

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HVOF İLE YAPILAN WC-CO ESASLI
KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet İPEK

Enstitü Anabilim Dalı

**: METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı

: Doç. Dr. Yıldız YARALI ÖZBEK

Ocak 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HVOF İLE YAPILAN WC-CO ESASLI
KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

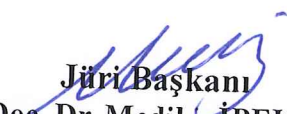
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet İPEK

Enstitü Anabilim Dalı

**: METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 02.01.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

 **Jüri Başkanı**
Doç. Dr. Mediha İPEK

 **Üye**
Doç. Dr. Yıldız Yarah ÖZBEK

 **Üye**
Doç. Dr. Zafer BARLAS

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

02.01.2019

Ahmet İPEK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması esnasında, bana her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen; başta danışman hocam Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Yıldız Yaralı ÖZBEK'e teşekkür ederim.

Deney çalışmaları ile ilgili süreçte destek veren Araştırma Görevlisi Sayın Eray ABAKAY'a, Doktora Öğrencisi Sayın Bilgehan GÜVEN, laboratuvar teknisyeni Sayın Ersan DEMİR ve Erkut TAŞ'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım süresince imkânlarından faydalanmış olduğum Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne ve değerli hocalarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmam süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
BÖLÜM 2.	
YÜZEY MÜHENDİSLİĞİ	3
2.1. Yüzey kaplama tekniklerinin sınıflandırılması.....	4
2.1.1. Alevle sprej kaplama metodu	5
2.1.2. Atmosferik plazma sprej metodu	6
2.1.3. Ark sprej metodu	7
2.1.4. Detonasyon püskürtme (D-Gun)	7
2.1.5. Soğuk gaz sprej metodu	8
2.1.6. Vakum plazma sprej metodu	9
2.1.7. Soğuk gaz sprej metodu	9
2.1.8. Kontrollü atmosfer plazma sprej metodu	10
2.1.9. Yüksek hızda oksijen yakıt sprejleme (HVOF)	11
2.1.9.1. HVOF prosesi.....	13
BÖLÜM 3.	
AŞINMA	15
3.1. Aşınma Modelleri ile Aşınma Yöntemlerinin Sınıflandırılması	16
3.1.1. Abrasif aşınma	17

3.1.2.Adhezif aşınma.....	17
3.1.3.Yüzey yorulması	17
3.1.4. Eroziyon aşınma.....	18
BÖLÜM 4.	
304 PASLANMAZ ÇELİĞİ	20
4.1. Genel özellikler (304)	20
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
5.1. Deneyin Amacı.....	22
5.2. Kaplama Süreci	22
5.3. Metalografik Çalışmalar	25
5.4. Optik Çalışmalar	25
5.5. Stereo Görüntüleri.....	25
5.6. Sertlik Ölçümleri.....	25
5.7. X-Işınları Analizleri	26
5.8. Tarayıcı Elektron Mikroskopu (SEM)	26
5.9. Aşınma Deneyleri	26
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
6.1. Optik Mikroskop Sonuçları.....	28
6.2. Stereo Görüntü Sonuçları.....	35
6.3. Mikro sertlik Sonuçları	36
6.4. XRD Analiz Sonuçları	38
6.5. SEM Görüntüleri ve EDS Analizi.....	41
6.6. Aşınma Deneyi Sonuçları	48
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	86
7.1. Giriş	86

7.2. Öneri	88
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	93



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
APS	: Atmosferik Plazma Sprey
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
D-GUN	: Detonasyon Püskürtme
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi Yakıt
HV	: Vickers Sertliği
İDDB	: İyon Demeti Biriktirme Yöntemi
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
μ	: Mikron, Sürtünme Katsayısı
μm	: Mikrometre
OM	: Optik Mikroskop
Θ	: Theta
Ra	: Kaplama Yüzey Pürüzlülük Değeri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
VPS	: Vakumlu Plazma Püskürtme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yüzey kaplama tekniklerinin genel sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2. Tel ile gerçekleştirilen alevle püskürtme sisteminin şematik görünüşü.....	5
Şekil 2.3. Atmosferik Plazma Sprey Metodunun şematik görüntüsü.....	6
Şekil 2.4. Termal ark sprej sistemi işleyişi	7
Şekil 2.5. Detonasyon püskürtme sisteminin şematik görüntüsü.....	8
Şekil 2.6. Soğuk sprej metodunun işleyişinin gösterilmesi.....	8
Şekil 2.7. Vakum plazma sprej metodunun gösterimi.....	9
Şekil 2.8. Soğuk sprej metodu çalışma prensibi.....	10
Şekil 2.9. Kontrollü atmosferik plazma sprej metodunun çalışma prensibi.....	11
Şekil 2.10. HVOF prosesinin çalışma prensibi.....	14
Şekil 2.11. HVOF prosesi uygulaması.....	14
Şekil 3.1. Mekanik aşınma proseslerinin sınıflandırılması.....	15
Şekil 3.2. Tribo sistemin elemanlarının şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.3. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.4. Kılavuz kanadına ait bir erozif aşınma örneği.....	18
Şekil 5.1. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazı.....	26
Şekil 5.2. ASTM G133 standardına uygun aşınma cihazı.....	27
Şekil 6.1. HVOF kaplaması yapılan numunelerde nozul mesafesine göre kaplama kalınlığı değişimi.....	29
Şekil 6.2. HVOF kaplaması yapılan numunelerde paso sayısına göre kaplama kalınlığı değişimi	30
Şekil 6.3. Kaplama sonrası elde edilen z1 (a), z2 (b), z3 (c) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	31
Şekil 6.4. Kaplama sonrası elde edilen z4 (d), z5 (e), z6 (f) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	32
Şekil 6.5. Kaplama sonrası elde edilen z7 (g), z8 (h), z9 (i) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	33
Şekil 6.6. Kaplama sonrası elde edilen z10 (j), z11 (k), z12 (l) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.....	34

Şekil 6.7. 100 x büyütmede toz-1 numunelerine ait stereo görüntü.....	35
Şekil 6.8. 100 x büyütmede toz-2 numunelerine ait stereo görüntü.....	36
Şekil 6.9. HVOF kaplaması yapılan numunelerde nozul mesafesine göre sertlik değerlerinin değişimi.....	38
Şekil 6.10. HVOF kaplaması yapılan numunelerde paso sayısına göre sertlik değerlerinin değişimi.....	38
Şekil 6.11. Sulzer Metco 5810 ve Amdry 960 karışımı ile yapılan kaplama numunelerine ait (z1-z6) XRD analiz sonuçları.....	39
Şekil 6.12. Woka 3653 ve Amdry 960 toz karışımı ile kaplanan numunelere ait XRD analizi sonuçları.....	40
Şekil 6.14. HVOF kaplaması ile elde edilen z4 (d), z5 (e) ve z6 (f) numunelerine ait SEM görüntüleri.....	44
Şekil 6.15. HVOF kaplaması ile elde edilen z7 (g), z8 (h) ve z9 (i) numunelerine ait SEM görüntüleri.....	45
Şekil 6.16. HVOF kaplaması ile elde edilen z10 (j), z11 (k) ve z12 (l) numunelerine ait SEM görüntüleri.....	46
Şekil 6.17. Aşınma öncesi z5 numunesine ait SEM ve EDS analizleri.....	47
Şekil 6.18. Aşınma öncesi z8 numunesine ait SEM ve EDS analizleri.....	47
Şekil 6.19. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.....	51
Şekil 6.20. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.....	51
Şekil 6.21. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.....	52
Şekil 6.22. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.....	52
Şekil 6.23 5x büyütmede optik mikroskop ile alınan z8-3 no lu numuneye ait aşınma iz genişliği gösterimi.....	53
Şekil 6.24. 5x büyütmede optik mikroskop ile alınan z11-3 no lu numuneye ait aşınma iz genişliği gösterimi.....	53
Şekil 6.25. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.....	57
Şekil 6.26. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	57

Şekil 6.27. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	58
Şekil 6.28. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	58
Şekil 6.29. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	59
Şekil 6.30. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	59
Şekil 6.31. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	60
Şekil 6.32. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı- yol grafiği.....	60
Şekil 6.33. z1-1 (a), z1-2 (b), z1-3 (c) ve z1-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	62
Şekil 6.34. z2-1 (a), z2-2 (b), z2-3 (c) ve z2-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	63
Şekil 6.35. z3-1 (a), z3-2 (b), z3-3 (c) ve z3-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri	64
Şekil 6.36. z4-1 (a), z4-2 (b), z4-3 (c) ve z4-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	65
Şekil 6.37. z5-1 (a), z5-2 (b), z5-3 (c) ve z5-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	66
Şekil 6.38. z6-1 (a), z6-2 (b), z6-3 (c) ve z6-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	67
Şekil 6.39. z7-2 (a), z7-3 (b) ve z7-4 (c) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	68
Şekil 6.40. z8-1 (a), z8-2 (b), z8-3 (c) ve z8-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	69
Şekil 6.41. z9-2 (a), z9-3 (b) ve z9-4 (c) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	70
Şekil 6.42. z10-1 (a), z10-2 (b), z10-3 (c) ve z10-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	71
Şekil 6.43. z11-1 (a), z11-2 (b), z11-3 (c) ve z11-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	72

Şekil 6.44. z12-1 (a), z12-2 (b), z12-3 (c) ve z12-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	73
Şekil 6.45. Aşınma deneyi sonrası z1-1 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	74
Şekil 6.46. Aşınma deneyi sonrası z2-2 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	75
Şekil 6.47 Aşınma deneyi sonrası z3-3 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	76
Şekil 6.48. Aşınma deneyi sonrası z4-4 kaplama numunesine ait 7 farklı bölgedeki EDS analizi.....	77
Şekil 6.49. Aşınma deneyi sonrası z5-1 kaplama numunesine ait 6 farklı bölgedeki EDS analizi.....	78
Şekil 6.50. Aşınma deneyi sonrası z6-2 kaplama numunesine ait 6 farklı bölgedeki EDS analizi.....	79
Şekil 6.51. Aşınma deneyi sonrası z7-3 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	80
Şekil 6.52. Aşınma deneyi sonrası z8-4 kaplama numunesine ait 5 farklı bölgedeki EDS analizi.....	81
Şekil 6.53. Aşınma deneyi sonrası z9-4 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	82
Şekil 6.54. Aşınma deneyi sonrası z10-3 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	83
Şekil 6.55. Aşınma deneyi sonrası z11-2 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	84
Şekil 6.56. Aşınma deneyi sonrası z12-1 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. HVOF ve plazma termal sprey özelliklerinin karşılaştırılması.....	12
Tablo 4.1. AISI 304'ün mekanik özellikleri.....	20
Tablo 5.1. Kullanılan tozların kütlece oranları.....	23
Tablo 5.2. Numunelerin Nozul Mesafesi ve Kaplama Paso Sayısı.....	24
Tablo 5.3. Kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri.	24
Tablo 5.4. Kaplama işlemi öncesinde 304 paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim	24
Tablo 6.1. Kaplanan Numunelerin Kalınlıkları.....	29
Tablo 6.2. Kaplanmış numuneler ve altlık malzeme için farklı noktalardan alınan sertlik değerleri.	37
Tablo 6.3. Aşınma sürecinde kullanılan parametreler	48
Tablo 6.4. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.	49
Tablo 6.5. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.	49
Tablo 6.6. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.	49
Tablo 6.7. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.	50
Tablo 6.8. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.....	54
Tablo 6.9. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.....	54

Tablo 6.10. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.	54
Tablo 6.11. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.	55



ÖZET

Anahtar kelimeler: HVOF, Yüzey kaplama, Aşınma, 304 Paslanmaz çeliği

Bu tez çalışmasında 304 paslanmaz çeliğinin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. 304 paslanmaz çeliği endüstride yaygın olarak tercih edilen ve kullanılan paslanmaz çelik türlerindendir. Bu malzemede yüzey kaplaması yapılarak aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca farklı nozul mesafesi ve paso sayısının kaplama özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yüzey kaplama işleminde yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF) sprey yönteminden faydalanılarak iki farklı ticari toz karışımı kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Birinci bileşim olarak % 50 Sulzer Metko 5810 (wolfram karbür-kobalt) ve %50 Amdry 960 (nikel, krom ve alüminyum tozları) karışımı tercih edilmiştir. İkinci karışım ise %50 Woka 3653 (wolfram karbür-kobalt-krom karışımı) ve %50 Amdry 960 (nikel, krom ve alüminyum karışımından) meydana gelmiştir. Üretilen kaplama malzemesinden elde edilen aşınma, sertlik, mikro yapı, optik, stereo görüntüleri ve SEM analizleri detaylı olarak incelenmiştir. Aşınma testi, alümina (Al_2O_3) bilye ile ASTM G133 standardına uygun aşınma cihazında sabit yol, farklı yük ve hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonucunda kaplanan malzemelere ait optik, SEM görüntüleri incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

ANALYSIS OF WEAR BEHAVIOR OF HVOF SPRAYED WC-CO BASED COATINGS

SUMMARY

Keywords: HVOF, surface coating, abrasion, 304 stainless steel

In this thesis study, it is aimed to improve the surface properties of 304 stainless steel. 304 stainless steel is one of the most preferred and widely used stainless steel type in the industry. During the use of this material, it is aimed to improve the wear properties by surface coating. In addition, the effect of different nozzle distance and number of passes on the coating properties was investigated. In the coating process, two different commercial powder mixtures are used for coating with high speed oxy fuel (HVOF) spray method. The first method is 50% Sulzer Metco 5810 (wolfram carbide-cobalt) and 50% Amdry 960 (nickel, chromium, aluminum powders). The second content consists of a mixture of 50% Woka 3653 (wolfram carbide-cobalt-chromium) and 50% Amdry 960 (nickel, chromium, aluminum). By using these two different powder mixtures, the coating process was applied at different distances and with different transition numbers. Wear, hardness, microstructure, optical, stereo images and SEM analysis of the obtained coating material were examined in detail. Abrasion test was carried out with Alumina (Al_2O_3) ball in different loads and at different times by using ASTM G133 standarts. As a result of the abrasion test, the optical and SEM images of the coated materials were evaluated and the results were evaluated.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yüzey mühendisliği, aşınma sorunlarına çözüm için son yıllarda endüstride yaygın olarak yer bulmuştur. Aşınma, korozyon gibi problemler yüzey kaplama teknikleri ile büyük ölçüde azaltılabilir. Yüzey kaplamalar aşınma direncini artırmak, mekanik ve elektriksel özellikleri iyileştirmek, uzay, otomotiv, nükleer ve diğer mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Metal yüzeylerin kaplanması, kaplama ile metal arasında difüzyon oluşumu ve difüzyon oluşmadan kaplama ile altlık arasında mekanik etkileşim sonucu yapışma olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Plazma sprej yöntemi difüzyon olmadan gerçekleşen kaplama yöntemidir. Plazma sprej yönteminde kaplama uygulanacak yüzeye ergitilmiş partiküller hızla püskürtülür ve yüzeye çarpan partiküller hızla soğuyarak katılır. Plazma sprej kaplamaların yapısı yüzeye paralel olarak dizilir. Yüzeye dik bağlanmanın sağlanması için altlık yüzeyine pürüzlü hal aldırılır. Böylece kaplama işlemi sonucunda yüzey dalgalı hal alır [2].

Metalik parçanın çeşitli yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan kaplamaların biriktirilmesi için mevcut olan birçok termal püskürtme işlemi bulunmaktadır. Bunlardan, HVOF termal püskürtme prosesi, aşınmaya dirençli kaplamaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. HVOF, metalik veya metal olmayan malzemelerin bir kaplama oluşturmak amacıyla erimiş veya yarı erimiş halde ince bir şekilde malzeme yüzeyinde biriktirilmesi işlemidir. Kaplama malzemesi; toz, seramik çubuk, tel veya erimiş hallerde olabilir. HVOF yönteminde; kobalt, nikel veya krom partikülleri ve tungsten karbür veya krom karbür matrisi kullanılmaktadır. En yaygın iki karbür kaplama kombinasyonu WC-Co ve $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 'dir. WC-Co sermetlerinin CrC – NiCr kaplamalara göre daha iyi sertlik ve aşınma direncine sahip olması nedeniyle makine endüstrisinde kendi uygulamaları vardır [3],[4].

Kaplama işleminde altlık malzemesi olarak 304 paslanmaz çeliği kullanılmıştır. 304 paslanmaz çeliğinin kullanılmasındaki amaç hem 304 paslanmaz çeliğinin kaplama proseslerinde çok iyi bağlayıcılık özelliği göstermesi hem de endüstride yaygın olarak tercih edilmesi olarak açıklanabilir.

Bu tez çalışmasında, 304 paslanmaz çeliğinin yüzeyine HVOF yöntemi ile kaplamalar yapılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. 304 paslanmaz çeliği yüzeyine yapılan kaplamalar ile çeliğin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi ve nozul mesafesi ile paso sayısının kaplama özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Paso sayısı, bir saniyede 200 mm alanın taranması olarak tanımlanabilir. Kaplanmış malzemeye ait kaplama kalınlıkları ölçülerek kaplama kalınlıklarının sertlik ve aşınma üzerine etkileri araştırılmıştır. Kaplama yüzeyinden elde edilen aşınma öncesi ve sonrası makro ve mikroyapı görüntüleri kullanılarak kaplama hataları incelenmiştir. Elde edilen X- ışınları analizlerinden yapıda oluşan fazların tayini yapılmıştır. Aşınma testi öncesi ve sonrasında yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Aşınma testi sonucunda kaplanmış malzeme yüzeylerinin aşınma iz genişliği ölçülerek aşınma hacmi ve oranı elde edilmiştir. Aşınma testi sonrası yüzeyde meydana gelen değişimler elde edilen SEM görüntülerine göre yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2. YÜZEY MÜHENDİSLİĞİ

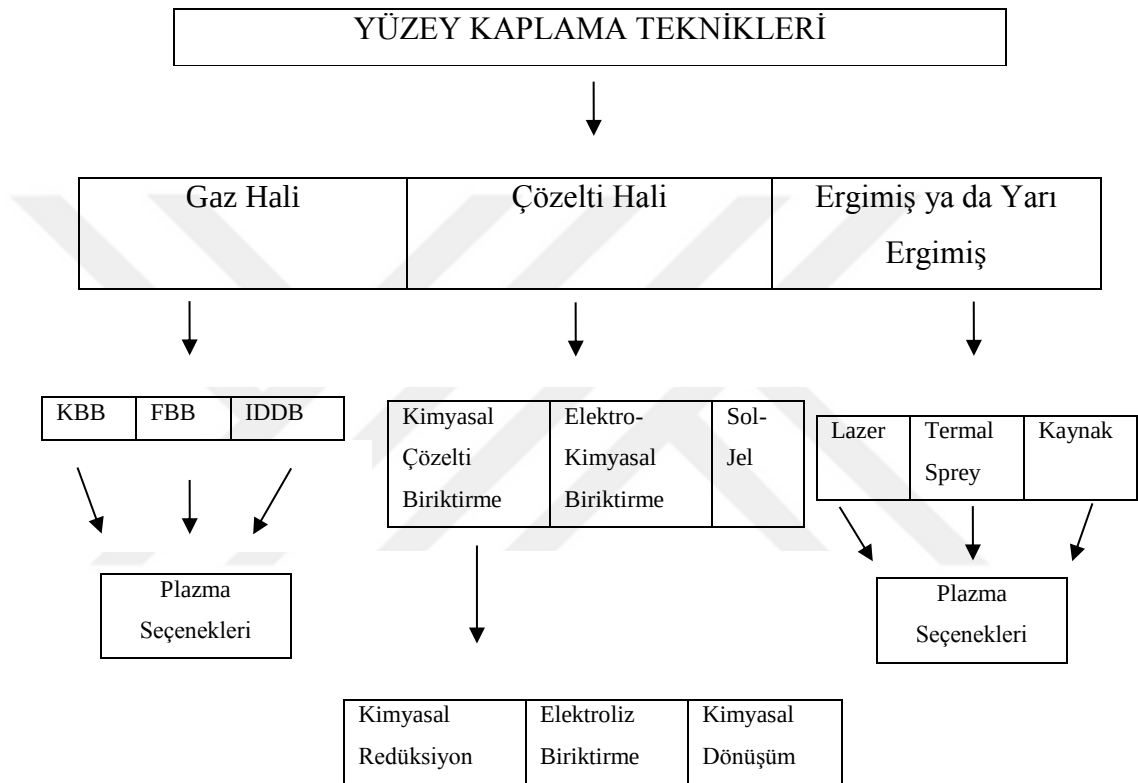
Yüzey mühendisliği, istenen yüzey özelliklerini ve davranışlarını gerçekleştirme yöntemlerini ele alan bilim dalı olarak tanımlanabilir. Herhangi bir bileşenin yüzeyi, özellik ve renk temelinde seçilebilir, ancak mühendislik bileşenleri genellikle bundan daha fazlasını gerektirir. Mühendislik bileşenleri, sert ortamlarda çeşitli koşullar altında, bazı işlevleri tamamen ve etkili bir şekilde yerine getirmelidir. Mühendislik ortamları yükü kimyasal ve fiziksel bozulma ile bileşenin yüzeyine birleştirerek karmaşık hal alır. Aşınan yüzeyin zarar görmesi bir bileşenin çalışmasını etkileyen bir olaydır. Talaşlı imalat sürecinde kullanılan kesme takımları bileşenin çalıştığı sert ortama örnek verilebilir. Kesme takımı aşırı yükleme, sürtünme ve bunların sonucunda yüksek sıcaklığa maruz kalarak yüzeyde aşınmaların oluşumuna neden olur. Yağlama ile sürtünme yüzeylerinin teması ve aşınması azalır ancak geleneksel yağlar düşük basınç, korozyon çevre, yüksek hız ve aşırı yüklemelere neden olabilir. Takım yüzeyini geliştirmek yalnız takım ömrünü arttırmakla kalmaz aynı zamanda işlenen parçanın bitmiş yüzeyini de geliştirir [5].

Yüzey mühendisliği süreçlerinde şu özellikler istenir;

- a. Sınır boyunca aşınma direncini geliştirmek,
- b. Oksidasyon ve sülfidasyon direncini geliştirmek,
- c. Aşınma direncini geliştirmek,
- d. Sürtünme nedeniyle kaybolan enerjiyi azaltmak,
- e. Mekanik özellikleri geliştirmek,
- f. Elektriksel veya elektronik özellikleri geliştirmek,
- g. Isı yalıtımını geliştirmek,
- h. Estetik görünümü geliştirmek [6].

2.1. Yüzey Kaplama Tekniklerinin Sınıflandırılması

Tribolojik kaplamalarda değişen hızlı teknoloji ile beraber son yıllarda morfoloji, kompozisyon, yapı ve adezyon gibi özellikleri kapsayan çalışmalarla daha önceden ulaşılamayan özelliklere ulaşılmıştır. Bu çalışmalar iyon ve plazma temelli çalışmalardır. Yüzey mühendisliğinde kaplama teknikleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Kaplama sürecinde kaplama kalınlığı ve kaplama sıcaklığı olmak üzere iki önemli karakteristik parametre vardır [7]. Termal sprej metotlarını genel olarak aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz;

- Alevle Sprej Kaplama Metodu
- Atmosferik Plazma Sprej Metodu
- Ark Sprej Metodu
- Detonasyon Püskürtme (D-Gun)
- Soğuk Gaz Sprej Metodu
- Vakum Plazma Sprej Metodu

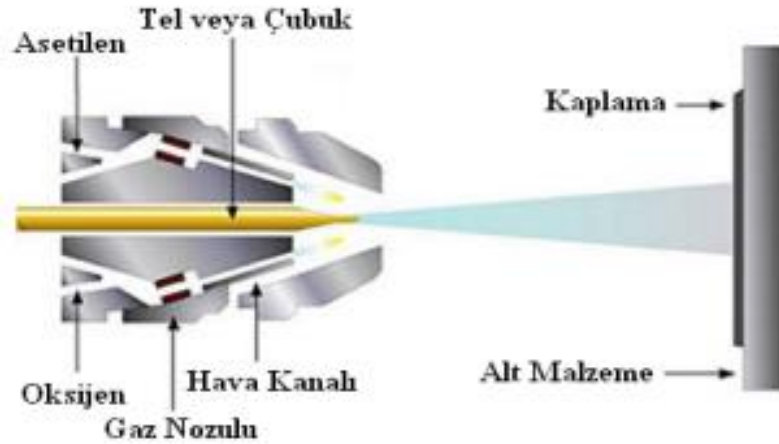
- g. Kontrollü Atmosfer Plazma Sprey Metodu
- h. Yüksek Hızda Oksi Yakıt Spreyleme (HVOF) [8].

2.1.1. Alevle spreyleme kaplama metodu

Alevle spreyleme kaplama metodu yüzeye kaplanacak olan tel veya tozların, nozul içinde ergitilip alt malzeme yüzeyine püskürtülmesi şeklinde olmaktadır. Püskürtülen telin ergimesi için yüksek sıcaklığa ihtiyaç olup bu sıcaklık oksijen ve yanıcı gaz alevi ile elde edilmektedir. Alevle püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda darbe direnci ve aşınma direnci özellikleri bakımından çok iyi sonuçlar elde edilir. Alevle püskürtme yöntemi ortam koşullarına göre alevle tel püskürtme ve alevle toz püskürtme olmak üzere iki farklı yöntemden oluşur.

2.1.2. Alevle tel püskürtme

Alevle tel püskürtme yönteminde tel makaradan tabancaya iletilerek kaplama işlemi gerçekleşir. Şekil 2.2.'de alevle tel püskürtme metodu gösterilmiştir [8].



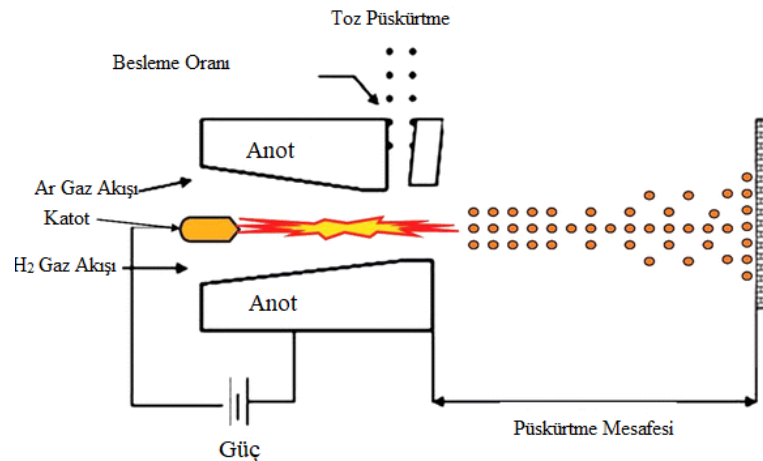
Şekil 2.2. Tel ile gerçekleştirilen alevle püskürtme sisteminin şematik görünüşü [9].

2.1.3. Alevle toz püskürtme

Bu yöntemde tozlar hava aracılığı ile asetilen ve oksijen gazının yanması sonucu oluşan alev içine püskürtülür. Tozların ergiyip malzeme yüzeyine püskürtülmesi sonucu kaplama tabakası elde edilmiş olur. Alev sprej yöntemi ekonomiktir ve geniş alanlarda kullanılabilir. Ayrıca alev sprej kaplama metal, seramik, polimer ve kompozit altlıklara uygulanabilir [9].

2.1.4. Atmosferik plazma sprej metodu

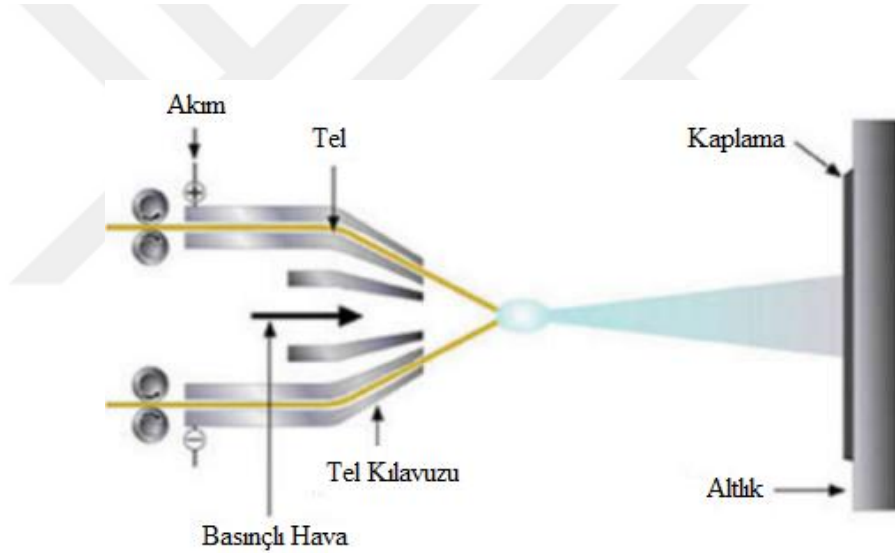
Atmosferik plazma sprej metodu, atmosferik basınç altında plazma püskürtme aparatı ile enerji kaynağından elektrik arkı oluşturup püskürtülen malzemenin ergitilmesini sağlayan termal sprej prosesidir. Plazma ısı kaynağı 8000 K gibi çok yüksek sıcaklıklara çıkabilir. Anot boyunca katodun etrafında bir gaz karışımı püskürtülür. Elektrik arkının gaz karışımı ile etkileşimi, gaz atomlarının ayrılmasını ve iyonize olmasını sağlayarak, plazma jeti veya plazma püskürmesinin oluşumuna yol açar. Toz, bir taşıyıcı gaz ile taşınır ve plazmaya enjekte edilir. Parçacıkların tamamı veya bir kısmı plazma jeti ile eritilir ve altlık yüzeyine doğru itilir. Parçacıklar yüzeye çarparak deforme olur ve hızla katılaşır. Kaplama yapısı, oksitlenmiş parçacıklar, poroziteler ve ergimemiş veya kısmen eritilmiş parçacıkları meydana getiren lameller ve homojen olmayan yapılardan oluşur. Şekil 2.3.'de atmosferik plazma sprej metodunun işleyişi verilmiştir [10].



Şekil 2.3: Atmosferik Plazma Sprej Metodunun şematik görüntüsü [11].

2.1.5. Ark sprey metodu

Ark sprey metodu 1900'lü yılların başında bulunsu da 1960'larda popüler olmuştur. Daha sonra metallerin korozyon direncini arttırmak için yoğun olarak kullanılmıştır [12]. Yüksek hızlı elektrik ark püskürtme, yeniden üretim mühendisliğinde kullanılan önemli bir tekniktir. Şekil 2.4.'de olduğu gibi bu teknikte elektrik akımları sürekli olarak iki tel üzerinden akar, tel uçları birbirine temas ederek kısa devre yapar ve bir elektrik arkı üretir. Sonuç olarak, tel uçları anında erir. Erimiş metal, sıkıştırılmış hava kullanılarak mikro damlacıklar halinde atomize edilir ve damlacıklar daha sonra bir kaplama oluşturmak için çok yüksek hızlarda bir iş parçası yüzeyine püskürtülür. Yüksek hızlı elektrik ark püskürtme yöntemi hatalı parçaların geri dönüştürülmesine, atık parçaların geri kazanımı ve yeniden üretilmesine yardımcı olur [13].

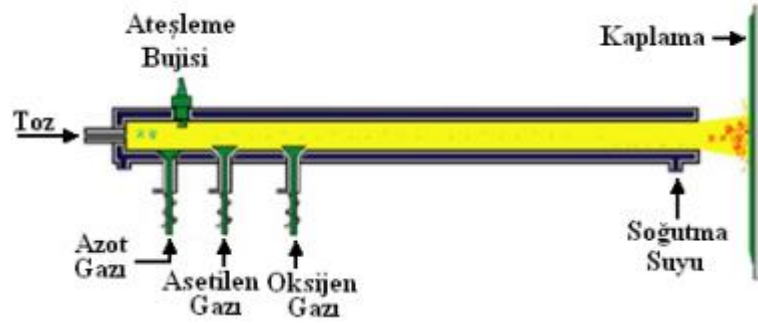


Şekil 2.4. Termal ark sprey sistemi işleyişi [12].

2.1.6. Detonasyon püskürtme (D-Gun)

Detonasyon püskürtme oksijen, asetilen ve azot gazlarının içinde tozlaştırılmış kaplama malzemesinin enjekte edilecek miktarının ölçüldüğü tabancalı bir sistemden oluşur. Oksijen ve asetilenin karışmasıyla oluşan elektrik kıvılcımları patlamayı meydana getirir. Bu işlem esnasında toz ısıtılır ve partiküller ivmelenir. Ergimiş partiküller parça yüzeyine çarparak istenilen kalınlıkta birikme işlemi oluşturulur.

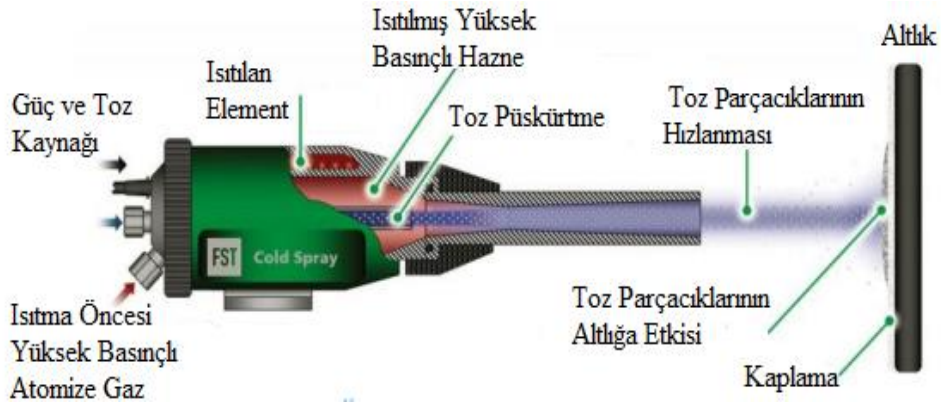
Metalik olmayan altlık malzemeler bu prosesle kaplanamazlar. Çünkü yüksek hızdaki gaz akışı yüksek erozyona neden olabilir. Şekil 2.5.'te sürecin işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Detonasyon püskürtme sisteminin şematik görüntüsü [9].

2.1.7. Soğuk gaz spray metodu

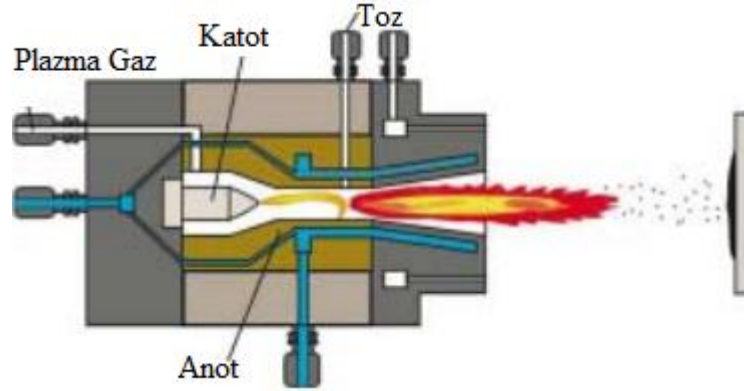
Soğuk gaz spray metodu 1980'lerin ortalarında A. Papyrin ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.6.'daki gibi metalik veya metalik olmayan malzemelerin düşük sıcaklıklarda ısıtılması ile 500-1200 m/s aralığında hızlandırılarak uygun gaz, spray parametreleri ve nozul tasarımına göre yüksek basınç altında hedef malzemeye yapışması sürecidir [14].



Şekil 2.6. Soğuk spray metodunun işleyişinin gösterilmesi [14].

2.1.8. Vakum plazma sprey metodu

Vakumlu plazma püskürtme (VPS), 10-100 μm arasındaki boyutlarda, ısıyla yumuşatılmış veya erimiş parçacıkların, düzleştirildiği ve katılaştığı bir alt-tabakaya doğru hızlandırıldığı nispeten yeni bir tekniktir. VPS kaplamalar genellikle diğer termal sprey kaplamalara göre daha yüksek yoğunluk gösterir. Termal plazmanın yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle, refrakterler, metaller ve seramikler gibi çok yüksek ergime noktalarına sahip malzemeler bu teknikle kaplanabilir. Şekil 2.7.'de görüldüğü üzere bu işlemde erimiş parçacıklar, hedef yüzeye çarpar ve kararlı bir yapı oluşturmak için hızlıca soğutulur. Katılma işlemi tamamlandıktan sonra mil çıkarılır ve işlem tamamlanır. VPS ayrıca, farklı materyalleri ayrı ağızlıklarla püskürterek çok katmanlı, işlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar ve kompozit malzemeler üretebilmektedir [15].

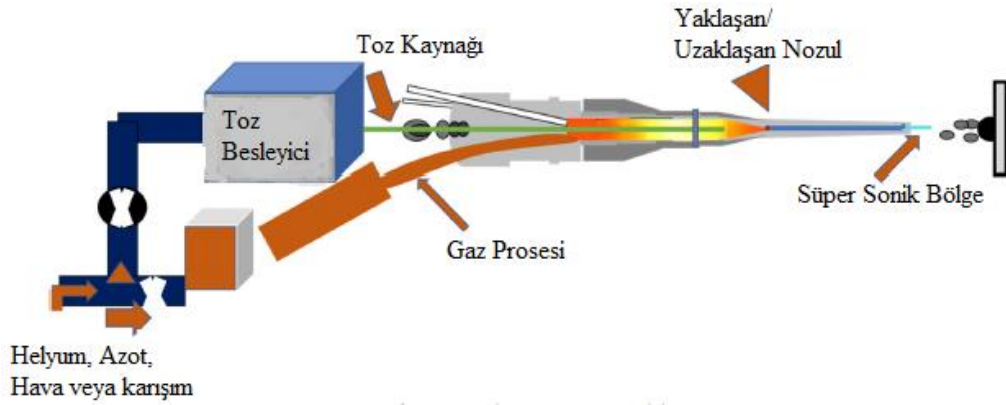


Şekil 2.7. Vakum plazma sprey metodunun gösterimi [15].

2.1.9. Soğuk gaz sprey metodu

Soğuk gaz sprey metodunda yüksek hızda (300-1200 m/s) gaz takviyesiyle 1-50 μm aralığındaki toz parçacıkları hızlandırılarak 25 mm mesafedeki altlık malzemesine püskürtülür. Bu parçacıkların kinetik enerjisi yüksek sıcaklıktan ziyade, plastik gerilme enerjisinin çarpışmadan korunmasına yardımcı olur. Bu durumda alt tabakanın sıcaklığı artarak malzemede yumuşama meydana gelir ve böylece sertleşme oranı azalır. Elde edilen çökeltide, yüksek sıcaklıkta oksidasyon, buharlaşma, ergime, kristalleşme, kalıntı gerilmeler ve gaz salınımı gibi eksiklikler görülecektir. Bu

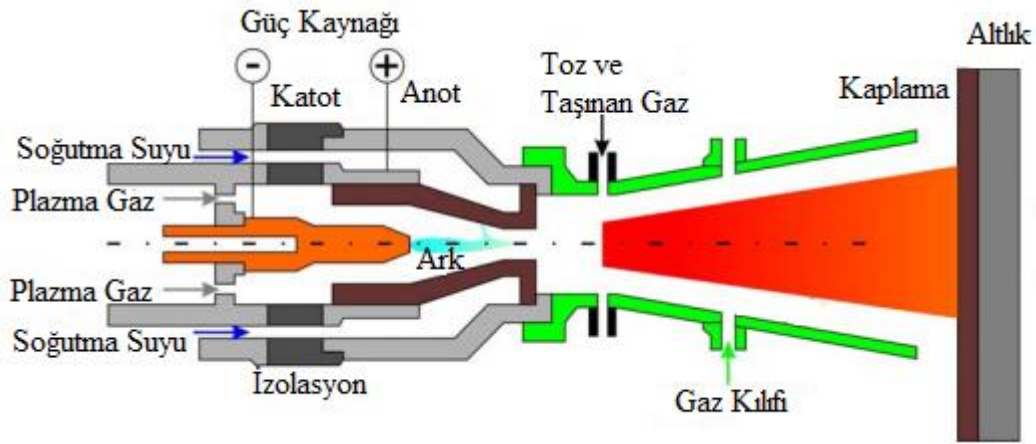
işlemede, toz partikülleri, malzemenin ergime noktasından daima daha düşük bir sıcaklıkta süpersonik ağız tarafından hızlandırılır, bu da katı halde bulunan partiküllerin kaplama tabakası oluşturmasını sağlar. Böylece tozlardan dolayı ergime ve katılaşma süreci olmaz. Soğuk gaz spray metodu çalışma prensibi Şekil 2.8.'de görüldüğü gibi basınçlı gaz (genellikle hava, nitrojen ve helyum) elektrik enerjisiyle 300-800 °C arasında değişen sıcaklıklara kadar ısıtılır ve daha sonra bir süpersonik gaz jeti oluşturmak için bir yaklaşan - uzaklaşan ağızlığı iletilir. Gaz genişlemesinin ardından, bazı durumlarda oda sıcaklığının altında bile olabilen bir sıcaklık düşüşü söz konusu olduğundan, işlem “Soğuk Gaz Spray Metodu” adını almıştır [16].



Şekil 2.8. Soğuk spray metodu çalışma prensibi [16].

2.1.10. Kontrollü atmosfer plazma spray metodu

Atmosferik plazma spray (APS) metodu, tozları düşük poroziteli yoğun, yapışkan ve homojen kaplamalar olarak depolamak için kullanılabilen çok yönlü bir yöntemdir. Plazma püskürtme sırasında, toz formundaki kaplama malzemesi eriyene kadar ısıtılır. Isıtılmış malzemenin, altlık malzemesi ile etkileşime geçmesi için yüksek hızlarda plazma ağızında parçacıklar veya damlacıklar biçiminde hareket ettirilir, burada poroziteler, mikro çatlaklar, ergimemiş parçacıklar gibi mikro kusurlar lamel istifini hızlı bir şekilde düzleştirip katılaştırılır. Bu kusurların bazıları açık ve bağlı, bazıları kapalı ve izole edilmiştir. Bu mikro kusurların varlığı nedeniyle, plazma püskürtmeli kaplama farklı bir mikroyapıya sahip olup kaplama öncesindeki malzemeden farklı özellik gösterir [17]. Şekil 2.9.'da sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Kontrollü atmosferik plazma sprey metodunun çalışma prensibi [8].

2.1.10.1. Yüksek hızda oksijen yakıt spreyleme (HVOF)

HVOF işleminde yanma yakıtı ve oksijen, püskürtme tozuyla birlikte yanma haznesine yönlendirilir. Gazların yanması sonucunda hazne yüksek ısı ve yüksek basınca sahip olur ve bu da gazların nozulden geçerek süpersonik akış oluşturmalarını sağlar. Toz parçacıkları, yanma haznesinden geçen alev sıcaklığı ve nozulden akması esnasında ergimektedir. Alev sıcaklığı, yakıt, yakıt gazı / oksijen oranı ve gaz basıncına bağlı olarak 2500°C-3200°C arasında değişir. HVOF işleminde, parçacıklar alev sıcaklığına ve malzemenin ergime noktasına bağlı olarak tamamen veya kısmen eriyebilir. Ergime derecesi, alev sıcaklığına ve parçacıkların alevi kapladığı bekleme süresine bağlıdır. Bu parametreler kaplamanın özelliklerini etkilemekte olup kontrollü olarak değiştirilebilir [18].

Kaplama performansı sadece malzemenin kendine has özellikleriyle değil, aynı zamanda termal etkiler sonucu malzeme özelliklerinde meydana gelen bozulma ile de ilgilidir. HVOF termal sprey kaplamalarının oluşumunu etkileyen temel faktörler; kullanılan püskürtme sistemi, hammadde özellikleri (bileşim, parçacık boyutu dağılımı, vb.), nozul tipi, yakıtlar, oksijen-yakıt oranı, püskürtme mesafesi ve toz besleme oranı gibi süreç parametreleridir. Sprey parçacıklarının sıcaklığını ve hızını değiştirmek için farklı püskürtme tabancaları, nozullar ve yakıtlar kullanılabilir. Daha yüksek sıcaklık daha fazla erimiş parçacık ve böylece daha yoğun bir kaplama yapısı üretir. Parçacık hızının artırılması ve parçacıkların daha düşük sıcaklıkta tutulmasıyla,

parçacıkların orijinal yapılarını ve kompozisyonlarını daha iyi muhafaza ederler (örneğin, nano yapı, uçucu elementler). Dahası, metalik parçacıkların oksidasyonu, alevin koruyucu etkisine, alevin kimyasına, daha kısa bekleme süresine ve daha düşük parçacık sıcaklığına bağlı olarak daha düşük olabilir. Altlık özellikleri ile birlikte parçacık hızı (v) ve parçacık sıcaklığı (T), ölçülebilen tabaka oluşumunu etkileyen ana parametrelerdir. Parçacık hızı ve sıcaklığı, mikroyapı kadar tabaka verimliliğini de etkiler [19].

2.1.10.2. HVOF ve plazma termal sprej karşılaştırılması

HVOF işlemi nispeten basittir ve kaplamanın yeniden tekrar edilebilirliğini sağlar. HVOF prosesi Tablo 2.1.'de görüldüğü gibi düşük oksit içeriği, gelişmiş aşınma direnci, kristallenebilirlik, düşük porozite ve yüksek bağ mukavemeti sağlar.

Tablo 2.1. HVOF ve plazma termal sprej özelliklerinin karşılaştırılması [20]

Özellik	HVOF	Plazma Sprej
Alev Sıcaklığı	3000 °C	11000 °C
Gaz Hızı	4 Mach	Sübsonik-1 Mach
Üfleç-Altık Mesafesi	130-350 mm	75-150 mm
Kaplama Açısı	45°-90°	60°-90 °
Kaplama Verimi	%75	%45

HVOF işleminin faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Plazma sprej ile karşılaştırıldığında daha düşük alev sıcaklığına sahiptir.
- Daha çevreci olduğu için daha çok tercih edilir.
- Kuvvetli sınırlı reaksiyonlar ve faz dönüşümlerine sahiptir.
- Altık malzemesine güçlü bir yapışma gösterir.
- Yüksek bağ mukavemetine sahiptir.
- Yüksek yoğunluk
- Diğer süreçlere göre daha düşük maliyete sahip olup kullanımı daha kolaydır.
- Yüksek türbülans nedeniyle daha düzgün ve verimli parçacık ısıtısına sahiptir.
- Plazma ve ark püskürtme işleminden daha kalın kaplamalar üretilebilir.

- j. Diğer işlemlere kıyasla daha düşük parçacık sıcaklığına sahiptir.
- k. Süreç otomatik olabilir.
- l. Pürüzsüz kaplanmış yüzey elde edilir.
- m. Mükemmel işlenmiş yüzey kalitesi gözlemlenir.

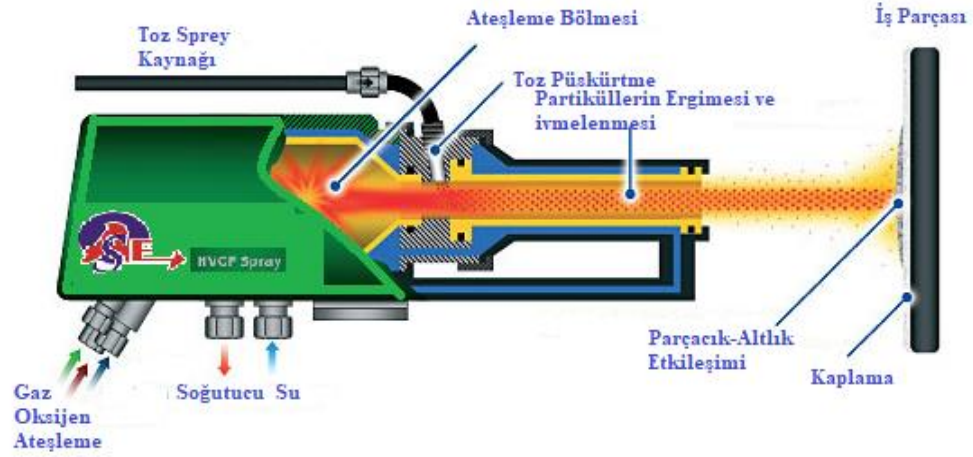
HVOF prosesinin diğer termal spreyci kaplamalara göre dezavantajlarını şu şekilde belirtebiliriz;

- a. HVOF sürecinde üretilen ısı çok yüksek olduğu için altlık malzemesinin aşırı ısınma ihtimali vardır. Altlık malzemesinin ideal sıcaklığa kadar soğutulmasına dikkat edilmesi gerekir. Püskürtme sırasında sıvı CO₂ veya hava kullanılarak soğutma yapılır.
- b. Yüksek poroziteye sahip kaplamaların üretilmesi için polyester vs. gibi yardımcı malzeme ilavesi gerekir. Bu durum HVOF ile Termal Bariyer Kaplamaların üretimini zorlaştırır [20].

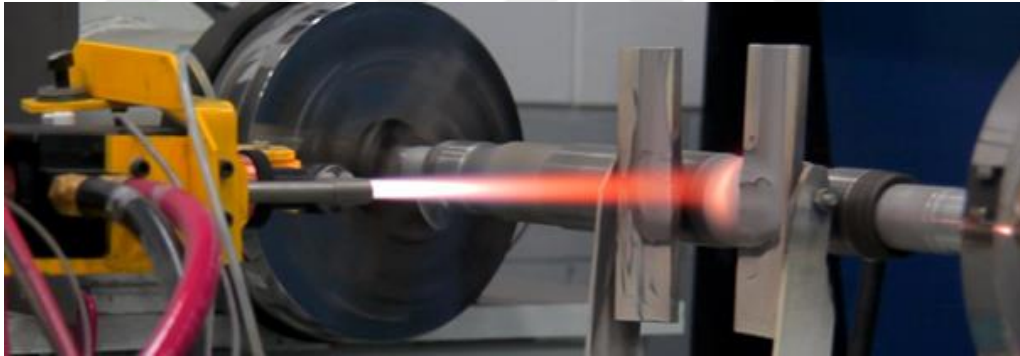
2.1.10.3. HVOF prosesi çalışma prensibi

HVOF prosesi, istenen kaplamaların oluşması için toz partiküllerinin eritilmesi ve hızlandırılması için termal ve kinetik enerjinin bir kombinasyonunun kullanılmasına dayanmaktadır. Karbon-hidrojen gazları (propan, propilen, asetilen) veya saf hidrojen gazı yakıt gazları olarak kullanılır. Gaz sıcaklığı yakıt gazı seçimine ve oksijen ile yakıt gazı debi oranına bağlıdır. Kaplanacak toz partikülleri, sıcak gaz akımı vasıtasıyla aksel olarak beslenir, eritilir ve kaplanacak iş parçasının yüzeyine itilir. Tabanca, karıştırma bölgesi, yanma bölgesi ve nozul olmak üzere üç bölümden oluşur. Operasyon esnasında gövde, hava veya su ile soğutulur. Yakıt ve oksijen, eş akselci jetler aracılığıyla karıştırılır ve bir alev veya harici ateşleyicinin yanmayı başlattığı yanma bölgesine yönlendirilir. Yanma sırasında, gazın hızlandırıldığı ağızlık içinde genleşme gerçekleşir. Toz, taşıyıcı gaz tarafından hızlandırılır ve aleve enjekte edilir. Toz, etraftaki genleşmiş gazın yönü ile aynı akış yönüne sahiptir. Yanma bölgesinde nozuldan toz partiküllerin girmesi üzerine, toz partikülleri ısıtılır ve daha da hızlandırılır. Püskürtülen tozun yüksek hızı ve yüksek etkisi nedeniyle, üretilen

kaplama plazma sprej ile üretilen malzemelerden daha az poroziteli ve daha yüksek bağlanma mukavemetine sahiptir [21]. Şekil 2.10.'da HVOF prosesinin çalışma prensibi verilmiş olup Şekil 2.11.'de uygulama sürecinden bir görüntü verilmiştir.



Şekil 2.10. HVOF prosesinin çalışma prensibi [22].

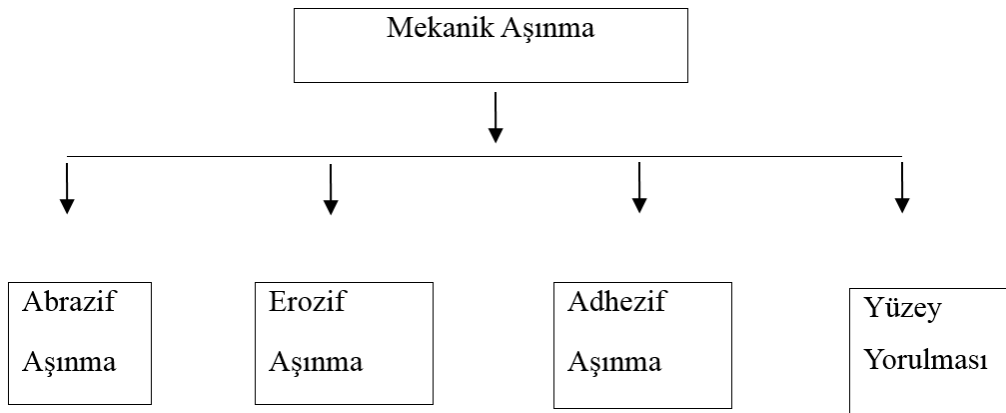


Şekil 2.11. HVOF prosesi uygulaması [23].

BÖLÜM 3. AŞINMA

Aşınma, malzemelerin birbirine teması ile temas yüzeylerinden bazı parçaların ayrılması sonucu malzemelerde istenmeyen bir değişikliğin (hasar, malzeme kaybı vs.) ortaya çıkmasıdır. Temas halindeki yüzeylerde sürtünme kuvveti güç kaybına neden olmakta, aşınma çalışma şartlarının bozulmasına ve malzemelerin veriminin düşmesine neden olmaktadır. Aşınma en çok hareket aktarım mekanizmalarında görülmektedir. Bu mekanizmalara örnek olarak türbin kanatları, dişliler, motor pistonları ve silindirler verilebilir. Aşınma kaybı; aşınma ortamı, aşınma mekanizması, malzeme cinsi, yük miktarı, aşınma hızı, sürtünme esnasında oluşan yüzey film özellikleri ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır [24].

Aşınmanın sonuçları hem iyi hem de kötü olabilir. Yararlı aşınma örneklerine kalem ile yazma, tornalama, cilalama, talaşlama söylenebilir [25]. Aşınma çoğu mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen tasarım sürecinde ihmal edilebilmektedir. Aşınma tasarım sürecinde ele alınırsa kullanım esnasında sorun teşkil etmez [26]. Aşınma türleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

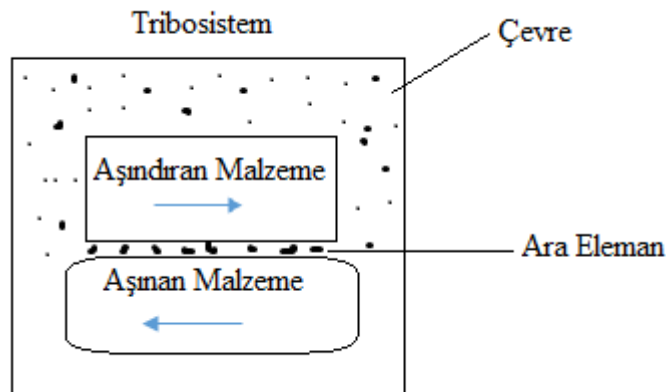


Şekil 3.1. Mekanik aşınma proseslerinin sınıflandırılması [27].

Aşınma, metallik veya metallik olmayan malzemelerde görülebilmektedir [28]. Tarımda kullanılan pulluklarda, su-kum gibi çamur karışımlarının kullanıldığı pompalarda, öğütücülerde, bilyeli rulmanlarda, segmanlarda, düz rulmanlarda, dişlilerde, mühürlerde, frenlerde ve günlük yaşamda ayakkabılarda, bıçaklarda, mobilyalarda, insan eklemlerinde, dizde ve dirsekler gibi çok çeşitli yerlerde görülür. Aşınmaya sebep olan şartlar çok çeşitlidir. Aşınma sisteminde bulunan ve aşınma olayına neden olan genel unsurlar Şekil 3.2.'de de gösterildiği gibi;

- 1) Aşındıran malzeme, karşı malzeme
- 2) Aşınan malzeme, ana malzeme
- 3) Ara malzeme
- 4) Çevresel durum: yük, hareket etmenlerine bağlıdır [27].

Aşındıran malzeme katı, sıvı, gaz veya bunların karışımı olabilir [29].



Şekil 3.2. Tribo sistemin elemanlarının şematik gösterimi [29].

3.1. Aşınma Modelleri ile Aşınma Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Elemanlardaki hareketler veya birbiriyle olan temasları çok çeşitli şekillerde değişmektedir. Harekete göre; kayma, yuvarlanma, darbe, titreşim ve akış olarak sınıflandırılabilir. Aşınma prosesi sistem kinematiğine bağlı olarak kayma aşınması, darbe aşınması, erozif aşınma, titreşim aşınması, yuvarlanma aşınma olarak ayrılmıştır [30].

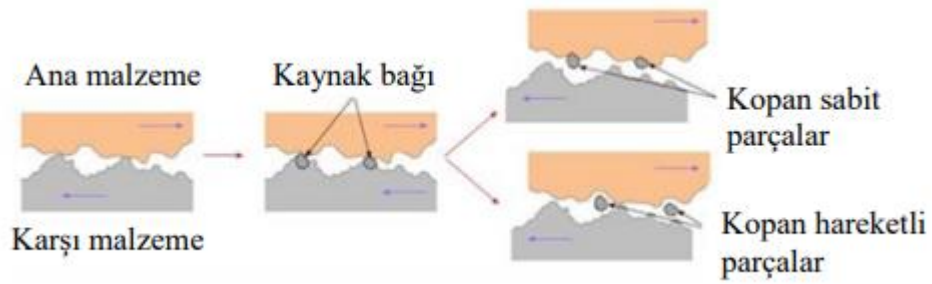
3.1.1. Abrazif aşınma

Malzeme, sertliği aynı veya saha sert bir malzemenin parçacıkları tarafından yüke maruz kalıyorsa abrazif aşınma meydana gelir [27,28]. Toprak kaldırmaya çalışan kepçede meydana gelen aşınma abrazif aşınmaya örnektir [29].

Kaydırma olukları, kirli hidrolik sistemler, kırıcılar, toz metalürjisinde kullanılan kalıplar, tırtıklı yüzeyle karşılıklı eş çalışan yüzeyler, ekstruderler abrazif aşınmaya maruz kalırlar [29].

3.1.2. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma birbirine göre kayan iki yüzey arasında meydana gelir. Temas eden pürüzlülüklerdeki yüksek kısmi basınç, plastik şekil değişimine, adhezyona ve kısmi birleşmelere neden olur. Bu yüzeyler arasındaki rölatif kayma bu birleşmelerin kopmasına ve sıklıkla bir yüzeyden diğerine geçmesine sebep olur. Şekil 3.3.'de adhezif aşınma şema halinde gösterilmiştir. Dişlilerde, kuru ve sınırlı yağlanmış kaymalı yataklarda, kam mekanizmalarında kesme takımlarında, pistonlarda, tel çekmede kalıplarda adhezif aşınma ile karşılaşilmektedir [29].



Şekil 3.3. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi [31].

3.1.3. Yüzey yorulması

Tekrarlı değişken yüklemeler nedeniyle çatlak oluşumu ve malzeme dökülmesi sonucu meydana gelen aşınmaya yüzey yorulmasının neden olduğu aşınma denir. Temas eden

katı parçalar arasındaki yuvarlanma, kayma hareketleri sıvıların veya katıların darbesi sonucu çevrimsel yüzey gerilmeleri oluşur. Rölatif hareket halindeki katı yüzeylerde pürüzlüklerin tekrarlı kayma teması nedeniyle mikroskobik ölçekte kısmi yorulma oluşur. Sıcak ve soğuk haddede kullanılan merdanelerde, raylı ve tekerlekli sistemlerde, bilyeli rulmanlarda, yazıcılarda ve kavitasyonun olduğu pompalarda yüzey yorulması gözlemlenebilir. Malzemenin yorulması, elastik ve plastik şekil değişimi, yumuşama, çekirdeklenme ve çatlak ilerleme mekanizmalarını kapsar.

3.1.4. Eroziyon aşınma

Katı veya sıvı aşındırıcı parçacıkların hava veya sıvı bir ortam içerisinde hedef numunenin yüzeyine çarparak numuneden malzeme kaldırması olayına eroziyon aşınma denir. Eroziyon aşınma, uçağın toz bulutundan geçerken gaz türbin kanatlarında, maden çıkarma işlemlerinde pompa çarklarında görülmektedir.

Eroziyon aşınma bazı aşınma mekanizmalarını kapsar. Bu aşınma mekanizmaları, parçacık malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutuyla kontrol edilebilir. Sıvı parçacıkların aşındırıcı olduğu bir durumda, abrazyon aşınmadan söz edilemez. Şekil 3.4. örneğinde olduğu gibi, çarpmaya bağlı tekrar tekrar meydana gelen çarpma kuvvetlerinin ve bunların meydana getirdiği gerilmeler aşınmaya sebep olur [29].



Şekil 3.4. Kılavuz kanadına ait bir eroziyon aşınma örneği [13].

Erozif aşınma, göreceli olarak küçük parçacıkların mekanik bileşenlere çarptırılması ile oluşturulan belirsiz sayıda aşınma mekanizmasını kapsar. Düşük çarpma açıları aşınma prosesinin abrazif aşınmaya benzemesini destekler. Yüksek çarpma açıları ise tipik erozyon mekanizmasına neden olur. Parçacığın çarpma hızı da erozif aşınma durumunu etkiler. Düşük çarpma hızları malzeme yüzeyinde plastik deformasyonu sebep olacak gerilme değerlerinin oluşmasını sağlayamaz ve yüzey yorulması ile aşınma meydana gelir. Eğer aşındırıcı parçacıklar küresel ise aşınma yüzeyleri aşırı plastik deformasyon sonucu oluşur. Gevrek malzemeler ise çatlak ilerleme mekanizması yardımıyla aşınırlar. Çok yüksek parçacık hızlarında çarpma yüzeyinde ergime söz konusu olur [29].



BÖLÜM 4. 304 PASLANMAZ ÇELİĞİ

AISI 304 kalite paslanmaz çelik, paslanmaz çeliğin temel çeşitlerinden biri olup, en yaygın kullanılanıdır. Tablo 4.1.'de belirtildiği gibi bu paslanmaz çelik kalitesi; kimyasal bileşiminin, mekanik özelliğinin, kaynak yapılabilirliğinin ve korozyon-oksidadasyon direncinin fiyatına oranla çok iyi olması sebebiyle tercih edil Bu kalitedeki malzemelerin korozyona dayanımı 303 kalite paslanmaz çeliklere oranla daha yüksektir. 304 paslanmaz çeliklerin düşük sıcaklıklardaki özellikleri ve işleme sertleştirmesine verdiği tepki mükemmele yakındır. AISI 304 kalite paslanmaz, östenitik paslanmaz çelikler grubuna girmektedir. En yaygın paslanmaz çelik kalitelerinden biri olan 304 paslanmaz çelik; kimya, petrokimya, ev aletleri, endüstriyel mutfaklar, otomotiv yan sanayi, gıda sanayi ve buna benzer çeşitli alanlarda sıkça kullanılır [32].

Tablo 4.1. AISI 304 tipi paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri [32].

Mekanik Özellikler	Değerler
Çekme Mukavemeti	500-700 MPa
Akma Mukavemeti	≥ 190 MPa
Sertlik, Brinell (HB)	≤ 215

4.1. Genel Özellikler (304)

Bu paslanmaz kalitesi 1.4301 kalite paslanmaz olarak da adlandırılır ve östenitik paslanmaz çelikler sınıfına girer. Bu paslanmaz çelik kalitesindeki malzemelere iyi şekil verilebilir ve iyi kaynak yapılabilir. Bu kalitedeki paslanmazlar mıknatıs çekmez ve yüksek bir korozyon direncine sahiptir [32].

304 paslanmaz çelikler yapıdaki karbon oranına göre üç grupta incelenir ve 304, 304H ve 304L olarak nitelendirilirler (Tablo 4.2.). [32].

Tablo 4.2. 304 paslanmaz çeliklerinin kimyasal analizleri [32].

Çeşit		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
304	min.	-		-		-	18,00		8,00	-
	maks.	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	20,00	-	10,50	0,10
304H	min.	-	2,00	-			18,00		8,00	-
	maks.	0,030	2,00	0,75	0,045	0,030	20,00	-	12,00	0,10
304L	min.	0,04	2,00	-			18,00		8,00	
	maks.	0,10	2,00	0,75	0,045	0,030	20,00	-	10,50	-

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deney Süreci

Bu deneyde AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine HVOF teknolojisi ile kaplama yapılarak yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İki farklı toz karışımı kullanılarak, farklı içerikteki tozların yüzey kaplama özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada iki farklı karışım hazırlanmış ve kaplama tozu olarak kullanılmıştır. Bu karışımlardan birincisinde %50 Sulzer Metko 5810 ve %50 Amdry 960 toz karışımı, ikincisinde ise %50 Woka 3653 ve %50 Amdry 960 karışımı kullanarak paslanmaz çelik yüzeyine HVOF ile kaplama yapılmıştır. Deneyde nozul mesafesi ve paso sayısının etkisinin ölçülmesi amacıyla farklı nozul mesafeleri ve paso sayıları kullanılmıştır. Sertliğin aşınma özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması amacıyla yüzeylerden kaplama öncesi ve kaplama sonrası sertlik değerleri elde edilmiştir. Kaplama yüzey özelliklerinin anlaşılması amacıyla SEM görüntüleri alınmıştır. Yapıda oluşan fazların tayin edilmesi amacıyla X-ışınları analizleri yapılmıştır. Pürüzlülüğün aşınma direncine etkilerinin tayini için aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. HVOF ile kaplama uygulanmış yüzeylere aşınma testi yapılmıştır. Aşınma sonrası kaplanmış numunelerin aşınma hızları ve sürtünme katsayıları hesaplanmış ve aşınma yüzeylerinden SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri alınmıştır.

5.2. HVOF ile Kaplama Süreci

Deneyde kaplama tozu olarak iki farklı toz karışımı kullanılmıştır (Tablo 5.1.). Bunlardan birisi Sulzer Metco 5810 ve Amdry 960 karışımı olup Sulzer Metco 5810 malzemesi WC12Co kimyasal yapısına sahiptir. Malzeme tane boyut aralığı $-63 +22 \mu\text{m}$ ($-230 \text{ mesh} +11 \mu\text{m}$) şeklindedir. Bu malzeme küresel kompozit morfolojiye

sahiptir. Pürüzsüz, sert, aşınmaya dayanıklı yüzeyler üretir. Amdry 960 ise nikel, krom ve alüminyum tozlarından oluşmaktadır. Diğer karışım ise Woka 3653 ve Amdry 960 karışımlarıdır. Woka 3653 WC10Co4Cr şeklinde olup bu karışım da Amdry 960 Ni, Cr ve Al tozlarından oluşmaktadır. Kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri Tablo 5.3.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan tozların kütlece oranları

TOZ-1	TOZ-2
%50 Sulzer Metco 5810 (WC, %12 Kobalt Tozu)	% 50 Woka 3653 (WC10%Co%4Cr)
% 50 Amdry 960 (Ni, Cr, Al)	% 50 Amdry 960 (Ni, Cr, Al)

Kaplanacak AISI 304 malzemeye ait kimyasal kompozisyon OBLF marka spektrometre cihazında ölçülmüş olup gözlemlenen sonuçlar Tablo 5.4.'te verilmiştir. Kaplama öncesinde AISI 304 paslanmaz çelik yapıda altlık metal numuneler 30x40 mm boyutlarda kesilerek 12 farklı gruba ayrılmıştır. Gruplara ayrılan bu numunelere vida ile sabitlemek için delikler açılmıştır. Daha sonra yüzey kaplama kalitesinin arttırmak amacıyla numunelere kumlama işlemi uygulanmıştır. Sulzer Metco 5810 tozuna nem giderilmesi için 90 °C'de fırında kurutma işlemi uygulanmıştır. Bu esnada HVOF tüpü temizlenmiştir. Tozların yüzeyde daha iyi tutunması için Amdry 960 metalik tozu kullanılmıştır. Daha sonra bu numunelere kaplama-püskürtme işlemi robot tarafından 200 mm/s hız ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi yapılırken Tablo 5.2.'de belirtildiği üzere iki farklı toz karışımı için HVOF işlemi yapılırken nozul mesafesi ve paso sayısı değişken olarak alınmıştır. Kaplama sonrası numuneler 1'den 12'ye kadar (z1-z12) 10x10 mm olacak şekilde kesilerek numaralandırılmıştır.

Tablo 5.2. Numunelerin nozul mesafesi ve kaplama paso sayısı.

Numune	Toz Grubu	Nozul Mesafesi(mm)	Paso Sayısı
z1	Toz-1	200	10
z2	Toz-1	300	10
z3	Toz-1	200	15
z4	Toz-1	300	15
z5	Toz-1	200	20
z6	Toz-1	300	20
z7	Toz-2	200	10
z8	Toz-2	300	10
z9	Toz-2	200	15
z10	Toz-2	300	15
z11	Toz-2	200	20
z12	Toz-2	300	20

Tablo 5.3. Kaplama tozlarının kimyasal bileşimleri.

Kullanılan Tozlar	Seramik Toz-1 (Sulzer Metco 5810)	Seramik Toz-2 (Woka 3653)	Bağlayıcı Toz (Amdry 960)
Kimyasal Kompozisyon	WC12Co	86WC10Co4Cr	NiCrAl
Toz Boyut Dağılımı	-63 +11 μm	-45 +15 μm	-125+45 μm
Çalışma Sıcaklığı, °C	500 C	500 C	980 C
Yoğunluk	4,6-5,4 g/cm ³	2,9-5,8 g/cm ³	1,4-4 g/cm ³
Toz Morfolojisi	Küresel Kompozit	Küresel Kompozit	Küresel Kompozit

Tablo 5.4. Kaplama işlemi öncesinde 304 paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim, %Ağırlık.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Co	Fe
% Ağırlık	0,10	0,59	1,04	0,036	0,010	17,46	0,13	0,22	0,18	Kalan

5.3. Metalografik Çalışmalar

HVOF ile üretilen numuneler, kaplama yüzeylerini ortalayacak biçimde Struers Labotom-3 marka kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen numunelerin SEM görüntülerinin alınabilmesi ve numunenin kalan metalografik işlemlerinin kolaylaşması amacıyla Struers Labopress-1 cihazı ile iletken bakalit tozu kullanılarak sıcak bakalite alınmıştır. Kaplamaların kesit görüntülerinin alınabilmesi için bakalite alınan numuneler sırasıyla 60, 120, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 mesh' lik Metaserv 2000 marka SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler alümina ile parlatılmıştır.

5.4. Optik Çalışmalar

Bu deneysel çalışmada ZEISS marka AX10 model optik mikroskop yardımıyla numune kesitlerinden değişik büyütmelerde optik görüntüleri alınmıştır. Ayrıca optik mikroskop ile aşınma iz derinliği ölçümü yapılmıştır.

5.5. Stereo Görüntüleri

HVOF kaplama sonrası numunelerinin stereo görüntüleri ZEISS marka Discovery.V12 model cihaz ile ölçülmüştür.

5.6. Sertlik Ölçümleri

HVOF ile üretilen kaplama tabakasının yüzey sertliği LEICA marka VHMT MOT model mikro sertlik cihazı kullanılarak alınmıştır (Şekil 5.1.). Yüzey sertlikleri 50 g yük altında 15s uygulanarak alınmıştır. Sertlik değerleri, numune üzerinde 3 farklı bölgede sertlik deneyi uygulanarak elde edilmiş üç değerın ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 5.1. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazı.

5.7. X-Işınları Analizleri

Kaplanan numunelere kesme işlemi sonrası X-Işını analizi yapılmıştır. XRD çalışmalarında, dalga boyu $\lambda=1.54056$ olan $\text{CuK}\alpha$ ışın demeti kullanılarak tarama açısı (2θ) $0-90^\circ$ arasında olacak şekilde $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızında RIGAKU XRD D/MAX/2200/PC marka X-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Difraksiyon diyagramları üzerinde yapılan ölçme ve hesaplamalarda düzlemler arası mesafeden (d değeri) hareket edilerek mevcut fazlar tanınmıştır. Faz analizleri, x-ışınları difraksiyonlarının ASTM kartları ile karşılaştırılması sonucu ve MDI JADE7.0 bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

5.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kesit görüntü için hazırlanan numunelerden bazıları iletken bakelite alınarak SEM analizleri için hazırlanmıştır. SEM çalışmaları JEOL JSM-6060 LV marka cihazla yapılmıştır. Ayrıca aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeylerinin SEM analizleri yapılmıştır.

5.9. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri ASTM G133 standardına uygun aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2.). Deney sürecinde ortam sıcaklığı 25°C olup ortam

nemi %35 olarak ölçülmüştür. Çizgisel (lineer) aşınma yöntemi uygulanmıştır. Aşınma deneyleri alümina bilye ile yapılmıştır. Deney sırasında uygulanan yük 2 N ve 3N olarak alınmıştır. Aşınma deneyleri 0,1 m/s ve 0,2 m/s hızda yapılmıştır. Deney süresince alınan yol sabit 400 m olarak alınmıştır. Deney esnasında aşındırıcı bilyenin yönü her deney için çevrilmiştir. Deney esnasında yük uygulama kolunun yüzeye temasında hassas davranılmış yüzeyden doğru veriler alınması sağlanmıştır. Uygulanan deney esnasında elde edilen veriler yine ASTM G133 standardına uygun aşınma cihazına ait programa aktarılarak sürtünme katsayısı ve yol grafikleri elde edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 5.2. ASTM G133 standardına uygun aşınma cihazı.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

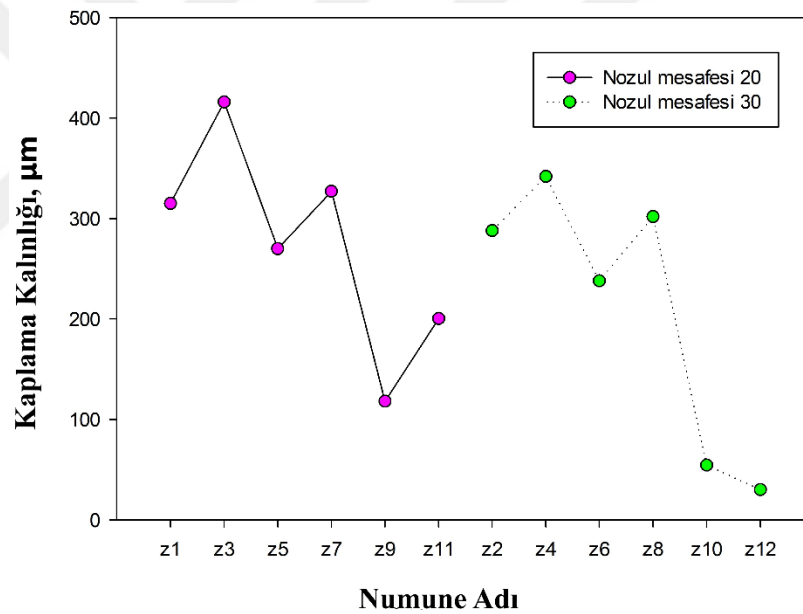
% 50 5810 (WC%12Co) tozu ile % 50 Amdry 960 (Ni, Cr, Al) tozları ve %50 Woka (WC%10Co%4Cr) tozu ile % 50 Amdry 960 (Ni, Cr, Al) tozları karıştırılarak 304 paslanmaz çelik altlık malzemeye HVOF yöntemiyle kaplanmış, elde edilen numunelerden optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde numune yüzeylerinde ergimeler ve poroziteler tespit edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak kaplama kalınlıkları ölçülmüştür.

Nozul mesafesi ve paso sayısına bağlı optik mikroskop görüntülerinden elde edilen kaplama kalınlıkları Tablo 6.1.'de verilmiştir. Elde edilen değerler iki ana grupta ele alınmıştır. İlk olarak % 50 5810 (WC%12Co) tozu ile % 50 Amdry 960 (Ni, Cr, Al) tozları kullanılarak üretilen z1, z2, z3, z4, z5, z6 numunelerinde (Şekil 6.1.) paso sayısı sabit tutulup nozul mesafesi değiştirildiğinde kaplama kalınlığının değişimleri incelenmiştir. Paso sayısı 10 alınıp nozul mesafesi 200 mm'den 300 mm'ye artırıldığında kaplama kalınlığında düşüş görülmektedir. Benzer durum z3, z4, z5, z6 numunelerinde de görülmektedir. Kaplama kalınlığındaki düşüşün sebebi artan nozul mesafesi ile birlikte altlık yüzeyine etki eden alev yoğunluğundaki azalmanın sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.2.'de de görüleceği üzere nozul mesafesi sabit tutulup paso sayısı artırıldığında kaplama kalınlığında meydana gelen değişim sabit bir artış veya azalış şeklinde olmayıp, 10 paso sayısından 15 paso sayısına çıkıldığında kaplama kalınlığında artış ve 15 paso sayısından 30 paso sayısına geçildiğinde ise azalış şeklinde görülmektedir. Toz-1 numunelerinde en yüksek kaplama kalınlığına (416 µm) 200 mm nozul mesafesi ve 15 paso sayısında ulaşılmıştır. %50 Sulzer Metko 5810 ile % 50 Amdry 960 karışımı ile elde edilen kaplamalarda da benzer etkiler

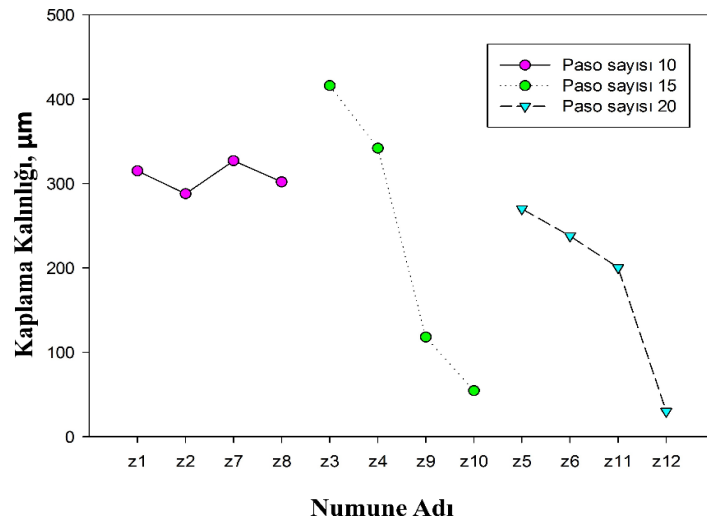
görülmektedir. Toz-2 numunelerinde en yüksek kaplama kalınlığına ($327 \mu\text{m}$) 200 mm nozul mesafesi ve 10 paso sayısında ulaşılmıştır.

Tablo 6.1. Kaplanan Numunelerin Kalınlıkları

Numune	Toz Grubu	Nozul Mesafesi(mm)	Paso Sayısı	Kaplama Kalınlığı(μm)
z1	Toz-1	200	10	315
z2	Toz-1	300	10	288
z3	Toz-1	200	15	416
z4	Toz-1	300	15	342
z5	Toz-1	200	20	270
z6	Toz-1	300	20	238
z7	Toz-2	200	10	327
z8	Toz-2	300	10	302
z9	Toz-2	200	15	118
z10	Toz-2	300	15	54,39
z11	Toz-2	200	20	200,27
z12	Toz-2	300	20	30



Şekil 6.1. HVOF kaplaması yapılan numunelerde nozul mesafesine göre kaplama kalınlığı değişimi.



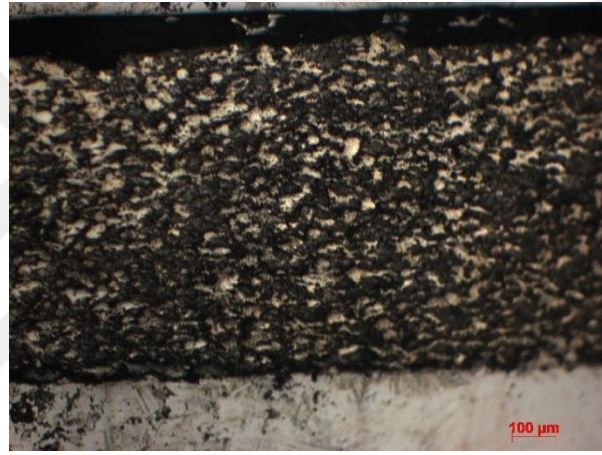
Şekil 6.2. HVOF kaplaması yapılan numunelerde paso sayısına göre kaplama kalınlığı değişimi.

Şekil 6.3.'de z1, z2 ve z3 numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. z1 numunesinin kaplama kalınlığı 315 µm olup z2 numunesinde kaplama kalınlığı 288 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 6.4.'de z4, z5 ve z6 numaralı numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.5.'te z7, z8 ve z9 numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde altlık-kaplama ara yüzeyinde bazı poroziteler görülmüştür. Bu porozitelerin oluşma nedenini iki şekilde açıklayabiliriz; birincisi tozun püskürtülmesi esnasında metal yüzeyinde mevcut pürüzlülüğün engeli ile tozun akmadan ani katılaşması ve ikincisi de metal yüzeyinde ıslatmanın yetersiz olması sonucunda yüzeyde oksit, yağ ve lekelerin oluşması şeklinde açıklamak mümkündür. Paslanmaz çeliğin altlık olarak kullanılması sonucunda paslanmaz çeliğe ait oksidasyon direncinin fazla olması altlık- kaplama ara yüzeyinde oksitlenmenin daha az olduğunun kanıtı olarak düşünülebilir.

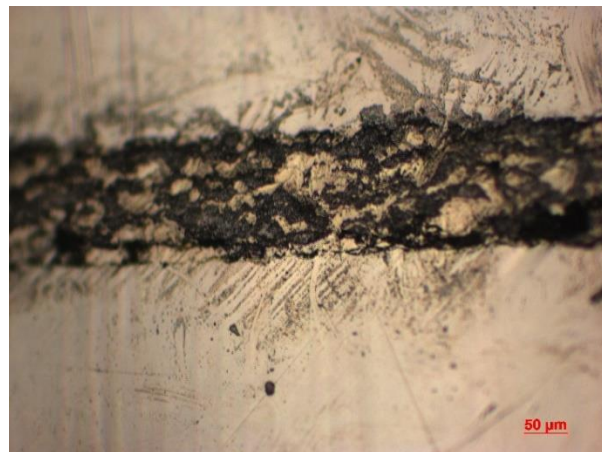
Mishra ve Arkadaşlarının yaptığı çalışmada olduğu gibi Co ve WC arasında çok iyi bağ oluşması sonucunda WC-Co kaplamada WC10Co4Cr ile kıyaslandığında daha yoğun yapı göze çarpmaktadır. Şekil 6.5. için ayrıca z7 ve z8 numaralı numunelerin optik mikroskop görüntülerine bakılacak olursa yapıda gri ve koyu benekler mevcut olup bunlar WC ve çözülmeyen WC fazlarını göstermektedir. Parlak olanlar ise kobaltı temsil etmektedir. Şekil 6.6.'da verilen z10, z11, z12 numunelerine ait optik görüntülere ait bazı yapılarda mikro çatlaklar ve porozitelere de rastlanmıştır [33].



a)



b)



c)

Şekil 6.3. Kaplama sonrası elde edilen z1 (a), z2 (b), z3 (c) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.



d)

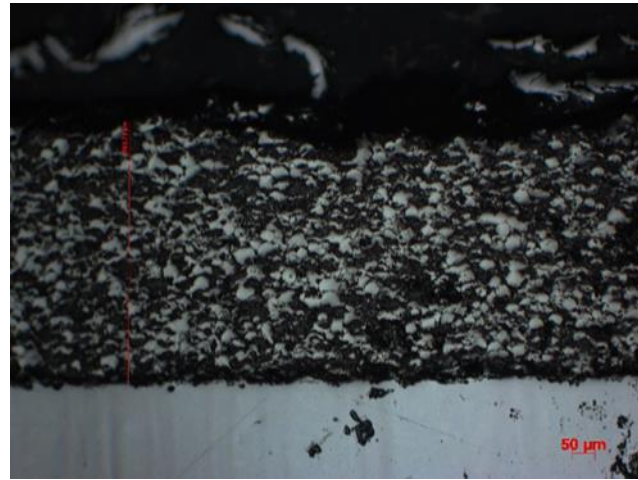


e)

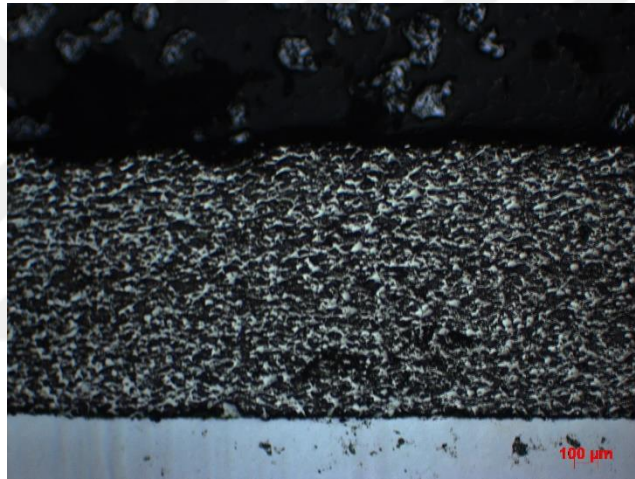


f)

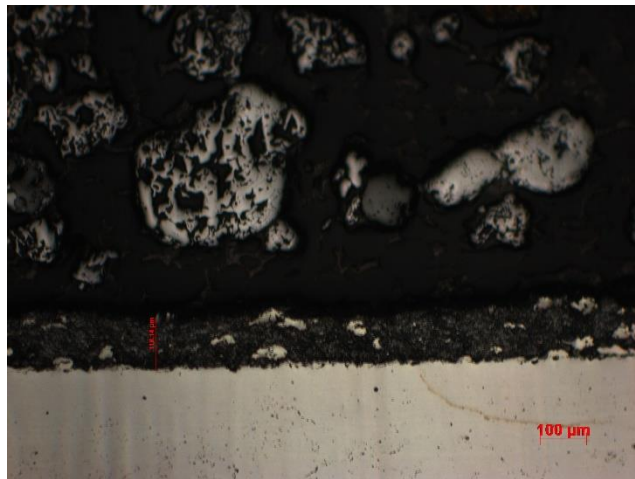
Şekil 6.4. Kaplama sonrası elde edilen z4 (d), z5 (e), z6 (f) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.



g)

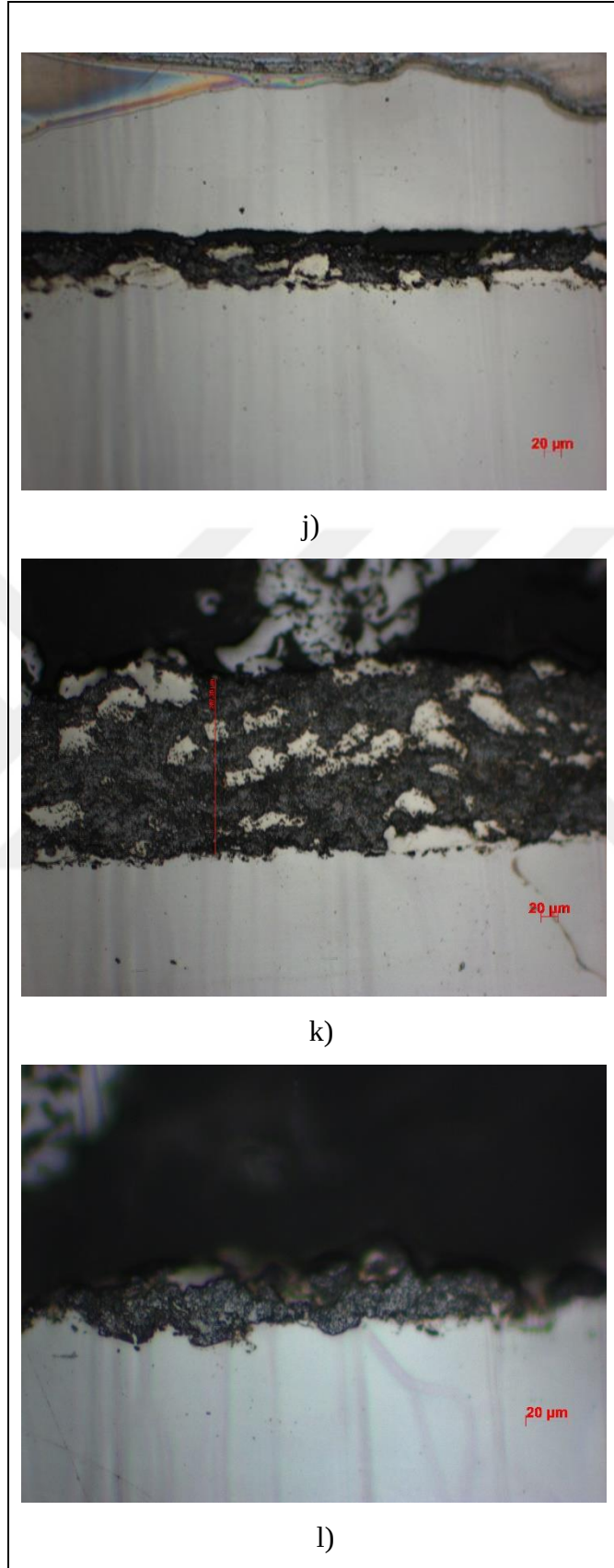


h)



i)

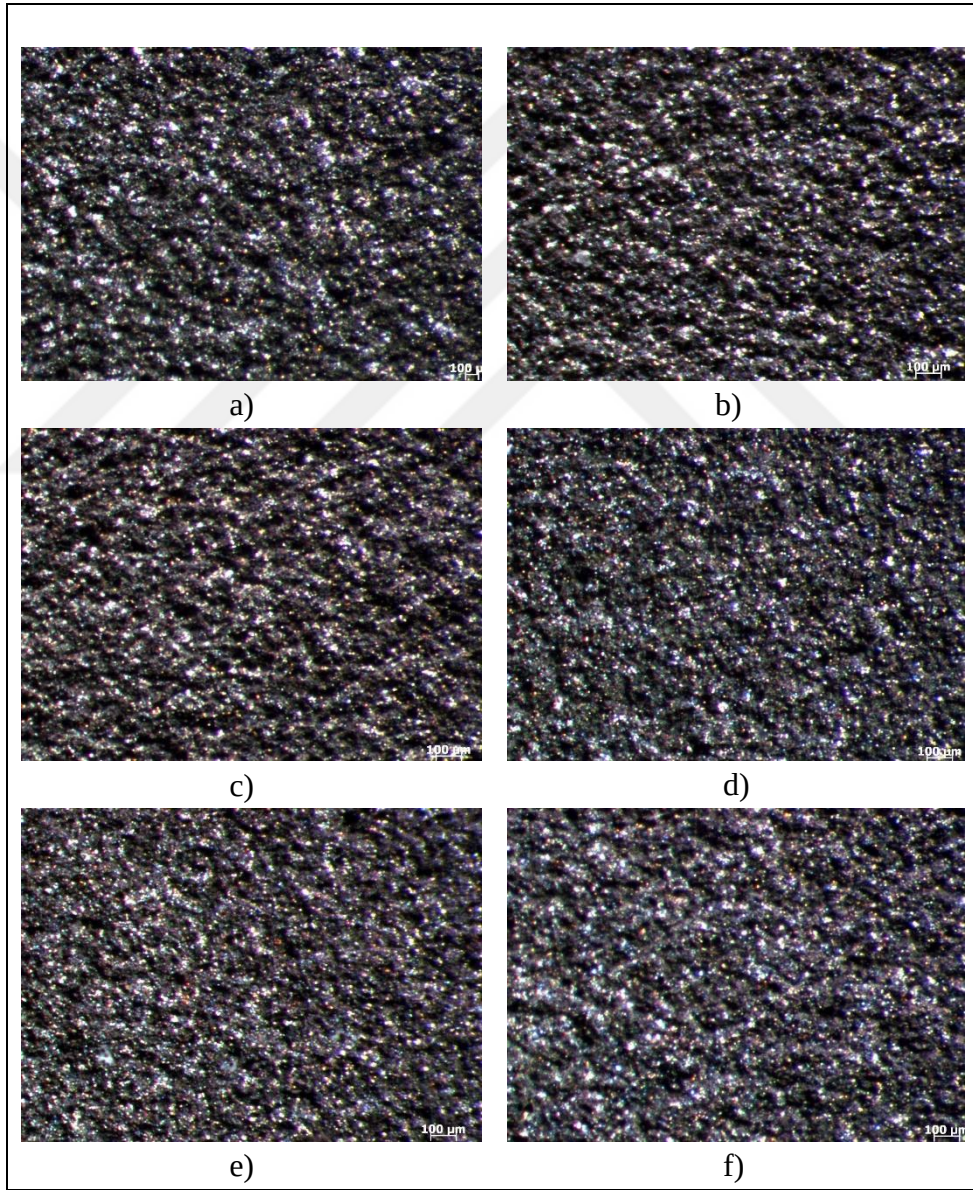
Şekil 6.5. Kaplama sonrası elde edilen z7 (g), z8 (h), z9 (i) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.



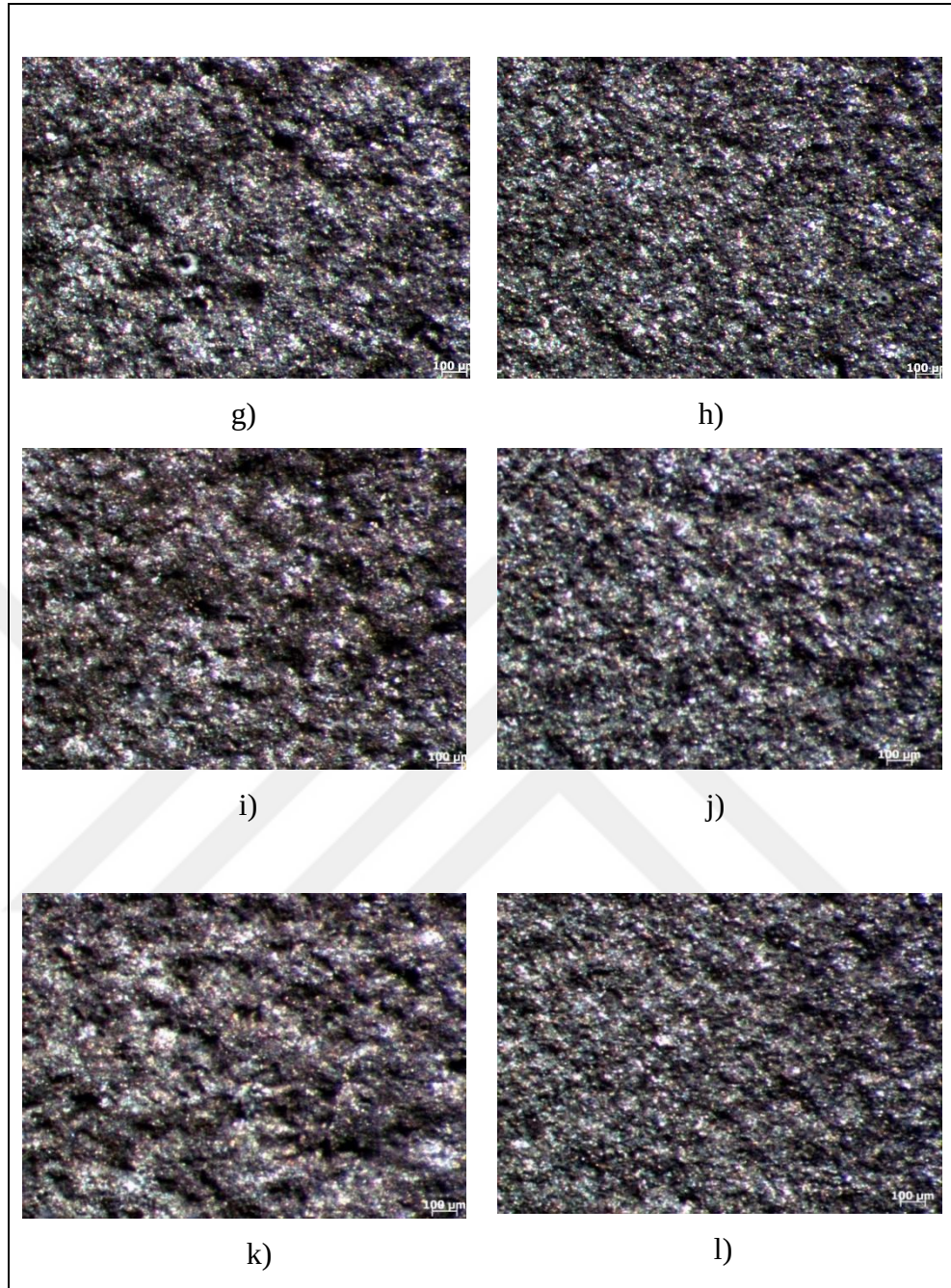
Şekil 6.6. Kaplama sonrası elde edilen z10 (j), z11 (k), z12 (l) numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri.

6.2. Stereo Mikroskop Görüntüleme Sonuçları

Stereo görüntüler incelendiğinde Şekil 6.7.'de görüldüğü gibi kaplama yüzeylerinde camsı fazların oluşumuna rastlanılmaktadır. Yüzeylerde fazla miktarda pürüzlülük görülmüştür (Şekil 6.8.). Kaplamaların üst yüzeyinden alınmış görüntülerde yer yer yüzey topografyasında farklılıklar görülmektedir. Yüzeye gelen tozların ergimesinde ve çarpma hızındaki farklılıklar homojen kaplama yüzeyi oluşumunda bu şekilde olumsuzluklara sebebiyet verebilmektedirler.



Şekil 6.7. 100 x büyütmede toz-1 numunelerine ait stereo görüntü



Şekil 6.8. 100 x büyütmede toz-2 numunelerine ait stereo görüntü

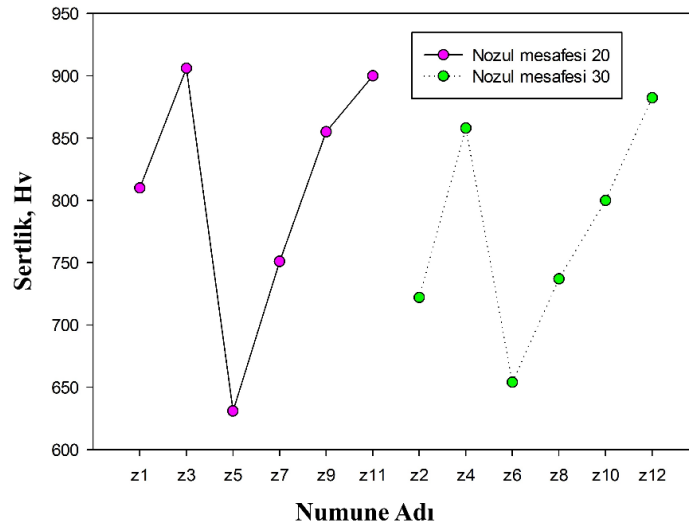
6.3. Mikro Sertlik Sonuçları

Kaplama sonrası 12 farklı (z1-z12) numunenin her birinin 3 farklı bölgesinden sertlik değerleri ölçülmüş, elde edilen bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçümleri sonucu elde edilen kaplamaya ait ortalama sertlik değerleri ve altlık sertlik değerleri Tablo 6.2.'de gösterilmiştir. Paso miktarının artması sonucunda kaplama yapılan

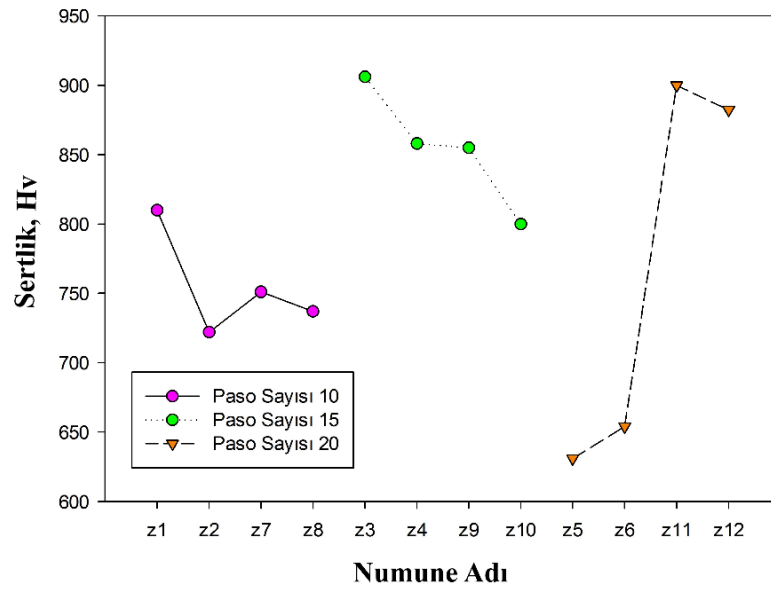
tozların yoğunluğu arttığı için kaplama malzemesinin sertlik değerleri artmıştır. Nozul mesafesindeki artış ise kaplama tozlarının yoğunluğunu azalttığı için sertlik değerlerinde düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Toz-1 ve toz-2 grupları sertlik sonuçları kıyaslandığında toplamda en yüksek ortalama sertlik değeri toz-1 grubunda bulunan, 15 paso ve 200 mm nozul mesafesinden kaplama işlemi uygulanan z3 numunesinde 906 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 6.9.'da sertlik değerleri ile nozul mesafesi değişimi incelendiğinde en düşük sertlik değeri 631 HV ile toz-1 grubundan z5 numunesine aittir. Paso sayısı ve sertlik ilişkisi Şekil 6.10.'da verilmiş olup en düşük sertlik 20 pasoda 5 no' lu numunede görülmüştür. Toz-2 grubu içinde en yüksek sertlik değeri 900 HV ile z-11 numunesinde, en düşük sertlik değeri ise 737 HV ile z-8 numunesinde ölçülmüştür (Şekil 6.11.).

Tablo 6.2. Kaplanmış numuneler ve altlık malzeme için farklı noktalardan alınan sertlik değerleri.

Numune Kodu	Ortalama Sertlik Değeri (HV)	Altlık Sertlik Değeri (HV)	Nozul Mesafesi (mm)	Paso Sayısı
z1	810	250	200	10
z2	722	250	300	10
z3	906	250	200	15
z4	858	250	300	15
z5	631	250	200	20
z6	654	250	300	20
z7	751	250	200	10
z8	737	250	300	10
z9	855	250	200	15
z10	800	250	300	15
z11	900	250	200	20
z12	882,3	250	300	20



Şekil 6.9. HVOF kaplaması yapılan numunelerde nozul mesafesine göre sertlik değerlerinin değişimi.

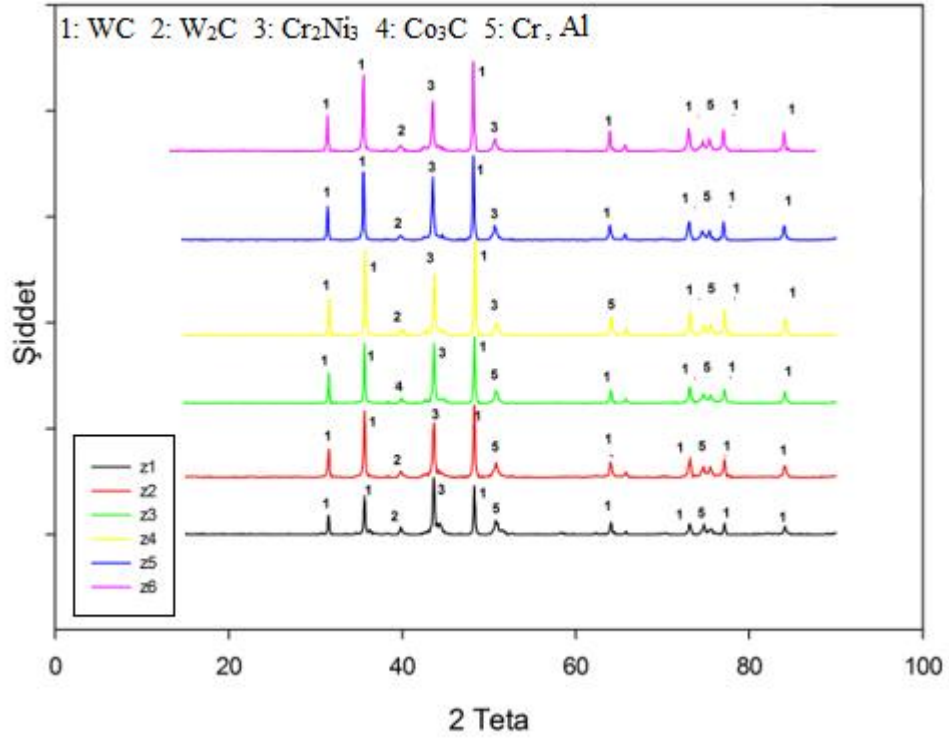


Şekil 6.10. HVOF kaplaması yapılan numunelerde paso sayısına göre sertlik değerlerinin değişimi.

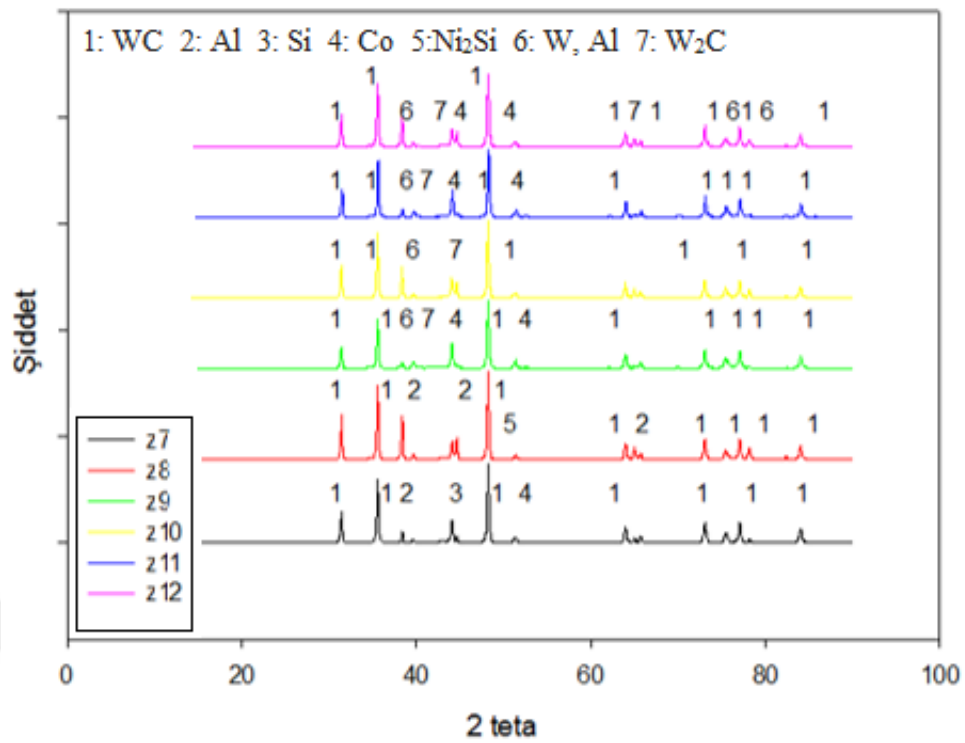
6.4. XRD Analiz Sonuçları

XRD analizi incelendiğinde z1 ve z2 numunelerinde Cr, W_2C , Cr_2Ni_3 , WC kristalin fazlarına rastlanılmaktadır. Artan nozul mesafesi ile birlikte 34 ve 47 2θ açılarında WC pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca kaplama yüzeyinde W_2C fazları karbonun oksitlenmesi sonucu oluşmuştur. z1- z6 numunelerine ait X-ışını grafikleri Şekil 6.12.'de verilmiştir. Taimin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da belirtildiği üzere W_2C fazları WC fazlarının azalması ile ortaya çıkmıştır. WC 'den W_2C 'e geçiş

iki şekilde açıklanabilir; birincisi kobalt ergime sıcaklığının (1495°C) alev ısısının ($2800\text{-}3500^{\circ}\text{C}$ aralığında) çok altında olması ve erkenden sıvı hale geçmesi sonucu ergiyen kobaltta W ve C elementleri ergime göstermez. İkincisi ise karbon oksidasyon olayı ile oksijenle kolayca taşınarak WC ve Co partiküllerinin arasına yerleşerek W_2C fazını meydana getirir [34].



Şekil 6.11. Sulzer Metco 5810 ve Amdry 960 karışımı ile yapılan kaplama numunelerine ait (z1-z6) XRD analizi sonuçları.



Şekil 6.12. Woka 3653 ve Amdry 960 toz karışımı ile kaplanan numunelere ait XRD analizi sonuçları.

Zheng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada termal sprey prosesi esnasında depolanan tozlar yüksek sıcaklıkta oksijenle buluşup kimyasal değişikliğe sebep olurlar [35]. WC parçacıklarının dekarburizasyonu sonucu aşağıda belirtilen reaksiyon gerçekleşir;



EDS analizine göre aşınma sonrası artık malzemeler W, Co, Cr, C ve az miktarda O bulunmaktadır. Yapıdaki W ve C fazları W_2C fazı gibi kırılğan (gevrek) yapı meydana getirmektedir. Bu gevrek yapılar zayıf bağ oluşturarak erozyon aşınma direncini azaltmaktadır. Şekil 6.13.'te ki XRD sonuçlarında (z7-z12) da benzer yapıların elde edildiği görülmüştür.

Yapıdaki çatlakların varlığı büyük oranda toz boyutu, gaz akış hızı ve püskürtme sıcaklığı ile ilişkilidir. Kaplama prosesinde WC yapıyı erozif aşınmaya karşı iyileştirme sağlamıştır [35].

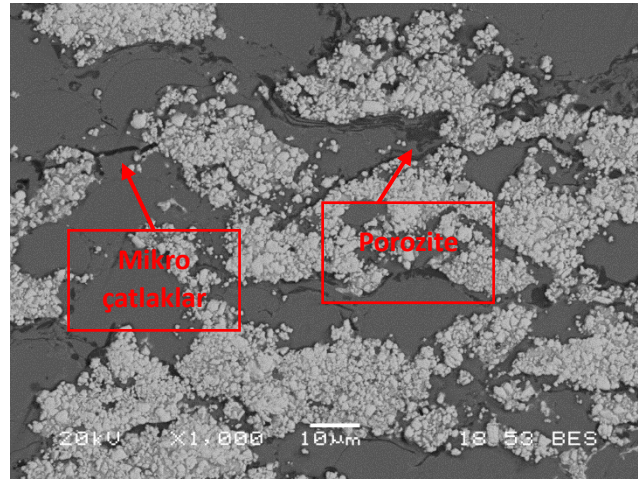
6.5. SEM Görüntüleri ve EDS Analizi

SEM görüntüleri incelendiğinde HVOF ile yapılan kaplama sonucunda yapıda mikro çatlaklar ve porozitelerin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 6.14., Şekil 6.15.). Ayrıca yapıda kısmen ergimemiş partiküller görülmektedir. Bu durumu sıcaklık ve ergime süreci ile ilişkilendirebiliriz. Hajare ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada toz parçacıkları çok yüksek parçacık hızına bağlı olarak daha az partikül ergimesine ve karbürlerin çözünmesine sebep olduğu belirtilmiştir. Parçacıklar tam olarak aynı boyutta değildir. Küçük parçacıklar tamamen erir, ancak daha büyük veya nemli olabilecek toz parçacıklar ergimeyebilir. Geniş boyut aralığının sonucu olarak aşırı derecede fazla ısınan bazı parçacıklar yetersiz bir şekilde ergimeye neden olabilmektedir. Bu durum porozitenin artışına ve sertliğin azalmasına neden olur. Karbür boyutundaki artış da kaplamanın porozite oranını da artırmaktadır. Ayrıca merkezden sınırlarına kadar değişen sıcaklık dereceleri vardır. Şekil 6.14. SEM görüntüsünde olduğu gibi kaplama malzemesi ve altlık malzeme bölgelerinde meydana gelen sıcaklık farkı ve açık atmosferin etkisiyle kaplanan malzeme daha hızlı soğur; ara bölgede soğuma kontrollü olmadığı için partiküllerin ergimesi gecikir ve bu durum bağ yapısında ayrışmaya neden olabilir ve Şekil 6.16.'daki gibi bağlanma problemi ortaya çıkabilir [36].

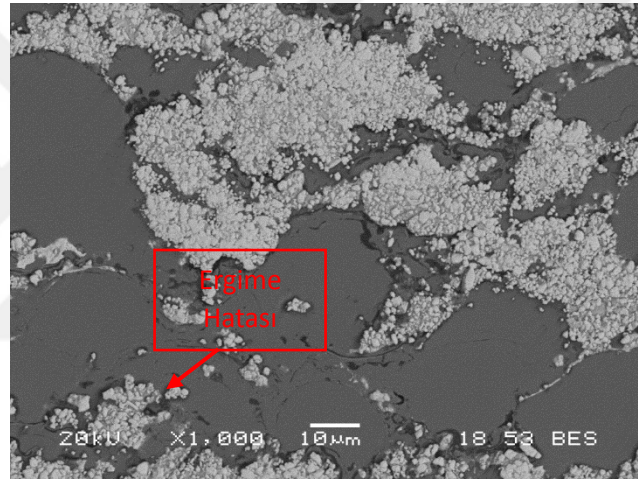
Mishra ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada WC10Co4Cr kaplama malzemesi WC12Co malzemesine göre daha fazla porozite içermektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama yapılan toz-1 ve toz-2 kıyaslandığında yapıda WC10Co4Cr bulunan kaplama malzemesi toz-1 ile kaplanan malzemeye göre daha fazla porozite içermektedir. Yine aynı çalışmada XRD numuneleri incelendiğinde Co ve Cr varlığı ile beraber WC pikinin büyüklüğü azalmaktadır [33].

Hong ve arkadaşları tarafından elde edilen bulgulara olduğu gibi Şekil 6.15.'in e'sinde görülen salkım şeklinde beyaz kütleler yapıdaki W elementini ifade etmektedir. Şekil 6.27.'de de beyaz salkımlı bölümler benzer sonuçları işaret etmektedir [37].

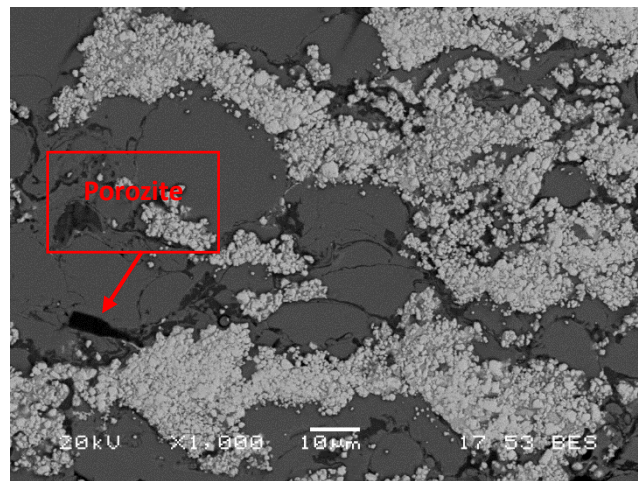
Şekil 6.14.'de görülen koyu gri bölgeler Al ve Cr elementinin bölgede yoğunluğunu göstermektedir. Yapıda kobalt'da belirgin bir görüntü oluşturmuştur. Şekil 6.15.'de salkım yapılar dikkat çekmektedir. Ayrıca görüntüden anlaşılağı üzere yapıda bağlanma problemi ile beraber poroziteler göze çarpmaktadır. Kaplamadaki porozite oluşumu, toz malzemenin tipine ve şekline, kaplama üretim yöntemine ve üretim parametrelerine bağılıdır. Aşınma uygulamaları düşük poroziteli yapılar gerektirir. Şekil 6.16.'da en çok dikkat çeken durum koyu gri bölgenin yapıda yoğun bir şekilde yer bulmasıdır. Bu koyu gri bölgede Hong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki gibi oksitlenmenin varlığından söz edebiliriz. Ayrıca Şekil 6.16.'da siyah bölgelerin yoğunluğu görülmektedir. Bu durumun nedenlerini yüzeyden parça sökölmesine ve yapıda oyuk bir halin mevcut olduğuna yorabiliriz [37][38]. Aşınma öncesi mikroyapıları ve yüzeyden elde edilen EDS analizleri Şekil 6.17. ve Şekil 6.18.'de verilmiştir. Şekil 6.17. için Al mevcudiyetinden söz edebiliriz.



a)

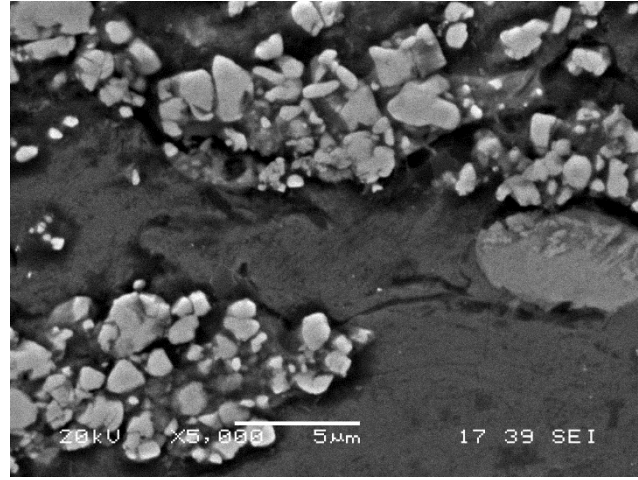


b)

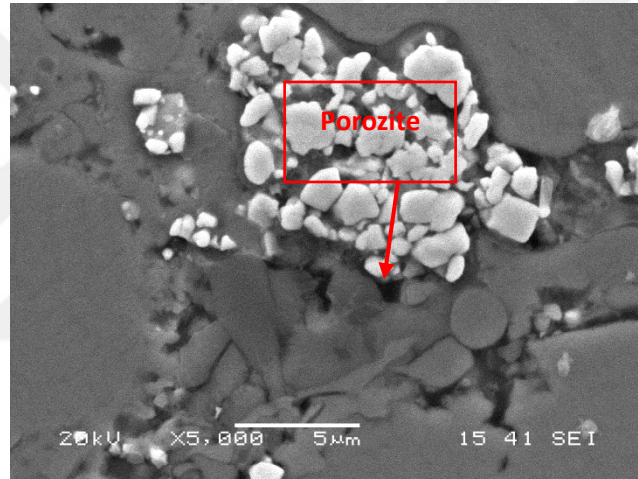


c)

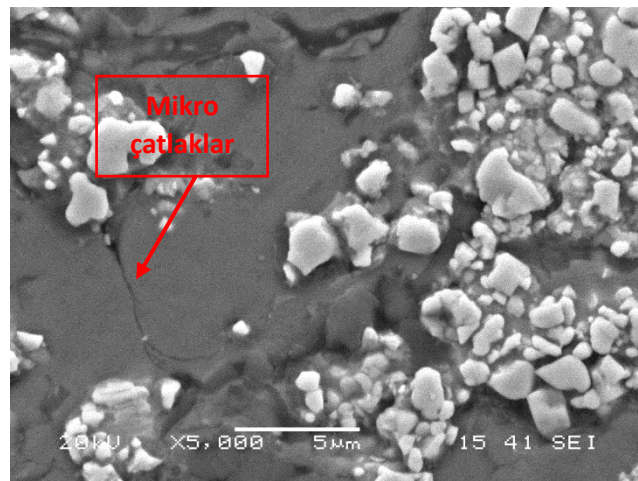
Şekil 6.13. HVOF kaplaması ile elde edilen z1 (a), z2 (b) ve z3 (c) numunelerine ait SEM görüntüleri.



d)

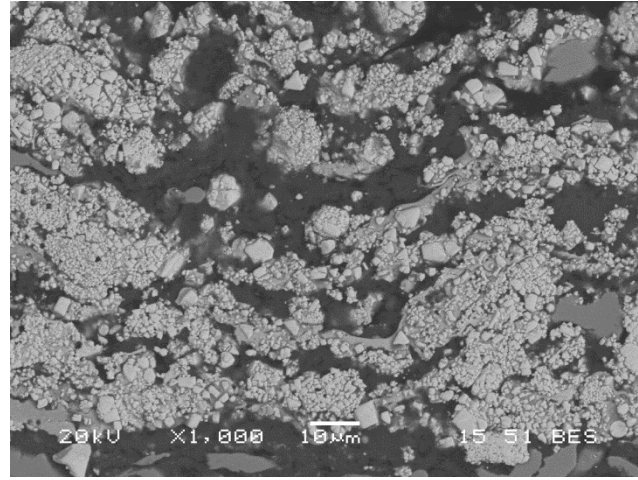


e)

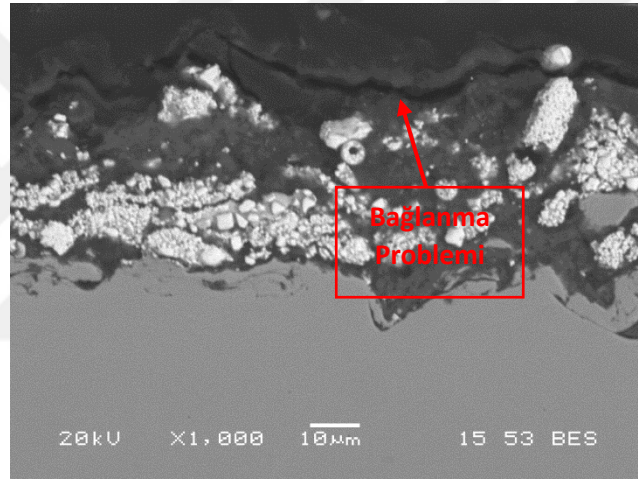


f)

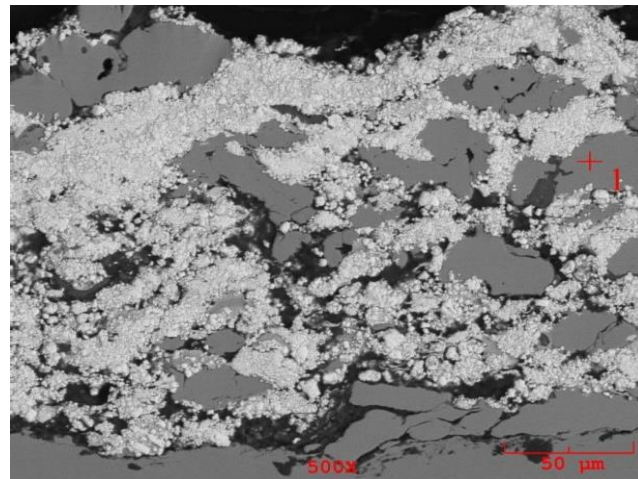
Şekil 6.14. HVOF kaplaması ile elde edilen z4 (d), z5 (e) ve z6 (f) numunelerine ait SEM görüntüleri.



g)

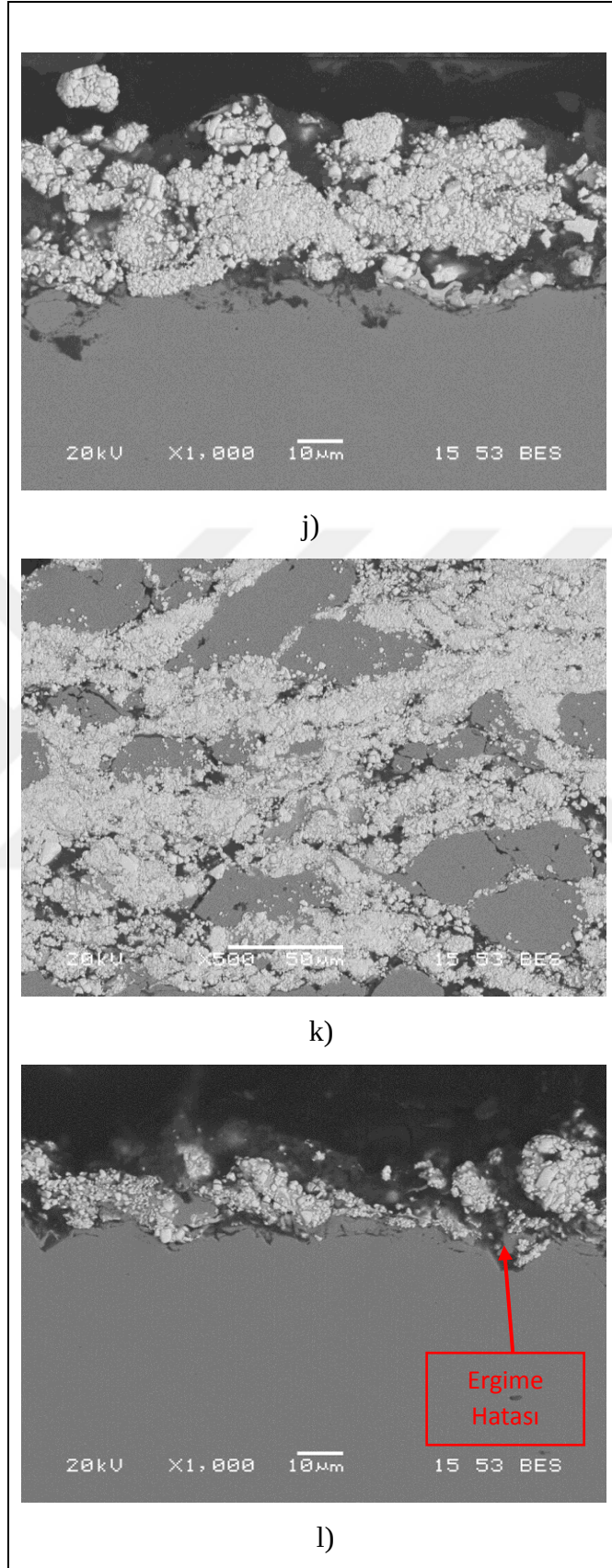


h)

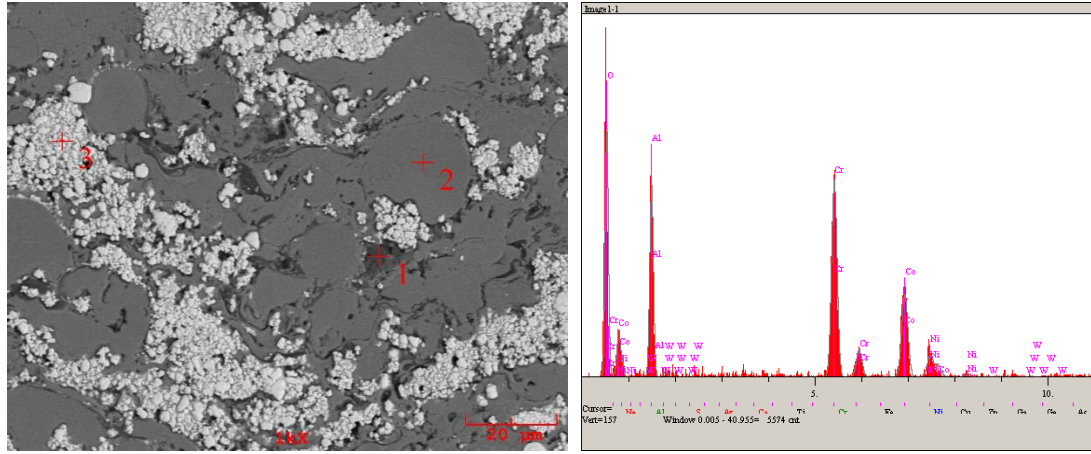


i)

Şekil 6.15. HVOF kaplaması ile elde edilen z7 (g), z8 (h) ve z9 (i) numunelerine ait SEM görüntüleri.

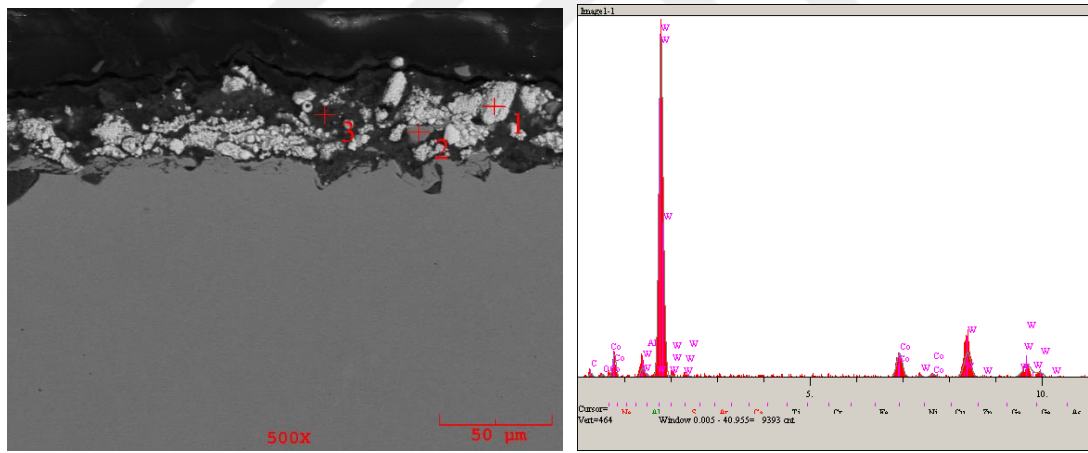


Şekil 6.16. HVOF kaplaması ile elde edilen z10 (j), z11 (k) ve z12 (l) numunelerine ait SEM görüntüleri.



Element, %Ağırlık	1	2	3
O	30.589	2.346	2.080
Al	16.378	10.581	0.480
Cr	26.065	21.831	1.962
Co	19.635	36.268	3.008
Ni	6.237	28.973	0.884
W	1.096	0.000	91.586

Şekil 6.17. Aşınma öncesi z5 numunesine ait SEM ve EDS analizleri.



Element, %Ağırlık	1	2	3
C	3.924	0.000	
O	1.806	2.029	22.620
Al	0.524	0.645	77.380
Co	13.674	15.295	
W	80.072	0.209	

Şekil 6.18. Aşınma öncesi z8 numunesine ait SEM ve EDS analizleri.

6.6. Aşınma Deneyi Sonuçları

Aşınma deneyi 400m sabit yolda 2 ve 3 N yük uygulanarak 0,1 m/s ve 0,2 m/s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma sürecinde kullanılan parametreler Tablo 6.3.'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Aşınma sürecinde kullanılan parametreler

Zaman (dk)	Yük (N)	Hız (m/s)	Yol (m)
66	2	0,1	400
66	2	0,2	400
33	3	0,1	400
33	3	0,2	400

Aşınma deneyi sonucu elde edilen numunelerde iz genişliklerinin ölçülmesi için optik mikroskoptan yararlanılmıştır. Görüntü elde etmek için kullanılan büyütme oranı 5x olarak alınmıştır. Toz-1 ve Toz-2'ye ait kaplama yüzeylerinde oluşan iz genişlikleri nozul mesafesi ve paso sayısı değiştirilerek etkilerinin araştırılması amacıyla 12 farklı numunede aşınma deneyi uygulanmıştır. Sonuçlar Tablo 6.4. ve Tablo 6.5.'de verilmiştir. Elde edilen verilerden en yüksek aşınma iz genişliğine (570,67 μm) toz-1 numunesinde 0,1 m/s hız ve 3 N yük altında ulaşılmıştır. Toz-1 ve toz-2 numuneleri karşılaştırıldığında en yüksek iz genişliğine (617,84 μm) 0,1 m/s hızda 2 N yük altında toz-2 numunesine ait karışımında ulaşılmıştır. Tablo 6.6. ve Tablo 6.7. incelendiğinde ve Karaoğlanlı ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmaya benzer olarak yük miktarında meydana gelen artış sonucunda genellikle aşınma hacminde artış gözlemlenmiştir [38]. Şekil 6.22. ve Şekil 6.23.'de örnek olarak optik mikroskoptan alınan aşınma iz görüntüsünde, üç farklı iz ölçümü belirtilmiştir. Aynı şekillerde aşınma yolu da görülebilmektedir. Ortalama kütle kayıpları kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Denklem 6.1'de verilen formüle göre yapılmıştır.

$$K_0 = \Delta m / L.F.\rho \text{ (mm}^3\text{N}^{-1}\text{mm}^{-1}\text{)}$$

Δm = Ortalama kütle kaybı, g

L=Kayma mesafesi, mm

F= Uygulanan kuvvet, N

ρ = Yoğunluk, g/mm³

Tablo 6.4. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.

Numune No	Ortalama İz Genişliği (μm)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı (μ)
z1-1	335,30	1,0716E-02	2,6791E-05	0,47
z2-1	263,21	5,0510E-03	1,2627E-05	0,45
z3-1	475,88	3,1279E-02	7,8198E-05	0,46
z4-1	445,85	2,5650E-02	6,4125E-05	0,71
z5-1	340,79	1,1266E-02	2,8166E-05	0,45
z6-1	371,95	1,4742E-02	3,6855E-05	0,35
z7-1	451,20	2,6599E-02	6,6498E-05	0,42
z8-1	415,02	2,0614E-02	5,1536E-05	0,63
z9-1	395,23	1,7755E-02	4,4387E-05	0,37
z10-1	386,28	1,6553E-02	4,1382E-05	0,70
z11-1	617,84	6,9040E-02	1,7260E-05	0,37
z12-1	509,53	3,8496E-02	9,6241E-05	0,65

Tablo 6.5. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.

Numune No	Ortalama İz Genişliği (μm)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı (μ)
z1-2	246,07	4,0864E-03	1,0216E-05	0,66
z2-2	570,67	5,4285E-02	1,3571E-04	0,43
z3-2	447,98	2,6025E-02	6,5063E-05	0,35
z4-2	495	3,5258E-02	8,8145E-05	0,38
z5-2	348,88	1,2110E-02	3,0275E-05	0,15
z6-2	478,67	3,1840E-02	7,9601E-05	0,42
z7-2	565,58	5,2831E-02	1,3208E-04	0,59
z8-2	446,78	2,5813E-02	6,4533E-05	0,67
z9-2	461,1	2,8416E-02	7,1041E-05	0,41
z10-2	489,61	3,4104E-02	8,5261E-05	0,72
z11-2	482,59	3,2640E-02	8,1599E-05	0,38
z12-2	477,38	3,1580E-02	7,8950E-05	0,83

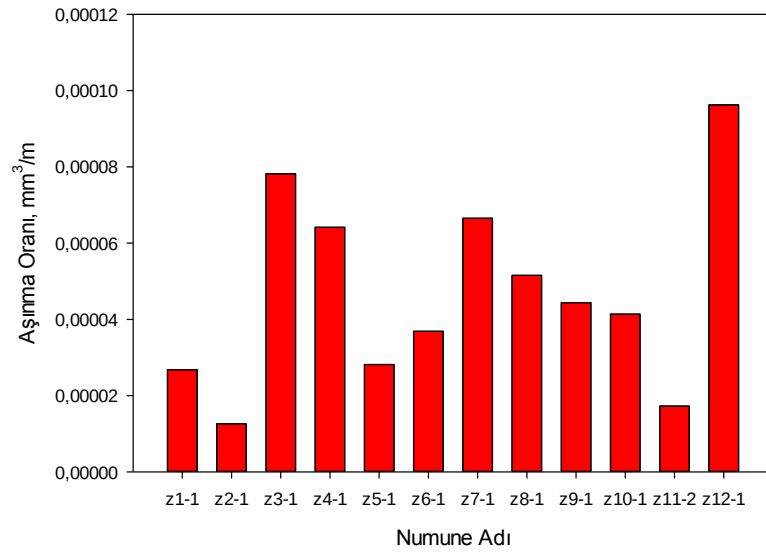
Tablo 6.6. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.

Numune No	Ortalama İz Genişliği (μm)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı (μ)
z1-3	325,18	9,7496E-03	2,4374E-05	0,41
z2-3	316,89	9,0017E-03	2,2504E-05	0,44
z3-3	451,90	2,6725E-02	6,6813E-05	0,47
z4-3	470,55	3,0226E-02	7,5565E-05	0,45
z5-3	516,87	4,0205E-02	1,0051E-04	0,33
z6-3	466,18	2,9380E-02	7,3450E-05	0,47
z7-3	387,18	1,6671E-02	4,1678E-05	0,47
z8-3	439,96	2,4631E-02	6,1578E-05	0,83
z9-3	433,14	2,3486E-02	5,8714E-05	0,52
z10-3	325,42	9,7718E-03	2,4430E-05	0,75
z11-3	453,13	2,6947E-02	6,7368E-05	0,53
z12-3	523,07	4,1686E-02	1,0422E-04	0,78

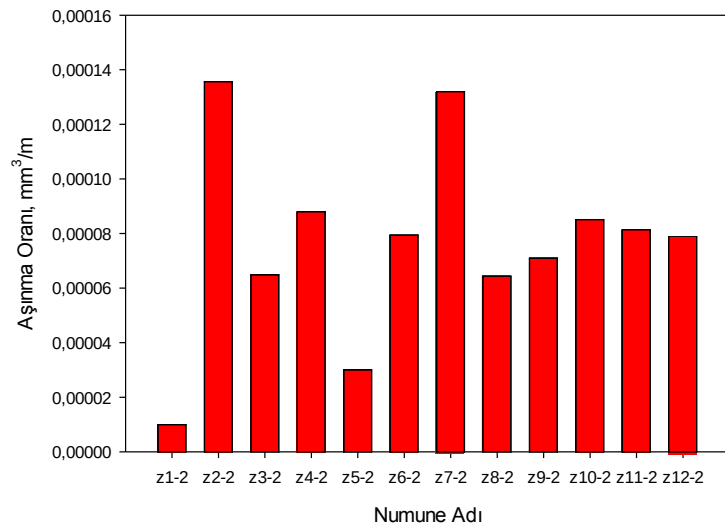
Tablo 6.7. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.

Numune No	Ortalama İz Genişliği (μm)	Aşınma Hacmi (mm^3)	Aşınma Oranı (mm^3/m)	Sürtünme Katsayısı (μ)
z1-4	411,25	2,0048E-02	5,0119E-05	0,41
z2-4	260,06	4,8637E-03	1,2159E-05	0,47
z3-4	410,61	1,9953E-02	4,9881E-05	0,47
z4-4	461,11	2,8418E-02	7,1045E-05	0,45
z5-4	313,35	8,6943E-03	2,1736E-05	0,52
z6-4	413,08	2,0321E-02	5,0804E-05	0,63
z7-4	362,33	1,3603E-02	3,4007E-05	0,45
z8-4	385,63	1,6467E-02	4,1169E-05	0,58
z9-4	443,94	2,5317E-02	6,3292E-05	0,50
z10-4	545,46	4,7338E-02	1,1834E-04	0,62
z11-4	358,53	1,3170E-02	3,2924E-05	0,45
z12-4	405,7	1,9232E-02	4,8081E-05	0,78

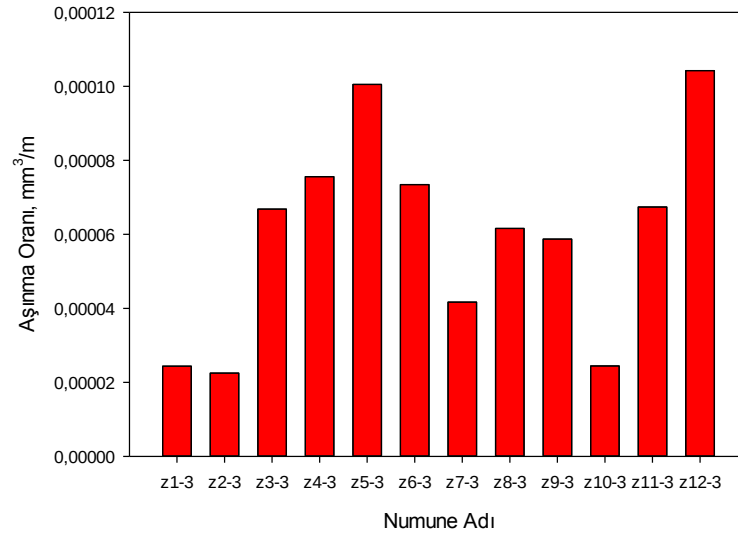
Aşınma oranları ile ilgili sonuçlar incelendiğinde Şekil 6.18.'de olduğu gibi 2N yük altında 1 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen kaplama malzemelerinde en yüksek aşınma oranı 12-1 numunesinde (20 pasoda, 300 mm mesafede) görülmüştür. Aynı şartlar altında en düşük aşınma oranı z2-1 numunesinde (10 pasoda, 300 mm mesafede) elde edilmiştir. Şekil 6.19.'da görüleceği üzere 3N yük altında 1m/s hızda yapılan aşınma deneyinde en yüksek aşınma oranı z2-2 numunesinde (10 pasoda, 300 mm mesafede) görülmüştür. Aynı şartlarda en düşük aşınma oranı z1-2 numunesinde (10 pasoda, 200 mm mesafede) görülmüştür. Şekil 6.20. incelendiğinde 3N yük altında 2 m/s hızda en yüksek aşınma oranı z12-3 numunesinde (20 pasoda, 300 mm mesafede) görülmüş olup aynı şartlarda en düşük aşınma oranı z2-3 (10 pasoda, 300 mm mesafede) numunesinde görülmüştür. Şekil 6.21. için yapılan kıyaslamada 2N yük altında ve 2 m/s hızda elde edilen verilerden yola çıkarak en yüksek aşınma oranına z10-4 numunesinde (15 pasoda, 300 mm mesafede), en düşük aşınma oranına ise z2-4 numunesinde 10 pasoda, 300 mm mesafede) rastlanmıştır.



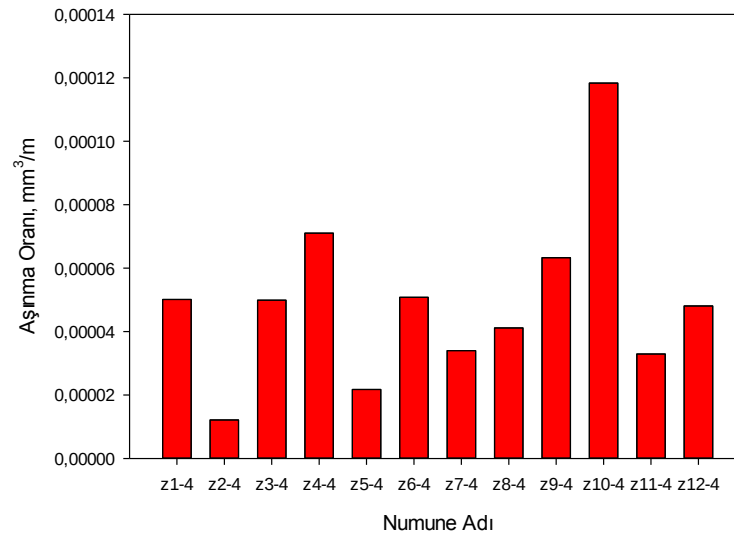
Şekil 6.19. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.



Şekil 6.20. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.



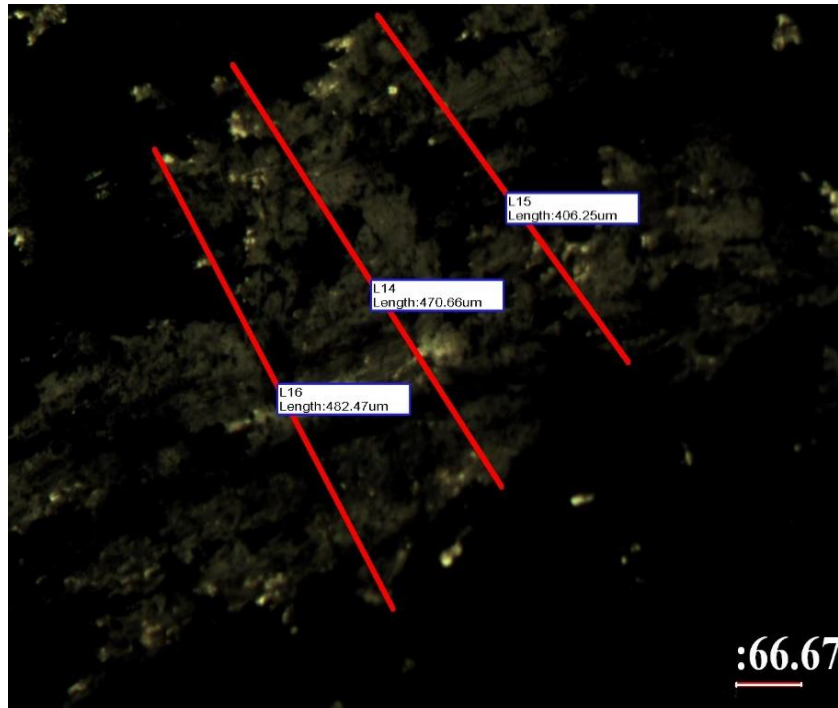
Şekil 6.21. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.



Şekil 6.22. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında elde edilen aşınma oranı grafiği.



Şekil 6.23 5x büyütmede optik mikroskop ile alınan z8-3 no lu numuneye ait aşınma iz genişliği gösterimi.



Şekil 6.24. 5x büyütmede optik mikroskop ile alınan z11-3 no lu numuneye ait aşınma iz genişliği gösterimi.

Aşınma deneyi öncesinde ve sonrasında malzeme yüzey pürüzlülük testi yapılmıştır. Tablo 6.6. ve Tablo 6.7.'deki test sonuçları incelendiğinde ve Federici ve

arkadaşlarının yaptığı çalışmaya benzer olarak aşınma öncesinde kaplanmış malzemeler için her malzeme kendi içerisinde değerlendirilirse genel olarak yüzey pürüzlülüğü artışı sürtünme katsayısında düşüşe neden olmaktadır. Tablo 6.8. ve Tablo 6.9.'da benzer durum söz konusudur [39].

Tablo 6.8. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.

Sıra No	Numune Adı	Ra (Aşınma Öncesi)	Ra (Aşınma Sonrası)	Sürtünme Katsayısı (μ)
1	z1-1	3,942	4,102	0,47
2	z2-1	3,92	2,612	0,45
3	z3-1	1,572	0,151	0,46
4	z4-1	4,194	3,024	0,71
5	z5-1	2,41	3,793	0,45
6	z6-1	0,944	3,518	0,35
7	z7-1	0,251	3,345	0,42
8	z8-1	4,763	2,245	0,63
9	z9-1	8,637	5,768	0,37
10	z10-1	5,264	1,501	0,70
11	z11-1	0,368	3,692	0,37
12	z12-1	4,576	3,158	0,65

Tablo 6.9. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.

Sıra No	Numune Adı	Ra (Aşınma Öncesi)	Ra (Aşınma Sonrası)	Sürtünme Katsayısı (μ)
1	z1-2	4,678	3,958	0,66
2	z2-2	3,342	4,004	0,43
3	z3-2	4,061	4,356	0,35
4	z4-2	4,842	5,473	0,38
5	z5-2	5,823	6,003	0,15
6	z6-2	4,76	5,288	0,42
7	z7-2	5,55	5,189	0,59
8	z8-2	4,322	4,001	0,67
9	z9-2	6,944	6,726	0,41
10	z10-2	3,061	2,960	0,72
11	z11-2	7,788	5,458	0,38
12	z12-2	2,795	3,710	0,83

Tablo 6.10. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.

Sıra No	Numune Adı	Ra (Aşınma Öncesi)	Ra (Aşınma Sonrası)	Sürtünme Katsayısı (μ)
1	z1-3	5,305	6,120	0,41
2	z2-3	4,302	5,054	0,44
3	z3-3	6,12	5,019	0,47
4	z4-3	5,887	3,971	0,45
5	z5-3	4,354	5,250	0,33
6	z6-3	5,035	5,674	0,47
7	z7-3	3,638	4,111	0,47
8	z8-3	3,653	3,848	0,83
9	z9-3	7,138	6,717	0,52
10	z10-3	3,383	3,479	0,75
11	z11-3	6,43	6,471	0,53
12	z12-3	3,583	4,379	0,78

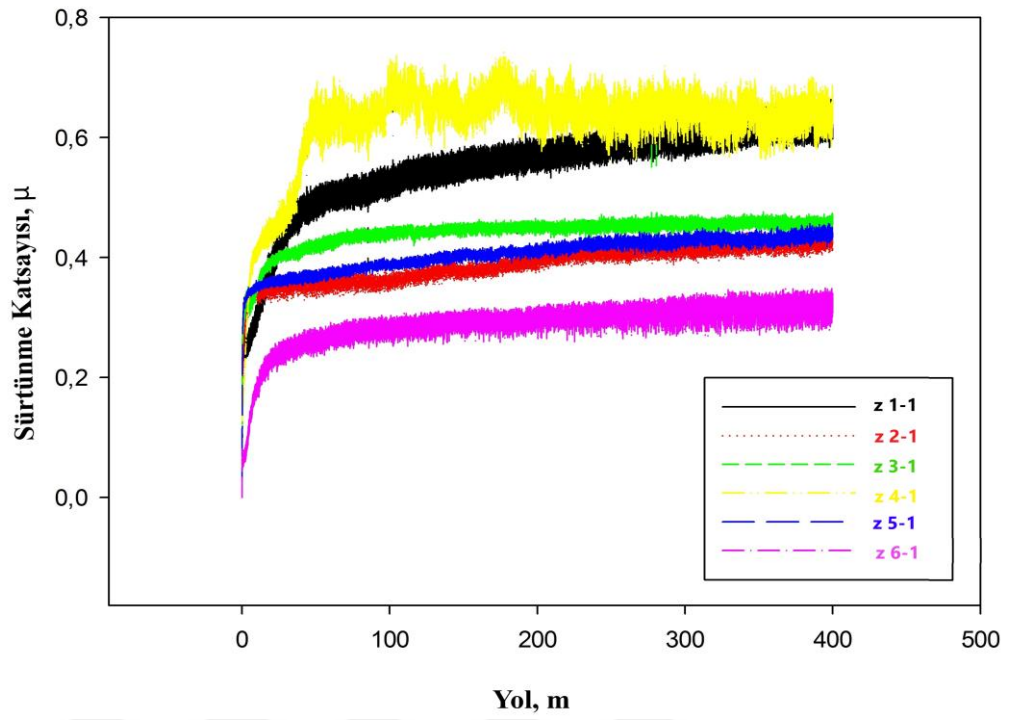
Tablo 6.11. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyi pürüzlülük test sonuçları.

Sıra No	Numune Adı	Ra (Aşınma Öncesi)	Ra (Aşınma Sonrası)	Sürtünme Katsayısı (μ)
1	z1-4	2,931	4,948	0,41
2	z2-4	4,26	4,878	0,47
3	z3-4	6,21	5,807	0,47
4	z4-4	5,748	6,813	0,45
5	z5-4	5,183	5,220	0,52
6	z6-4	4,995	4,649	0,63
7	z7-4	6,858	5,814	0,45
8	z8-4	3,561	3,893	0,58
9	z9-4	6,974	7,817	0,50
10	z10-4	3,391	3,467	0,62
11	z11-4	7,419	5,964	0,45
12	z12-4	4,603	4,194	0,78

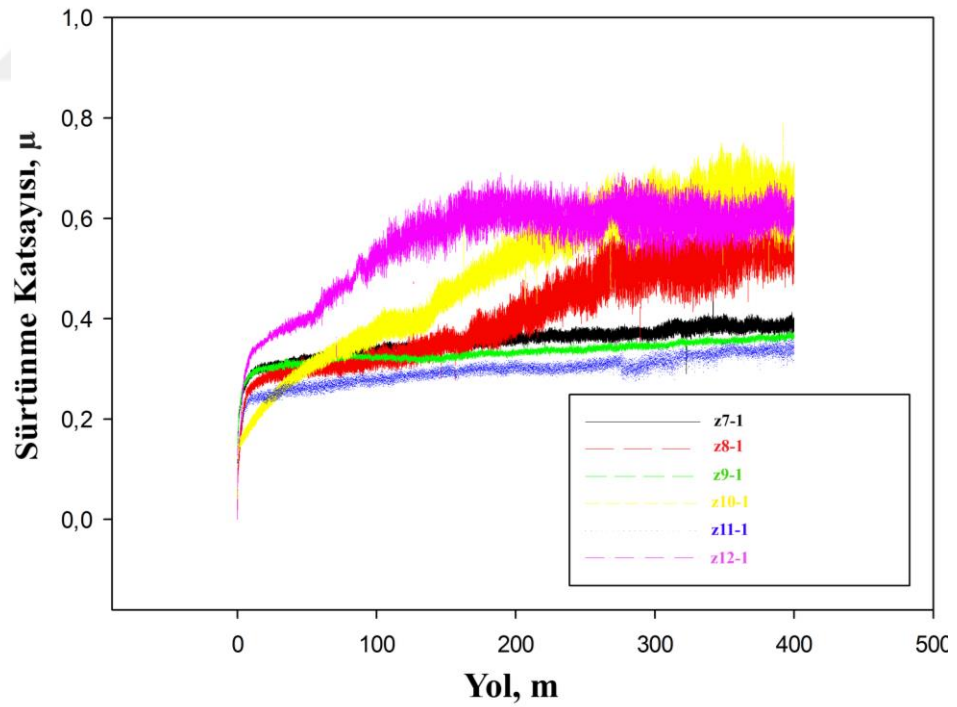
Vashishtha ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya benzer olarak Tablo 6.11. incelendiğinde toz-1 numunesi ile kaplanan malzemenin toz-2 numunesine göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Genellikle düşük sürtünme kat sayısı yüksek aşınma direnci sağladığı için toz-1 numunesi(WC12Co-Amdry 960), toz-2 numunesine (WC10Co4Cr-Amdry 960) göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir [40][37].

Şekil 6.24.'de belirtildiği üzere 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numuneler incelendiğinde z1-z6 numuneleri için en yüksek sürtünme kat sayısı 0,71 μ ile z4-1 numunesine aittir. Bu durum z4 numunesinin en düşük aşınma direncine sahip olduğuna işaretler. Aynı grafikte en yüksek aşınma direnci, en düşük sürtünme kat sayısına sahip z6 numunesine aittir [37]. Z6 numunesi toz-1 grubu kaplama olup 300 mm nozul mesafesinde 20 paso sayısı ile kaplama işlemine tabi tutulmuştu. Z4 numunesi ise 300 mm nozul mesafesinde 15 paso sayısı ile kaplanmıştı. Toz-1 grubu kaplama numunelerine ait sonuçlarda en düşük sürtünme katsayısı Şekil 6.26.'da görüleceği üzere en düşük sürtünme katsayısı z5-2 numunesine ait olup bu durum aynı zamanda z5-2 numunesinin en yüksek aşınma direncine sahip olduğunun kanıtıdır. Şekil 6.25. için 0,1 m/s hızda 2 N yük altında z11 numunesinin aynı parametrelerde aşınma ölçümü yapılan diğer numunelere göre daha başarılı sonuç ortaya koyacağı görülmektedir. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3 N yük altında aşınma testi yapılan z7-z12 numuneleri incelendiğinde 200 mm nozul mesafesindeki z11 numunesi aynı şartlar altında diğer numunelere göre daha yüksek aşınma direnci gösterecektir (Şekil 6.27.). Toz-2 grubu numuneler incelendiğinde

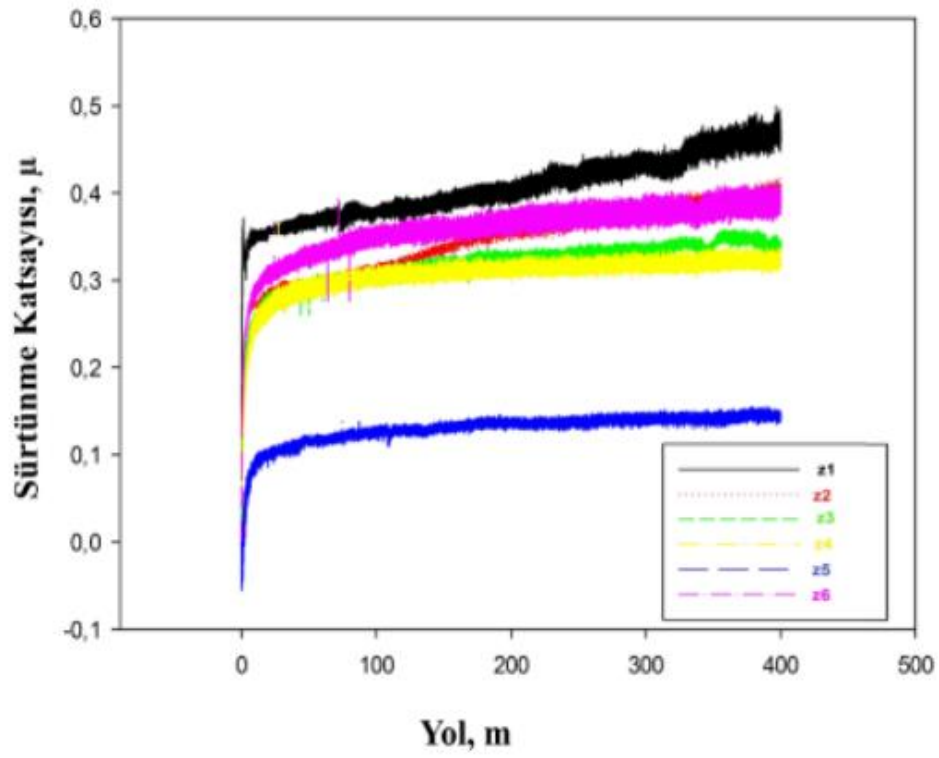
Şekil 6.29.'da görüleceği üzere en yüksek sürtünme katsayısı değerleri z8-3 numaralı numunelere aittir. Şekil 6.30. incelendiğinde Sulzer Metco 5810 ve Amdry 960 toz malzeme ile yapılan kaplamada z4-1 numaralı numune $0,71 \mu$ değeriyle $0,2 \text{ m/s}$ hızda 2N yük altında en yüksek sürtünme katsayısına sahip olup aşınma direnci en azdır yorumu yapılabilir. Aynı şartlar altında Woka3653 ve Amdry 960 tozu ile yapılan kaplamada Şekil 6.31.'de olduğu gibi z9-1 ve z11-1 numuneleri $0,37 \mu$ sürtünme katsayısı değeri ile en yüksek aşınma direncine sahip numunelerdir. Şekil 6.28. de ise $0,2 \text{ m/s}$ hızda 3 N yük altında toz-1 grubu için en yüksek aşınma direnci $0,33 \mu$ sürtünme kat sayısına sahip z5-3 numunesidir. Aynı şartlarda en düşük aşınma direnci değeri ise $0,47 \mu$ sürtünme kat sayısına sahip z3-3 numunesidir. Şekil 6.29.'da yine $0,2 \text{ m/s}$ hızda ve 3 N yük altında toz-2 grubu için değerler incelendiğinde en düşük aşınma direnci $0,83 \mu$ sürtünme kat sayısına sahip z 8-3 numunesidir. Bu şartlarda en yüksek aşınma direnci $0,47$ sürtünme kat sayısına sahip z7-3 numunesidir. Liu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada olduğu gibi yapıda bulunan WC fazlarının fazla olması kaplanmış malzeme için daha yüksek aşınma direnci sağlaması anlamına gelmektedir [41]. Toz-1 ve toz-2 grubu bu şartlar altında kıyaslandığında Sulzer Metco 5810 ve Amdry 960 tozları (toz-1 grubu) ile yapılan karışımdan daha başarılı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.



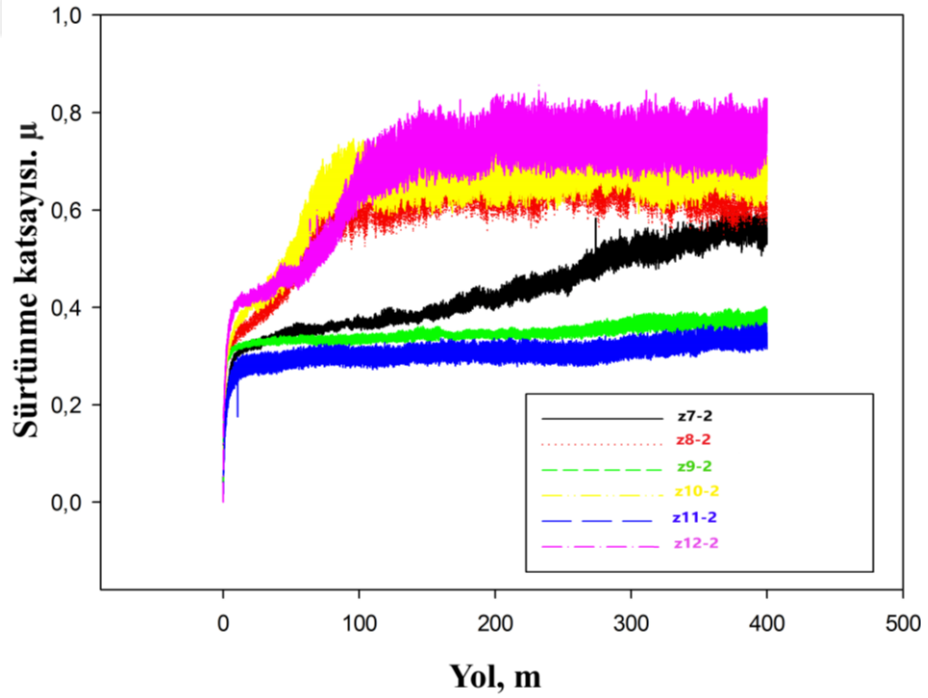
Şekil 6.25. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



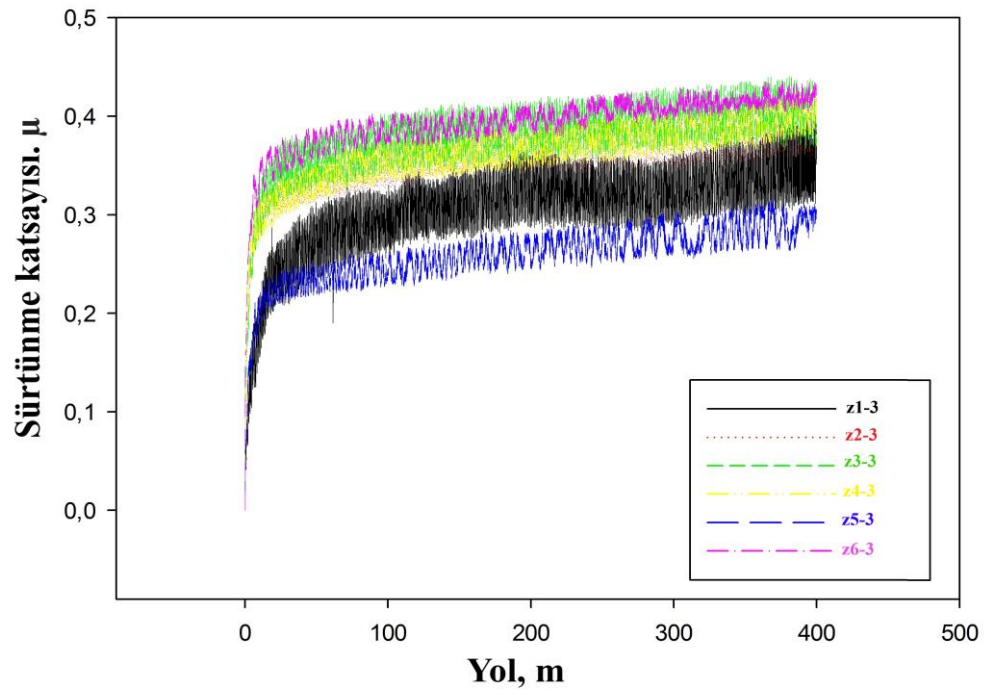
Şekil 6.26. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



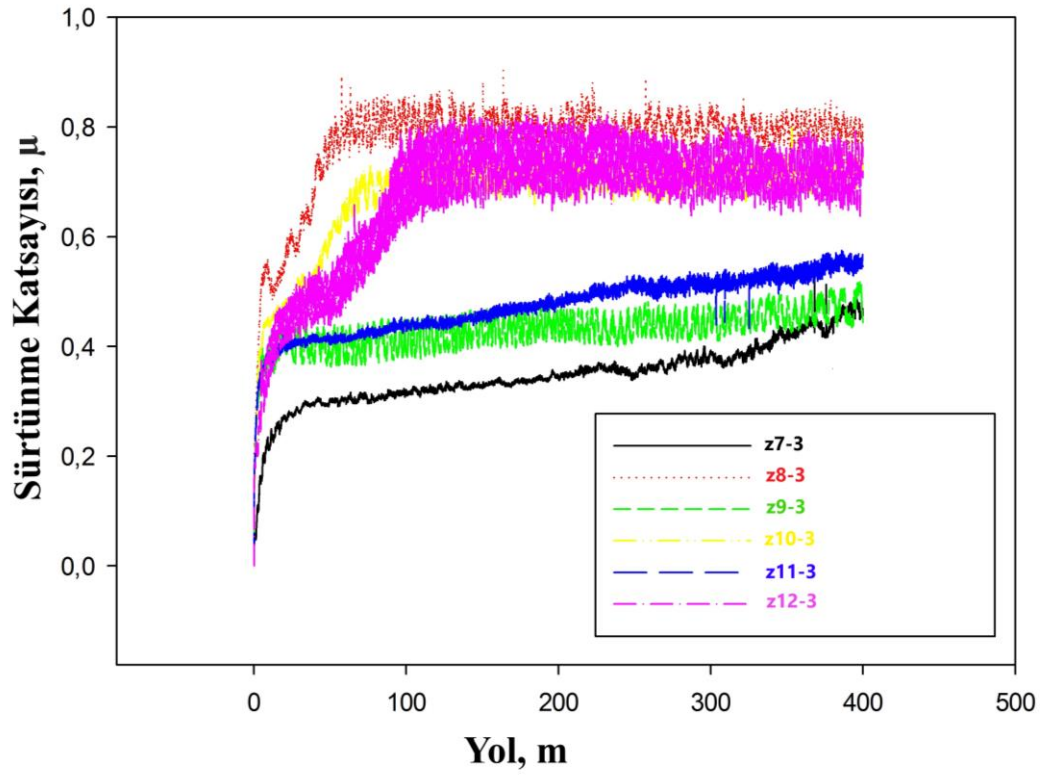
Şekil 6.27. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



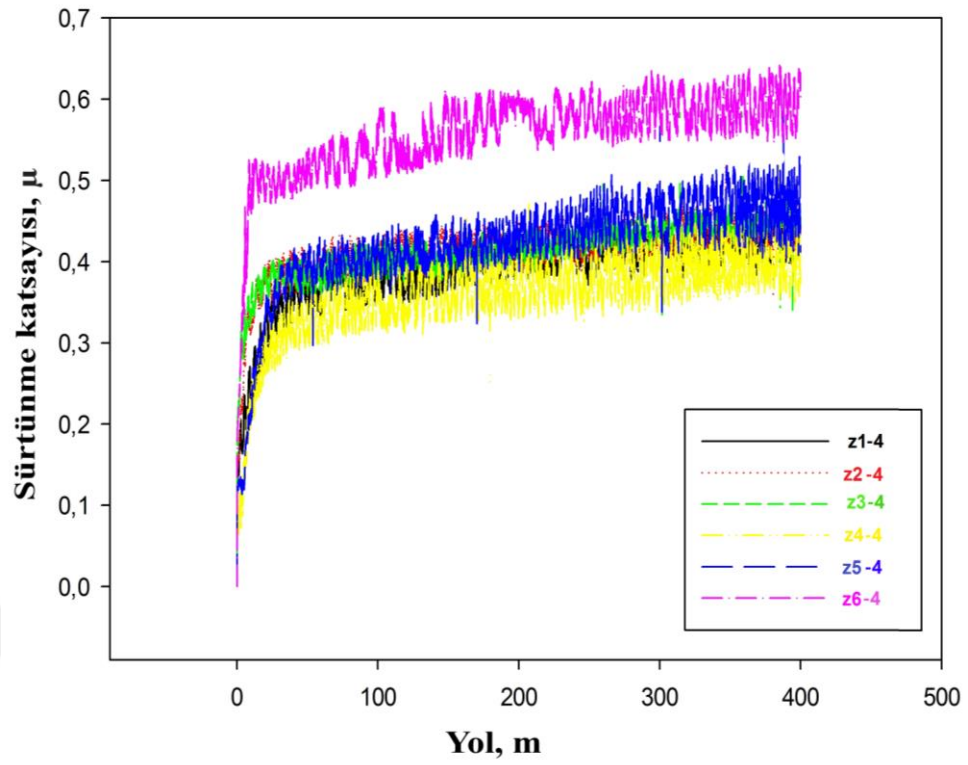
Şekil 6.28. 400 m mesafede 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



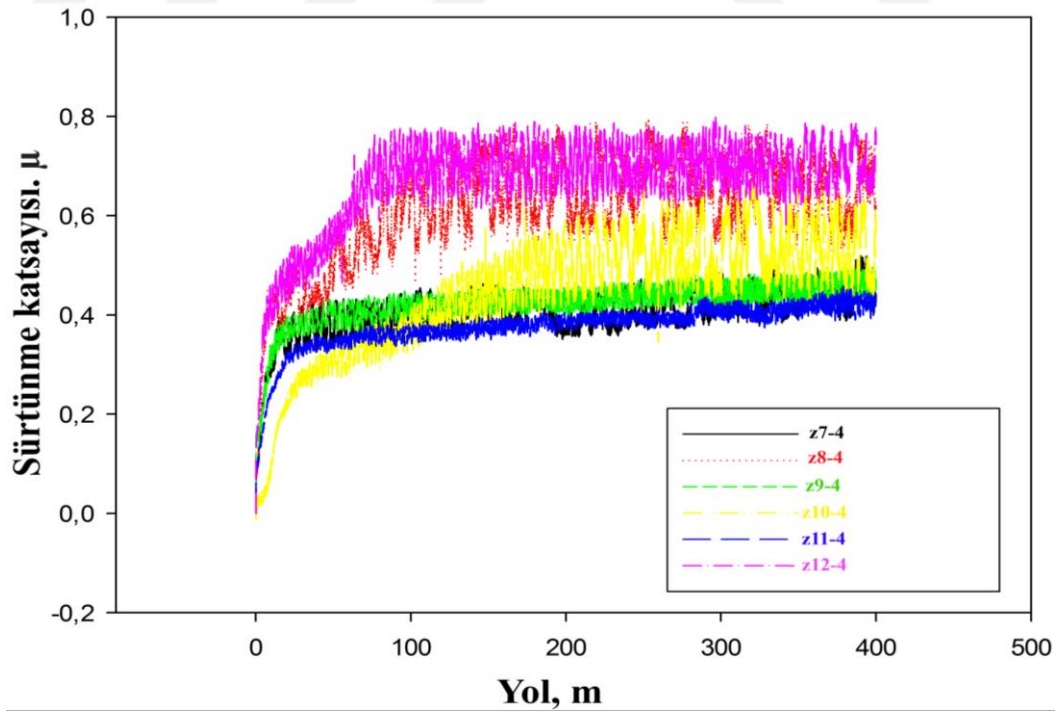
Şekil 6.29. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



Şekil 6.30. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 3N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



Şekil 6.31. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z1-z6 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.



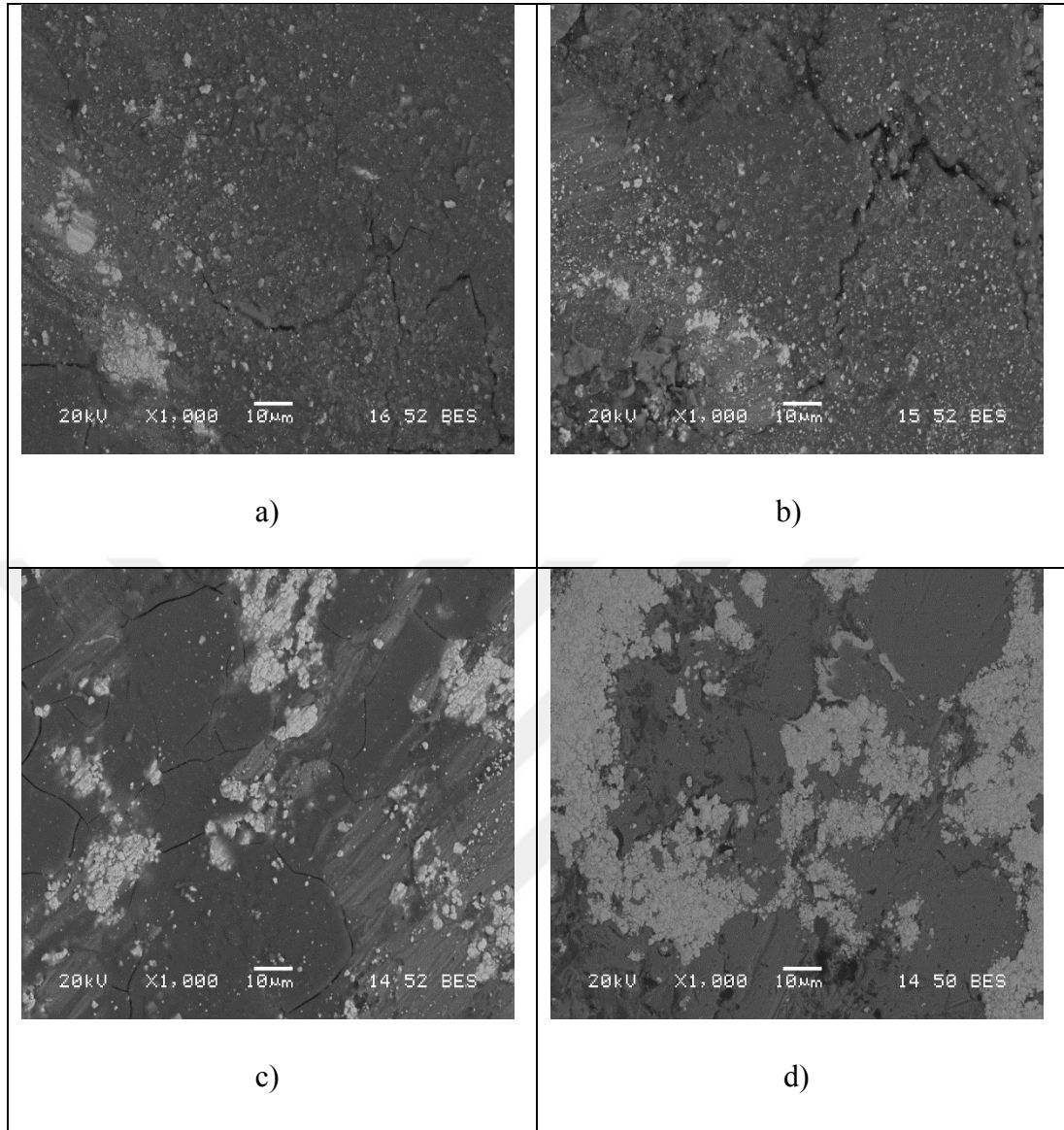
Şekil 6.32. 400 m mesafede 0,2 m/s hızda 2N yük altında aşınma sonucu z7-z12 numunelerine ait sürtünme katsayısı-yol grafiği.

6.7. Kaplanan Numunelerin Aşınma Sonrası SEM ve EDS Analizleri

Aşınma deneyi sonrası kaplama yapılan tüm numuneler için SEM görüntüleri alınarak numunelerin tamamına EDS analizi yapılmıştır. SEM görüntüsü incelendiğinde numunelerin genelinde plastik deformasyon olduğu görülmektedir. Ayrıca SEM görüntülerinde elde edilen beyaz bölgelerin çoğunun özellikle aşınma esnasında kullanılan alümina bilyeye ait parçaların koparak kaplama yüzeyine nüfuz etmesinin bir sonucu olarak yorumlanmaktadır. Ayrıca elde edilen görüntülerde abrasif aşınmanın yoğunluğu göze çarpmaktadır.

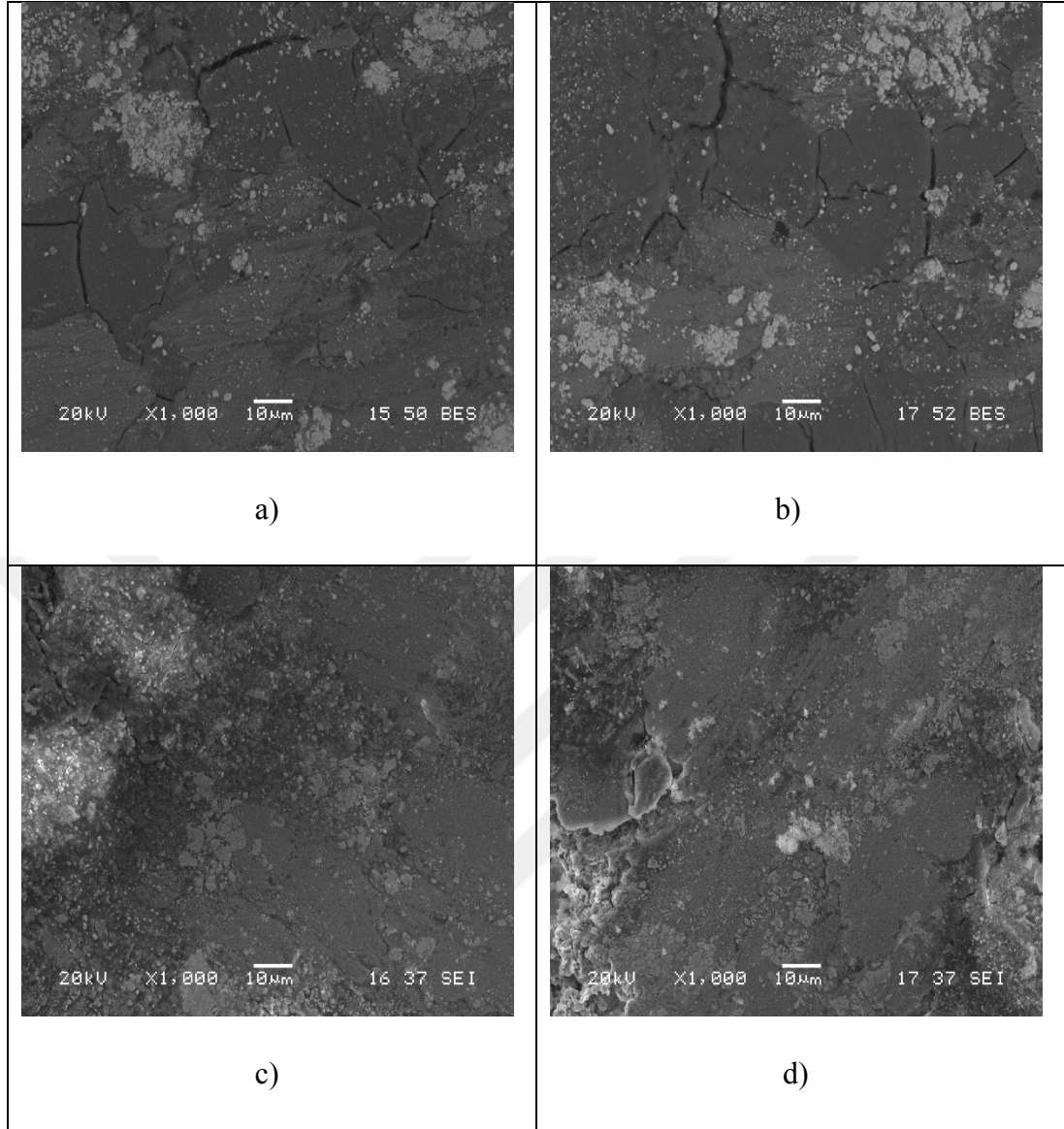
6.7.1. Aşınma sonrası SEM görüntüleri ve yorumlanması

Aşınma sonrası z-1 numunesi için sonuçlar incelendiğinde Şekil 6.22.'nin a'sındaki görüntü 0,1 m/s hızda ve 2 N yük altındaki toz-1 gurubu karışıma ait aşınma sonucu elde edilen SEM görüntüsünü ifade etmektedir. Yapıda abrasif aşınmanın varlığı söylenebilir. Şekil 6.22.'nin b'si a'dan farklı olarak 3N yük uygulandığı için daha derin bir aşınma görülmektedir. Ayrıca aşınma bölgesinde yapıda oyuk yerler mevcuttur. Şekildeki c ve d aynı hızda ancak a ve b'den daha hızlı (3 m/s) hızda aşınma deneyine tabi tutulduğu için yapıda daha fazla yivler vardır.



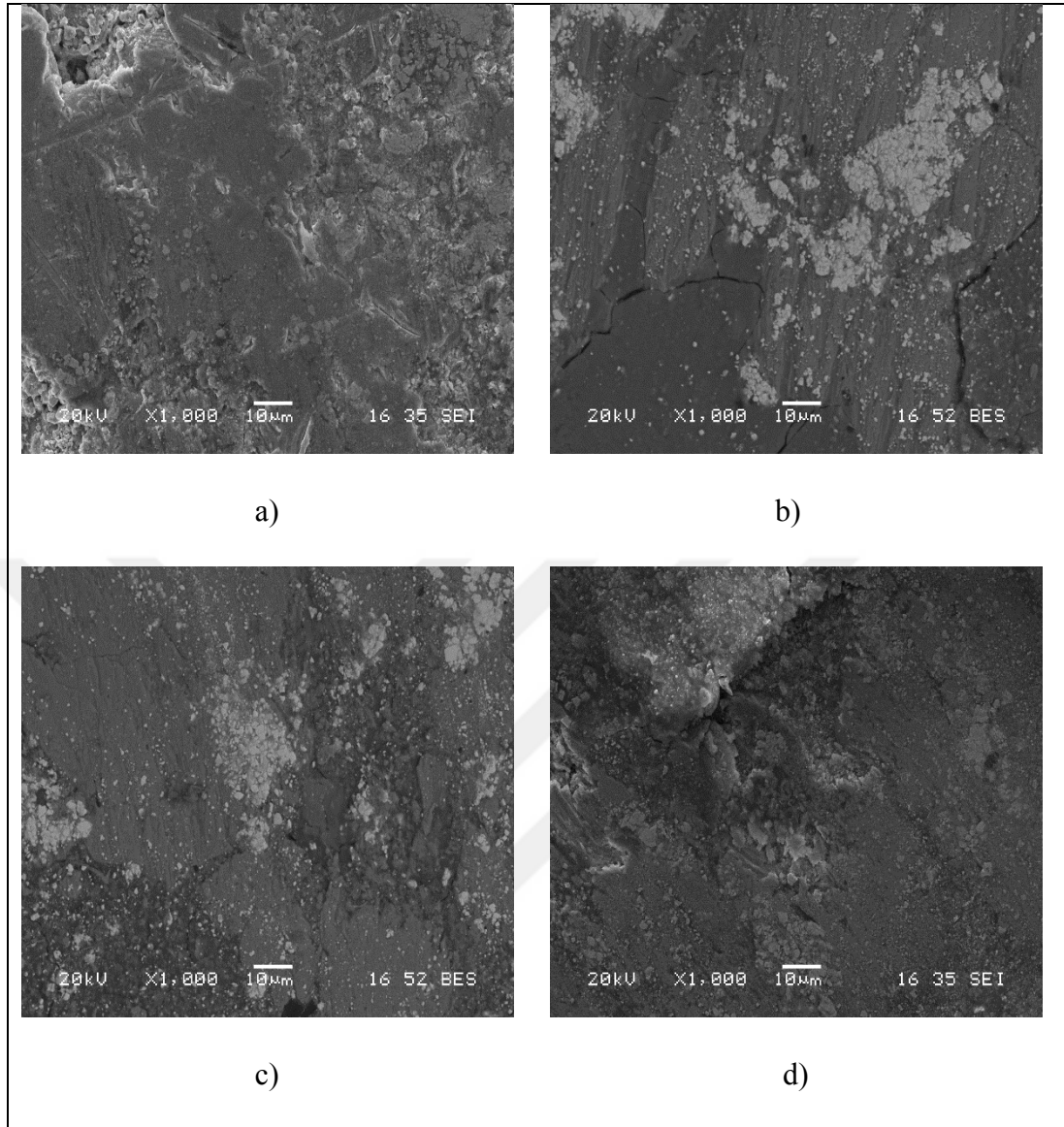
Şekil 6.24. z1-1 (a), z1-2 (b), z1-3 (c) ve z1-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

2 no'lu numuneden elde edilen görüntüler z-1 numunesine benzer olarak abrasif aşınma oluşturmuş olup ayrıca yapıda derin çatlaklar yer edinmiştir. Aşınma esnasında kullanılan alümina bilyede yapıya nüfuz ederek ve yapıdan parça kopararak abrasif aşınma örneği sergilemiştir (Şekil 6.23.).



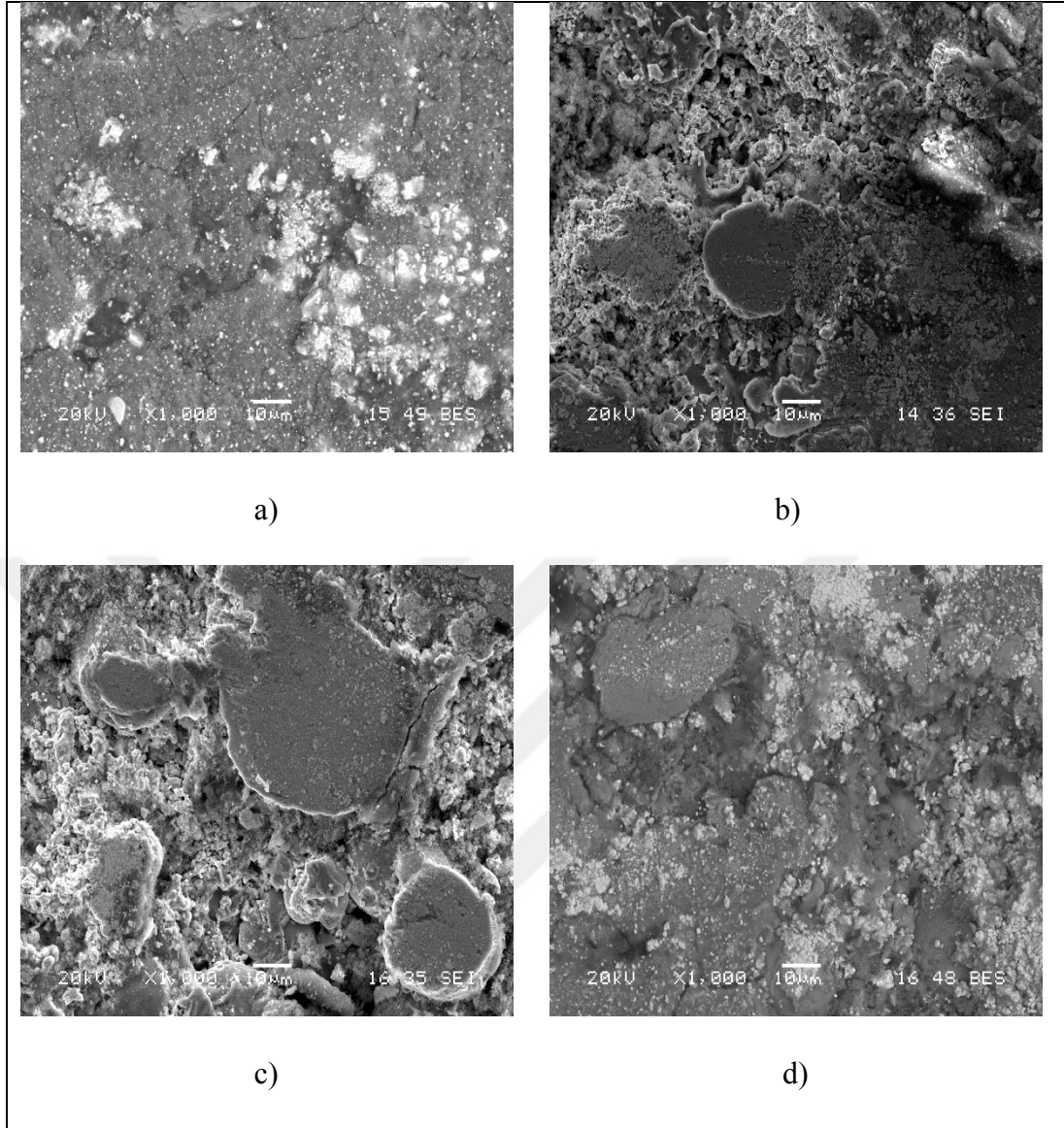
Şekil 6.34. z2-1 (a), z2-2 (b), z2-3 (c) ve z2-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.24. incelendiğinde yüzeyde plastik deformasyon varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca Şekil 6.24.'ün b'sinde a'ya göre bariz bir aşınma fazlalığı vardır. Şekil 6.24.'ün d'sinde ise aşınma hızının fazlalığından kaynaklı olarak Şekil 6.24.'ün a'sına göre bariz bir aşınma farkı vardır. Yapıda derin bir aşınma görülmektedir. Tüm parametreler göz önünde alındığında en sert yapı olarak karşımıza çıkan z-3 numunesi diğer kaplama numunelerine göre daha fazla direnç göstermiştir. Yapıda görülen aşınmalar diğer yapılara göre nispeten daha azdır.



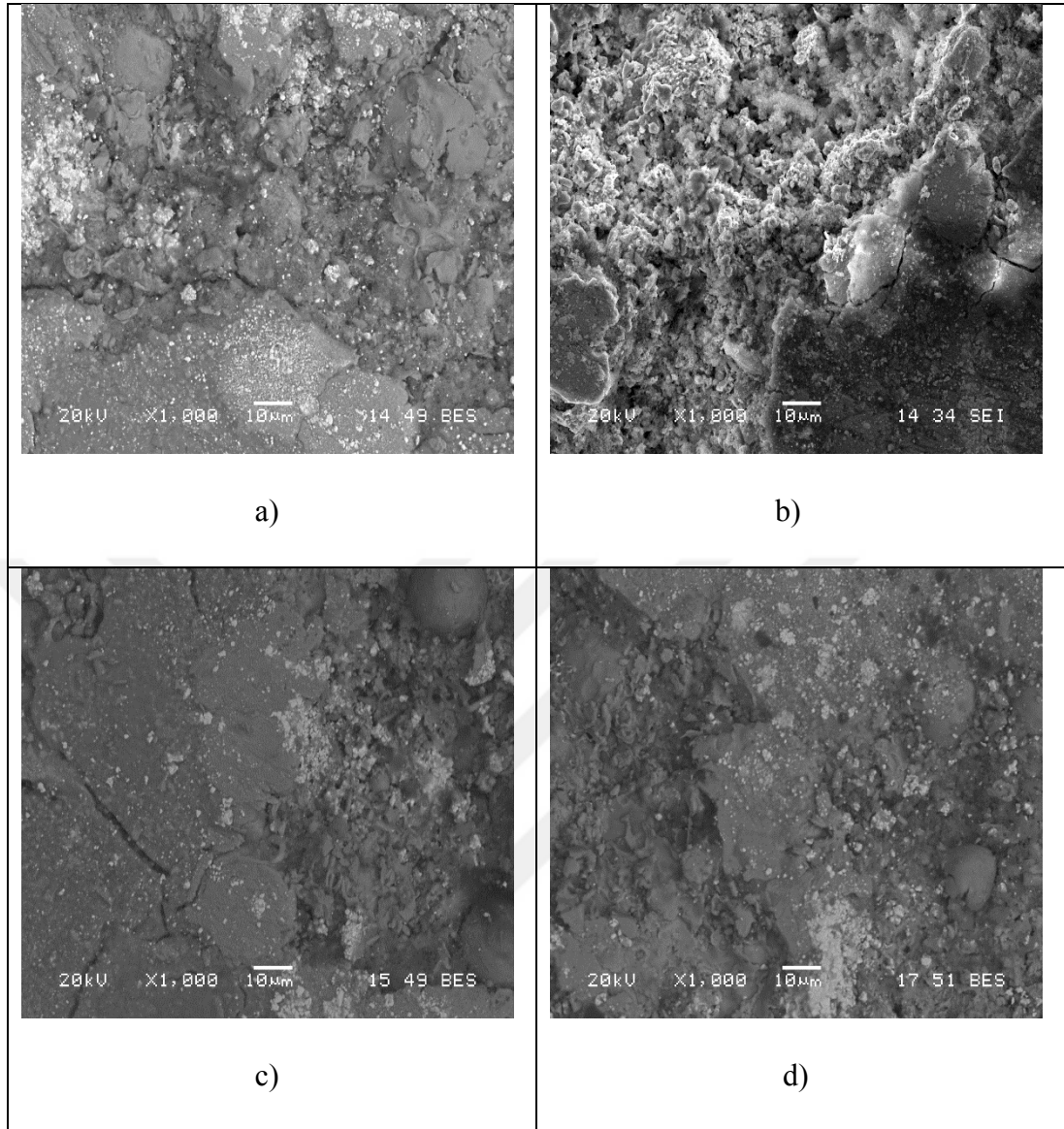
Şekil 6.35. z3-1 (a), z3-2 (b), z3-3 (c) ve z3-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Toz-1 karışımı ile kaplama yapılan z-4 numunesi için yüzeyden parça kopmaları çok fazla göze çarpmaktadır. Ayrıca bu yapıda derin oyuklar oluşmuştur. Şekil 6.25. için özellikle a'sında ciddi aşınmalar görülmektedir. Bu numune için sürtünme kat sayısı en yüksek değerlere yakın bir sonuca sahipti. Burandan da sürtünme kat sayısının fazla olmasının aşınma direnci için olumsuz bir özellik olduğu görülebilmektedir.



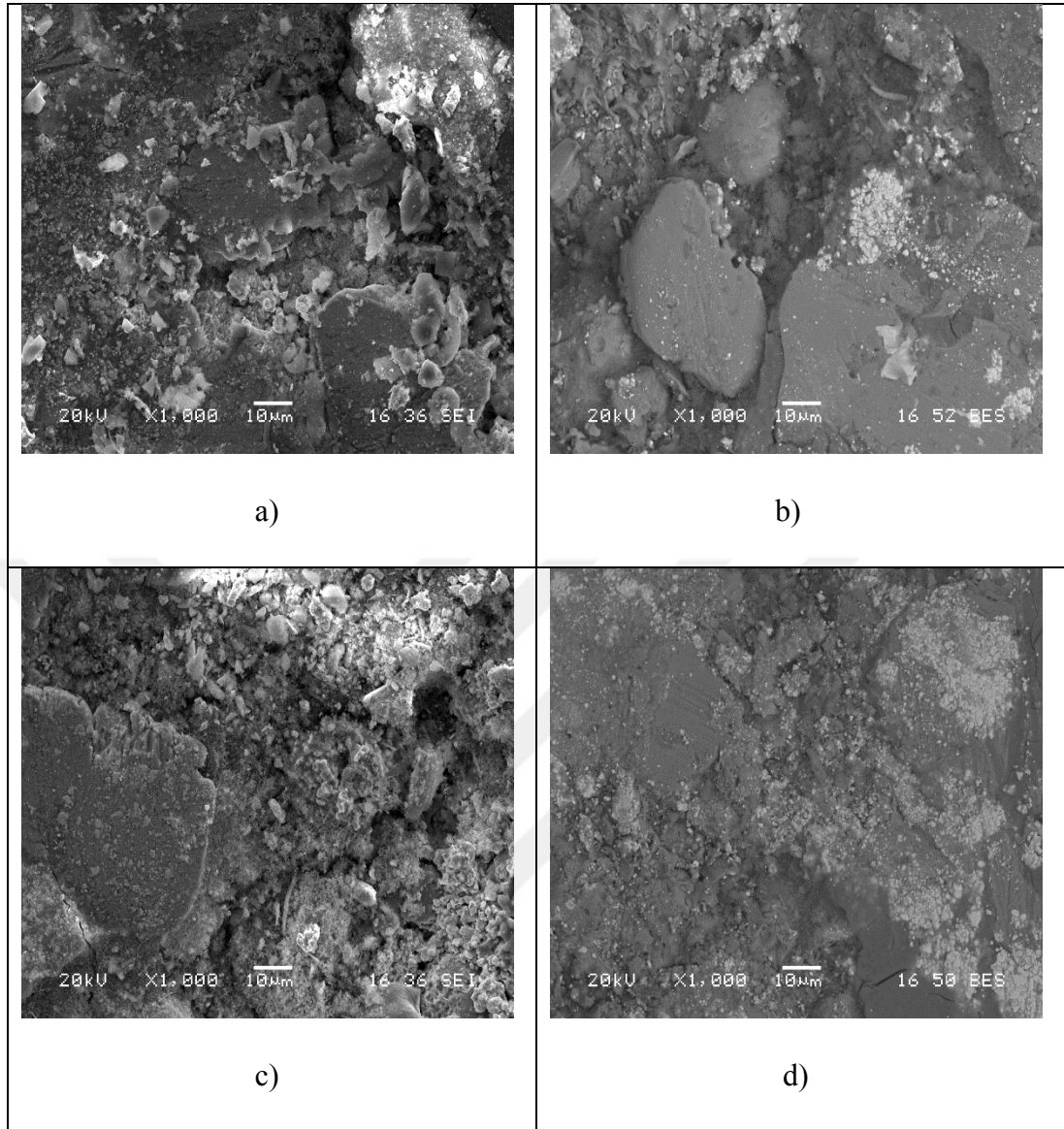
Şekil 6.36. z4-1 (a), z4-2 (b), z4-3 (c) ve z4-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

200 mm nozul mesafesi ve 20 pasoda kaplama yapılan z5-1 numunesi sertlik bakımından en düşük sertliğe sahip malzeme olmasının etkisi ile beraber yapı yüksek oranda aşınma göstermiştir. Bu durumu Şekil 6.26.'daki SEM görüntüsünden rahatlıkla görebiliriz. Şekil 6.26.'nın a'sında diğer parametrelerde yapılan aşınma sonuçlarına göre daha az aşınma görülmektedir. Bunun en büyük sebebini bu malzeme 1N yük altında ve 0,1 m/s hızda aşınma deneyine tabi tutulması ile açıklayabiliriz.



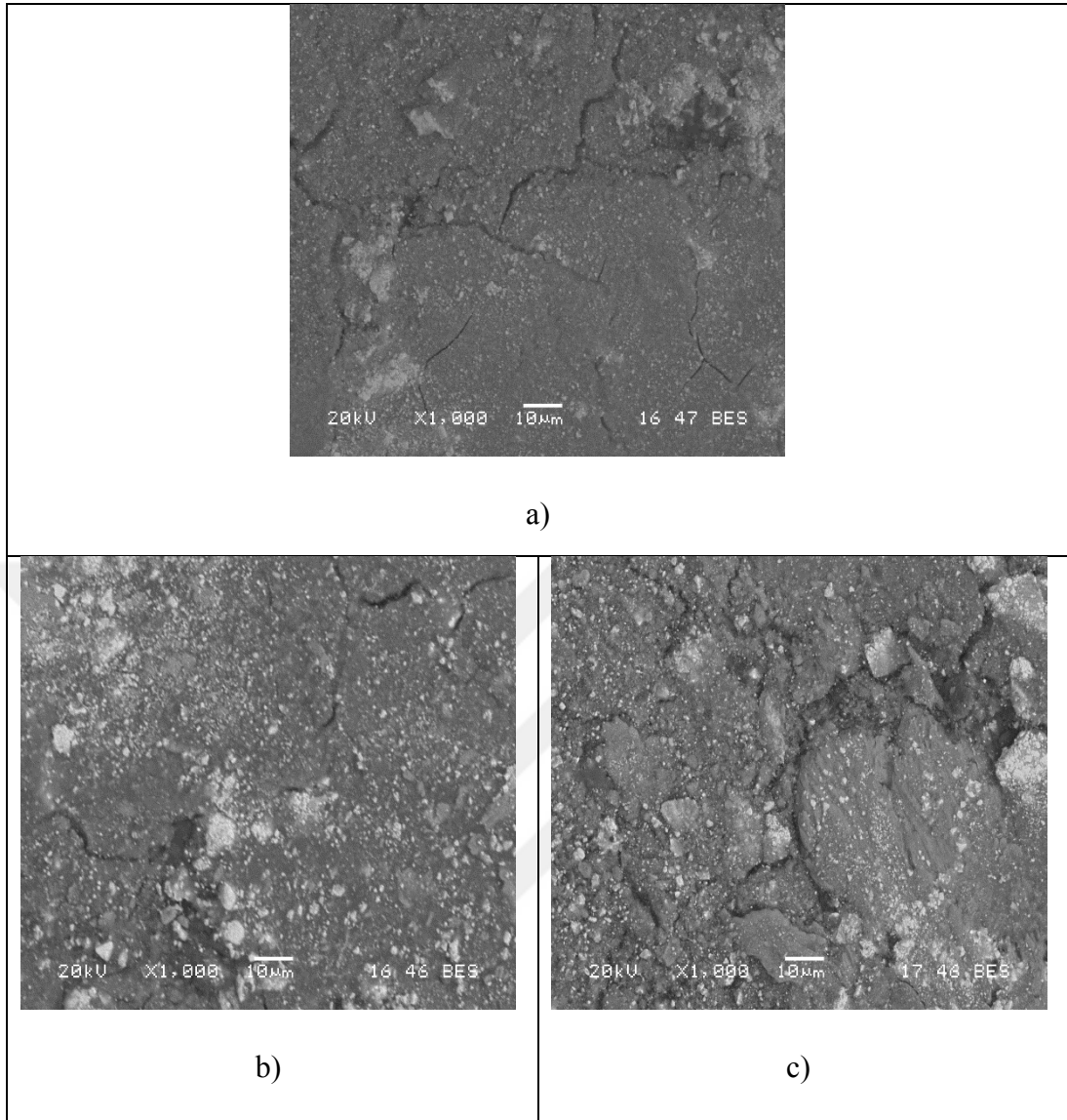
Şekil 6.3725. z5-1 (a), z5-2 (b), z5-3 (c) ve z5-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.27.'de b ve c'de görülen derin oyuklar diğer kaplamalara göre fazla yük ile aşınma deneyinin yapılmasının sonucu olarak yorumlanmaktadır. Şekil 6.27.'nin b'sini ve c'sini kıyasladığımız zaman hızı daha fazla olan z6-3'de z6-2'ye göre daha fazla parça kopmuş olup yapıda daha fazla plastik deformasyon görülmektedir.



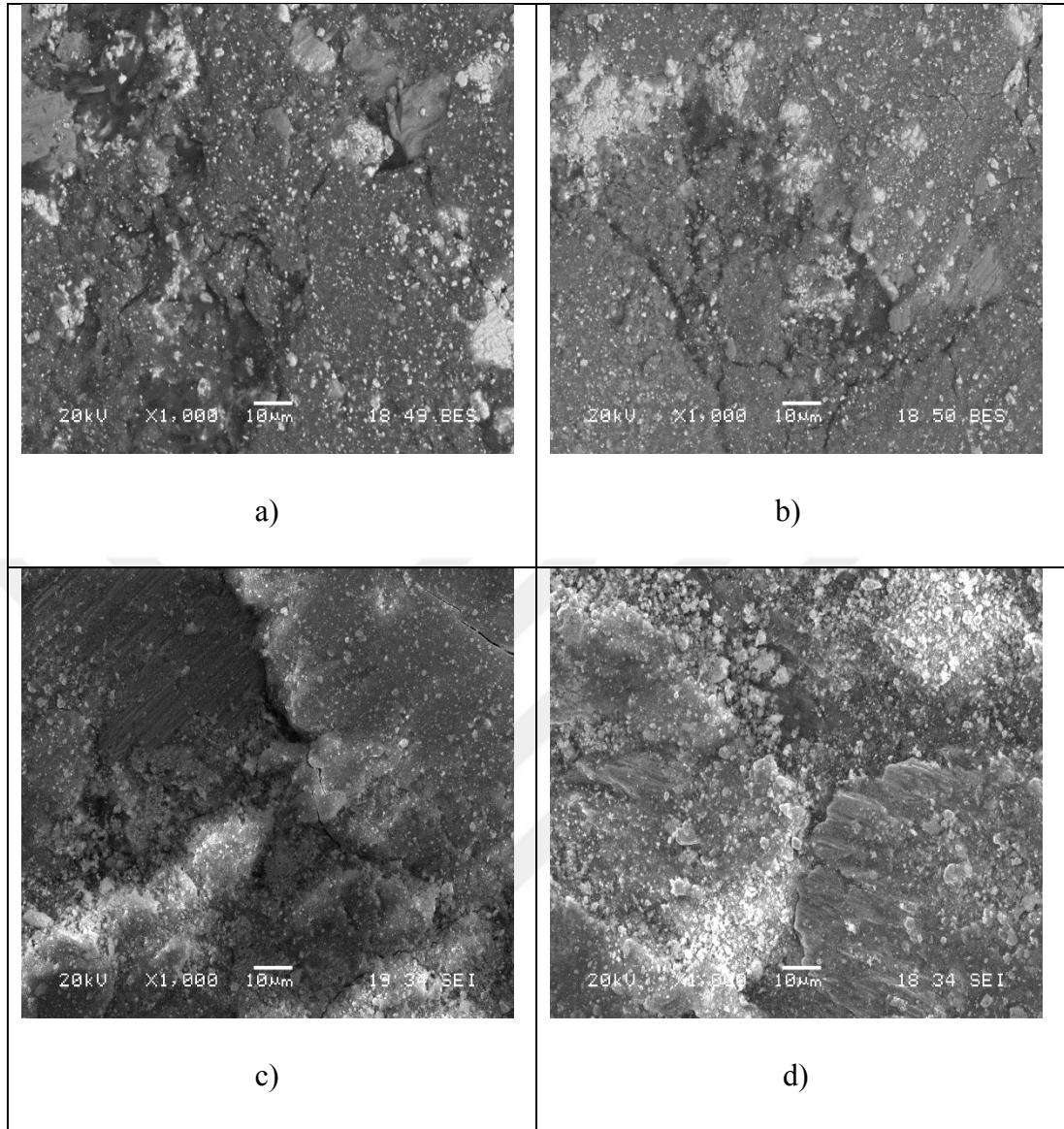
Şekil 6.38. z6-1 (a), z6-2 (b), z6-3 (c) ve z6-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.28. incelendiğinde diğer örneklerde olduğu gibi en fazla oyuk yapılar ve plastik deformasyon 0,2 N yük altında 0,2 m/s hızda aşınma deneyi yapılan z7-4 numunesinde vardır. 0,1 m/s hızda 1N yük altında aşınma deneyi yapılan kaplama malzemesinden SEM görüntüsü alınamamıştır.



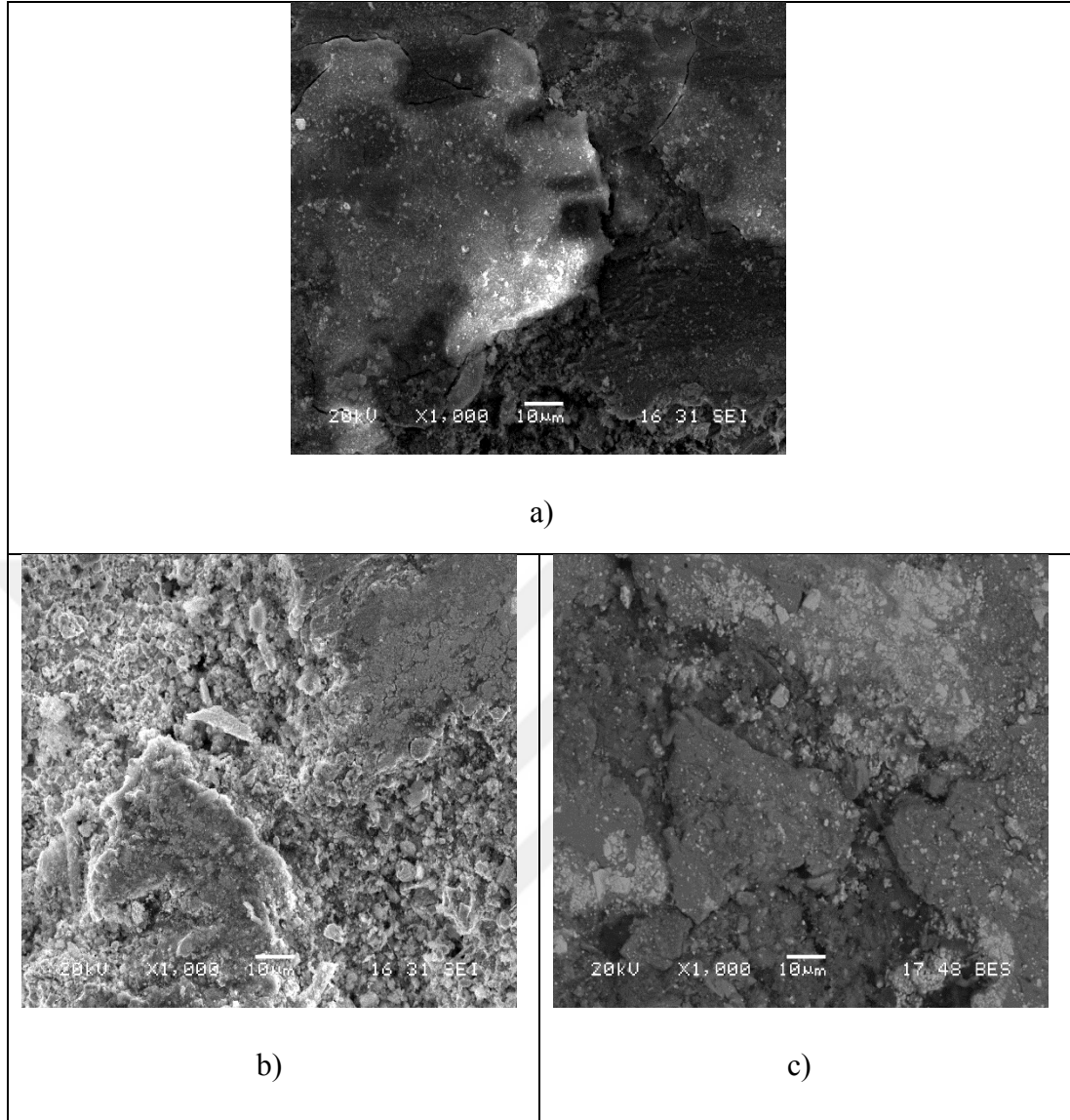
Şekil 6.39. z7-2 (a), z7-3 (b) ve z7-4 (c) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.29.'un c'sinde ve d'sinde klivaj tipi kırılmalara ait görüntüler mevcuttur. Yüzeyden parça kopması ile beraber yapıda yivli şekiller mevcuttur. Yer yer abrazif ve adhezif aşınmalar meydana gelmiştir. Yüzeyde süreksizlikler görülmektedir.



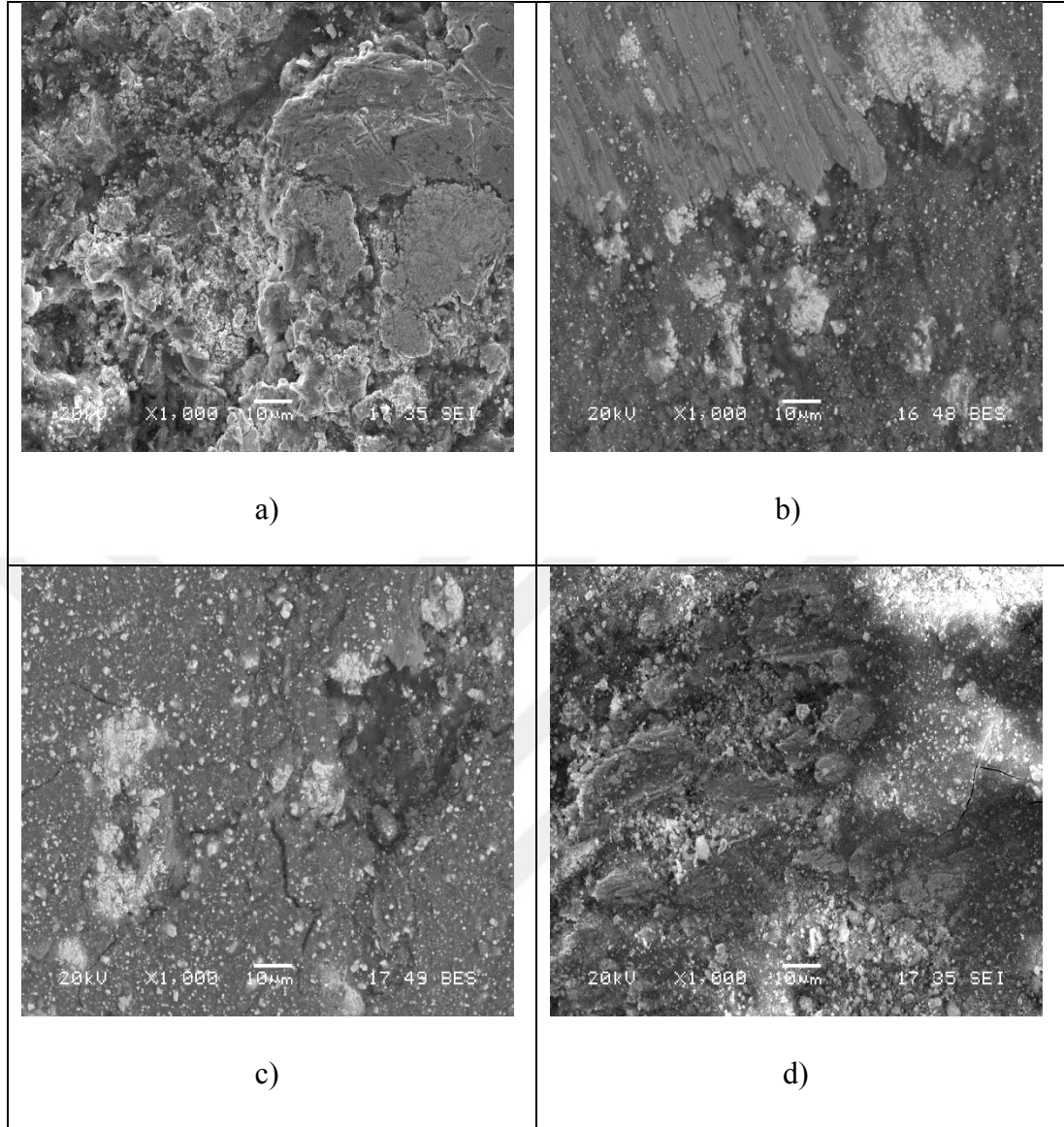
Şekil 6.40. z8-1 (a), z8-2 (b), z8-3 (c) ve z8-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Aşınma deneyi öncesi pürüzlülük ölçümü yapılan z-9 numunesi aşınma sonrasında ciddi oranda pürüzlü bir yapı almıştır. Bu yapıda kızaklama, abrazif aşınma izleri görülmektedir. Bazı yerlerde abrazif aşınma kaynaklı malzeme kayıpları meydana gelerek aşınma ürünleri yüzeye sıvanmıştır (Şekil 6.30.).



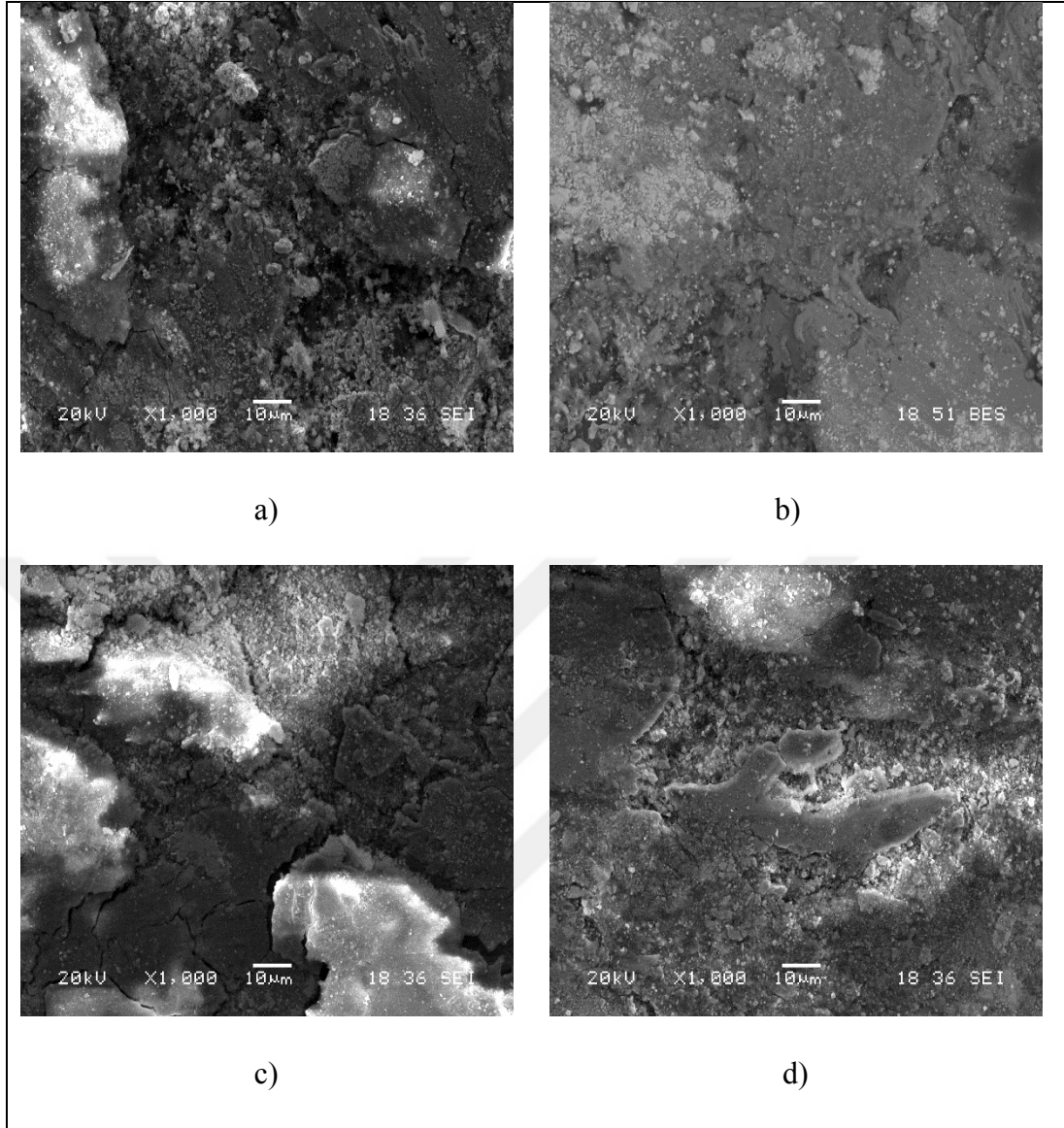
Şekil 6.41. z9-2 (a), z9-3 (b) ve z9-4 (c) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Toz-2 grubuna ait z-10 numunesi için Şekil 6.31.'in c'si incelendiğinde çok derin bir aşınma görüntüsü vardır. Bu yapı hem yüksek yük hem de yüksek hızda aşınma deneyine tabi tutulduğu için yüzeyde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Şekil 6.31.'in b'sinde ise aşınma yolu rahatlıkla görülebilmektedir.



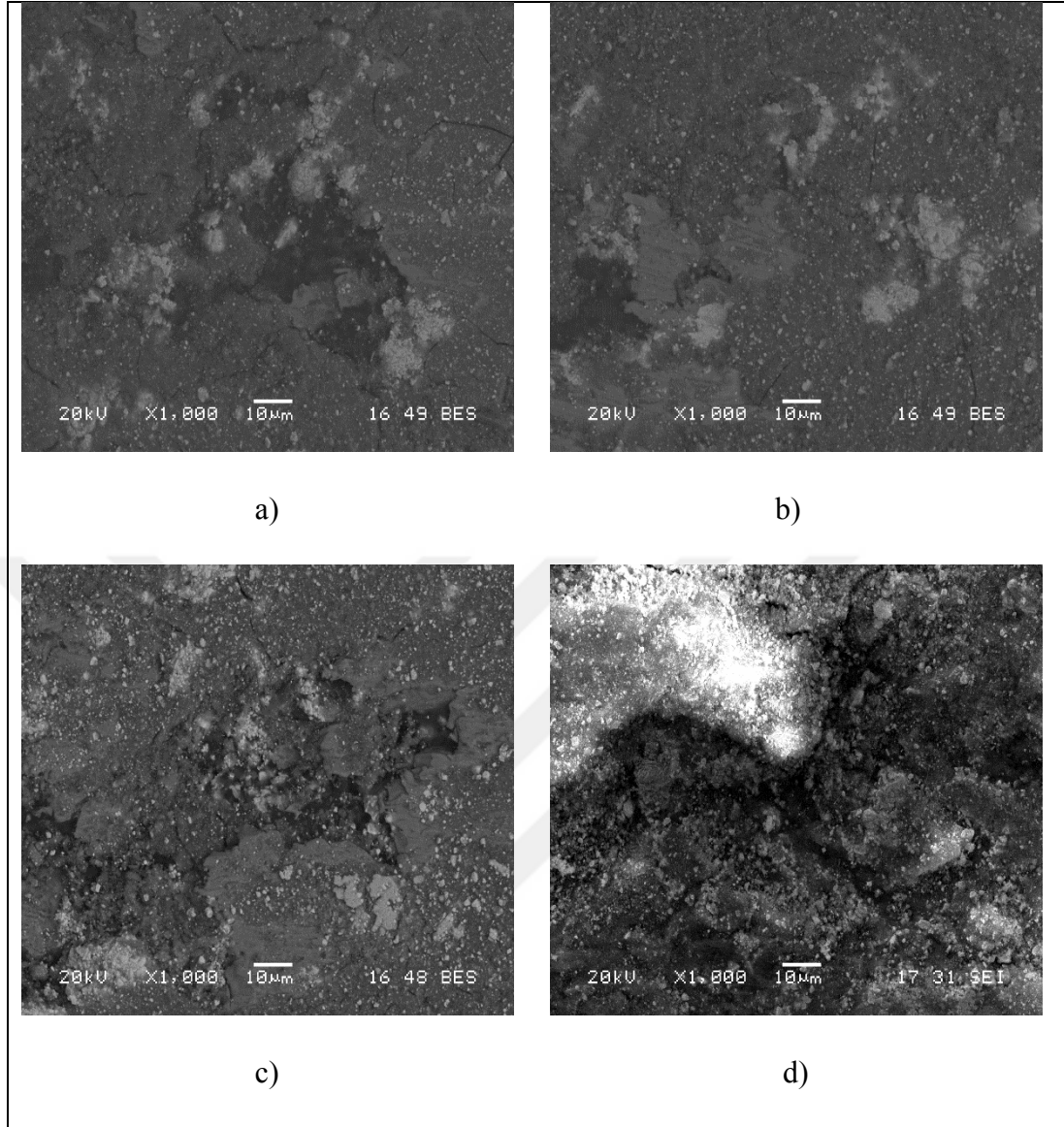
Şekil 6.42. z10-1 (a), z10-2 (b), z10-3 (c) ve z10-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

Literatürdeki çalışmaya benzer olarak Şekil 6.32.'deki yapıda parça kopmaları görülmektedir. Parça kopmalarının oluşumu başlangıçta yüzeye bir basınç uygulanması sonucunda yapıda çatlaklar meydana gelir ve bu çatlaklar büyüyerek yapının kırılmasına yol açar. Kırılma olayının devamında yapıdan bazı parçalar koparak Şekil 6.32.'nin a'sındaki gibi yapıda oyuklar meydana gelir [42].



Şekil 6.26. z11-1 (a), z11-2 (b), z11-3 (c) ve z11-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

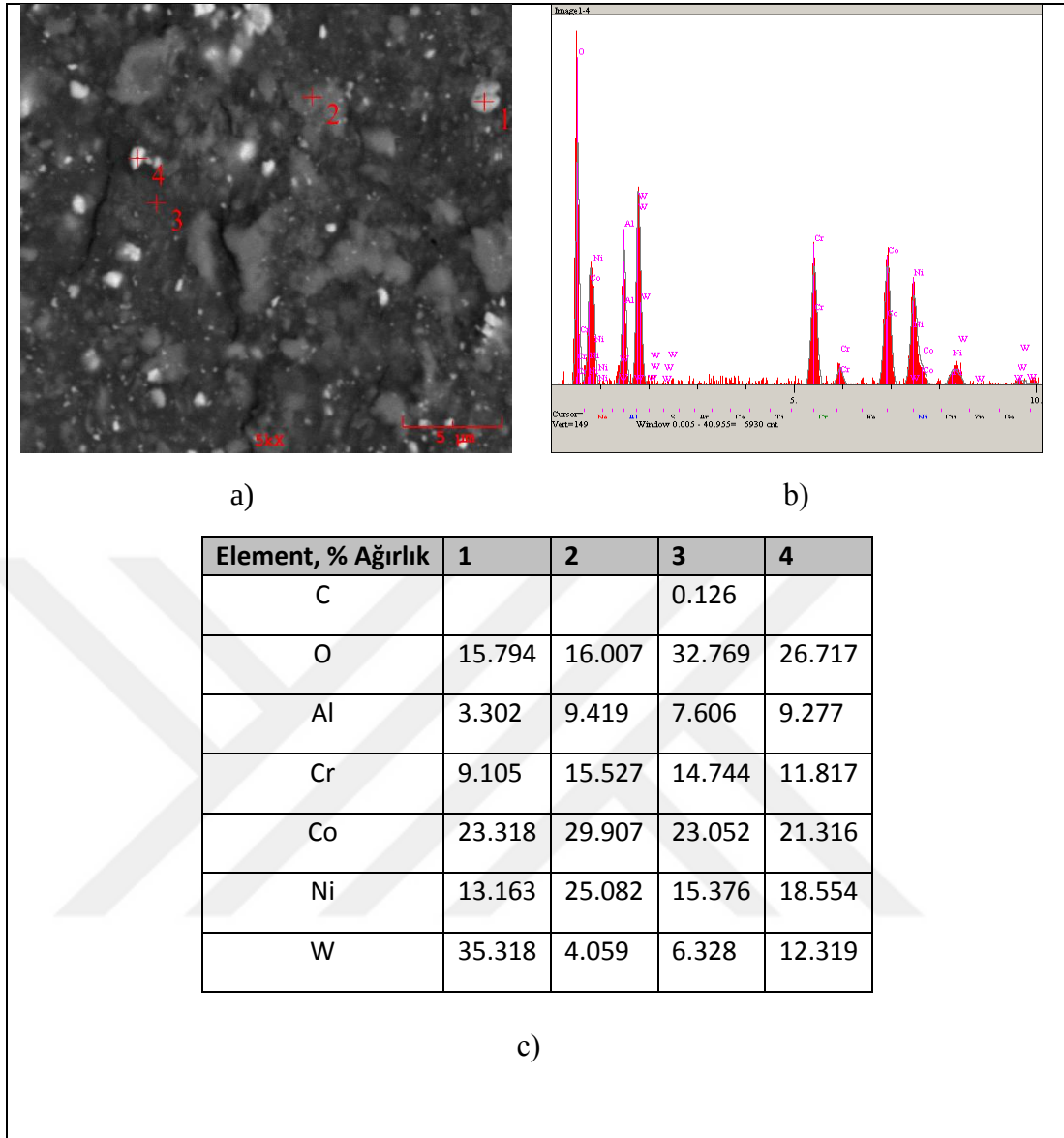
Şekil 6.33.'de elde edilen görüntüler literatürdeki aşınma türüne benzer olarak kazımalı bir aşınmanın oluştuğunun göstergesidir. Yüzeyde yivler meydana gelerek derin oyuklar gözlemlenmiştir [43].



Şekil 6.44. z12-1 (a), z12-2 (b), z12-3 (c) ve z12-4 (d) numunelerine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri.

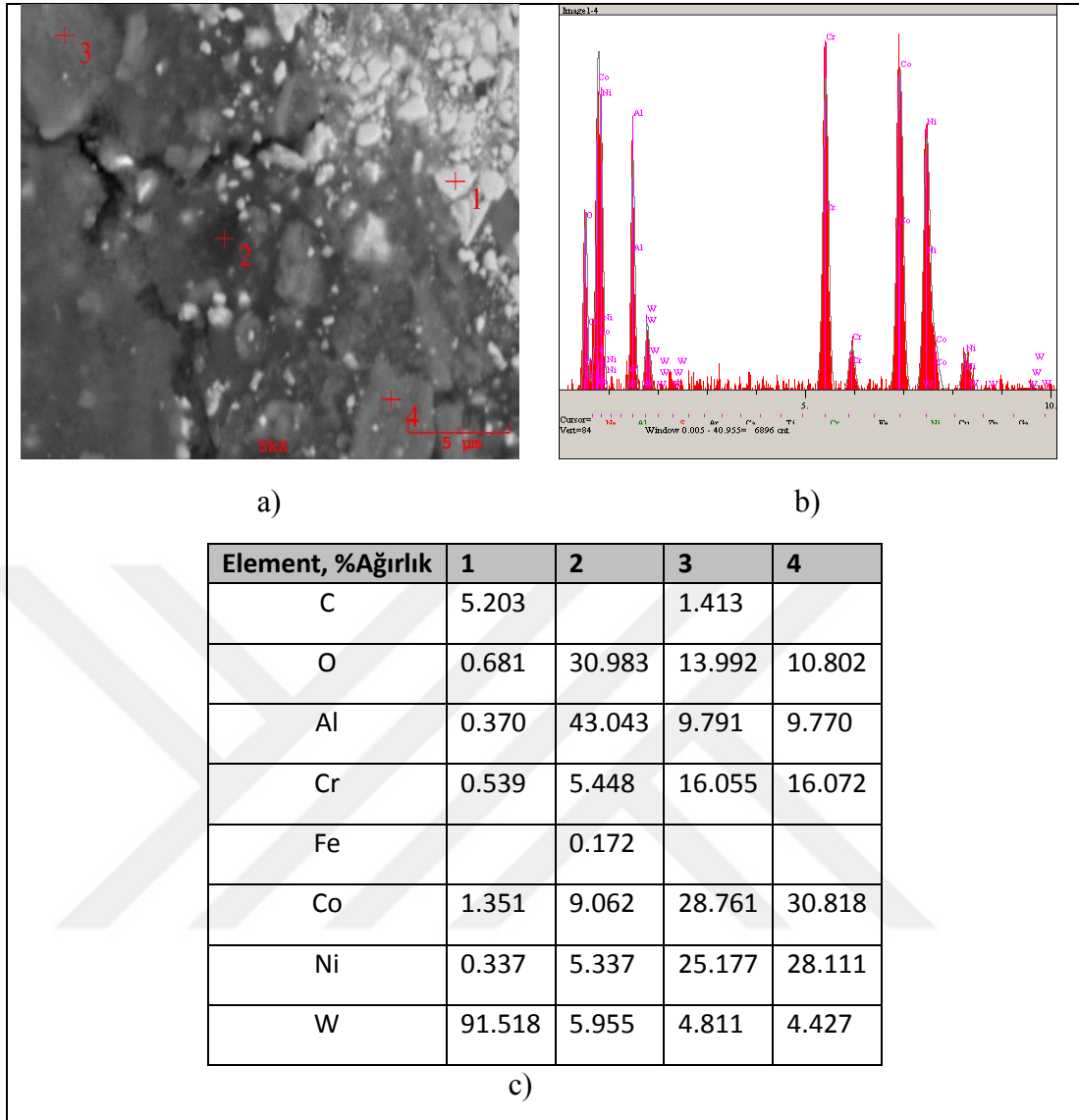
6.7.2. Aşınma sonrası EDS analizi ve yorumlanması

EDS analizi detaylı olarak incelendiğinde yapıda oksijen ve alüminyumun belirginliği ortaya çıkmıştır. Bu durumun temel sebebi olarak aşınma deneyinde alümina bilyenin kullanılması olarak ifade edilebilir. Ayrıca oksijenin varlığı yapıda oksitlenmenin oluşmasına da işaretler. Şekil 6.34.'de de görüleceği gibi z1-1 numunesi için yapıda fazla miktarda oksijen mevcuttur. Ayrıca bu yapıda diğerlerinden farklı olarak karbon elementine de rastlanmıştır. Bu kaplama malzemesinde karbonun WC yapısından geldiği düşünülmektedir.



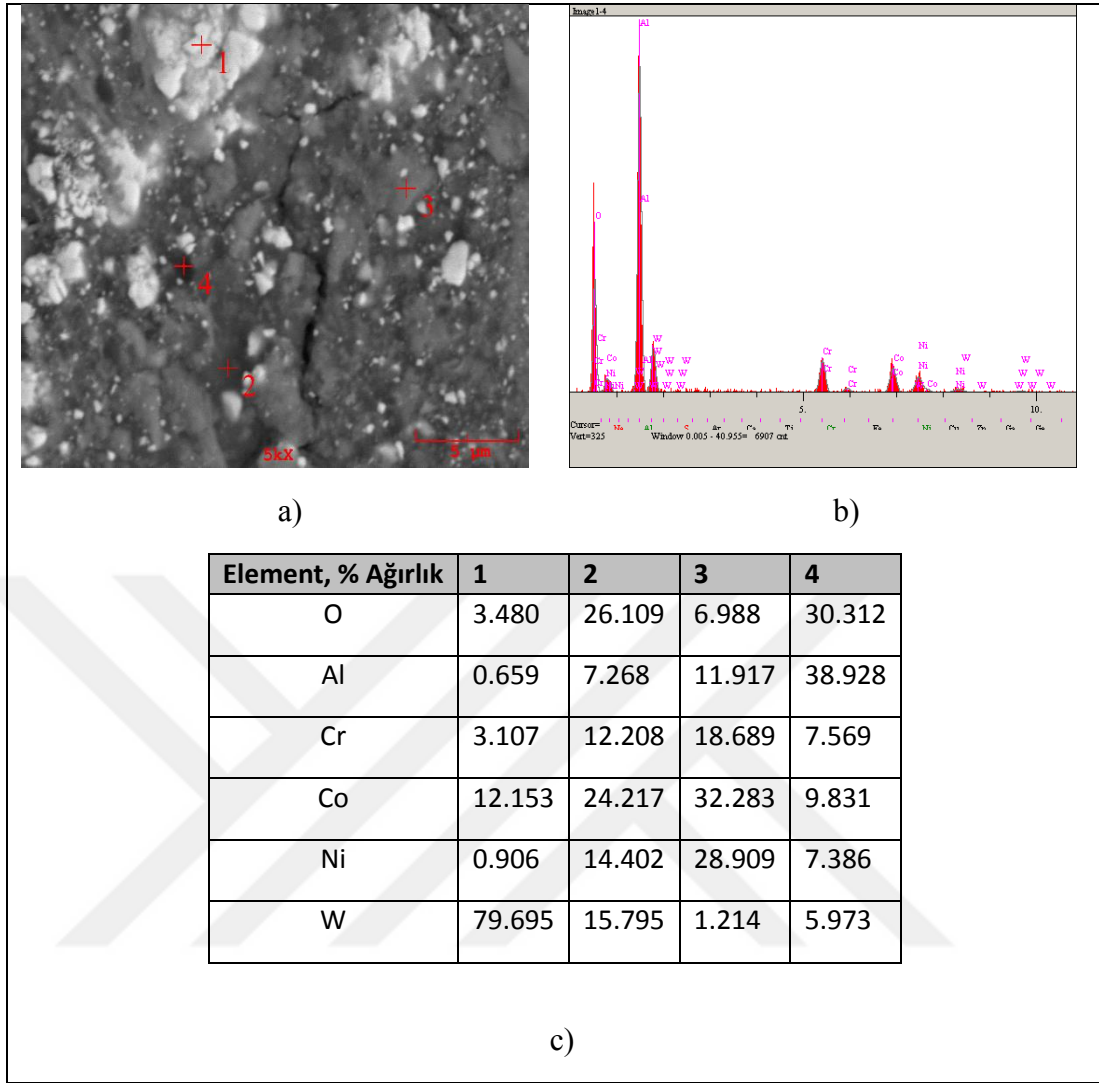
Şekil 6.45. Aşınma deneyi sonrası z1-1 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.35. incelendiğinde mat bir yapının hakim olduğu ve bölgenin oksitli bir hal aldığı görülmekte olup 2 no'lu bölgeden alınan EDS görüntüsü de bu durumu desteklemektedir. Ayrıca 2 no'lu bölgeyi aşınma esnasında kullanılan bilye ile temasın en yoğun olduğu bölge olduğunu da söyleyebiliriz. 3 no'lu bölgede oksit varlığı ile beraber yapıyı 2 no'lu bölgeye göre biraz daha parlak olmasının krom elementinin varlığından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



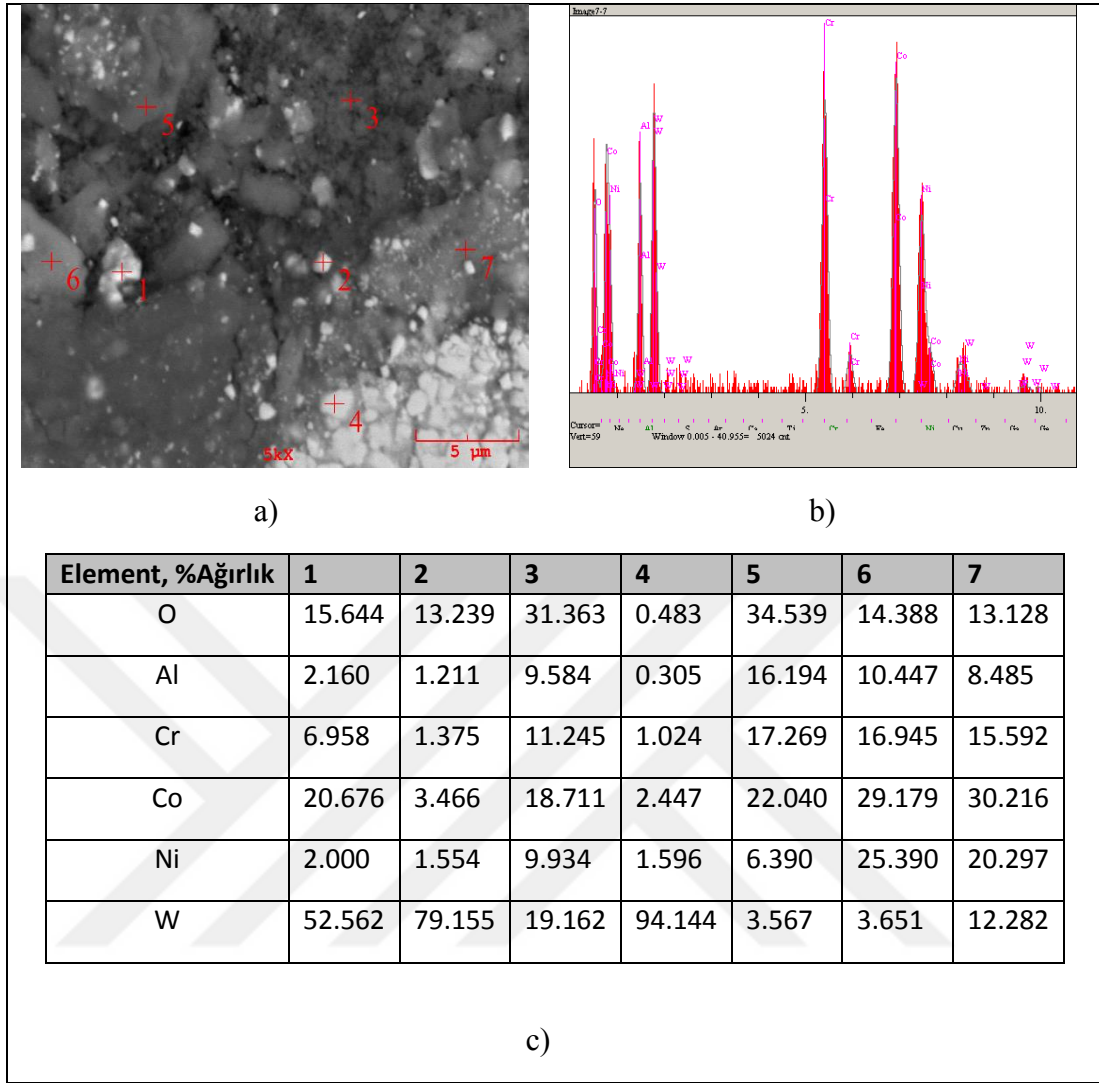
Şekil 6.46. Aşınma deneyi sonrası z2-2 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.36.'daki z3-3 numunesine HVOF işlemleri 200 mm mesafede 15 pasoda yapılmıştır. Bu kaplama malzemesi için 1 no'lu bölgede mevcut W elementi parlak bir yapı kazandırmıştır. Yapıdaki kaplama dağılımının nispeten homojen olması kaplama numuneleri içinde en sert yapının olmasının göstergesidir.



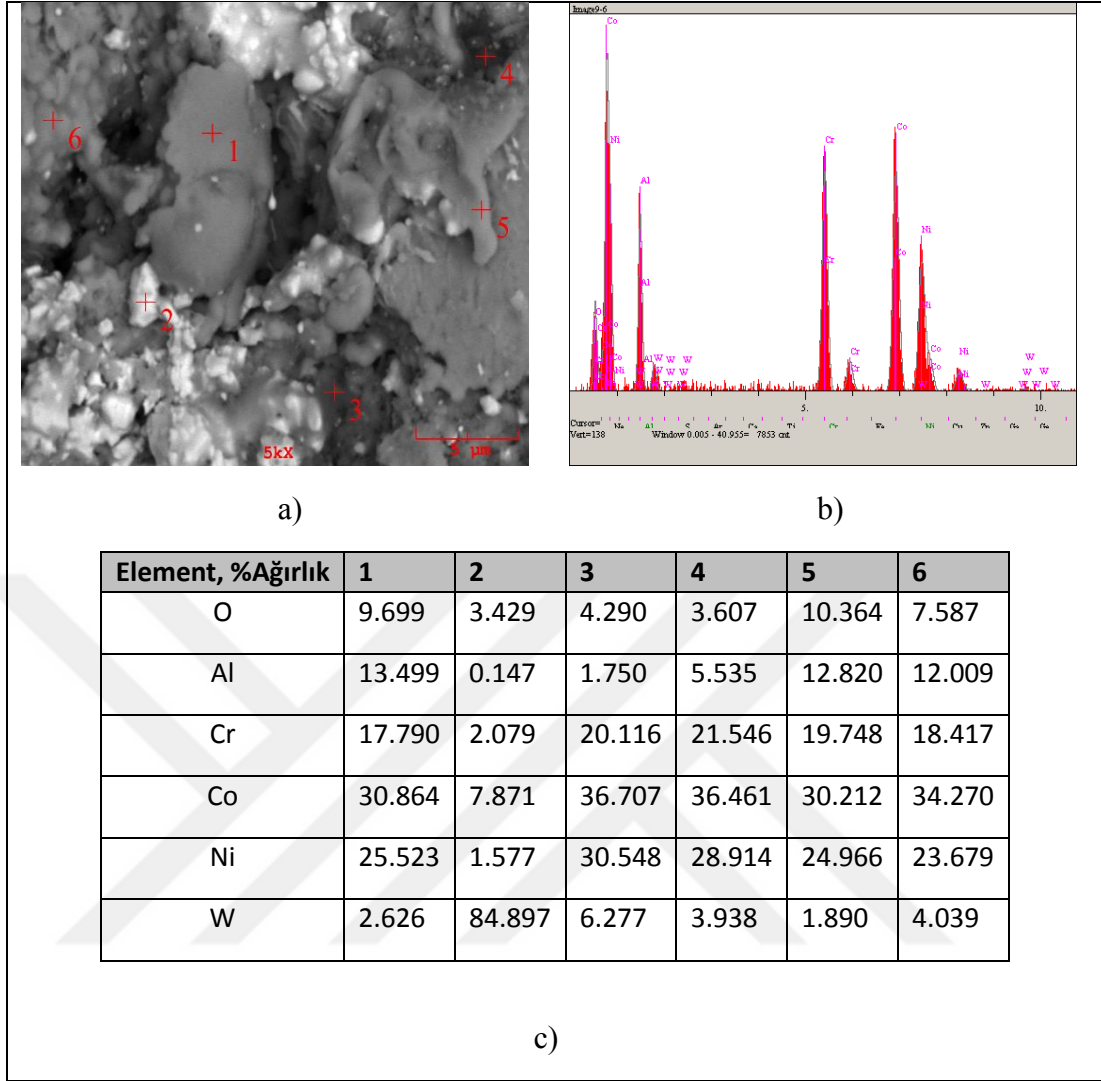
Şekil 6.47 Aşınma deneyi sonrası z3-3 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

EDS analizi sonuçlarına göre Şekil 6.37.'ye ait z4-4 numunesi oksitli bir yapıya sahip olup aynı zamanda aşınma deneyinde kullanılan bilyeden sökülen oksijen ve alüminyum aşınma sonrası numune yapısında yer edinmiştir.



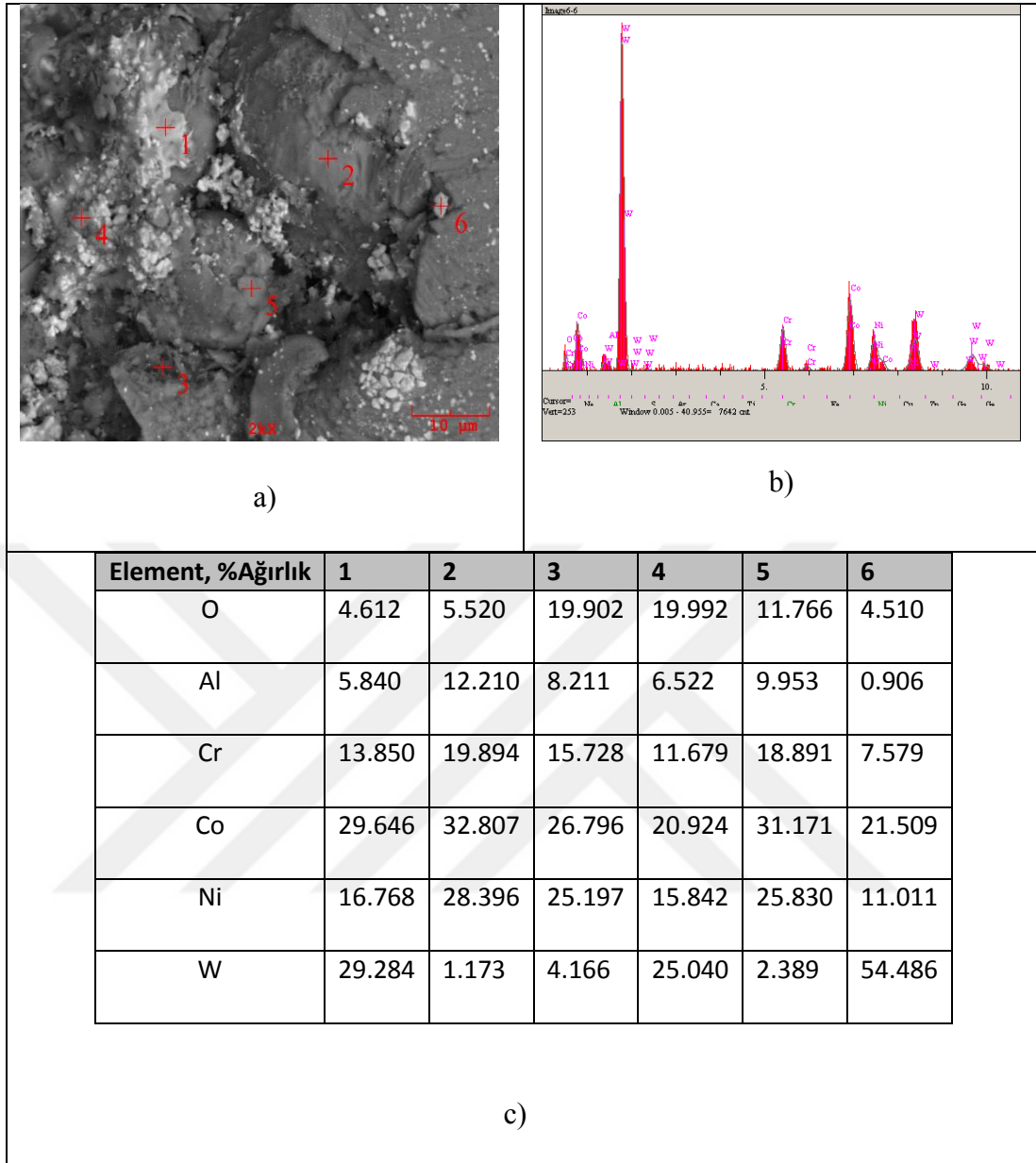
Şekil 6.48. Aşınma deneyi sonrası z4-4 kaplama numunesine ait 7 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.38. için yapıda krom yoğunluğu göze çarpmakta olup Amdry 960 bağlayıcı malzemesinden gelen kromlar yoğun olarak yapıya nüfuz etmiştir.



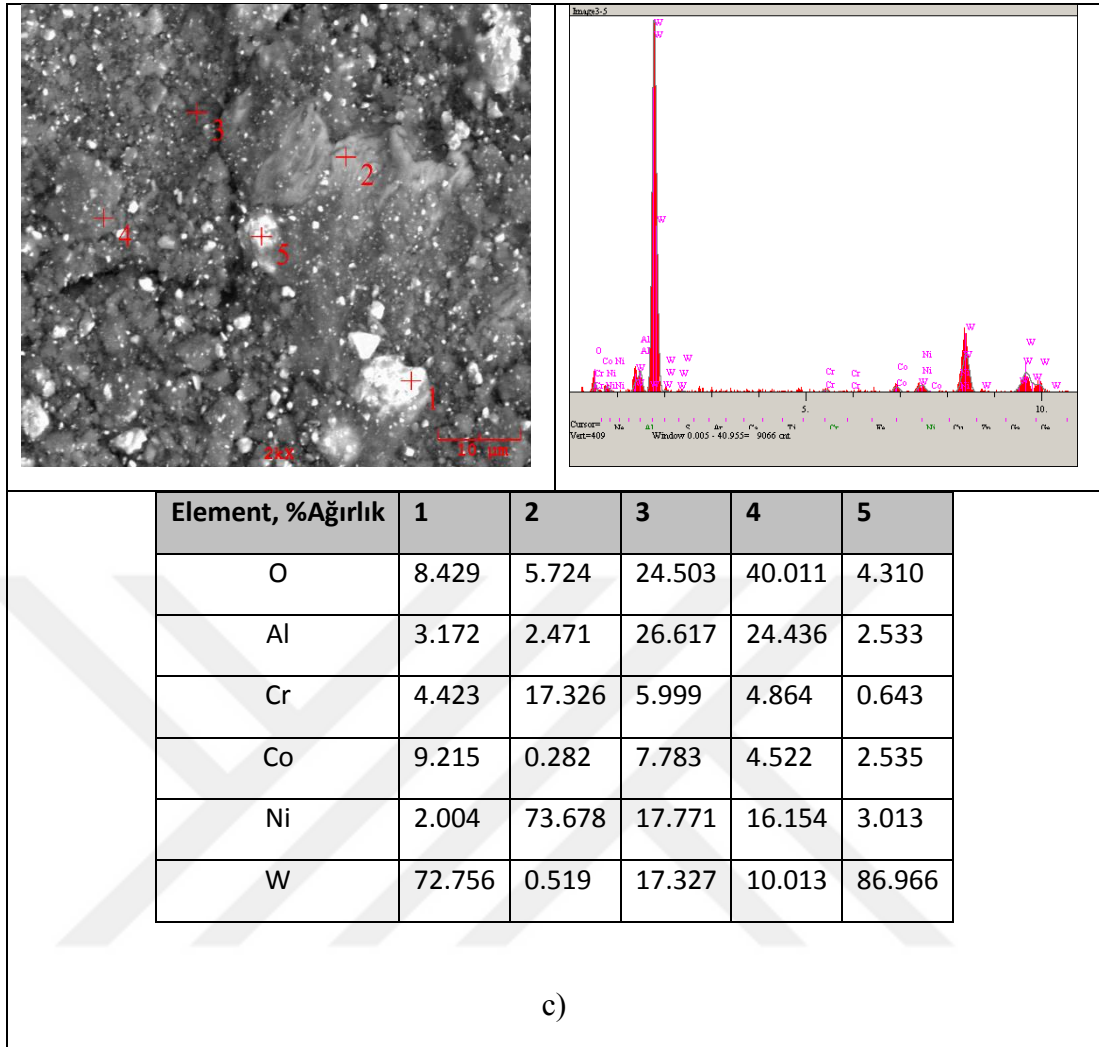
Şekil 6.27. Aşınma deneyi sonrası z5-1 kaplama numunesine ait 6 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.39.'a ait proseste nozul mesafesinin uzak olması (300 mm) W elementinin yapıda tutunmasının zorlaştığının kanıtıdır. Yapıda derin oyuklar görülmesi tüm kaplama malzemeleri içerisinde en düşük sertlik değerinin z6 numunesinde olmasının da kanıtıdır. Nozul mesafesinin uzak olması da bu durumun temel nedeni olarak düşünülmektedir.



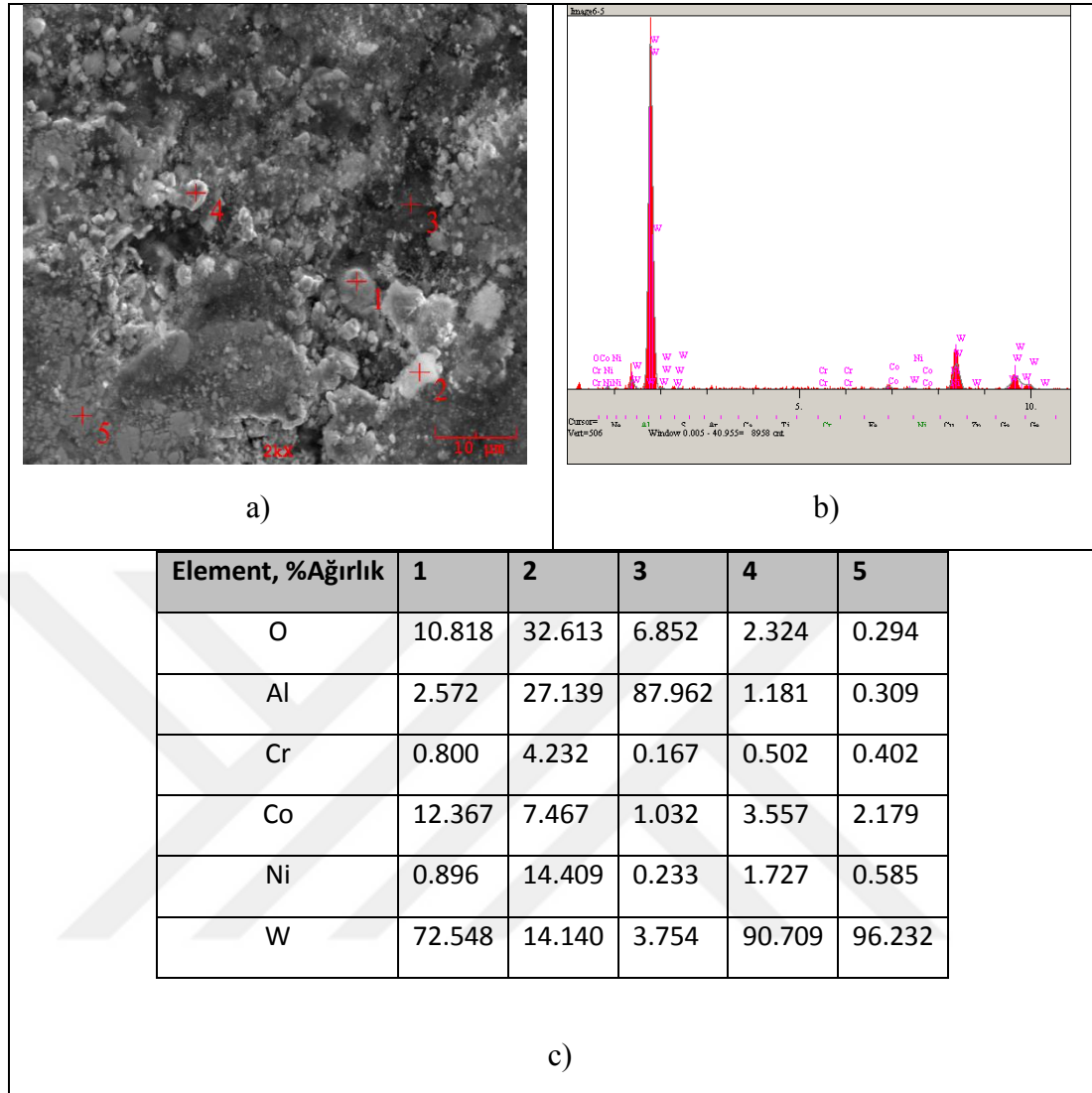
Şekil 6.50. Aşınma deneyi sonrası z6-2 kaplama numunesine ait 6 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.40.'daki EDS görüntüsü incelendiğinde 4'nolu bölgede çok fazla oranda alüminyum yapıda yer edinmiş olup bunun en çok nedeni alümina bilye olsa da Amdry960 ara malzemesinden de alüminyum yapıya dahil olarak yoğunluğu üst seviyelere çıkarmıştır.

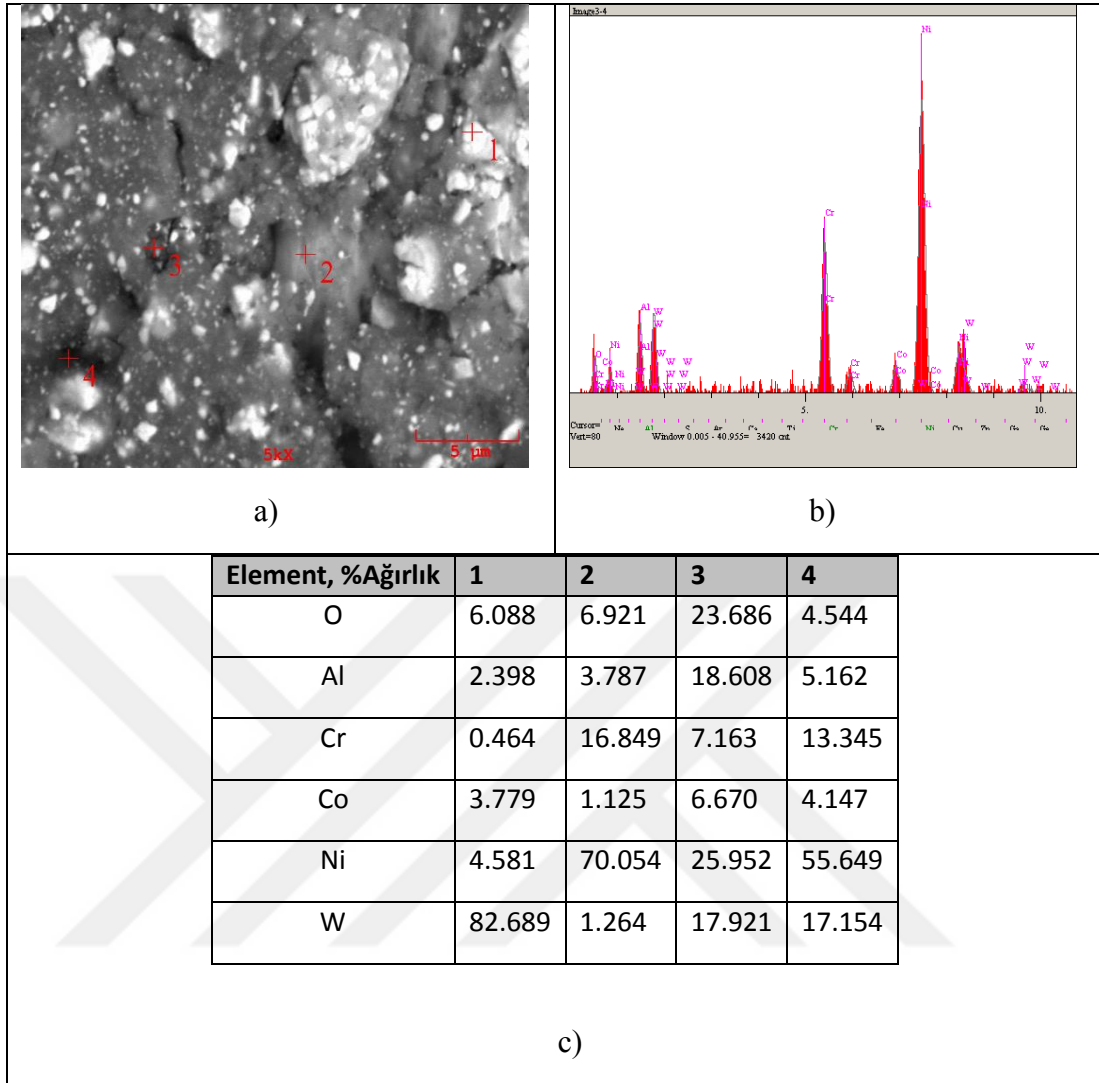


Şekil 6.52. Aşınma deneyi sonrası z8-4 kaplama numunesine ait 5 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.42.'deki z9-4 kaplama numunesinde derin oyuklar göze çarpmaktadır. Yapıda plastik deformasyon yoğun olarak görülmektedir. Şekil 6.42.'nin a'sındaki alüminyum miktarının fazlalığı aşınma bilyesinden gelmektedir. Bunun sebebi bölgede yüksek oranda alüminyum ölçülmesi ile beraber bölgede meydana gelen deformasyonun varlığı ile açıklanabilir.

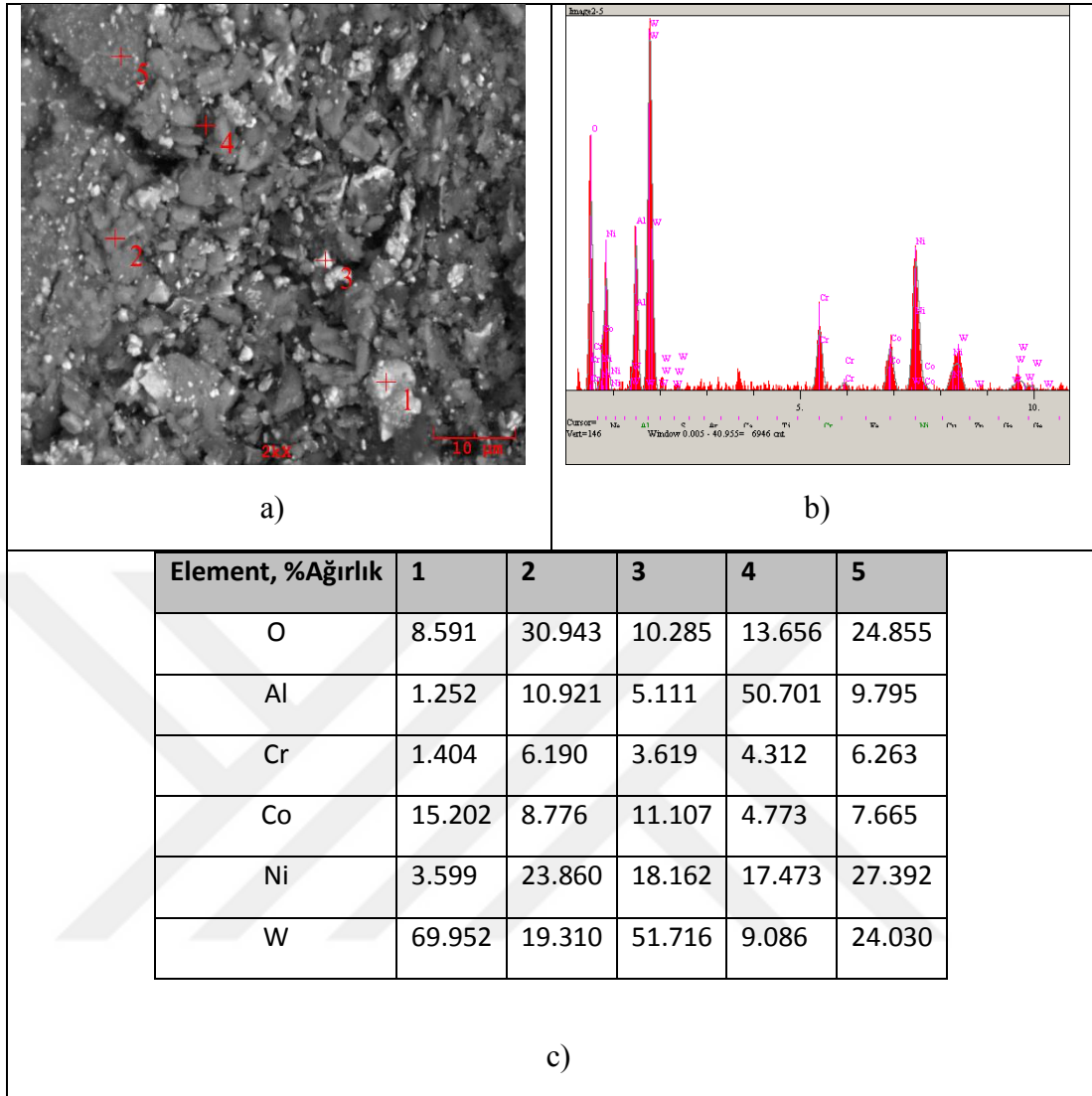


Şekil 6.43.'deki z10-3 numunesi 54,39 mikron kaplama kalınlığına sahipti. Bu kaplama malzemesi lokal olarak çukurcuklar oluşturmuş ve yapıda kırılmalar meydana gelmiştir. Bu yapı yüksek sürtünme kat sayısına sahip olması ile beraber düşük aşınma direnci göstermiştir.



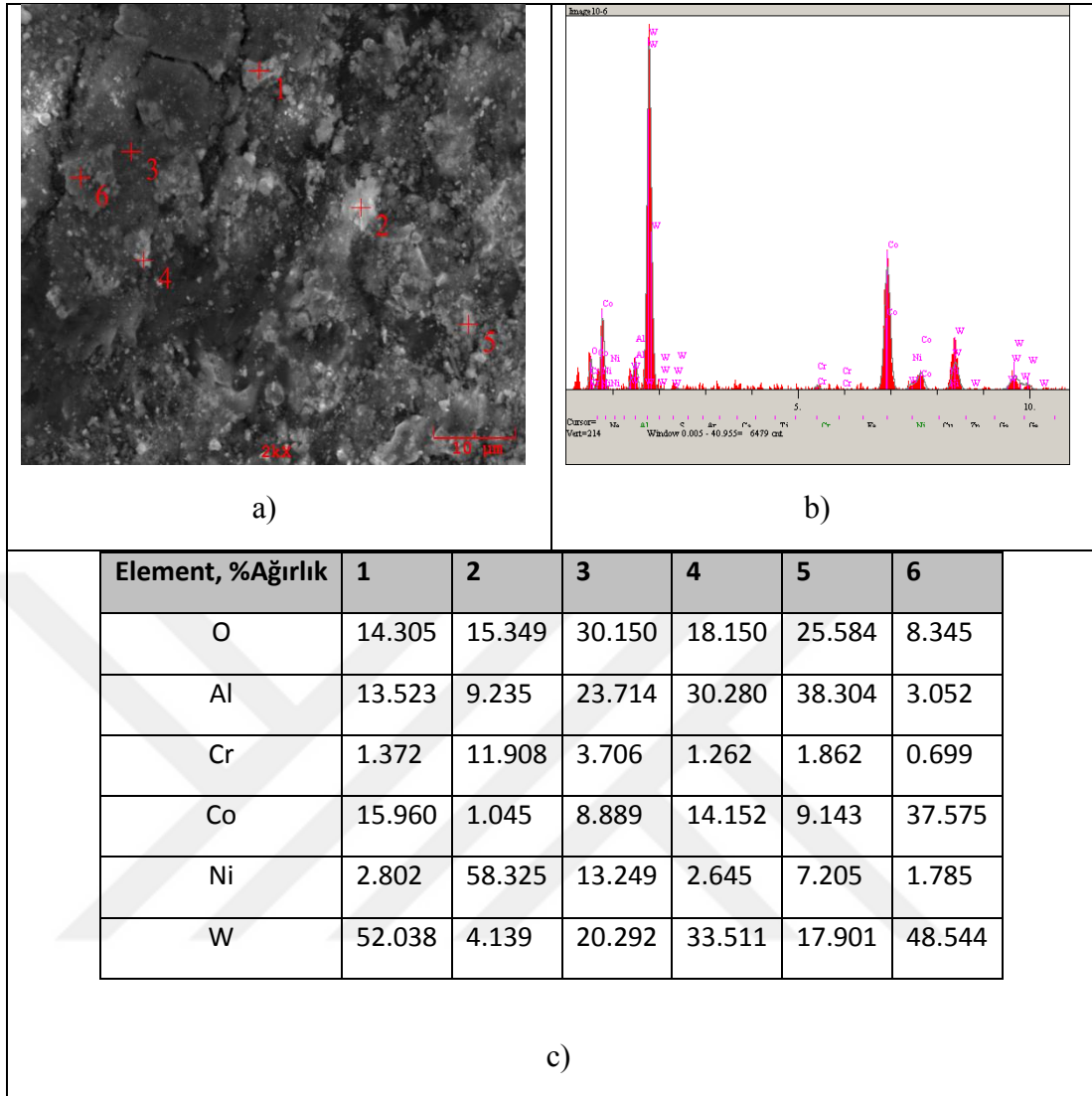
Şekil 6.54. Aşınma deneyi sonrası z10-3 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.44.'de oksitli yapının varlığı göze çarpmakta olup yapıda yer yer mikro çatlaklar mevcuttur. Ayrıca yapıda girintilerde görülmekte olup dağılımın homojene yakın olduğu söylenebilir. Bu yapı tüm kaplama numuneleri içinde en yüksek ikinci sertlik değerine sahiptir.



Şekil 6.55. Aşınma deneyi sonrası z11-2 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

Şekil 6.45.'de daha önce belirtilen nozul mesafesi kaynaklı uzaklığın fazla olmasının sonucu olarak, kaplama sürecinde bağlanmanın güç hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak yapıda derin oyuklar meydana gelmiş, abrasif aşınma gerçekleşmiştir.



Şekil 6.56. Aşınma deneyi sonrası z12-1 kaplama numunesine ait 4 farklı bölgedeki EDS analizi.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

7.1. Giriş

Bu çalışmada HVOF termal sprey kaplama yöntemi ile 304 paslanmaz çelik yüzeyine çeşitli toz karışımları ile kaplamalar yapılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu toz karışımlardan birincisinde %50 Sulzer metko 5810 ve %50 Amdry 960 toz karışımı, ikincisinde ise %50 Woka 3653 ve %50 Amdry 960 toz karışımı kullanarak çelik yüzeyine ait aşınma ve korozyon özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kaplama işlemi esnasında HVOF işlemi uygulanırken paso sayısı ve kaplama mesafesi değiştirilerek bu parametrelere göre sonuçlar irdelenmiştir. Kaplama yapılan numuneler için optik, stereo görüntüler alınarak numunelere ait HVOF işlemi sırasında uygulanan paso sayısı ve mesafeye göre sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Kaplanan numuneler için X ışınları analizi yapılarak pik şiddetleri ölçülüp yapıdaki elementlerle ilgili yorumlar yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kaplanan numunelere ait yapıdaki kimyasal etkileşimler, fiziksel değişikliklerle beraber kaplanan numunelere ait yapısal bağlanma kusurları irdelenmiştir. ASTM G 133 standardına göre aşınma testi yapıp, her numune için sürtünme kat sayısı değerleri elde edilerek numunelere ait aşınma oranlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca kaplama malzemelerinin korozyon direnci ölçülerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde açıklanabilir:

1. Optik mikroskop görüntüleri incelenerek kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Toz-1 numunelerinde (%50 Sulzer metko 5810 ve %50 Amdry 960 toz karışımı) en yüksek kaplama kalınlığına (416 μm) 200 mm nozul mesafesi ve 15 paso sayısında ulaşılmıştır. Toz-2 numunelerinde (%50 Woka 3653 ve %50 Amdry 960) en yüksek kaplama kalınlığına (327 μm) 200 mm nozul mesafesi

ve 10 paso sayısında ulaşılmıştır. Optik mikroskop görüntülerinde altlık-kaplama ara yüzeyinde görülen poroziteler; yüzey pürüzlülüğü kaynaklı tozun erken katılaşması ve yüzeyde mevcut oksit, yağ vs. gibi kalıntıların etkisi ile açıklanabilir. Stereo görüntüleri incelendiğinde yapıda camsı fazlar görünmüştür. Ayrıca pürüzlü bir yüzey oluşumu dikkat çekmektedir.

2. Mikro sertlik ölçümü sonucunda en yüksek ortalama sertlik değeri 15 pasoda 200 mm nozul mesafesinde toz-1 grubu numunelerinden z3 numunesine ait olup 906 HV değerindedir. En düşük sertlik değeri 631 HV olup 200 mm nozul mesafesinde, 20 paso sayısı ile toz-1 grubundan z5 numunesine aittir. Toz-2 grubunda ise en yüksek sertlik değeri 200 mm nozul mesafesinde, 20 paso sayısında 900 HV ile z-11 numunesinde, en düşük sertlik değeri ise 300 mm mesafede 10 pasoda 737 HV ile z-8 numunesinde elde edilmiştir.
3. XRD analizi sonucunda toz-1 grubu kaplama malzemelerinde genellikle WC, W_2C , Cr_2Ni_3 , Co_3C , Cr fazlarına rastlanmıştır. Toz-2 gurubu kaplamalar için WC, Al, SiCo, Ni2Si, W, Al, W_2C fazları görülmektedir. Prosesteki mevcut WC fazları yapıda aşınmaya karşı fayda göstermiştir.
4. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre yapıdaki hatalar dikkat çekmektedir. Kaplanan numunelerde en çok gözlemlenen hata türleri; mikro çatlaklar, porozite, ergime hataları ve bağlanma problemleri olarak açıklanabilir.
5. Kaplanan numunelere ait aşınma deneyi yapılırken hız ve uygulanan yükler parametre olarak kullanılmış olup 2N, 3N yük altında ve 2 m/s, 3 m/s hızlarda aşınma testi yapılmıştır. Daha sonra aşınma iz genişliği alınarak en yüksek iz genişliğine (617,84 μm) 0,1 m/s hızda 2 N yük altında toz-2 numunesine ait toz karışımında ulaşılmıştır. Aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme kat sayısı değerleri incelendiğinde en yüksek sürtünme kat sayısı 300 mm mesafede 20 pasoda kaplama yapılarak, 0,1 m/s hızda 3 N yük altında aşınma testi yapılan z12-2 numunesidir. En düşük sürtünme kat sayısı ise 200 mm mesafede 20 pasoda kaplanarak 0,1 m/s hızda 3N yük altında aşınma testi yapılan z5-2 numunesidir.
6. Numunelerle ilgili elde edilen aşınma hacmi ve oranı incelendiğinde düşük aşınma oranı kaplamada daha yüksek aşınma direnci sağlamaktadır. Düşük

aşınma hacmi yüksek sertlik sağlamaktadır. Düşük sürtünme kat sayısı kaymayı kolaylaştırarak malzeme kaybını engeller.

7. Kaplanmış numunelerde genellikle abrasif aşınma gözlemlenmiştir. Yapıda sökûlmeler, çizikler görûlmektedir.
8. Aşınma miktarı genel olarak yük artışıyla artmıştır.
9. Aşınma sonucu SEM analizi incelendiğinde kaplama yüzeylerinde plastik deformasyon, kazımalı aşınma ile beraber derin oyuklar görûlmüştür.
10. Aşınma deneyinin alümina bilye ile yapılmasının sonucu olarak EDS analizi sonuçlarına göre yapıda alüminyum ve oksijen elementlerine rastlanmıştır.

Her iki toz ile yapılan kaplamada da verimli bir sonuç elde edilmiş olup kaplamalar maliyet ve zaman açısından tasarruf sağlayacak niteliktedir.

7.2. Öneriler

1. Farklı ticari tozlarla kaplama yapılarak bu çalışma ile karşılaştırılıp optimum özellikte yapıya ulaşılabilir.
2. 304 paslanmaz çeliğinin türü değiştirilebilir. Bunun yerine başka bir paslanmaz çelik kullanılarak sonuçlar gözlemlenebilir.
3. Bu çalışmaya ait yorulma testi yapılarak yorulma davranışları araştırılabilir.
4. AISI 52100 çelik bilye kullanılarak aşınma testleri aynı değişkenlerde tekrar edilerek alümina (Al_2O_3) bilye ile yapılan aşınma test sonuçları karşılaştırılabilir.
5. Kaplama numuneleri için HCl veya NaCl ortamında korozyon test sonuçları incelenebilir.
6. Aşınma sürecinde daha yüksek yükler uygulanarak (5N, 10 N gibi) sonuçlar kıyaslanabilir.
7. Kaplanmış malzemelere ısıtıl işlem uygulanarak yüzey özellikleri karşılaştırılabilir.
8. Kaplama sonrası her iki yapıya ait (toz-1 ve toz-2 kaplamaları için) manyetik özelliklerin değişimi karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Alsaran, A., Çelik, “Yüzey Mühendisliğinde Yeni Bir Yaklaşım; Dupleks Yüzey İşlemi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., c. 1, ss. 1–7, 2003.
- [2] T. H. Mingwen Bai, Liam Reddy, “Experimental and thermodynamic investigations on the chlorine-induced corrosion of HVOF thermal sprayed NiAl coatings and 304 stainless steels at 700 °C”, Corros. Sci., c. 135, ss. 147–157, 2018.
- [3] S. K. M. JashanpreetSingh, Satish Kumar, “Tribological analysis of WC–10Co–4Cr and Ni–20Cr2O3 coating on stainless steel 304”, Wear, c. 376–377, ss. 1105–1111, 2017.
- [4] Z. Yeşildal, R., Günay, Y., “Plazma Sprey Yöntemi ile Kaplama ve Sprey Karakteristiklerinin İncelenmesi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg., c. 9, sayı 1, ss. 59–76, 2007.
- [5] J. S. Ba Bai, “Production of Coated and Free-Standing Engineering Components using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Process”, Dublin City University, 2003.
- [6] J. R. Davis, Surface Engineering For Corrosion and Wear Resistance. Asm International, 2001.
- [7] A. Holmberg, K. , Matthews, “Surface Coating Methods”, Spring Tribol. Ser., c. 28, ss. 7–32, 1994.
- [8] A. Wank, “Basics of Thermal Spray Technology I Processes”, Luckenbach.
- [9] S. Özel, “Yüzey Kaplama İşlemlerinde Kullanılan Isıl Püskürtme Yöntemleri”, BEÜ Fen Bilim. Derg. BEU J. Sci., ss. 88–97, 2013.
- [10] C. Gadow, R. , Friedrich, “Development of Atmospheric Plasma Sprayed Dielectric Ceramic Coatings for High Efficiency Tubular Ozone Generators”, J. Water Resour. Prot., 2010.

- [11] C. T. W. Azarmi, F., “Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters using a Design of Experiment for Alloy 625 coatings”, *J. Therm. Spray Technol.*, c. 17, sayı 1, ss. 144–155, 2008.
- [12] S. Tailor, “Thermal Spray Aluminum (TSA) Coating”, Jodhpur, 2016.
- [13] M. Haoliang Tian, Changliang Wang, “Phase composition and formation mechanisms of a high-velocity electric arc-sprayed FeNiCrAl coating”, *J. Alloys Compd.*, c. 769, ss. 998–1006, 2018.
- [14] N. Santos da Silva, F. , Cinca, “Cold gas spray coatings: basic principles, corrosion protection and applications”, *Eclet. Quim. J.*, c. 42, 2017.
- [15] F. Azarmi, “Vacuum Plasma Sparying”, *Adv. Mater. Process.*, ss. 37–38, 2005.
- [16] C. Pathak, S. , Gobinda, “Development of Sustainable Cold Spray Coatings and 3D Additive Manufacturing Components for Repair/Manufacturing Applications: A Critical Review”, Pahang.
- [17] K. Thirumalaikumarasamy, D. Shanmugan, “Influences Of Atmospheric Plasma Spraying Parameters On The Porosity Level Of Alumina Coating On AZ31B Magnesium Alloy Using Response Surface Methodology”, *Prog. In Nat. Sci. Mater. Int.*, c. 22, sayı 5, ss. 468–479, 2012.
- [18] E. Turunen, “Diagnostic tools for HVOF process optimization”, VTT Publications, 2005.
- [19] M. Oksa, “Nickel- and iron-based HVOF thermal spray coatings for high temperature corrosion protection in biomass-fired power plant boilers”, VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.
- [20] B. Hasan, “Design Of Experiment Analysis Of High Velocity Oxy-Fuel Coating Of Hydroxyapatite”, Dublin City University, 2009.
- [21] J. c. Tan, “Optimisation of the HVOF Thermal Spray Process For Coating, Forming and Repair of Components”, Dublin City University, 1997.
- [22] “<http://www.alloysprayengineering.com/high-velocity-oxy-fuel.html> 05.05.2018”. .
- [23] “<http://hydroil.com.au/hvof/> 11.10.2018”. .
- [24] V. T., “Laboratuvar Föyü Aşınma Deneyi”, 2016.
- [25] K. H., “Triboloji Prensipleri ve Uygulama Örnekleri”, İstanbul.

- [26] B. M., “CuZn10 Pirinç Malzemede Kayma Hızının Aşınmaya Etkisi”, Selçuk Üniversitesi, 2005.
- [27] J. A. Williams, Wear and Wear Particles-Some Fundamentals, 38. baskı. Tribology International, 2005.
- [28] A. W. Stachowiak, G. W. & Batchelor, Engineering Tribology, 3. baskı. Engineering Tribology.
- [29] J. A. W. Karl-Heinz Z. G., Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series, 1987.
- [30] M. Adamiak, Effect of Abrasive Size on Wear, Abrasion Resistance of Materials. InTech, 2012.
- [31] R. Demirsöz, “Granül Cüruf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Karabük Üniversitesi, 2018.
- [32] T. Osmanoğlu, “AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri”, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, 2012.
- [33] A. K. Tribhuwan Kishore Mishra, “Investigation of Sliding Wear Behaviour of HVOF Carbide Coating”, Mater. Today Proc. 5, ss. 19539–19546, 2018.
- [34] P. Taimin Gong, “Influence of WC Carbide Particle size on the microstructure and abrasive wear behavior of WC–10Co–4Cr coatings for air craft landing gear”, Wear362-363, ss. 135–145, 2016.
- [35] Y. L. Chao Zheng, “Experimental study on the erosion behavior of WC-based high-velocity oxygen-fuel spray coating”, Powder Technol., ss. 383–389, 2017.
- [36] A. S. Hajare, “Comparative study of wear behaviour of Thermal Spray HVOF coating on 304 SS”, Mater. Today Proc. 5, ss. 6924–6933.
- [37] Y. W. Sheng Hong, “The effect of temperature on the dry sliding wear behavior of HVOF sprayed nanostructured WC-CoCr coatings”, Ceram. Int., ss. 458–462, 2017.
- [38] M. H. Abdullah Cahit Karaoglanli, Mecit Oge, Kadir Mert Doleker, “Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition”, Surf. Coat. Technol., c. 318, ss. 299–308, 2017.

- [39] C. Matteo Federici, “Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material”, *Wear*, c. 368–369, ss. 326–334, 2016.
- [40] R. K. K. Nitesh Vashishtha, “Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings”, *Tribol. Int.*, c. 105, ss. 55–68, 2017.
- [41] S. N. Z. Liu , J. Cabrero, “Improving corrosion and wear performance of HVOF-sprayed Inconel 625 and WC-Inconel 625 coatings by high power diode laser treatments”, *Surf. Coat. Technol.*, c. 201, ss. 7149–7158, 2007.
- [42] Y. F. Zhongzheng Pei, Renbo Song, Qinan Ba, “Dimensionality wear analysis: Three-body impact abrasive wear behavior of a martensitic steel in comparison with Mn₁₃Cr₂”, *Wear*, c. 414–415, ss. 341–351, 2018.
- [43] Y. Y. ÖZBEK, “Pulsa Plazma Teknolojisi ile Çelik Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet İPEK, 1989 yılında Çorum, Sungurlu ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Sungurluda tamamladı. İstanbul Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında bitirdi. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2014-2015 yılında altı ay süreyle Hakkâri-Yüksekova'da vatani görevini yaptı. 2015 Mayıs itibariyle İstikamet Döküm A.Ş. firmasında üretim mühendisi olarak başladığı görevine halen devam etmekte olup aynı zamanda fabrika mesul müdürlüğünü de yürütmektedir.