



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HVOF TEKNİĞİ KULLANILARAK ÜRETİLEN WC-Co ve NiCr
KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

SEFA ERDEM YILMAZ

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ DERVİŞ ÖZKAN

BARTIN-2023



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**HVOF TEKNİĞİ KULLANILARAK ÜRETİLEN WC-Co ve NiCr
KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sefa Erdem YILMAZ

BARTIN-2023

KABUL VE ONAY



BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna Dr. Öğr. Üyesi Derviş ÖZKAN'ın danışmanlığında hazırlamış olduğum “HVOF TEKNİĞİ KULLANILARAK ÜRETİLEN WC-Co ve NiCr KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı Yüksek Lisans Tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

03.02.2023

Sefa Erdem YILMAZ

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen, çok değerli yardım ve yönlendirmelerini eksik etmeyen, desteği ve tecrübelerini esirgemeyerek çalışmalarına yön veren başta tez danışman Hocam, Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Derviş Özkan'a, Bartın Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. Abdullah Cahit Karaoğlu, Dr. Öğr. Üyesi Yasin Özgürlük ve Dr. Öğr. Üyesi Gülfem Binal'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Katı partikül erozyon aşınma cihazının imalatında yardımlarını esirgemeyen Yimsan Tic.Ltd.Şti. Genel Müdürü İnş. Müh. Engin Yakın Bey'e ve Bartın Sanayisi esnaflarından Onur Dizel işletme sahibi Mustafa Torna Bey'e teşekkürü borç bilirim. Gerek tez çalışmamda gerekse günlük yaşantımda vermiş oldukları her türlü destekten ötürü arkadaşlarım ve aile dostlarımıza teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında beni yalnız bırakmayan, sabırla bekleyen, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen en az benim kadar bu çalışma için çaba gösteren Saygıdeğer Babam Tuncay Yılmaz'a, Değerli Annem Atiye Yılmaz'a, Kıymetli Ağabeylerim Hasan Emre Yılmaz ve Fatih Yılmaz başta olmak üzere tüm aileme sonsuz sevgi, saygı, teşekkür ve hürmetlerimi sunarım.

Sefa Erdem YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HVOF TEKNİĞİ KULLANILARAK ÜRETİLEN WC-Co VE NiCr KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sefa Erdem YILMAZ

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Derviş ÖZKAN

Bartın-2023, sayfa: 111

Günümüzde kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından yüksek performanslı malzemelerin üretimine olan ilgi gün geçtikçe artış göstermektedir. Yüzey mühendisliği alanında termal spreycaplama teknolojisinin kullanımı ile endüstriyel kullanımda olan parçaların aşınma, oksidasyon, korozyon ve termal şok gibi hasarlara karşı servis kullanım ömürleri önemli ölçüde artırılabilir. Termal spreycaplamalar otomotivden havacılığa, kimya endüstrisinden uzay ve savunma teknolojilerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Katı partikül erozif aşınması (SPE) diğer mekanik ve tribolojik olarak meydana gelen etkenler gibi endüstride kullanılan parça ve bileşenlerin malzeme yüzeyinden başlayarak plastik deformasyon neticesinde hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Özellikle makine sanayinde kullanılan parçaların maruz kaldıkları aşınmaya bağlı şartlar göz önüne alındığında parçaların kısa çevrim süreçlerinde hasara uğramadan kullanımda olmaları önem arz etmektedir. Aşınma ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar termal spreycaplama yöntemlerinden özellikle yüksek hızlı oksiyakıt (HVOF) püskürtme tekniği kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntem, daha az oksit, daha düşük porozite içeriğine ve yüksek sertlik değerlerine sahip kaplamaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Yüksek lisans tez çalışmasının ana içeriğini oluşturan çalışmada, 316L

paslanmaz altlık malzeme üzerine WC-Co ve NiCr içeriğine sahip kaplamalar, HVOF tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kaplamaların SPE davranışları ayrıntılı olarak incelenmiş ve SPE deneyleri farklı açılı ve farklı partikül boyutlarına sahip alümina (Al_2O_3) aşındırıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek çıkarımlar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, WC-Co kaplamaya sahip malzemelerin katı partikül erozyonuna karşı gevrek/kırılgan yüzey özellikler sergilediği, NiCr kaplamaya sahip malzemelerin ise sünek yüzey özellikleri sergilediği görülmüştür. Kaplamaya sahip ve deneyler sonrası oluşan aşınmış yüzeylerin tespiti ve ayrıntılı değerlendirmelerinin yapılabilmesi için ileri karakterizasyon tekniklerinden X-ışınları difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve 3D profilometre analiz ölçümleri alınmıştır. Elde edilen bulgular ile güncel literatüre, karşılaştırmalı olarak farklı kaplamaya sahip sistemlerin üretim, SPE davranışları ve hasar oluşumları yönüyle olumlu yönde katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı partikül erozyonu (SPE), Termal sprej kaplama, Yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) prosesi, WC-Co, NiCr.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSIVE WEAR BEHAVIORS OF WC-Co AND NiCr COATINGS PRODUCED USING HVOF TECHNIQUE

Sefa Erdem YILMAZ

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Asist. Prof. Derviş ÖZKAN

Bartın-2023, sayfa: 111

Today, the interest in the production of high-performance materials in terms of their chemical, physical, and mechanical properties is increasing day by day. With the utilization of thermal spray coating technology in the field of surface engineering, the service life of parts in industrial use against damages such as wear, oxidation, corrosion, and thermal shock can be significantly increased. Thermal spray coatings have a wide range of uses, from automotive to aviation, from the chemical industry to aerospace and defense technologies. Like other mechanical and tribological factors, solid particle erosive wear (SPE) causes damage to parts and components used in industry as a result of plastic deformation, starting from the material surface. Given the wear-related conditions to which the parts used in the machinery industry are subjected, it is critical that the parts remain operational without being damaged during short cycle periods. Wear and abrasion resistant coatings are carried out using thermal spray coating methods, especially the high velocity oxy-fuel (HVOF) spray technique. This method allows the production of coatings with less oxide, lower porosity content, and high hardness values. In the study, which constitutes the main content of the master's thesis, coatings with WC-Co and NiCr content on 316L stainless steel substrates were produced using the HVOF technique. The SPE behavior of the produced coatings was examined in detail, and SPE experiments were carried out using different impact angles and alumina (Al_2O_3) abrasives with different particle sizes. Studies conducted in the literature

and the findings obtained were evaluated comparatively, and inferences were drawn. As a result of the studies, it was observed that the materials with the WC-Co coating exhibit brittle surface properties against solid particle erosion, while the materials with the NiCr coating exhibit ductile surface properties. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy distribution spectrometry (EDS) and 3D profilometer analysis measurements were taken from advanced characterization techniques in order to detect and make detailed evaluations of the coated and eroded surfaces after the experiments. With the findings obtained, a positive contribution has been made to the current literature in terms of production, SPE behavior, and damage formation in systems with different coatings.

Keywords: Solid particle erosion (SPE), Thermal spray coating, High velocity oxy-fuel (HVOF) process, WC-Co, NiCr.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem.....	1
1.2. Araştırmanın Amacı.....	2
1.3. Araştırmanın Önemi	3
2. LİTERATÜR İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR	5
2.1. Termal Sprey Kaplama Prosedürü.....	5
2.2. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri.....	9
2.2.1. Plazma Sprey Kaplamalar	16
2.2.1.1. Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi	18
2.2.1.2. Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi.....	19
2.2.1.3. Süpersonik Plazma Sprey (SAPS) Kaplama Yöntemi.....	20
2.2.2. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi.....	21
2.2.2.1. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Çalışma Prensibi.....	22
2.2.2.2. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları	24
2.2.2.3. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Kullanım Alanları.....	25
2.3. Aşınmaya Dayanıklı Kaplamalar	26
2.3.1. Cr ₃ C ₂ -NiCr Kaplama	27
2.3.2. MCrAlY Kaplamalar.....	28
2.3.3. WC-Co Kaplamalar	29
2.3.3.1. WC-Co Kaplama Özellikleri ve Uygulamaları.....	30

2.3.4. NiCr Kaplamalar	31
2.3.4.1. NiCr Kaplama Özellikleri ve Uygulamaları	31
2.4. Aşınma Türleri.....	31
2.4.1. Erozyon Aşınması	36
2.5. Katı Partikül Erozyonu	37
2.5.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Parametreler	42
2.5.1.1. Partikül Çarpma Açısı	43
2.5.1.2. Partikül Çarpma Hızı	43
2.5.1.3. Partikül Kütlesel Debisi	44
2.5.1.4. Partikül Boyutu	44
2.5.1.5. Aşınan (Hedef) Malzeme Özellikleri	45
3. YÖNTEM	46
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Altlık Malzeme.....	46
3.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kaplama Tozları ve Aşındırıcı Partiküller	47
3.2.1. WC-Co Tozu.....	47
3.2.2. NiCr Tozu	48
3.2.3 Aşındırıcı Partiküller	48
3.3. Partiküllerin Boyut Dağılım Analizleri	49
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	50
3.5. Yüzey Sertliği Ölçümleri.....	50
3.6 Porozite Ölçümleri.....	51
3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	51
3.8. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS)	52
3.9. HVOF Kaplama Cihazı.....	52
3.5. Katı Partikül Erozyonu Deneyleri	52
3.5.1. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Deney Düzenegi.....	52
3.5.2. Katı Partikül Erozyonu Ön Hazırlık Deneyleri ve Deneysel Parametrelerinin Belirlenmesi.....	55
3.5.3. Katı Partikül Erozyonu Deneyleri.....	56
3.5.3.1. Deney Öncesi Hazırlık Çalışmaları	57
3.5.3.2. Deneysel Çalışmalar	57
3.5.4. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Oranlarının Hesaplanması	58
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	60

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Toz Malzemelerin Karakterizasyon İncelemeleri	60
4.1.1. WC-Co Tozunun Karakterizasyonu ve Boyut Dağılım Analizi.....	60
4.1.2. NiCr Tozunun Karakterizasyon ve Boyut Dağılım Analizleri.....	61
4.1.3. Aşındırıcı Partikül (Al_2O_3) Karakterizasyonu ve Boyut Dağılım Analizi	63
4.2. HVOF Yöntemi Kullanılarak Üretilen Kaplamalar	65
4.2.1. WC-Co Kaplamaların Üretim ve Karakterizasyonu.....	65
4.2.2. NiCr Kaplamaların Üretim ve Karakterizasyonu	68
4.3. Üretilen Kaplamaların Pürüzlülük, Sertlik ve Porozite Ölçümleri	70
4.3.1. Pürüzlülük Ölçümleri	70
4.3.2. Sertlik Ölçümleri.....	71
4.3.3. Porozite Ölçümleri	72
4.4. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Oranlarının Değişimi	73
4.4.1 Katı Partikül Erozyonu Aşınması Sonrası Gerçekleştirilen Karakterizasyon ve İncelemeler.....	78
4.5. Katı Partikül Erozyon Aşınması Sonrası 3D Profilometre Analizi ve Pürüzlülük Değerleri	91
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Tez çalışması kapsamında izlenen çalışma planı	3
2.1: Termal spreycaplamaların tarihsel gelişimi	6
2.2: Termal spreycaplamaların temel işlem adımları	6
2.3: Termal spreycaplama tekniklerinin alev sıcaklıkları ve parçacık hızlarının şematik gösterimi.....	8
2.4: Termal spreycaplama prosesi.....	8
2.5: Termal spreycaplama proseslerinin genel şematik gösterimi	9
2.6: Termal spreycaplama teknikleri şematik gösterimi	10
2.7: Detonasyon tabancası (D-gun) spreycaplama yöntemi şematik gösterimi	14
2.8: Tel alev spreycaplama tekniğinin şematik gösterimi.....	15
2.9: CGDS yönteminin şematik gösterimi	16
2.10: Plazma spreycaplama tekniğinin şematik gösterimi	17
2.11: VPS tekniğinin şematik gösterimi.....	20
2.12: HVOF püskürtme tekniğini etkileyen parametreler	22
2.13: HVOF püskürtme tekniğinin şematik gösterimi	24
2.14: Termal spreycaplama yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemelerinin gösterimi ve sınıflandırılması	27
2.15: Katı partikül erozif aşınmasının şematik gösterimi	39
2.16: Sünek ve gevrek malzemelerde; a) çarpma açısına ve b) çarpma süresine bağlı değişen aşınma oranları	41
2.17: Katı partikül erozyon aşınmasına etki eden parametreler	42
3.1: Katı partikül erozyon deneyleri için izlenen iş akış şeması gösterimi	46
3.2: Partikül boyutu ölçüm cihazı	50
3.3: 3D profilometre cihazı	50
3.4: Tescan MAIA4 XMU SEM cihazının görseli.....	51
3.5: Katı partikül erozif aşınma cihazının şematik gösterimi.....	53
3.6: SPE aşınma deney düzeneğinin SolidWorks çizimleri	54
3.7: a) Ayarlanabilir numune fikstürü, b) aşındırıcı partikül ve basınçlı hava karışım haznesi gösterimi.....	54
3.8: SPE test düzeneğinin gerçek görüntüsü	55

4.1: WC-Co tozlarının SEM mikroyapı görüntüsü	60
4.2: WC-Co tozlarının EDS analizi verileri	61
4.3: WC-Co tozlarının partikül boyut dağılım analizi.....	61
4.4: NiCr kaplama tozlarının SEM mikroyapı görüntüsü	62
4.5: NiCr kaplama tozlarının EDS analiz verileri	62
4.6: NiCr tozlarının partikül boyut dağılım analizi	63
4.7: Alümina aşındırıcı partiküllerinin gerçek görüntüleri.....	63
4.8: Aşındırıcı partikül Al ₂ O ₃ (50 mesh, 80 mesh) SEM görüntüleri	64
4.9: Al ₂ O ₃ (50 mesh) boyut dağılımı.....	64
4.10: Al ₂ O ₃ (80 mesh) boyut dağılımı.....	64
4.11: WC-Co kaplamanın ara-kesit SEM görüntüsü.....	66
4.12: (a) WC-Co kaplamanın SPE deneyleri öncesi üst yüzey SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi.....	66
4.13: WC-Co kaplamanın EDS analizi.....	67
4.14: WC-Co kaplamaların XRD analiz sonucu	67
4.15: NiCr kaplamanın kesit SEM görüntüsü	68
4.16: NiCr kaplamanın a) üst yüzey SEM görüntüsü ve b) elementel haritalama analizi ..	69
4.17: NiCr kaplamanın EDS analizi	69
4.18: NiCr kaplamanın XRD analiz sonucu	70
4.19: (a) WC-Co ve (b) NiCr kaplamalı numunelerin 3D profilometre görüntüleri.....	71
4.20: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların alansal pürüzlülük (Sa) değerleri.....	71
4.21: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr malzemelerin sertlik değerleri	72
4.22: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların porozite oranları (%)	73
4.23: HVOF ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelere ait katı partikül erozyon oranları	75
4.24: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	79
4.25: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi	80
4.26: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi.....	80
4.27: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	81

4.28: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi	81
4.29: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi.....	82
4.30: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	82
4.31: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi	83
4.32: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi.....	83
4.33: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	84
4.34: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi	84
4.35: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi.....	85
4.36: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	86
4.37: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi.....	86
4.38: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi.....	87
4.39: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	87
4.40: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi.....	88
4.41: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi.....	88
4.42: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	89
4.43: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi.....	89
4.44: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi.....	89

4.45: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	90
4.46: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi.....	90
4.47: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi.....	91
4.48: WC-Co kaplamanın 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	91
4.49: WC-Co kaplamanın 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	92
4.50: WC-Co kaplamanın 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	92
4.51: WC-Co kaplamanın 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	93
4.52: WC-Co kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük grafikleri	93
4.53: NiCr kaplamanın 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	94
4.54: NiCr kaplamanın 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	95
4.55: NiCr kaplamanın 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	95
4.56: NiCr kaplamanın 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü.....	96
4.57: NiCr kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük grafikleri	96

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
2.1: Endüstriyel sektörlerde tercih edilen termal sprey kaplama prosesleri.....	10
2.2: Kaplama proses parametrelerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	11
2.3: Bazı termal sprey kaplama tekniklerinin karakteristik özellikleri	12
2.4: HVOF ve HVOF sistemlerinin karşılaştırılması	23
2.5: HVOF tekniğinin avantajları ve avantajı kazandıran etmenler.....	25
2.6: Endüstriyel faaliyetlerde yaygın kullanılan tozların HVOF tekniği ile uygulama alanları	26
2.7: Aşınma mekanizma türleri	34
2.8: Uluslararası aşınma test standartları (ASTM).....	35
2.9: Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma tipleri.....	35
2.10: Katı partikül erozyonuna maruz kalan makine bileşenleri.....	38
3.1: 316L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu.....	47
3.2: 316L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.....	47
3.3: Deneyisel/teorik çalışmalarda yaygın kullanıma sahip alümina toz boyutları.....	49
3.4: Al ₂ O ₃ kimyasal kompozisyonu	49
3.5: Al ₂ O ₃ mekanik özellikleri	49
3.6: Kumlanmış 316L numuneleri ile ön hazırlık deney parametreleri	56
3.7: Kumlanmış 316L numuneleri ile gerçekleştirilen ön hazırlık deneyleri sonrası meydana gelen malzeme kayıpları	56
3.8: Katı partikül erozif aşınma deney parametreleri	57
3.9: WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE aşınma deney parametreleri.....	58
4.1: WC-Co tozlarının kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)	60
4.2: NiCr tozlarının kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça).....	62
4.3: WC-Co kaplamaların üretilmesinde kullanılan HVOF sprey parametreleri.....	65
4.4: NiCr kaplama üretmek için kullanılan HVOF parametreleri	68
4.5: Kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük (Sa) değerleri.....	71
4.6: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların sertlik değerleri	72
4.7: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların yüzey porozite oranları (%)	72
4.8: Katı partikül erozif aşınma deneyleri sonrası malzeme kayıpları ve erozyon oranları	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
°C	: Derece selsiyus
DC	: Doğru akım
dk	: Dakika
E	: Erozyon oranı
F	: Demir
GPa	: Giga paskal
H	: Hidrojen
mm	: milimetre
MPa	: Mega paskal
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
Sa	: Yüzey alanının ortalama pürüzlülüğü
Sv	: Yüzey alanının maksimum çukur derinliği
Sp	: Yüzey alanının maksimum pürüz yüksekliği
Si	: Silisyum
s	: Saniye
slpm	: Standart litre/dakika
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
V	: Volt
Zr	: Zirkonyum
Y	: Ytria
µm	: Mikrometre
m	: Kütleli debi (g/s)
Δm	: Kütle kaybı (mg)

KISALTMALAR

APS	: Atmosferik plazma sprej
ASTM	: Amerikan malzeme test birliđi
CGDS	: Soğuk gaz-dinamik sprej
CoNiCrAlY	: Kobalt-nikel-krom-alüminyum-ytria
D-gun	: Detonasyon tabancası
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
EDX-mapping	: Elementel haritalama
HVOF	: Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme
LPPS	: Düşük basınçlı plazma sprej
MCrAlY	: Metal-krom-alüminyum-ytria
PS	: Plazma sprej
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Sermet	: Seramik ve metal
TBC	: Termal bariyer kaplama
VPS	: Vakum plazma sprej
XRD	: X-ışınları difraksiyonu

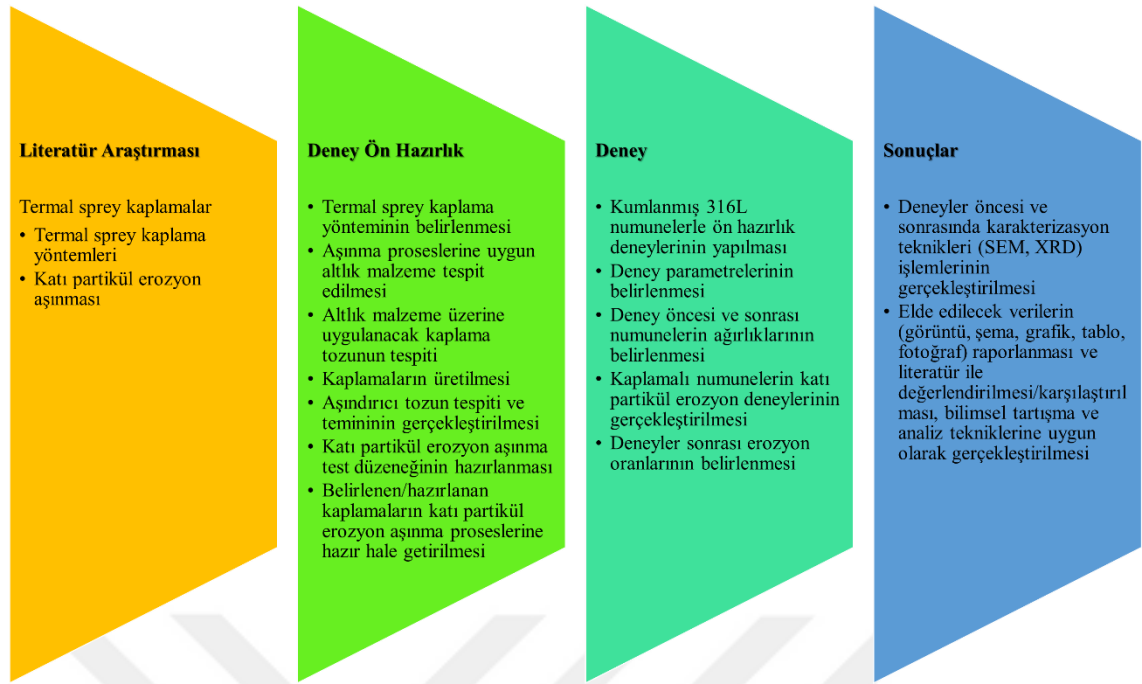
1. GİRİŞ

1.1. Problem

Malzeme yüzeyine tekrarlı çarpmalar neticesinde meydana gelen yüzey hasarı ve/veya parça kaybı ile sonuçlanan hasarlara katı partikül erozyon (SPE) aşınması adı verilmektedir. Gaz veya sıvı bir akışkan içerisinde taşınan farklı boyut ve geometrik yapılarda olan parçacıkların, farklı çarpma açısı ve farklı hızlar ile malzeme yüzeyine çarpması sonucu SPE aşınması meydana gelir. SPE hakkında yapılan çalışmaların başlıca amacı, uzay ve havacılık sistemleri, otomotiv endüstrisi, enerji dönüşüm santralleri, gaz türbin motorları, helikopter rotor kanatları, türbin ve kömür dönüştürme santralleri gibi hayatımızın her alanında çok ciddi önem taşıyan alanları kapsayan bir sorunu çözüme kavuşturmadır (Kumar ve Kumar, 2021; Berger, 2015; Meghwal vd., 2020a). SPE aşınmasının, doğrudan ve dolaylı maliyetleri artırdığı göz önünde bulundurulduğunda firmalara ekonomik olarak zarar vermesi kaçınılmazdır. Günümüz havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmakta olan mühendislik malzemelerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek, malzeme dayanımı ve ömrü açısından çok ciddi önem arz etmektedir (S. Kumar ve Kumar, 2021; Sadeghi vd., 2019). Yüksek sıcaklıklarda ve hızlarda çalışmakta olan gaz türbin motorlarının, termal ve mekanik gerilmelere maruz kalmasına neden olurken erozyon aşınmasına karşı direncini de azaltmaktadır. Servis koşulları altında çalışmakta olan bir parçanın yüzeyinde meydana gelebilecek hasar mekanizmaları parçanın servis ömrünü doğrudan etkilediği gibi ticari faaliyetleri ekonomik olarak büyük zararlara uğratabilmektedir. Agresif servis koşullarında çalışan makine bileşenlerinin yüzeyine mikron boyutlarında olan herhangi bir malzemenin teması dahi önemi yadsınamayacak erozif hasarlara neden olabilmektedir (Dixit vd., 2022). Atmosfer içerisinde bulunabilecek; volkan külleri, çöl tozları, buzul parçacıkları ve yabancı nesnelerden kaynaklı SPE hasarları, gaz türbin motorlarında ve helikopter ana rotor ve kuyruk pallerinde erozyon aşınmasına neden olabilmektedir (Parlakıyigit vd., 2020). Bu durum havacılık ve uzay malzemelerinin ekonomik ömründe önemli ölçüde kısalmalara ve zaman içerisinde verimliliğini düşürerek parçadan beklenen işlevi tam olarak yerine getirememesine neden olmaktadır. İlerleyen/gelişen teknoloji ve günümüz ihtiyaçlarının sonucu olarak her geçen gün servis koşulları daha kompleks bir yapıya dönüşmesiyle, makine bileşenlerinin maruz kaldığı koşullar zorlaşmaktadır. Buna bağlı olarak malzemelerde meydana gelen hasar mekanizmaları da artış göstermektedir (Menapace vd., 2020; Robitaille vd., 2009).

1.2. Araştırmanın Amacı

Havacılık ve uzay endüstrisinin günümüz koşulları ve gelecek hedefleri göz önünde bulundurulduğunda, servis koşullarının zorlaşacağı ve makine elemanlarından beklentilerin yükseleceği açıktır. Malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ve üstün hale getirilmesi yüzey mühendisliği çalışmaları sonucudur. Yüzey mühendisliği alanında son dönemde önemli ilerlemeler gerçekleşmiş olup, sürekli yenilenme ve gelişme göstermektedir. Verimli ve daha yüksek dayanıma sahip makine elemanları üretiminde termal spreycaplama tekniklerinden faydalanılmaktadır. Malzeme yüzeyinde meydana gelen SPE aşınma etkisini minimuma indirebilmek amacıyla, kaplamaların önemi her geçen gün artmaktadır. Genel olarak termal spreycaplamalar, zorlu servis koşullarında çalışmakta olan makine bileşenlerinin yüzeylerinde oluşabilecek hasarlardan olabildiğince az etkilenmesini sağlayarak katı partikül erozyonuna karşı bileşenlere dayanım kazandırırken, yüksek verimde çalışmasına olanak sağlamaktadır (Kılıç vd., 2020; Özkan, 2021). Bu çalışmada, 316L paslanmaz çelik malzeme üzerine HVOF tekniği ile WC-Co ve NiCr kaplamalar üretilmiştir. HVOF tekniği ile kaplanmış numunelerin mikro yapısal mekanik özellikleri ve SPE aşınma davranışları araştırılmıştır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde, farklı çarpma açıları ve farklı aşındırıcı partikül boyutları gibi parametreler, literatür incelemeleri ve ön hazırlık deney sonuçları baz alınarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen katı partikül erozyon aşınma deneyleri sonrasında kaplamalı numunelerde meydana gelen hasar mekanizmaları ve erozyon aşınma oranları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Erozyon aşınma hasar mekanizmalarının detaylı incelemeleri karakterizasyon tekniklerinden, X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM), elementel haritalama (EDX-mapping), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve 3D profilometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen aşamalar Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Çalışmanın temel, amacı yüksek mühendislik ürünü olan termal spreycaplama teknikleri ile havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan malzemelerin yüzey özelliklerinin hedeflenen seviyeye ulaştırılması ve maksimum verimlilikte efektif şekilde çalışabilmesini sağlamaktır.



Şekil 1.1: Tez çalışması kapsamında izlenen çalışma planı

1.3. Araştırmanın Önemi

Volkan küllerinden, çöl tozlarından, buzul parçacıklarından ve yabancı nesnelerden kaynaklı oluşabilecek hasarların uçak türbin kanatçıkları, helikopter ana rotor ve kuyruk palleri gibi işlevsel parçalarda verebileceği zararların önceden doğru bir şekilde tespit edilmesi, bu komponentlerin çalışma performansı, kullanım ömrü, tamir ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından son derece önemlidir. Yüksek mühendislik ürünü olan termal sprej kaplamalar, havacılık ve uzay endüstrisi için ekonomik ve sürdürülebilir olmaları ile hayati önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, modern gaz türbin kanatçıkları gibi metalik esaslı altlık malzemelerin kullanıldığı makine elemanlarının katı partikül erozyonu etkisi altında davranışlarını incelemek için hedef malzeme yüzeyleri farklı partikül boyutlarına sahip alümina (Al_2O_3) partiküllerinin, farklı çarpma açılarında püskürtülmesi ile SPE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Havacılık endüstrisinde sıklıkla karşılaşılan sorunlar arasında yer alan aşınmaları önlemenin en efektif yolu olarak bilinen kaplamaları geliştirmek amacıyla uzun yıllardan beri çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Düşük geliştirme ve uygulama maliyetlerinin yanı sıra yüksek performans ve yüksek yoğunluklu kaplama imkanı sunan HVOF yöntemi, belirtilen avantajlarından dolayı havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan bileşenleri kaplamada tercih edilmektedir. Bu çalışmanın özgün değeri, HVOF tekniği ile WC-Co ve NiCr kaplanmış numunelerin farklı partikül boyutu ve çarpma açısı etkisinde gerçekleşen

katı partikül erozyonu karşısında, yüzeğinde meydana gelen hasar mekanizmaları inceleme imkanı sunmasıdır. Elde edilen bulgular ile güncel literatür karşılaştırmalı olarak incelenmiş farklı kaplamaya sahip sistemlerin üretim, SPE davranışları ve hasar oluşumları yönüyle, literatüre olumlu yönde katkı sağlanması hedeflenmiştir.



2. LİTERATÜR İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

Endüstrinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek ve karşılaşılan zorlukları giderebilecek, üstün yüzey özelliklerine sahip makine elemanlarını üretebilmek amacıyla 1980’li yılların başından günümüze kadar sürekli gelişen ve ilerleyen termal sprej kaplamalar kullanılmaktadır. Mikro boyutlardaki partiküllerin sıvı veya gaz akışkan içerisinde malzeme yüzeyine çarparak oluşturduğu hasarlar, SPE aşınması olarak tanımlanmaktadır. Makine endüstrilerini zorlayıcı koşulların başında SPE aşınma hasarları gelmektedir. Meydana gelen SPE hasarları sonucu, malzeme yüzeyinde deformasyon, verimliliklerinde düşüş ve/veya tamamen bozulma ile karşılaşılabilir. Bu hasarları önleyebilmek amacıyla endüstriyel beklentilere uygun özellikleri sisteme kazandıracak kaplamalar üretilmektedir. Bu bölümde termal sprej kaplamalar ve üretim teknikleri, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, aşınma hasar çeşitleri ve katı partikül erozyonu üzerine yapılan çalışmalar araştırılmıştır.

2.1. Termal Sprej Kaplama Prosedürü

Mühendislik malzemelerinin endüstriyel tasarım aşamasında; kütleli özelliklerinin yanı sıra yüzey özellikleri de son derece önemlidir. Özellikle aşınmaya dayanıklı parçaların tasarımında önemli olan malzeme yüzeyi, agresif servis ortamında çeşitli mühendislik fonksiyonlarını sorunsuz yerine getirmelidir. Mühendislik bileşenlerinden beklenen performansı elde edebilmek amacıyla kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Termal sprej kaplamaların tarihsel gelişimi Şekil 2.1’de verilmiştir (Garrido et al., 2022; S. Kumar & Kumar, 2021; Sadeghi et al., 2019).



Şekil 2.1: Termal sprej kaplamaların tarihsel gelişimi (S. Kumar ve Kumar, 2021'den değiştirilerek)

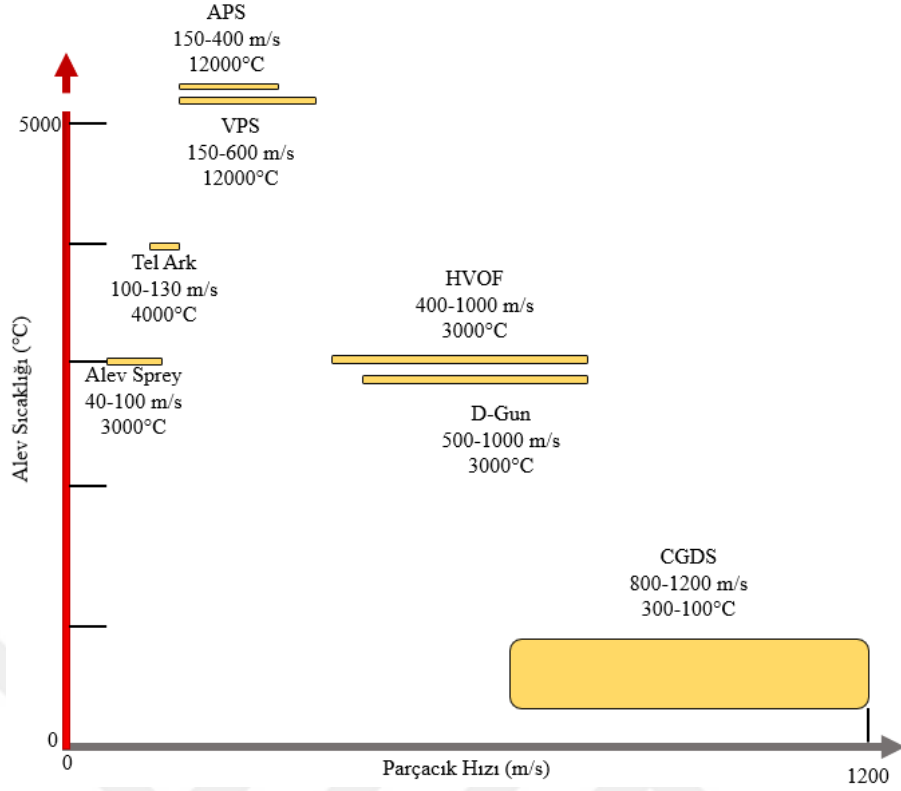
Uzay ve havacılık endüstrisinin gelişmesi ile gaz türbin motorlarında kullanılan bileşenlerin ömrünü uzatmak ve verimlerini artırabilmek amacıyla termal sprej kaplamalardan faydalanılmaktadır. Termal sprej kaplamaların temel üretim prosesi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Termal sprej kaplamaların temel işlem adımları

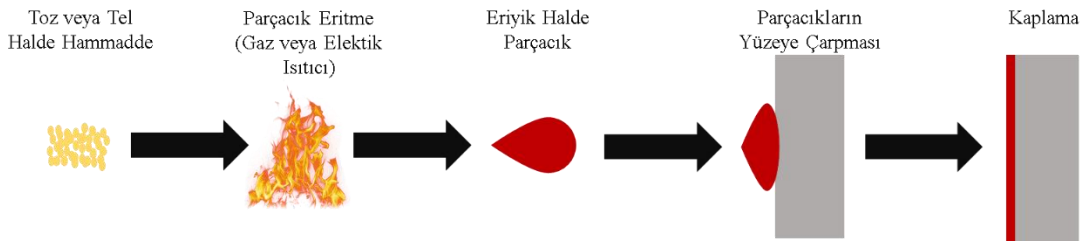
Termal sprej kaplama tekniklerinde, kaplama hammaddesi toz veya tel halde uygulanabilmektedir. Kaplanacak yüzey üzerine, farklı teknikler ile püskürtme tabancası kullanılarak uygulanmaktadır. Kaplanmış yüzey, altlık malzeme yüzeyinde koruyucu tabaka işlevini yerine getirmektedir. Tüm kaplama sistemlerinin temel mantığı olan püskürtüldüğü yüzeyin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini üstün kılma prensibi termal sprej kaplamalar içinde geçerlidir (Pawłowski, 2008). Günümüz endüstrisinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek üstün yüzey özelliklerine sahip ve daha verimli kullanılacak malzemeleri elde etmenin minimum maliyetli yolu olarak termal sprej teknikleri havacılık endüstrilerinde oldukça sık kullanılmaktadır (Özkan ve Karaoğlu, 2021). Termal sprej kaplama tekniklerinin diğer kaplama tekniklerine göre oldukça üstün avantajları mevcuttur. Endüstriyel anlamda en büyük avantajların başında metalik malzemelere uygulanabilirliği gelmektedir (J.R. Davis ve Associates. ve ASM International. Thermal Spray Society Training Committee., 2004).

Termal sprej tekniği ile kaplanacak altlık malzemenin, ön hazırlık aşamasında yüksek sıcaklıklara ulaştırılmasına ihtiyaç duyulmaksızın, termal sprej yöntemleri ile kaplama hammaddesi altlık malzeme yüzeyine püskürtülebilir. Altlık malzeme yüzeyine püskürtülecek olan tozlar yüksek ölçekte mekanik bağ ile tutunma ve birikme sağlayacakları için uygulanacakları yüzeyin oldukça temiz ve kaplamaya uygun olması hayati önem taşımaktadır. Bir ısı kaynağı parçacıkları ergimiş veya yarı ergimiş hale getirdikten sonra, püskürtme jeti yardımıyla kinetik enerji kazandırılan kaplama malzemeleri, altlık malzeme yüzeyine püskürtülür. Şekil 2.3’de bazı termal sprej yöntemlerinin alev sıcaklıkları ve parçacık hızları verilmiştir (Pawłowski, 2008).



Şekil 2.3: Termal sprej kaplama tekniklerinin alev sıcaklıkları ve parçacık hızlarının şematik gösterimi (Meghwal vd., 2020b'den değiştirilerek)

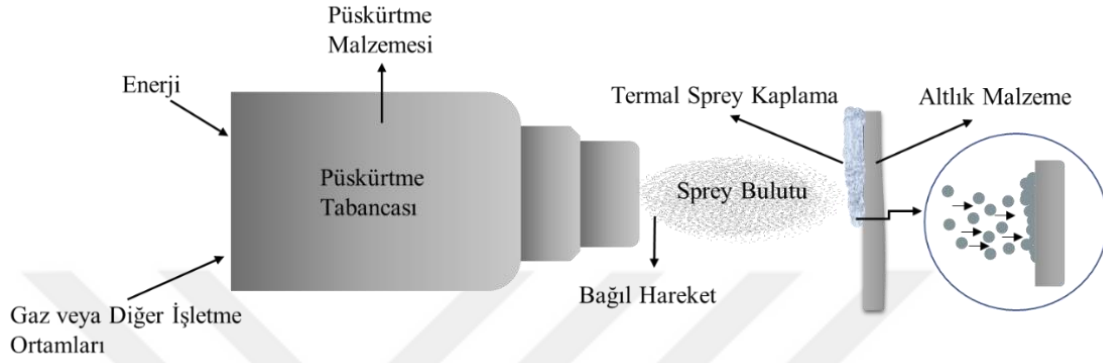
Altlık yüzeyine çarpan kaplama malzemesi hızla soğuyarak splat (yassı tanecik) şeklini alarak yüzeyde istenilen kalınlıkta kaplama oluştururlar. Şekil 2.4'de termal sprej kaplama prosesi gösterilmiştir (Pawłowski, 2008).



Şekil 2.4: Termal sprej kaplama prosesi

Termal sprej kaplamaların en önemli avantajları arasında, metal formdaki malzemelere tekrar kaplama yapabilme imkanı sunması yer almaktadır. Bu sayede yeni parça tedarik ve/veya üretimine ihtiyaç duyulmaksızın çok daha düşük maliyetlerle, parça tekrar işlevsel hale getirilebilmektedir. Bununla birlikte kaplanacak malzeme termal bozulmaya uğratılmaksızın yeniden kullanıma hazır hale gelir. Parça boyutlarında değişikliğe

gidilmeden aşınmış ve hasar görmüş kaplamaları yüzeyden kaldırarak yeniden kaplamanın uygulanabilme imkanı endüstride sürdürülebilirliği sağlamaktadır. Tüm bu avantajlarının yanı sıra püskürtme ekipmanının konumlanamayacağı kadar küçük boyutlu parçalara, kaplama uygulanmasını engelleyen boyut sınırlamaları ile karşı karşıya kalınmaktadır. Şekil 2.5’de termal sprej proseslerinin genel şematik gösterimi verilmiştir (Dorfman, 2018).



Şekil 2.5: Termal sprej kaplama proseslerinin genel şematik gösterimi

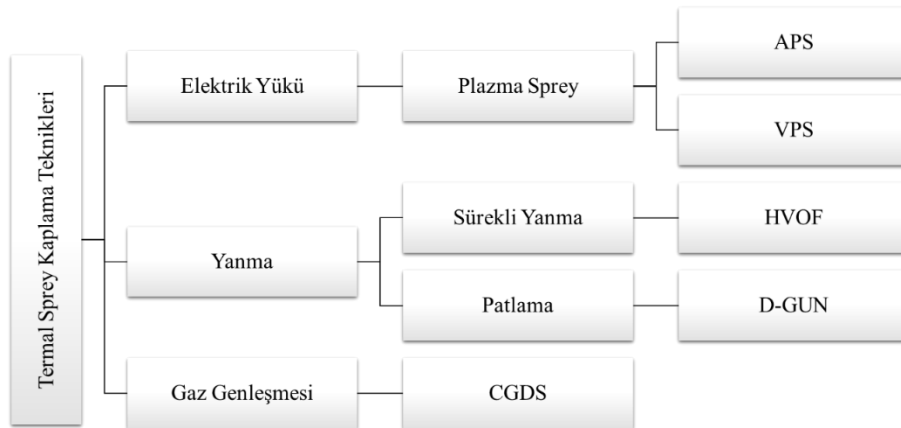
2.2. Termal Sprej Kaplama Yöntemleri

Termal sprej kaplamalar petro-kimya, gaz sektörü, havacılık, enerji santralleri, tekstil, maden işleme ve kağıt endüstrilerinde uygulama alanları oldukça yaygındır. Termal sprej kaplamaların başlıca avantajları arasında çok çeşitli kaplama teknikleri, farklı kaplama malzemeleri ve farklı altlık malzemelere uygulanabilirliği gelmektedir (Özkan, 2022). Endüstride ilk olarak alev sprej kaplama teknikleri ile kullanılmaya başlanan termal sprej teknolojisinin ilk kullanım amacı, nispeten basit parçaların bakım ve onarımı olmuştur. Plazma sprej kaplamalar, atmosferik plazma sprej (APS), vakum plazma (VPS) ve süpersonik plazma sprej olarak 3 farklı tekniğine dayanmaktadır. Termal sprej teknolojisi, plazma sprej ve detonasyon tabancası uygulamaları ile endüstride kendine yaygın kullanım alanı bulmuştur. Endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilecek detonasyon tabancası (D-gun), soğuk gaz püskürtme yöntemi (CGDS), alev sprej yöntemi ve yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) tekniklerine ticari faaliyetlerde oldukça sık rastlanmaktadır. Tablo 2.1’de endüstriyel sektörlerde tercih edilen termal sprej yöntemleri verilmiştir (J.R. Davis ve Associates. ASM International. Thermal Spray Society Training Committee., 2004; Pawłowski, 2008; Szymański vd., 2015).

Tablo 2.1: Endüstriyel sektörlerde tercih edilen termal sprey kaplama prosesleri

Endüstriyel Sektör	HVOF	D-gun	APS	VPS
Havacılık Gaz Türbini	*	*	*	*
Tarım			*	
Mimari			*	
Otomotiv Motorları	*		*	
İş Ekipmanları	*	*	*	
Çimento ve Kil Üretim Ekipmanları	*		*	
Kimyasal İşleme	*	*	*	
Bakır ve Pirinç Fabrikaları				
Savunma ve Havacılık	*	*	*	*
Dizel Motorlar	*	*	*	
Elektrik-Elektronik	*	*	*	*
Gıda İşleme	*	*	*	
Cam Üretimi		*	*	
Hidro-Buhar Türbinleri	*		*	*
Demir-Çelik Döküm İmalatı	*	*	*	
Deniz Ekipmanları İmalatı ve Onarımı				
Medikal	*	*	*	
Madencilik	*		*	
Nükleer	*	*	*	
Petrol ve Gaz Arama	*	*	*	
Tekstil	*		*	
Demiryolu	*		*	

Termal sprey uygulamalarının kaplama işlemleri için ihtiyaç duyulan kinetik ve termal enerjiyi elde etme yöntemlerine göre sınıflandırması Şekil 2.6'da verilmiştir(Dorfman, 2018).



Şekil 2.6: Termal sprey kaplama teknikleri şematik gösterimi

Termal sprey kaplama teknikleri endüstrinin beklentilerini optimum düzeyde karşılamalarına rağmen, istenilen tüm özellikleri aynı anda sunabilmeleri mümkün değildir. Bu nedenle kaplamadan beklenen özellikler ve termal püskürtme tekniklerinin malzemeye

kazandırdığı özellikler karşılaştırılarak en uygun prosesin tercih edilmesi ticari faaliyetler açısından son derece önemlidir (Döleker, Özgürlük, Özkan, vd., 2018; Döleker, Özgürlük, Parlakyiğit, vd., 2018). Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde endüstrilerde sıklıkla kullanılan termal sprey kaplama teknikleri açıklanmıştır. Tablo 2.2’de termal sprey kaplama proseslerinin karşılaştırmalı parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.2: Kaplama proses parametrelerin karşılaştırmalı gösterimi (Fantozzi vd., 2017; Szymański vd., 2015’den değiştirilerek)

Proses	Isı Kaynağı	İvmelendirici Gaz	Hammadde Besleme Tipi	Püskürtme Tabancası Sıcaklığı (°C)	Parçacık Hızı (m/s)	Kaplama Malzemeleri	Hacimsel Gözeneklilik Seviyesi (%)
Elektrik Ark	Elektrotlar arası ark	Hava	Tel	6000	240	Sünek Malzeme	8-15
Plazma Ark	Plazma ark	Hava	Tel	6000	120-600	Seramik, plastik ve kompozit	2-5
Düşük Basıncılı Plazma Püskürtme	Plazma ark	Atıl Gaz	Toz	16000	500	Metalik, seramik, plastik ve kompozit	<5
Alev Püskürtme	Oksi-Asetilen/Oksi - Hidrojen	Hava	Toz	3000	30-120	Metalik ve seramik	10-20
D-gun	Oksijen Asetilen	Patlama şok dalgaları	Toz	4500	800	Metalik, seramik, plastik ve kompozit	0,1-1
HVOF	Oksipropilen/ Hidrojen/Propan/LPG	Yanma Jeti	Toz/Tel	3000	800	Metalik ve seramik	0,1-2

Yukarıda verilen tabloda elektrik ark, plazma ark, düşük basınçlı plazma püskürtme, alev püskürtme, D-gun, HVOF tekniklerinin ısı kaynakları, malzeme besleme tipleri, püskürtme tabancası sıcaklıkları, parçacık hızları, kaplama malzemeleri ve kaplama sonrası gözeneklilik oranları açıkça verilmiştir. Tablo 2.3’de bazı termal püskürtme yöntemlerinin temel özellikleri, hammadde yapıları ve kaplama nitelikleri verilmiştir.

Tablo 2. 3: Bazı termal sprej kaplama tekniklerinin karakteristik özellikleri (Berger, 2015; Meghwal vd., 2020a; Menapace vd., 2020)

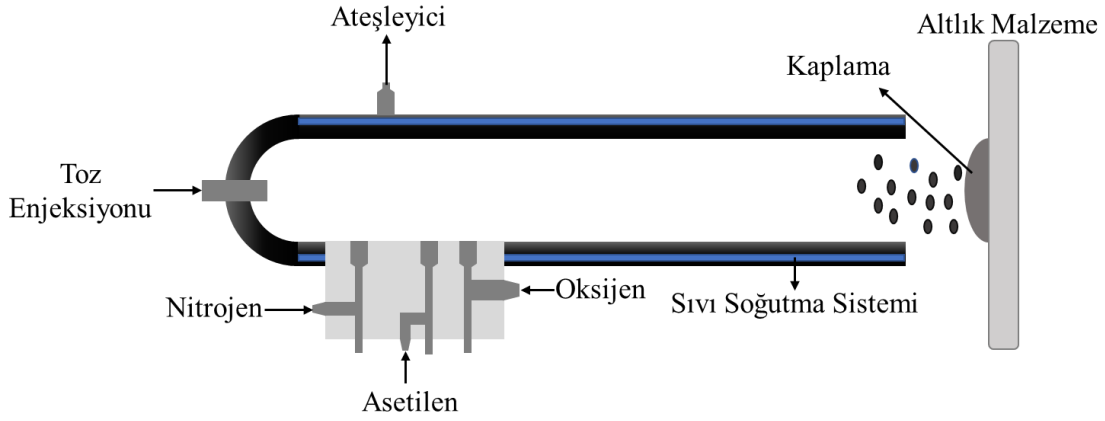
PROSES	AÇIKLAMA	HAMMADDE YAPISI	KAPLAMA ÖZELLİKLERİ
Plazma Püskürtme	Elektrotlar arasında bir elektrik arkı üretilir ve plazma jeti vasıtası ile püskürtme tozu altlık malzeme yüzeyine püskürtülür.	Genellikle katı malzemeler tercih edilen proseste son zamanlarda solüsyon kullanımı da yaygınlaşmıştır. Seramik oksit püskürtmede kullanılır.	Gözeneklilik %3-%8 arasındadır. >40-50 Mpa'lık iyi yapışma. Biriktirme Verimliliği %50.
Tel Ark Püskürtme	Teli sistemden bağımsız olarak içeri taşıyan ekipman vardır. İletken telleri eriten ark kaynağıdır. Eriyik haldeki malzeme basınç sayesinde malzeme yüzeyine püskürtülür	Teller genellikle sünek malzemeden veya sünek olmayan seramik bir malzeme ile doldurulmuş hazneden üretilir.	Gözeneklilik %10'un oldukça üzerindedir. <30 MPa Düşük yapışma. Biriktirme verimliliği %80.
Alev Sprej Püskürtme	3000 K'e kadar ulaşan yanma sıcaklıkları için oksiasetilen kullanılır. Kaplama sonrasında düzeltebilme imkanı sunan yüksek gözenekliliğe sahip malzemeler üretilir.	Toz veya çubuk kullanılarak metal ve polimerler püskürtülür.	>%10 ve üzeri yüksek gözeneklilik. <30 Mpa düşük yapışma. Biriktirme verimliliği %50. %6-%12 arasında yüksek oksit içeriğine sahiptir.
Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF)	Süpersonik gaz akış hızları sistemin karakteristik özelliğidir. Özel püskürtme tabancaları ile 0,24 Mpa-0,82 Mpa arasında değişen optimum basınç sağlanır. Püskürtme tabancasına bağlı olarak radyal, eksenel veya ikisi birden kullanılarak malzeme yüzeyine malzeme püskürtülür.	Genellikle metal alaşımları ve sermetler için uygun olan bu proseste çözelti ve süspansiyon hammadde enjeksiyonu da gelişmiştir.	60 MPa-80 MPa' a arası üstün yapışma. Biriktirme verimliliği %70. Düşük gözeneklilik. %0,5 ve altında düşük oksijen içeriğine sahiptir.
Detonasyon Tabancası (D-gun)	Asetilen/hidrojen, oksijen ve ihtiyaca göre nitrojen yardımı ile patlatma işlemi gerçekleştirilir. Patlatma sonucu oluşan şok dalgası ile malzeme altlık yüzeye püskürtülür.	Yaygın kullanım alanı metal, alaşım ve sermet tozlarıdır.	%1' in altında düşük gözeneklilik. %0,1-%0,5 arasında düşük oksijen içeriği. Biriktirme verimliliği %90. Üstün yapışma özelliklerine sahiptir.

Detonasyon tabancalı sprej kaplama tekniği endüstride yaygın olarak, D-gun şeklinde adlandırılmaktadır. 1950'li yılların başında Union Carbide tarafından ilk çalışmalar gerçekleştirilmiş olup bununla birlikte patlatma tabancası 1960'larda Ukrayna'nın Kiev bölgesinde bulunan Paton Enstitüsünde geliştirilmiştir. D-gun sprej tekniği, toz

partiküllerini ısıtmak ve hızlandırmak için patlatma olarak isimlendirilen yöntemi kullanır. D tabancası olarak isimlendirilen bölümün iç çapı genellikle 25 mm olan uzun ve su soğutmalı bir namlu içerir. Namlu içerisine oksijen ve asetilen karışımı, kaplama partikülleriyle enjekte edilir. Gazın tutuşması ile patlama gerçekleşir ve patlama dalgası kaplama tozlarını hızlandırır. Patlama esnasında gerçekleşmesi muhtemel olan geri tepmeyi yani yakıt gazı tedarik bölümünün patlamasını engellemek için sisteme inert bir gaz olan nitrojen veya azot takviye edilir. D-gun patlatma işleminde aşağıda verilen döngüler gerçekleşir (Karaoğlu vd., 2020).

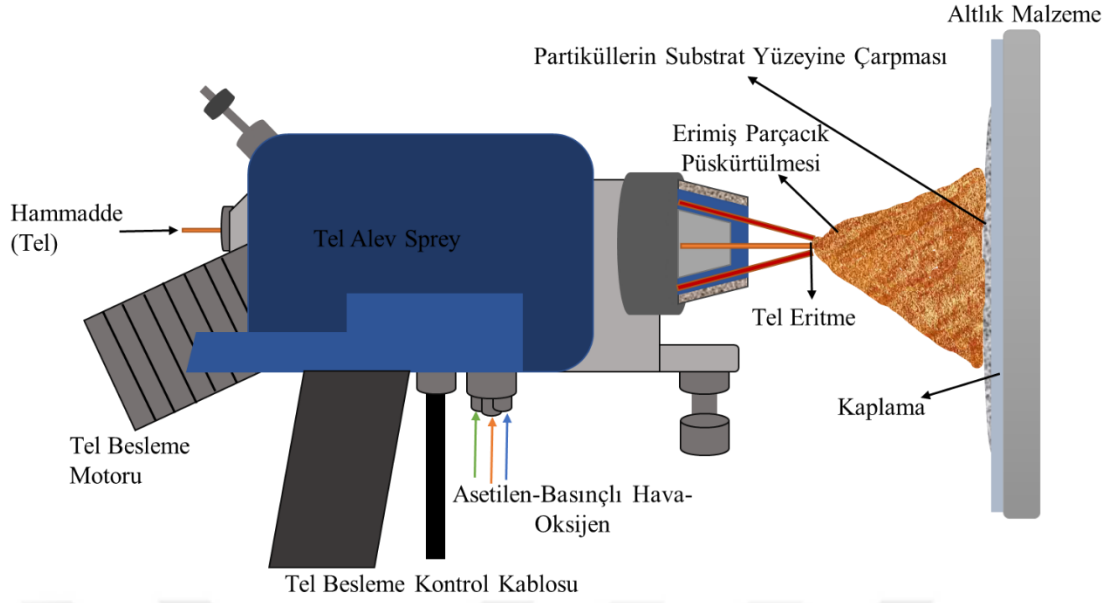
- Yanma odasına oksijen ve yakıt enjeksiyonu
- Geri tepmeyi engellemek için toz ve nitrojen enjeksiyonu
- Karışımın tutuşturulması ve tozun hızlanması
- Namlunun nitrojen ile temizlenmesi

Saniyede 1 ile 15 arası patlatma gerçekleşmektedir. Patlatma işlemi ile kaplama malzemeleri altlık malzeme yüzeyine püskürtülür. Yanma gazlarının oranı kontrol edilebilir ve bu sayede kaplama partiküllerinin uçuş hızı 1200 ms^{-1} 'e kadar yükseltilebilir. Elde edilen bu yüksek kinetik enerji sayesinde sıcak partiküllerin altlık malzemeye yüzeyine ciddi şekilde çarpması sağlanır. Bu sayede çok yoğun ve güçlü kaplamalar üretilebilir. Son derece yüksek partikül uçuş hızı ve daha düşük çalışma sıcaklıkları sayesinde daha yoğun ve yüksek amorf faz içeriğine sahip kaplamalar elde edilmesine olanak sağlar. Patlatma tabancasıyla püskürtme tekniği, endüstride çok etkili bir amorf kaplama teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Pratik mühendislik uygulamalarında yapısal parçalar, kaçınılmaz olarak birbirleri ile temas halinde olacak ve zorlu servis koşullarında yoğun stres etkisinde çeşitli aşınma davranışları ile karşılaşılacaktır. Optimum aşınma performansını sisteme kazandırmak amacıyla geliştirilen D-gun tekniği çok yüksek kalite standartlarında üretim imkanı sunmasına rağmen, yüksek maliyetli bir teknik olarak nükleer güç, kesici uç, havacılık ve uzay, kağıt, plastik ve tekstil endüstrilerinde kullanım alanı mevcuttur. Şekil 2.7'de D-gun patlamalı püskürtme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir (Li vd., 2020).



Şekil 2.7: Detonasyon tabancası (D-gun) spray kaplama yöntemi şematik gösterimi (Li vd., 2020'den değiştirilerek)

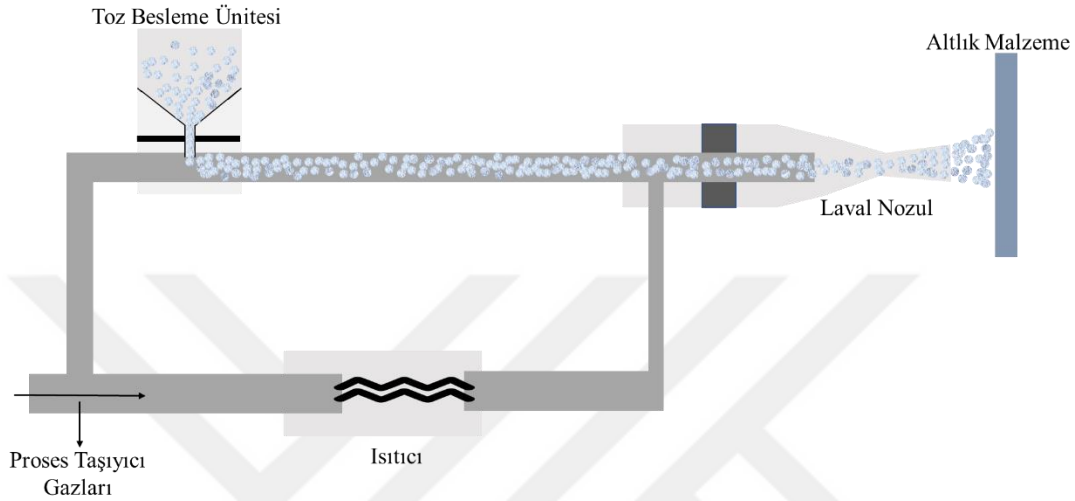
Max Ulrich Schoop tarafından geliştirilen ve patenti alınan alev spray tekniği, bilinen en eski termal spray kaplama yöntemlerindendir. Düşük sermaye yatırımı, yüksek biriktirme oranları, verimlilikleri, nispeten düşük maliyetleri ve görece çalıştırma kolaylığı ile ticari faaliyetlerde kullanılmaktadır. Alev spray yönteminde kaplama partiküllerini eritmek amacıyla ısı kaynağı olarak yanıcı bir gaz kullanılır. Bu teknik ile kaplama hammaddesi olarak tel, çubuk ve toz partiküllerin birçoğu kullanılabilir. Alev spray tekniğinde püskürtme tabancaları elle kullanımı da mümkündür. Proses işletme maliyetlerini ve kaplama özelliklerini dengelemek amacıyla farklı gaz kombinasyonları tercih edilerek oluşturulabilir. Asetilen, propan, metil-asetilen-propadien (MAPP) gazları ve oksijenle birlikte hidrojen yaygın olarak kullanılan gazlardır. Alev sıcaklıkları oksijen oranına (yakıt gazı) ve basıncına bağlı olarak, 3000 K ile 3350 K arasında değişim göstermektedir. Toz, tel olmak üzere iki farklı alev spray tekniği bulunmaktadır. Temel olarak alev püskürtme yöntemi, gaz haldeki yakıtın oksijen tarafından yakılarak alev üretildiği ve partiküllerin hızlandırılarak parça yüzeyine püskürtüldüğü bir proses olarak endüstride kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de tel alev spray kaplama tekniğinin şematik gösterimi verilmiştir (Donadei vd., 2020; Y. C. Liu vd., 2018).



Şekil 2.8: Tel alev sprej kaplama tekniğinin şematik gösterimi (Amin ve Panchal, 2016'dan değiştirilerek)

Soğuk gaz püskürtme yöntemi (CGDS) 1980'lerin sonunda Alkhimov tarafından Rusya'da geliştirilmiştir. Termal sprej kaplama teknikleri içerisinde nispeten yeni bir püskürtme teknolojisidir. Endüstride yaygın olarak soğuk püskürtme (CS) olarak da bilinmektedir. Geleneksel termal sprej tekniklerinden olan, tel ark ve alev püskürtme proseslerinde alt tabakaya çarptırılan partiküller kısmen veya tamamen erimiş halde bulunurken, daha az termal enerji ve daha yüksek kinetik enerjiye sahip olan CGDS tekniğinde partiküller altlık malzeme yüzeyine çarptıklarında katı haldedirler. Bu sayede saf metaller, alaşımlar, kompozitler, nanoyapı malzemeleri ve amorf yapıli malzeme üretiminde, CGDS tekniğı kullanılabilir. Soğuk püskürtme tekniğı, biyomalzeme endüstrisi, polimer ve polikarbonot yüzeyler ve tuzlu su ortamları gibi birçok kritik alanda çalışan makine bileşenlerinin özellikle yorulma aşınma ve korozyon performanslarını iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Y. C. Liu vd., 2018). Proses de çapları 1 ile 50 μm arasında değişen partiküller, partikül besleyici üzerinden toz enjeksiyon tüpü aracılığı ile tipik olarak hava, nitrojen veya helyum gibi ayrı bir toz taşıyıcı akışıyla nozula iletir ve itici gazlarla ivmelendirilmesi sonucu altlık malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle kaplama oluşumu meydana gelir. İtici gaz (taşıyıcı gaz), bir elektrik kaynağı tarafından yüksek sıcaklıklara ulaştırılır ve basınç etkisinde tozlarla homojen olarak karışım sağlayacakları yakınsak-ıraksak laval nozula enjekte edilirler. Gaz-toz karışımı laval nozul ağzından süpersonik hızlara ulaştırılır. Partiküller nozuldan çıktıktan sonra altlık malzeme yüzeyine çarparlar ve

plastik deformasyona uğrayarak yüzeye yapışırlar. Proses sıcaklığı, kaplama malzemesinin erime noktasından daha düşük seviyelerde olduğu için CGDS yöntemlerinde oksidasyon, erime, buharlaşma ve termal işlemlerden kaynaklanan yaygın sorunlarına minimum seviyede rastlanır. Şekil 2.9’da CGDS tekniğinin şematik gösterimi verilmiştir (Viscusi vd., 2019).

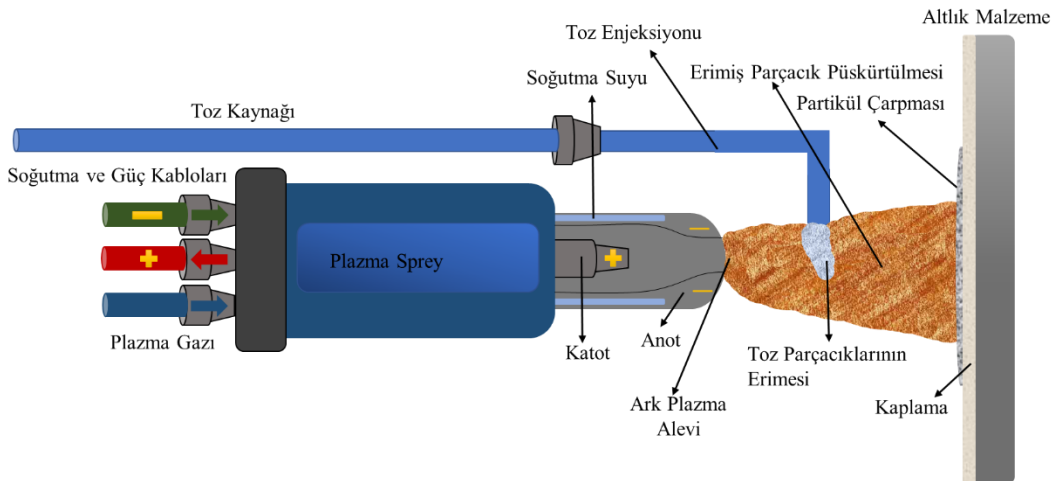


Şekil 2.9: CGDS yönteminin şematik gösterimi (Viscusi vd., 2019’den değiştirilerek)

2.2.1. Plazma Sprey Kaplamalar

Plazma sprej kaplama teknikleri birçok endüstriyel alanda yüksek verimlilik, düşük işletme ve bakım maliyetleri sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Taşımacılık (havacılık, kara taşıtları ve deniz taşıtları) endüstrilerinde, talaşlı imalat elemanlarında, biyomedikal endüstrisinde ve kimyasal işleme endüstrilerinde plazma sprej tekniklerinin kullanım oranı oldukça yüksektir. Bu kaplama yöntemi; sürtünme, aşınma, korozyon ve termal koruma sağlaması ile mühendislikte hayati öneme sahiptir. Bahsedilen endüstrilerde kullanılan makine elemanları hizmet ömrü süresince yüksek sıcaklık, sert ve aşındırıcı partiküller gibi istenmeyen durumlarla karşı karşıya kalmaktadır. Endüstride karşılaşılan herhangi bir bozulmayı önlemek ve mühendislik bileşenlerinin üstün performansla hizmet edebilmelerini sağlamak amacıyla çeşitli iyileştirmelere gidilmektedir. Termal sprej kaplamalar tekniklerinden endüstride en geniş yer edinen, plazma sprej püskürtme yöntemidir. Erime sıcaklıkları oldukça yüksek olan metalik ve seramik esaslı kaplama malzemelerinin bu teknik ile uygulanması mümkündür. Plazma püskürtme işleminde güçlü bir akış

oluşturabilmek için DC elektrik arkı kaynağına ihtiyaç duyulur. İyonize plazma gazı, püskürtme işleminde ısı kaynağı olarak kullanılır. Bakır anot ve tungsten katottan oluşan plazma püskürtme tabancalarında soğutmalı sistem kullanılmaktadır. Plazma gazı (He, H₂, N₂ veya karışımları) katodun etrafında birkaç santimetre uzunluğunda bir plazma bulutu oluşturur ve iyonize edilmiş anottan akar. Plazma gazına enjekte edilen kaplama malzemesi ergitilir ve gaz tarafından alt tabaka yüzeyine püskürtülür. İşlemler gerçekleştirilirken, alt tabaka sıcaklığı 95 °C ve 205 °C aralığında olması gerekmektedir. Kaplamanın sağlıklı olmasını amacıyla alt tabakada soğutma işlemine veya püskürtme hızının tekrar ayarlanmasına gidilebilir (Amin ve Panchal, 2016). Plazma alevine enjekte edilmiş kaplama parçacıkları altlık malzeme yüzeyine çarpmadan önce 200 m/s hızlarına kadar ulaşmaktadır. Kinetik enerji etkisi altında bulunan eriyik haldeki kaplama malzemeleri altlık yüzeyine yayılarak altlık üzerine lamel oluştururlar. Tabanca tasarımı, plazma gazı ve malzeme özelliklerinin doğrudan etkilediği parametreler püskürtme hızı ve püskürtme oranıdır. Plazma püskürtme teknikleri, endüstride yaygın olarak atmosferik plazma sprej (APS), düşük basınçlı plazma püskürtme (LPPS) olarak da adlandırılan vakum plazma sprej (VPS) ve süpersonik plazma sprej (SAPS) olarak endüstride yer edinmiştir. Plazma püskürtme çok yüksek erime noktalarına sahip refrakter özellikli malzemelere kaplama yapabilme imkanı sunar. Endüstride yaygın kullanım alanı olarak diş implantları ve ortopedik protezlere hidroksiapatit olarak uygulanmaktadır. Şekil 2.10'da plazma sprej kaplama tekniğinin şematik gösterimi verilmiştir (Amin ve Panchal, 2016; Odhiambo vd., 2019).



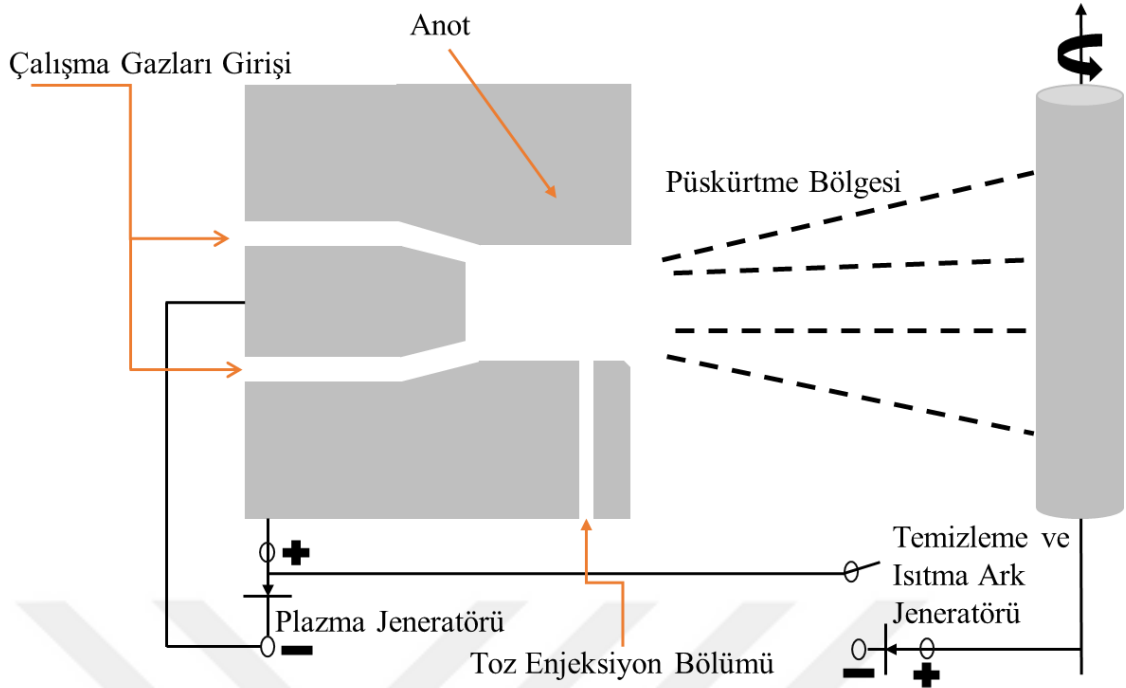
Şekil 2.10: Plazma sprej kaplama tekniğinin şematik gösterimi (Amin ve Panchal, 2016'dan değiştirilerek)

2.2.1.1. Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi

Plazma püskürtme tekniğinin ilk kullanımı ve patentlenmesi Gage ve diğerleri tarafından 1962’de gerçekleştirilmiştir. Termal püskürtme işlemleri kaplama üretimleri arasında ileri teknoloji ürünleri temsil ederler. Plazma püskürtme yöntemlerinden olan atmosferik plazma sprej (APS) püskürtme, atmosfere açık ortamda gerçekleştirilmesinden adını almaktadır. APS tekniği temelde ergiyik, yarı ergiyik veya mikron boyutlarında bulunan katı partiküllerin altlık yüzeyine parçacık püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Sistem tabanca, toz besleme ünitesi, enerji kaynağı ve gaz kaynağından oluşmaktadır. Kaplama amacıyla malzemeye püskürtülen parçacıklar, çarpma anına kadar atmosfer ile reaksiyona girerler. APS tekniklerinde plazma, inert bir gazın yüksek oranda ısıtılması ile elde edilir. Endüstride kullanılan tipik sistemlerde sıklıkla argon veya argon yanında ikincil gaz olarak hidrojen karışımı tercih edilmektedir. Ticari faaliyetlerde 20 KW ile 200 KW güç aralığında çalışan makineler kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık (5000 °C- 20000 °C) yardımı ile ergitilen toz hammaddeler yüksek enerjili akım etkisinde hızlandırılırlar. Sistemi yüksek sıcaklıklardan korumak amacıyla sıvı soğutma sistemlerinden faydalanılmaktadır. Plazma jeti hızlarında (100 ms^{-1} - 600 ms^{-1}) malzeme yüzeyine biriktirme işlemi gerçekleştirilir. Plazma jetin sıcak bölümünde kaplama partikülleri karışır ve homojen hale gelirler (Dosta vd., 2016). Bu sayede, biriktirme ve kaplama oluşumu adımları son derece kolaylaşır. Kaplama kalitesi, kaplama malzemesi partikül boyut dağılımı, hız, uzaklık, gaz akış sıcaklığı, aktarılan ısı, termal genleşme katsayısı gibi püskürtme parametrelerine bağlıdır. Püskürtme esnasında hava ile temas eden partiküllerin deformasyon davranışı ürünlerin yapışmasını, istenen kalınlığı ve nihai üst yüzey pürüzlülüklerini elde etmede etkindir. Temel olarak taşıyıcı amacıyla kullanılan gaza enjekte edilen kaplama partikülleri, ısıtılarak hızlandırılır ve altlık yüzeyine püskürtülür. Altlık yüzeyinde oldukça hızlı soğuma eğilimine giren malzemeler üst üste yığılarak istenilen özellikleri sağlayan kaplama tabakasını oluşturur. Kaplama yapısı birbirine mekanik tutunma ile bağlı ortalama % 30 poroziteye sahip homojen olmayan lamellerden meydana gelmektedir. Bu tekniğin başlıca avantajlarından biri de yüksek sıcaklarda gerçekleştirildiğinde, seramik ve sermet grubu malzemeleri de biriktirmeye olanak sağlamasıdır. Yüksek oranda oksit ve porozite içeriği ile bilinen kaplama yapısı ile APS tekniği, nispeten düşük maliyetleri sonucu özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir (Deshpande vd., 2018).

2.2.1.2. Vakum Plazma Sprey (VPS) Kaplama Yöntemi

Endüstride düşük basınçlı plazma püskürtme (LPPS) olarak da adlandırılan vakum plazma sprej (VPS) tekniği sıcak korozyona karşı dayanıklı kaplamalar biriktirmek amacıyla Wilms tarafından 1980'lerde kullanıldı (Pawłowski, 2008). Saf bakır kaplamaları üretebilmek amacıyla Braguier ve Tueta tarafından da aynı yıllarda kullanıldığı bilinmektedir. Günümüzde endüstrisinde yaygın ticari kullanımına gaz türbin kanatçıklarına, sıcak korozyona karşı dayanıklı kaplamalar üretilmek istendiğinde rastlanmaktadır. 50 µm den daha düşük kalınlıklara sahip kaplamalar elde etmek için fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi gaz fazlı biriktirme yöntemlerine göre nispeten düşük maliyetli alternatif kaplama imkanı sunmaktadır (Han vd., 2022). Vakum plazma püskürtme tekniğinin şematik gösterimi Şekil 2.11'de verilmiştir. VPS, basınçlı gaz ortamında veya vakum altında gerçekleştirilir. Sistemin temel elemanları elektrik ark jeneratörüne sahip plazma torcu ve nozuldur. Kaplama partikülleri, vakum etkisinde çalışan plazma jetine bağlantı noktasından aktarılır (Kuo vd., 2019). Püskürtme işlemene başlamadan önce yüzeyi temizlemek ve gerekli sıcaklığa ulaştırabilmek amacıyla ilave bir ark'a ihtiyaç duyulur. VPS teknikleri oksijensiz özel bölmelerde gerçekleştirilmektedir. VPS uygulamalarında püskürtme tozlarının atmosfer ile teması yoktur bu nedenle oksit içeriği oldukça düşüktür bununla birlikte yüksek yapışma kabiliyetine sahip kaplamalar elde edilebilmesine olanak tanıyan VPS yöntemi ile özellikle reaktif ve yüksek sıcaklıklara dayanımlı üstün kalite standartlarında kaplamalar elde edilebilmektedir. Gelişmiş kaplama kalınlığı kontrolü ve karmaşık geometrilere sahip parçalar üzerinde hızla kaplama imkanı sunan VPS tekniğinde 10 kPa ile 50 kPa (0,1 atm ile 0,5 atm) aralığındaki basınçlara göre tasarlanmış torçlar kullanılır. Temel olarak VPS sistemlerinde oksijen olmayışı ve yüksek alt tabaka sıcaklıklarıyla çalışabilme imkanı, çok daha düşük oksit içeriğine sahip yoğun ve üstün yapışma özellikleri gösteren kaplama üretimine olanak tanır (Kovářík vd., 2015).



Şekil 2.11: VPS tekniğinin şematik gösterimi

2.2.1.3. Süpersonik Plazma Sprey (SAPS) Kaplama Yöntemi

Süpersonik plazma püskürtme, APS temelinde geliştirilmiş ileri seviye yüzey kaplama tekniğidir. APS tekniğine kıyasla daha yüksek ısı kaynağı (20000 K), oldukça yüksek hızlarda parçacık hızı ve daha güçlü indirgeyici atmosfer özellikleri ile endüstride yer almaktadır. Plazma sprej akışı 400 m/s hızlardan 2400 m/s hızlara kadar ulaşabilmektedir. Yüksek kinetik enerji potansiyeli ile erimiş halde bulunan kaplama partiküllerinin yüzeye homojen şekilde dağılması sağlanır (Xi vd., 2020). Aynı zamanda yüksek kinetik enerjinin kaplamaya kazandırdığı avantajlardan biri de kaplama partiküllerinin oksijen ile temas süresini azaltması bu sayede oksit içeriğinin düşük olmasıdır. SAPS kaplamalar, yoğun ve kompakt katmanlı yapı, katmanlar arası yüksek kohezyon gücü, sünekliği ve kaplama ile altlık arasında yüksek bağlanma gücü gibi kapsamlı ve üstün özellikleri ile ticari pazarda kendine yer edinmiştir. Kaplama kalitesini uygulama parametreleri çok önemli ölçüde belirlemektedir bu nedenle kaplamadan istenilen özelliklere uygun işlem parametresi belirlemek son derece hayati önem taşır. SAPS tekniğinin tüm bu avantajları göz önünde bulundurulduğunda termal püskürtme alanında öncü teknolojiler arasında yerini aldığı görülmektedir (Lin vd., 2015).

2.2.2. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yöntemi

Yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme tekniğı 1980'lerin başında geliştirilmeye başlanmıştır. Birçok araştırmacı, Bick ve Jürhens ve Kreye ve diğerleri HVOF hakkında yapılan ilk çalışmaların Thayer School of Engineering (Hanover, USA) ve Browning Engineering (West Lebanon, USA) de yürütüldüğü konusunda hem fikirdir (Dorfman, 2018; Pawłowski, 2008). HVOF hakkında, Browning ve Witfield kardeşlerin ilk çalışmaları yaptığını ileri süren kaynaklarda mevcuttur. HVOF tekniğı endüstriye sonradan kazandırılmasına karşın oldukça hızlı ilerleme kaydetmiş ve kullanım alanı yaygınlaşmıştır. Bu durumun başlıca nedeni, HVOF tekniğinin D-gun püskürtmeye alternatif görülmesi ve endüstride yaygın kullanım alanına sahip D-gun kaplamalara düşük maliyetli alternatif arayışları sonucunda, HVOF ile ilgili farklı ve çok sayıda çalışmalar yapılmasıdır. Ticari faaliyetlere, D-gun tekniğinden daha üstün kaliteye sahip kaplama yapma imkanı sunan HVOF tekniğinin önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde HVOF tekniğı, karbür püskürtülmesinde standart bir teknik halini almıştır. Uzay ve havacılık endüstrisinde daha önceden kullanılan elektrolit krom kullanılarak gerçekleştirilen birçok uygulama, yerini HVOF püskürtme ile uygulanan karbürler ve alaşımlara bırakmıştır (H. Kumar vd., 2018). Şekil 2.12'de HVOF tekniğı ile gerçekleştirilen kaplamaları etkileyen parametreler verilmiştir.



Şekil 2.12: HVOF püskürtme tekniğini etkileyen parametreler (H. Kumar vd., 2018'den değiştirilerek)

2.2.2.1. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Çalışma Prensibi

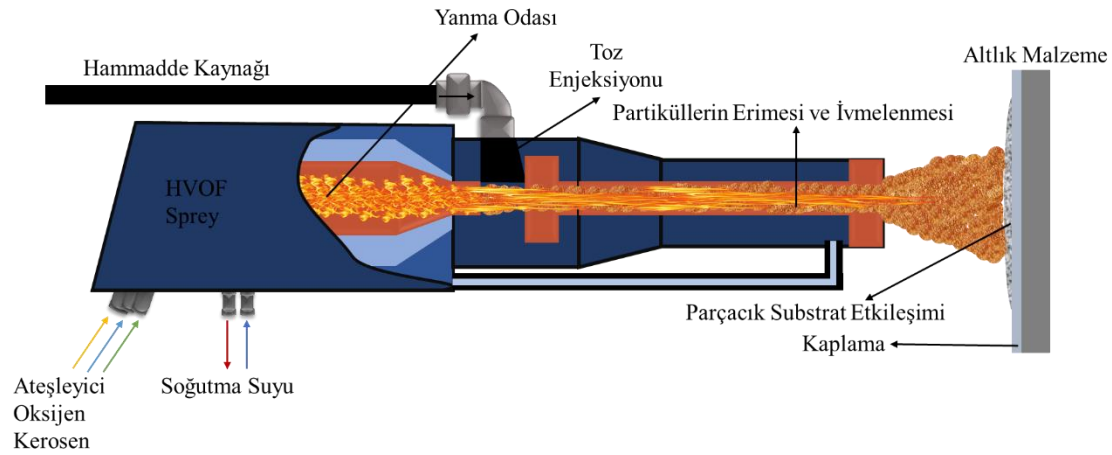
Termal sprej kaplama yöntemleri içinde önemli bir yere sahip olan HVOF sprej, genellikle düşük oksit içeriği ve yüksek bağlanma gücüne sahip yoğun kaplamalar üretmek için tercih edilir. HVOF sprej prosesi gaz veya sıvı yakıt kullanılarak gerçekleştirilebilir. Sıvı yakıt kullanılan proseslere yüksek hızlı hava/yakıt (HVOF) adı verilmektedir. Hidrojen, propan, propilen, kerosen ve gaz yağı olmak üzere çeşitli gaz ve sıvı yakıtlar ile oksijenin kombinasyonu şeklinde kullanılır. Tablo 2.4'de gaz ve sıvı yakıt kullanılarak gerçekleştirilen HVOF proseslerinde oluşabilecek farklar gösterilmiştir (L. Chen vd., 2019; Guzanová vd., 2019). HVOF sprej yönteminde kaplama partikülleri, oksijen ve yakıt, yanma odasına yönlendirilirler. Gazların yanması sonucu karışım haznesinde meydana gelen yüksek sıcaklık ve yüksek basınç, gaz/toz karışımına nozuldan püskürme esnasında süpersonik akış sağlar. Kaplama partikülleri yanma odasında ve nozuldan çıkış sürecinde kısmen eriyik veya

eriyik hale gelirler. Alev sıcaklığı yakıtta, gaz/oksijen oranına ve gaz basıncına bağlı olarak 2500 °C ve 3200 °C aralığında değişmektedir. HVOF sprej yönteminde, süpersonik jet kullanıldığından geleneksel alev sprej yöntemlerinden ayrılarak, altlık malzeme yüzeyinde parçacık birikme etkisinin hızı çok daha yüksektir bu da gelişmiş özelliklere sahip kaplamalar elde edilmesine imkan tanır. Ayrıca mekanizma püskürtme tabancası çıkışında jetin genişlemesi ile alev püskürtme tekniğinden ayrılır (H. Kumar vd., 2018; Lin vd., 2015).

Tablo 2.4: HVOF ve HVAF sistemlerinin karşılaştırılması (L. Chen vd., 2019; Guzanová vd., 2019'dan değiştirilerek)

Parametreler	HVOF	HVAF
Yakıt Çeşitleri	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈	Gaz yağı, Kerosen
Yanma Basıncı	55 Mpa	55-0,83 Mpa
Gaz Hızı	1800-2100 m/s	2000-2200 m/s
Tanecik Hızı	450-600 m/s	475-700 m/s
Toz Yedirme	Eksenel	Radyal
Toz Yedirme Hızı	Yüksek	Düşük
Sprej Oranı	<120 g/dk	<200 g/dk
Tüketim Değerleri		
Yakıt	438000 lt H ₂ veya 5280 lt Propilen	28 lt Kerosen
Oksijen	18420 lt	61400 lt
Su	600 lt	2375 lt

Yanma odası ve püskürtme tabancası su ile soğutulur. HVOF prosesinde alev, hammadde ve püskürtme mesafesi gibi değişkenler kaplama parametreleri olarak görülebilir. Temel olarak HVOF sprej prosesi ile alev püskürtme arasında iki belirgin fark bulunmaktadır. HVOF sprej'de kaplama partiküllerini ısıtmak ve hızlandırmak için sınırlı yanma imkanı ve uzatılmış nozul kullanılmaktadır. Klasik HVOF kaplama cihazı, hipersonik gaz hızlarında yani MACH 5'ten daha yüksek hızlarda çalışır. Hammadde toz yapısı genelde karbürlü kompozit, metal ve alaşım matrislerdir. Toz besleme hızı 20 gr/dk ile 120 gr/dk aralığındadır. Püskürtme mesafesi ise genellikle 150 mm ile 300 mm aralığında değişir. Şekil 2.13'de HVOF püskürtme tekniğinin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Deshpande vd., 2018).



Şekil 2.13: HVOF püskürtme tekniğinin şematik gösterimi (Amin ve Panchal, 2016'dan değiştirilerek)

2.2.2.2. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları

HVOF sprej yönteminde işlem sıcaklıklarının nispeten düşük olması ve partiküllerin altlık malzemeye çarpma esnasındaki hızlarının çok yüksek olması sayesinde gelişmiş özelliklere sahip kaplama üretimine olanak tanır. Elde edilen kaplamalar çok yoğun, üstün yapışma kabiliyeti çok düşük oranda oksit içeriğine sahiptir. HVOF sprej, üstün özellikleri ticari faaliyetler için yöntemi çok çekici kılmaktadır. HVOF tekniği seri üretimde sürdürülebilirliği, maliyet verimliliği gibi avantajlar sunmasının yanı sıra kaplama özelliklerine gelişmişlik kazandırmaktadır. HVOF sprej yöntemiyle kaplanan malzemelerin üstün aşınma direnci ve korozyona karşı dayanım gösterdiği bilinmektedir. Bu metotla istenilen kalınlıkta servis ömrü uzatılmış parçalar elde edilebilmektedir. Kaplamada gözeneklilik % 2'den düşük olmasının yanı sıra bazı kaplamalarda % 0,5'e kadar düşebilmektedir (Henao vd., 2020). Temas ile yüksek stres altında bulunan makine elemanlarına yüksek mukavemet kazandıran HVOF tekniği diğer kaplama tekniklerine kıyasla daha fazla birikme verimliliği sağlamaktadır. Kaplanan malzemenin yorulma ömründe ve darbe duyarlılığında son derece olumlu etki gösterdiği bilinmektedir. HVOF geleneksel termal sprej yöntemlerine göre basit kullanımı, bakım aralıklarının çok uzun, bakım maliyetlerinin düşük olması ve kaplama teknolojisinde gerçekleştirilecek değişimlere çok kolay adapte olması ile öne çıkmaktadır. Üstün özelliklere sahip kaplamaların elde edilebilmesi ile oldukça geniş endüstriyel alanlara hizmet verebilmektedir (Meghwal vd., 2020a). HVOF tekniği ile son yüzey işlemine ihtiyaç duyulmaksızın direkt kullanılabilir

kaplama yüzeyleri elde edilebilmektedir. Tüm bu avantajlarının yanı sıra ana malzemenin yüksek sıcaklıklara çıkması istenmeyen durumlarda, optimum sıcaklığa düşürmek amacıyla çok iyi bir soğutma sistemine ihtiyaç duymaktadır. Düşük gözeneklilik tipik olarak avantaj olsa da endüstri ihtiyaçlarına göre yüksek gözenekli kaplama elde edilmesi gerektiği durumlarda yardımcı malzeme kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. HVOF tekniğinin avantajları Tablo 2.5’de verilmiştir (Tailor vd., 2019).

Tablo 2.5: HVOF tekniğinin avantajları ve avantajı kazandıran etmenler

Kaplamanın Avantajları	Avantajı Kazandıran Temel Etmen
Yüksek yoğunluk (Düşük gözeneklilik)	Yüksek kinetik enerjiye sahip püskürtme
Yüksek korozyon dayanımı	Daha az gözeneklilik
Yüksek sertlik	Üstün yapışma kabiliyeti
Üstün aşınma dayanımı	Sert kaplama
Yüksek yapışma ve bağ kuvveti	Gelişmiş parçacık yapışma özellikleri
	Partikül tozlarının süpersonik hızlar altında püskürtülmesi ile atmosfer ile temas süresinin düşük olması
Düşük oksit içeriği	Daha iyi parçacık ısıtma
Erimiş partikül içeriği	Düşük artık gerilme
Kalın kaplamalar	Daha yüksek darbe gücü
Püskürtme sonrası pürüzsüz yüzey	

2.2.2.3. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Kaplama Yönteminin Kullanım Alanları

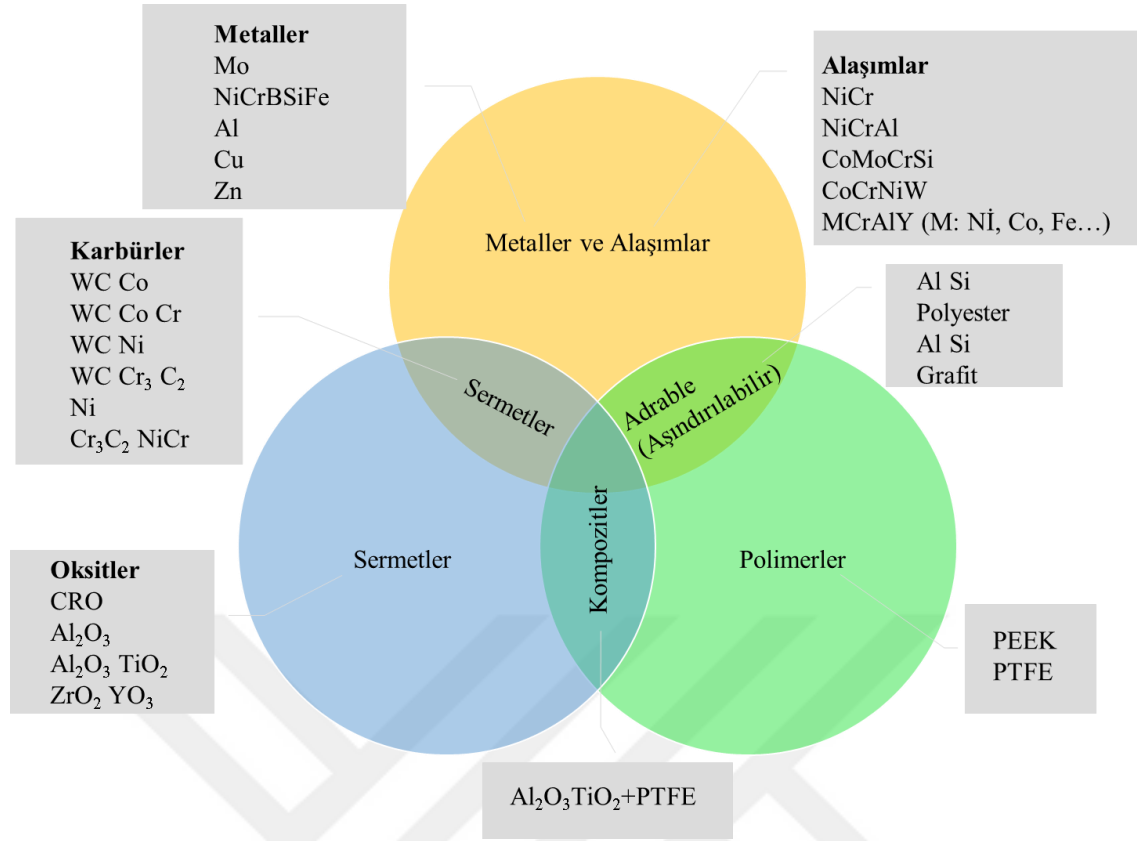
HVOF tekniği üstün özellikli sermet kaplamaların yanı sıra yüksek kaliteli metalik kaplamaların üretimi için son derece elverişlidir. Tüm bu avantajları ile çok geniş bir kullanım alanına sahip olan HVOF püskürtme tekniği havacılık ve uzay endüstrisi (türbin motor kanatçıkları, kompresör kanatları, stator), güç üretimi (endüstriyel gaz türbinleri), otomotiv (şanzıman parçaları), ağır ekipman (piston ve hidrolik çubuk), petro-kimya (pompa bileşenleri), cam üretimi (kalıp pistonları), metal üretim tesisleri (şekillendirme kalıpları ve sac kesiciler), şaftlar, subap iticileri, makine yatakları gibi hava, kara ve deniz endüstrisinin birçok alanında kullanılmaktadır. Tablo 2.6’da endüstride yaygın kullanım alanı olan tozların HVOF sprey püskürtme tekniği ile uygulama alanları verilmiştir (Guzanová vd., 2019; H. Kumar vd., 2018; Ludwig vd., 2019).

Tablo 2.6: Endüstriyel faaliyetlerde yaygın kullanılan tozların HVOF tekniği ile uygulama alanları

Kaplama Tozu	Uygulama Alanı
Ni-Cu	İyi korozyon direnci (özellikle tuzlu su koşullarına karşı koruma için)
Ni-Cr	Erozyon, korozyon ve sıcaklık oksidasyonu direnci
Ni-Cr-B-Si	Yüksek aşınma, korozyon direnci ve termal bozulma direnci
Ni-Cr-Al-Y	Yüksek sıcaklık oksidasyonu direnci
Co-Cr-Ni-W-C	Yüksek sıcaklık ve yoğun stres altında erozyon direnci
Fe-Cr-Ni-Mo-Si-C	Düşük sıcaklık erozyon direnci
WC-Co	Kaplamalarda yüksek aşınma direnci
Cr ₃ C ₂ -NiCr	900°C'e kadar aşınma direnci
Al ₂ O ₃	Yüksek sıcaklık aşınma direnci
ZrO ₂	Termal bariyer kaplama (TBC)
Cr ₂ O ₃	Yoğun stres altında erozyon ve aşınma direnci

2.3. Aşınmaya Dayanıklı Kaplamalar

Teknolojik gelişmeler neticesinde ticari faaliyetlerde kullanılan makine elemanlarının servis koşulları zorlaşmaktadır. Endüstriyel faaliyetlerin beklentilerinin yükselmesi sonucu uzun ömürlü, yüksek performanslı ve üstün özelliklere sahip kaplamaların üretimi hayati derecede önem kazanmıştır. Endüstrilerde karşılaşılan zorluklara korozyon, erozyon, aşınma, termal bozulma ve oksidasyon hasarları örnek verilebilir. Karşılaşılan hasar mekanizmaları, makine elemanlarının servis ömründe, çalışma performanslarında ve verimliliklerinde düşüşe sebebiyet vermektedir. Endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte malzemeler elde edebilmek amacıyla farklı kaplama ve kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Örneğin tuzlu su teması olan yüzeyleri korozyona karşı dayanımlı malzemeler üretebilmek amacıyla saf metallerden Çinko (Zn) tercih edilmektedir. Kullanım yerine göre makine elemanından yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dayanım isteniyorsa MCrAlY (M=Ni, Co veya ikisi) sınıfının üyelerinden NiCrAlY alaşımı tercih edilmesi gerekmektedir (Rasool vd., 2015). Eğer sistemin yüksek stres altında, aşınma dayanımının yüksek olması bekleniyorsa karbür malzemeler sınıfında yer alan WC-Co kaplama üretilmesi, sistemin daha verimli ve performanslı çalışmasını sağlayacaktır. Şekil 2.14'de termal spreyci kaplama yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemeleri ve sınıfları verilmiştir (Madah vd., 2015; Sidhu vd., 2006).



Şekil 2.14: Termal sprey kaplama yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemelerinin gösterimi ve sınıflandırılması

2.3.1. Cr₃C₂-NiCr Kaplama

Sermet malzeme sınıfının bir üyesi olan Cr₃C₂-NiCr kaplamalar yüksek sıcaklıklarda karşılaşılan aşınma ve korozyon sorunlarına ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Cr₃C₂-NiCr kaplamalar hakkında patentlenmiş ilk çalışma, Pelton ve Koffskey kardeşler tarafından 1960'da gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada bileşim Cr₃C₂ ile NiCr'nin mekanik olarak karıştırılması şeklinde oluşturulmuştur. Cr₃C₂-NiCr kaplamalar endüstride çok uzun süre en önemli kaplama malzemesi olarak yer edinmiştir (Jin vd., 2016). Bu bileşimin metalurjik süreçleri hakkında ayrıntılı çalışmalar HVOF püskürtme prosesinin endüstriyel anlamda kullanılmaya başlaması ile gerçekleştirilmiştir. Farklı teknolojilerin gelişmesi ile çok çeşitli kaplama tozları, kimyasal ve faz kompozisyonu çeşitlerinin ortaya çıkması hızlanmıştır. Cr₃C₂ hammaddesi, püskürtme işlemi sırasında genellikle eriyik halde olduğu için oluşan kaplamada amorf faz yoğun bulunur. Karbon kaybı HVOF sistemine bağlı gerçekleşmektedir ve kaplama kalitesi açısından son derece önemlidir. Bununla birlikte düşük yoğunluklu kaplama imkanı sunan bu bileşimde XRD ile tespiti gerçekleştirilebilen tek karbür Cr₃C₂'dir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kaplama işlemlerinin XRD ile

incelenmesi sonucunda, Cr_2O_3 ün kaplama içerisinde varlığını göstermiştir (Ozkan, 2023). Cr_3C_2 -NiCr kaplamaların mikro yapıları, hammadde tozlarının çeşitlerinden ve hazırlanma tekniklerinden etkilenmektedir. Cr_3C_2 taneciğini çevreleyen matris zayıf bağ yapısına sahiptir bu nedenle karbür tane sınırları boyunca ve/veya bazı karbür tanelerinde mikro çatlaklara rastlanması muhtemeldir. Cr_3C_2 -NiCr kaplamaların tüm bu özellikleri göz önünde bulundurulduğunda yüksek sıcaklıklarda çalışan makine elemanlarının aşınma ve korozyona karşı dayanıma ihtiyaç duyduğu bölgelerinde kullanılması endüstriyel açıdan son derece avantajlıdır. Kaplama ile kullanılan makine elemanının performansı, verimliliği ve servis ömründe önemli ölçüde artış gözlemlenebilecektir. Termal püskürtmeli Cr_3C_2 -NiCr kaplamalar, nikel krom alaşımının üstün korozyon ve oksidasyon direnci sağlaması ve krom karbürlerin 900 °C'e kadar gelişmiş aşınma dayanımları ile halen endüstride sıklıkla tercih edilen kaplama türleri arasında bulunmaktadır (T. S. Sidhu vd., 2006b; Zhou vd., 2017).

2.3.2. MCrAlY Kaplamalar

MCrAlY kaplama özellikle havacılık ve uzay endüstrileri başta olmak üzere ticari faaliyetlerde yaygın kullanım alanına sahiptir. Makine elemanlarının oksidasyon, sıcak korozyon ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan MCrAlY bileşiminde, M bileşeni demir, kobalt, nikel ve nikel kobalt kombinasyonları ile oluşturulabilir. Bu sayede diğer kaplamalara kıyasla, üretilen malzemenin özelliklerinin ayarlanmasında daha fazla esneklik sağlar. M-Cr-Al bazlı bileşene dahil edilen itriyum (Y), Al_2O_3 parçacıklarının yapışma özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Havacılık, deniz ve sanayi hizmetlerinin makine elemanlarından beklediği oksidasyon direnci, sıcak korozyon özellikleri, süneklik ve dayanım MCrAlY kaplamalar ile istenilen seviyeye ulaştırılabilir (Donachie vd Donachie, 2002). CoCrAlY kaplamalar söz konusu olduğunda daha esnek bir katı çözeltili matrisinde bulunan monoalüminid (MAI) bileşeni, NiCrAlY kaplamalar incelendiğinde ise Ni_3Al fazının bir karışımını içerir. Matrisleri Nikel ve kobalt bazlıdır, yüksek oranda krom içermesinin yanı sıra alüminyum içeriği de mevcuttur. Kaplama tozunda bulunan alüminyum (Al) yavaş büyüyen bir tortu (Al_2O_3) oluşturur ve oksidasyona karşı birincil korumayı sağlar. Koruyucu tortu (Al_2O_3) için alüminyum kaynağı, bu tarz kaplamaların kullanım ömrü boyunca büyük ölçüde dağılmış monoalüminid (MAI) fazından gelir. İçeriğinde bulunan krom (Cr), sıcak korozyona karşı dayanımı artırmada oldukça etkilidir ayrıca alüminyum (Al) kimyasalın aktivitesini artırır (Y. Chen vd., 2018). Bu sayede kaplamanın ömrü standart difüzyon kaplamalara göre uzatılmakla kalmaz, bununla birlikte

katı çözültü matrisinde çok yüksek oranda bir süneklik sağlar. MCrAlY kaplama ailesinde CoCrAlY kaplamalar sıcak korozyon direnci açısından üstün olduğu kabul edilirken NiCrAlY kaplamalar ise üstün oksidasyon direncine sahiptir. NiCoCrAlY kaplama bileşeni, oksidasyon ve sıcak korozyon arasında endüstrinin isteklerini optimum düzeyde karşılayacak şekilde oluşturulabilirler. MCrAlY kaplamalar temel nikel, kobalt veya nikel kobalt matris bileşenlerine ek olarak % 15 - % 25 Cr, % 10 - % 15 Al ve % 0,2 - % 0,5 Y içeriğine sahiptirler. Kaplamayı daha homojen hale getirebilmek ve alt tabakaya yapışmayı güçlendirmek amacıyla, yüksek sıcaklık sağlayan termal sprey prosesleri ile uygulanması kaplama kalitesinde hayati öneme sahiptir. MCrAlY kaplama bileşimleri istenilen miktarda krom veya alüminyum ile oluşturulabilmesi kaplamaya koruyuculuk ve mekanik özelliklerin optimum performans için dengelenebilmesini sağlamaktadır. MCrAlY kaplamalar geleneksel kaplamalara göre oldukça üstün performans ve özelliklere sahip olmasının yanı sıra makine elemanlarının servis ömründe önemli düzeyde artış sağlarlar. % 27 - % 35 aralığında krom içeriğine sahip CoCrAlY kaplamalar özellikle denizcilik ve endüstriyel türbinlerin korozyona karşı ömürlerin önemli ölçüde iyileştirdiği bilinmektedir. MCrAlY kaplamaların maksimum servis sıcaklıklarının 980 °C olduğu bilinmektedir (Y. Chen vd., 2020).

2.3.3. WC-Co Kaplamalar

Tungsten karbür/kobalt (WC-Co) kaplamalar özellikle havacılık endüstrisi gibi yüksek dayanıma ihtiyacı duyulan ticari faaliyetlerde sıklıkla kullanılan termal sprey püskürtme hammaddelerindendir. WC-Co kaplamalar aşırı sertlik (12-14 GPa), yüksek modül (350-400 Mpa), yüksek girinti tokluğu (5-7 MPa $\sqrt{m}$) ve düşük gözeneklilik (% 0,5) gibi benzersiz özellik kombinasyonu sayesinde aşınma, korozyon ve temas yorgunluğuna karşı mükemmel dayanım göstermektedir. Bu geniş kapsamlı özellikler esasında kaplamanın % 20'sini oluşturan daha yumuşak (2,5 GPa) kobalt matrisindeki son derece sert (24 GPa) WC küboidlerinin tek tip dağılımı ile elde edilir. Küboidlerin tipik boyut ağırlığı 0,5 - 6 μm arasında değişmektedir. HVOF tekniği ile uygulanmaya son derece elverişli bir kaplama malzemesidir (Eswara Wanhill, vd., 2017).

2.3.3.1. WC-Co Kaplama Özellikleri ve Uygulamaları

WC-Co yüksek aşınma dayanımı, düşük gözeneklilik ve korozyona karşı kaplandığı yüzeye son derece gelişmiş özellikler kazandırmaktadır. Ayrıca yüksek erozyon direncine sahip olan WC-Co kaplamalar endüstride özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Nanoyapılı besleme stokları ile üretilen WC-Co kaplamalar, kayar parçalara sahip rulmanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedeni geleneksel kaplamalara kıyasla sürtünme aşınmasına karşı gösterdikleri üstün dayanım özellikleridir. WC-Co malzemeler genellikle kendileri aşındırıcı görevi görürler ve temas halinde oldukları malzemelerin yüzeylerini aşındırırlar (Erfanmanesh vd., 2018). Kaliteli kaplamalar elde edilebilmesi için WC, hammadde tozundan minimum kayıpla yüzeye aktarılması gerekmektedir. Bu nedenle proses sıcaklıkları 2720 °C'nin altında olmalıdır. Kaplama kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri de soğuma hızıdır. WC-Co kaplamada yaygın olarak karşılaşılan sorunlardan biri WC küboidlerinin dekarbürizasyonudur. Kobalt erimesini sağlamak için proses sıcaklığının yükselmesi gerekirken öte yandan yüksek sıcaklık WC'nin ayrışmasına ve dekarbürizasyona yol açar. Bu nedenle yüksek kaliteli kaplamalar elde edebilmek için gaz akım sıcaklığı ve oksidasyon potansiyeli optimize edilmelidir. WC-Co kaplamaların püskürtülmesi sırasında meydana gelmesi muhtemel olan fiziki ve kimyasal değişiklikler dikkate alındığında işleme parametrelerinin optimum seviyede tutulmasının önemi daha iyi anlaşılmaktadır. HVOF tekniği ile gerçekleştirilen bir WC-Co kaplamadan en iyi özellik kombinasyonuna sahip olabilmek için 1,3- 1,5'lik oksiyakıt oranının optimum olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir (Mohanty vd., 2018; Salmaliyan vd., 2017). Ek olarak WC-Co kaplamalar aşınma, kayan aşınma, erozyon, korozyon ve yuvarlanma teması yorgunluğunu azaltarak malzemenin servis ömrünü önemli ölçüde arttırır. WC-Co kaplamalardan elde edilen olağanüstü özellik kombinasyonu, uçak gaz türbinlerinde ve çok sayıda uygulama ile sonuçlanmıştır. Bunlar türbin bölümünde, yakıcıdaki aktüatör piston çubukları, yakıt pompası pervaneleri, yanma odası konumlandırma pimleri, dişli kutusu destek pimleri, burçlar, labirent conta yüzgeçleri ve conta dişlileri, yağ pompası temizleme ve havalandırma boruları, yatak yuvaları ve egzoz, kaporta pimleri gibi çok sayıda işlevsel parçanın gereksinimlerini karşılamak için WC-Co kaplamalar uygulanır. Bunun yanı sıra aşınma, korozyon, sürtünme ve kayma aşınması hasarlarına karşı yüksek dayanım gösteren WC-Co kaplamalar çok çeşitli helikopter bileşenlerine uygulanır (Eswara vd Wanhill, vd., 2017). Bunlar ana rotor milleri, rotor kanadı uzatma manşonları, kanat cıvataları, şanzıman dişlileri, amortisör muhafazaları, eğik

plakalar, kuyruk rotor göbekleri, pinyon dişlileri, kanat yarıçap halkaları, silindir piston tertibatları, iç bilezik yatakları, düz dişliler, yatak tespit somunları, konik tahrik ve giriş dişlileridir. WC-Co kaplamalar havacılık endüstrisine kazandırdığı tüm bu özellikler ile ticari faaliyetler açısından hayati önem taşımaktadır (Mohanty vd., 2018; Salmaliyan vd., 2017).

2.3.4. NiCr Kaplamalar

Alaşım sınıfının bir üyesi olan NiCr bileşimi endüstride çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Ni bileşeni sisteme tokluk, süneklik, korozyon dayanımı, aşınma dayanımı ve oksitlenmeye karşı direnç kazandırır. Krom kaplama birçok endüstri tarafından yüksek aşınma dayanımı, korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik sağlaması ile bilinmektedir (Binal, 2023). Nikel krom karışımı birlikte uygulandığında kaplamaya çok daha yüksek bir korozyon dayanımı ve bahsedilen tüm özelliklerin iyileştirilmiş hali kazandırılmış olur. NiCr tozları küresel bir şekle sahiptir (Henao vd., 2020; Jin vd., 2016).

2.3.4.1. NiCr Kaplama Özellikleri ve Uygulamaları

Uygulandıkları makine elemanlarına korozyon ve erozyona karşı yüksek dayanım kazandıran bu kaplamalar havacılık ve uzay endüstrileri, tarım aletleri, otomotiv motorları, petrol ve gaz arama ekipmanları, çelik haddehane ekipmanları ve kesici uç takımlarında kullanılmaktadır. NiCr kaplamaların ticari faaliyetlere birçok tribolojik fayda sağladığı bilinmektedir (Sadeghimeresht vd., 2016).

2.4. Aşınma Türleri

Aşınma bir katının yüzeyinden mekanik nedenlerle, yani katı sıvı veya gaz haldeki bir karşı gövdenin teması ve görelili hareketiyle meydana gelen ve ilerleyen malzeme kaybıdır. Bir yüzeyde meydana gelen aşınmanın temel nedeni, mikroskobik seviyede pürüzlülüğün varlığıdır. Mikroskop altında pürüzler incelendiğinde kumlanmış yüzeye benzer şekilde görülebilir. Pürüzlerin malzeme yüzeyinde bulunma oranı yüzey pürüzlülüğü olarak ifade edilmektedir. Sürtünme ve aşınmayı azaltmak amacıyla yapılan ilk işlem yüzeyin cilalanması ve kayganlık etkisini artırarak, sürtünme esnasında malzeme kaybını en aza

indirgeyebilmektir. Aşınma mekanizmaları, faydalı biçimde kullanarak pürüzlülük değerleri optimum seviyelere çekilebilmektedir. Bunun sağlanabilmesi amacıyla çok küçük boyutlarda aşındırıcılar yüzeye çarptırılarak, yüksek pürüzlülüğe sahip çıkıntıların alçaltılması hedeflenmiştir. Aşınma yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra, yüzeye göreceli olarak hareket eden bir yük altında başka bir malzeme veya nesne ile etkileşim sonucu oluşur. Bu faktörlerin etkileşim derecesi yüzey yüklemesi, bağlı hareketin doğası ve hızı ile kategorize edilebilir. Bu değişkenler aşınma mekanizmalarını aşındırıcı ve/veya yorulma olarak karakterize etmek amacıyla kullanılır. Aşınma mekanizmaları Tablo 2.7’de verilmiştir (Bergmann ve Vicenzi, 2011a; Xin vd., 2017). Aşınma süreçleri, tribolojik yük tipine ve ilgili malzemelere göre, kayma aşınması, sürtünme aşınması, abrasif aşınma ve malzeme kavitasyonu gibi farklı türlerde sınıflandırılmıştır. Aşınmaya neden olan önemli mekanizmalar yüzey yorulması, adhezif, abrazif ve tribokimyasal reaksiyonlardır. Aşınma mekanizmaları, ayrı ayrı, art arda veya eş zamanlı şekilde gerçekleşebilir. Yüzey yorgunluğu, yüzeye yakın bölgelerde değişen ve artan yüklerin neden olduğu çatlama, çatlak büyümesi ve aşınma parçacıklarının ayrılması ile ortaya çıkmaktadır. Aşınma tekrarlı bir biçimde sürünmeden kaynaklanan yorgunluk ve karşı gövdenin sert pürüzleri veya sürtünen yüzeyler arasında kalan sert parçacıkların teması sonucu gövdede meydana gelen hasar şeklidir (Bergmann ve Vicenzi, 2011a). Aşınma davranışlarının tespiti için kullanılan deneysel metotların uluslararası ASTM standartları Tablo 2.8’de verilmiştir. Adhezif aşınmasında iki metal yüzey yük altında birbiriyle göreceli hareket halindeyken temas noktaları ve atomlar arası kuvvetler nedeniyle lokal olarak kaynayabilir. Ortaya çıkan bağ, alttaki malzemeden daha güçlüyse, bağlanan malzeme kopar veya plastik deformasyona uğrar. Malzemenin bir yüzeyden başka bir yüzeye aktarılması işlemine adhezif aşınma adı verilir (aşındırıcı malzeme seramik olabilir). Adhezif aşınma hafif ve şiddetli şekilde gerçekleşebilir. Şiddetli adhezif aşınmaya örnek sürtünme verilebilir. Ortaya çıkan aşınma yüzeyin yırtılması ve zedelenmesi şeklinde yorumlanabilir. Bu tür aşınmalara dişliler, kamlar, valfler, piston segmanları ve silindirlerde rastlanabilir (Lijesh vd., 2018). Abrasif aşınma, yüzeye çarpan veya yük altında yüzey boyunca hareket eden malzemelerin ana malzeme yüzeyinden parça kaldırmasına verilen isimdir. Malzemenin katı olması bu tarz aşınmalarda önemli değildir, yüzeyle etkileşim ana malzeme yüzeyinde girinti oluşmasına neden olur ve kesme, sürtme, yontma veya yorulma çatlama yoluyla, yüzeyi plastik deformasyona uğratır. Pürüzlü ve sert bir yüzey daha yumuşak bir yüzeye çarparak hareket etmesi durumunda yüzeyde oluk oluşturarak veya malzemeyi birbiri ardına iterek kaldırdığı durumlara işleme aşınması adı verilir. İki yüzey farklı sertlik derecelerinde ise malzeme

kendini yumuşak yüzeye gömme eğiliminde olacak ve daha sert yüzeyin aşınmasına neden olacaktır. Aşınma mekanizmaları; aşındırıcıların sertliği, boyutu ve kırılma mukavemeti, yüzeylerin sertliği ve pürüzlülük dereceleri, yüzeylere etkiyen yük ve bağıl hareket gibi birçok parametreye bağlıdır (Bremerstein vd., 2015; Kalácska vd., 2020).

Kavitasyon, özellikle pompa rötarları ve gemi pervaneleri gibi hidrolik uygulamalar ile ilişkili hasar tipidir. Bu tarz bileşenlerin, döndükçe yüzeylerinde yüksek ve alçak basınç bölgeleri oluşur. Kavitasyon, basıncın, buhar basıncının altına düştüğü ve kaynamanın meydana geldiği durumlarda, yüzeye yapışan kabarcıkların oluşumu şeklinde ifade edilir. Baloncuklar yüksek basınç etkisi altında çökerler ve bir yüzeye temas halinde bulunanlar koruyucu yüzey filmlerini çıkararak metalde plastik deformasyona neden olurlar (Qiu vd., 2015).

Korozyon, bir yüzeyin çevresi ile istenmeyen bir şekilde kimyasal ve elektrokimyasal etkileşiminin sonucudur. Genel olarak korozyon, oksidasyon, sulu korozyon, kuru korozyon olarak farklı başlıklar altında incelenir. Oksidasyon bir metalin atom veya bir molekül etkileşiminin sonucu olarak elektron kaybetmesi ile meydana gelen bir süreçtir. Çoğunlukla oksidasyon bir metalin zaman içerisinde oksijen varlığı sonucu reaksiyona girmesiyle oluştuğu düşünülse de birçok oksidasyon mekanizmasında oksijen içermeyen gerçekleşmektedir (Maher vd., 2022).

Katı partikül erozyon aşınması mikro partiküller içeren sıvı veya gaz akışkanın bir malzemeye temas ederek, yüzeyi plastik deformasyona uğratması olarak tanımlanmaktadır. Aşınma hasar mekanizma tiplerinin hangi endüstriyel alanlarda karşılaşıldığına ilişkin Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.7: Aşınma mekanizma türleri (Deters ve Bartel, 2020'den değiştirilerek)

Sistem Yapısı	Tribolojik Yük (Hareket türleri ve sembolik şekilleri)	Aşınma Türü	Etkili Aşınma Mekanizmaları			
			Yüzey Yorulması	Abrazif	Adhezif	Tribokimyasal Reaksiyon
Katı	Kayma	-	*			*
Arayüz (Tam katı ayırma)	Yuvarlanma					
Katı (Katı sürtünme)		Kayma	*	*	*	*
		Yuvarlanma	*	*	*	*
			*	*	*	*
						
Katı ve partikül		Kayma		*		*
		Kayma	*	*		*
		Yuvarlanma	*	*		*
						
Katı Akış		Akış	*			*
		Titreşim				
						
Partiküllü Akış		Akış	*	*		*
						

Tablo 2.8: Uluslararası aşınma test standartları (ASTM)

ASTM standardı	Deney yöntemi
G 40-96	Aşınma ve erozyonla ilgili terminoloji
G 65-94	Kuru kum ve lastik tekerlek aparatı kullanılarak aşınma ölçme yöntemi
G 73-93	Sıvı çarpma erozyon ölçme yöntemi
G 76-95	Yüksek gaz basıncı kullanılarak katı parçacık çarpması sonucu erozyon ölçme yöntemi
G 77-93	Block-On halka aşınma testi kullanarak kayan aşınma erozyon ölçme yöntemi
G 81-97	Çeneli kırıcı oluk açma aşınma ölçme yöntemi
G 98-91	Malzemelerin aşınma dayanımını ölçme yöntemi
G 99-98	Disk üzerindeki pin aparatı ile aşınma ölçme yöntemi
G 105-89	Islak kum ve lastik tekerlek aparatı kullanılarak aşınma ölçme yöntemi
G 115-93	Sürtünme katsayılarını ölçme ve raporlama rehberi
G 119-93	Aşınma ve korozyon arasındaki korelasyonu belirleme rehberi
G 132-92	Pin aşınma testi için aşınma ölçme yöntemi
G 133-95	Lineer karşılıklı bilye düz kayma aşınma ölçme yöntemi
G 134-95	Katı malzemelerin kavitasyonlu sıvı püskürtme aşınma ölçme yöntemi

Tablo 2.9: Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma tipleri

Endüstriyel Sektör	Abrazif	Adhezif	Yorulma	Erozyon	Kavitasyon	Korozyon/Oksidasyon
Havacılık Gaz Türbini	*	*	*	*		*
Tarım	*			*		
Mimari	*					
Otomotiv Motorları	*	*		*		*
İş Ekipmanları	*	*	*			
Çimento ve Kil Üretim Ekipmanları	*					*
Kimyasal İşleme	*			*		*
Bakır ve Pirinç Fabrikaları	*					*
Savunma ve Havacılık	*	*	*	*	*	*
Dizel Motorlar	*	*		*		*
Elektrik-Elektronik						
Gıda İşleme	*					*
Cam Üretimi	*					*
Hidro-Buhar Türbinleri	*	*	*	*	*	*
Demir-Çelik Döküm İmalatı	*	*		*		*
Deniz Ekipmanları İmalatı ve Onarımı	*			*		*
Medikal	*		*			*
Madencilik	*	*		*	*	*
Nükleer						*
Petrol ve Gaz Arama	*			*		*
Tekstil	*					
Demiryolu		*				*

2.4.1. Erozyon Aşınması

ASTM G40-96 (erozyonla ilgili terminoloji) standartlarına göre erozyon, malzeme yüzeyi ile sıvı, gaz, katı veya bunların karışımları ile oluşan partiküllerin akış ile mekanik etkileşime girmesi sonucu malzeme yüzeyinde plastik ve elastik deformasyona neden olması olarak açıklanmaktadır (Bergmann ve Vicenzi, 2011). Endüstriyel ihtiyaçlara göre üretilen makine elemanlarına yüksek enerji ile çarpan partiküller, hedef malzeme mukavemetinden bir mertebe daha dayanımlı olması sonucunda, malzeme kaybına neden olurlar. Birçok endüstride karşılaşılan erozif aşınma hasarlarını en aza indirgeyebilmek amacıyla ileri mühendislik ve gelişmiş teknolojinin ürünü olan kaplamalar ile ilgili yatırımlar yapılmaktadır. Endüstriyel makine bileşenlerinin servis ortamında bu tür aşınmaya sebebiyet verici partiküller bulunması durumunda, aşınma neredeyse kaçınılmazdır (Q. Wang vd., 2019). Aşındırıcı partiküllerin bulunduğu servis ortamlarına örnek olarak mineral işleme ve ayırma tesisleri verilebilir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan termik santrallerde, çelik ve çimento üretiminde, kağıt üretiminde ve petrokimya endüstrilerinin servis ortamlarında da aşınmaya sebebiyet verici partiküller bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki erozyon, partikül akışlı ortamda çalışan makine, türbin, motor ve kazan bileşenlerinin hasar görmesine, bozulmasına ve servis ömürlerinin çok ciddi oranda kısılmasına neden olmaktadır (Noon ve Kim, 2016). Örneğin petrol endüstrisinde kullanılan ve toz yakıtla çalışan kazanlarda uçucu küllerin neden olduğu erozyon makine ekipman arızalarının yaklaşık % 25’lik kısmının başlıca nedenidir. Erozif aşınma sürecindeki etkenlerin, farklı mekanizmalarla makine elemanlarının hasar görmesine neden olduğu bilinmektedir (R. Liu vd., 2015). Bir partikül metal bir yüzeye çarptığında, bu malzemenin tepkisi esas olarak akma dayanımına bağlı olarak, elastik ve plastik deformasyonla sonuçlanabilir. Hutchings’e göre, bir partikülün sünek bir malzeme üzerindeki etkisinin neden olduğu hasarın uzantısını bilmenin yolu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Bergmann ve Vicenzi, 2011b).

$$B = \rho \frac{v^2}{\sigma_y}$$

Bu eşitlikte:

B = En iyi metz numarası (boyutsuz)

ρ = Hedef malzemenin yoğunluğu (Mg/m³)

V = Parçacık çarpma hızı (m/s)

$$\sigma_y = \text{Hedef malzemenin akma dayanımı (MPa)}$$

İfade etmektedir.

Düşük çarpma açılarında gerçekleşen erozif aşınma malzeme yüzeyinde mikro kesmelere sebebiyet vermektedir. Düşük çarpma açılarında gerçekleşen erozif aşınmaya karşı yüksek yüzey sertliği istenmektedir. Yeterli düzeyde sertlik sağlanırsa parçacık hızı çok yüksek olmadıkça seramik gibi kırılgan malzemeler bile koruyucu olarak kullanılabilir. Yüksek çarpma açılarında gerçekleşen aşınma ise sünek metallerde mikro/makro çatlamlar ile sonuçlanabilmektedir. Herhangi bir malzemenin yüksek çarpma açılarında gerçekleşen aşınmaya karşı dayanımı, kırılmadan önce absorbe edebileceği enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Bu değer malzeme gerilme-gerinim eğrisi altında kalan alanın ölçüsü ile belirlenebilir (Bergmann ve Vicenzi, 2011b).

2.5. Katı Partikül Erozyonu

Aşınma, katı bir yüzeye farklı malzemelerin temas etmesi durumunda gerçekleşen nispi hareket nedeniyle meydana gelen malzeme kaybı hasarlarına verilen genel isimdir. Aşınmanın malzemelerde mekanik ve/veya kimyasal olumsuz sonuçlar doğurması kaçınılmazdır. Endüstriyel makine bileşenlerinin güvenilirliği üzerindeki hayati etkilerinin kabul edilmesinin yanı sıra aşınma sonucu ortaya çıkan maliyetlerinde çok yüksek olduğu bilinmektedir. Aşınma konusunda sistematik çalışmalara 1960'lı yıllarda başlanmış olmasına rağmen günümüzde halen bu sorunların devam etmesi aşınma olgusunun karmaşıklığını açıkça ortaya koymaktadır. Endüstride sıklıkla karşılaşılan aşınma sorunları arasında yer alan katı partikül erozyonu hakkında çok çeşitli akademik çalışmalar süregelmektedir (Kleis ve Kulu, 2008).

Tipik bir aşınma çeşidi olan katı partikül erozyonu, küçük katı parçacıkların malzeme yüzeyine tekrarlı çarpması sonucu, hedef yüzeyde meydana gelen hasar mekanizmalarına verilen isimdir. Partiküllerin bir gaz veya sıvı ortamında önemli bir hızda yüzeye çarpması ve/veya yüzeyde sürüklenmesi ile SPE meydana gelir. Katı partikül erozyonunun etkileri uzun süredir bilinmektedir. Bunun yanı sıra SPE'nin yararlı olduğu kumlama ve yüksek hızlı aşındırıcı su jeti kesimi gibi kullanım alanları da mevcuttur. Ancak buhar ve jet türbinleri, parçacıklı madde taşıyan boru hatları, valfler, yakma sistemleri ve akışkanlı yataklar başta olmak üzere birçok mühendislik sisteminde hayati derecede önemli bir sorundur. Tablo

2.10’da katı partikül erozif aşınmaya uğrayan makine bileşenleri verilmiştir (Patnaik vd., 2010a). Birden fazla süreci içerisinde barındırdığı için karmaşık bir aşındırma mekanizmasıdır. Ana süreç olarak katı partiküllerin hedef malzemeye çarpmasından kaynaklanan mekanik hasarlar bilinmektedir. Buna karşın erozyon sırasında partikül ve yüzeyler arasındaki termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar gibi ikincil süreçlerde son derece önemlidir. Erozif ortamlarda çalışan makine bileşenlerinin ömürlerinde ciddi kısaltmalar ve arızaların meydana geldiği bilinmektedir. Erozif ortamlarda çalışan sistemlere örnek olarak uçak gaz türbini/kompresör kanatları, kum bulamaçları taşıyan boru hatları, petrol arama ve arıtma sistemleri roket motoru kuyruk memeleri ve uçucu küle maruz kalan kazan boruları verilebilir. Deney koşulları ile test edilen malzemelerin aşındırıcı karşısında verdiği tepkiler arasında korelasyon olduğu oldukça erken fark edilmiştir. Bunun sonucunda Tilly ve diğerleri parçacık özellikleri, darbe parametreleri, parçacık konsantrasyonu, malzeme sıcaklığı ve çekme gerilimi dahil olmak üzere erozyonu etkileyen çeşitli parametrelerin kapsamlı bir analizini gerçekleştirdi.

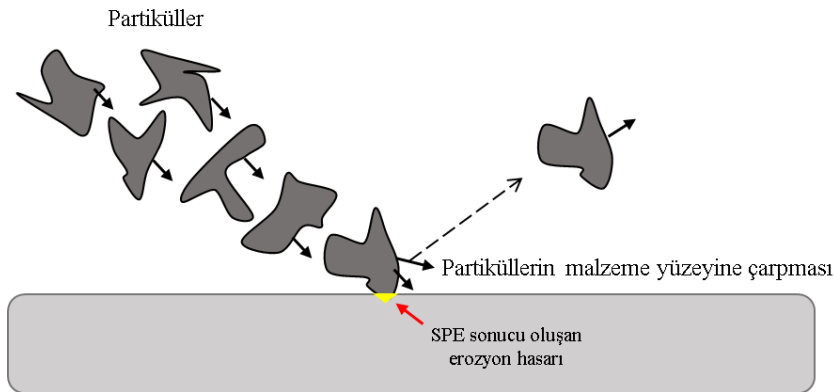
Tablo 2.10: Katı partikül erozyonuna maruz kalan makine bileşenleri

Sistem	Makine Bileşeni
Uçak motoru	Gaz türbin ve kompresör kanatçıkları
Helikopter motoru	Rotor ve gaz türbin kanatçıkları
Kömür gaz prosesi	Türbin, kilit hazne valfleri ve genişleme türbini
Kömür sıvı prosesi	Üretilen buharı ayarlamak için kullanılan boğaz
Yanma sistemleri	Yanıcı memeler ve ısıtıcılar
Hidrolik maden ve makineler	Pompalar ve valfler
Kimyevi fabrikalar	Hava akışlı abrazif malzeme taşıyıcılar

Ruff ve Wiederhorn, seramik ve metallerin erozyonu üzerine tek ve çoklu parçacık modellerini göz önüne alarak katı partikül hakkında farklı bir incelemeyi literatüre kazandırmışlardır. Humphrey ise sıvı hareketinin temelleri ve katı partiküller tarafından gerçekleşen erozyonla ilgili kapsamlı bir çalışmayı literatüre kazandırdı. Çalışma katı

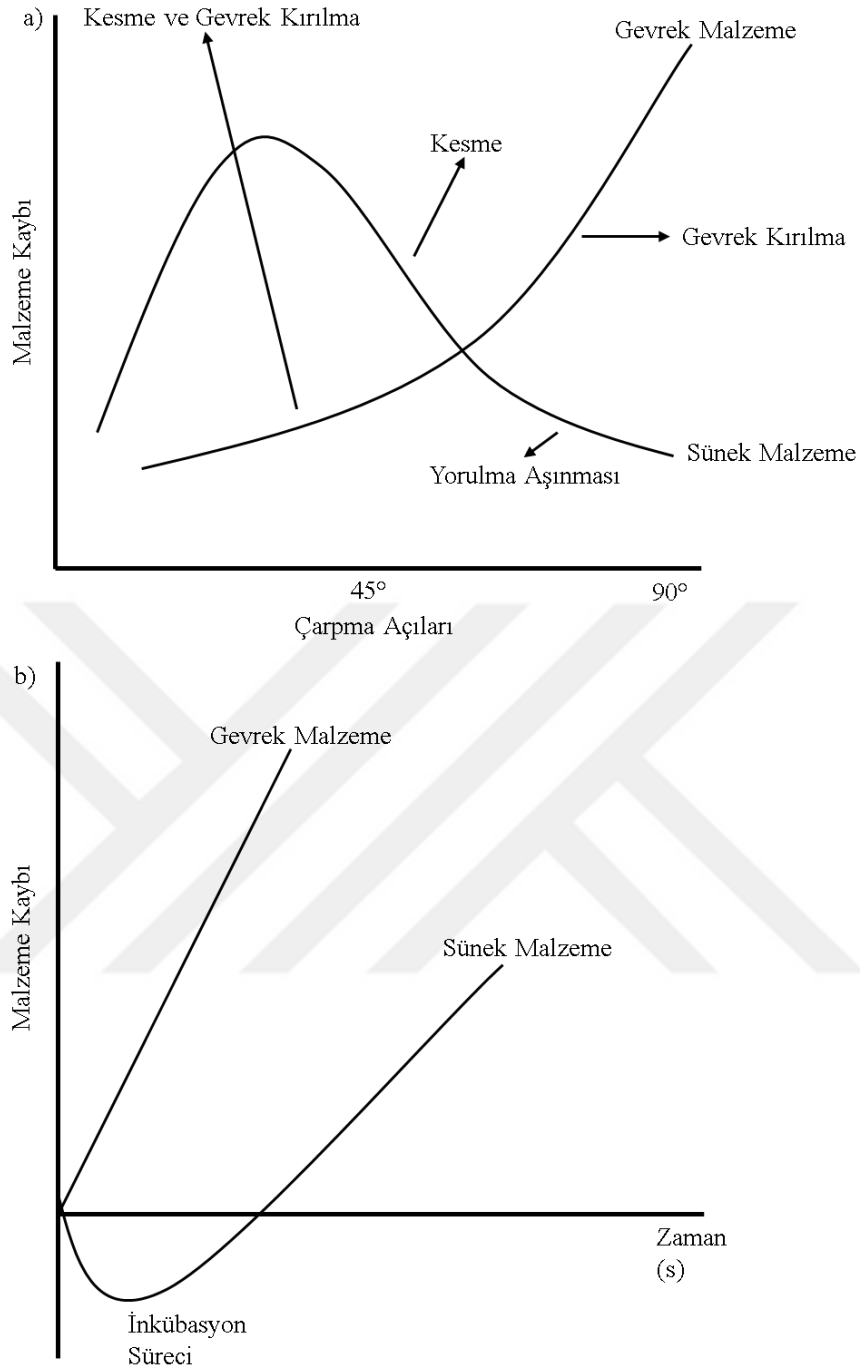
partiküllerin hareketine ilişkin deneysel tekniklerin ve çeşitli temel hususların bir karşılaştırmasını incelemişlerdir. Gaz ve petrol endüstrileriyle de doğrudan ilgili olması nedeniyle boruların ve boru bağlantı parçalarının erozyonu birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu tür endüstriyel uygulamalarda erozyon hızının ve bunun sürece dahil olan diğer parametrelerle ilişkisinin belirlenmesi temel ilkesi kabul edilerek akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söderberg ve Hutchings bu tür deneylerin avantaj ve dezavantajlarını bildirmiştir. Mclaury ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada dirseklerin ve düz boruların içindeki erozyon oranı üzerine dirsek çapı, kum oranı ve boyutunun farklı değerlerinde penetrasyon oranı ile akış hızı arasındaki korelasyon sağlanmıştır. Bu deneysel çalışmaların temel amacı, erozyon miktarı ile ilgili malzemelerin fiziksel özelliklerinin yanı sıra parçacık hızı ve çarpma açısı arasında bir ilişkiyi kurmaktır (Bhushan, vd., 2010; Kleis ve Kulu, 2008; Patnaik vd., 2010).

Günümüz endüstrisinde yüksek teknoloji ile geliştirilmiş makine bileşenleri, ihtiyaç duyulan performansı sağlayabilmek amacıyla her geçen gün ağırlaşan servis koşullarında çalışmaktadır. Çalışma koşullarının zorlaşmasından kaynaklı makine bileşenlerinde katı partikül erozyon aşınması sonucu çeşitli arızalar ve ömürlerinde ciddi kısılmalar meydana gelmektedir. Katı partikül erozyon aşınma mekanizması gerçekleşirken partikül çarpma açısı, çarpma hızı, kütleli debi, partikül boyutu ve çarptığı yüzeyin özellikleri gibi parametreler aşınma oranını önemli ölçüde etkilemektedir. Adhezif aşınmada karşılaşıldığı gibi aşındırılan malzeme ve proses parametrelerine bağlı olarak gerçekleşen plastik deformasyon ve/veya kırılma olayının şematik gösterimi Şekil 2.15’de verilmiştir (Patnaik vd., 2010b).



Şekil 2.15: Katı partikül erozif aşınmasının şematik gösterimi

Sünek ve gevrek malzemelerde aşınma oranı darbe açısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Sünek malzemeler, aşınmış parçacığın yer değiştirmesi veya kesme sonucu plastik deformasyona uğrarken gevrek malzemelerde aşındırıcı partikülün çarpma noktasından etrafına doğru büyüyen çatlak oluşumu ve çatlakların birleşimi ile malzeme kaybı oluşmaktadır (Cernuschi vd., 2016). Bunun yanı sıra sünek ve gevrek yapıda malzemelerin zamana bağlı erozyon aşınma mekanizmaları da farklıdır. Gevrek malzemelerde zamana bağlı lineer erozif aşınma meydana gelirken, sünek karakteristik özelliklere sahip malzemelerde aşındırıcı partikülün hedef malzeme yüzeyine kısmen gömülmesi nedeniyle geçici bir süre inkübasyon (kuluçka) dönemi yaşanır. Çarpma süresi arttıkça önce yüzeye yapışan parçalar kopmaya başlar sonrasında hedef malzeme yüzeyinde elastik ve plastik deformasyon hasarları meydana gelir. Şekil 2.16’da sünek ve gevrek malzemelerin çarpma açısına ve çarpma süresine bağlı erozyon davranışları gösterilmektedir.



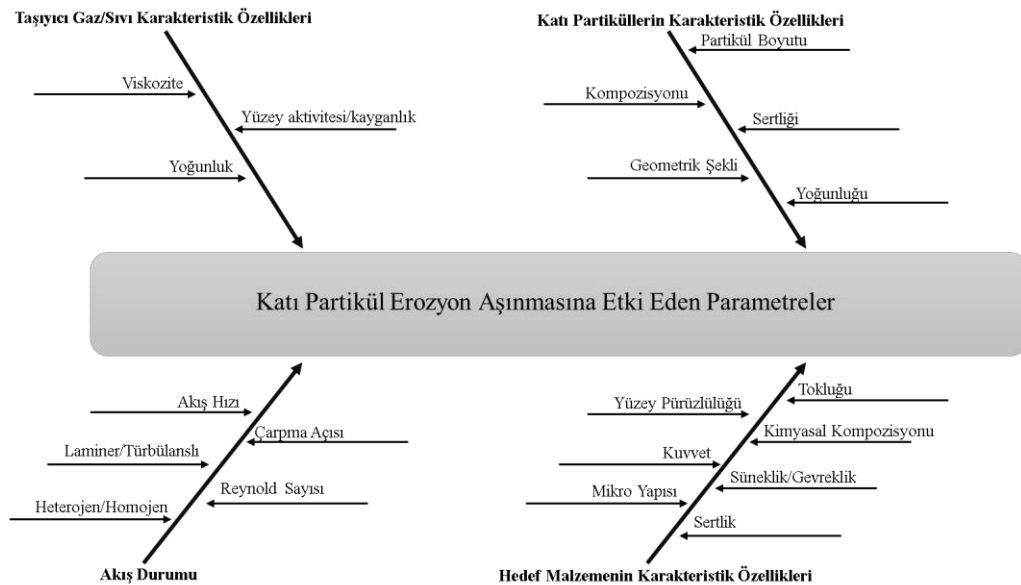
Şekil 2.16: Sünek ve gevrek malzemelerde; a) çarpma açısına ve b) çarpma süresine bağlı değişen aşınma oranları (Barkoula ve Karger-Kocsis, vd., 2002; Hadavi vd., 2019a'dan değiştirilerek)

Sünek malzemelerde gerçekleşen SPE için iki temel aşınma mekanizması söz konusudur. Bunlar kesme erozyonu ve sürtünme şeklinde deformasyondur. Kesme erozyonunda, krater kenarlarının ayrılması, mikro işleme, sürme ve/veya dudak oluşumu ile karşılaşılır. Kesme erozyonu birçok yönüyle abrazif aşınma ile benzerdir. Sürtünme erozyonunda ise

malzemenin ayrılması, girinti tipinin çarpma etkisi altında yüzeyden parçalanması şeklindedir. Tek tip bir kraterin etkisi, çarpma sonucunda malzemede bulunan girintileri yükseltir ve art arda gelen darbeler neticesinde girintilerde gerilim seviyesini artırır. Yüksek gerilim seviyelerine ulaşan metalde düzleşmiş ince levhalar oluşur ve darbeler neticesinde yüzeyden kopma gerçekleşir. SPE aşınma oranı büyük ölçüde çarpma açısına bağlıdır. Yüzey sertliği ve süneklik ise SPE’ de aşınma davranışları için son derece önemli kriterlerdir (Peng ve Cao, 2016).

2.5.1. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Parametreler

Katı partikül erozyonunda karşılaşılan hasar mekanizmalarının tespiti ve aşınmaya karşı optimum performans elde etmek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde izlenebilecek en iyi strateji SPE’i etkileyen parametreleri optimum şekilde belirlemektir. Farklı araştırmacılar tarafından katı partikül erozif aşınması üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda partikül boyutu ve geometrik şekli, sertlik, yoğunluk, çarpma açısı, çarpma hızı, hedef malzeme sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı gibi parametrelerin etkileri incelenmektedir. Şekil 2.17’de SPE’e etki eden parametreler şematik olarak verilmiştir (Bagci, 2016).



Şekil 2.17: Katı partikül erozyon aşınmasına etki eden parametreler

Katı partikül erozyonu temel olarak dört ana başlık altında ve dört temel parametreyi etkileyen değişkenlere bağlı olarak incelenebilir. Buna karşın çoğu araştırmacı çalışmalarında partikül çarpma açısı, hızı, kütsel debisi, boyutu ve aşınan malzemenin özelliklerine odaklanmaktadır (Jindal vd., 2022).

2.5.1.1. Partikül Çarpma Açısı

Çarpma açısı hedef yüzey ile katı partiküllerin birbirlerine temas ettiğinde aralarında kalan açıdır. Çarpma açısı ile erozyon aşınmasının değişimi sünek ve gevrek malzemeler için farklılıklar göstermektedir. Sünek malzemeler için maksimum aşınmaya genellikle 20°-30° açıları karşılaşırlarken bu durum gevrek malzemeler için 90° olarak ifade edilmektedir. SPE prosesinde yüksek çarpma açıları mikroyapıda plastik deformasyona yol açarken düşük darbe açıları sürme/kesme mekanizmasına daha sık rastlanmaktadır. SPE deneyleri sonrası meydana gelen hasarların daha anlaşılır olabilmesi amacıyla, gevrek malzemeler ile gerçekleştirilen deneyler genellikle dik çarpma açıları ile gerçekleştirilirken, sünek özellik sergileyen malzemeler ise düşük çarpma açıları SPE aşınmasına tabi tutulmaktadır (Zahedi vd., 2018). Bununla birlikte 30°- 45°- 60°- 90° açılarda gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda mevcuttur. Abedini ve diğerleri Al-pirinç alaşımıyla gerçekleştirdikleri katı partikül erozif aşınma deneylerinde maksimum aşınma oranına 30° çarpma açısında ulaşmışlardır. Doe Yoganandh ve diğerleri katı partikül erozyonunda çarpma açısının etkisinin % 21 olduğunu tespit etmişlerdir. Katı partikül erozif aşınması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda farklı çarpma açıları deney gerçekleştiren araştırmacı oranın % 20 olduğu bilinmektedir (Bhushan, vd., 2010.; Kleis ve Kulu, 2008; Patnaik vd., 2010a).

2.5.1.2. Partikül Çarpma Hızı

Katı partikül erozyonunda çarpma hızının malzemeyi aşındırması üzerinde son derece önemli etkileri mevcuttur. Çünkü yüksek hız, malzeme kaldırma oranını etkileyen, artan partikül frekansını belirleyen ana etmenler arasındadır. Literatürde oldukça yüksek bir sayıya ve orana sahip olan araştırmacılar farklı hızlarda deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yoganandh ve diğerleri katı partikül erozyonunu incelerken hızın erozyon oranı üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre oldukça yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Çarpma hızının sayısal olarak erozyon oranına etkisinin % 60 olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonucu

destekleyen farklı çalışmalarda mevcuttur. Sahoo ve diğerleri de aynı şekilde çarpma hızının erozyon oranı üzerindeki etkisinin diğer parametrelerden oldukça yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacıların birçoğu katı partikül erozif aşınma deneylerinde hızı 15 m/s ile 20 m/s arasında belirlemişlerdir. Buna karşın bazı çalışmalarda çarpma hızının 95 m/s'e kadar yükseltildiğine de rastlamak mümkündür. Araştırmacıların %80'den fazlası katı partikül erozif aşınma deneylerinde farklı hız parametreleri kullandığı bilinmektedir (Cernuschi vd., 2016; Patnaik vd., 2010b).

2.5.1.3. Partikül Kütlesel Debisi

Partikül akış hızı yani kütlesel debisi (birim zamanda birim alana çarpan malzeme kütlesi) erozif aşınma hızının farklı bir kontrol parametresidir. Teorik olarak erozyon hızı hedef yüzeye çarpan partiküllerin kütlesel debisinden farklı olmalıdır çünkü bu durumda tüm parçacıkların hedef yüzeye eşit hızlarda çarptığı varsayılmaktadır. Kütlesel debinin bir eşik değere kadar partikül hızı ile aynı olduğu bilinmektedir. Partiküllerin kütlesel debisi arttıkça birim zamanda hedef yüzeye çarpan malzeme miktarında da artış olacaktır bunun sonucunda hedef malzeme daha yüksek oranda hasara maruz kalacaktır. İki çarpma arasında geçen sürenin kısılmasını sonucunda hedef yüzeyin bozunma reaksiyonunda geçireceği süre kısılacak dolayısıyla erozyon miktarında da azalma görülecektir. Yukarıda gerçekleştirilen analize dayalı olarak partiküllerin birim zamanda akış hızının erozyon üzerindeki etkilerinden kaçınmak için belirli bir akış hızının ayarlanması gerektiği sonucuna varılabilir (Jindal vd., 2022).

2.5.1.4. Partikül Boyutu

Aşındırıcı olarak kullanılacak partiküllerin boyutları ve mekanik özelliklerinin erozyon üzerindeki etkisi son derece yüksektir. Literatürde araştırmacıların birçoğunun aynı malzemenin farklı partikül boyutlarına sahip varyasyonları ile deneyler gerçekleştirdiği görülmektedir. Buna ek olarak partikül boyutunun büyümesi sonucunda erozyon oranında artış meydana geldiği bilinmektedir. Birçok araştırmacı, aşındırıcı partiküllerde meydana gelen kırılmalar sonucunda, hedef malzeme yüzeyine mikro partiküllerin yapışması ile karşılaşıldığı konusunda hemfikirdir. Dolayısıyla, teorik olarak hesaplanan erozyon oranı, gerçekte meydana gelen erozyona kıyasla nispeten daha düşük olarak bulunmaktadır.

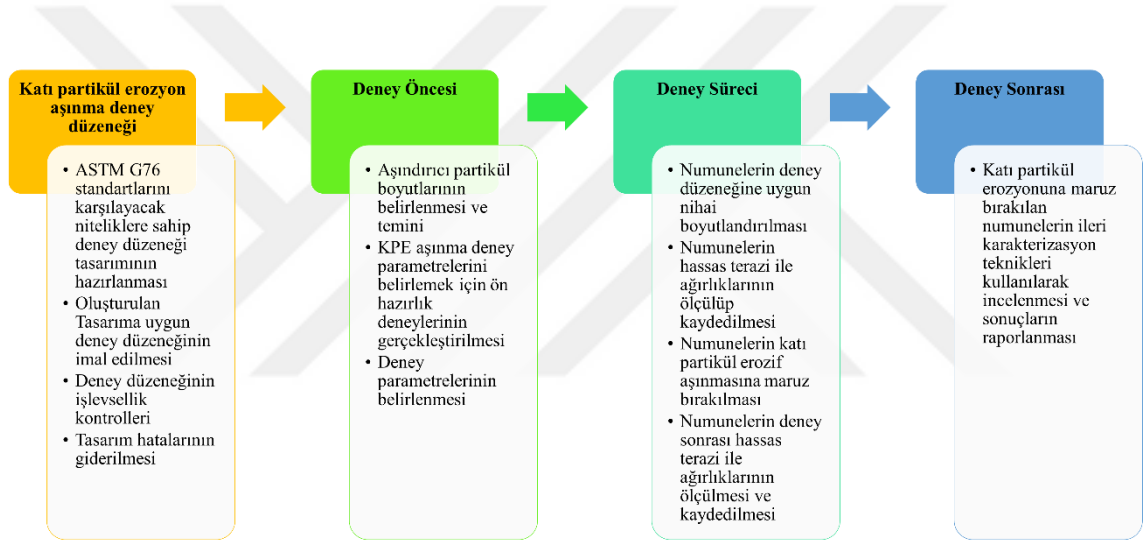
Partikül boyutlarının yanı sıra katı partikül erozyonunda partiküllerin geometrik şekli ve sertlikleri de son derece önemlidir (Karimi vd., 2017).

2.5.1.5. Aşınan (Hedef) Malzeme Özellikleri

Hedef malzemenin özellikleri esas olarak sertlik, yüzey pürüzlülüğü, mukavemet, tokluk, mikroyapı ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Hedef malzemenin özellikleri katı partikül erozyon oranında belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde aşınan malzemenin yüzey sertliği arttıkça erozyon oranı ile ters orantı sergilediği görülmektedir. Gadhikar ve diğerleri ısıtılmış ve ısıtılmamış çelikler üzerinde yaptıkları deneylerde ısıtılmanın sertlik, süneklik, darbe tokluğunun artmasına akma dayanımının azalmasına yol açtığını bunun yanı sıra erozyon aşınma direncinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca mikroyapının, malzemelerin erozyon davranışlarını etkileyen en önemli parametrelerden olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma direnci sertliğe bağlıdır buna karşın sertliğin aşınma direncine katkısı belli bir eşiğe kadardır o eşikten daha sert malzemelerde tam tersine aşınma direncinde azalma gözlemlenebilir (KUANG vd., 2022). Aşınma direnci için matris içine gömülü sert karbürlerin destekleyici ve koruyucu etkisi mevcuttur. Yukarıda gerçekleştirilen analiz ve araştırmaların sonucu olarak katı partikül erozif aşınma oranını etkileyen parametreler arasında hedef malzemenin karakteristik özelliklerinin hayati önem taşıdığı anlaşılmaktadır (Behera ve Sahoo, 2020; Li vd., 2020).

3. YÖNTEM

Bu çalışma, HVOF yöntemi ile üretilmiş WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE aşınma sonrasında meydana gelen erozyon oranları ve hasar mekanizmalarının tespiti amacıyla gerçekleştirilmiştir. WC-Co ve NiCr kaplamaların erozyon deneylerinde aşındırıcı partikül olarak alümina (Al_2O_3) kullanılmıştır. Kaplamalı numunelerin farklı çarpma açıları (30° - 45° - 60° - 90°) ve farklı boyutlardaki aşındırıcılar (50 mesh ve 80 mesh) etkisinde gerçekleşen SPE davranışları incelenmiştir. SPE deneyleri öncesi ve sonrasında karakterizasyon teknikleri ile (SEM, elementel haritalama ve EDS analizi) mikroyapısal incelemeleri, pürüzlülük, sertlik ve porozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince izlenen iş akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Katı partikül erozyon deneyleri için izlenen iş akış şeması gösterimi

3.1. DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Altlık Malzeme

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek mekanik dayanım ve korozyona karşı gösterikleri üstün direnç sayesinde havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere, biyomedikal ve denizcilik endüstrilerinde yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Düşük karbon içeriğine sahip 304, 304L, 308L ve 316L, östenik paslanmaz çeliklerin başlıca temsilcileridir. Havacılık endüstrilerinde sıklıkla 316L paslanmaz çeliğinin tercih edilme sebebi mükemmel mekanik özellikleri, üstün korozyon direnci, kolay bulunabilirliği ve nispeten düşük maliyetli olmasıdır. 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılan havacılık bileşenlerinde aşınma hasarları ile yaygın karşılaşılır. Aşınma hasarlarını önlemek amacıyla çeşitli spreylere kaplama yöntemleri

kullanılarak aşınmaya dayanıklı kaplamaların üretimi, 316L paslanmaz çelikler için son derece elverişlidir (Yasir vd., 2016). Mükemmel özellik kombinasyonları ve yaygın kullanımı dikkate alınarak gerçekleştireceğimiz SPE deneylerinde altlık malzeme olarak 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Silindir çubuklar halinde ticari olarak elde edilen 316L paslanmaz altlık malzemeler 25,4 mm (1 inç) çapında ve yaklaşık ~5mm kalınlıkta olacak şekilde tel erozyon tekniği kullanılarak nihai ölçülere getirilmiştir. Kaplama işlemleri öncesi altlık malzeme yüzeyinin belirli pürüzlülük değerlerine ulaşması ve kaplamanın yapışma kabiliyetinin iyileştirilmesi amacıyla kumlama prosesi uygulanmıştır. Kumlama işleminde, altlık/hedef malzeme yüzeyine ~40 cm'lik uzaklıktan yatayla yaklaşık 75° açı yapacak şekilde 2-2,5 bar değerindeki basınçlı hava yardımı ile Al₂O₃ tozları püskürtülmüştür. Kaplama aşamalarının daha iyi gerçekleştirilebilmesi için, altlık malzeme yüzeyleri etil alkol ile ultrasonik temizleme prosesi uygulanarak arındırılmış ve kaplama prosesine hazır hale getirilmiştir. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de 316L paslanmaz malzemesine ait mekanik özellikler ve kimyasal kompozisyonları sırası ile verilmiştir (Ozgurluk, 2022; Yasir vd., 2016; Yu vd., 2020).

Tablo 3.1: 316L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
0,030	1	2,0	0,045	0,03	1	16-18	2-3	10-14

Tablo 3.2: 316L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri

Kopma Mukavemeti	>485 Mpa
Akma Mukavemeti, (%0,2)	>170 Mpa
Sertlik, Rockwell (HRC)	<22 HRC

3.2. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Kaplama Tozları ve Aşındırıcı Partiküller

3.2.1. WC-Co Tozu

WC-Co kaplamalar yüksek aşınma dayanımı, düşük gözeneklilik ve korozyon direnci gibi mükemmel özellik kombinasyonuna sahiptir. Havacılık ve uzay endüstrileri başta olmak üzere, üstün aşınma dayanımına sahip makine elemanlarına ihtiyaç duyulan endüstrilerde, WC-Co kaplamalar yaygın kullanım alanına sahiptir. Bahsedilen özellikleri göz önünde

bulundurularak, 316L paslanmaz çelik malzeme üzerine, GTV şirketinden (Almanya) ticari olarak temin edilen WC-Co tozları HVOF yöntemiyle püskürtülmüştür.

3.2.2. NiCr Tozu

Uygulandıkları makine elemanlarına korozyon ve aşınmaya karşı yüksek dayanım kazandırın NiCr kaplamalar havacılık ve uzay endüstrileri, tarım aletleri, otomotiv motorları, petrol ve gaz arama ekipmanları, çelik haddehane ekipmanları ve kesici uç takımları gibi birçok endüstride yaygın kullanıma sahiptir. Bahsedilen özellikleri göz önünde bulundurularak, 316L altlık malzeme üzerine GTV şirketinden (Almanya) ticari olarak temin edilen NiCr tozları HVOF yöntemiyle püskürtülmüştür.

3.2.3 Aşındırıcı Partiküller

Sert, köşeli yapısı sebebiyle yüksek aşındırma kabiliyetine sahip olması ve kolay bulunabilirliğinin yanı sıra endüstride kumlama malzemesi, zımpara ve aşınma dayanımı istenen yüzeylerde kaplama malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 (alümina/alüminyum oksit) tüm bu özellikleri ile deneysel/teorik aşınma deneylerinde sıklıkla tercih edilmektedir. SPE deneylerinde aşındırıcı partikül olarak Al_2O_3 kullanılmasına bahsedilen özellikler göz önünde bulundurularak karar verilmiştir. Farklı aşındırıcı partikül boyutlarının SPE deneylerine etkisini incelemek amacıyla, iki farklı partikül boyutuna (50 mesh (297 μm)-80 mesh (177 μm)) sahip alümina aşındırıcıları Ege Nanotek Kimya Sanayi Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Tablo 3.3'de teorik/deneysel çalışmalarda yaygın kullanım alanına sahip alüminaların toz boyutları verilmiştir. Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de Al_2O_3 aşındırıcıların sırasıyla kimyasal kompozisyonları ve karakteristik mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3: Deneysel/teorik çalışmalarda yaygın kullanıma sahip alümina toz boyutları

40 mesh	400 µm
45 mesh	354 µm
50 mesh	297 µm
60 mesh	250 µm
70 mesh	210 µm
80 mesh	177 µm
100 mesh	149 µm
120 mesh	125 µm

Tablo 3.4: Al₂O₃ kimyasal kompozisyonu

Al₂O₃	% 99,69
Na₂O	% 0,20
Fe₂O₃	% 0,02
SiO₂	% 0,03
CaO	% 0,05
TiO₂	% 0,01

Tablo 3.5: Al₂O₃ mekanik özellikleri

Sertlik	9 mohs
Tane yapısı	Köşeli
Erime noktası	Yaklaşık 2050 °C
Özgül ağırlık	Yaklaşık 3,9- 4,1 g/cm ³
Tane iriliğine göre dökme ağırlığı	Yaklaşık 0,8- 1,9 g/cm ³

3.3. Partiküllerin Boyut Dağılım Analizleri

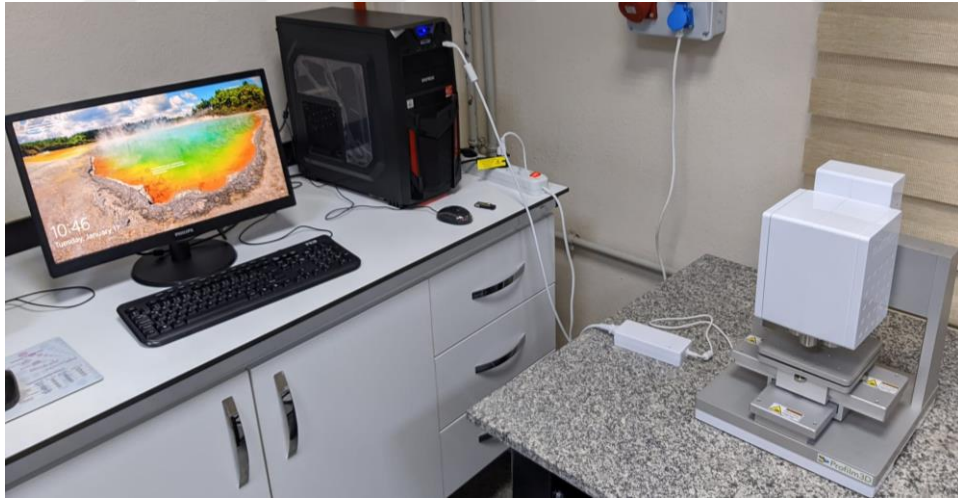
SPE deneylerinde kullanılan kaplama tozları ve aşındırıcı partiküllerin boyut dağılım analizlerini gerçekleştirmek amacıyla Malvern Mastersizer 3000 (İngiltere) marka model cihaz kullanılmıştır. Şekil 3.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan partikül boyutu ölçüm cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 3.2: Partikül boyutu ölçüm cihazı

3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri Şekil 3.3’de fotoğrafı verilen 3D profilometre (Filmetrics Profilm3D, USA) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonrasında alansal pürüzlülük (S_a), maksimum çukur derinliği (S_v) ve maksimum pürüz yüksekliği (S_p) tespit edilmiştir.



Şekil 3 3: 3D profilometre cihazı

3.5. Yüzey Sertliği Ölçümleri

HVOF kaplama tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr malzemelerin sertlik ölçümleri Micro-duromat 400E marka mikro sertlik ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm süresince numunelere 50-gf yük yaklaşık 20°'lik açıyla 15 saniye boyunca piramit şeklindeki bir uç

kullanılarak uygulanmıştır. Sertlik değeri (HV) hesaplaması için matematiksel formül eşitlikte verilmiştir.

$$HV \approx 1,854 \frac{F}{d^2} \text{ şeklindedir (Ramki \& Ezhil Vizhi, 2018)}$$

Burada;

F: Uygulanan kuvvet (N)

d: Köşegenlerinin ortalaması (mm)

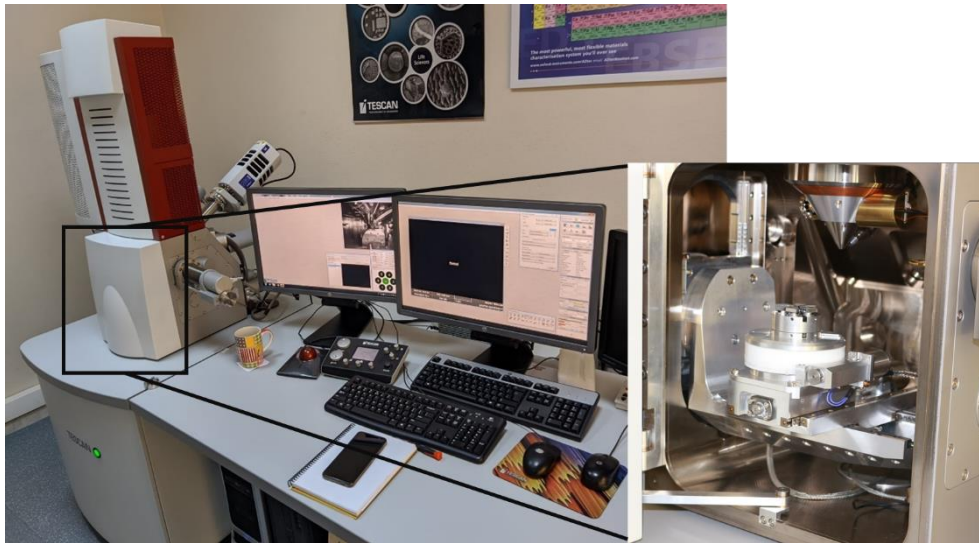
ifade etmektedir.

3.6 Porozite Ölçümleri

HVOF yöntemiyle üretilen WC-CO ve NiCr kaplamaların porozite değerlerinin tespit edilmesi amacıyla Image-J (ProPlus 6.0) programı kullanılmıştır. 1000x büyütme oranında elde edilen 10 adet SEM görüntüsü üzerinden değerlerin ortalamaları alınarak yüzeylerin porozite oranları tespit edilmiştir.

3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri öncesi ve sonrasında mikroyapısal incelemelerini gerçekleştirmek amacıyla, yüksek büyütme oranlarında görüntüleri TESCAN marka MAIA3 XMU (Çek Cumhuriyeti) cihazı ile çekilmiştir. Cihazın gerçek görüntüsü Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: Tescan MAIA4 XMU SEM cihazının görseli

3.8. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS)

WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin, SPE deneyleri öncesi ve sonrasında yüzeylerinde bulunan elementleri tespit etmek amacıyla SEM cihazı üzerine monte edilmiş olan Oxford Instruments X-Max50 model enerji dağılımlı spektrometre kullanılmıştır.

3.9. HVOF Kaplama Cihazı

HVOF sprej yönteminde, Hipojet 2700-M (Hindistan) marka modellenli endüstriyel sprej tabancası kullanılmıştır. HVOF kaplama prosesinde kullanılan üretim parametreleri, üretici sprej ekipmanı, literatürde yapılan çalışmalar, çalışmalarımızda kullanılan tozların özellikleri ve uygulamadaki kullanımlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

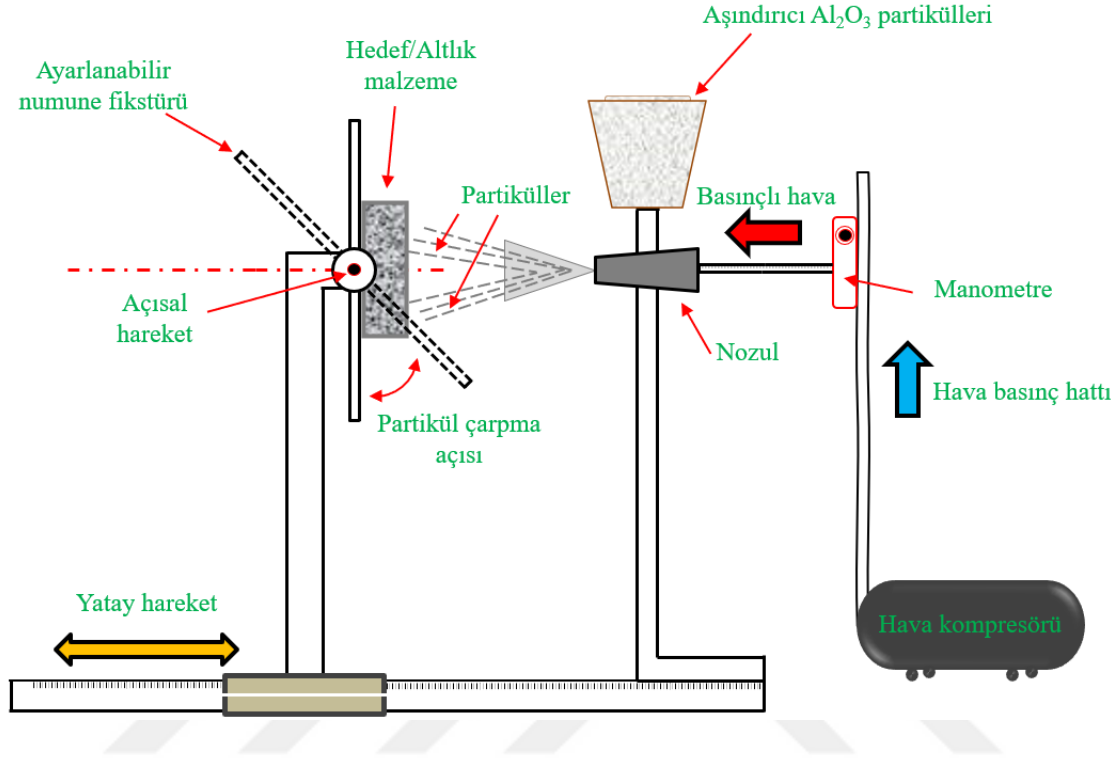
3.5. Katı Partikül Erozyonu Deneyleri

Havacılık ve uzay endüstrileri başta olmak üzere aşınmaya dayanıklı kaplamaların kullanıldığı endüstrilerde tercih edilen WC-Co ve NiCr kaplamaların erozyon aşınması davranışları tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen SPE deneyleri ASTM G76-95 standartlarında, çarpma açısı ve aşındırıcı partikül boyutu etkisinde gerçekleştirilmiştir.

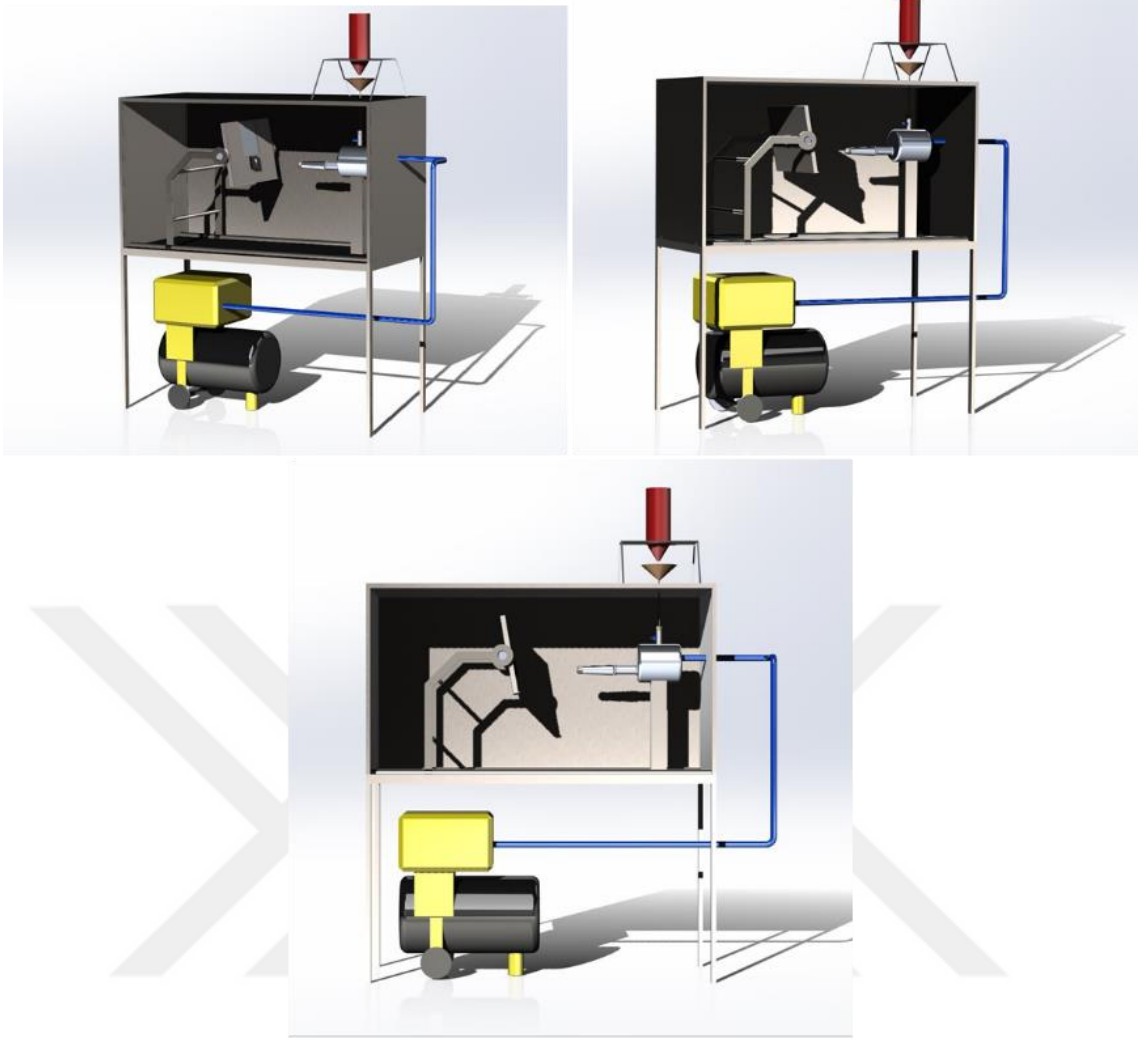
3.5.1. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Deney Düzeneği

SPE deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir. Katı partiküllerin malzeme yüzeyine istenilen ivme ile çarpmasını sağlamak amacıyla, yüksek basınç ihtiyacı duyulmaktadır. Servis koşullarında malzeme yüzeyine çarpan parçacıklar her zaman aynı düzlem üzerinde hareket etmemektedir. Çarpma açılarından kaynaklı erozif aşınmayı deney koşullarında simüle edebilmek için numune fikstürünün yatayla yaptığı açının ayarlanabilir nitelikte olması gerekmektedir. Sisteme alümina (Al_2O_3) partikülleri doğal akış ile sağlanmaktadır. İstenilen miktarda alümina partikülleri toz ve basınçlı hava karışım haznesinde biriktirildikten sonra partikül haznesini ile olan bağlantısı vana ile kesilir. Deney düzeneği test parametrelerine uygun hale getirildikten sonra, kompresör tarafından sağlanan basınçlı hava karışım haznesine gönderilir. Yüksek basınç etkisi altında kalan katı partiküller karışım haznesinin tek çıkışı haline gelen nozul üzerinden hedef malzeme yüzeyine püskürtülür. Şekil 3.6’da sırasıyla ayarlanabilir numune fikstürü, toz ve basınçlı hava

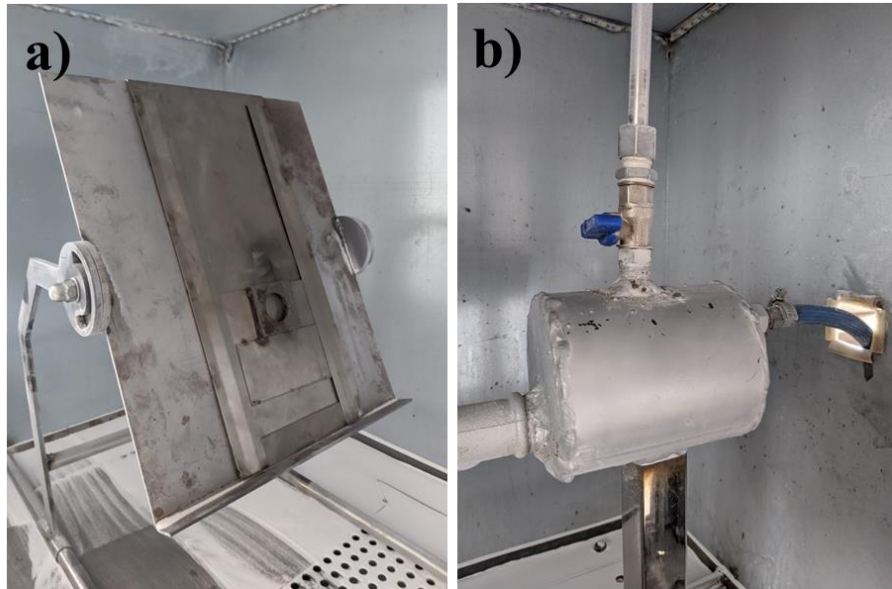
karışım haznesi gösterilmektedir. Şekil 3.7’de SPE aşındırma cihazının SolidWorks çizimleri ve Şekil 3.8’de test düzeneğinin gerçek görünümü ve elemanlarının tanıtımı verilmiştir.



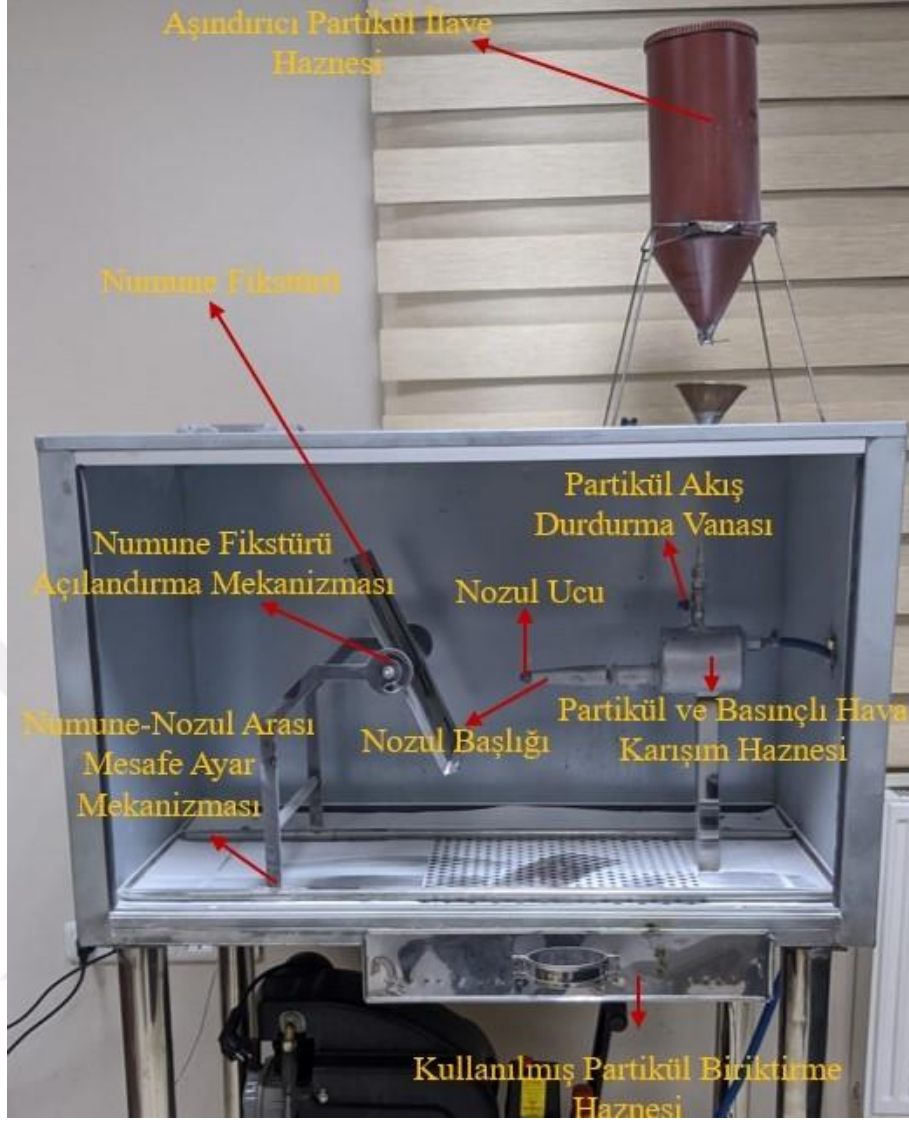
Şekil 3.5: Katı partikül eroziv aşınma cihazının şematik gösterimi



Şekil 3.6: SPE aşınma deney düzeneğinin SolidWorks çizimleri



Şekil 3.7: a) Ayarlanabilir numune fikstürü, b) aşındırıcı partikül ve basınçlı hava karışım haznesi gösterimi



Şekil 3.8: SPE test düzeneğinin gerçek görüntüsü

3.5.2. Katı Partikül Erozyonu Ön Hazırlık Deneyleri ve Deneysel Parametrelerinin Belirlenmesi

HVOF kaplamalı WC-Co ve NiCr numunelerinin katı partikül eroziv aşınma deneylerinden önce kumlanmış 316L malzeme üzerine 50 mesh partikül boyutlarında alümina (Al_2O_3) aşındırıcılar ile literatüre göre belirlenen parametrelerle ön hazırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ön hazırlık deney parametreleri 30° - 45° - 60° - 90° çarpma açıları, 20 mm çarpma mesafesi ve 1,5 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Ön hazırlık deney parametreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Kumlanmış 316L numuneleri ile ön hazırlık deney parametreleri

Deney numunesi	Partikül boyutu (mesh)	Çarpma açısı (°)	Çarpma süresi (s)	Çarpma mesafesi (mm)	Basınç (bar)
Kumlanmış 316L	50	30	10	20	1,5
	50	45	10	20	1,5
	50	60	10	20	1,5
	50	90	10	20	1,5

Tablo 3.7’de kumlanmış 316L paslanmaz malzemeleri ile gerçekleştirilen ön hazırlık deneyleri sonucu meydana gelen aşınma oranları verilmiştir.

Tablo 3.7: Kumlanmış 316L numuneleri ile gerçekleştirilen ön hazırlık deneyleri sonrası meydana gelen malzeme kayıpları

Deney numunesi	Partikül boyutu (mesh)	Çarpma açısı (°)	Çarpma mesafesi (mm)	Basınç (bar)	Malzeme Kaybı (gr)
Kumlanmış 316L	50	30	20	1,5	0,0106
	50	45	20	1,5	0,0067
	50	60	20	1,5	0,0049
	50	90	20	1,5	0,0019

3.5.3. Katı Partikül Erozyonu Deneyleri

HVOF kaplamalı WC-Co ve NiCr numunelerin SPE deneylerinden önce kumlanmış 316L numuneleri ile gerçekleştirilen ön hazırlık deney sonuçlarına ve literatür incelemelerine göre deney parametreleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak olan parametreler Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8: Katı partikül erozif aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı Partikül	Partikül Boyutu (mesh)	Basınç (Bar)	Partikül Çarpma Açısı (°)	Nozul Mesafesi (mm)	Aşındırma Süresi (s)
Alümina (Al ₂ O ₃)	50- 80	1,5	30- 45- 60- 90	15	10

3.5.3.1. Deney Öncesi Hazırlık Çalışmaları

WC-Co ve NiCr numuneleri, yüzeylerinde istenmeyen yabancı nesne olmaması için, SPE deneylerinden önce yüksek basınçlı hava yardımı ile temizlenmiştir. Yüzey temizliği işleminin ardından $\pm 0,0001$ mg hassasiyete sahip Kern & Shon marka hassas terazi ile ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.3.2. Deneysel Çalışmalar

SPE deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 3.9’da verilmiştir. 1,5 bar püskürtme basıncına sahip alümina partikülleri, belirlenen süre, mesafe, açı ve partikül boyutlarında hedef malzeme yüzeyine çarptırılmıştır. WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin farklı partikül çarpma açılarında ve farklı büyüklüklerde partiküllere karşı gösterdiği davranışların incelenmesi hedeflenmiştir. Erozyona tabi tutulma süresi biten numuneler tekrar yüksek basınçlı hava yardımı ile temizlendikten sonra hassas terazi ile tartılarak deney sonrası ağırlıkları kaydedilmiştir.

Tablo 3.9: WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE aşınma deney parametreleri

Deney No	Hedef Malzeme	Aşındırıcı Partikül	Partikül Boyutu (mesh)	Basınç (Bar)	Çarpma Açısı (°)	Nozul Mesafesi (mm)	Çarpma Süresi (s)
1	WC-Co		50	1,5	30	15	10
2	WC-Co		50	1,5	45	15	10
3	WC-Co		80	1,5	60	15	10
4	WC-Co	Alümina	80	1,5	90	15	10
5	NiCr	(Al ₂ O ₃)	80	1,5	30	15	10
6	NiCr		80	1,5	45	15	10
7	NiCr		50	1,5	60	15	10
8	NiCr		50	1,5	90	15	10

3.5.4. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Oranlarının Hesaplanması

SPE deneyleri öncesi tüm numunelerin ağırlıkları (m_1) ölçülmüştür. Numunelerin erozif aşınmaya maruz bırakıldıktan sonraki ağırlıkları (m_2) olarak isimlendirilmiştir. Deney öncesi numune ağırlığından (m_1) deney sonrası numune ağırlığı (m_2) çıkarılarak deney sürecinde meydana gelen malzeme kaybı tespit edilmiştir. Toplam malzeme kaybının kütleli debi ($\dot{m}$) ve erozyon süresinin (t) çarpımına bölünmesi ile katı partikül erozif aşınma oranı (E) hesaplanmıştır. Erozyon oranı matematiksel hesaplaması aşağıda verilmiştir.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t}$$

SPE aşınmasında kütleli debisinin ($\dot{m}$) hesaplanabilmesi amacıyla deney süresince püskürtülen alümina partikülleri özel olarak tasarlanmış toz toplama ünitesinden alınarak ağırlıkları tespit edilmiştir. 50 mesh boyutuna sahip alümina tozları ile gerçekleştirilen deney süresince 246,92 gr alümina tozu kullanıldığı tespit edilmiştir. Deneyler 10 saniyelik periyotlarda gerçekleştirildiği için deney başına harcanan toz miktarı 61,73 gramdır. 80 mesh boyutuna sahip alümina tozları ile gerçekleştirilen deney süresince 234,2 gr alümina tozu kullanıldığı tespit edilmiştir. Deneyler 10 saniyelik periyotlarda gerçekleştirildiği için deney başına harcanan toz miktarı 58,55 gramdır. Kütleli debi eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

Yukarıda verilen formüle göre $\dot{m}$ kütleli debiyi (gr/s), m püskürtülen alümina partiküllerinin ağırlığını (gr), t ise püskürtme zamanını (s) ifade etmektedir. 50 mesh ve 80 mesh partikül boyutlarında gerçekleştirilen deneylerde kütleli debi sırasıyla 6,17 gr/sn ve 5,8 gr/sn olarak hesaplanmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

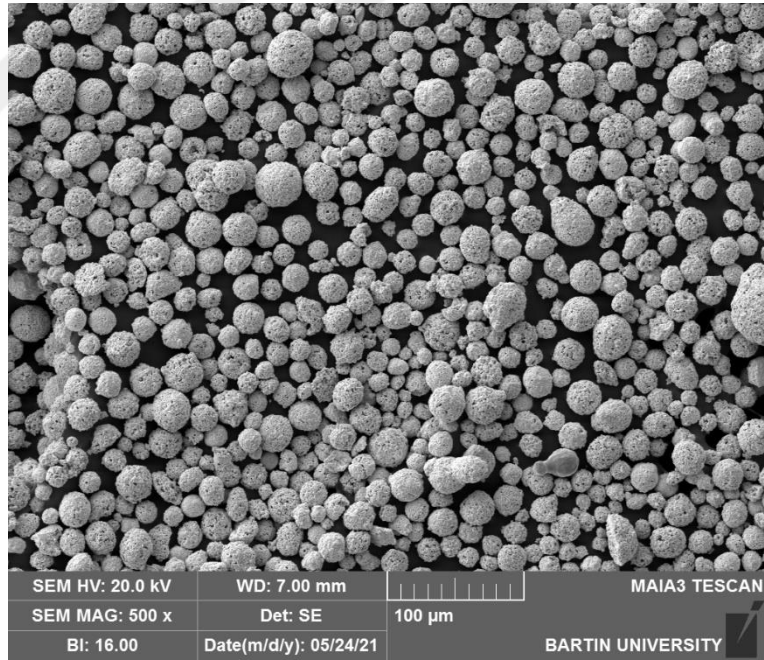
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Toz Malzemelerin Karakterizasyon İncelemeleri

4.1.1. WC-Co Tozunun Karakterizasyonu ve Boyut Dağılım Analizi

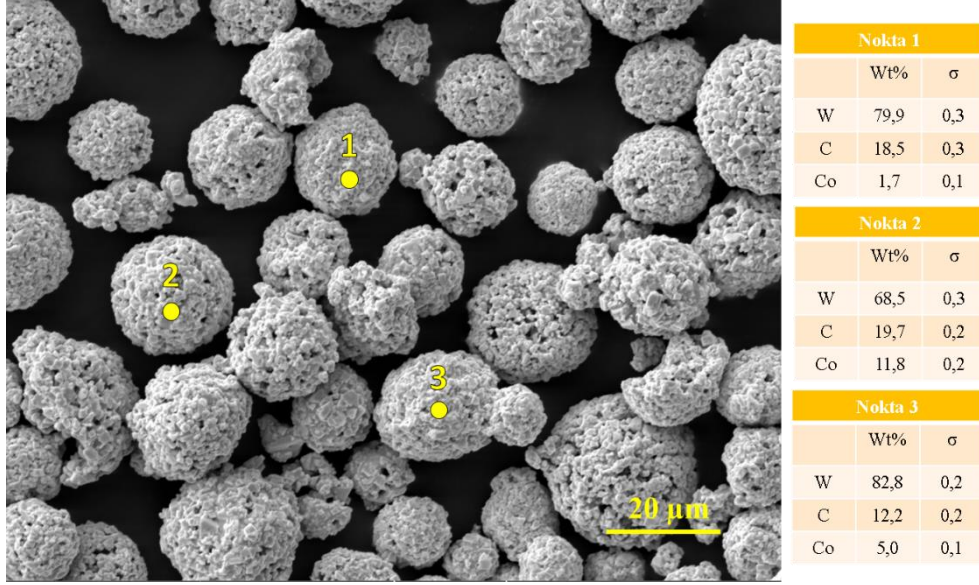
WC-Co tozunun kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1’de verilmiştir. WC-Co tozlarının SEM görüntüleri Şekil 4.1’de, EDS analiz sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. WC-Co kaplama tozlarının partikül boyutları 8 µm- 89 µm aralığındadır. Şekil 4.3’de partikül boyut dağılımları verilmiştir.

Tablo 4.1: WC-Co tozlarının kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

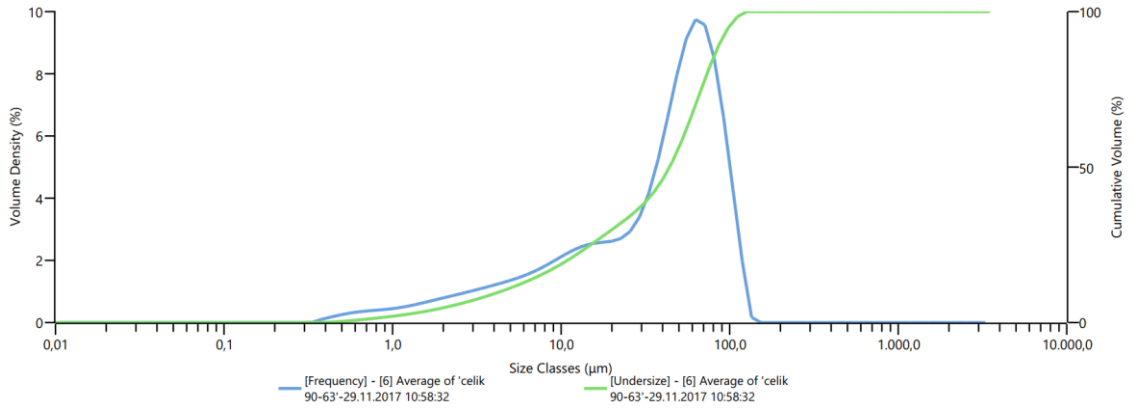
WC-Co	88/12
-------	-------



Şekil 4.1: WC-Co tozlarının SEM mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.2: WC-Co tozlarının EDS analizi verileri



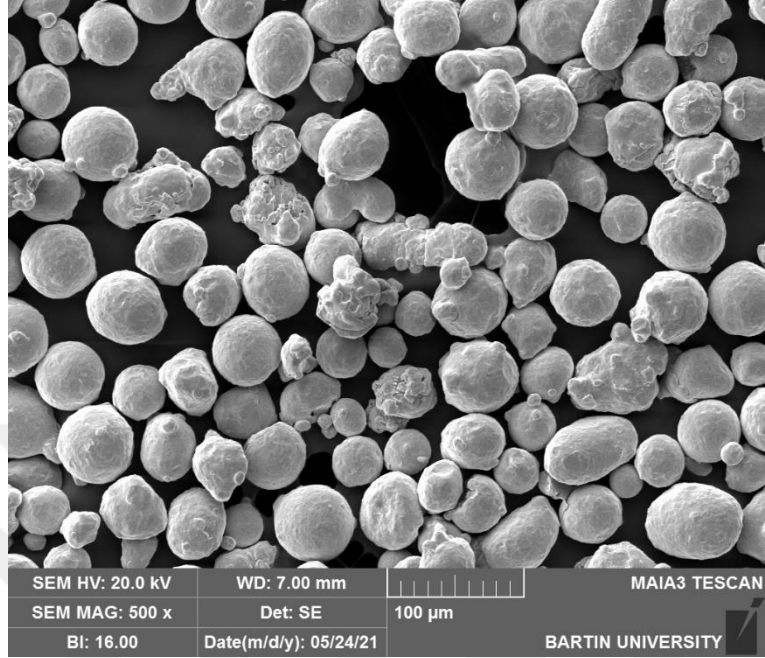
Şekil 4.3: WC-Co tozlarının partikül boyut dağılım analizi

4.1.2. NiCr Tozunun Karakterizasyon ve Boyut Dağılım Analizleri

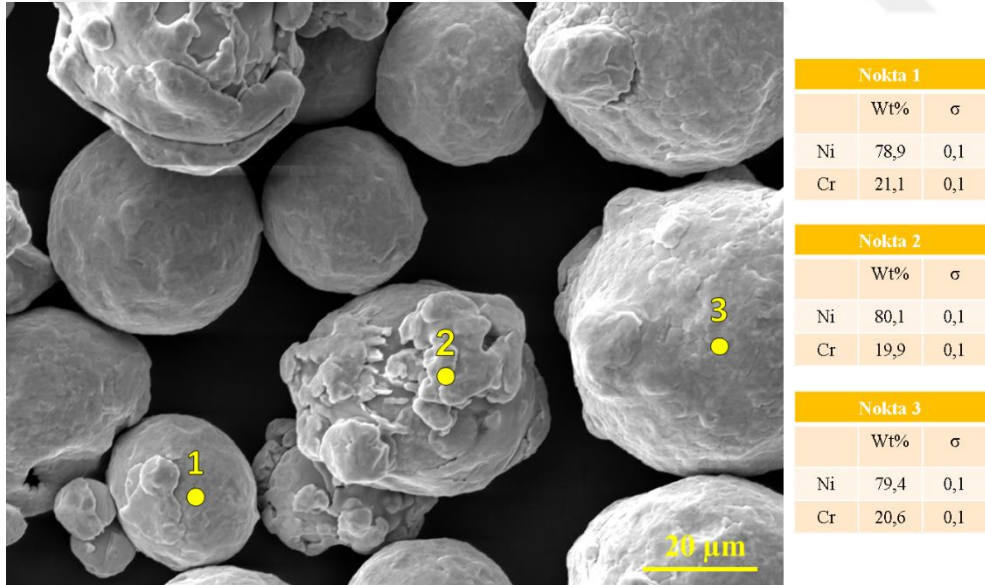
NiCr tozunun kimyasal kompozisyonu Tablo 4.2’de verilmiştir. NiCr tozlarının SEM görüntüleri Şekil 4.4’de, EDS analiz sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir. NiCr kaplama tozlarının boyutları 28,15 μm - 72,95 μm aralığındadır. Şekil 4.6’da partikül boyut dağılımları verilmiştir.

Tablo 4.2: NiCr tozlarının kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

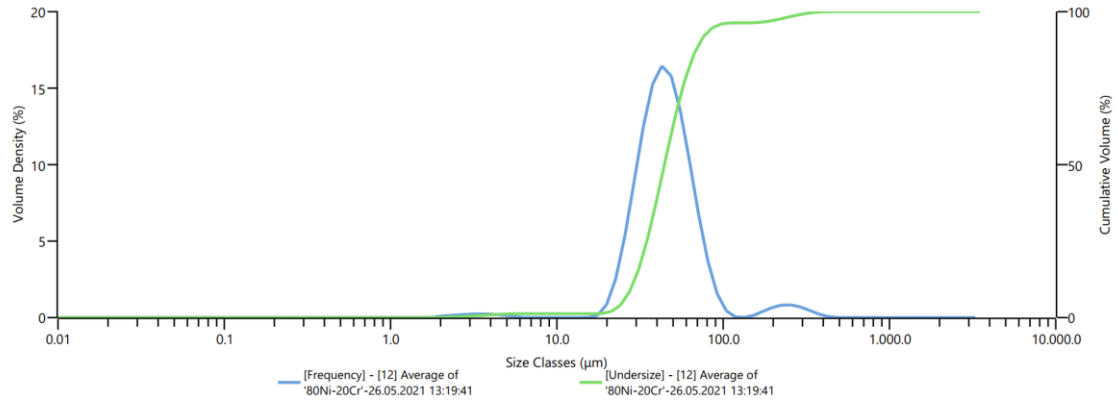
NiCr	80/20
------	-------



Şekil 4.4: NiCr kaplama tozlarının SEM mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.5: NiCr kaplama tozlarının EDS analiz verileri



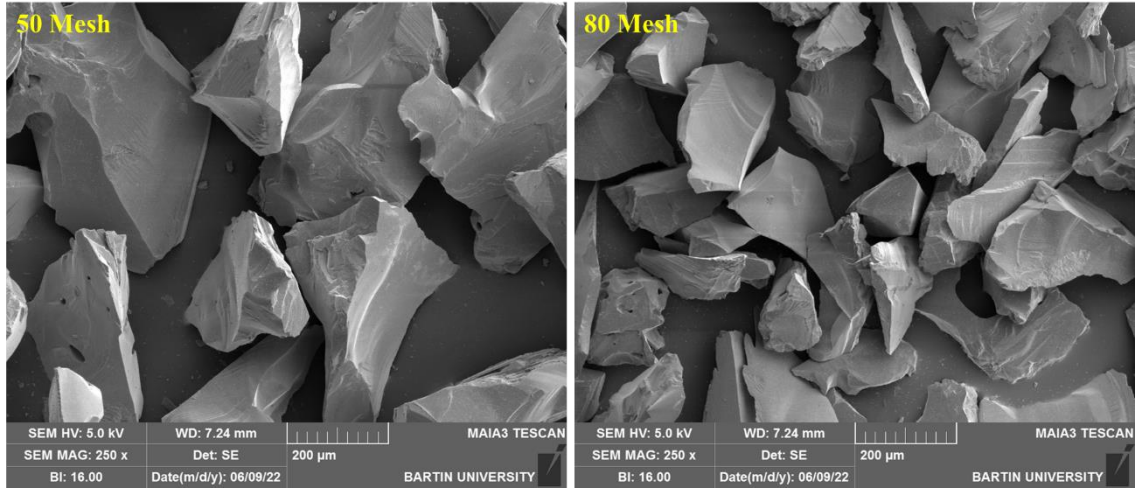
Şekil 4.6: NiCr tozlarının partikül boyut dağılım analizi

4.1.3. Aşındırıcı Partikül (Al_2O_3) Karakterizasyonu ve Boyut Dağılım Analizi

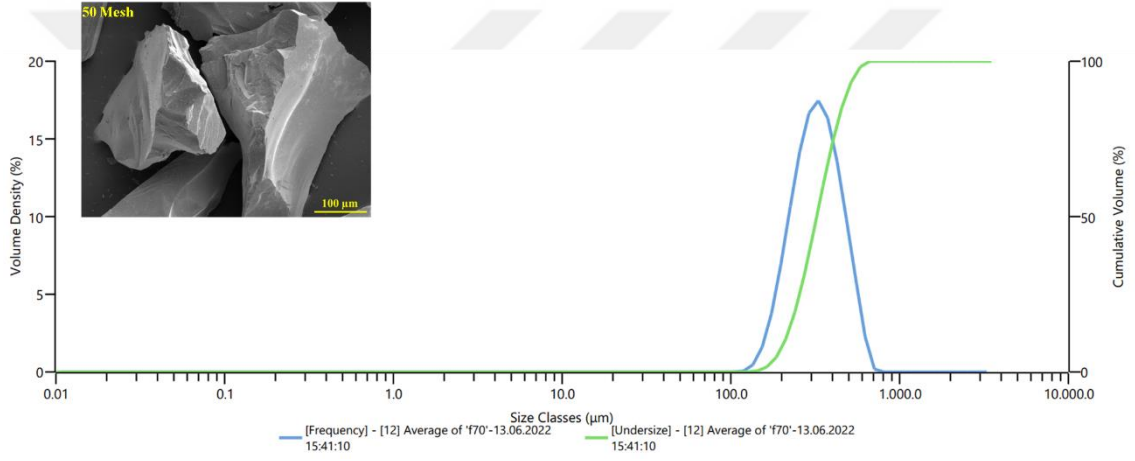
SPE deneylerinde aşındırıcı partikül olarak kullanılacak alümina tozlarının fotoğrafı Şekil 4.7’de, SEM mikroyapı görüntüleri (50 mesh ve 80 mesh) Şekil 4.8’de verilmiştir. Alümina aşındırıcılarının partikül boyut dağılım analizleri sonucunda 50 mesh alüminaların (Al_2O_3) ortalama boyut dağılımı $D_v(50) = 323 \mu\text{m}$, 80 mesh için $D_v(50) = 182 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).



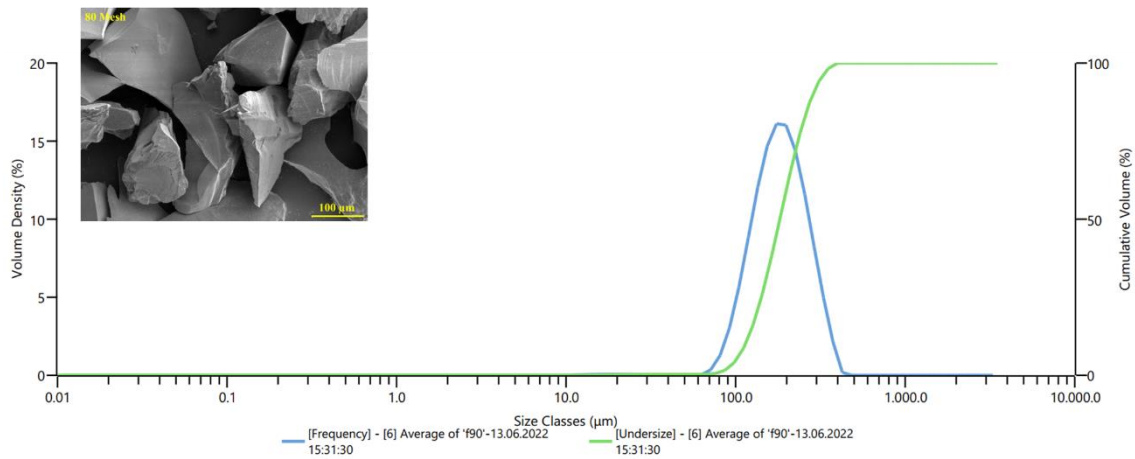
Şekil 4.7: Alümina aşındırıcı partiküllerinin gerçek görüntüleri



Şekil 4.8: Aşındırıcı partikül Al_2O_3 (50 mesh, 80 mesh) SEM görüntüleri



Şekil 4.9: Al_2O_3 (50 mesh) boyut dağılımı



Şekil 4.10: Al_2O_3 (80 mesh) boyut dağılımı

4.2. HVOF Yöntemi Kullanılarak Üretilen Kaplamalar

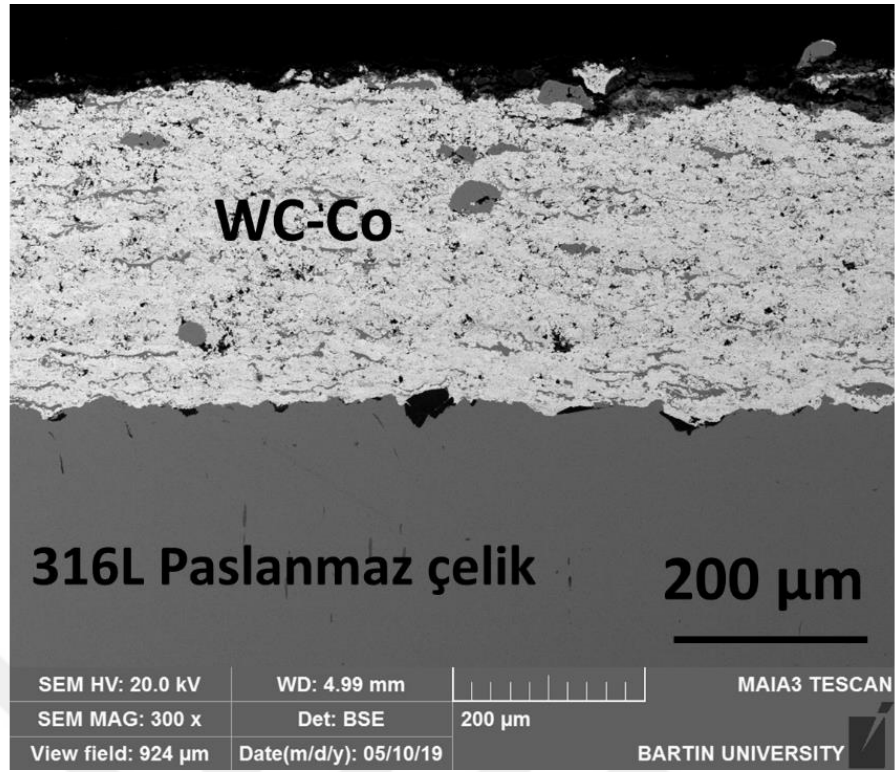
HVOF yöntemi havacılık ve uzay endüstrilerinde malzeme yüzeylerine üstün aşınma dayanımı kazandırmak amacıyla yaygın kullanım alanına sahip termal spreyci kaplama tekniklerindendir. Nispeten düşük maliyetleri, yüksek yapışma, düşük oksit içeriği, yüksek korozyon dayanımı, yüksek sertlik ve üstün aşınma dayanımlı kaplamalar üretme imkanı sunan HVOF tekniği endüstri açısından önemlidir. HVOF yönteminin tüm bu avantajları ve endüstrideki yaygın kullanımları göz önünde bulundurularak 316L altlık malzeme üzerine WC-Co ve NiCr kaplamalar HVOF yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

4.2.1. WC-Co Kaplamaların Üretim ve Karakterizasyonu

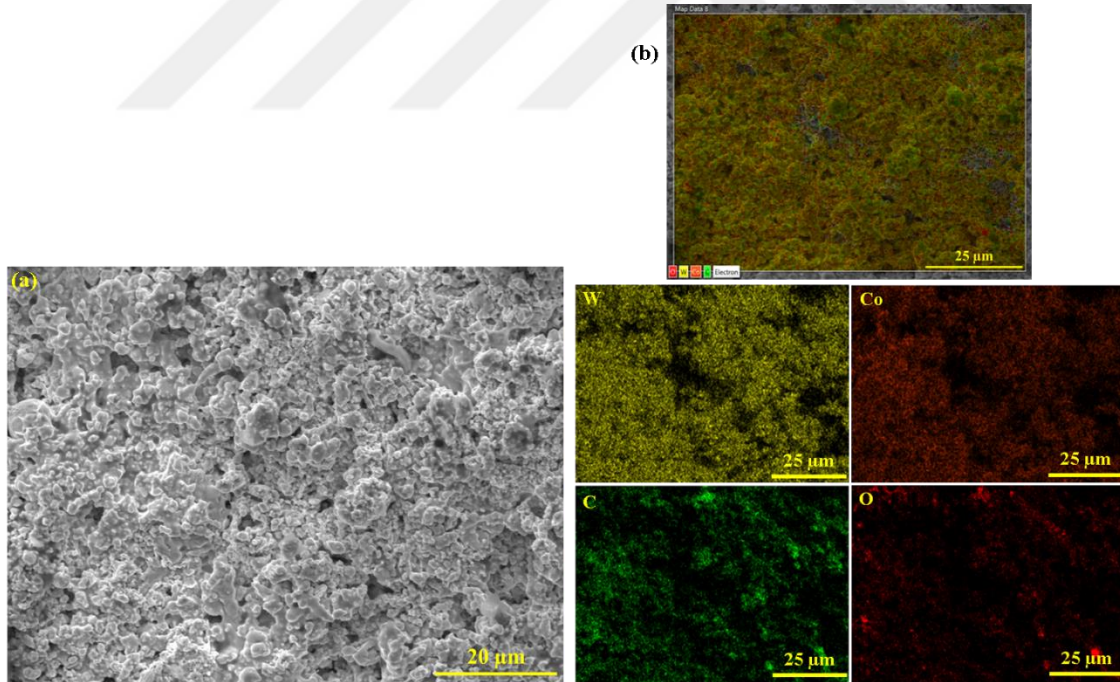
WC-Co kaplamalar 316L paslanmaz çelik malzemeler üzerine Tablo 4.3’de belirtilen HVOF parametreleri baz alınarak üretilmiştir. Elde edilen WC-Co kaplamaların ortalama kalınlığı yaklaşık olarak $300 \mu\text{m} \pm 75 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. WC-Co kaplama kesit SEM görüntüsü Şekil 4.11’de, (a) üst yüzey SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi Şekil 4.12’de, EDS analizi Şekil 4.13’de ve XRD analiz sonuçları Şekil 4.14’de verilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde üretilen kaplama içeriğinde düşük miktarda oksit içeriğinin varlığı görülmektedir.

Tablo 4.3: WC-Co kaplamaların üretilmesinde kullanılan HVOF spreyci parametreleri

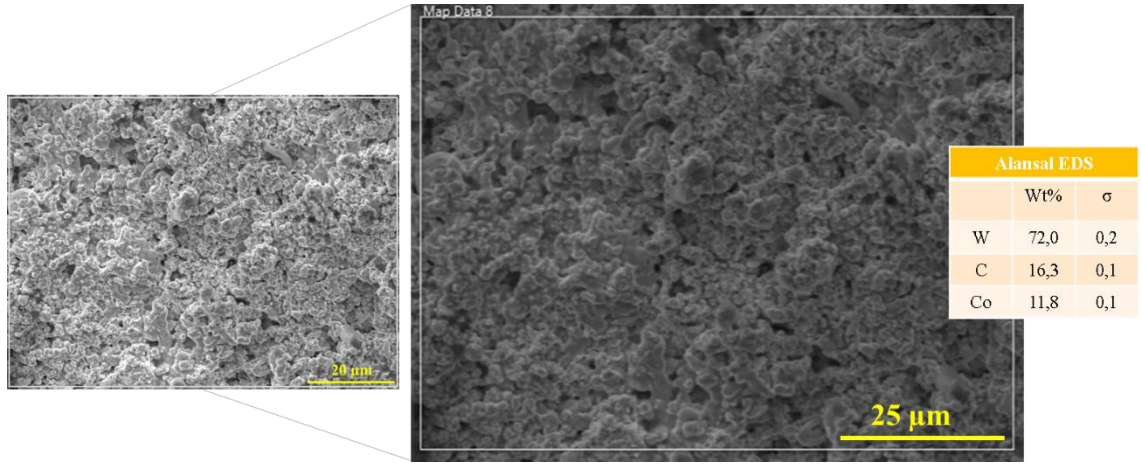
Kaplama	Yanma gazları	Toz taşıyıcı gaz	Toz besleme hızı	Kaplama Mesafesi (mm)
WC-Co	O ₂ (250 slpm), CH ₄ (80 slpm)	N ₂ (6,5 slpm)	25 g/dk	250



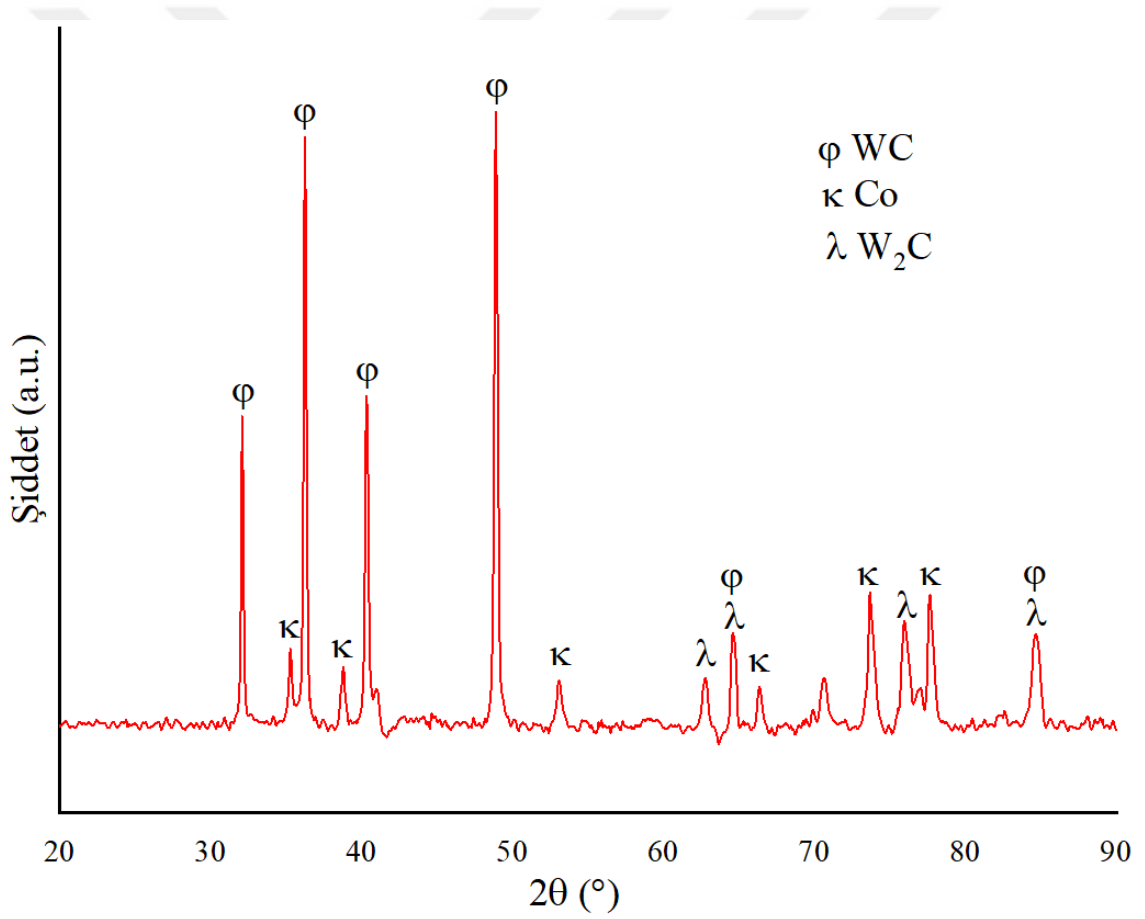
Şekil 4.11: WC-Co kaplamanın ara-kesit SEM görüntüsü



Şekil 4.12: (a) WC-Co kaplamanın SPE deneyleri öncesi üst yüzey SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi



Şekil 4.13: WC-Co kaplamanın EDS analizi



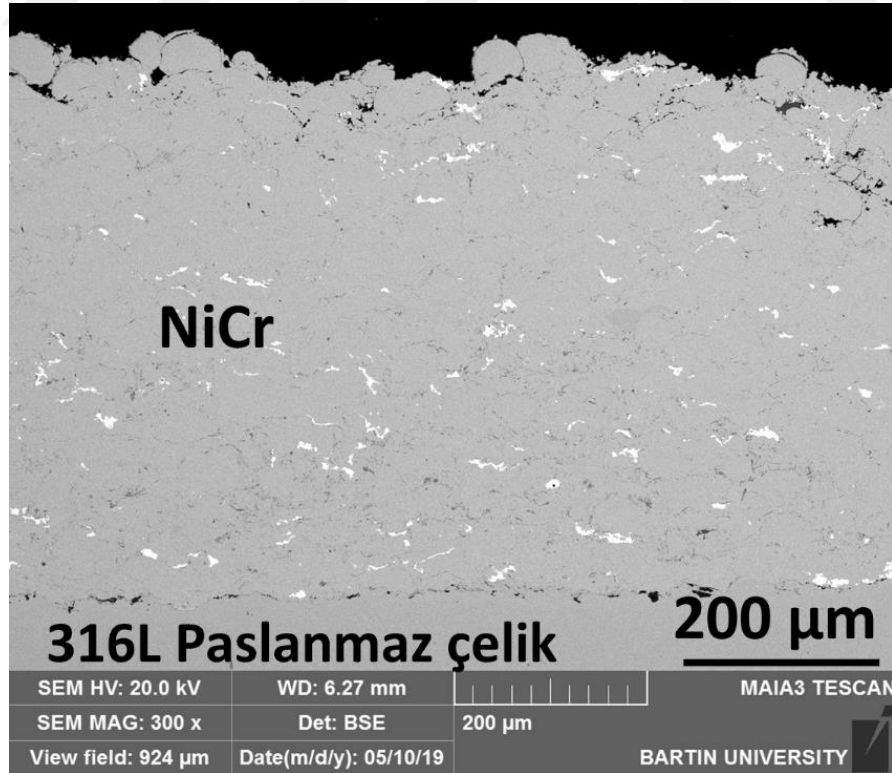
Şekil 4.14: WC-Co kaplamaların XRD analiz sonucu

4.2.2. NiCr Kaplamaların Üretim ve Karakterizasyonu

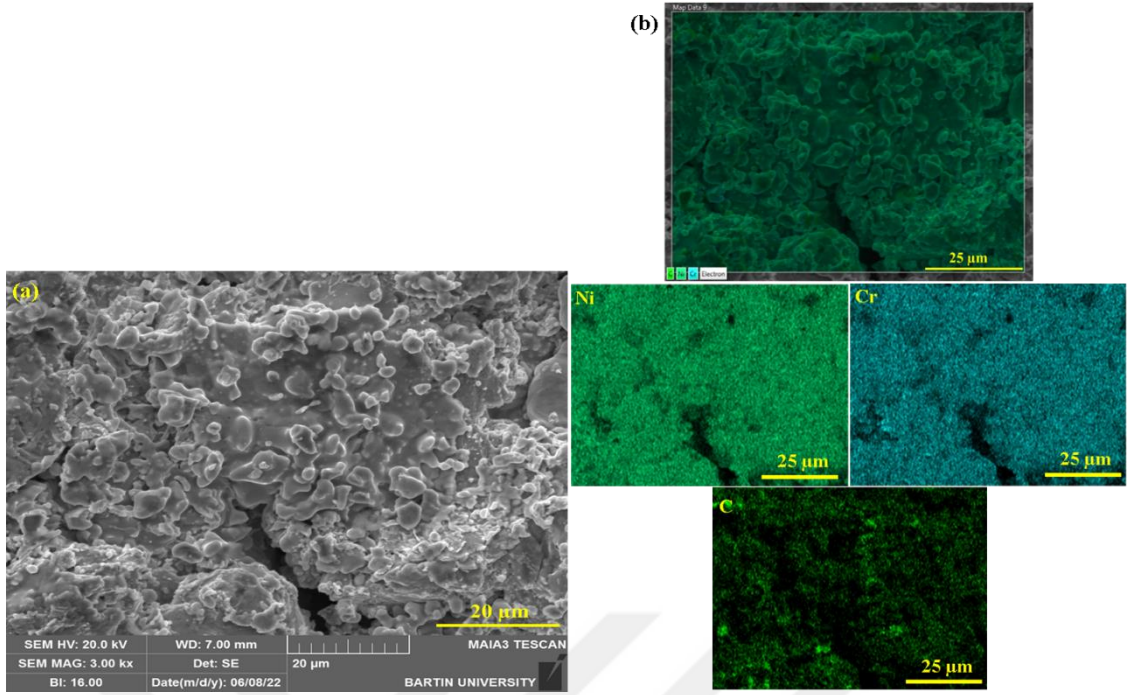
NiCr kaplamalar 316L paslanmaz çelik üzerine Tablo 4.4’de belirtilen HVOF parametreleri baz alınarak üretilmiştir. Elde edilen NiCr kaplamaların ortalama kalınlığı yaklaşık olarak $425 \mu\text{m} \pm 90 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. NiCr kaplamanın kesit SEM görüntüsü Şekil 4.15’de, (a) üst yüzey SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi Şekil 4.16’da, EDS analizi Şekil 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.16’da verilen elementel haritalama analizi incelendiğinde Ni-Cr ve C elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarında çok düşük miktarda Si elementinin varlığı görülmektedir. XRD analiz sonuçları Şekil 4.18’de verilmiştir.

Tablo 4.4: NiCr kaplama üretmek için kullanılan HVOF parametreleri

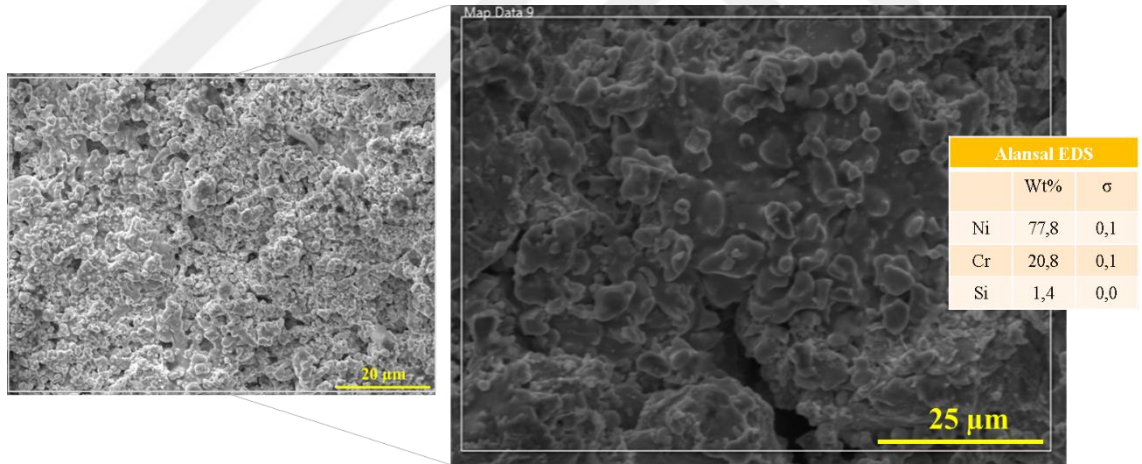
Kaplama	Yanma gazları	Toz taşıyıcı gaz	Toz besleme hızı	Kaplama mesafesi (mm)
NiCr	O ₂ (250 slpm), CH ₄ (25 slpm)	N ₂ (6,5 slpm)	20 g/dk	250



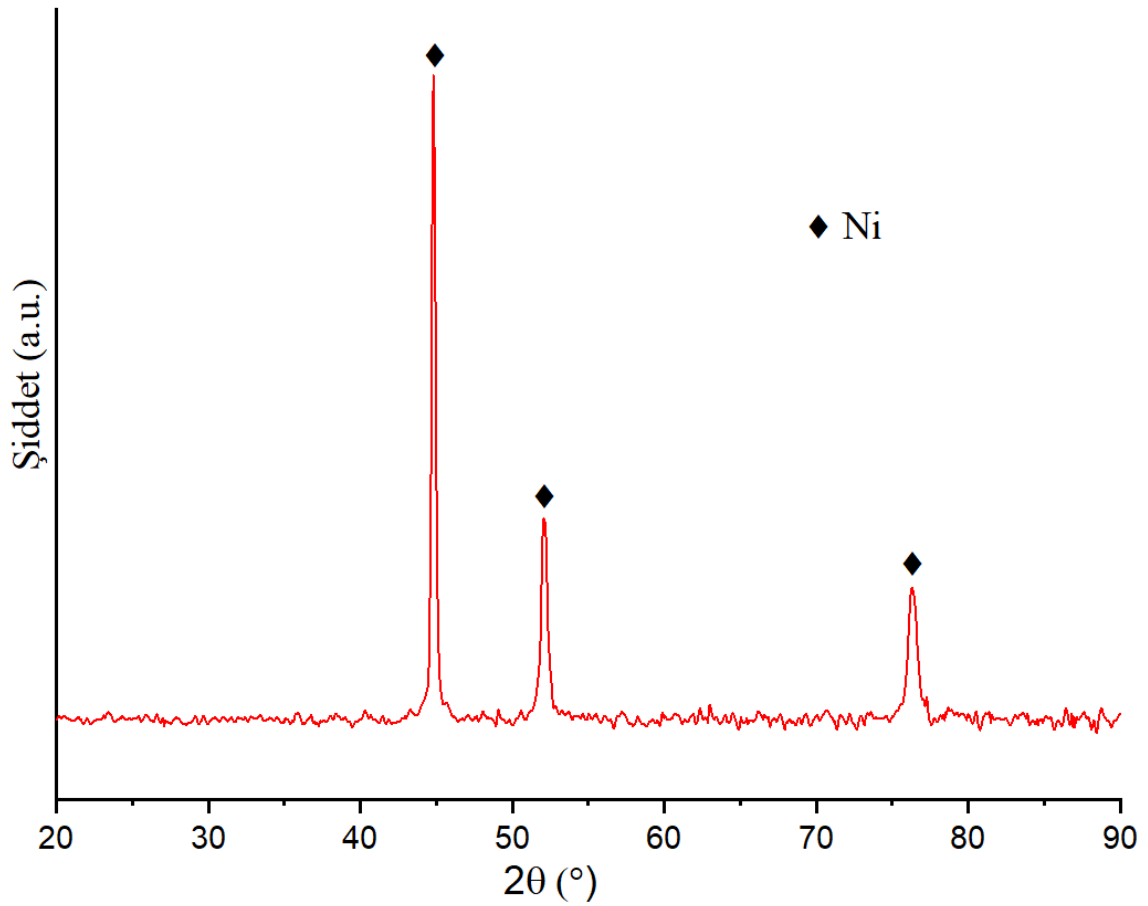
Şekil 4.15: NiCr kaplamanın kesit SEM görüntüsü



Şekil 4.16: NiCr kaplamanın a) üst yüzey SEM görüntüsü ve b) elementel haritalama analizi



Şekil 4.17: NiCr kaplamanın EDS analizi

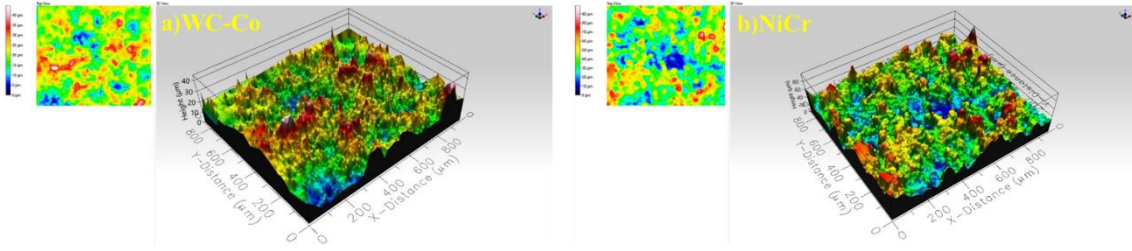


Şekil 4.18: NiCr kaplamanın XRD analiz sonucu

4.3. Üretilen Kaplamaların Pürüzlülük, Sertlik ve Porozite Ölçümleri

4.3.1. Pürüzlülük Ölçümleri

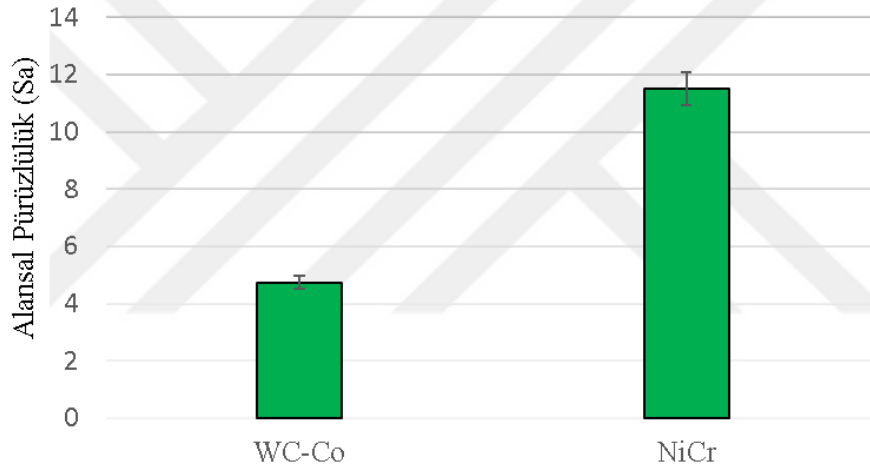
HVOF yöntemi ile kaplanmış WC-Co ve NiCr kaplamaların SPE deneyleri öncesi ve sonrasında alansal pürüzlülük (S_a) ölçümleri 3D profilometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde WC-Co kaplamalı numunenin, NiCr kaplamalı numuneye göre daha düşük pürüzlülük değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.19’da (a) WC-Co kaplamalı numunenin, (b) NiCr kaplamalı numunenin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir. Tablo 4.5’de ve Şekil 4.20’de pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 4.19: (a) WC-Co ve (b) NiCr kaplamalı numunelerin 3D profilometre görüntüleri

Tablo 4.5: Kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük (S_a) değerleri

WC-Co	$4,74 \pm 0,4$
NiCr	$11,5 \pm 0,7$



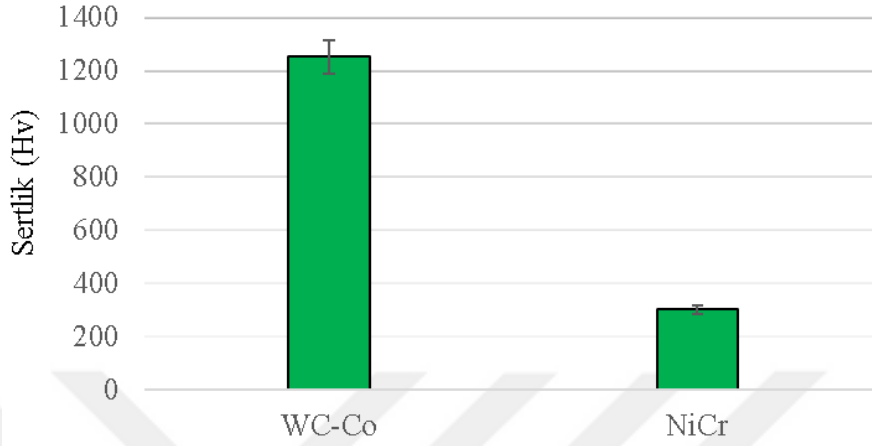
Şekil 4.20: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların alansal pürüzlülük (S_a) değerleri

4.3.2. Sertlik Ölçümleri

HVOF kaplama tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr malzemelerin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler incelendiğinde WC-Co kaplamalı numunenin, NiCr kaplamalı numuneye kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 4.6 ve Şekil 4.21’de HVOF tekniği ile kaplanmış WC-Co ve NiCr kaplamaların sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 4.6: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların sertlik değeri

WC-Co	1252 ± 35
NiCr	301 ± 12



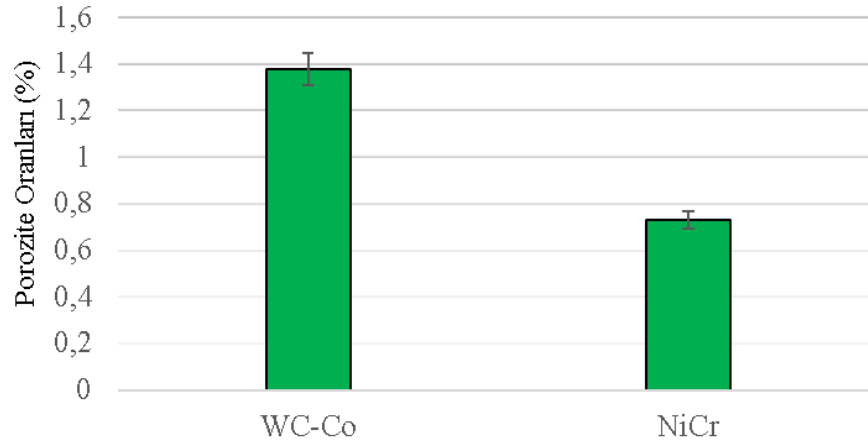
Şekil 4.21: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr malzemelerin sertlik değeri

4.3.3. Porozite Ölçümleri

HVOF kaplama tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların porozite değeri ölçülmüştür. WC-Co kaplamalı numunenin NiCr kaplamalı numuneye göre daha yüksek porozite oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4.7’de ve Şekil 4.22’de porozite oranlarının verilmiştir.

Tablo 4.7: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların yüzey porozite oranları (%)

Porozite oranları (%)	
WC-Co	1,38 ± 0,3
NiCr	0,73 ± 0,2



Şekil 4.22: HVOF tekniği ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların porozite oranları (%)

4.4. Katı Partikül Erozyonu Aşınma Oranlarının Değişimi

HVOF ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplı numunelerinin SPE deneyleri öncesi ve sonrasında meydana gelen malzeme kayıpları ve erozyon oranlarının değişimi Tablo 4.8’de verilmiştir.

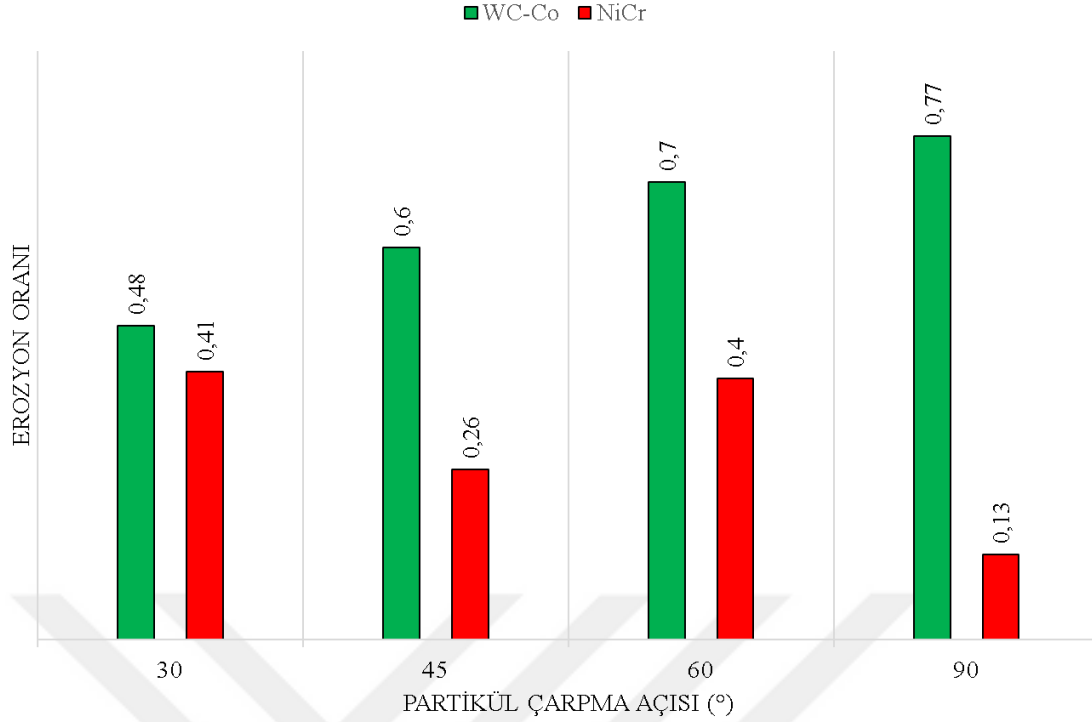
Tablo 4.8: Katı partikül erozif aşınma deneyleri sonrası malzeme kayıpları ve erozyon oranları

Deney No	Hedef Malzeme	Partikül Boyutu (mesh)	Çarpma Açısı (°)	Nozul Mesafesi (mm)	Çarpma Süresi (s)	Ağırlık kayıpları ve erozyon oranları			
						m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm(g)	Erozyon oranı ($E = ((m_1 - m_2) / (m \times t)) \times 1000$)
1	WC-Co	50	30	15	10	3,0448	3,0142	0,0298	0,48
2	WC-Co	50	45	15	10	2,4751	2,4379	0,0372	0,60
3	WC-Co	80	60	15	10	2,6380	2,5973	0,0407	0,70
4	WC-Co	80	90	15	10	2,5403	2,4954	0,0449	0,77
5	NiCr	80	30	15	10	2,5425	2,5189	0,0236	0,41
6	NiCr	80	45	15	10	2,5322	2,5173	0,0149	0,26
7	NiCr	50	60	15	10	2,7160	2,6912	0,0248	0,40
8	NiCr	50	90	15	10	2,4558	2,4479	0,0079	0,13

Gerçekleştirilen SPE deney sonuçlarına göre, WC-Co kaplı numunelerde aşındırıcı partikül çarpma açısının büyümesi ile erozyon oranında da artış olduğu gözlenmiştir. En düşük erozyon oranı ile 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 30° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde karşılaşılmıştır. Bu değeri sırasıyla 45°- 60°- 90° çarpma açılarında gerçekleştirilen deneyler takip etmektedir. Tablo 4.8’de gösterilen deney sonuçları, Şekil 2.16 a’da verilen erozyon oranı/çarpma açısı grafiği ile karşılaştırıldığında, WC-Co kaplı numunelerin SPE karşısında gevrek/kırılgan yüzey özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır (Barkoula ve Karger-

Kocsis, 2017.; Hadavi ve arkadaşları., 2019). 60° ve 90° çarpma açılarında 80 mesh boyutuna sahip aşındırıcı partiküller kullanılmıştır. SPE deneylerinde aşındırıcı partikül boyutunun büyümesi erozyon oranını artırırken, küçülmesi ise erozyon oranını azaltmaktadır (Clark ve Wong, 1995; Desale vd., 2009). Bununla ilişkili olarak 60° ve 90° çarpma açılarında gerçekleştirilen SPE deneylerinde kullanılan aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi nedeniyle, erozyon oranı artış hızında bir miktar azalma olduğu tespit edilmiştir.

NiCr kaplamalı numuneler ile gerçekleştirilen SPE deneylerinde, en yüksek aşınma oranının 80 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 30° çarpma açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu oranı 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 60° çarpma açısında gerçekleştirilen deney harici, sırasıyla ters orantılı azalacak şekilde 45° ve 90°'lik çarpma açılarında gerçekleştirilen deneyler takip etmektedir. Tablo 4.8'de verilen sonuçlar Şekil 2.16a'da verilen erozyon oranı/çarpma açısı grafiği ile karşılaştırıldığında, NiCr kaplamaların SPE karşısında sünek yüzey özellikleri sergilediği anlaşılmaktadır. Sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin aksine 60° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde meydana gelen erozyon oranı artışı, daha önce de literatür incelemelerine göre ifade edildiği üzere partikül boyutunun büyümesi ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir (Clark ve Wong, 1995). Buna karşın 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde, meydana gelen erozyon oranında önemli seviyede düşüş gerçekleşmiştir. 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde meydana gelen erozyon oranı azalması göz önünde bulundurularak, sünek yüzey özellikleri sergileyen kaplamaların aşınmasında, çarpma açısı etkisinin, partikül boyutundan daha etkili bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.23'de WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri sonrası erozyon oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.23: HVOF ile üretilen WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelere ait katı partikül erozyon oranları

Tablo 4.6 ve Şekil 4.21'e göre WC-Co kaplamanın, NiCr kaplamaya göre daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Yüksek sertlik değerlerinin katı partikül erozyona karşı hedef malzemeye dayanım kazandırdığı bilinmektedir (KUANG vd., 2022). Yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu bilinen WC-Co kaplamaların Şekil 4.23'de daha yüksek erozyon oranlarına ulaştığı görülmektedir. Bu durum daha önce de belirtildiği üzere NiCr kaplamalı numunelerin sünek yüzey özellikleri sergilemesi ile ilişkilidir. Sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin SPE aşınması karşısında inkübasyon/kuluçka evresi yaşadığı bilinmektedir (Hadavi vd., 2019a). Inkübasyon sürecini, Şekil 2.16b'de verilen SPE aşınmasında yüzey özelliklerine göre, zaman/kütle kaybı grafiği incelenerek açıklamak gerekirse, SPE karşısında sünek yüzey özellikleri sergileyen kaplamaların, erozyon başlangıcında, kaplama yüzeyine aşındırıcı partikül gömülmesi ile karşılaşıldığı şeklinde ifade edilebilir (Alqallaf vd., 2020; Hadavi vd., 2019b; Y. F. Wang ve Yang, 2008). Sünek yüzey özelliği sergilediği deney sonuçları ve literatüre göre daha önce de ifade edilen NiCr kaplamalı numunelerin karakterizasyon incelemeleri bölümünde verilen SEM görüntüleri, elementel haritalama ve EDS analizleri incelemelerinde hedef yüzeye yüksek oranda aşındırıcı partikül (Al_2O_3) gömüldüğü açıkça görülmektedir (Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38). Elde edilen veriler göz önünde bulundurularak, gevrek ve sünek yüzey özellikleri

sergileyen kaplamaların SPE aşınmasına karşı farklı şekilde hasar oluşumlarına uğradıkları görülmüştür.

Ramesh vd. (2010) gevrek ve sünek bileşenlerden oluşan malzemelerin erozyon karşısında kırılma veya sünek davranış sergileyebileceği vurgulamışlardır. HVOF püskürtmeli WC-CO/NiCrFeSiB kaplamaları 40 m/s hızda 125 µm - 180 µm partikül boyutlarında ve 30°-90° çarpma açılarında silika aşındırıcısına tabi tutmuşlardır. 90° çarpma açısında, bu tez çalışmasına benzer şekilde, WC-Co kaplamanın en yüksek erozyon oranlarına ulaştığını tespit etmişlerdir. NiCrFeSiB kaplamaların sünek ve kırılma erozyon modlarını birlikte sergilediğini de rapor etmişlerdir (Ramesh vd., 2010).

Reddy vd. (2022) plazma püskürtme yöntemi ile ürettikleri WC-Co+Cr₃C₂-NiCr kaplamaların yüksek sıcaklık etkisi altında erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Alümina aşındırıcı partikülleri ile deneyleri 30° ve 90° çarpma açılarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde, 300 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde 90° çarpma açısında en yüksek erozyon oranı ile karşılaşmışlardır, buna karşın 500 °C ve 700 °C sıcaklıkta gerçekleştirdikleri deneylerde 30° çarpma açısında daha yüksek erozyon oranlarına ulaşmışlardır (Reddy vd., 2022).

Sidhu ve arkadaşlarının 2007 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada sünek ve gevrek özellik sergileyen malzemelerin SPE davranışlarını incelemişlerdir. Sünek yüzey özellikleri sergileyen malzemelerin, yüzeyine yüksek oranda aşındırıcı partikül alümina gömüldüğünü ve gevrek malzemelerin ise çarpma açısı büyümesinin erozyon oranını artırdığını rapor etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular bu çalışmadaki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir (H. S. Sidhu vd., 2007).

Singh vd. (2019) 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine HVOF püskürtme yöntemini kullanarak Ni bazlı Ni-Cr-O ve NiCrBSiFe-WC(Co) elde etmişlerdir. Kaplamalı numune ve kaplamasız 316L malzemeleri 30°- 40°- 50°- 60° açılarında farklı sürelerde SPE deneylerine tabi tutmuşlardır. Maksimum erozyon oranına, bu çalışmaya benzer şekilde, 30° çarpma açısında kaplamasız 316L ve Ni-Cr-O'da rastlamışlardır. Buna karşın en yüksek dayanımı NiBCrSi-WC(Co)'nun gösterdiğini belirtmişlerdir (Singh vd., 2019).

Praveen vd. (2016) 304 paslanmaz çelik üzerine yüksek aşınma dayanımı elde edebilecekleri kaplamalar üretmişlerdir. Yüksek dayanım bekledikleri kaplamaları HVOF termal spreynin tekniği ile üretmişlerdir. HVOF kaplama için püskürtme parametrelerini optimize etmek amacıyla taguchi yöntemini kullanmışlardır. 304 paslanmazın üzerine ürettikleri, ağırlıkça %65 NiCrSiB-%35 WC-Co kaplamaları, SPE aşınma testlerine G76-95 standartlarında tabi tutmuşlardır. Çarpma açılarını 30°- 60°- 90° olarak belirleyerek erozyon deneyleri sonucunda Ni bazlı kaplama numunelerinin sünek davranış sergilediğini gözlemlemişlerdir. 90° çarpma açısında meydana gelen erozyon oranı 30°'e kıyasla neredeyse 2 kat aşınma direnci gösterdiğini rapor etmişlerdir (Praveen vd., 2016).

Mathapati vd. (2017) plazma püskürtme tekniği kullanarak MDN321 çeliği üzerine NiCrAlY-25WC-Co kaplamalar üretmişlerdir. Elde ettikleri kaplamaları 200 °C - 400 °C - 600 °C sıcaklıklarında alümina aşındırıcıları ile 30° ve 90° çarpma açılarında SPE aşınmasına tabi tutmuşlardır. Seçilen test sıcaklıklarında kaplamanın alt tabakaya nispeten daha yüksek erozyon direnci sergilediğini, bunun yanı sıra düşük darbe açılarının yüksek sıcaklıklarda daha çok hasara sebebiyet verdiğini ifade etmişlerdir (Mathapati vd., 2017).

Singh vd. (2020) kazan borularında SPE aşınmasının yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğini belirterek, 400 °C ve üzerinde erozyonun oksidasyon ve sıcak korozyonla birlikte hızlandığını ifade etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneyde WC-12Co, Stellite 6, Stellite 21 kaplamaları SAE213-T12 kazan çeliği üzerine D-gun tekniği kullanarak üretmişlerdir. 400 °C sıcaklıkta alümina aşındırıcılarını 30° ve 90° çarpma açısı oluşturacak şekilde hedef malzeme yüzeyine püskürtmüşlerdir. Stellite 21 kaplamaların, her iki çarpma açısında da Stellite 6 ve WC-Co kaplamalara göre nispeten daha düşük erozyona uğradığını rapor etmişlerdir (P. K. Singh ve Mishra, 2020).

Feng vd. (2020) WC-Co kaplamalar ile SPE aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. SPE aşınmasını etkileyen faktörler olarak çarpma açısı, çarpma hızı, aşındırıcının sertliği, aşındırıcının hedef malzeme yüzeyine çarptıktan sonra kırılma derecesi olduğunu öne sürmüşlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak korundum, silikon karbür ve cam kumu kullanmışlardır. Deneylerini 30°- 45°- 60°- 75°- 90° çarpma açılarında gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneylerde çarpma açısına bağlı erozyon oranı değişimleri düşük açıdan başlayarak açının artışına bağlı yükselme sergilediğini tespit etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar çalışmamızda bulduğumuz WC-Co erozyon oranları ile benzerlik göstermektedir.

Farklı aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirdikleri SPE deneylerinde, aşındırıcı partikül cinsinin SPE oranına etkisini yüksekte düşüğe doğru korundum, silikon karbür ve cam kumu olarak sıralamışlardır (Feng vd., 2020).

Sidhu vd. (2007) kazan borusu çeliklerini üzerindeki katı partikül erozyonu hakkında araştırmalar yapmışlardır. HVOF püskürtme yöntemi ile uygulanan NiCr ve Stellite-6 kaplamalar üretmişlerdir. Deneyler 150 µm - 200 µm silika aşındırıcı partikülleri ile 250 °C sıcaklıkta, 30° ve 90° çarpma açılarında ve 26 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. İnce ve düzgün katmanlı bir mikro yapıda olan NiCr kaplamalar Stellite-6 kaplı numuneye göre her iki çarpma açısında da erozyona karşı daha yüksek dayanım göstermektedirler. Ayrıca NiCr kaplamaların SPE aşınma davranışlarının sünek malzeme mekanizması sergilediğine dikkat çekmişlerdir, Stellite 6 kaplı numunelerin gevrek/kırılgan yapıda olduğunu rapor etmişlerdir (H. S. Sidhu vd., 2007).

WC-Co ve NiCr kaplı numunelerin gösterdikleri SPE aşınma davranışları ve deneysel sonuçlar, güncel literatür ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde aralarında uyum olduğu ve literatürün deneysel sonuçları doğrular nitelikte olduğu açıkça görülmektedir.

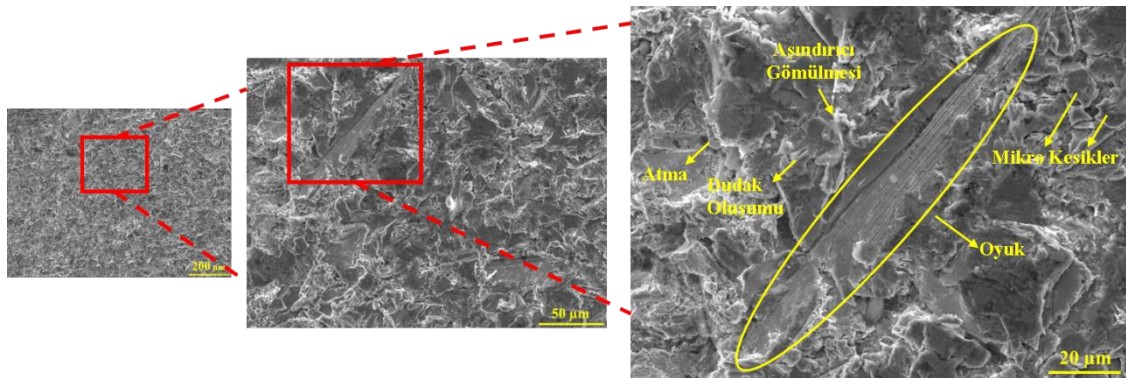
4.4.1 Katı Partikül Erozyonu Aşınması Sonrası Gerçekleştirilen Karakterizasyon ve İncelemeler

WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerde SPE aşınma etkisinin; kaplama malzemesinin özellikleri, çarpma açıları ve farklı partikül boyutları ile ilişkileri incelenmiştir. SPE deneyleri sonrası meydana gelen hasar mekanizmaları karakterizasyon teknikleri (SEM, elementel haritalama ve EDS analizi) kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

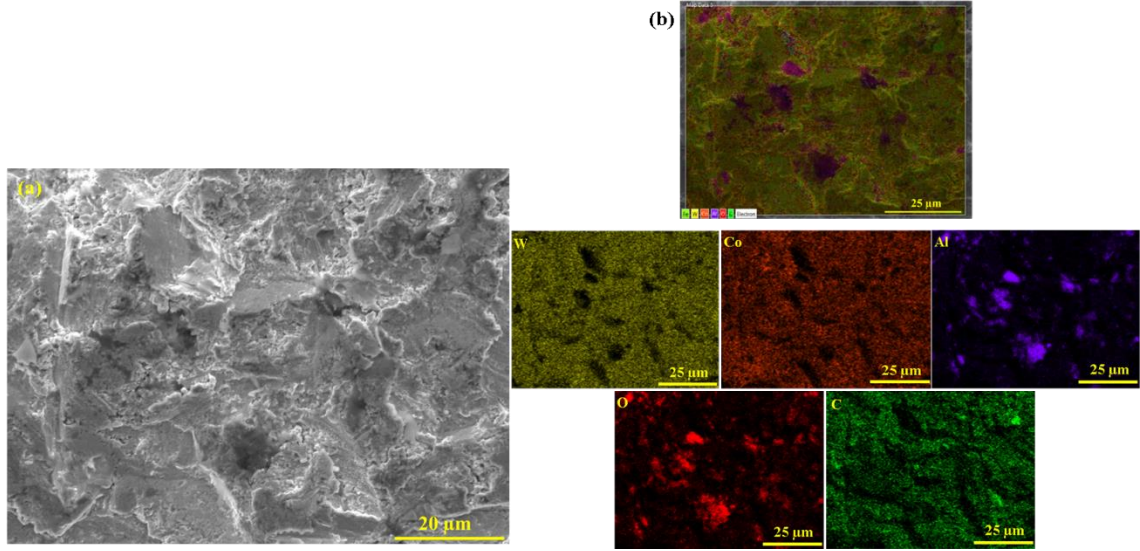
WC-Co kaplamalı numuneler ile gerçekleştirilen deneyler sonrası SEM görüntülerinde kaplama yüzeylerinde hasar mekanizmalarının meydana geldiği açıkça görülmektedir (Şekil 4.24, Şekil 4.27, Şekil 4.30 ve Şekil 4.33). Kaplama yüzeylerinde düşük çarpma açılarında oluşan kazıma, mikro kesme, dudak oluşumu, sürünme kaynaklı hasarlar ve mikro çatlaklar mikroyapı incelemelerinde tespit edilmiştir. Yüksek çarpma açılarında (60° ve 90°) gerçekleştirilen deneylere ait SEM görüntüleri incelendiğinde hedef malzeme yüzeyinde hasar mekanizmalarının daha yüksek oranda olduğu gözlemlenmiştir. Bahsedilen yüksek hasarlardan kaynaklı yüzeyden parça kaybı sonucu altlık malzemenin ortaya çıktığı SEM,

elementel haritalama ve EDS analizlerinde tespit edilmiştir (Şekil 4.26, Şekil 4.28 ve Şekil 4.30). Tablo 4.8’de verilen erozyon oranları ile deney sonrası gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri sonuçlarının uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. WC-Co kaplamalı numunelerin 30°- 45°- 60° çarpma açılarında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası SEM görüntülerinde kaplama yüzeyine düşük miktarda aşındırıcı partikül Al_2O_3 gömüldüğü mikroyapı incelemelerinde tespit edilmiş olup, gerçekleştirilen elementel haritalama ve EDS analizleri ile aşındırıcı partikül gömülmesi doğrulanmıştır (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26). Ancak 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde WC-Co numunelerine, aşındırıcı partikül gömülmesine rastlanmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35). Gerçekleştirilen elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları ile SEM verileri karşılaştırıldığında, elde edilen bulguların birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. WC-Co gibi gevrek yüzey özellikleri sergileyen kaplamaların SPE deneyleri sonucunda karşılaştıkları hasar mekanizmalarını, karakterizasyon incelemeleri sonrası yinelemek gerekirse, düşük çarpma açılarda kesme ve düşük oranda kırılma hasarları ile karşılaşılırken, yüksek çarpma açılarında malzeme yüzeyinde kırılma ve çatlakların büyümesi sonucu yüzeyden parça kopması ile karşılaşıldığı anlaşılmaktadır.

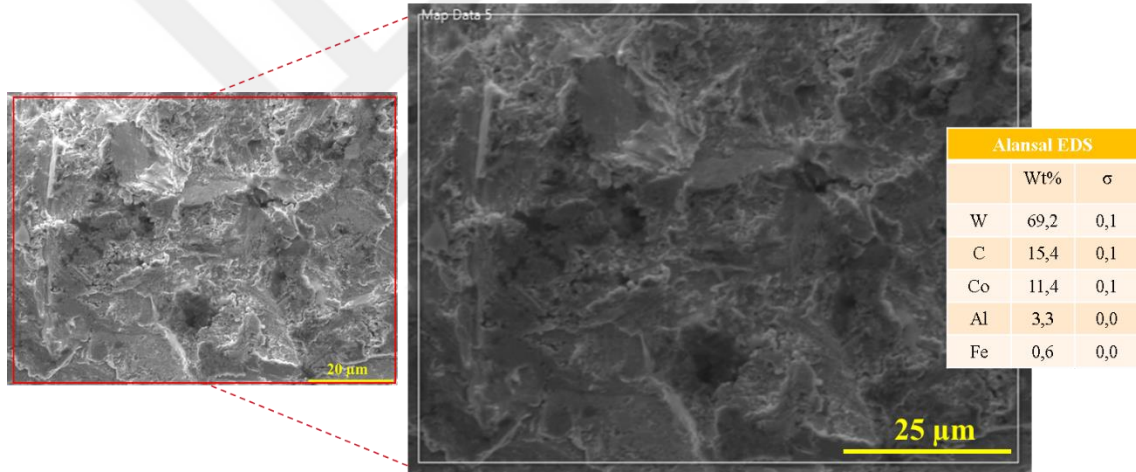
WC-Co kaplamalı numune ile 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.24’de görüleceği üzere kesme, kazıma ve kırılma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.25’de verilen SEM görüntüsü ve elementel haritalama analizlerinde yüzeye düşük miktarda aşındırıcı partikül (Al_2O_3) gömüldüğü açıkça görülmektedir. Yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesini Şekil 4.26’da verilen EDS analiz sonucu da doğrulamaktadır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile örtüşmektedir.



Şekil 4.24: 30°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri



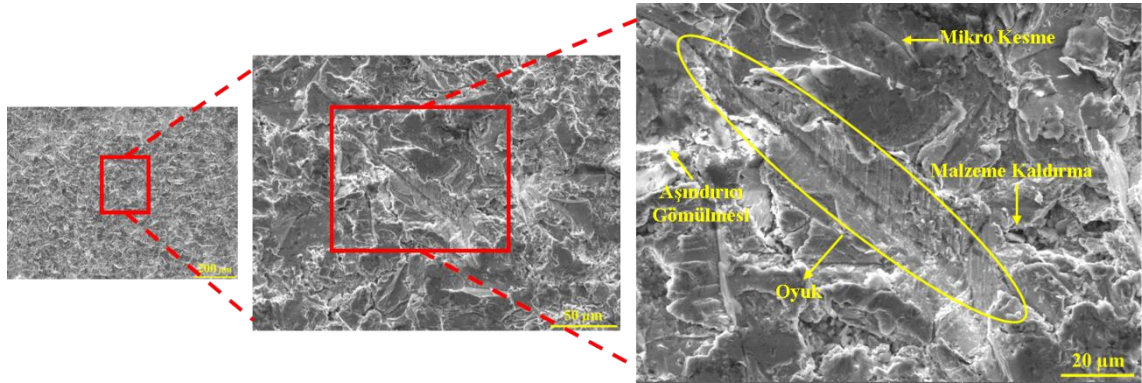
Şekil 4.25: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi



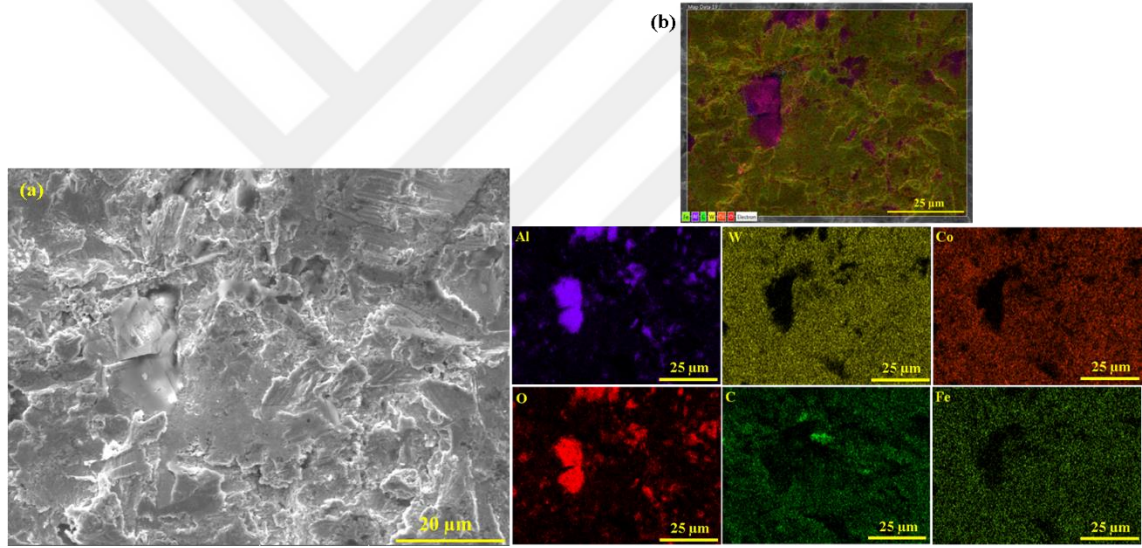
Şekil 4.26: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi

WC-Co kaplamalı numune ile 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.27'de görüleceği üzere kesme ve kırılma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kaplama tabakasının lokal olarak tamamen kopmaya uğraması ile altlık malzemenin (316L) varlığı tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde tespit edilen bu durum elementel haritalama ve EDS analizleri ile uyum içerisindedir (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29). Şekil 4.28'de verilen SEM görüntüsü ve elementel haritalama analizlerinde yüzeye düşük miktarda aşındırıcı partikül (Al_2O_3) gömüldüğü görülmektedir. Yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesini Şekil 4.29'da

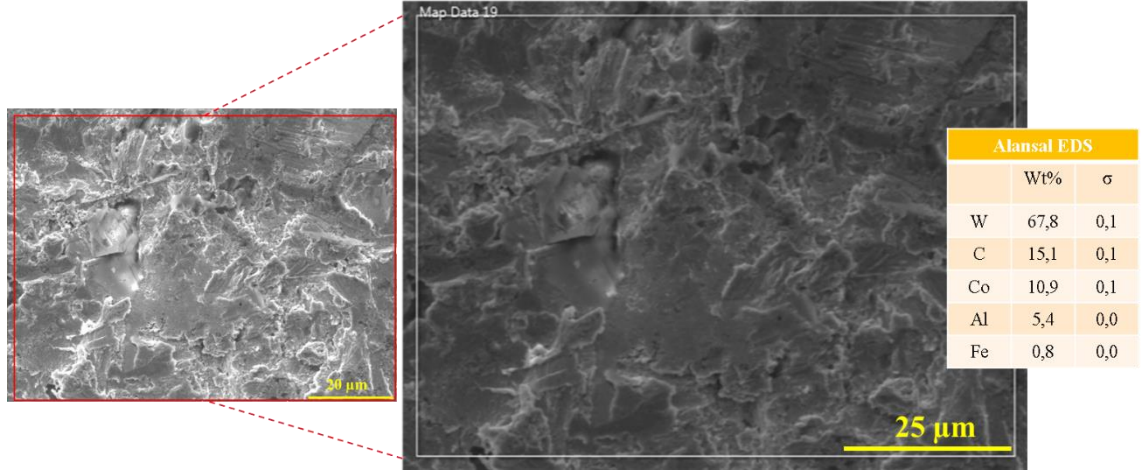
verilen EDS analiz sonucu da doğrulamaktadır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.27: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

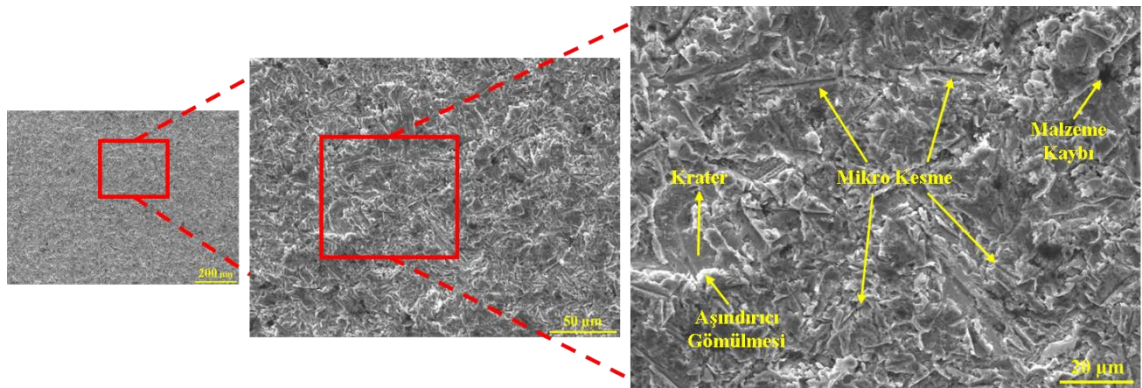


Şekil 4.28: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi

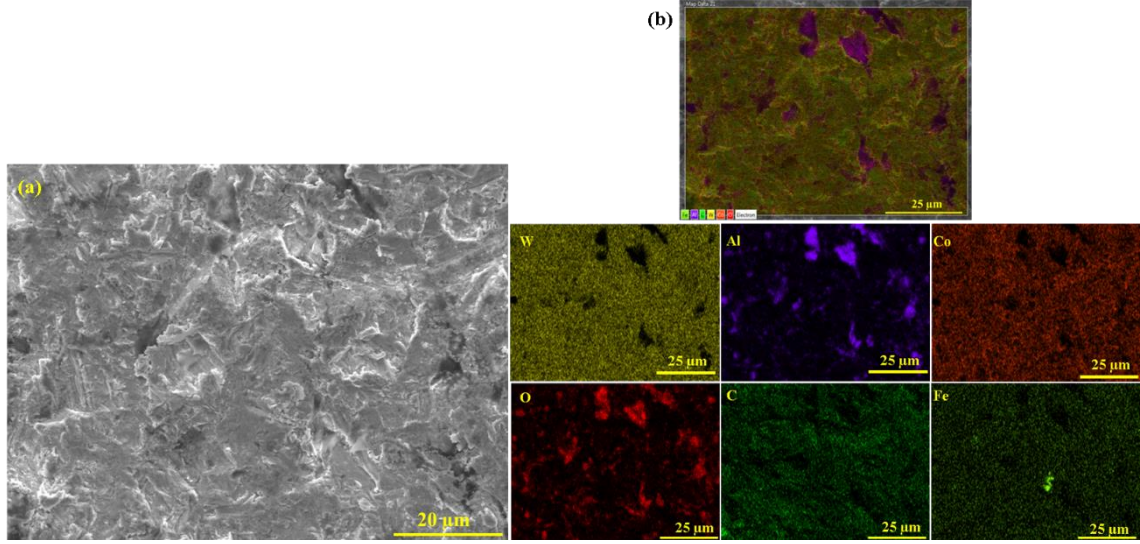


Şekil 4.29: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi

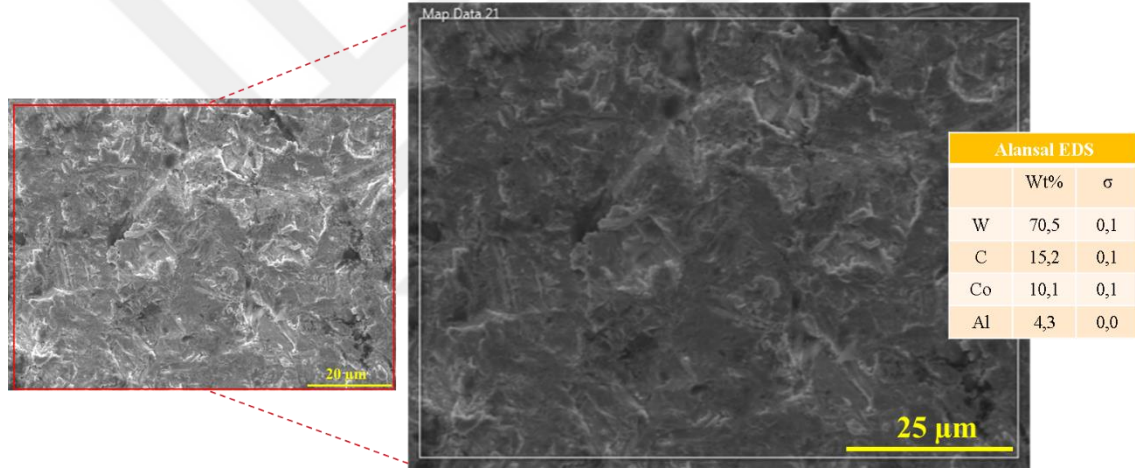
WC-Co kaplamalı numune ile 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.30'da görüleceği üzere kırılma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte kaplama tabakasının lokal olarak tamamen kopmaya uğraması ile altlık malzemenin (316L) varlığı tespit edilmiştir. SEM incelemelerinde tespit edilen bu durum elementel haritalama analizleri ile uyum içerisinde (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31). Şekil 4.31'de verilen SEM görüntüsü ve elementel haritalama analizlerinde yüzeye düşük miktarda aşındırıcı partikül (Al_2O_3) gömüldüğü görülmektedir. Yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesini Şekil 4.32'de verilen EDS analiz sonucu da doğrulamaktadır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile uyum içerisinde.



Şekil 4.30: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x, 1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri



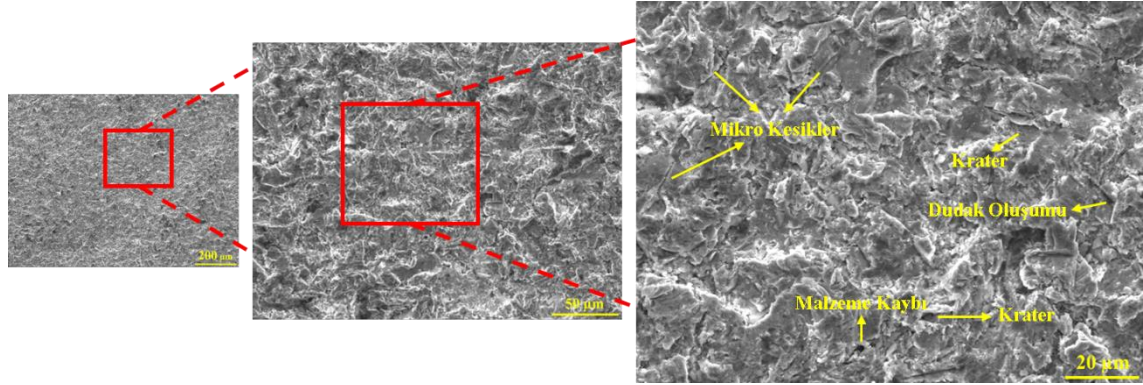
Şekil 4.31: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi



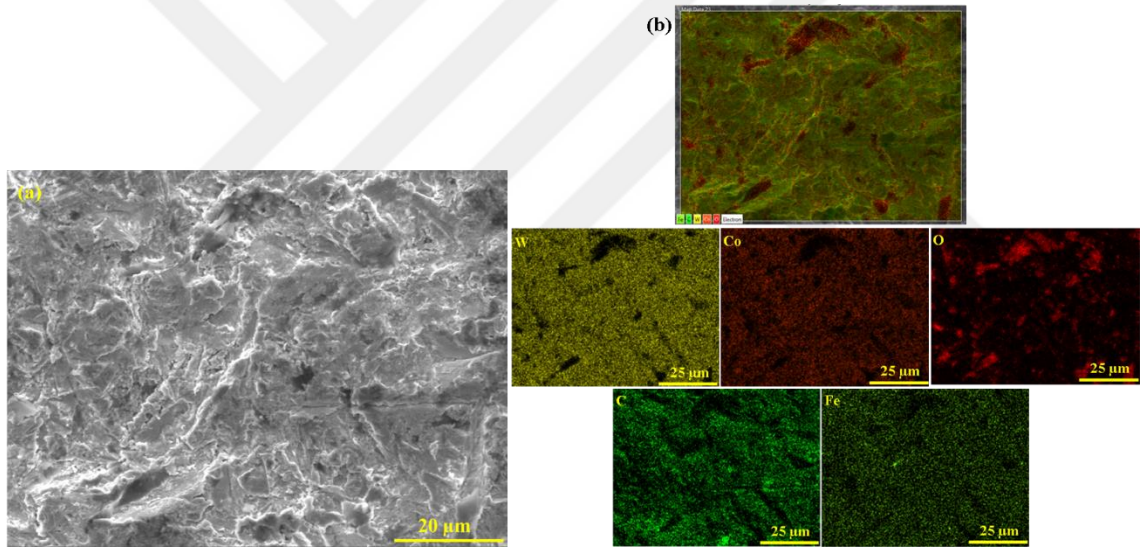
Şekil 4.32: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi

WC-Co kaplamalı numune ile 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.33'de görüleceği üzere kırılma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte kaplama tabakasının lokal olarak tamamen kopmaya uğraması ile altlık malzemenin (316L) varlığı tespit edilmiştir. SEM incelemelerinde tespit edilen bu durum elementel haritalama ve EDS analizleri ile uyum içerisinde (Şekil 4.34). Şekil 4.34'de verilen SEM ve elementel haritalama analizinde görüleceği üzere WC-Co ile gerçekleştirilen tüm SPE deneylerinden farklı olarak yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesine rastlanmamıştır.

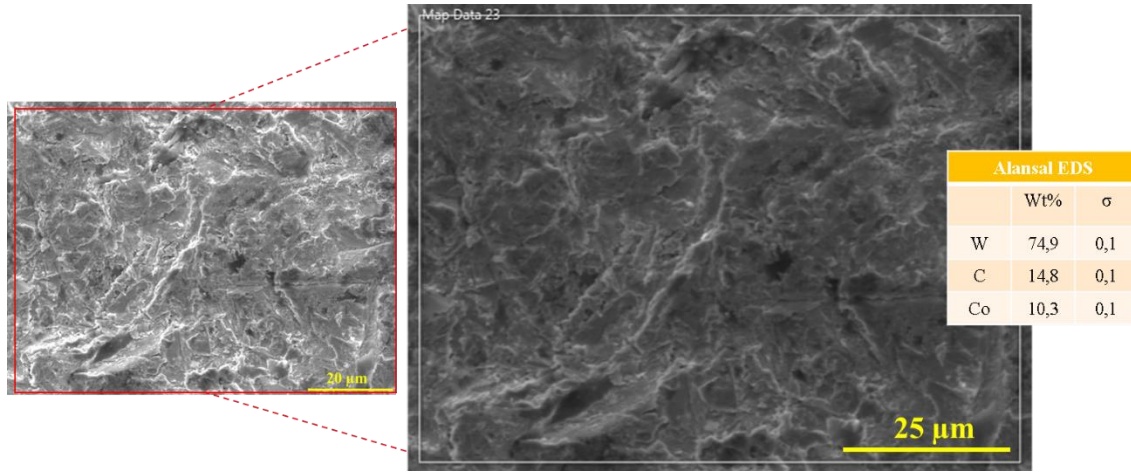
Yüzeye aşındırıcı partikül gömülmediği Şekil 4.35’de verilen EDS analiz sonucu da doğrulamaktadır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile uyum içerisinde.



Şekil 4.33: 90°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri



Şekil 4.34: 90°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi

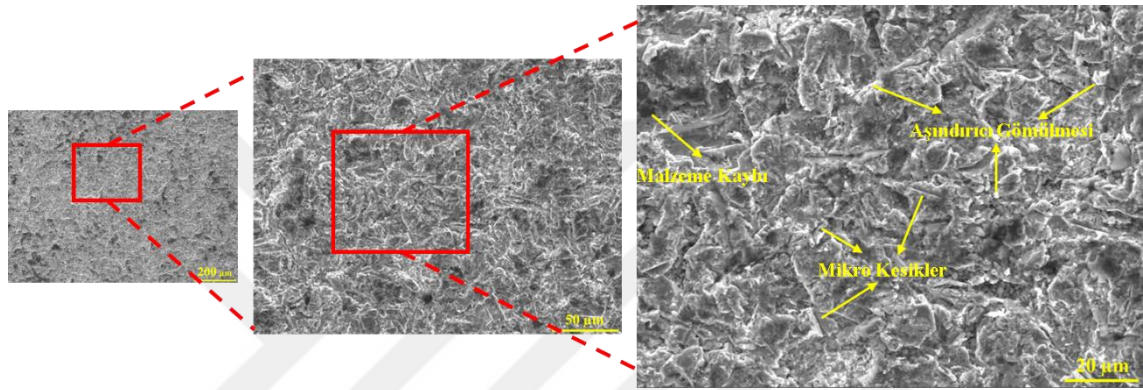


Şekil 4.35: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası WC-Co kaplamalı numunenin EDS analizi

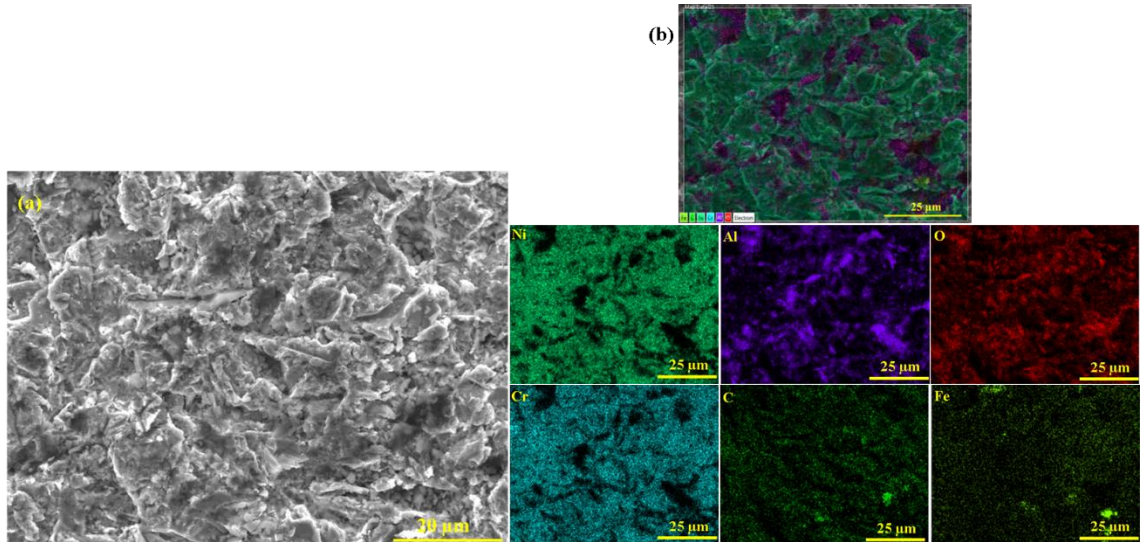
NiCr kaplamalı numunelerin düşük çarpma açıları (30° ve 45°) yüzeyde kesme hasarlarının meydana geldiği, yüksek çarpma açıları (60° ve 90°) ise belirli süre tekrar eden çarpmalar sonucu gerilme ve şekil değişiklikleri (yüzey yorulması) ile karşılaşıldığı SEM incelemelerinde net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.36, Şekil 4.39, Şekil 4.42 ve Şekil 4.45). Tablo 4.8'de verilen erozyon oranları ile NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri sonrası mikroyapı incelemelerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür. NiCr kaplamaların SEM incelemelerinde tüm çarpma açıları yüzeye yüksek miktarda aşındırıcı partikül (Al_2O_3) gömüldüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.36, Şekil 4.39, Şekil 4.42 ve Şekil 4.45). Diğer çarpma açılarına kıyasla daha yüksek miktarda aşındırıcı partikül gömülmesine, 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyinde rastlandığı mikroyapı incelemelerinde tespit edilmiştir ve bu sonuç elementel haritalama ve EDS analizleri ile doğrulanmıştır (Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38). Tüm çarpma açıları için SEM görüntülerinde tespit edilen yüksek miktarda aşındırıcı partikül gömülmesi elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları ile doğrulanmıştır (Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47). Sünek yüzey özellikleri sergileyen NiCr kaplamalı numunelerin deney sonrası bulguları, literatür incelemeleri ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir (H. S. Sidhu vd., 2007, Praveen vd., 2016, Singh vd., 2019).

NiCr kaplamalı numune ile 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.36'da görüleceği üzere kesme şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kaplama tabakasının lokal olarak tamamen kopmaya uğraması ile altlık malzemenin (316L) varlığı tespit

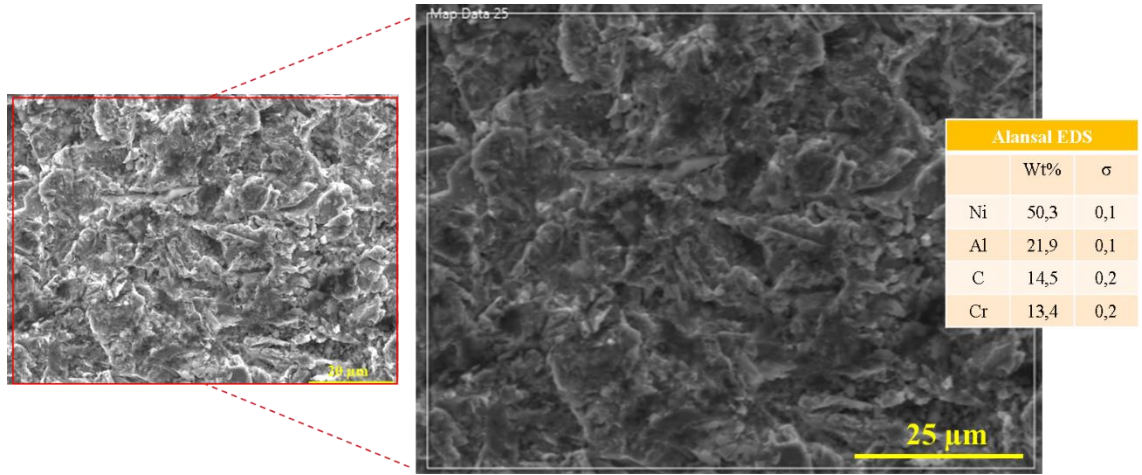
edilmiştir. SEM incelemelerinde tespit edilen bu durum elementel haritalama ve EDS analizleri ile uyum içerisinde (Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). Şekil 4.37’de verilen SEM ve elementel haritalama analizinde görüleceği üzere NiCr kaplamalı numune ile 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde yüzeye çok ciddi oranda aşındırıcı partikül gömülmesi olduğu tespit edilmiştir. Kaplamalı yüzeye yüksek oranda aşındırıcı partikül gömülmesini Şekil 4.38’de verilen EDS analiz sonucu da doğrulamaktadır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile örtüşmektedir.



Şekil 4.36: 30°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

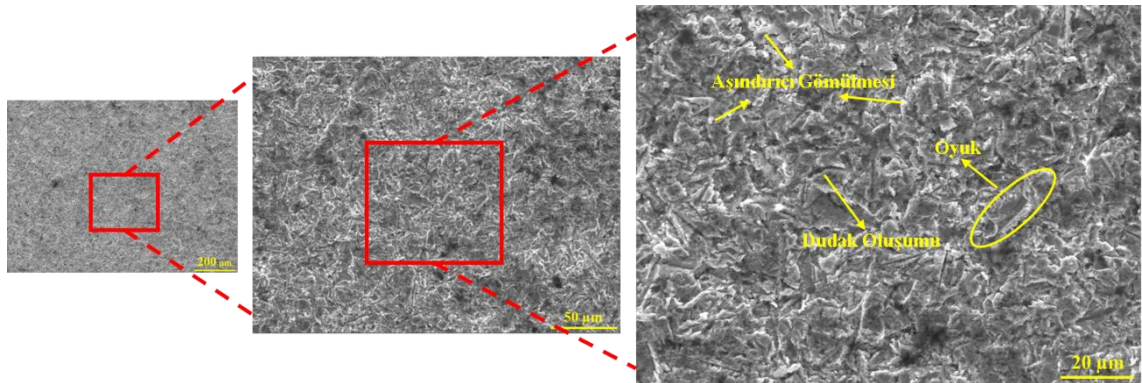


Şekil 4.37: 30°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi

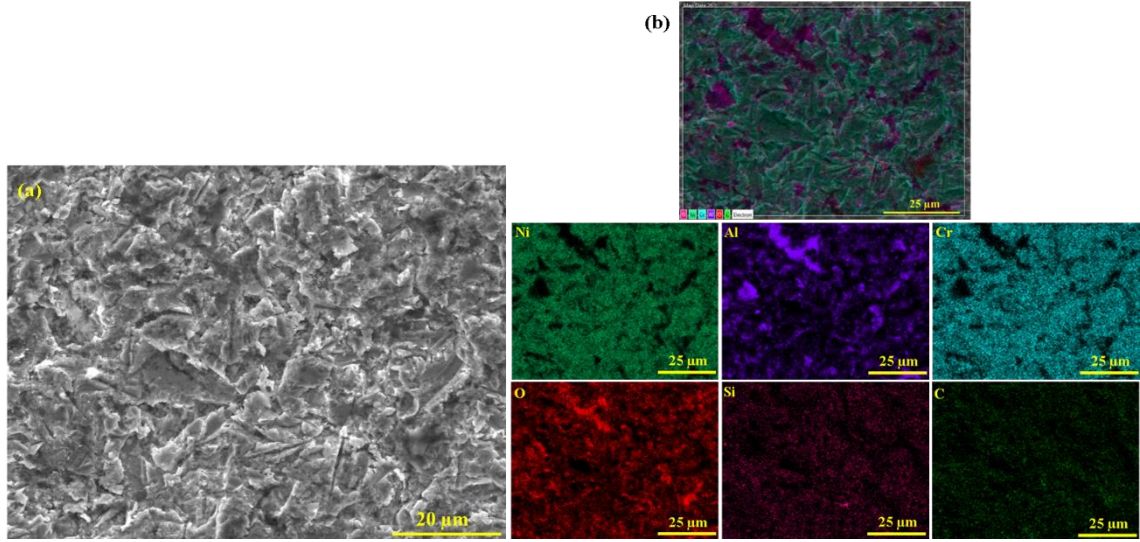


Şekil 4.38: 30°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi

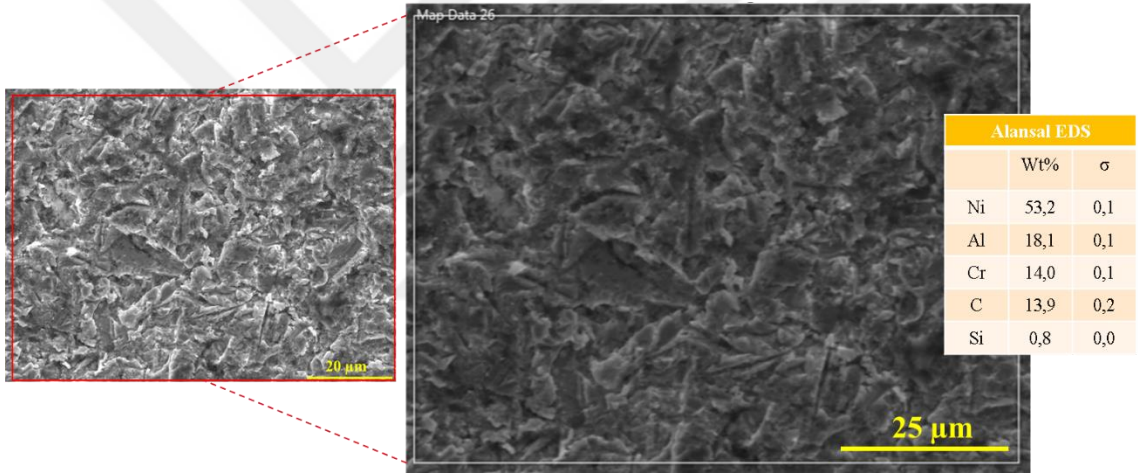
NiCr kaplamalı numune ile 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.39'da görüleceği üzere mikro kesme şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.40'da verilen SEM ve elementel haritalama analizinde görüleceği üzere NiCr kaplamalı numune ile 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde yüzeye ciddi oranda aşındırıcı partikül gömülmesi olduğu ve düşük miktarda (% 0,8) Silisyum (Si) elementinin varlığı tespit edilmiştir. Yüzeye yüksek oranda aşındırıcı partikül gömülmesi ve Si elementinin varlığı Şekil 4.41'de verilen EDS analiz sonucu ile örtüşmektedir. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri, SPE deneyleri sonrası tespit edilen erozyon oranları ile uyum içerisinde.



Şekil 4.39: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x, 1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

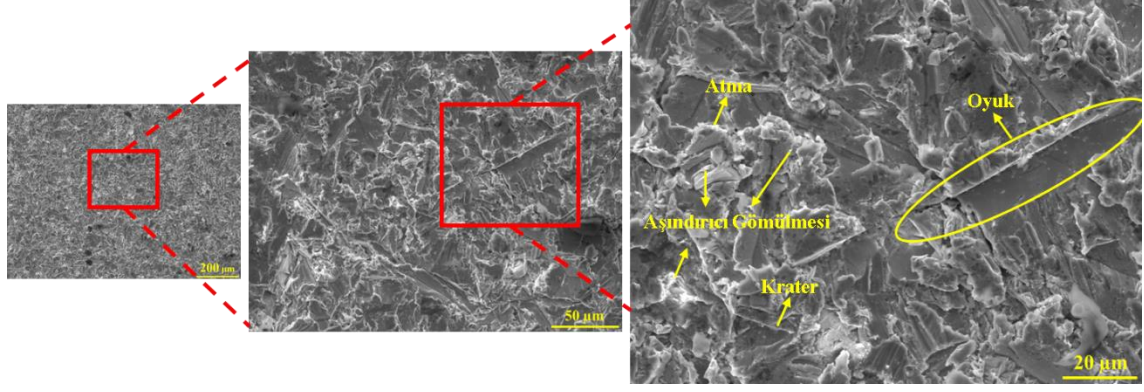


Şekil 4.40: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi

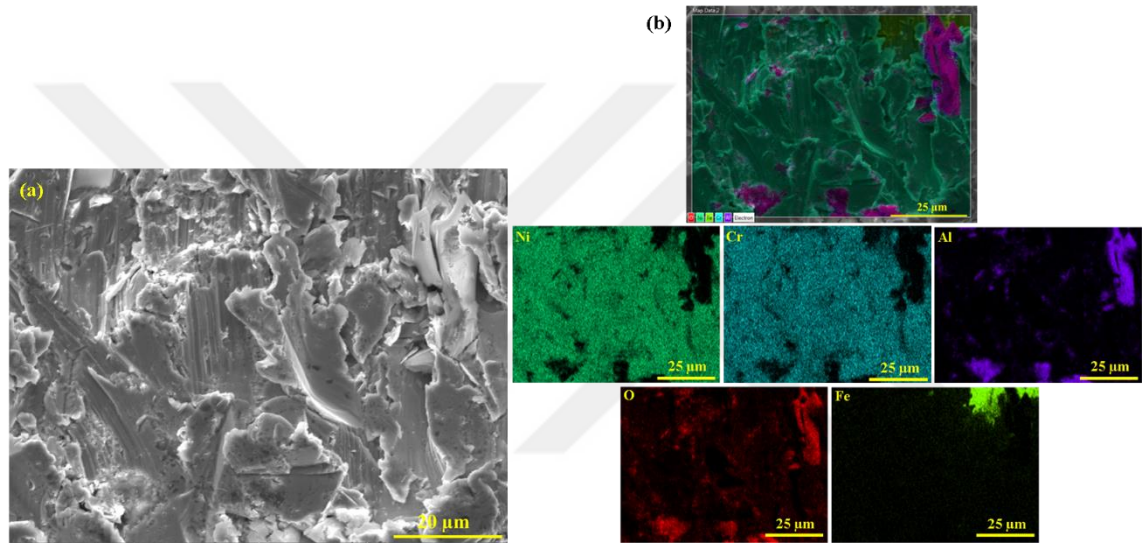


Şekil 4.41: 45°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi

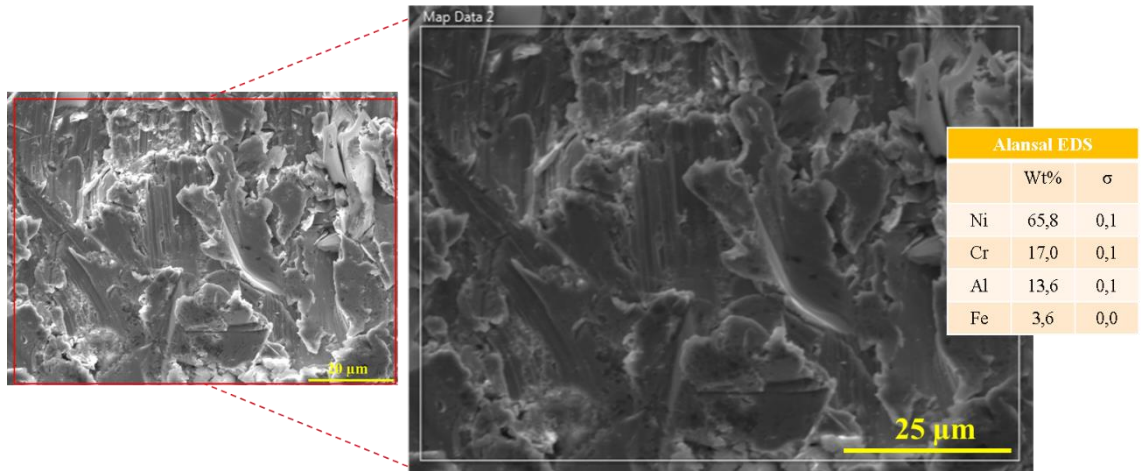
NiCr kaplamalı numune ile 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.42'de görüleceği üzere kesme ve yorulma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Mikroyapısal incelemelerde kaplamanın tamamen koptuğu ve altlık tabakanın gözüktüğü küçük bir alan tespit edilmiştir. Elementel haritalama ve EDS analizlerinde de kaplamanın tamamen koptuğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). Şekil 4.43'de verilen SEM ve elementel haritalama analizinde görüleceği üzere NiCr kaplamalı numune ile 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde yüzeye yüksek oranda aşındırıcı partikül gömülmesi olduğu gözlenmiştir. Kaplamalı yüzeye yüksek oranda aşındırıcı partikül gömülmesi Şekil 4.44'de verilen EDS analiz sonucu ile örtüşmektedir.



Şekil 4.42: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

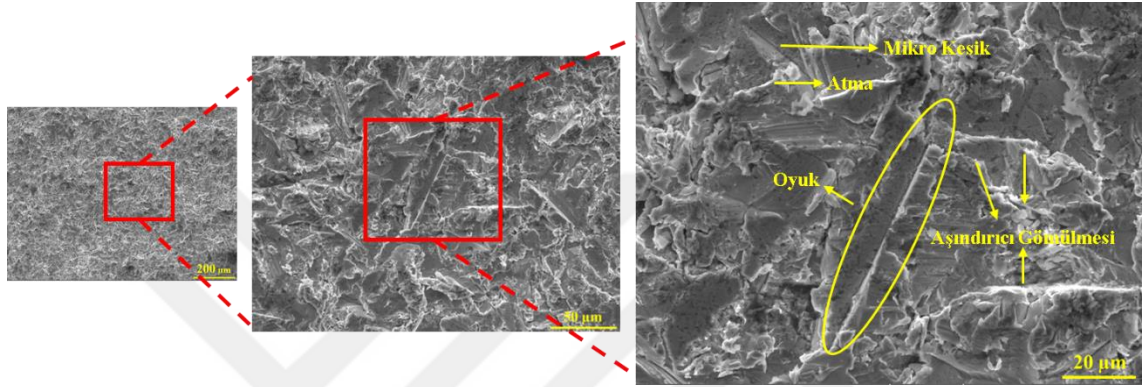


Şekil 4.43: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi

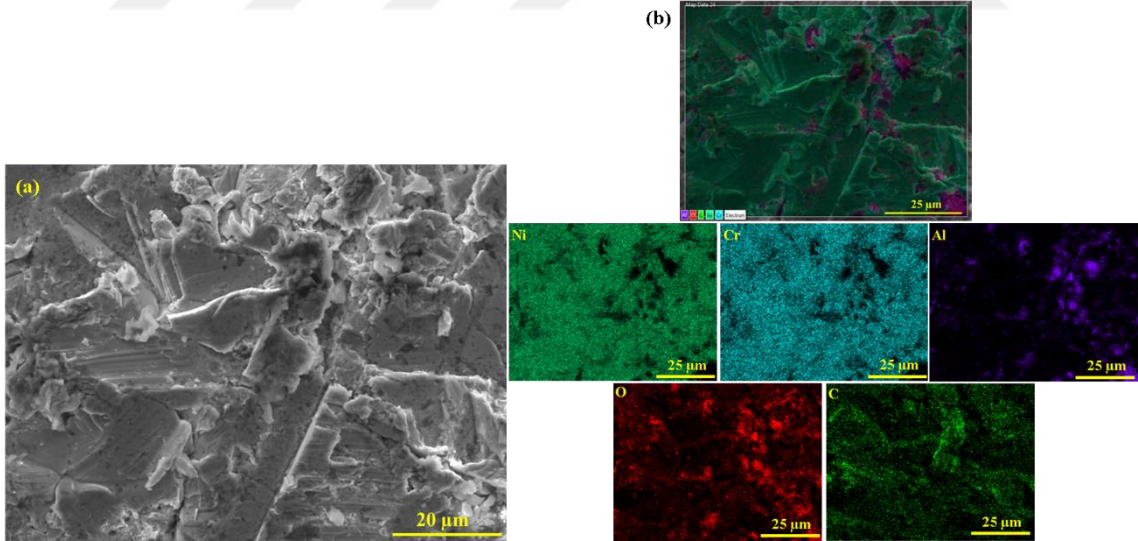


Şekil 4.44: 60°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi

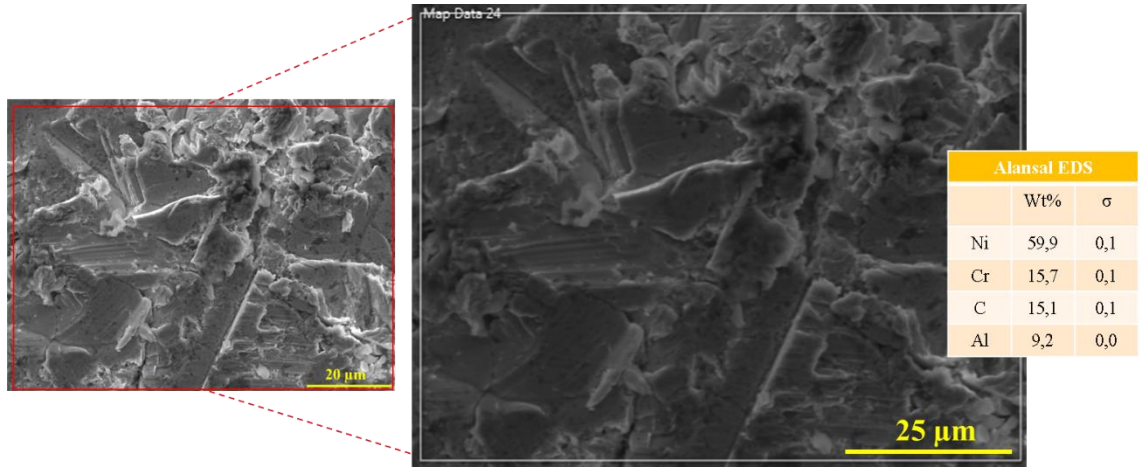
NiCr kaplamalı numune ile 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası mikroyapısal incelemelerde Şekil 4.45’de görüleceği üzere yorulma şeklinde hasar mekanizmaları meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.46’da verilen SEM ve elementel haritalama analizinde görüleceği üzere NiCr ile 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde yüzeye diğer çarpma açılara kıyasla nispeten düşük oranda aşındırıcı partikül gömülmesi olduğu tespit edilmiştir. Kaplamalı Yüzeye nispeten düşük oranda (% 9,2) aşındırıcı partikül gömülmesi Şekil 4.47’de verilen EDS analiz sonucu ile örtüşmektedir.



Şekil 4.45: 90°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin 250x,1000x ve 2000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri



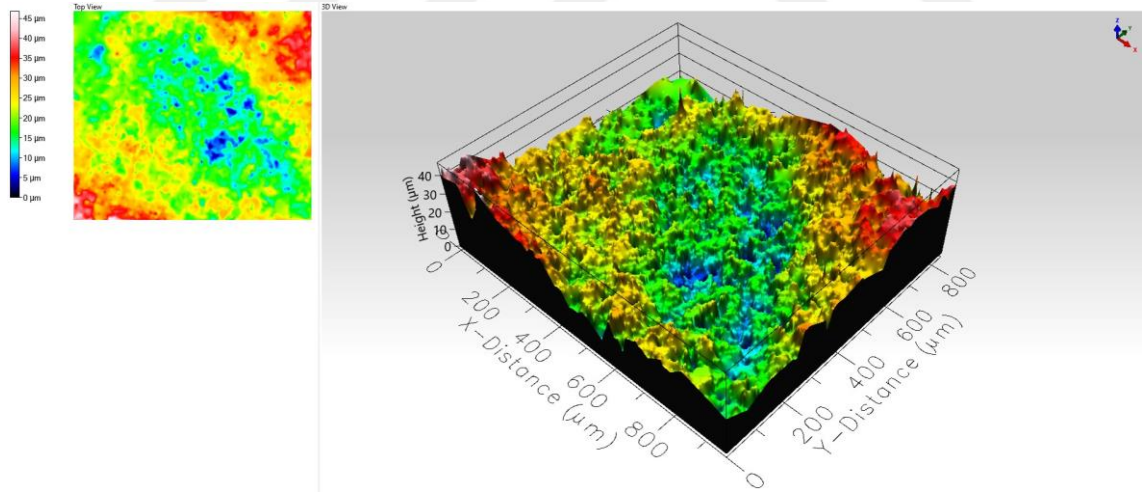
Şekil 4.46: 90°’lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamanın (a) SEM görüntüsü ve (b) elementel haritalama analizi



Şekil 4.47: 90°'lik çarpma açısında gerçekleştirilen SPE aşınma deneyi sonrası NiCr kaplamalı numunenin EDS analizi

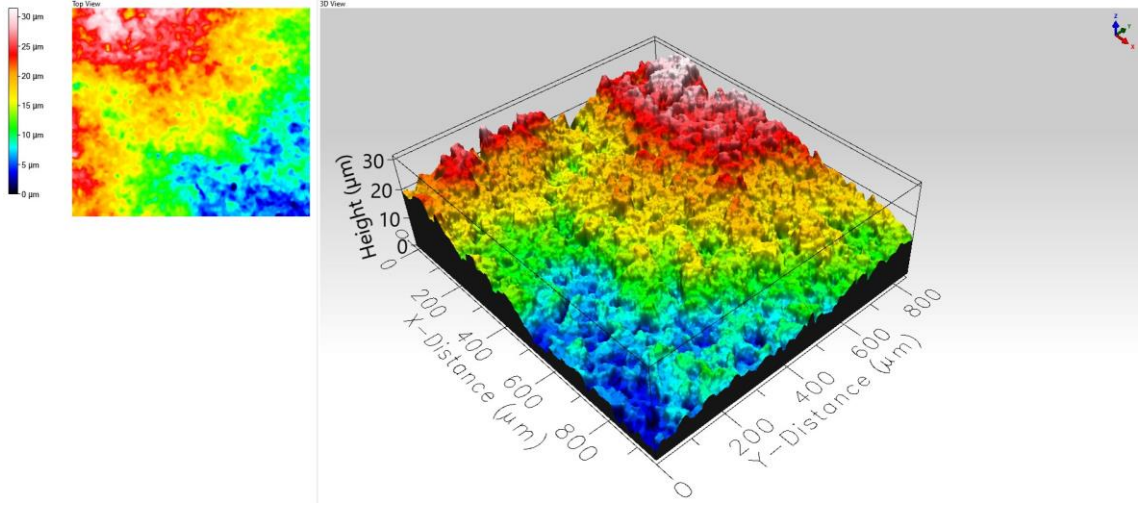
4.5. Katı Partikül Erozyon Aşınması Sonrası 3D Profilometre Analizi ve Pürüzlülük Değerleri

Şekil 4.48'de 30° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış WC-Co kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüleri verilmiştir.



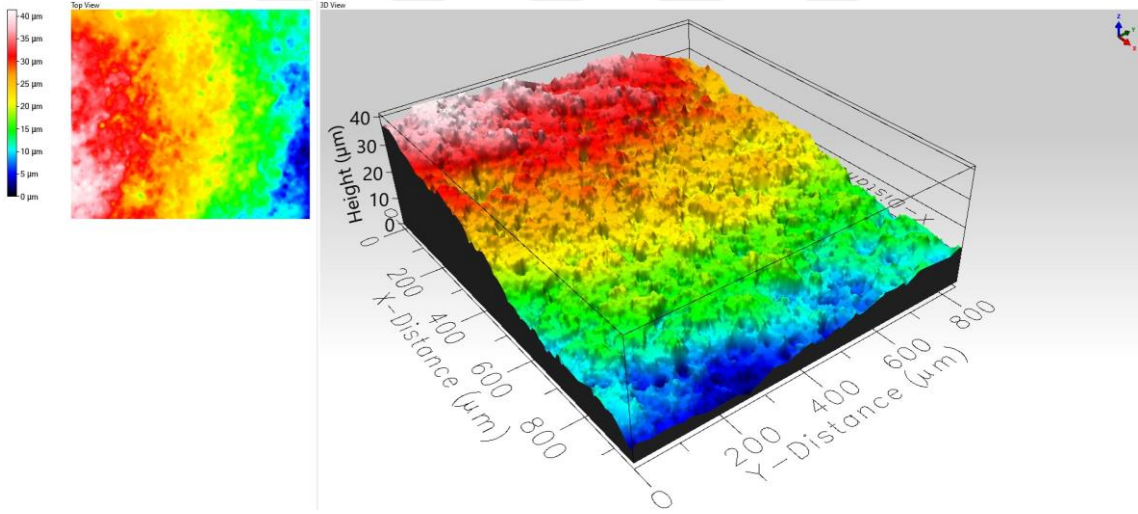
Şekil 4.48: WC-Co kaplamanın 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.49'da 45° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış WC-Co kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



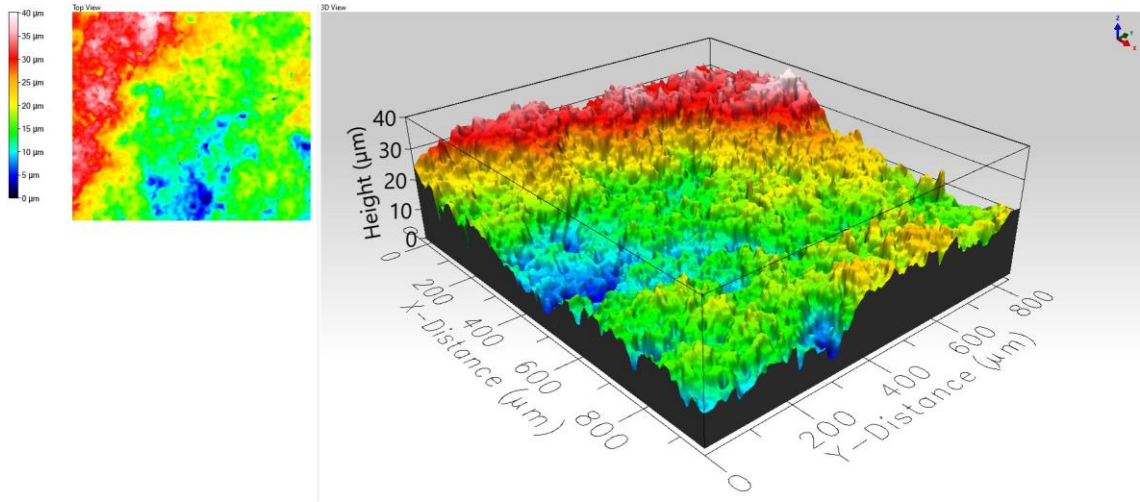
Şekil 4.49: WC-Co kaplamanın 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.50’de 60° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış WC-Co kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.

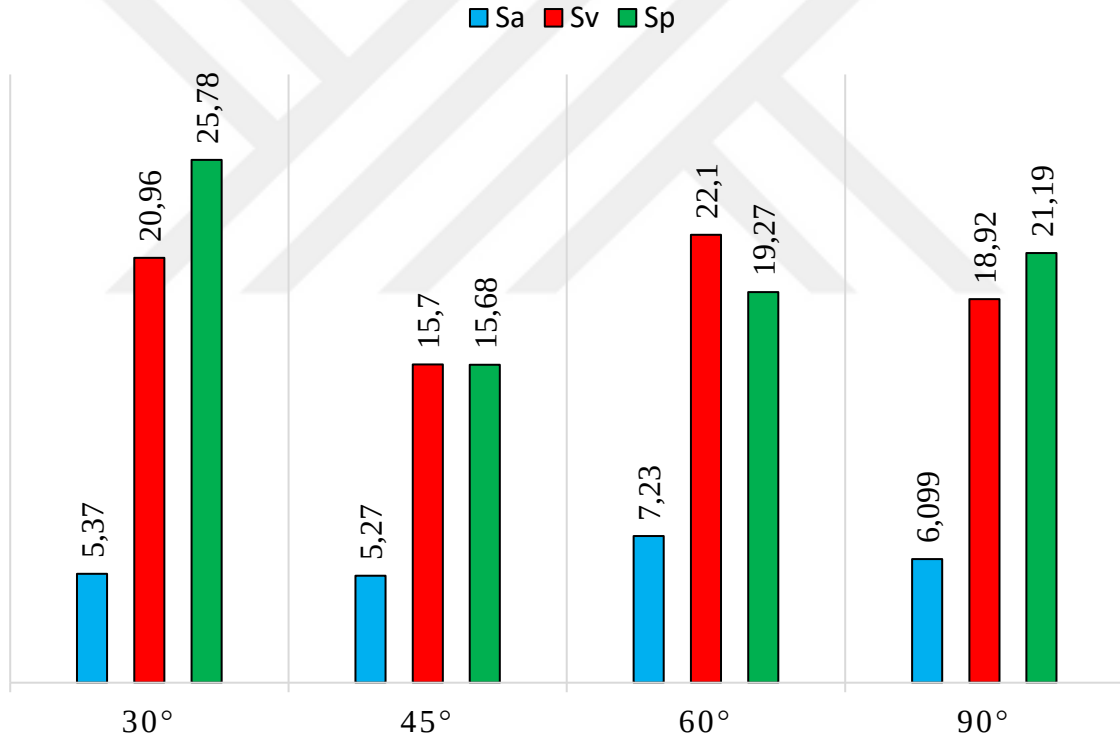


Şekil 4.50: WC-Co kaplamanın 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.51’de 90° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış WC-Co kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.51: WC-Co kaplamanın 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

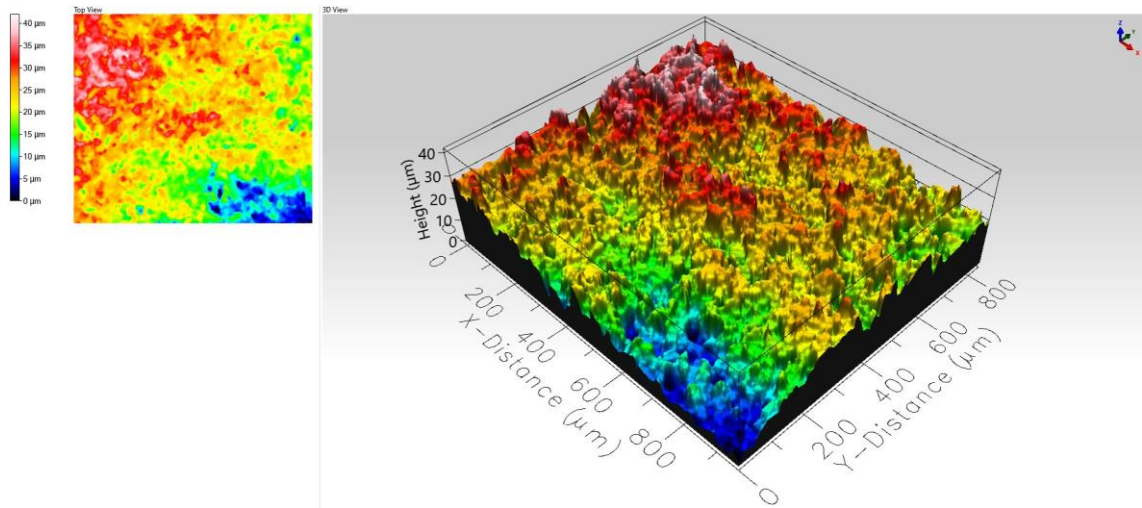


Şekil 4.52: WC-Co kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük grafikleri

Şekil 4.52’de verilen grafik; 1,5 bar püskürtme basıncında, farklı çarpma açılarında ve iki farklı partikül boyutu kullanılarak aşındırılan WC-Co kaplamalı yüzeyin 3D profilometre cihazı ile elde edilen pürüzlülük değerlerini (Sa, Sv, Sp) ifade etmektedir. Aynı aşındırıcı partikül boyutu kullanılarak gerçekleştirilen (50 mesh partikül boyutu için 30° ve 45°, 80 mesh partikül boyutu için 60° ve 90°) SPE deneyleri sonrası bulgular incelendiğinde çarpma

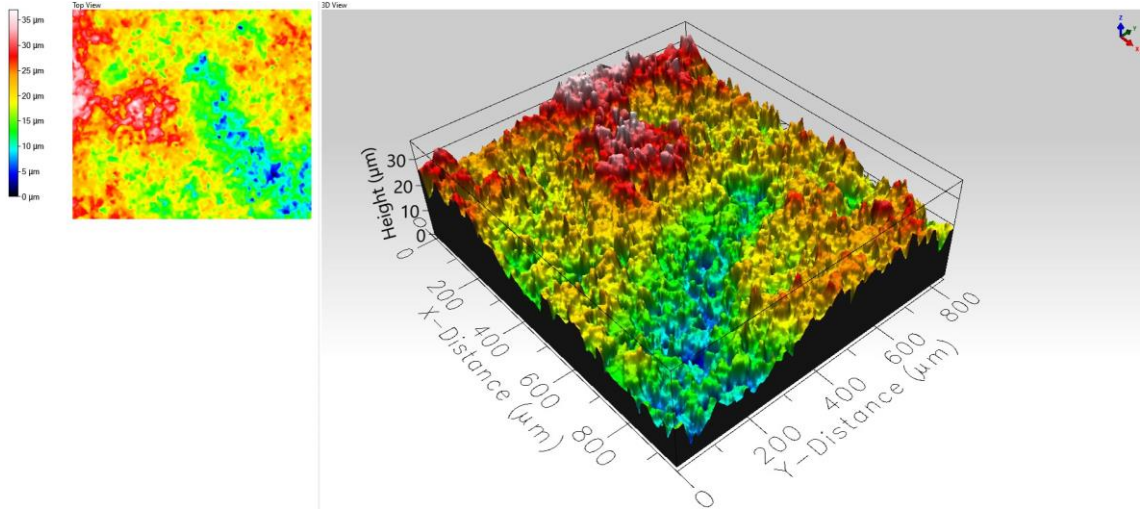
açısının artması ile azalan alansal pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte en yüksek pürüzlülük değerleri 60° çarpma açısı ve 80 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen SPE aşınma deney numunesinde gözlemiştir. Elde edilen pürüzlülük verileri göz önünde bulundurularak, gevrek yüzey özellikleri sergileyen kaplamalarda, aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile pürüzlülük değerlerinde artış gerçekleştiği ifade edilmiştir. Şekil 4.52’de verilen sonuçlar mikroyapı incelemeleri ile uyum içerisindedir (Şekil 4.24, Şekil 4.27, Şekil 4.30 ve Şekil 4.33).

Şekil 4.53’de 30° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış NiCr kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



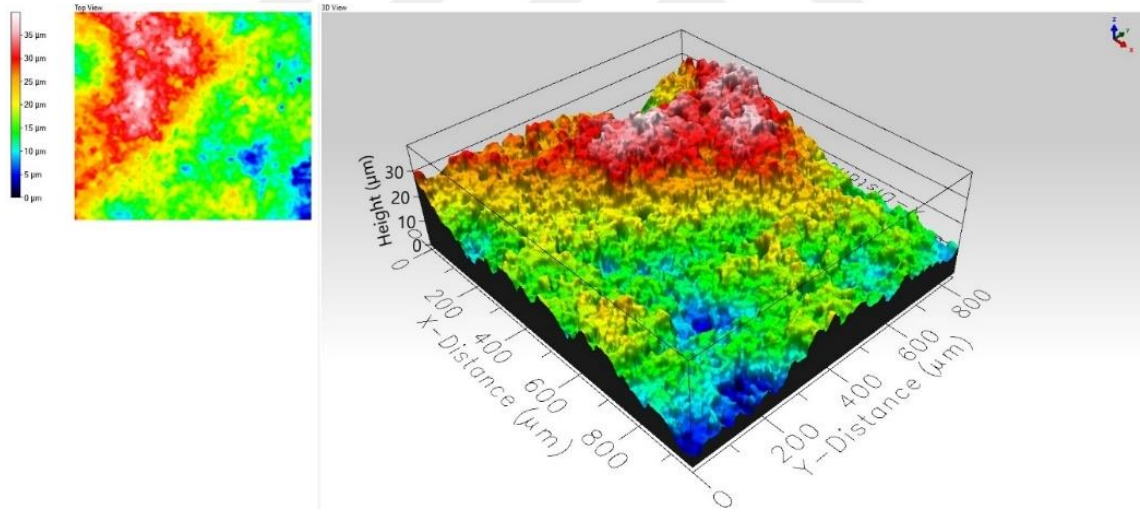
Şekil 4.53: NiCr kaplamanın 30° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.54’de 45° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış NiCr kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



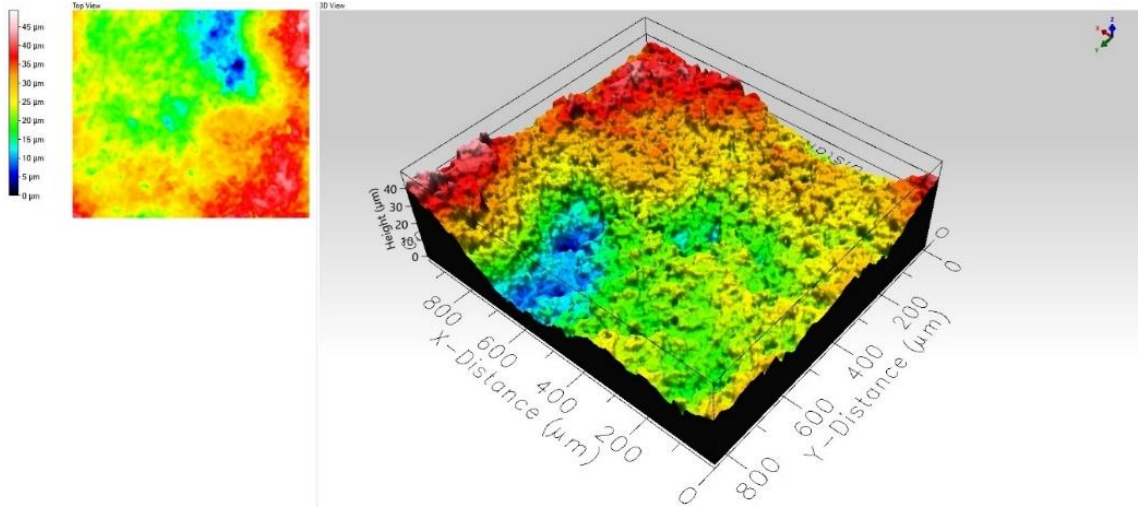
Şekil 4.54: NiCr kaplamanın 45° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.55’de 60° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış NiCr kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.

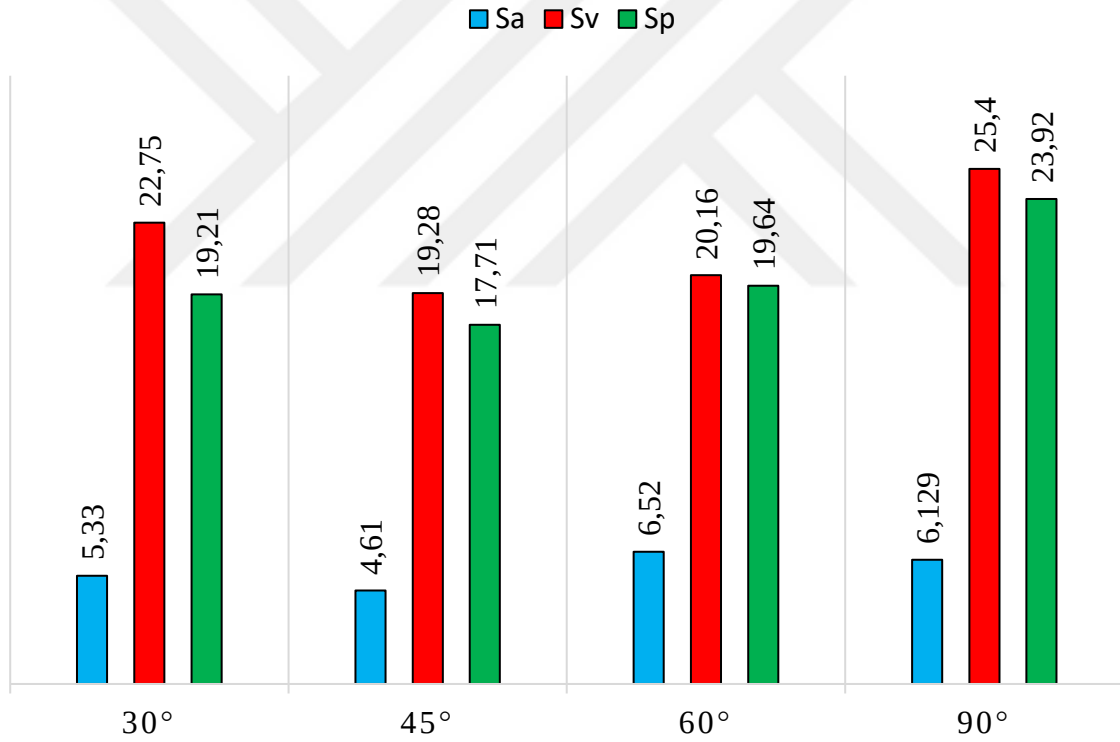


Şekil 4.55: NiCr kaplamanın 60° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü

Şekil 4.56’da 90° çarpma açısı ile erozyona uğratılmış NiCr kaplama numunesinin 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.56: NiCr kaplamanın 90° çarpma açısında gerçekleştirilen SPE sonrası 3D profilometre görüntüsü



Şekil 4.57: NiCr kaplamalı numunelerin alansal pürüzlülük grafikleri

Şekil 4.57’de verilen grafik; 1,5 bar püskürtme basıncında, farklı çarpma açılarında ve iki farklı partikül boyutu kullanılarak aşındırılan NiCr kaplamalı yüzeyin 3D profilometre cihazı ile elde edilen pürüzlülük değerlerini (Sa, Sv, Sp) ifade etmektedir. Aynı aşındırıcı partikül boyutu kullanılarak gerçekleştirilen (80 mesh partikül boyutu için 30° ve 45°, 50 mesh partikül boyutu için 60° ve 90°) SPE deneyleri sonrası bulgular incelendiğinde çarpma

açısının artması ile azalan alansal pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte en yüksek alansal pürüzlülük değerleri 60° çarpma açısı ve 50 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen SPE aşınma deney numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen pürüzlülük verileri göz önünde bulundurularak, sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin, aşındırıcı partikül boyutunun büyümesi ile pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği ifade edilmiştir. Şekil 4.57’de verilen sonuçlar mikroyapı incelemeleri ile uyum içerisinde (Şekil 4.36, Şekil 4.39, Şekil 4.42 ve Şekil 4.45).



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında, termal spreycaplama tekniklerinden olan HVOF prosesi ile 316L paslanmaz altlık malzeme üzerine üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların katı partikül erozyon aşınma deneyleri, farklı çarpma açılarında (30°- 45°- 60°- 90°), farklı partikül boyutlarında (50 mesh- 80 mesh), 1,5 bar püskürtme basıncında ve 3mm çapındaki nozul üzerinden kaplamalı malzemelerin yüzeyine aşındırıcı partikül püskürtülerek (10 mm uzaklıktan) ASTM G76-95 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen termal spreycaplamaların aşındırıcı partikül boyutu ve çarpma açısı etkisinde meydana gelen katı partikül erozyon aşınma davranışları, karakterizasyon teknikleri (SEM, elementel haritalama, XRD ve 3D profilometresi) kullanılarak incelenmiş ve açıklanmaya çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- 1) HVOF yöntemi ile 316L paslanmaz altlık malzeme üzerine WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- 2) Yüksek sertlik değerlerine sahip WC-Co kaplamalı numunelerin katı partikül erozyon davranışları incelendiğinde, genel olarak çarpma açısının artması ile artış gösteren erozyon oranları görülmektedir (Şekil 4.23). Bu sonuçlar, WC-Co kaplamaların SPE karşısında gevrek yüzey özellikleri sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.26a). Literatür incelemeleri ile örtüşen bu durum, gevrek/kırılgan yüzey özellikleri sergileyen kaplamaların, çarpma açısının artması ile erozyon oranlarında artış meydana geldiği şeklinde gözlemlenmiştir.
- 3) WC-Co kaplamalı numuneler ile gerçekleştirilen katı partikül erozyon deneylerinde en düşük aşınma oranının 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 30° çarpma açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu oranı sırasıyla 45°- 60°- 90°'lik çarpma açılarında artan erozyon oranları takip etmektedir. Aşındırıcı partikül boyutlarının küçülmesi ile erozyon oranlarında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. 60 ve 90°'lik çarpma açılarında gerçekleştirilen erozyon deneyleri, 30 ve 45°'lik çarpma açılarında gerçekleştirilen deneylere kıyasla daha küçük partikül boyutlarında (80 mesh) aşındırıcılar ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası elde edilen verilere göre, erozyon oranlarında nispeten düşük de olsa artış gözlemlenmektedir. Bu durum gevrek yüzey özellikleri sergileyen malzemelerin katı

partikül erozyon davranışlarında çarpma açısı etkisinin, aşındırıcı partikül boyutundan daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir.

4) WC-Co kaplamalı numunelerin katı partikül erozyon deneyleri sonrası SEM incelemelerinde, erozyon sonuçları ile arasında bağlantı olduğu görülmüştür. Genel olarak düşük çarpma açılarında (30° ve 45°) kesme ve düşük oranda kırılmaya rastlanırken (Şekil 4.24 ve Şekil 4.27) yüksek çarpma açılarında (60° ve 90°) ise yüksek oranda kaplamada kırılma şeklinde meydana gelen hasar mekanizmalarına (Şekil 4.30 ve Şekil 4.33) rastlanmıştır.

5) WC-Co kaplamalı numunelerin katı partikül erozyon deneyleri sonrasında elementel haritalama ve EDS analizleri erozyon oranları ve SEM incelemelerini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür. Kaplamanın yüzeyden kopması ile altlık malzeme yüzeyinin ortaya çıktığı karakterizasyon incelemelerinde görülmüştür (Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.31, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.37). Bunun yanı sıra kaplamalı yüzeye aşındırıcı partiküllerin gömülmesi olduğu EDS analizlerinde açıkça görülmektedir (Şekil 4.26, Şekil 4.29 ve Şekil 4.32). Ancak, 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerde kaplamalı yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesine rastlanmamıştır (Şekil 4.35).

6) WC-Co kaplamalı numunelerin, SPE deneyleri öncesi pürüzlülük değerlerinin, deneyler sonrası pürüzlülük değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. WC-Co kaplamalarda erozyon oranının azalması ile meydana gelen pürüzlülük değerlerinde de düşüş olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın büyük çarpma açılarında (60° ve 90°) gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası pürüzlülük değerlerinin küçük çarpma açılara (30° ve 45°) kıyasla daha yüksek oranda olduğu Şekil 4.36'da görülmektedir. Bu durum küçük boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin gevrek özellik sergileyen bileşenlerde yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olması şeklinde açıklanmıştır.

7) WC-Co kaplamalı numunelere göre düşük sertlik değerlerine sahip NiCr kaplamaların katı partikül erozyon davranışları incelendiğinde, genel olarak çarpma açısının artması ile ters orantılı şekilde azalan erozyon oranları görülmektedir (Şekil 4.23). Bu sonuçlar NiCr kaplamalı numunelerin katı partikül erozyonu karşısında sünek yüzey özellikleri sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.26a) . Literatür incelemeleri ile benzerlik gösteren bu

durum sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin, çarpma açısının artması ile erozyon oranlarında azalma meydana geldiğini göstermektedir.

8) NiCr kaplamalı numuneler ile gerçekleştirilen katı partikül erozyon deneylerinde en yüksek aşınma oranının 80 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 30° çarpma açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu oranı, 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 60° çarpma açısında gerçekleştirilen deney harici, sırasıyla ters orantılı azalacak şekilde 45° ve 90°'lik çarpma açılarındaki gerçekleştirilen deneyler takip etmektedir. Sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin aksine 60° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde meydana gelen erozyon oranı artışı, partikül boyutunun büyümesi ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın 50 mesh aşındırıcı partikül boyutu ve 90° çarpma açısında gerçekleştirilen deneyde gözlemlenen erozyon oranı azalması, sünek yüzey özellikleri sergileyen kaplamaların aşınmasında, çarpma açısı etkisinin, partikül boyutundan daha etkili bir parametre olduğunun göstergesidir.

9) NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri sonrası, genel olarak düşük çarpma açılarındaki (30° ve 45°) kesme hasarları (Şekil 4.36 ve Şekil 4.39) ile karşılaşılırken, yüksek çarpma açılarındaki (60° ve 90°) ise yüzey yorulması şeklinde gerçekleşen hasar mekanizmaları (Şekil 4.42 ve Şekil 4.45) ile karşılaşıldığı gözlenmiştir.

10) NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri sonrası, 60° çarpma açısında erozyona tabi tutulan kaplamanın yüzeyden bölgesel olarak kopması ile altlık malzemenin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). 60° çarpma açısında gözlemlenen bu durum partikül boyutunun 30° ve 45°'lik çarpma açılarına kıyasla büyük olması ile açıklanmıştır. Literatür incelemelerine göre, sünek yüzey özellikleri sergileyen bileşenlerin erozyon aşınmasına maruz kalması ile ilk olarak aşındırıcıların yüzeye gömüleceği, devam eden tekrarlı çarpmaların etkisi sonucunda öncelikle gömülen aşındırıcı partiküllerden başlanarak erozyon hasarlarının meydana geleceği ifade edilmektedir (Şekil 4.26b). NiCr kaplamalı numunelerin katı partikül erozyon deneyleri süresince çarpma açısının artması ile ters orantılı azalma meydana gelecek şekilde, kaplamalı yüzeye yüksek miktarda aşındırıcı partikül gömüldüğü EDS analizlerinde de gözlenmiştir (Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).

11) Şekil 4.20 ve Şekil 4.57 incelendiğinde NiCr kaplamalı numunelerin SPE deneyleri öncesi pürüzlülük değerlerinin, deneyler sonrası pürüzlülük değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. NiCr kaplamalı malzemenin erozyon oranının azalması ile meydana gelen pürüzlülük değerlerinde de düşüş olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın küçük çarpma açıları (30° ve 45°) gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası pürüzlülük değerlerinin, büyük çarpma açılarına (60° ve 90°) kıyasla daha düşük olduğu Şekil 4.37’de açıkça görülmektedir. Bu durum sünek yüzey özellikleri sergileyen kaplamalar için büyük boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olduğunu göstermektedir.

12) WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin katı partikül erozyon davranışları karşılaştırıldığında, daha düşük sertliğe sahip NiCr kaplamaların daha az erozyon oranlarına ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.23). Bu durum daha önce yukarıda açıklandığı gibi inkübasyon süreci ile ilişkilendirilebilir (Şekil 4.26b). SPE sonucu meydana gelen malzeme kaybının yanı sıra, yüzeye aşındırıcı partikül gömülmesi de söz konusudur. SPE deneyleri öncesi, WC-Co kaplamalı numunelerin, NiCr kaplamalı numunelere göre daha düşük pürüzlülük değerlerine sahip olduğu Şekil 4.20’de görülmektedir.

Aşınmaya dayanıklı kaplamaların katı partikül erozyon davranışlarının araştırılmasında kullanılan, HVOF yöntemi ile WC-Co ve NiCr kaplamalı numunelerin SPE sonucunda meydana gelen hasar mekanizmaları incelenerek kaplamaların kullanımını artırmayı hedefleyen deneysel çalışmalarda, sonuçların değerlendirilmesi ile elde edilen bulgular esas alınarak, gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- 1) Katı partikül erozyon deneylerinde, yeni tip kaplamaların uygulanması, farklı deney parametrelerinin ve/veya farklı termal sprej yöntemlerinin kullanılabilirliğinin araştırılması,
- 2) Katı partikül erozyon aşınmasında Taguchi ve Anova metotlarının kullanılması ile çok varyasyonlu sonuçlar elde edilebileceği gibi katı partikül erozyonuna etki eden parametreler arasındaki korelasyonun belirlenmesi,
- 3) NiCr kaplı malzemelerin katı partikül erozyonu karşısında sergiledikleri sünek yüzey özelliklerinin daha net açıklanabilmesi için çarpma sürelerinde çok varyasyonlu deney

parametrelerinin belirlenmesi (3 s, 5 s, 7 s, 10 s, 15 s), inkübasyon evresinin işleyişinin açıklanmasında,

4) SPE ile ilgili yeni tip uygulamalarda sıcaklık ortamının deneye yansıtılması, havacılık bileşenlerinin gerçek koşullarına daha uygun sonuçlar bulunmasına imkan sunacağı ön görülmektedir.



KAYNAKLAR

- Alqallaf, J., Ali, N., Teixeira, J. A., ve Addali, A. (2020). Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades-A review. In *Processes* (Vol. 8, Issue 8). MDPI AG.
- Amin, S., ve Panchal, H. (2016). A Review on Thermal Spray Coating Processes. In *International Journal of Current Trends in Engineering & Research* (Vol. 2).
- Bagci, M. (2016). Determination of solid particle erosion with Taguchi optimization approach of hybrid composite systems. *Tribology International*, 94, 336–345.
- Barkoula, N.-M., ve Karger-Kocsis, J. (2002). *Solid Particle Erosion of Unidirectional GF Reinforced EP Composites with Different Fiber/Matrix Adhesion*.
- Behera, A., ve Sahoo, A. K. (2020). Wear behaviour of Ni based superalloy: A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5638–5642.
- Berger, L. M. (2015). Application of hardmetals as thermal spray coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 49(1), 350–364.
- Bergmann, C. P., ve Vicenzi, J. (2011a). Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet. In *Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bergmann, C. P., ve Vicenzi, J. (2011b). Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet. In *Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*.
- Binal, G. (2023). Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750 °C. *Surface and Coatings Technology*, 454.
- Bremerstein, T., Potthoff, A., Michaelis, A., Schmiedel, C., Uhlmann, E., Blug, B., ve Amann, T. (2015). Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results. *Wear*, 342–343, 44–51.
- Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D. E., ve Moscatelli, A. (2016). Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. *Wear*, 348–349, 43–51.
- Chen, L., Bobzin, K., Zhou, Z., Zhao, L., Öte, M., Königstein, T., Tan, Z., ve He, D. (2019). Wear behavior of HVOF-sprayed Al_{0.6}TiCrFeCoNi high entropy alloy coatings at different temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 358, 215–222.
- Chen, Y., Zhao, X., ve Xiao, P. (2018). Effect of microstructure on early oxidation of MCrAlY coatings. *Acta Materialia*, 159, 150–162.

- Chen, Y., Zhao, X., ve Xiao, P. (2020). Effect of surface curvature on oxidation of a MCrAlY coating. *Corrosion Science*, 163, 108256.
- Clark, H. M. I., ve Wong, K. K. (1995). Impact angle, particle energy and mass loss in erosion by dilute slurries. *Wear*, 186–187(PART 2), 454–464.
- Desale, G. R., Gandhi, B. K., ve Jain, S. C. (2009). Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063). *Wear*, 266(11–12), 1066–1071.
- Deshpande, P., Minfray, C., Dassenoy, F., Thiebaut, B., le Mogne, T., Vacher, B., ve Jarnias, F. (2018). Tribological behaviour of TiO₂ Atmospheric Plasma Spray (APS) coating under mixed and boundary lubrication conditions in presence of oil containing MoDTC. *Tribology International*, 118, 273–286.
- Dixit, S., Rodriguez, S., Jones, M. R., Buzby, P., Dixit, R., Argibay, N., DelRio, F. W., Lim, H. H., ve Fleming, D. (2022). Refractory High-Entropy Alloy Coatings for High-Temperature Aerospace and Energy Applications. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 31, Issue 4, pp. 1021–1031). Springer.
- Doleker, K. M., Ozgurluk, Y., Ozkan, D., Mesekiran, N., ve Karaoglanli, A. C. (2018). Comparison of microstructures and oxidation behaviors of Ytria And magnesia stabilized zirconia thermal barrier coatings (TBC). *Materiali in Tehnologije*, 52(3), 315–322.
- Doleker, K. M., Ozgurluk, Y., Parlakyigit, A. S., Ozkan, D., Gulmez, T., ve Karaoglanli, A. C. (2018). Oxidation Behavior of NiCr/YSZ Thermal Barrier Coatings (TBCs). *Open Chemistry*, 16(1), 876–881.
- Donachie, M. J., ve Donachie, S. James. (2002). *Superalloys : a technical guide*. ASM International.
- Donadei, V., Koivuluoto, H., Sarlin, E., ve Vuoristo, P. (2020). Icephobic Behaviour and Thermal Stability of Flame-Sprayed Polyethylene Coating: The Effect of Process Parameters. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(1–2), 241–254.
- Dorfman, M. R. (2018). Thermal Spray Coatings. *Handbook of Environmental Degradation Of Materials: Third Edition*, 469–488.
- Dosta, S., Robotti, M., Garcia-Segura, S., Brillas, E., Cano, I. G., ve Guilemany, J. M. (2016). Influence of atmospheric plasma spraying on the solar photoelectro-catalytic properties of TiO₂ coatings. *Applied Catalysis B: Environmental*, 189, 151–159.
- Erfanmanesh, M., Abdollah-Pour, H., Mohammadian-Semnani, H., ve Shoja-Razavi, R. (2018). Kinetics and oxidation behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co coatings. *Ceramics International*, 44(11), 12805–12814.
- Eswara, N., ve Wanhill, P. R. J. H. (n.d.). *Indian Institute of Metals Series Aerospace Materials and Material Technologies*

- Feng, C., Chen, D., Xu, M., Shen, C., Yang, L., ve Jiang, J. (2020). Study of Solid Particle Erosion Wear Resistance of WC–Co Cemented Carbide. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(2), 543–554.
- Garrido, B., Dosta, S., ve Cano, I. G. (2022). Bioactive glass coatings obtained by thermal spray: Current status and future challenges. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61(5), 516–530.
- Guzanová, A., Brezinová, J., Draganovská, D., ve Maruschak, P. O. (2019). Properties of coatings created by HVOF technology using micro-and nano-sized powder. *Koroze a Ochrana Materialu*, 63(2), 86–93.
- Hadavi, V., Arani, N. H., ve Papini, M. (2019a). Numerical and experimental investigations of particle embedment during the incubation period in the solid particle erosion of ductile materials. *Tribology International*, 129, 38–45.
- Hadavi, V., Arani, N. H., ve Papini, M. (2019b). Numerical and experimental investigations of particle embedment during the incubation period in the solid particle erosion of ductile materials. *Tribology International*, 129, 38–45.
- Han, D., Pan, Y., Niu, Y., Chen, Y., Qi, Z., Pan, X., Zheng, X., ve Chen, G. (2022). Isothermal oxidation resistance and microstructure evolution of VPS-TiAlCrY coating on TiAl single crystals at 1100–1200 °C. *Corrosion Science*, 208, 110664.
- Henao, J., Sotelo-Mazon, O., Giraldo-Betancur, A. L., Hincapie-Bedoya, J., Espinosa-Arbelaes, D. G., Poblano-Salas, C., Cuevas-Arteaga, C., Corona-Castuera, J., ve Martinez-Gomez, L. (2020). Study of HVOF-sprayed hydroxyapatite/titania graded coatings under in-vitro conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14002–14016.
- Jin, D., Yang, F., Zou, Z., Gu, L., Zhao, X., Guo, F., ve Xiao, P. (2016). A study of the zirconium alloy protection by Cr₃C₂–NiCr coating for nuclear reactor application. *Surface and Coatings Technology*, 287, 55–60.
- Jindal, C., Sidhu, B. S., Kumar, P., ve Sidhu, H. S. (2022). Performance of hardfaced/heat treated materials under solid particle erosion: A systematic literature review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 629–639.
- J.R. Davis & Associates., ve ASM International. Thermal Spray Society Training Committee. (2004). *Handbook of thermal spray technology*. ASM International.
- Kalácska, Á., de Baets, P., Fauconnier, D., Schramm, F., Frerichs, L., ve Sukumaran, J. (2020). Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines. *Wear*, 442–443, 203107.
- Karaoglanli, A. C., Oge, M., Doleker, K. M., ve Hotamis, M. (2017). Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition. *Surface and Coatings Technology*, 318, 299–308.

- Karaoglanli, A. C., Ozgurluk, Y., ve Doleker, K. M. (2020). Comparison of microstructure and oxidation behavior of CoNiCrAlY coatings produced by APS, SSAPS, D-gun, HVOF and CGDS techniques. *Vacuum*, 180, 109609.
- Karimi, S., Shirazi, S. A., ve McLaury, B. S. (2017). Predicting fine particle erosion utilizing computational fluid dynamics. *Wear*, 376–377, 1130–1137.
- Kilic, M., Ozkan, D., Gok, M. S., ve Karaoglanli, A. C. (2020). Room-and high-temperature wear resistance of mcraly coatings deposited by detonation gun (D-gun) and supersonic plasma spraying (ssps) techniques. *Coatings*, 10(11), 1–12.
- Kleis, I., ve Kulu, P. (2008). Solid particle erosion: Occurrence, prediction and control. In *Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control*. Springer London.
- Kovářík, O., Haušild, P., Siegl, J., Chráska, T., Matějček, J., Pala, Z., ve Boulos, M. (2015). The influence of substrate temperature on properties of APS and VPS W coatings. *Surface and Coatings Technology*, 268, 7–14.
- KUANG, W., MIAO, Q., DING, W., ZHAO, Y., ZHAO, B., WEN, X., ve LI, S. (2022). Fretting wear behaviour of machined layer of nickel-based superalloy produced by creep-feed profile grinding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(10), 401–411.
- Kumar, H., Chittosiya, C., ve Shukla, N. (2018). HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 5).
- Kumar, S., ve Kumar, R. (2021). Influence of processing conditions on the properties of thermal sprayed coating: a review. In *Surface Engineering* (Vol. 37, Issue 11, pp. 1339–1372). Taylor and Francis Ltd.
- Kuo, T. Y., Chin, W. H., Chien, C. S., ve Hsieh, Y. H. (2019). Mechanical and biological properties of graded porous tantalum coatings deposited on titanium alloy implants by vacuum plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 372, 399–409.
- Li, X., Zhai, H., Li, W., Cui, S., Ning, W., ve Qiu, X. (2020). Dry sliding wear behaviors of Fe-based amorphous metallic coating synthesized by D-gun spray. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 537.
- Lijesh, K. P., Khonsari, M. M., ve Kailas, S. v. (2018). On the integrated degradation coefficient for adhesive wear: A thermodynamic approach. *Wear*, 408–409, 138–150.
- Lin, L., Li, G. L., Wang, H. D., Kang, J. J., Xu, Z. L., ve Wang, H. J. (2015). Structure and wear behavior of NiCr-Cr 3 C 2 coatings sprayed by supersonic plasma spraying and high velocity oxy-fuel technologies. *Applied Surface Science*, 356, 383–390.
- Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Yao, M. X., ve Collier, R. (2015). Effects of molybdenum content on the wear/erosion and corrosion performance of low-carbon Stellite alloys. *Materials & Design*, 78, 95–106.

- Liu, Y. C., Lin, G. S., Wang, J. Y., Cheng, C. S., Yang, Y. C., Lee, B. S., ve Tung, K. L. (2018). Synthesis and characterization of porous hydroxyapatite coatings deposited on titanium by flame spraying. *Surface and Coatings Technology*, 349, 357–363.
- Ludwig, G. A., Malfatti, C. F., Schroeder, R. M., Ferrari, V. Z., ve Muller, I. L. (2019). WC10Co4Cr coatings deposited by HVOF on martensitic stainless steel for use in hydraulic turbines: Resistance to corrosion and slurry erosion. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124918.
- Madah, F., Dehghanian, C., ve Amadeh, A. A. (2015). Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni–B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 282, 6–15.
- Maher, M., Iraola-Arregui, I., ben Youcef, H., Rhouta, B., ve Trabadelo, V. (2022). The synergistic effect of wear-corrosion in stainless steels: A review. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1975–1990.
- Mathapati, M., Ramesh, M. R., ve Doddamani, M. (2017). High temperature erosion behavior of plasma sprayed NiCrAlY/WC-Co/cenosphere coating. *Surface and Coatings Technology*, 325, 98–106.
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., Berndt, C. C., Kottada, R. S., ve Ang, A. S. M. (2020a). Thermal Spray High-Entropy Alloy Coatings: A Review. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 29, Issue 5, pp. 857–893). Springer.
- Meghwal, A., Anupam, A., Murty, B. S., Berndt, C. C., Kottada, R. S., ve Ang, A. S. M. (2020b). Thermal Spray High-Entropy Alloy Coatings: A Review. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 29, Issue 5, pp. 857–893). Springer.
- Menapace, C., Mancini, A., Federici, M., Straffellini, G., ve Gialanella, S. (2020). Characterization of airborne wear debris produced by brake pads pressed against HVOF-coated discs. *Friction*, 8(2), 421–432.
- Mohanty, D., Kar, S., Paul, S., ve Bandyopadhyay, P. P. (2018). Carbon nanotube reinforced HVOF sprayed WC-Co coating. *Materials & Design*, 156, 340–350.
- Noon, A. A., ve Kim, M. H. (2016). Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow. *Wear*, 364–365, 103–111.
- Odhiambo, J. G., Li, W. G., Zhao, Y. T., ve Li, C. L. (2019). Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings. *Coatings*, 9(7).
- Ozgurluk, Y. (2022). Investigation of oxidation and hot corrosion behavior of molybdenum coatings produced by high-velocity oxy-fuel coating method. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128641.
- ÖZKAN, D. (2021). MCrAlY İçerikli Bağ Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Mikroyapısal Özelliklerinin ve İzotermal Oksidasyon Davranışının İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*.

- Ozkan, D. (2023). Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings. *Surface and Coatings Technology*, 457.
- Ozkan, D., ve Karaoglanli, A. C. (2021). High entropy alloys: Production, properties and utilization areas. In *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* (Vol. 8, Issue 1, pp. 164–181). TUBITAK.
- Parlakıyigit, A. S., Ozkan, D., Oge, M., Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Gulmez, T., ve Karaoglanli, A. C. (2020). Formation and growth behavior of TGO layer in TBCs with HVOF sprayed NiCr bond coat. *Emerging Materials Research*, 9(2), 451–459.
- Patnaik, A., Satapathy, A., Chand, N., Barkoula, N. M., ve Biswas, S. (2010a). Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review. *Wear*, 268(1), 249–263.
- Patnaik, A., Satapathy, A., Chand, N., Barkoula, N. M., ve Biswas, S. (2010b). Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review. *Wear*, 268(1), 249–263.
- Pawłowski, Lech. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. Wiley.
- Peng, W., ve Cao, X. (2016). Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid–solid flow. *Powder Technology*, 294, 266–279.
- Praveen, A. S., Sarangan, J., Suresh, S., ve Channabasappa, B. H. (2016). Optimization and erosion wear response of NiCrSiB/WC–Co HVOF coating using Taguchi method. *Ceramics International*, 42(1), 1094–1104.
- Qiu, N., Wang, L., Wu, S., ve Likhachev, D. S. (2015). Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings. *Engineering Failure Analysis*, 55, 208–223.
- Ramesh, M. R., Prakash, S., Nath, S. K., Sapra, P. K., ve Venkataraman, B. (2010). Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings. *Wear*, 269(3–4), 197–205.
- Ramki, C., ve Ezhil Vizhi, R. (2018). Study on the mechanical properties of potassium sodium hydroxide borate hydrate (KSB) single crystals by using Vickers microhardness tester. *Materials Letters*, 215, 165–168.
- Rasool, G., Mridha, S., ve Stack, M. M. (2015). Mapping wear mechanisms of TiC/Ti composite coatings. *Wear*, 328–329, 498–508.
- Reddy, G. M. S., Ramesh, S., Anne, G., Ramesh, M. R., Rao, T. N., ve Patil, P. (2022). Solid Particle Erosion Behaviour of Plasma-Sprayed (WC–Co)/(Cr₃C₂–NiCr) Coatings. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 8(2).
- Robitaille, F., Yandouzi, M., Hind, S., ve Jodoin, B. (2009). Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 203(19), 2954–2960.

- Sadeghi, E., Markocsan, N., ve Joshi, S. (2019). Advances in Corrosion-Resistant Thermal Spray Coatings for Renewable Energy Power Plants. Part I: Effect of Composition and Microstructure. In *Journal of Thermal Spray Technology* (Vol. 28, Issue 8, pp. 1749–1788). Springer.
- Sadeghimeresht, E., Markocsan, N., Nylén, P., ve Björklund, S. (2016). Corrosion performance of bi-layer Ni/Cr₂C₃-NiCr HVOF thermal spray coating. *Applied Surface Science*, 369, 470–481.
- Salmaliyan, M., Malek Ghaeni, F., 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.
- Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., ve Prakash, S. (2007). Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(2), 232–238.
- Sidhu, T. S., Prakash, S., ve Agrawal, R. D. (2006a). Characterizations and hot corrosion resistance of Cr₃C₂-NiCr coating on Ni-base superalloys in an aggressive environment. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 811–816.
- Sidhu, T. S., Prakash, S., ve Agrawal, R. D. (2006b). Characterizations and hot corrosion resistance of Cr₃C₂-NiCr coating on Ni-base superalloys in an aggressive environment. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 811–816.
- Singh, J., Kumar, S., ve Mohapatra, S. K. (2019). Erosion wear performance of Ni-Cr-O and NiCrBSiFe-WC(Co) composite coatings deposited by HVOF technique. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(4), 610–619.
- Singh, P. K., ve Mishra, S. B. (2020). Studies on solid particle erosion behaviour of D-Gun sprayed WC-Co, Stellite 6 and Stellite 21 coatings on SAE213-T12 boiler steel at 400 °C temperature. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125353.
- Szymański, K., Hernas, A., Moskal, G., ve Myalska, H. (2015). Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers - A review. *Surface and Coatings Technology*, 268, 153–164.
- Tailor, S., Modi, A., ve Modi, S. C. (2019). Thermally Sprayed Thin Copper Coatings by W-HVOF. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(1–2), 273–282.
- Viscusi, A., Astarita, A., Gatta, R. della, & Rubino, F. (2019). A perspective review on the bonding mechanisms in cold gas dynamic spray. In *Surface Engineering* (Vol. 35, Issue 9, pp. 743–771). Taylor and Francis Ltd.
- Wang, Q., Luo, S., Wang, S., Wang, H., ve Ramachandran, C. S. (2019). Wear, erosion and corrosion resistance of HVOF-sprayed WC and Cr₃C₂ based coatings for electrolytic hard chrome replacement. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 81, 242–252.
- Wang, Y. F., ve Yang, Z. G. (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, 265(5–6), 871–878.

- Xi, H. heng, He, P. fei, Wang, H. dou, Liu, M., Chen, S. ying, Xing, Z. guo, Ma, G. zheng, ve Lv, Z. lin. (2020). Microstructure and mechanical properties of Mo coating deposited by supersonic plasma spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86.
- Xin, L., Lu, Y., ve Shoji, T. (2017). The role of material transfer in fretting wear behavior and mechanism of Alloy 690TT mated with Type 304 stainless steel. *Materials Characterization*, 130, 250–259.
- Yasir, M., Lenggo Ginta, T., Ariwahjoedi, B., Alkali, A. U., ve Danish, M. (2016). *EFFECT OF CUTTING SPEED AND FEED RATE ON SURFACE ROUGHNESS OF AISI 316L SS USING END-MILLING*. 11(4).
- Yu, J., Kim, D., Ha, K., Jeon, J. B., ve Lee, W. (2020). Strong feature size dependence of tensile properties and its microstructural origin in selectively laser melted 316L stainless steel. *Materials Letters*, 275.
- Zahedi, P., Parvande, S., Asgharpour, A., McLaury, B. S., Shirazi, S. A., ve McKinney, B. A. (2018). Random forest regression prediction of solid particle Erosion in elbows. *Powder Technology*, 338, 983–992.

ÖZGEÇMİŞ

