlak numuneler (Bkz. Şekil 2.4) metalografik işlemlerden geçirildikten sonra kesitten Optik Mikroskop (Nikon MA 100N) görüntüsü alınmıştır. Şekil 2.19' de Optik Mikroskop cihazına yer verilmiştir.



**Şekil 2.19. Nikon MA100N Optik Mikroskop**

Kaplamalar içerisinde oluşan kusurları ve hadde merdanesi üzerindeki elementel dağılımı belirleyebilmek için hem yüzeyden hem de kesitten SEM/EDS (Hitachi – SU 1510) görüntüleri çekilmiştir. Şekil 2.20' de deneyler sırasında kullanılan SEM/EDS cihazına yer verilmiştir.



**Şekil 2.20. Hitachi – SU 1510 SEM/EDS Cihazı**

#### **2.4.2. XRD Analizi**

ESD kaplama sırasında yüzeyde meydana gelen faz dönüşümlerinin karakterize edilebilmesi için numunelerin XRD analizleri incelenmiştir. Numunelerin X - ışınları difraksiyon analizleri 20-80 derece arasında,  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanılarak Bruker D8 Advance marka cihazda yapılmıştır. Şekil 2.21' de analiz sırasında kullanılan XRD cihazına yer verilmiştir. XRD özellikle ince film tabakalarının analizinde etkin bir yöntemdir. X ışınlarının dalga boyları atomlar arası mesafelerin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Tahribatsız bir muayene yönemi olduğu için deney sırasında numunelere zarar vermemektedir.



**Şekil 2.21. Bruker D8 Advance XRD Cihazı**

### **2.4.3. Mikro Sertlik Analizi**

Dökümü gerçekleştirilen numuneler, yüzey sertlik değerlerinin daha rahat okunabilmesi için öncelikle zımparalanmıştır. 200 gr' lık bir yük 10 saniye boyunca numuneler üzerinde uygulanmıştır. Deney sırasında kullanılan Emcotest – Durascan G5 marka mikro sertlik cihazına Şekil 2.22' de yer verilmiştir.



**Şekil 2.22. Emcotest – Durascan G5 mikro Sertlik Cihazı**

#### 2.4.4. Çekme ve Üç Nokta Eğme Testi

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, mikro yapıya ve grafit yapıların özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Çekme testi SHIMADZU AGS-X (100 kN) cihazında 1 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Numuneler deneysel çalışmaya uygun Şekil 2.2' deki ebatlara göre hazırlanmıştır.

Üç nokta eğme deneyi SHIMADZU AGS-X (100 kN) cihazında 5 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Numuneler deneysel çalışmalara uygun Şekil 2.3' deki ebatlara göre hazırlanmıştır. Deneyler sırasında kullanılan cihaza Şekil 2.23'de yer verilmiştir.



Şekil 2.23. SHIMADZU AGS-X (100 kN) Çekme ve Üç nokta Eğme Test Cihazı

#### 2.4.5. Aşınma Testi

Aşınma testi oda sıcaklığında, 40 N yük altında, 240 RPM hızda, 250 metre mesafede, 6 mm çapında  $Al_2O_3$  bilye ile ball-on disk yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Tribometer T10/20). Cihaz sürtünme katsayısını test sırasında otoma-

tik olarak kaydetmiştir. Bütün numuneler için sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Aşınma testi sırasında kullanılan cihaza Şekil 2.24' de yer verilmiştir.



**Şekil 2.24. Tribometer T10/20 Aşınma Cihazı**

#### **2.4.6. Haddeleme Testi**

Deneyel çalışmalar için tasarlanan bir haddeleme makinesinin merdaneleri Şekil 2.5' deki ebatlara göre dökülmüş ve talaşlı imalat usullerine göre işlenmiştir. Çalışmada kullanılan haddeleme makinesine Şekil 2.25' de yer verilmiştir. Haddelemede iki farklı türde lama (St 37 soğuk haddelenmiş ve Alüminyum 6035) kullanılmıştır. Deneyler 1 m/dk lık hızda gerçekleştirilmiştir. Haddeleme kuvveti St 37 lama için 20 kN, Al 6035 Lama için 5 kN' da sabit tutulmuştur. Deneyden sonra merdane üzerinde oluşan değişimler kaydedilmiştir.



**Şekil 2.25. Haddeme Makinesi**

#### 2.4.7. Yüzey Pürüzlülük Testi

Yüzey pürüzlülük ölçümleri 0,25 mm/s hızda ve 10 mm tarama uzunluğuna dayalı bir 2D profilometre (Mitutoyo SJ-301) kullanılarak yapılmıştır. Hadde merdanelerinin 3 ayrı bölgesinden alınan ölçümler ileriki aşamalarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Test sırasında kullanılan cihaza Şekil 2.26' de yer verilmiştir.



**Şekil 2.26. Mitutoyo SJ-301 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı**

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yüzeyleri kaplanacak olan küresel grafitli dökme demir numuneler Taguchi deneyi ile belirlenen optimum kaplama parametrelerinde (132 V - 1230 Hz aralığında) WC - %12 Co içerikli elektrodu ile ESD kaplamalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar (Optik Mikroskop ve SEM/EDS analizleri, yüzey pürüzlülük ölçümü, XRD analizi, Sertlik, Çekme, Üç Nokta Eğme, aşınma testi ve haddeleme) sonucu elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

#### 3.1. Optik Mikroskop ve SEM/EDS Analizleri

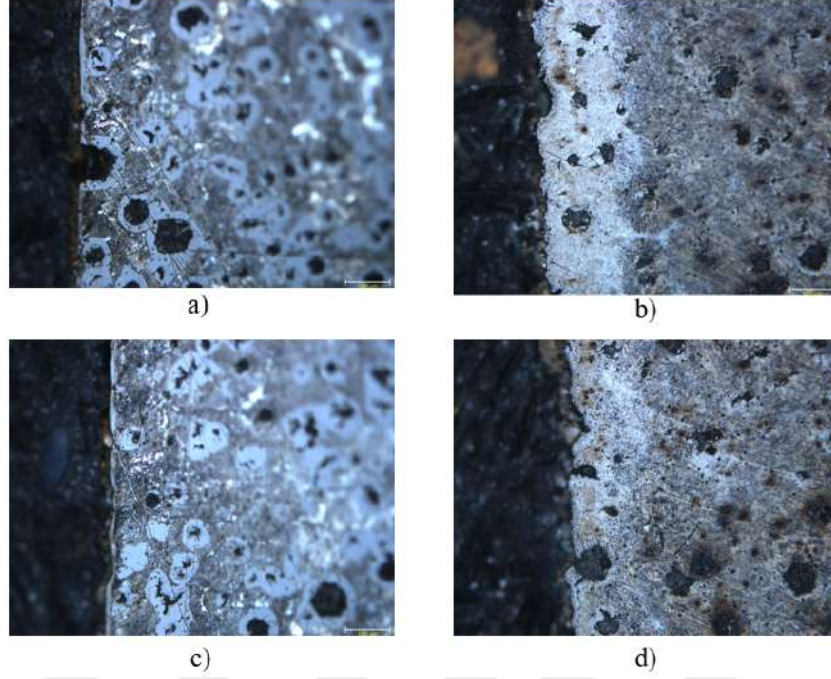
##### 3.1.1. Kesitten Alınan Optik Mikroskop Görüntüleri

Numuneler metalografik incelemeler için kesici disk yardımı ile kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen numuneler bakalite alındıktan sonra sırası ile 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 Grid zımpara kağıdı ile sulu ortamda zımparalanarak 1 mikron  $Al_2O_3$  solüsyonu ile çuha üzerinde parlatılmıştır. Parlatılan numuneler % 2 Nital (% 98 Etil Alkol, % 2  $HNO_3$ ) sıvısında 10 saniye boyunca dağlanmıştır. Elde edilen mikro yapılar Nikon MA 100N optik mikroskopta (Şekil 2.19) görüntülenmiştir.

Isıl işlem görmüş ve görmemiş numuneler üzerinde oluşturulan kaplamaların ortalama kalınlığı  $30 \pm 8 \mu m$  olarak hesaplanmıştır. Kaplama kalınlığı en az 15 ölçümün ortalama değeridir. Isıl işlem öncesi ve sonrası numunelerin aynı büyütmelerdeki mikro yapıları Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.10' de diğer kaplamaların mikroyapı görüntülerine yer verilmiştir.

Altlık malzeme yüzeyinde talaşlı imalattan dolayı, matrisle eşit oranda C içeriği mevcuttur. Bu C, her ne kadar difüzyonla bir yayılma gösterse de kaplama ile alaşımlandırmaya katılacak ve kaplamanın C oranını artıracaktır. Artan C oranı ile sünekliği azalan tabakanın, kaplama sırasında ortaya çıkan iç gerilimleri taşıma ve bertaraf etme kabiliyeti oldukça zayıflayacaktır (Carrasco vd., 2022; Chen vd.,

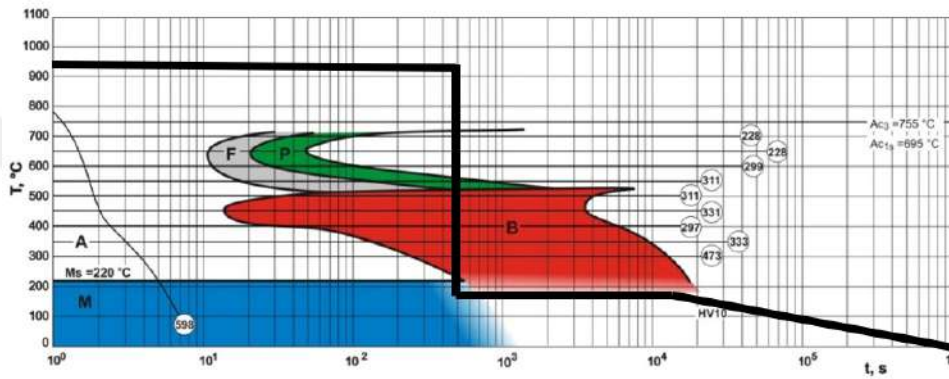
2023). Bu da kaplamaları çatlamaya ve pul oluşumuna daha meyilli hale getirecektir. GGG 60 sfero döküm numuneler, tamamen östenitleme ve ardından temperleme ile ısıl işleme tabi tutuldu bu sayede numune iç gerilmeleri büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır.



**Şekil 3.1. a,c)Isıl İşlemsiz b,d) Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunelerin Kesit Görüntüleri**

Isıl işlem görmemiş numunelerin yüzeyinde çukurlaşmalar meydana gelmiştir (Şekil 3.1 a,c). Isıl işlem görmüş numunelerde ise böyle bir durum söz konusu değildir (Şekil 3.1 b, d). Optik mikroskop görüntüleri, ısıl işlem görmemiş GGG 60 numune yüzeyine daha yakın bölgelerde noduler yapı içeriğine, ısıl işlem görmüş yüzeyde ise 100 mikrondan daha kalın karbondan arındırılmış bir bölge içerdiğini göstermektedir. Şekil 3.1 (a, c) incelendiğinde malzeme iç yapısındaki ferritik bölgelerin daha çok küresel grafitlerin etrafında yoğunlaştığını, perlit fazın ise küresel grafitlerin arasında daha koyu bir renkte yer aldığını söyleyebiliriz. Isıl işlem görmüş yüzey ısıl işlem sırasında hava ile temas halindedir (Şekil 3.1 b, d). Matristeki bazı grafit nodüllerin ve C' nun ısıl işlem sırasında CO ürettiği düşünülmektedir. Bu da iki aşamalı reaksiyonla CO<sub>2</sub> oluşumuna yol açmaktadır (Moormann, 2011). Şekil 3.1 (b, d) incelendiğinde Şekil 3.1 (a, b)' ye göre yüzeyde oluşan grafit nodüllerin sayısında azalma ve boyutlarında bir küçülme gözlemlenmiştir. Isıl işlem öncesi grafitlerin küreselliği çok düzensizken (Şekil 3.1 a,c), ısıl işlem sonrası grafitlerin küreselliğindeki düzen artmıştır (Şekil 3.1 b, d). Buna ek olarak sementit/beynitik/martensitik matrisinde az grafit ve karbon içeren altlık demir matrisi,

mikro kaynak işlemi sırasında iyi bir metalurjik bağ oluşturmaya yardımcı olacaktır (Carrasco vd., 2022; Chen vd., 2023; Khan vd., 2022). Isıl işlem sonucu matris fazda oluşan sementit/beynitik/martensitik yapıların varlığı Şekil 3.2 Zaman Sıcaklık dönüşüm grafiği üzerinden belirlenmiştir. Şekil 3.2’ de verilen TTT (Zaman Sıcaklık Dönüşüm) diyagramına göre östenit bölgesinde uzun süre tutulan numuneler hızlı bir şekilde beynit bölgesinin sınır sıcaklığı olan 200 ° C civarına soğutulmuş ve az miktarda perlit ve yüksek miktarda beynit mikroyapısı yanında yine az miktarda martenzit içeren bir mikroyapı ile sonuçlanmıştır (grafikte F: Ferrit, P: Perlit, M: Martensit ve B: Beynitik fazları ifade etmektedir).



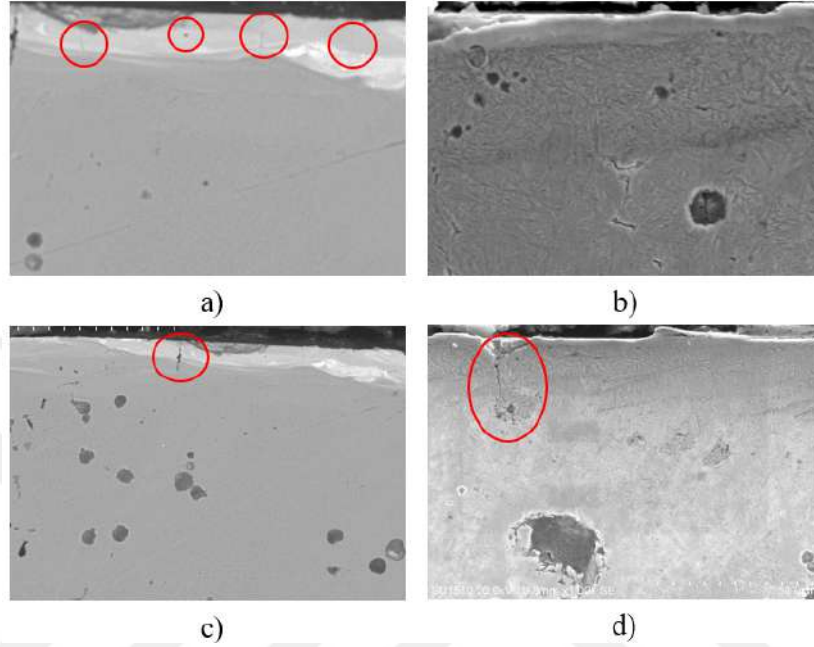
Şekil 3.2. GGG Dökme Demirin Zaman Sıcaklık Dönüşüm Grafiği (Mrzyglód vd., 2017)

### 3.1.2. Kesitten Alınan SEM Görüntüleri

Daha yüksek soğuma hızlarında meydana gelen iç gerilmeler kaplamalar içerisinde çatlakların ve gözenekli bölgelerin artmasına (kırmızı bölgeler) neden olmuştur (Şekil 3.3 a, c). Kaplamalar içerisinde oluşan bu tür kusurlar (çatlaklar ve gözenekler) düşük zorlamalar altında bile yıkıcı hasarlara ve büyük deformasyon kayıpları ile sonuçlanabilmektedir. Bu gibi durumlar zorlu çalışma şartları altında bir süre sonra kaplamaların pul pul dökülme yani delaminasyon riskini artırmaktadır (Concustell vd., 2015; Vashishtha ve Sapate, 2017).

Isıl işlem kaplamaların yüzeye tutunma oranının artmasına yardımcı olmuştur (Carrasco vd., 2022). Ayrıca altlık numune ile kaplama arasındaki termal genleşme uyumsuzluğun giderilmesi de kaplamalar içerisinde oluşan kusur yoğunluğunun azalmasına katkı sağlamıştır (Kayali ve Talaş, 2019, 2021). Isıl işlem sonucu

daha düzenli hale getirilen mikro yapı (Şekil 3.1 b, d), kaplama içerisinde çatlak başlangıcının azalmasına katkı sağlamıştır (Şekil 3.3 b, d). Şekil 3.3 d' de küresel grafitin çeperinde meydana gelen bir çatlağın yüzeye kadar ilerleyen görüntüsüne yer verilmiştir. Genel olarak kaplamaların fiziksel açıdan homojen ve pürüzsüz bir görünüme sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 3.3. a,c) Kaplamalı b,d) Isıl İşlemli Kaplamalı Numunelerin SEM Görüntüleri

### 3.2. XRD Analizleri

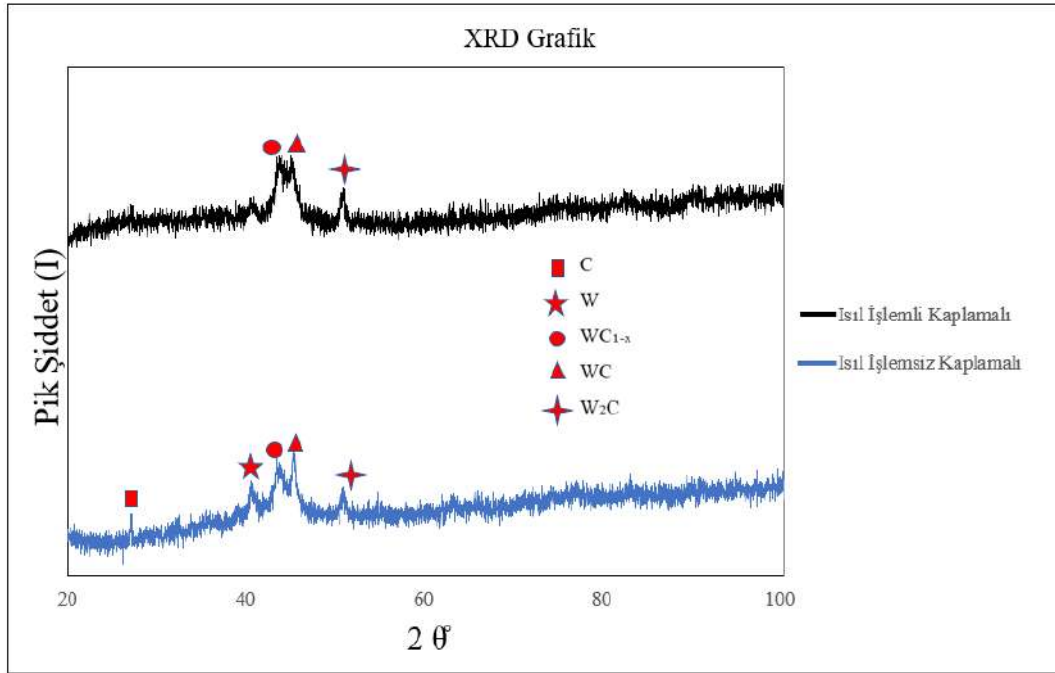
XRD analizi sonucu yoğun pikler üzerinden ısıl işlemsiz kaplamalarda C, W,  $WC_{1-x}$ , WC ve  $W_2C$  fazlar, ısıl işlemli kaplamalarda  $WC_{1-x}$ , WC ve  $W_2C$  fazlar tespit edilmiştir (Valarezo vd., 2010; Ding vd., 2011; Li ve Yang, 2013). Isıl işlemle karbondan arındırılmış bölge sayesinde (Şekil 3.1 b, d) kaplama içerisine difüzyon yolu ile karbon atomunun geçme ihtimali minimuma indirilmiştir. Ancak ısıl işlemsiz kaplama içerisinde XRD analizi sonucu karbon atomunun varlığı tespit edilmiştir. İç gerilmeleri berteraf etmekte zayıf kalan ve matriste serbest halde bulunan karbon atomu SEM görüntülerinde çatlak ve boşluklu yapıların varlığı ile karşımıza çıkmıştır (Şekil 3.3 a, c).

ESD sonucu ortaya çıkan fazların ( $W_2C$ , W ve  $WC_{1-x}$ ) yapı içerisinde oluşması kaplamaların dekarbürizasyona uğradığını göstermektedir. Dekarbürizasyon,

kaplamaların sertlik ve aşınma direnç değerlerinin artmasına katkı sağlamıştır (Zamulaeva vd., 2008; Kayali ve Talaş, 2021). WC/ % 12 Co içeren kaplamaların XRD Analizi Element/Bileşik Dağılımına Tablo 3.1’ de grafiklerine Şekil 3.4’ de yer verilmiştir.

**Tablo 3.1. XRD Analizi Element/Bileşik Dağılımı**

Isıl İşlemlenmiş Kaplamalı	Isıl İşlemlenmemiş Kaplamalı
-	Var (C)
-	Var (W)
Var ( $WC_{1-x}$ )	Var ( $WC_{1-x}$ )
Var(WC)	Var(WC)
Var ( $W_2C$ )	Var ( $W_2C$ )



**Şekil 3.4. a) Isıl İşlemlenmemiş ve Isıl İşlemlenmiş Kaplamalı Numunelerin XRD Grafikleri**

Kaplamaların oluşumunda WC’ ün dekarbürizasyon derecesi, WC’ ün en yoğun pikin, bozunma ürünlerinin ana piklerine oranı olarak ifade edilmektedir (Bartuli vd., 2005). Kaplama içerisindeki WC oranını şu şekilde hesaplamak mümkündür:

$$WC = \frac{I_{WC}}{I_{WC} + I_{W_2C} + I_W + I_{WC_{1-x}}} \quad (3.1)$$

Burada ısıtılmış numunenin  $I_{WC}$ ' deki  $WC$  yoğunluğunu;  $I_{W_2C}$ ' deki  $W_2C$  yoğunluğu;  $I_W$ ' deki  $W$  yoğunluğunu,  $I_{WC_{1-x}}$ ' deki  $WC_{1-x}$  yoğunluğunu göstermektedir (Denklemler 3.1). Bu oran ısıtılmış kaplamalı ve ısıtılmış kaplamalı numunelerde 0,22 ve 0,32 olarak hesaplanmıştır. Kaplamalar içerisinde  $WC$  oranının fazla olması numunenin aşınma direncini (Bkz. Tablo 3.5) ve sertliğini (Bkz. Tablo 3.2) artırmıştır. Bu oranın fazla olması ortamdan karbon çekilmesini artırdığı için numunelerin sünekliğini ve işlenebilirliğini düşürmüştür. İleride yapılan çekme ve üç nokta eğme testleri bu durumu desteklemektedir (Tablo 3.3 ve 3.4). Elde edilen sonuçlar literatürle uyum içerisindedir (Burkov ve Pyachin, 2014; Bartuli vd., 2005; Bolelli vd., 2009).

### 3.3. Sertlik Testi

Kaplamalar içerisinde bulunan  $WC$ , mikrosertliği artırmaktadır. Kaplamaların içeriğinde bulunan  $W_2C$  fazları ve  $W$  elementlerinin varlığı kaplamaların sertliğini ve aşınma dirençlerini önemli ölçüde iyileştirmektedir (E Silva vd., 2006; Vernhes vd., 2013).

$WC$  seramik malzemesi  $Ni$  ve  $Co$  gibi elementleri ile bir arada kullanıldığı zaman altlık numune üzerine tutunabilmesi daha kolay olabilmektedir. Burada  $Ni$  ve  $Co$  elementleri bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcı elementlerin kullanılması kaplama içerisinde çatlakların oluşmasını ve yayılmasını zorlaştırırken kaplamaların sertlik değerlerini artırmaktadır (Couto vd., 2013, 2015; Berger vd., 2008).

Test sırasında en az beş yerden okunan verilerin ortalaması alınmıştır. İlk durumda GGG 60 numunenin yüzey sertlik değeri ortalama  $270 \pm 5.6 HV_{0,2}$  olarak hesaplanmıştır. Isıtılmış yüzey sertlik değeri ortalama  $540 \pm 9 HV_{0,2}$  olarak ölçülmüştür. Devam eden çalışmada ısıtılmış işlem görmemiş ve görmüş numunelerin üzeri  $WC / \% 12 Co$  elektrot malzemesi ile kaplanmıştır. Kaplama sonucu yüzey sertlik değeri ortalama ısıtılmış kaplamalı numunede  $1107 \pm 8 HV_{0,2}$ , ısıtılmış kaplamalı numunede  $1330 \pm 12.5 HV_{0,2}$  olarak ölçülmüştür. Bu değer literatürdeki diğer çalışmalarla örtüşmektedir (Kayali ve Talaş, 2021; Liao vd., 2000; De Oliveira Fernandes vd., 2022; Kul vd., 2016; Savkovic vd., 2019). Tablo 3.2' de numunelerin yüzey sertlik değerlerine yer verilmiştir.

**Tablo 3.2. Yüzey Sertlik Testi Sonuçları**

<b>Numune Adı</b>	<b>Sertlik Değeri HV<sub>0,2</sub></b>
<b>Isıl İşlemsiz</b>	270 ± 5.6
<b>Isıl İşlemlı</b>	540 ± 9
<b>Isıl İşlemsiz Kaplanmış Numune WC/ %12 Co</b>	1107 ± 8
<b>Isıl İşlemlı Kaplanmış Numune WC/ %12 Co</b>	1330 ± 12.5

Yüzeyde biriktirilen WC/ %12 Co kaplamalar numunelerin yüzey sertlik değerini artırmıştır. Isıl işlem sonrası matris fazda WC daha yoğun olması (Şekil 3.4) ısıl işlemsiz kaplamalara kıyasla yüzey sertlik değerinin artmasına katkı sağlamıştır. Isıl işlemsiz kaplamalı numunenin yüzey sertlik değerinin, ısıl işlemlı kaplamalı numuneye göre daha düşük çıkmasının sebebi kaplama matrisi içerisinde serbest halde bulunan karbon atomunun kaplama dayanımını düşürmesinden kaynaklanabilir (Şekil 3.4). Tablo 3.2' ye göre ısıl işlem numunelerin yüzey sertlik değerini 2 kat artırırken, ESD ile yapılan WC/ %12 Co kaplama numunelerin yüzey sertlik değerini 5 kat artırmıştır.

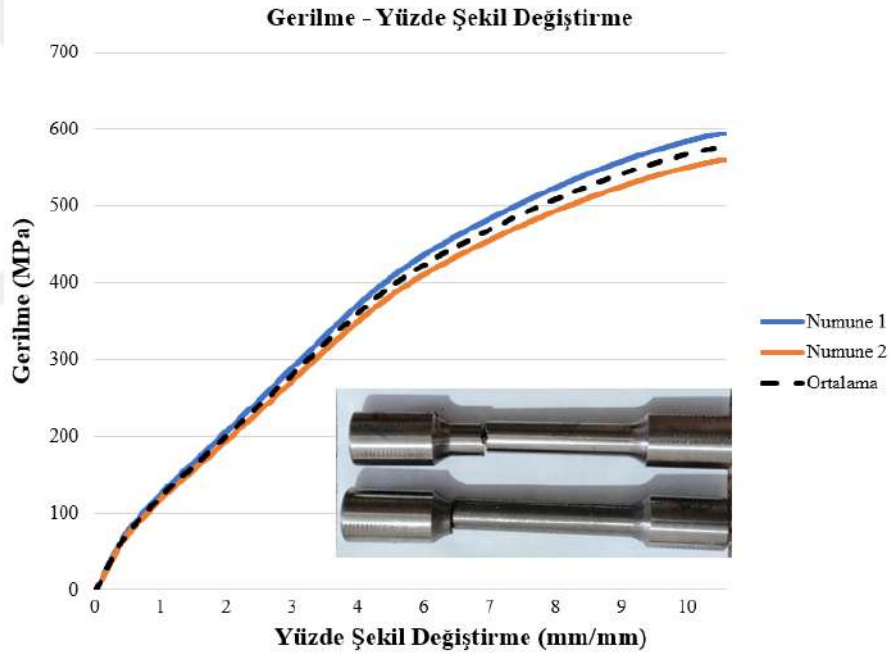
### 3.4. Çekme Testi

Testler, ısıl işlemsiz, ısıl işlemsiz kaplamalı, ısıl işlemlı ve ısıl işlemlı kaplamalı numuneler olmak üzere dört farklı aşamada yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. ESD kaplama çekme çubuğunun yüzeyine uygulanmıştır. Dökümü gerçekleştirilen numunelerin çekme testi sonrası ortalama çekme dayanımı ve yüzde uzama değerlerine Tablo 3.3' de yer verilmiştir.

**Tablo 3.3. Çekme Testi Sonuçları**

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Şekil Değiş-tirme %
Isıl İşlemsiz	578 ± 17	10,4
Isıl İşlemsiz Kaplama-lı	644 ± 5	7,6
Isıl İşleml-i	722 ± 11	4,8
Isıl İşleml-i Kaplama-lı (WC/ % 12 Co)	778 ± 29	2,7

Şekil 3.5 ' de ısıl işlem görmemiş numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiş-tirme eğrisine yer verilmiştir.

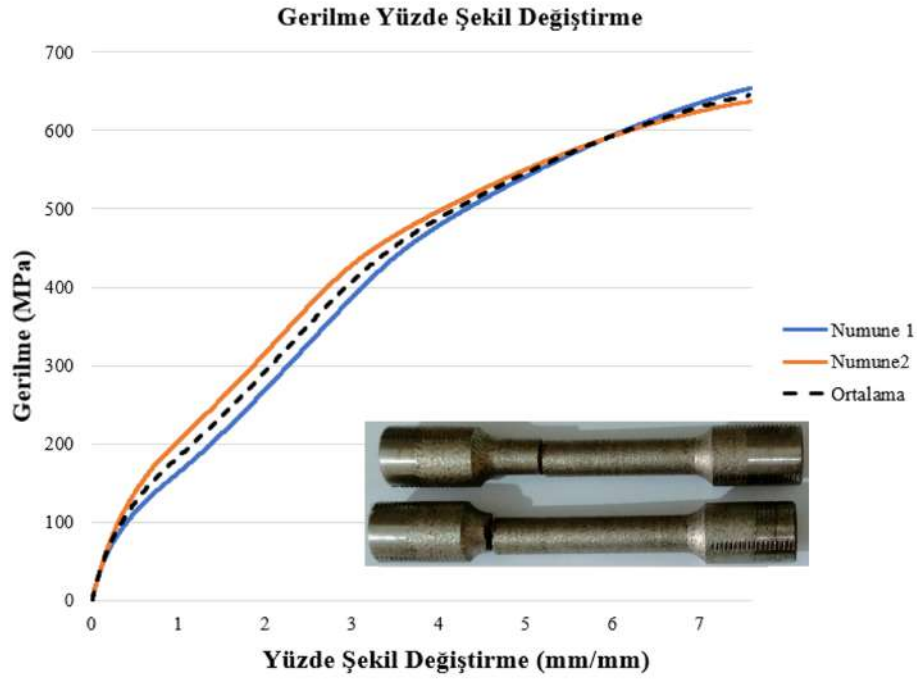


**Şekil 3.5. Isıl İşlemsiz Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiş-tirme Grafiği**

Altlık numunenin ortalama çekme dayanımı  $578 \pm 17$  MPa ve yüzdece uzama 10,4 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Łagoda (2001) ve Puustinen (2015) çalışmalarında çekme mukavemet değerini sırası ile 649 MPa ve 580 MPa, yüzdece uzama değerlerini 10,9 mm/mm ve 10 mm/mm olarak hesap etmişlerdir. Literatürde elde edilen değerlerin bu çalışmada elde edilen değerlere yeterince yakınsadığını görmekteyiz.

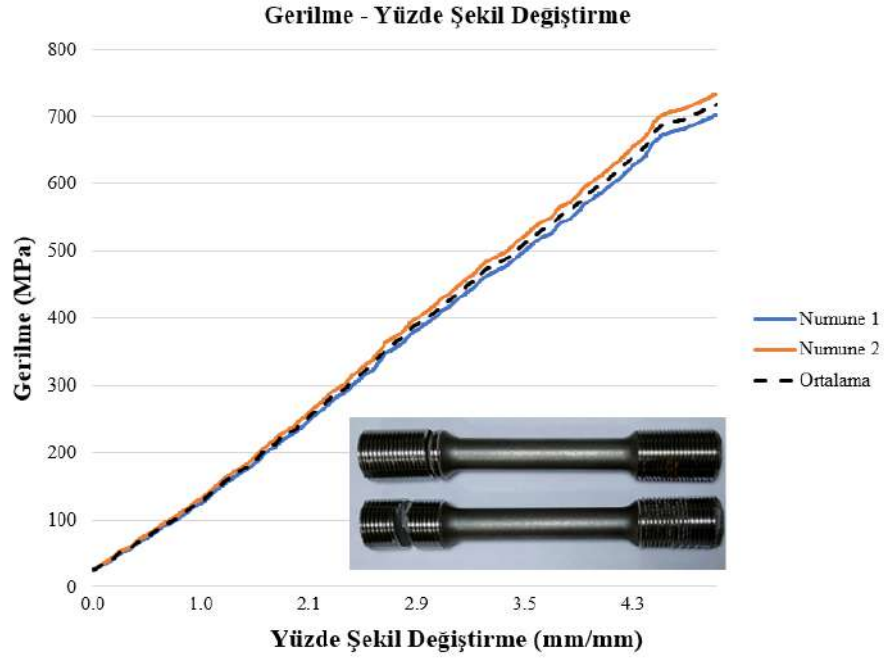
Isıl işlem-siz kaplamalı çekme testi eğrisi, ısıl işlem-siz kaplamasız çekme testi grafiğine benzer şekilde sonuçlanmıştır. Burada her ne kadar yüzeyde sert kap-

lamalar biriktirilse de altlık numunenin mikro yapısı ilk durumla aynı olduğu için test sonuçlarında bariz değişimler gözlemlenmemiştir. Kaplama ilk duruma göre deneyin sünekliğini düşürmüştür. Yüzeyde biriktirilen sert kaplamalar numunelerin çekme gerilmesinin artmasına neden olmuştur. Test sonucu maksimum çekme gerilmesi 644 MPa, yüzdece şekil değiştirme 7,6 mm/mm olarak hesap edilmiştir. Şekil 3.6' de ısıl işlemsiz kaplamalı bir numunenin çekme testi eğrisine yer verilmiştir.



**Şekil 3.6. Isıl İşlemsiz Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği**

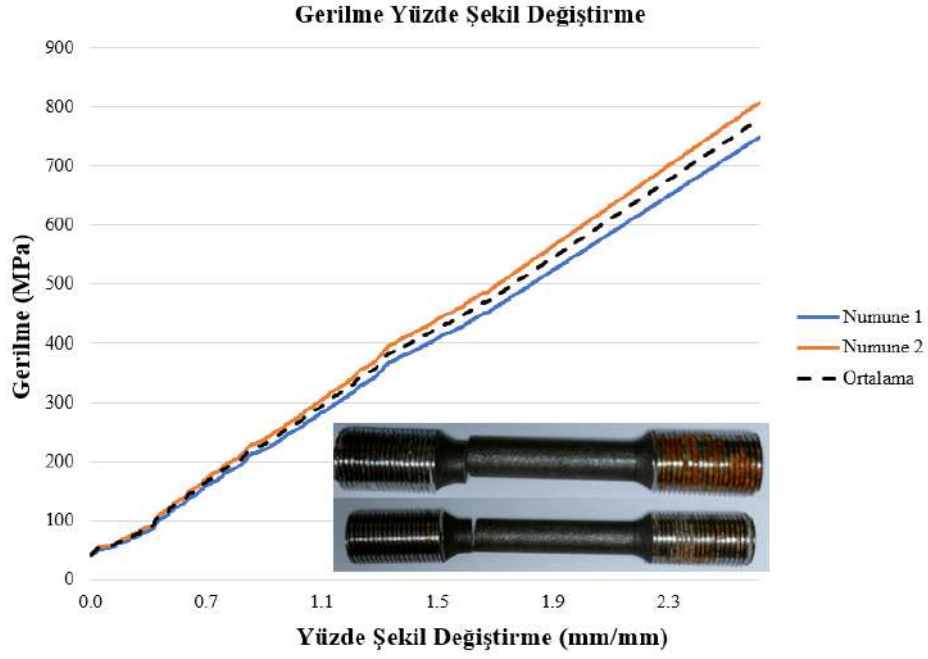
Isıl işlem, mikroyapıyı daha düzenli ve daha sert olan bir yapıya dönüştürmüştür (Şekil 3.1 b, d). Azalan yüzde uzama -düşük deformasyon kapasitesi- daha kırılğan yani gevrek bir yapı oluşumuna yol açmıştır. Şekil 3.7 ' de ısıl işlem görmüş bir numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme eğrisine yer verilmiştir.



**Şekil 3.7. Isıl İşlemlenmiş Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değişirme Grafiği**

Isıl işlemden sonra çekme dayanımı  $722 \pm 11$  MPa ve yüzdece uzama 4,8 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Isıl işlemsiz kaplamalı/kaplamasız çekme testi ile karşılaştırdığımızda çekme dayanımının artmasında ve yüzdece uzamanın azalmasında asıl etkiye ısıl işlemin neden olduğunu söyleyebiliriz.

Isıl işlemlenmiş WC/ % 12 Co ile kaplanmış çekme çubuğunda gevrek bir kırılma gözlemlendi. Şekil 3.8' de ısıl işlemlenmiş kaplamalı numunelerin Gerilme - Yüzde Şekil Değişirme grafiğine yer verilmiştir. Uzama şekil değişirme grafiğinde görüldüğü gibi, belirgin bir akma noktası mevcut değildir. Aynı yorumu ısıl işlemlenmiş kaplamalı çekme testi için de söyleyebiliriz (Şekil 3.8). Bu gevrek malzemelerde sıklıkla görülen bir durumdur. Ani kopma ile sonuçlanan bu eğrilerde Şekil 3.7 de verildiği gibi kısmi bir süneklik matrisin karbon miktarının azalması ile beraber kır dökme demir gibi nerdeyse hiç bir uzama göstermeyen dökme demirlere göre çok az uzama ile sonuçlanmıştır. Şekil 3.8 de ise, daha düşük yüzde uzamanın ve daha doğrusal bir eğrinin varlığı ile daha önce belirtildiği gibi içyapı değişimi ve ayrıca matrisin karbonca zenginleşmesi veya küresel grafitin şekil değiştirmesi ile ilişkili olabilir.



**Şekil 3.8. Isıl İşlemlili Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değişirme Grafiği**

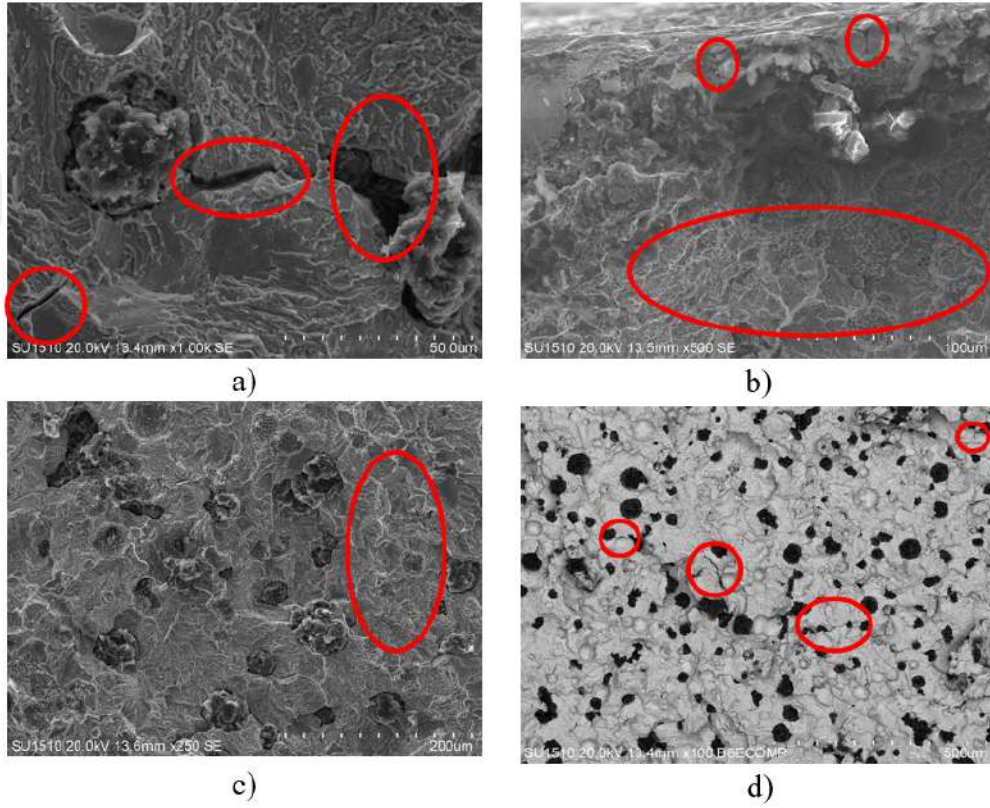
Sonuçta çekme dayanımı  $778 \pm 29$  MPa ve yüzdece uzama 2,5 mm/mm olarak hesaplanmıştır. İlk duruma göre çekme gerilmesinde %35' lik artış, yüzdece uzamada ise 4 katlık bir azalış olmuştur.

Gerilme - Şekil Değişirme eğrisinin eğimi elastiklik modülü ile ifade edilir. Elastiklik modülü ne kadar büyük olursa numune üzerinde oluşan deformasyonda bir düşüş, sertlikte ise bir artış meydana gelmektedir. Elastik modül, malzemenin elastik deformasyona direnme kapasitesinin bir ölçütüdür. Bu nedenle ısıl işlemlili kaplamalı numunelerin elastik deformasyona karşı direnci maksimumdur (Bkz. Şekil 3.8).

Çekme testinden sonra, numunelerin kırılma morfolojileri gözlemlenmiştir (Şekil 3.9). Grafit nodülleri stres değerlerinin artmasına ve yorulma aşınmasına neden olabilmektedir. Şekil 3.9 b' de kırmızı ile gösterilen bölgedeki pullaşma, çatlak oluşumunun yüzeye çok yakın olduğunu göstermektedir. Şekil 3.9 b' de yüzeyde oluşan çatlakların hemen altında oluşan pullaşmalar kırmızı daire içerisinde gösterilmiştir. Yine Şekil 3.9 c' de kırmızı daire ile gösterilen bölgede küresel grafitlerin etrafında pullaşmalar söz konusudur. Şekil 3.9 a' da küresel grafitler arasında gözlemlenen çatlakları daha küçük büyütme bir SEM görüntüsünde de görebilmek mümkündür (Şekil 3.9 d). Kaplama ile altlık numune arasında çatlak başlangıcının gözlenmemesi, İmalat sırasında artık gerilmelerin çatlak başlangıcını bastırmasından kaynaklanabilir (Pedranz vd., 2023).

Düşük büyütme bir SEM’ de küresel görüntüye sahip nodüller (Şekil 3.9 d), daha büyük büyütmelerde keskin kenarlara sahiptir (Şekil 3.9 a, c). Çentik etkisinden dolayı bu durum lokal olarak iç gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Şekil 3.9 a’ da küresel grafitlerin etrafında meydana gelen çatlaklar, iç gerilmenin bir sonucu olabilir.

Isıl işlem sonucu, altlık numunenin dekarbürize ve ferritik yüzey yapısı çatlakların hem altlık numunede hem de kaplamada ilerlemesini sınırlandırmıştır (Pedranz vd., 2023; Li vd., 2022; Pereira vd., 2023; Gebhardt vd., 2023).

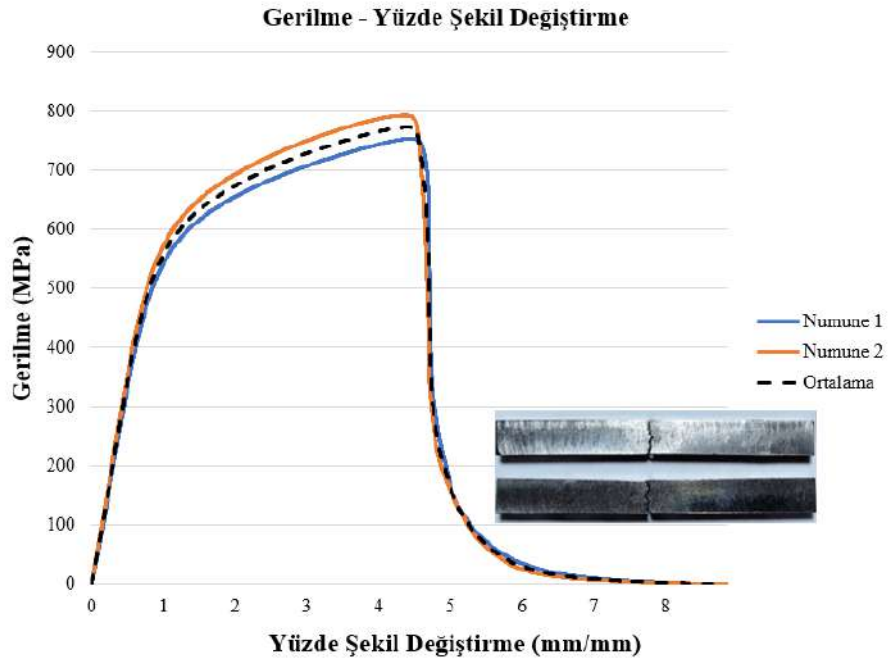


**Şekil 3.9. Çekme Testi Kesitinden Farklı Büyütmelerde Alınan SEM Görüntüleri a) 1000X b) 500X c) 250X d) 100X**

### 3.5. Üç Nokta Eğme Testi

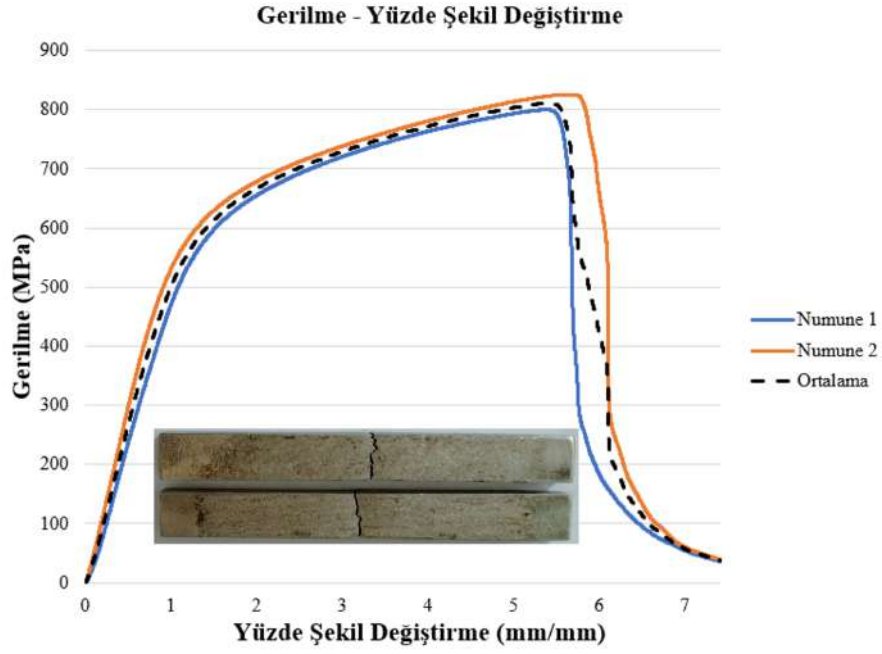
Testler ısıl işlemsiz, ısıl işlemsiz kaplamalı, ısıl işlemlili ve ısıl işlemlili kaplamalı olmak üzere dört farklı aşamada yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. ESD kaplama üç nokta eğme çubuğunun yüzeyine uygulanmıştır. Şekil 3.10’ de ısıl işlemsiz küresel grafitli dökme demirin Gerilme - Yüzde Şekil Değişirme eğrisine yer verilmiştir. Sünek bir yapıya sahip dökme demir kuvvet altında ani bir eğilmeye

maruz kalmıştır. Devamında eğilme hızı azalarak eğri parabolik bir şekilde sonlanmıştır. Isıl işlemsiz döküm numunenin ortalama maksimum eğilme gerilmesi  $771 \pm 18.5$  MPa, yüzde şekil değiştirmesi 8.3 mm/mm olarak hesap edilmiştir.



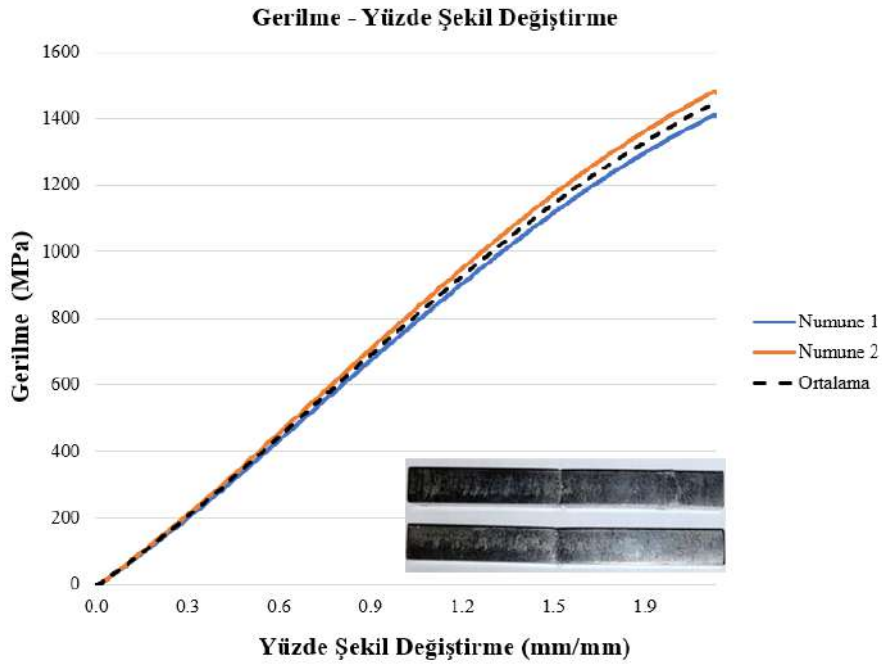
**Şekil 3.10. Isıl İşlemsiz Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği**

Şekil 3.11’de ısıl işlemsiz kaplamalı numunenin Gerilme - Yüzdece Şekil Değiştirme eğrisine yer verilmiştir. Kaplama sonucu numunelerin sünekliği azalırken, maksimum eğilme gerilmesinde artış gözlemlenmiştir. Isıl işlemsiz kaplamalı numunenin maksimum eğilme gerilmesi  $809 \pm 10$  MPa, yüzde yer değiştirmesi 7,4 mm/mm olarak hesaplanmıştır.



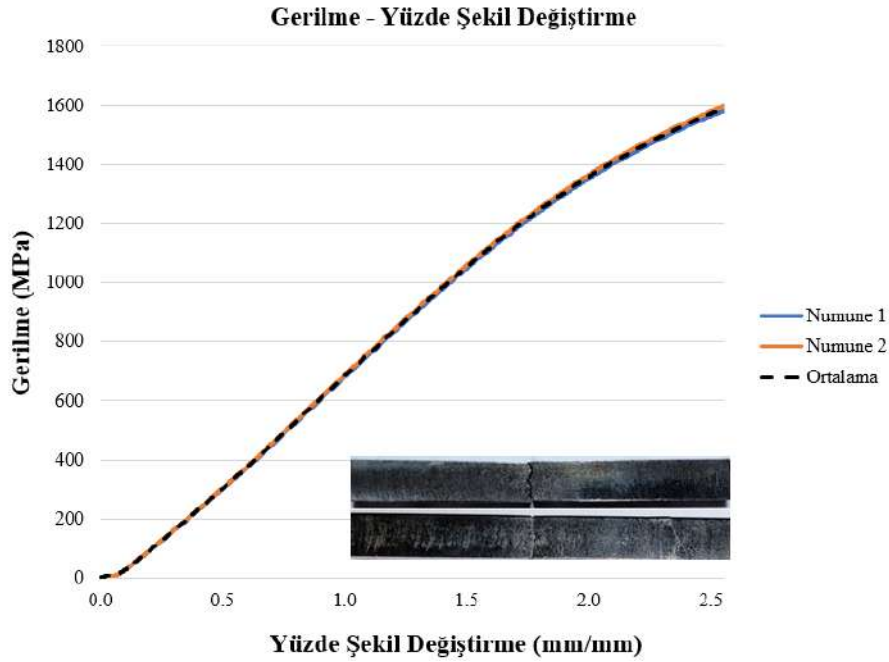
**Şekil 3.11. Isıl İşlemsiz Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği**

Şekil 3.12' de ısıl işlem görmüş numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme eğrisine yer verilmiştir. Isıl işlem sonucu gevrek bir yapıya dönüşen numune eğilme kuvveti altında lineer bir şekilde artmıştır. Isıl işlem görmüş numunenin maksimum eğilme gerilmesi  $1456 \pm 26$  MPa, yüzde yer değiştirmesi ise 2 mm/mm olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.12. Isıl İşlemlili Numunenin Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği**

WC/Co elektrotu ile yapılan kaplama plastik deformasyon enerjisini sınırladığı ve artan gerilmelerin çatlak yayılmasına engel olduğu sonucuna varılabilir. Kobalt matrisinin çözeltiyi güçlendirmesi, WC/Co kaplamaların mekanik özelliklerini iyileştirmiştir (Sahraoui vd., 2010; Antonov vd., 2015; Hulka vd., 2012). Şekil 3.13' de ısıtılmış ve kaplamalı numunenin üç nokta eğme grafiğine yer verilmiştir.



**Şekil 3.13. Isıl İşlemli ve Kaplamalı Num. Gerilme - Yüzde Şekil Değiştirme Grafiği**

Isıl işlemli ve kaplamalı numune Şekil 3.12' deki grafiğe benzer bir şekil göstermiştir. Yüzeyde biriktirilen sert kaplamalar eğme testi sırasında yine gevrek bir kırılmaya neden olmuştur. Toplam yüzde yer değiştirme 2.5 mm/mm, maksimum eğilme gerilmesi  $1588 \pm 8$  MPa olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.4' de eğilme testi sonucu numuneler üzerinde oluşan maksimum eğilme gerilmesi (MPa) ve yüzde uzama (%) verilerine yer verilmiştir. Kaplama, maksimum eğilme gerilmesini ilk duruma göre yaklaşık 2 kat artırmıştır. Tablo 3.4 ve yukarıdaki ilgili grafikler incelendiğinde ısıtılmış ve kaplama sonucu numunelerin gevrek olarak kırıldığı ve kaplamalar içerisindeki WC varlığı eğilme mukavemetini artırdığı söylenebilir Li vd. (2022).

**Tablo 3.4. Eğilme Testi Sonuçları**

<b>Numune Adı</b>	<b>Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)</b>	<b>Yüzde Şekil Değişirme %</b>
<b>Isıl İşlemsiz</b>	771 ± 18,5	8,3
<b>Isıl İşlemsiz Kaplamalı</b>	809 ± 10	7,4
<b>Isıl İşlemli</b>	1426 ± 26	2
<b>Isıl İşlemli Kaplamalı WC/ %12 Co</b>	1588 ± 8	2,5

Haddeleme işlemi sırasında merdane ile iş parçasının birbirine temas ettiği noktalarda eğilme gerilmelerinde artışlar meydana gelmektedir. Asal eksenden yüze varıncaya kadar maksimum değere ulaşan eğilme gerilmesi, buralarda merdane yüzeylerindeki deformasyon kayıplarını artırmaktadır. Malzemenin iç yapısındaki kusurlardan dolayı yüzeyde düzensiz dağılan gerilmeler, merdanelerin bir süre sonra yassılaşmasına neden olmaktadır. Yassılaşma, merdane temas yüzeyinin büyümesine ve ezilme bölgesindeki giriş ve çıkış düzlemlerinde kaymalarla sonuçlanmaktadır (Yıldız, 2011). Merdanelerin dayanımı iç yapıda ısıl işlemle, yüzeyde ise kaplamayla artırıldı. Bu sayede haddeleme kuvvetinin merdane üzerindeki etkileri minimuma indirildi. Elde edilen sonuçlar bu iddiayı desteklemektedir.

### 3.6. Aşınma Testi

GGG 60 numunesi üzerinde oluşturulan kaplamaların kuru kayma davranışlarını belirleyebilmek için 250 m' lik bir mesafede aşınma testi uygulanmıştır. WC/ %12 Co kaplamaların sürtünme davranışı, aşınma hacim kayıpları hesaplanmış, aşınmış yüzeylerin karakterizasyonu SEM-EDS' de yapılmıştır.

Test sonrası 2 Boyutlu Profilometre (Mitutoyo SJ-301) ile aşınma derinlikleri belirlendi. Aşınma izi dairesel olduğu için aşağıda belirlenen denklemler ile aşınma hacim kayıpları ve hızları hesaplandı (Denklem 3.2, 3.3). Devamında yüzeyde oluşan WC/ %12 Co kaplamaların varlığı ve aşınma izleri SEM/EDS ile gör-

selleştirildi.

$$V = \pi * D * P \quad (3.2)$$

$$W_a = V/(N * S) \quad (3.3)$$

Burada,  $V$ : hacim kaybını ( $mm^3$ ),  $D$ : aşınma iz çapını ( $mm$ ),  $P$ : Profilometreden ölçülen aşınma derinlik alanını ( $mm^2$ ),  $W_a$ : aşınma oranını ( $mm^3/Nm$ ),  $S$ : aşınma mesafesini ( $m$ ),  $N$ : test kuvvetini ifade etmektedir. Tablo 3.5' de aşınmaya maruz kalmış numunelerin aşınma hacim kayıpları ve hızlarına yer verilmiştir.

**Tablo 3.5. Aşınma Hacim Kayıpları ve Oranları**

<b>Numune Adı</b>	<b>Hacim Kaybı</b> $mm^3$	<b>Aşınma Oranı</b> $\times 10^{-6}$ $mm^3/Nm$
<b>Isıl İşlemsiz Kaplanmamış</b>	1,6956	169,56
<b>Isıl İşlemlili Kaplanmamış</b>	0,9734	97,34
<b>Isıl İşlemsiz Kaplanmış</b>	0,6908	69,08
<b>Isıl İşlemlili Kaplanmış</b>	0,3385	33,85

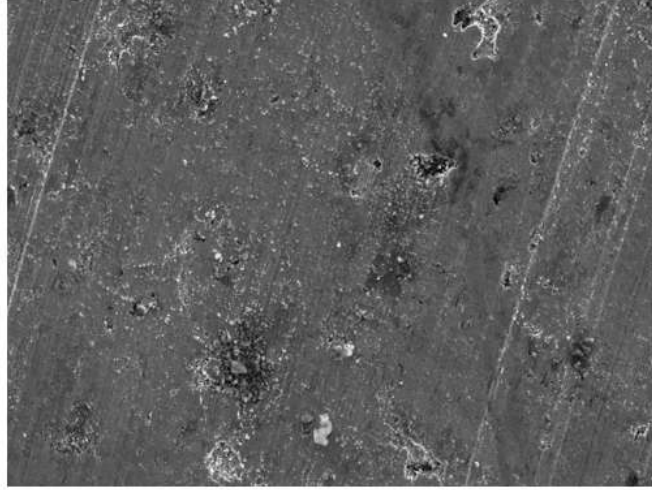
Tablo 3.5 incelendiğinde ısı işlem uygulanan altlık numunenin aşınmaya olan direnci % 43 oranında arttığı görülmektedir. Aşınma direnci bu aşamada yüzey sertlik değeri ile orantılı olarak artmıştır (Zhang vd., 2023). Yine ısı işlem uygulanmış kaplamalı ve kaplamasız numunelerin hacim kayıpları karşılaştırıldığında, kaplama aşınma direncini % 65 oranında artırmıştır. Kaplamalar içerisinde oluşan ara fazlar ( $W$ ,  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ) dekarbürizasyon ihtimalini artırmıştır. Dekarbürizasyon genellikle yüzeyden metalurjik bir reaksiyon sonucu örneğin ısı işlem gibi, karbon transferi olarak adlandırılır. Bu durumda, kaplama sırasında yüzeyde bulunan grafit ve matriste bulunan karbonun mikro kaynak etkisinden dolayı  $W$  ile birleşmesi ve bileşik yapması aşınma değerlerindeki farklılıklara neden olmuştur (bkz. Şekil 3.4) (Bartuli vd., 2005; Bolelli vd., 2009). Aşındırıcı bilya ile altlık arasına giren veya aşınma nedeniyle alt tabakanın delaminasyonundan kaynaklanan metalik kalıntılar da yüzey aşınmasının artmasına neden olmaktadır (Burkov ve Krutikova, 2020; Kayali ve Talaş, 2019).

C45 (Burkov ve Krutikova, 2020), T15K6 (Tarellyk vd., 2020), AISI316L (Kayali ve Talaş, 2019) gibi malzemeler üzerine yapılan WC/Co kaplamalar aşınma davranışını genel anlamda 1,5 ila 7,5 kat artırmıştır. WC/Ti-6Al-4V (Ocelik vd., 2005), Ni-WC (Farahmand ve Kovacevic, 2015) elektrot numuneleri ile yapılan kaplamalar aşınma performansını %33 - 40 oranında artırmıştır. Deney sonucu GGG 60 numunelerin aşınma performansı 5 kat artmıştır. Bu değer literatürle uyumludur (Burkov ve Krutikova, 2020; Tarellyk vd., 2020; Kayali ve Talaş, 2019).

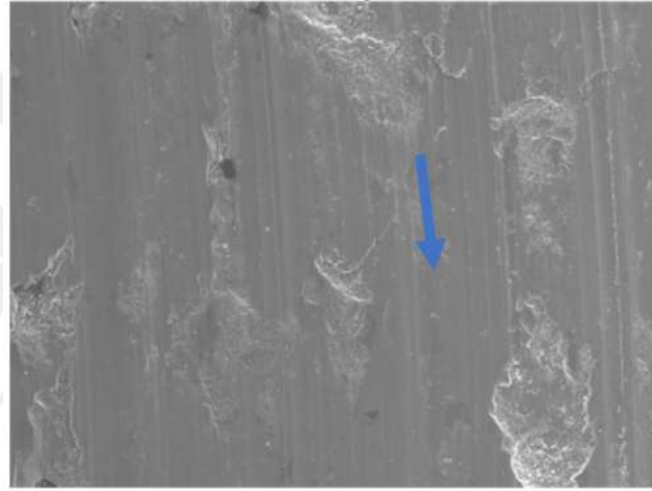
Kaplanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri yüksek olmasına rağmen bazı kaplamaların aşınmaya olan davranışları düşük çıkabilmektedir. Kaplamaların içerisinde oluşan çatlak varlığı aşınma direncini düşürmektedir. Yorulmanın etkisi altında bu tür çatlaklar delaminasyona neden olmaktadır. Bu da kaplamanın altlık numune üzerinden pul pul dökülmesine neden olabilmektedir (Kayali ve Talaş, 2021). Tablo 3.5' de kaplamalı numunelerin aşınma kayıplarındaki değişimler delaminasyonun bir etkisi olabilir.

Tekrarlanan yükler, çoğu metalik sistemde çukurlaşma şeklinde geniş malzeme kaybına neden olmaktadır. Küresel grafitler, matrise güçlü bir şekilde bağlı değildir. Küresel grafitler yüzeye yakın olduğu zaman aşınma yükü tam bu bölgelerden geçtiğinde stres değerlerinde ani yükselmeler meydana gelmektedir. Bu durum Tablo 3.5' de meydana gelen aşınma farklılıklarının bir diğer sebebi olabilir. Şekil 3.14' de aşınmanın ısıtma işlemi üzerindeki etkisi incelendi.

a)

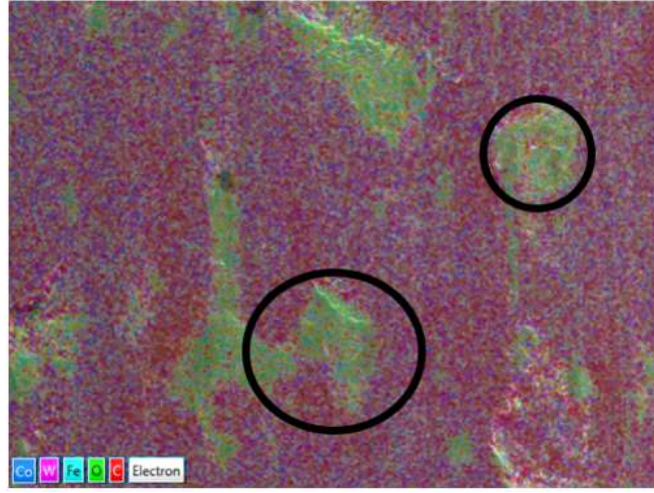


b)



**Şekil 3.14. a) Isıl İşlemlenmiş b) Isıl İşlemlenmemiş Kaplamasız Numunelerin SEM görüntüleri**

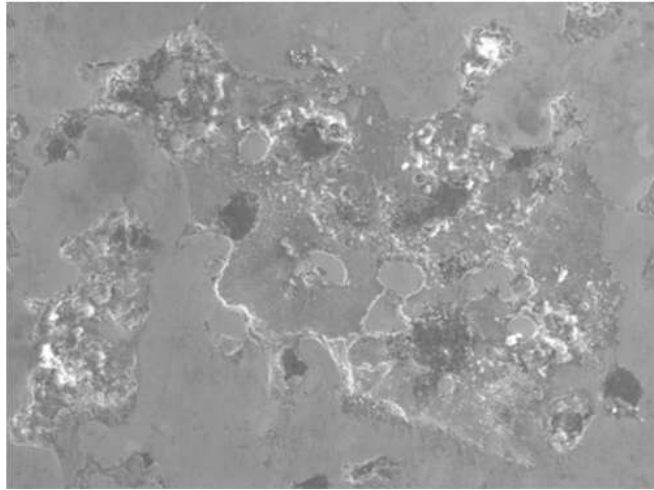
Isıl işlemlenmiş kaplamasız numunede aşınma daha az meydana gelmiştir. Burada oluşan aşınma türü daha çok adheziftir (Şekil 3.14 a). Isıl işlemlenmemiş kaplamasız numunelerde ise aşınma yönünde oluşan çizgilerin varlığı abrasif aşınmanın bir sonucudur (Kayali ve Talaş, 2019, 2021). Abrasif aşınmalar Şekil 3.14b’ de ok ile gösterilmiştir. Beyaz bölgelerde ise oksitlenmeler meydana gelmiştir. Şekil 3.15’ de gösterilen EDS (Mapping) görselinde oksitlenmiş bölgeler yeşil renk ile gösterilmiş olup bu iddiayı desteklemektedir.



**Şekil 3.15. Isıl İşlemsiz Kaplamasız Numunenin EDS (Mapping) Görüntüsü**

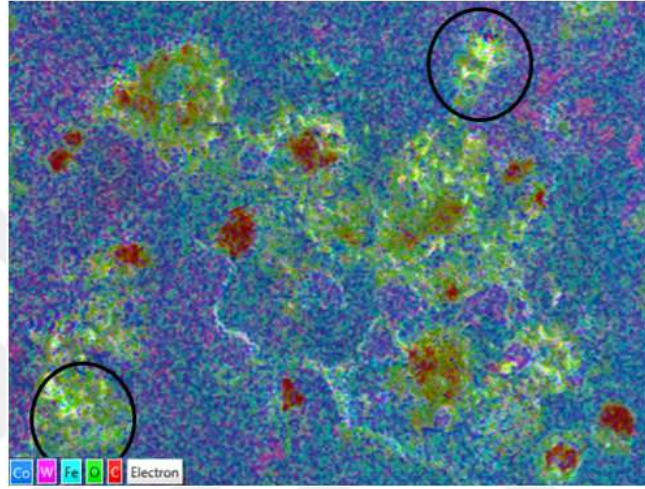
Isıl işlemsiz kaplamasız numunede oluşan delaminasyonun çoğu yüzeye yakın grafit nodüllerinin bulunduğu bölgelerde olduğu görülmektedir. Aşınma deneyi sırasında yüzeye belirli bir kuvvet altında oldukça küçük bir alana baskı yapan noktasal yükün oluşturduğu düşey eksenel gerilimin metalik matris tarafından hasara yol açmadan taşınmasına karşın, daha yumuşak ve kırılğan olan grafit nodüllerinin hızlı bir şekilde deformasyonu ile kaplama tabakasının esnekliği artan tekrarlı yüklenmelerde mikro çatlak oluşumuna ve ardından delaminasyona sebep olmaktadır. Bu nedenle, tekrarlı yüklenmelerde ortaya çıkan ve bariz olarak yorulma hasarı olarak değerlendirilebilen pul oluşumu ve yüzeyden ayrılması çatlak oluşumunun kaplama seviyesinde kaldığını göstermektedir.

Şekil 3.16' de ısıl işlem görmüş kaplamalı numunenin aşınmaya olan etkisi incelenmiştir.



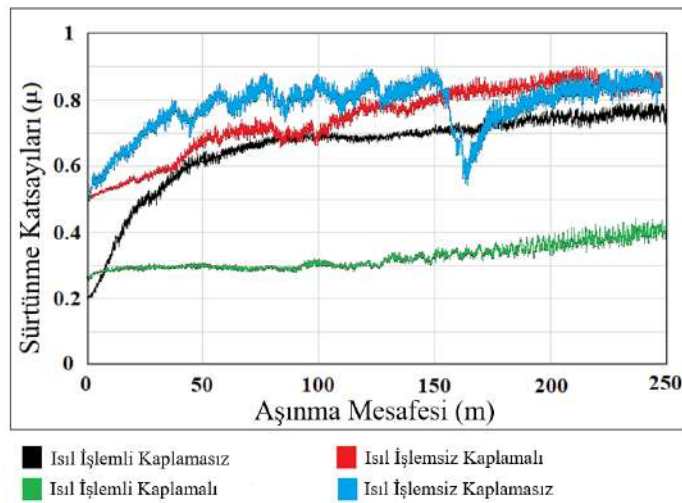
**Şekil 3.16. a) Isıl İşlemli Kaplamalı Numunenin SEM görüntüsü**

Isıl işlemlili kaplamalı numunelerin yüzeylerinde oksitlenmeler meydana gelmiştir. Şekil 3.17' de yeşil renk ile gösterilen yerlerde oksijen daha çok yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla bu yerlerde oksidatif aşınmalar meydana gelmiştir. Oksidatif aşınma bilindiği gibi, tekrarlı sürtünme olayında matrisin aşırı ısınması ve ardından aşındırıcı bilyesi tarafından sıyrılan veya temizlenen yüzeyin hava ile teması sonucu oksitlenmesi, oksit tabakasının zamanla kalınlaşması ve dökülmesi ile ortaya çıkan metalurjik bir durumdur. Aşındırıcı bilye yüzeyi aşındırır aşındırmaz oksidasyon reaksiyonu gerçekleşmiştir.



Şekil 3.17. Isıl İşlemlili Kaplamalı Numunenin EDS (Mapping) Görüntüsü

6 mm Alümina ( $Al_2O_3$ ) bilye ile yapılan aşınma testi sonucu kaplamalı ve kaplamasız numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.18' de verilmiştir.



Şekil 3.18. Numunelerin Sürtünme Katsayı Grafikleri

Isıl işlem uygulanan numunede sürtünme katsayısı ortalama 0,51 olarak elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanmayan numuneye göre bu değer %34 daha düşük çıkmıştır. Burada numune üzerinde uygulanan ısı işlem etkili olmuştur (Günen vd., 2022; Gul, 2010). Isıl işlemsiz kaplamasız numunenin grafiği incelendiğinde, yüzeyin daha pürüzlü olmasına bağlı olarak aşınma testinin başlangıcından itibaren sürtünme katsayısında ani bir yükseliş meydana gelmiştir. Aşınma diyagramında görülen bu düzensizlik genelde, yüzeyde ani olarak meydana gelen çukurcukların ve akabinde ortaya çıkan ve tekrarlı olarak kaybolup tekrar ortaya çıkan yorulmaya bağlı ve oksidasyonla devam eden yüzey hatalarının oluşumuna bağlı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3.5 ve Şekil 3.18 birlikte incelendiğinde artan kayma mesafesi yüzeyde oluşan aşınma kaybını artırmıştır. Aşınmış bölgenin yüzey sertliği ESD kaplama yöntemi ile iyileştirilmiştir. Sonuçta ısı işlemli kaplamalı bir numunede sürtünme katsayısı 0,32 olarak elde edilmiştir. Literatürde bu değer 0,34-0,40 aralığındadır (Wang vd., 2009; Zamulaeva vd., 2008; Burkov ve Krutikova, 2020; Farahmand ve Kovacevic, 2015). Isıl işlemsiz kaplamalı bir numuneye göre %22 daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Numuneye uygulanan ısı işlem sürtünme katsayısını her iki durumda da düşürürken kaplama sürtünme katsayısını %30 oranında düşürmüştür.

Haddeleme işlemi sırasında, plastik deformasyon ve sürtünme kuvvetinin etkisi ile ısı üretilmektedir. Bu ısı, merdane çapının büyümesine neden olur. Termal bombe etkisi olarak adlandırılan bu hata, özellikle ince malzemelerde göbek dalgalamansı ile sonuçlanmaktadır. Nihai ürün kalitesini etkileyen bu durumun önüne düşük sürtünme katsayıları ile geçebilmek mümkündür (Yıldız, 2011). İleriki çalışmalarda merdanelere uygulanan ısı işlem ve kaplamalar, bu gibi hataların giderilmesine katkı sağlamıştır.

### 3.7. Haddeleme

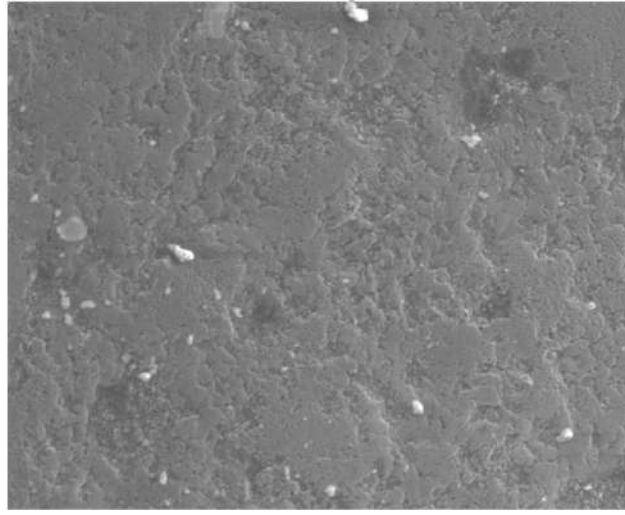
#### 3.7.1. Haddeleden Sonra Yüzeyden Alınan SEM/EDS Görüntüleri

Haddeleme deneyi Şekil 2.25'deki cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney St 37 soğuk haddelenmiş lama ve Al6035 lamalar kullanılarak yapılmıştır. İlk haddeleme işlemi ST 37 soğuk haddelenmiş bir lama ile yapılmıştır. Deney, 20 kN' luk bir haddeleme kuvveti altında 1m/dk hızda gerçekleştirilmiştir. 100 metre haddeleme yapıldıktan sonra merdane kama yuvasının olduğu yerden kırılmıştır. Kırılan merdanenin görüntüsüne Şekil 3.19 ' de yer verilmiştir. Bu merdanenin kırılan kısmının tam ortasından bir kesit çıkartılmış ve SEM/EDS görüntüleri incelenmiştir.



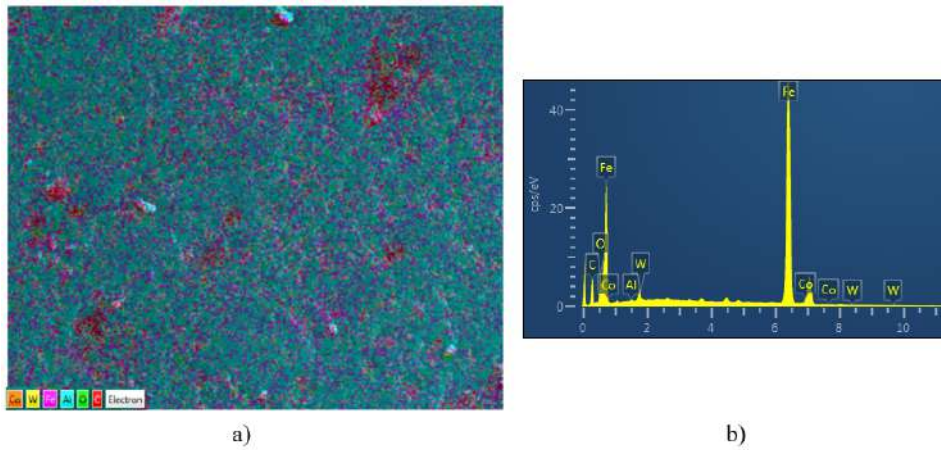
**Şekil 3.19. St 37 Lama Haddeleme İşleminde Sonra Yüzeyde Oluşan Çatlak**

İlk haddeleme işlemi sonrası merdane yüzeyinden alınan SEM görüntülerine Şekil 3.20' de yer verilmiştir.



**Şekil 3.20. St 37 Lama Haddelenme İşlemi Sonrası Yüzeyden Alınan SEM Görüntüsü**

Yukarıda homojen bir görüntü elde edilmiştir. EDS görüntüleri incelendiğinde yukarıdaki beyaz noktalarda daha çok C elementinin yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Soğuk haddelenmiş bir lama (St 37), kaplama tabakasına zarar verdiği için merdane yüzeyinde W ve Co elementleri yok denecek kadar az düzeydedir. Şekil 3.21’ de soğuk haddelenmiş merdanenin EDS ve Elementel Haritalama görüntülerine yer verilmiştir.



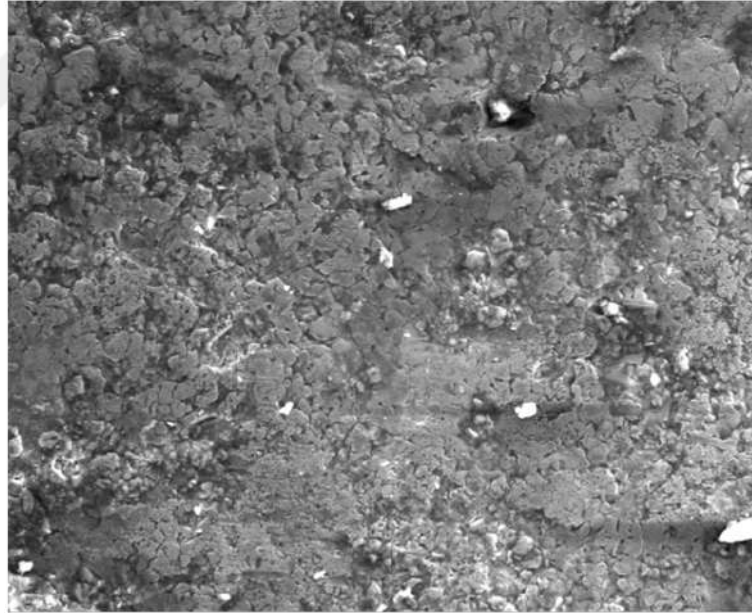
**Şekil 3.21. St 37 Lama İle Haddelenmiş Merdanenin a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri**

İkinci haddelenme işleminde Al 6035 lama 500 metre boyunca haddelenmiştir. Burada haddelenme kuvveti ortalama 5 kN olarak sürekli sabit tutulmaya çalışılmıştır. Haddelenmeden sonra merdanenin tam ortasında Alüminyum katman oluşmuştur. Şekil 3.22’ de oluşan bu katman ve SEM/EDS görüntüleri için çıkartılan kesitlerin yerleri (kırmızı kareler) gösterilmiştir.



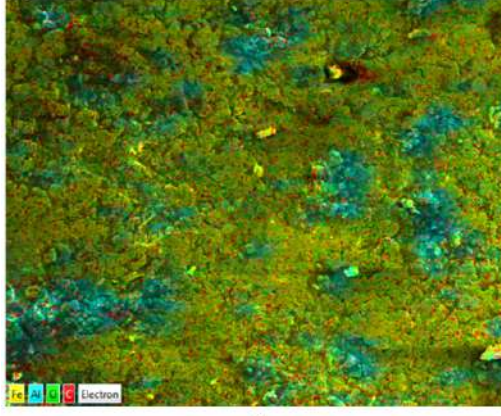
**Şekil 3.22. Al 6035 Lama Haddelme İşleminde Sonraki Merdane**

İkinci haddelme işleminin sonrası merdane yüzeyinden alınan kaplamasız Al katmansız bölgeden alınan SEM görüntüsüne Şekil 3.23’ de yer verilmiştir.

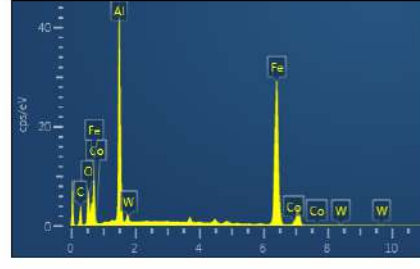


**Şekil 3.23. Kaplamasız ve Katmansız Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü**

Yukarıdaki görüntüde heterojen bir görüntü elde edilmiştir. EDS görüntüleri incelendiğinde yüzeyde Fe ve Al elementinin tespiti alüminyumun kolaylıkla deformasyonu ve yüzeydeki pürüzlülüklere girmesi ile açıklanabilirken Fe’in ise matristen geldiği düşünülmektedir. Fe ve Al arasında C elementi homojen bir dağılım göstermiştir. Şekil 3.24 ’ de Al katmansız bölgenin EDS ve Elementel Haritalama görüntülerine yer verilmiştir.



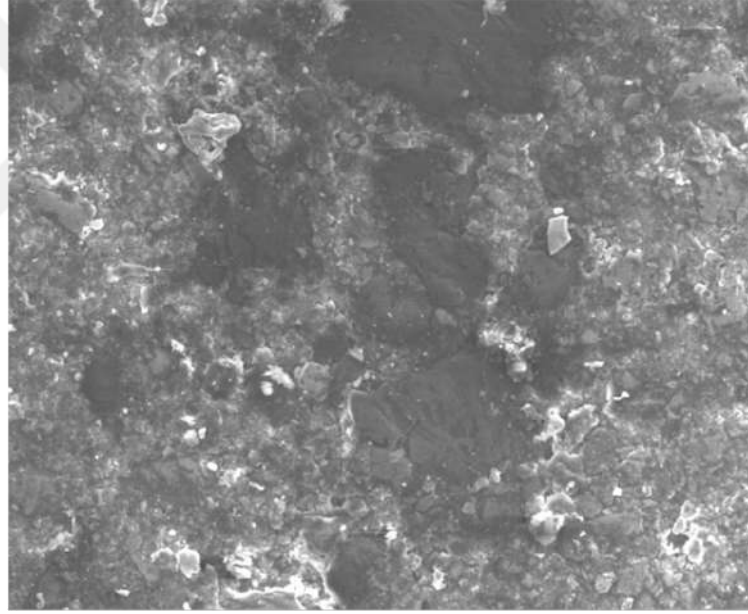
a)



b)

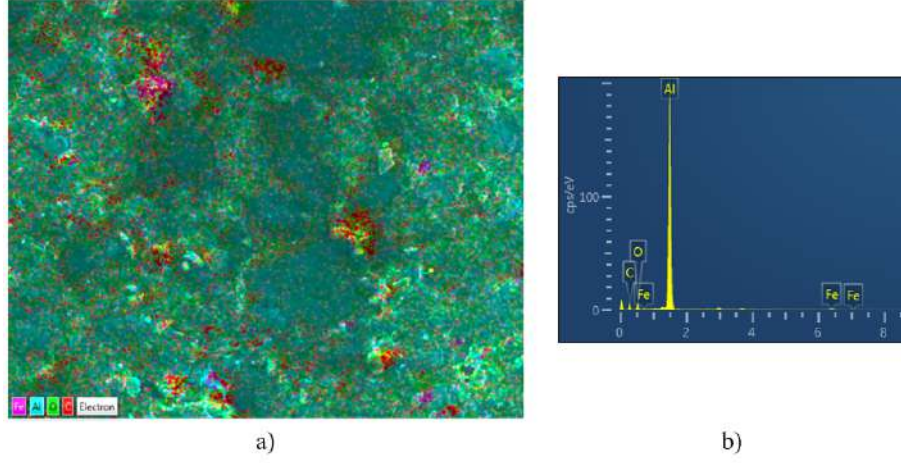
**Şekil 3.24. Kaplamasız ve Katmansız Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri**

Al katmanlı kaplamasız bölgenin SEM görüntülerine Şekil 3.25’ de yer verilmiştir.



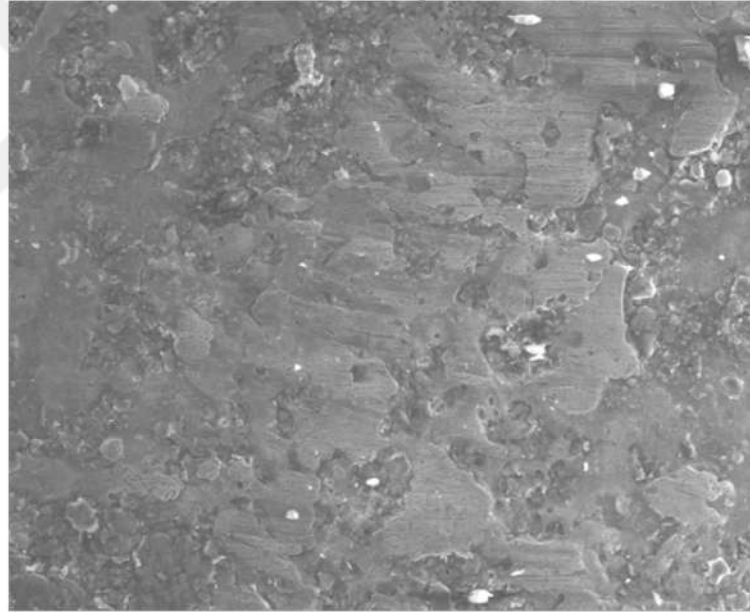
**Şekil 3.25. Kaplamasız ve Katmanlı Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü**

Yukarıdaki görüntüde Al yüzeydeki boşluklu yapıları doldurduğu için ilk duruma göre daha homojen bir görüntü elde edilmiştir. Şekil 3.26’ deki EDS ve Elementel Haritalama görüntülerinde yüzeyde daha çok Al elementi, kısmen de olsa C elementinin varlığı söz konusudur.



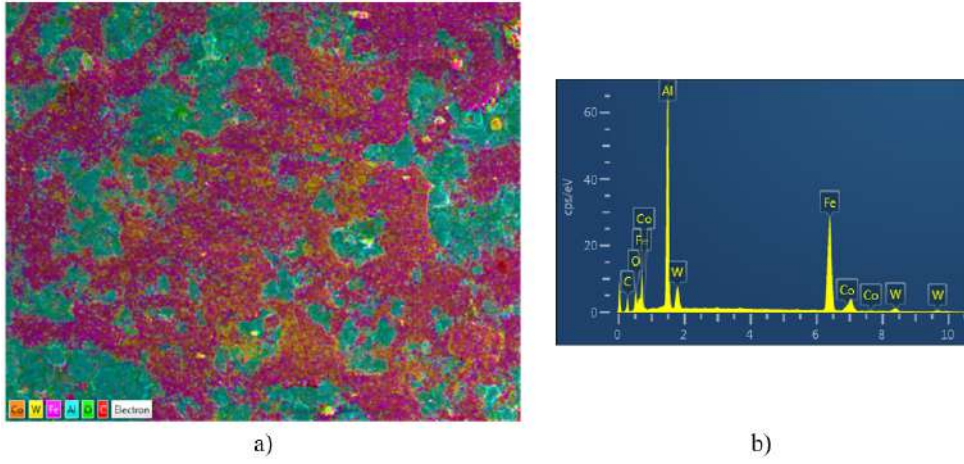
**Şekil 3.26. Kaplamasız ve Katmanlı Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri**

WC/ % 12 Co elektrotu ile yapılan kaplamalı Al katmansız bölgeden alınan SEM görüntüsüne Şekil 3.27’ de yer verilmiştir.



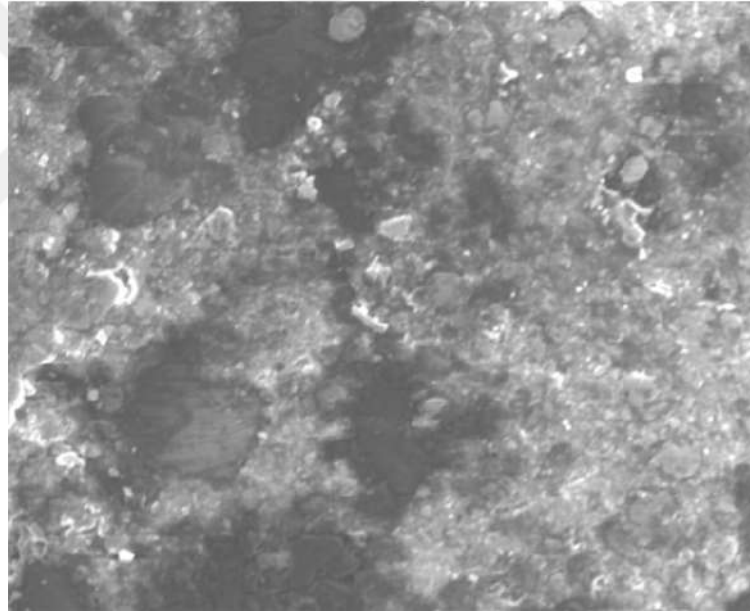
**Şekil 3.27. Kaplamalı ve Katmansız Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü**

Yukarıdaki görüntülerde kaplama yüzeyde birçok girintili yapı oluşturmuştur. Şekil 3.28’ de kaplamalı bölgenin EDS ve Elementel Haritalama görüntülerine yer verilmiştir. Yüzeyde W, C ve Co elementleri homojen bir şekilde dağılmıştır. Özellikle C elementi EDS görüntüsünde yoğun bir şekilde gözlemlenmiştir. Al elementin varlığı yine görüntüde yer almaktadır.



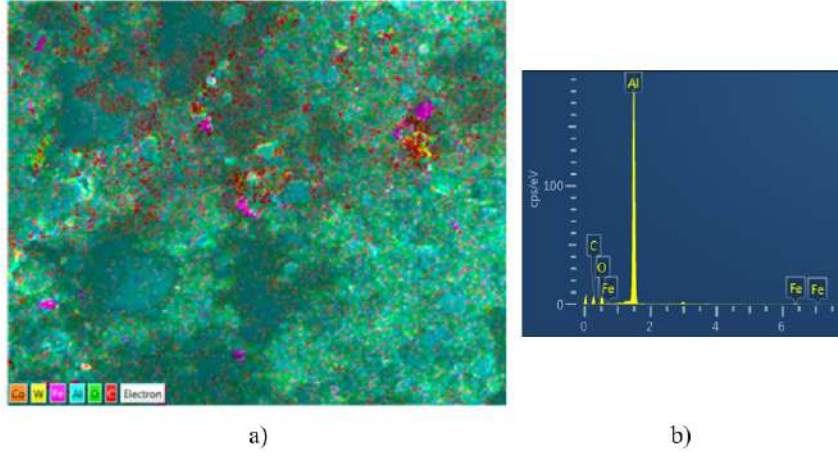
**Şekil 3.28. Kaplamalı ve Katmansız Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri**

Kaplamalı (WC/ % 12 Co) ve Al katmanlı bölgeden alınan SEM görüntüsüne Şekil 3.29' de yer verilmiştir.



**Şekil 3.29. Kaplamalı ve Katmanlı Bölgeden Alınan SEM Görüntüsü**

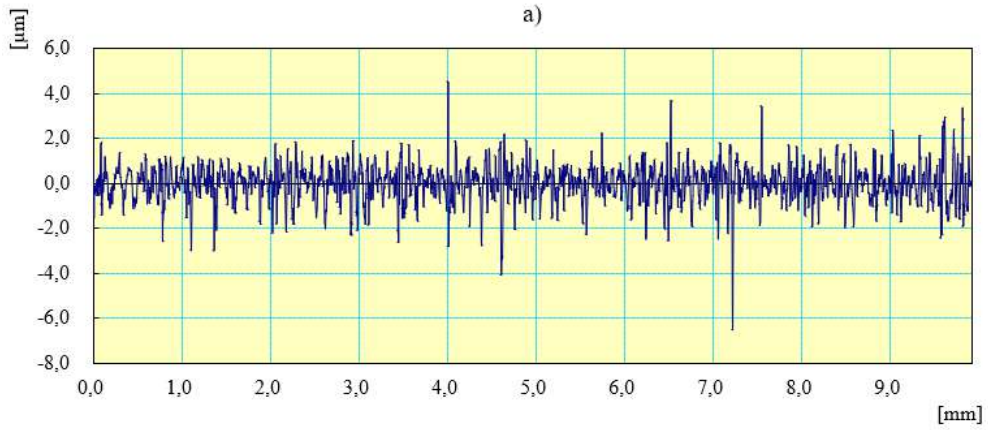
Hem SEM hem de EDS ve Elementel Haritalama (Şekil 3.30) görüntüleri incelendiği zaman kaplama elementlerinin (W, C, Co) yüzeyde kaybolduğu görülmektedir. Burada haddeleme bölgesinde oluşan Alüminyum katmanı etkili olmuştur.

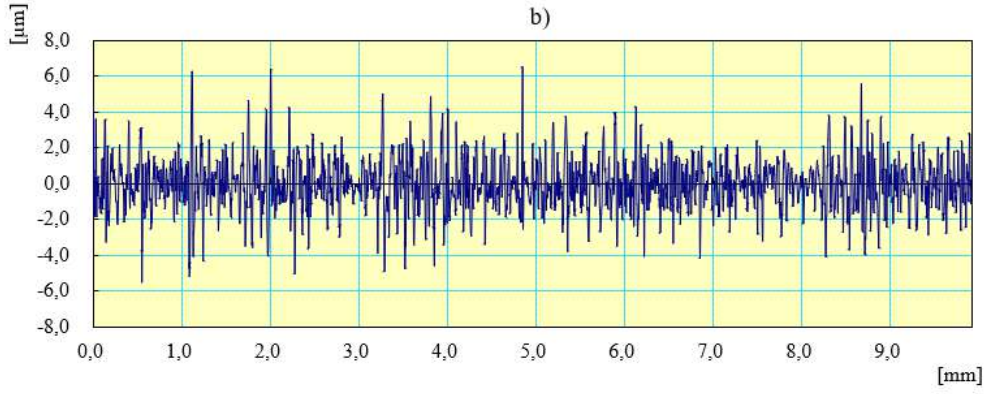


**Şekil 3.30. Kaplamalı ve Katmanlı Bölgeden Alınan a) EDS b) Elementel Haritalama Görüntüleri**

### 3.7.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

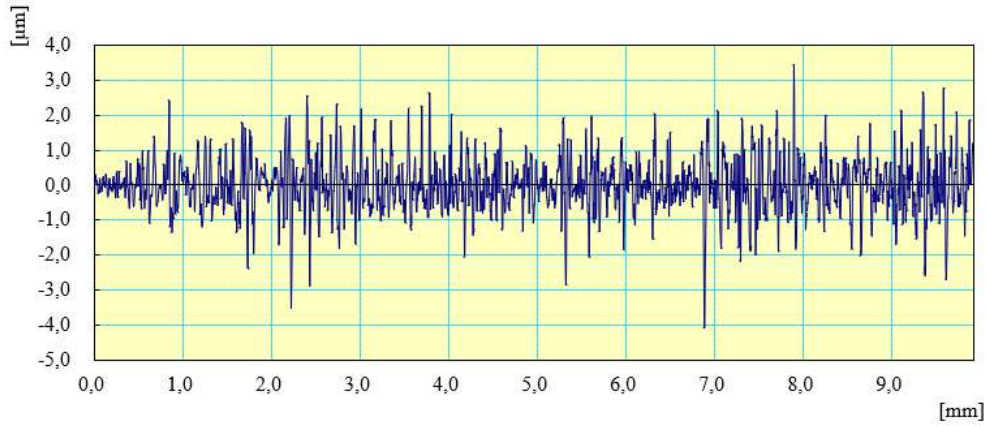
Yarısı WC/ %12 Co elektrotu ile kaplanan merdanelerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Kaplama işlemi sonucu yüzeydeki pürüzlülük değeri ortalama  $R_a = 0,627 \pm 0,081 \mu\text{m}$ ' dan ortalama  $R_a = 1,094 \pm 0,064 \mu\text{m}$ ' a artmıştır. Şekil 3.31' de merdane yüzey pürüzlülük değerlerinin haddedemeden önceki grafiğine yer verilmiştir.





**Şekil 3.31. a) Isıl İşlemlenmiş b) Isıl İşlemlenmiş Kaplamalı Yüzeylerin Pürüzlülük Verileri**

Al 6035 serisi bir lama ile yapılan haddelendirme işleminden sonra Alüminyum parçacıkları kaplama bölgesindeki ara boşlukları doldurduğu için yüzeyde herhangi bir pürüzlülük artışı meydana gelmemiştir ( $R_a = 0,526 \pm 0,024 \mu\text{m}$ ). Dahası ısıl işlem görmüş kaplamasız bölgeye göre yüzey pürüzlülük değeri alüminyum lamadan kopan alüminyum parçaların yüzey pürüzlülüklerini doldurması nedeniyle daha düşük çıkmıştır. Şekil 3.32’ de haddelendirmeden sonra yüzeyden elde edilen pürüzlülük değerlerine yer verilmiştir.



**Şekil 3.32. Haddelendirme işleminden Sonraki Yüzey Pürüzlülük Verileri**

Alüminyum türevi malzemeler haddelendikten sonra genellikle hem iş parçasının hem de merdanelerin yüzey pürüzlülük değeri düşmektedir. İşlem sırasında yağlama, sürtünme gerilmeleri ve pürüzlülük arasında bir ilişki vardır. Homojen bir yağlama ile sürtünme gerilmelerinin minimuma inmesi, yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasına neden olacaktır (Le ve Sutcliffe, 2002; Lenard, 2004).

Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, yüzeyde sıg bir gerilim tabakası oluşur. Bu gerilme yorgunluk gerilme sınırını aştığında yüzey altında çatlaklanmalar başlar. Bu

çatlaklar genel olarak küresel grafitlerin etrafında ve mikro çatlak oluşumlarının yoğun olduğu bölgelerde başlamaya meyillidir. Çatlaklar başta yüzeye paralel ilerler daha sonra keskin bir geçişle yüzeye doğru hareket eder. Yüzeyde oluşan bu gibi kusurlar merdane ömrünü ciddi şekilde etkiler (Batista vd., 2000; Deolalikar ve Sa-deghi, 2007).

### 3.8. Maliyet Analizi

Bu kısımda, sektörde kullanılan 430 mm çap ve 1700 mm boyuna sahip soğuk haddelemede kullanılan bir iş merdananesinin (RCM-WR) maliyet hesabı yapılmıştır. Bu tip merdaneler her bir kampanyada 1000 ton' luk malzeme haddelemektedir. Bir kampanyadan sonra yüzeyde oluşan kusurları giderebilmek için merdane yüzeylerinin taşlanması gerekmektedir. Herbir taşlama işlemi sırasında yüzeyden kaldırılan talaş miktarı 0,1 mm' dir. Merdane yüzeyinde iç bölgeye göre daha sert bir formda olan 25 mm' lik kabuk bölgesi tükenene kadar bu işlem devam etmektedir. Yani ortalama 250.000 ton malzeme haddeledikten sonra merdane çalışma ömrünü tamamlamaktadır. Sektörde kullanılan Alüminyum lama birim fiyatı 4,8 \$ / kg, maliyet analizinde kullanılan merdanenin piyasa fiyatı ise 12.000 \$' dır. Bir merdane ömrü boyunca işletmeye ortalama 1.200.000.000 \$ / ömür kar sağlamakadır.

Çalışmada merdane yüzeyleri WC / % 12 Co malzemesi ile kaplanarak yüzeyin aşınmaya karşı direnci 5 kat artırılmıştır. 430 mm çapında 1700 mm boyuna sahip bir merdanenin yüzey alanı yaklaşık  $2.296.500 \text{ mm}^2$  ' dir. Yüzeyde oluşturulacak  $30 \mu\text{m}$ ' luk kaplama kalınlığı için  $68.895 \text{ mm}^3$  elektrot hacmi gerekmektedir. Piyasada 5 mm çapında 30 mm boyunda bir elektrotun maliyeti 25 \$' dır. Nihayetinde bu alanı kaplayabilmek için yaklaşık 30 adet elektrot ihtiyacı duyulmaktadır. Bu da 750 \$ tutmaktadır. Kaplamasız merdane ile kıyaslayacak olursak, maksimum  $6.000.000.000 \text{ $ / ömür}$  iş yapabilme kapasitesine sahip olabileceği tahmin edilmektedir. Deneysel sonuçlar dikkate alındığında kaplama çalışmasının işletmeye getirisinin maliyet analizine Tablo 3.6' de yer verilmiştir.

**Tablo 3.6. Kaplamanın İşletmeye Sağladığı Getiri**

	Kaplamadan Önce	Kaplamadan Sonra
Her bir Kampanyada Çekilen Malzeme Miktarı	1000 Ton	1000 Ton
Merdane Kullanım Ömrü Boyunca İşletmeye Sağladığı Kar	(+) 1.200.000.000 \$ / ömür	(+) 6.000.000.000 \$ / ömür
Merdane Fiyatı	(-) 12.000 \$	(-) 12.000 \$
Kaplamada Kullanılan Elektrot Ücreti	-	(-) 750 \$
ESD Cihazı	-	(-) 100.000 \$
TOPLAM (\$)	1.199.988.000 \$	5.999.887.250 \$
TOPLAM (TL)	33.599.664.000 TL	167.994.043.000 TL

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada küresel grafitli dökme demir malzemesi WC / % 12 Co elektrot malzemesi ile başarılı bir şekilde kaplandı. Kaplamaların karakterizasyonu kesit görüntüsünden optik mikroskop ile kaplama kalınlıkları belirlendi, yüzey sertlik değerleri hesaplandı, XRD ve EDS görüntüleri ile kaplamaların bileşik ve element boyutunda analizleri yapıldı. Kaplamaların altlık numune üzerinde oluşturduğu mekanik değişiklikler, çekme ve üç nokta eğme testleri ile incelendi. Kaplamaların aşınma dirençleri ball-on-disk yöntemi ile test edildi. En son deneysel ortamda kullanılan ısıtma işlemi tabii tutulan bir hadde merdanesi kaplandı ve haddeleme yapıldı. Haddeleme işleminden sonra yüzeyde oluşan elementel dağılımına SEM/EDS analizi ile bakıldı. Yüzeyde oluşan pürüzlülük değerleri 2D profilometre ile ölçüldü. Kaplamanın işletmeye sağladığı tahmini getiriye hesaplayabilmek için maliyet analizi yapıldı. Çalışmada elde edilen sonuçları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Optimum kaplama parametreleri Taguchi deneyi kullanılarak belirlendi. Deney girdisi olarak voltaj ve frekans, çıktısı olarak kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değeri seçildi. Taguchi deneyi çıktılarına göre optimum kaplama parametreleri 132 V ve 1230 Hz olarak belirlendi. Voltaj ve frekans değerlerinin seçilen çıktı değerlerini nasıl etkilediğini belirleyebilmek için Varyans analizi (ANOVA) yapıldı. Frekans değişimi hem kaplama kalınlığını hem de kaplama sertliğini voltaj değişimine göre daha fazla etkiledi. Yapılan deneylerin doğruluk analizinde kaplama kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerinin tahmin edilen ve gözlenen sonuçlar arasında iyi bir uyum sağladığı söylenebilir. Son olarak, başka bir deney yapmadan ilgili voltaj ve frekans değerlerini denklemde yerine koyarak hesap edebilmek için Regrasyon analizi yapıldı. Optimum parametreler belirlendikten sonra daha önceden hazırlanan numunelere (aşınma, çekme çubuğu, üç nokta eğme çubuğu ve merdane) ısıtma işlemi uygulandı ve 4 farklı varyasyonda (ısıtma işlemi yapılmaz, ısıtma işlemi yapılmaz, ısıtma işlemi yapılmaz, ısıtma işlemi yapılmaz) karşılaştırmaları yapıldı.
- Kaplamaların yüzeyinde  $W_2C$ , W ve  $WC_{1-x}$  bileşiklerin varlığına rastlandı.

Isıl işlem görmüş numunede WC oranı daha fazla hesaplanmıştır. WC fazlalığı kaplamadaki dekarbürizasyon oluşma ihtimalini arttırdı. Bu da kaplamaların aşınma direncinin ve yüzey sertlik değerinin arttırmasına katkı sağladı.

- WC/ % 12 Co kaplamalar genel olarak homojen ve pürüzsüz görünüme sahiptir. Kaplamalar içerisinde oluşan hatalar, alaşımlamaya katılan karbon oranının fazlalığından ve kaplama ile altlık numune arasındaki termal genleşme uyumsuzluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Isıl işlem sayesinde karbondan temizlenen zemin kaplama kalitesinin artmasına neden oldu.
- Ortalama kaplama kalınlığı  $30 \pm 8 \mu\text{m}$  olarak ölçüldü. Ham numunenin yüzey sertlik değeri  $270 \pm 5,6 \text{HV}_{0,2}$  hem ısıtılmış hem de kaplanmış numunenin yüzey sertlik değeri  $1330 \pm 12,5 \text{HV}_{0,2}$  olarak ölçüldü. İlk duruma göre yüzey sertlik değeri 5 kat arttı.
- Mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için çekme ve üç nokta eğme testi yapıldı. Isıl işlem görmüş ve kaplanmış numunede çekme testi sonucu çekme dayanımı ve yüzdece uzama sırası  $778 \pm 29 \text{MPa}$  ve  $2,7 \text{mm/mm}$  olarak hesap edildi. Çekme dayanımı altlık numuneden 1,35 kat daha fazladır. Kırılma morfolojileri tutarlı ve düzgündür. Üç nokta eğme testi sonucu maksimum eğilme gerimesi  $1588 \pm 8 \text{MPa}$ , yüzdece uzama  $2,5 \text{mm/mm}$  olarak hesap edildi. Maksimum eğilme gerilmesi ilk duruma göre 2,1 kat artmıştır.
- Isıl işlem ve kaplama aşınma direnci önemli ölçüde etkiledi. Kaplanmamış ısıtılmış numunelerde aşınma direnci 1,7 kat artarken kaplama aşınma direncini 2,5 kat artırdı. Nihayetinde altlık numunenin aşınma direnci kaplama ve ısıtılmış ile 5 kat arttı. Altlık numunede abrasif aşınmalar meydana gelirken, ısıtılmış görmüş kaplamalı numunede oksidatif bir aşınma meydana gelmiştir. SEM/EDS görüntüleri bu sonuçları desteklemektedir. Aşınma testi sonrası sürtünme katsayısı 0,32 olarak hesaplandı. Kaplama ve ısıtılmış altlık numunenin sürtünme katsayısını 2,13 kat düşürdü.
- Deneysel ortamda kullanılan ısıtılmış görmüş bir hadde merdanesinin yarısı WC/Co elektrot malzemesi ile kaplandı. Ortalama  $5 \text{kN}$ ' luk kuvvet altında 500 metre haddeleme başarılı bir şekilde yapıldı. Al 6035 serisi bir lama ile yapılan haddeleme işlemi sonrası merdane tam ortasında Alüminyum bir

katman oluştuğu gözlemlendi. Bu katman yüzeydeki pürüzlü kısımların kapanmasına neden olmuştur. Dolayısı ile yüzey pürüzlülük testi ilk duruma göre daha düşük çıktı ( $R_a = 0,526 \pm 0,024 \mu\text{m}$ ). Merdanenin kaplamalı ve kaplamasız bölgelerinden kesit örnekleri alındı. Kaplamasız bölgede Fe, C ve Al elementlerinin varlığı tespit edildi. Hem kaplamalı hemde kaplamasız bölge üzerinde oluşan Alüminyum katmanı kaplama elementleri olan W, C ve Co elementlerinin görüntülenmesini zorlaştırmıştır. Alüminyum katmanı olmayan kaplamalı bölgeden alınan SEM/EDS görüntüleri bu iddiayı desteklemektedir. Görüntüler kaplamaların homojen olduğunu göstermektedir.

- Sektörde kullanılan 430 mm çap ve 1700 mm ebatlarına sahip soğuk haddeleme kullanılan bir iş merdanesinin kaplamadan önceki ve sonraki işletmeye olan tahmini getirisi hesaplanmıştır. Kaplamadan önce 33.599.664.000 TL, kaplamadan sonra ise 167.994.043.000 TL olarak hesaplanmıştır. Kaplamadan sonra merdanesinin kullanım ömrüne bağlı olarak kaplamanın işletmeye olan getirisi yaklaşık 5 kat artmıştır.

Haddeleme işlemi sırasında yassılaşıma, termal bombeleşmeler, araya yabancı cisim girmesi sonucu yüzeyde istenmeyen izler merdane yüzeylerinde şekil bozukluklarına neden olur. Artan sürtünme gerilimleri yüzey pürüzlülük değerlerini artırır. Yorulma gerilim sınırının aşılması sonucu yüzey ve altında çatlak başlama riski artar. Bu tür kusurlar işletme şartlarında ya merdane yüzeylerinin taşlanması ile ya da stokta sürekli yedeği bulundurulmuş bir diğer eşi ile değiştirilerek giderilmektedir. Değişimi sağlanan merdane de hurdaya ayrılmaktadır. Haliyle bu da işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, merdane rijitliği ve yüzey bütünlüğü sert kaplamalar ile korunmaya çalışılmıştır. Yüzeyde oluşabilecek lokal çatlak ve kopma gibi riskler kaplamalı bir yüzey ile modifiye edilmiştir. Tez boyunca yapılan deneysel çalışmalar bu iddiaları desteklemekte olup alternatif bir yöntem olarak işletmelere sunulmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Aghajani, H., Hadavand, E., Peighamardoust, N.-S., ve Khameneh-asl, S. (2020). Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*, 18:100392.
- Akray, S. İ. (2007). *Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi*. PhD thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Amousoltani, N., Salimijazi, H., ve Golozar, M. (2019). Study of alumina sealing of hvof thermally sprayed WC-Co coatings by sol-gel method. *Materials Research Express*, 7(1):016410.
- Angelopoulos, M. (2001). Conducting polymers in microelectronics. *IBM Journal of Research and Development*, 45(1):57–75.
- Antonov, M., Veinthal, R., Yung, D., Katušin, D., ve Hussainova, I. (2015). Mapping of impact-abrasive wear performance of WC–Co cemented carbides. *Wear*, 332:971–978.
- Asteman, H., Hartnagel, W., ve Jakobi, D. (2013). The influence of Al content on the high temperature oxidation properties of state-of-the-art cast ni-base alloys. *Oxidation of metals*, 80(1):3–12.
- Banovic, S., DuPont, J., ve Marder, A. (1997). Iron aluminide weld overlay coatings for boiler tube protection in coal-fired low NO<sub>x</sub> boilers. Technical report, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Bartuli, C., Valente, T., Cipri, F., Bemporad, E., ve Tului, M. (2005). Parametric study of an hvof process for the deposition of nanostructured WC-Co coatings. *Journal of thermal spray technology*, 14(2):187–195.

- Batista, Dias, Lebrun, Flour, L., ve Inglebert (2000). Contact fatigue of automotive gears: evolution and effects of residual stresses introduced by surface treatments. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 23(3):217–228.
- Benvenuti, C., Chiggiato, P., Cicoira, F., l'Aminot, Y., ve Ruzinov, V. (2004). Vacuum properties of palladium thin film coatings. *Vacuum*, 73(2):139–144.
- Berger, L.-M., Saaro, S., Naumann, T., Wiener, M., Weihnacht, V., Thiele, S., ve Suchánek, J. (2008). Microstructure and properties of hvof-sprayed chromium alloyed WC–Co and WC–Ni coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(18):4417–4421.
- Bolelli, G., Lusvarghi, L., ve Barletta, M. (2009). HVOF-sprayed WC–CoCr coatings on Al alloy: effect of the coating thickness on the tribological properties. *Wear*, 267(5-8):944–953.
- Burkov, A. (2016). Wear resistance of electrospark WC–C coatings with different iron contents. *Journal of Friction and Wear*, 37(4):385–388.
- Burkov, A. ve Krutikova, V. (2020). Deposition of amorphous hardening coatings by electrospark treatment in a mixture of crystalline granules. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 61(1):132–141.
- Burkov, A. ve Pyachin, S. (2014). Investigation of WC-Co electrospark coatings with various carbon contents. *Journal of materials engineering and performance*, 23(6):2034–2042.
- Burkov, A., Pyachin, S., Zaytsev, A., Syuy, N., ve Zaykov, E. (2018). Wear resistance of Fe<sub>33</sub>Ni<sub>8</sub>Cr<sub>8</sub>W<sub>8</sub>Mo<sub>8</sub>Co<sub>8</sub>C<sub>16</sub>B<sub>11</sub> metallic glass-based electrospark coatings. *Journal of Friction and Wear*, 39(5):381–387.
- Burkov, A. A. ve Chigrin, P. (2020). Synthesis of Ti-Al intermetallic coatings via electrospark deposition in a mixture of Ti and Al granules technique. *Surface and Coatings Technology*, 387:125550.
- Burkov, A. A., Pyachin, S., Ermakov, M., ve Syuy, A. (2017). In situ synthesis and characterization of Fe-based metallic glass coatings by electrospark deposition

- technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2):901–908.
- Cadney, S. ve Brochu, M. (2008). Formation of amorphous Zr<sub>41</sub>. 2Ti<sub>13</sub>. 8Ni<sub>10</sub>Cu<sub>12</sub>. 5Be<sub>22</sub>. 5 coatings via the electrospark deposition process. *Intermetallics*, 16(4):518–523.
- Cao, G., Wang, Y., ve Tang, G. (2018). Properties of NiCrAlY coatings fabricated on superalloy GH4169 by electrospark deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5):1787–1793.
- Cao, G., Zhang, X., Tang, G., ve Ma, X. (2019). Microstructure and corrosion behavior of Cr coating on M50 steel fabricated by electrospark deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(7):4086–4094.
- Carrasco, J. C., Vicente, F. S., Corral, A. M., ve Guillamón, M. P. (2022). Weldability of ductile cast iron using AISI-316L stainless steel er rod. *Revista de Metalurgia*, 58(3):e224–e224.
- Čatipović, N., Živković, D., ve Dadić, Z. (2018). The effects of molybdenum and manganese on the mechanical properties of austempered ductile iron. *Tehnički vjesnik*, 25(2):635–642.
- Chan, K., Scotchmer, N., Zhao, J., ve Zhou, Y. (2006). Weldability improvement using coated electrodes for RSW of HDG steel. Technical report, SAE Technical Paper.
- Chen, S.-Y., Li, Q.-C., Song, J.-J., Sun, H.-Q., ve Chang, G.-W. (2023). Study on the control method of ferrite grain size of nodular cast iron and its effect on low-temperature impact toughness. *Journal of Materials Engineering and Performance*, s. 1–10.
- Chen, Z. ve Zhou, Y.-h. (2006). Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part i. coating characterization. *Surface and coatings technology*, 201(3-4):1503–1510.
- Concuestell, A., Henao, J., Dosta, S., Cinca, N., Cano, I., ve Guilemany, J. (2015). On the formation of metallic glass coatings by means of cold gas spray technology. *Journal of Alloys and Compounds*, 651:764–772.

- Couto, M., Dosta, S., ve Guilemany, J. (2015). Comparison of the mechanical and electrochemical properties of WC-17 and 12Co coatings onto Al7075-T6 obtained by high velocity oxy-fuel and cold gas spraying. *Surface and Coatings Technology*, 268:180–189.
- Couto, M., Dosta, S., Torrell, M., Fernández, J., ve Guilemany, J. (2013). Cold spray deposition of WC-17 and 12Co cermets onto aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 235:54–61.
- De Damborenea, J., Navas, C., García, J., Arenas, M., ve Conde, A. (2007). Corrosion-erosion of TiN-PVD coatings in collagen and cellulose meat casing. *Surface and Coatings Technology*, 201(12):5751–5757.
- De Oliveira Fernandes, D., Anflor, C. T. M., Goulart, J. N. V., ve Baranoğlu, B. (2022). Nodular cast iron GGG40, 60, 70 mechanical characterization from bars and blocks obtained from brazilian foundry. *Metals*, 12(7):1115.
- Dehghanhadikolaie, A., Ansary, J., ve Ghoreishi, R. (2018). Sol-gel process applications: A mini-review. *Proc. Nat. Res. Soc*, 2(1):02008–02029.
- Demirbilek, O., Onan, M., Ünlü, N., ve Talaş, Ş. (2022). Investigation of the efficiency for ESD coating with stainless steel on die surfaces. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 16(4):335–348.
- Deolalikar, N. ve Sadeghi, F. (2007). Fatigue life reduction in mixed lubricated elliptical contacts. *Tribology Letters*, 27:197–209.
- Ding, Z.-X., Wei, C., ve Qun, W. (2011). Resistance of cavitation erosion of multimodal WC-12Co coatings sprayed by HVOF. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(10):2231–2236.
- Dwivedi, V. K., Sharma, P., ve Kumar, D. (2022). Modeling and genetic algorithm inter-relationship-optimized plasma-sprayed In718 thermal barrier coating structure. *Surface Review and Letters*, 29(07):2250092.
- E Silva, C. M., Branco, J., ve Cavaleiro, A. (2006). Characterization of magnetron co-sputtered W-doped C-based films. *Thin Solid Films*, 515(3):1063–1068.
- El Azhari, I., García, J., Zamanzade, M., Soldera, F., Pauly, C., Motz, C., Llanes, L., ve Mücklich, F. (2020). Micromechanical investigations of CVD coated

- WC-Co cemented carbide by micropillar compression. *Materials & Design*, 186:108283.
- Enrique, P. D., Li, C., DiGiovanni, C., Peterkin, S., ve Zhou, N. Y. (2020). Electrospray deposition interlayers for dissimilar resistance welding of steel to aluminum. *Manufacturing Letters*, 24:123–126.
- Enrique, P. D., Marzbanrad, E., Mahmoodkhani, Y., Jiao, Z., Toyserkani, E., ve Zhou, N. Y. (2019). Surface modification of binder-jet additive manufactured inconel 625 via electrospray deposition. *Surface and Coatings Technology*, 362:141–149.
- Faisal, M., El-Shenawy, E., ve Taha, M. A. (2019). Effect of deformation parameters on microstructural evolution of GGG 40 spheroidal graphite cast iron alloy. *Materials Sciences and Applications*, 10(06):433.
- Fantozzi, D., Matikainen, V., Uusitalo, M., Koivuluoto, H., ve Vuoristo, P. (2019). Chlorine induced high-temperature corrosion mechanisms in HVOF and HVAF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-based hardmetal coatings. *Corrosion Science*, 160:108166.
- Farahmand, P. ve Kovacevic, R. (2015). Corrosion and wear behavior of laser clad Ni–WC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 276:121–135.
- Gebhardt, C., Zhang, J., Bezold, A., ve Broeckmann, C. (2023). Microscale fatigue mechanisms in high silicon alloyed nodular cast iron. *International Journal of Fatigue*, 168:107402.
- Gould, J. (2011). Application of electro-spray deposition as a joining technology. *Welding Journal*, 90(10):191–197.
- Goyal, T., Walia, R. S., ve Sidhu, T. (2012). Study of coating thickness of cold spray process using taguchi method. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(2):185–192.
- Gul, F. (2010). Effect of boronizing surface treatment on the adhesive wear behavior of ferritic-pearlitic ductile iron. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(2).

- Günen, A., Soylu, B., ve Karakaş, Ö. (2022). Titanium carbide coating to improve surface characteristic, wear and corrosion resistance of spheroidal graphite cast irons. *Surface and Coatings Technology*, 437:128280.
- Hu, K., Hu, S., Zeng, S., Peng, B., Xiong, X., Wang, W., ve Cheng, G. (2019). The effect of surface treatment on the corrosion behavior of pure ta sheet in an equimolar NaCl-KCl melt at 850°C in air, part 2: Diamond film, TaC film, Ta-Si coating and Ta-Si-Al coating. *Corrosion Science*, 154:11–27.
- Hua, Y., Rong, Z., Ye, Y., Chen, K., Chen, R., Xue, Q., ve Liu, H. (2015). Laser shock processing effects on isothermal oxidation resistance of GH586 superalloy. *Applied Surface Science*, 330:439–444.
- Hulka, I., Şerban, V. A., Niemi, K., Vuoristo, P., ve Wolf, J. (2012). Comparison of structure and wear properties of fine-structured WC-CoCr coatings deposited by HVOF and HVAF spraying processes. In *Solid State Phenomena*, volume 188, s. 422–427. Trans Tech Publ.
- Inoue, A., Wang, Z., Louzguine-Luzgin, D., Han, Y., Kong, F., Shalaan, E., ve Al-Marzouki, F. (2015). Effect of high-order multicomponent on formation and properties of Zr-based bulk glassy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 638:197–203.
- Jiang, W., Shen, L., Qiu, M., Wang, X., Fan, M., ve Tian, Z. (2018). Preparation of ni-sic composite coatings by magnetic field-enhanced jet electrodeposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 762:115–124.
- Johnson, R. N. (1984). Coatings for fast breeder reactor components. *Thin solid films*, 118(1):31–48.
- Johnson, R. N. (2002a). Alternative coatings for wear and corrosion: the electrospark deposition process. *published in Proceedings, American Electroplaters and Surface Finishers Society*.
- Johnson, R. N. (2002b). Electrospark deposition: principles and applications. In *Proceedings of The Annual Technical Conference-Society of Vacuum Coaters*, s. 87–92.

- Johnson, R. N. ve Sheldon, G. (1986). Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6):2740–2746.
- Joukar, A., Mehta, J., Marks, D., ve Goel, V. K. (2017). Lumbar-sacral destruction fixation biomechanics: a finite element study. *The Spine Journal*, 17(11):S335.
- Kayali, Y. ve Talaş, Ş. (2019). Investigation of wear and corrosion behaviour of AISI 316 stainless steel coated by ESD surface modification. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 55(6):1148–1153.
- Kayali, Y. ve Talaş, Ş. (2021). Investigation on wear behavior of steels coated with WC by ESD technique. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 57(1):106–112.
- Ke, J., Liu, R., Xie, Z., Sun, M., Jing, K., Zhang, G., Cheng, X., Liu, X., Wang, X., ve Wu, X. (2022). Preparation of nanoscale wc powders by sol-gel synthesis and carbon monoxide carbonization. *Materials Letters*, 318:132143.
- Khan, M. S., Enrique, P., Ghatei-Kalashami, A., Lopes, J., Schell, N., Oliveira, J. P., Biro, E., ve Zhou, Y. N. (2022). The influence of in-situ alloying of electro-spark deposited coatings on the multiscale morphological and mechanical properties of laser welded Al–Si coated 22MnB5. *Materials Science and Engineering: A*, 839:142830.
- Kiryukhantsev-Korneev, P. V., Sytchenko, A., Gorshkov, V., Loginov, P., Sheveyko, A., Nozhkina, A., ve Levashov, E. (2022). Complex study of protective Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiAl coatings deposited by vacuum electro-spark alloying, pulsed cathodic arc evaporation, magnetron sputtering, and hybrid technology. *Ceramics International*, 48(8):10921–10931.
- Kiryukhantsev-Korneev, P. V., Sytchenko, A., ve Levashov, E. (2019). Comparative study of coatings formed by electrospark alloying using TiC–NiCr and TiC–NiCr–Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> electrodes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 60(6):662–672.
- Konoval, V., Umanskii, O., Panasyuk, A., ve Lukyanchuk, O. (2014). Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the

properties of electrospark-deposited coatings. i. mass transfer rate and coating composition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 53(1):31–39.

Korkmaz, K. (2008). Elektrosark biriktirme yöntemiyle mikro alaşımlı çeliklerin tungsten karbür ile kaplanması. *Gebze Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Kostadinov, G., Penyashki, T., ve Radev, D. (2019). Mathematical modeling of roughness changing of hard metal coatings obtained by contactless electrospark deposition. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 55(5):522–530.

Kudryashov, A., Zamulaeva, E., Levashov, E., Kiryukhantsev-Korneev, F., Sheveiko, A., ve Shvyndina, N. (2019). Application of electrospark deposition and modified shs electrode materials to improve the endurance of hot mill rolls. part 2. structure and properties of the formed coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 55(5):502–513.

Kul, M., Oskay, K., Temizkan, A., Karaca, B., Kumruoğlu, L., ve Topçu, B. (2016). Effect of boronizing composition on boride layer of boronized GGG-60 ductile cast iron. *Vacuum*, 126:80–83.

Kuptsov, K., Antonyuk, M., Bondarev, A., Sheveyko, A., ve Shtansky, D. (2021a). Electrospark deposition of wear and corrosion resistant Ta (Zr) C-(Fe, Mo, Ni) coatings to protect stainless steel from tribocorrosion in seawater. *Wear*, 486:204094.

Kuptsov, K., Sheveyko, A., Sidorenko, D., ve Shtansky, D. (2021b). Electro-spark deposition in vacuum using graphite electrode at different electrode polarities: Peculiarities of microstructure, electrochemical and tribological properties. *Applied Surface Science*, 566:150722.

Łagoda, T. (2001). Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. part ii: Verification of the model. *International Journal of Fatigue*, 23(6):481–489.

Le, H. ve Sutcliffe, M. (2002). Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication. *Tribology International*, 35(2):123–128.

- Lenard, J. G. (2004). The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(2):144–153.
- Li, C.-J. ve Yang, G.-J. (2013). Relationships between feedstock structure, particle parameter, coating deposition, microstructure and properties for thermally sprayed conventional and nanostructured WC–Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 39:2–17.
- Li, W., Yang, X., Wang, S., Duan, D., Li, F., Qiao, Y., Liu, Y., ve Liu, X. (2022). The effect of WC content on the bonding strength and mechanical properties of WC/Ni60 coatings of brake disc. *Optics & Laser Technology*, 149:107822.
- Liao, H., Normand, B., ve Coddet, C. (2000). Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*, 124(2-3):235–242.
- Ling, C. L., Yajid, M. A. M., Tamin, M. N., Kamarudin, M., Taib, M. A. A., Nosbi, N., ve Ali, W. F. F. W. (2022). Effect of substrate roughness and PVD deposition temperatures on hardness and wear performance of alcrn-coated WC-Co. *Surface and Coatings Technology*, 436:128304.
- Luo, H., Leitch, M., Behnamian, Y., Ma, Y., Zeng, H., ve Luo, J.-L. (2015). Development of electroless Ni–P/nano-WC composite coatings and investigation on its properties. *Surface and Coatings Technology*, 277:99–106.
- Luo, Q., Wang, S. C., Zhou, Z., ve Chen, L. (2011). Structure characterization and tribological study of magnetron sputtered nanocomposite nc-TiAlV (N, C)/aC coatings. *Journal of Materials Chemistry*, 21(26):9746–9756.
- Malyshev, O., Smith, A., Valizadeh, R., ve Hannah, A. (2010). Electron stimulated desorption from bare and nonevaporable getter coated stainless steels. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 28(5):1215–1225.
- Matikainen, V., Bolelli, G., Koivuluoto, H., Sassatelli, P., Lusvarghi, L., ve Vuoristo, P. (2017). Sliding wear behaviour of HVOF and HVAF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-based coatings. *Wear*, 388:57–71.

- McCrea, J., Marcoccia, M., ve Limoges, D. (2003). Electroformed nanocrystalline coatings: An advanced alternative to hard chrome electroplating. *Integran Technologies Inc Toronto (Ontario)*.
- Méndez-Medrano, K. O., Martínez-González, C. J., Alvarado-Hernández, F., Jiménez, O., Baltazar-Hernández, V. H., ve Ruiz-Luna, H. (2018). Microstructure and properties characterization of WC-Co-Cr thermal spray coatings. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6(4):482–497.
- Moormann, R. (2011). Phenomenology of graphite burning in air ingress accidents of htrs. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011.
- Mori, M., Watanabe, T., Kashima, N., Nagaya, S., Muroga, T., Miyata, S., Yamada, Y., Izumi, T., ve Shiohara, Y. (2006). Development of long YBCO coated conductors by multiple-stage CVD. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 445:515–520.
- Mrzygłód, B., Kowalski, A., Olejarczyk-Woźenska, I., Giętka, T., ve Głowacki, M. (2017). Characteristics of ADI ductile cast iron with single addition of 1.56% Ni. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(4):2273–2280.
- Nofal, A. (2013). Advances in the metallurgy and applications of adi. *Journal of Metallurgical Engineering*, 2(1).
- Ocelík, V., Matthews, D., ve De Hosson, J. T. M. (2005). Sliding wear resistance of metal matrix composite layers prepared by high power laser. *Surface and Coatings Technology*, 197(2-3):303–315.
- Pawlowski, L. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley & Sons.
- Pedranz, M., Fontanari, V., Raghavendra, S., Santus, C., Zanini, F., Carmignato, S., Lusuardi, D., Berto, F., ve Benedetti, M. (2023). A new energy based highly stressed volume concept to investigate the notch-pores interaction in thick-walled ductile cast iron subjected to uniaxial fatigue. *International Journal of Fatigue*, 169:107491.
- Pereira, I., Anjos, V., Alonso, G., Malheiros, L. F., ve Suarez, R. (2023). Damping

- behaviour of high silicon nodular cast iron. *International Journal of Metalcasting*, s. 1–17.
- Peterkin, S. (2017). *Electro-spark deposition machine design, physical controls and parameter effects*. PhD thesis, University of Waterloo.
- Pirso, J., Letunoviš, S., ve Viljus, M. (2004). Friction and wear behaviour of cemented carbides. *Wear*, 257(3-4):257–265.
- Podchernyaeva, I., Yurechko, D., Bochko, A., Sedlyar, G., ve Kostenko, L. (2012). Effect of electrospark deposition of Al–Si alloy on the wear resistance of a hard-alloy cutting plate. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 51(3):198–203.
- Ponomareva, I. N., Martyushev, D. A., ve Govindarajan, S. K. (2022). A new approach to predict the formation pressure using multiple regression analysis: Case study from sukharev oil field reservoir–russia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.
- Praveen, A. S., Sarangan, J., Suresh, S., ve Channabasappa, B. (2016). Optimization and erosion wear response of NiCrSiB/WC–Co HVOF coating using taguchi method. *Ceramics International*, 42(1):1094–1104.
- Prengel, H., Pfouts, W., ve Santhanam, A. (1998). State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 102(3):183–190.
- Puustinen, E. (2015.). *Enhancing the mechanical properties of solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast iron with austempering heat treatment*. PhD thesis, Kemia Tekniikan Korkeakoulu.
- Pyachin, S. ve Burkov, A. (2015). Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 51(2):118–124.
- Pyachin, S., Burkov, A., ve Komarova, V. (2013). Formation and study of electrospark coatings based on titanium aluminides. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 7(3):515–522.
- Qi, Y., Ma, W., Zhuang, X., Bai, Y., Huang, J., Wang, R., Bao, M., ve Zheng, X. (2021). Thermal shock failure behavior of TiZrNiCuBe metallic

- Glass/NiCrAl-bentonite abrasable flame-retardant composite coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, s. 1–6.
- Reddy, E. L., Karuppiah, J., Lee, H. C., ve Kim, D. H. (2014). Steam reforming of methanol over copper loaded anodized aluminum oxide (AAO) prepared through electrodeposition. *Journal of Power Sources*, 268:88–95.
- Rezende, B. A., dos Santos, A. J., Câmara, M. A., do Carmo, D. J., Houmard, M., Rodrigues, A. R., ve Campos Rubio, J. C. (2019). Characterization of ceramics coatings processed by sol-gel for cutting tools. *Coatings*, 9(11):755.
- Ribalko, A. V. ve Sahin, O. (2006). A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloy. *Surface and coatings technology*, 201(3-4):1724–1730.
- Rukanskis, M., Padgurskas, J., Sabalius, A., Michailov, V., Kazak, N., ve Zunda, A. (2021). Friction and wear of electrospark coatings made of molybdenum, bronze, and combined (Ti+ Al+ C) composition on steel C45 in a lubricant medium. *Journal of Friction and Wear*, 42(1):56–62.
- Sachin, K., Chandan, B., ve Sagar, M. (2023). Experimental investigation and optimization of light transmitting brick using ANOVA method of regression using minitab software. *Materials Today: Proceedings*.
- Sahoo, P. (2009). Wear behaviour of electroless Ni–P coatings and optimization of process parameters using taguchi method. *Materials & Design*, 30(4):1341–1349.
- Sahraoui, T., Guessasma, S., Jeridane, M. A., ve Hadji, M. (2010). HVOF sprayed WC–Co coatings: Microstructure, mechanical properties and friction moment prediction. *Materials & design*, 31(3):1431–1437.
- Salmaliyan, M., Ghaeni, F. M., ve Ebrahimnia, M. (2017). Effect of electro spark deposition process parameters on WC-Co coating on H13 steel. *Surface and Coatings Technology*, 321:81–89.
- Savkovic, B., Kovac, P., Dudic, B., Gregus, M., Rodic, D., Strbac, B., ve Ducic, N. (2019). Comparative characteristics of ductile iron and austempered ductile iron modeled by neural network. *Materials*, 12(18):2864.

- Shafyei, H., Salehi, M., ve Bahrami, A. (2020). Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB<sub>2</sub> composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*, 46(10):15276–15284.
- Sheveyko, A., Kuptsov, K., Kiryukhantsev-Korneev, P. V., Kaplansky, Y. Y., Orekhov, A., ve Levashov, E. (2022). Protective coatings for LPBF Ni-based superalloys using a combination of electrospark deposition and pulsed arc evaporation methods. *Applied Surface Science*, 581:152357.
- Storozhenko, M., Umanskyi, O., Tarelnyk, V., Koval, O. Y., Gubin, Y. V., Mikulina, M., Martsenyuk, I., Kostenko, O., ve Kurinna, T. (2020). Structure and wear resistance of FeNiCrBSiC–MeB<sub>2</sub> electrospark coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59(5):330–341.
- Sun, B., Zhang, T., Shi, J., Wang, B., ve Zhang, X. (2021). Microstructural evolution during exposure in air and oxidation behavior of a nickel-based superalloy. *Vacuum*, 183:109801.
- Tang, S. K. (2009). *The process fundamentals and parameters of electro-spark deposition*. PhD thesis, University of Waterloo.
- Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I. V., Gaponova, O., Tarelnyk, N., Martsynkovskyy, V., Sarzhanov, B., Sarzhanov, O., ve Antoszewski, B. (2020). Effect of laser processing on the qualitative parameters of protective abrasion-resistant coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 58(11):703–713.
- Tkachenko, Y. G., Tolochyn, O., Britun, V., ve Yurchenko, D. (2020). Effect of shock sintering temperature and carbon content of the WC–Co hardmetal anode on the mass transfer in electrospark deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 58(11):692–702.
- Tkachenko, Y. G., Yurchenko, D., Britun, V., Vasil'kovskaya, M., ve Varchenko, V. (2015). Electrospark-deposited coatings from titanium and tungsten carbide alloys: mass transfer kinetics, structurization, and properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 54(5):309–317.
- Tkachenko, Y. G., Yurchenko, D., Timofeeva, I., ve Britun, V. (2018). Effect from the composition of electrodes produced from TiC–(Fe–Cr–Al–Si) alloys on the

formation, phase composition, and properties of wear-and oxidation-resistant electrospark-deposited coatings on steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57(7):465–472.

Tracton, A. A. (2006). *Coatings materials and surface coatings*. CRC press.

Tušek, J., Kosec, L., Lešnjak, A., ve Muhič, T. (2012). Electrospark deposition for die repair. *Metallurgija*, 51(1):17–20.

Umanskyi, O., Storozhenko, M., Tarelnyk, V., Koval, O. Y., Gubin, Y. V., Tarelnyk, N., ve Kurinna, T. (2020). Electrospark deposition of FeNiCrBSiC–MeB2 coatings on steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59(1):57–67.

Uyanık, G. K. ve Güler, N. (2013). A study on multiple linear regression analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 106:234–240.

Valarezo, A., Bolelli, G., Choi, W. B., Sampath, S., Cannillo, V., Lusvarghi, L., ve Rosa, R. (2010). Damage tolerant functionally graded WC–Co/stainless steel HVOF coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205(7):2197–2208.

Vashishtha, N. ve Sapate, S. (2017). Abrasive wear maps for high velocity oxy fuel (HVOF) sprayed WC-12Co and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>- 25NiCr coatings. *Tribology international*, 114:290–305.

Venturi, F., Kamnis, S., ve Hussain, T. (2021). Internal diameter HVOAF thermal spray of carbon nanotubes reinforced WC-Co composite coatings. *Materials & Design*, 202:109566.

Vernhes, L., Azzi, M., ve Klemberg-Sapieha, J. (2013). Alternatives for hard chromium plating: Nanostructured coatings for severe-service valves. *Materials Chemistry and Physics*, 140(2-3):522–528.

Vizureanu, P., Perju, M.-C., Achiței, D.-C., ve Nejneru, C. (2018). Advanced electro-spark deposition process on metallic alloys. *Advanced Surface Engineering Research*, 25:45–68.

Wang, D., Gao, J., Zhang, R., Deng, S., Jiang, S., Cheng, D., Liu, P., Xiong, Z., ve Wang, W. (2021). Effect of TaC particles on the microstructure and oxidation behavior of nicocralyta coating prepared by electrospark deposition on single crystal superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 408:126851.

- Wang, J., Zhang, M., Dai, S., ve Zhu, L. (2023). Research progress in electrospark deposition coatings on titanium alloy surfaces: A short review. *Coatings*, 13(8):1473.
- Wang, J.-s., Meng, H.-m., Yu, H.-y., Fan, Z.-s., ve Sun, D.-b. (2009). Characterization and wear behavior of WC-0.8 Co coating on cast steel rolls by electrospark deposition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6):707–713.
- Wang, R., Qian, Y., ve Liu, J. (2004). Structural and interfacial analysis of WC–8 Co coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition. *Applied Surface Science*, 228(1-4):405–409.
- Xiang, H., Ke, F., Tan, Y.-f., Wang, X.-l., ve Hua, T. (2017). Effects of process parameters on microstructure and wear resistance of tin coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8):1767–1776.
- Yang, Z.-r., Li, D.-s., Wang, L., Wang, S.-q., ve Wei, M.-x. (2013). Wear behavior and mechanism of spheroidal graphite cast iron. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20(10):81–86.
- Yıldız, Y. (2011). *Alüminyum Folyo Haddedelemde Kullanılan Merdanelerin Taşlama Operasyonu İle Kazandıkları Yüzey Özelliklerinin Haddeleme Prosesine Etkileri*. PhD thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yuan, Z., Liu, L., Song, H., Lu, Z., Yang, B., Xiong, J., Huang, N., ve Jiang, X. (2021). Improvement in the universality of high-performance CVD diamond coatings on different WC-Co substrates by introducing multilayered diamond/ $\beta$ -SiC composite. *Diamond and Related Materials*, 116:108369.
- Yun, D. W., Seo, S., Jeong, H., ve Yoo, Y. (2014). The effects of the minor alloying elements Al, Si and Mn on the cyclic oxidation of Ni–Cr–W–Mo alloys. *Corrosion Science*, 83:176–188.
- Zamulaeva, E., Levashov, E., Kudryashov, A., Vakaev, P., ve Petrzhik, M. (2008). Electrospark coatings deposited onto an armco iron substrate with nano- and microstructured WC–Co electrodes: Deposition process, structure, and properties. *Surface and coatings technology*, 202(15):3715–3722.

- Zhang, H., Hu, Y., Hou, G., An, Y., ve Liu, G. (2014a). The effect of high-velocity oxy-fuel spraying parameters on microstructure, corrosion and wear resistance of Fe-based metallic glass coatings. *Journal of non-crystalline solids*, 406:37–44.
- Zhang, J., Zhang, N., Zhang, M., Lu, L., Zeng, D., ve Song, Q. (2014b). Microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron with different strength grades. *Materials Letters*, 119:47–50.
- Zhang, L., Sun, H., Yu, J., Yang, H., Song, F., ve Huang, C. (2018). Application of electrophoretic deposition to occlude dentinal tubules in vitro. *Journal of Dentistry*, 71:43–48.
- Zhang, Y., Li, L., Wang, X., Zhao, Y., Chang, Q., Wang, W., ve Xu, A. (2021). Experimental study on aluminum bronze coating fabricated by electro-spark deposition with subsequent ultrasonic surface rolling. *Surface and Coatings Technology*, 426:127772.
- Zhang, Z., Lei, S., Xie, X., Yan, Z., Li, W., ve Zhao, X. (2023). Influence of vacuum heat treatment on wear behavior of hvaf sprayed WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni coatings. *Vacuum*, s. 112431.
- Zhao, X.-Q., Zhou, H.-D., ve Chen, J.-M. (2006). Comparative study of the friction and wear behavior of plasma sprayed conventional and nanostructured WC–12% Co coatings on stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2):290–297.
- Zheng, T., Hu, Y., Pan, F., Zhang, Y., ve Tang, A. (2019). Fabrication of corrosion-resistant superhydrophobic coating on magnesium alloy by one-step electrodeposition method. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(2):193–202.
- Zhu, Y., Chen, Y., Xu, G., Ye, X., He, D., ve Zhong, J. (2012). Micropattern of nano-hydroxyapatite/silk fibroin composite onto Ti alloy surface via template-assisted electrostatic spray deposition. *Materials Science and Engineering: C*, 32(2):390–394.