



**PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE SERAMİK
ESASLI TOZLARLA KAPLANAN MAGNEZYUM ALAŞIMININ
YÜZEY KAPLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Abdulkadir ZİREK

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Cihan ÖZEL

TEMMUZ 2019

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE SERAMİK ESASLI TOZLARLA
KAPLANAN MAGNEZYUM ALAŞIMININ YÜZEY KAPLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdulkadir ZİREK
(141120106)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :26/06/2019
Tezin Savunulduğu Tarih :26/07/2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cihan ÖZEL
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Haşim PIHTIL
: Doç. Dr. Ahmet YARDIMEDEN

TEMMUZ 2019

ÖNSÖZ

“Plazma Püskürtme Yöntemi İle Seramik Esaslı Tozlarla Kaplanan Magnezyum Alaşımının Yüzey Kaplama Özelliklerinin Araştırılması” konu başlıklı bu çalışmam, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D Konstrüksiyon ve İmalat A.B.D. Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından FÜBAP MF.18.13. numaralı proje ile desteklemiştir. Araştırmayı maddi açıdan destekleyen Fırat Üniversitesi Rektörlüğü’ne ve Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ ne (FÜBAP) teşekkür ederim

Bu çalışmanın tüm aşamalarında bana yol gösterip, yardımlarını esirgemeyen ve yakın ilgisi ile büyük destek sağlayan danışmanım Doç. Dr. Cihan ÖZEL’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamla ilgili üstün fedakârlık göstererek bilgi ve birikimini benden esirgemeyen ve bana yol gösteren çok değerli arkadaşım Dr. Turan GÜRGENÇ’ e yürekten teşekkür ederim. Bu tezin hazırlanmasında benden manevi desteklerini esirgemeyip, her konuda yardım eden sevgili meslektaşım Yük. Mek. Müh. Savaş APAK’ a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca tanıştığım günden bu yana, benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok kıymetli hayat arkadaşım ve biricik kızımın annesi İnş. Müh. Billur Şafak ZİREK’e ve hayatıma anlam katan, neşe ve huzur kaynağım, sevgili kızım Zeynep Beril ZİREK’e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Abdulkadir ZİREK
ELAZIĞ - 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	6
2.1. Magnezyum ve Alaşımları	6
2.2. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	8
3. AŞINMA ve SÜRTÜNME	10
3.1. Aşınma.....	10
3.2. Aşınma Çeşitleri	11
3.2.1. Abrasif Aşınma	11
3.2.2. Adhesif Aşınma.....	11
3.2.3. Korozyon Aşınma	12
3.2.4. Kaviteasyon Aşınması.....	12
3.2.5. Yorulma Aşınması.....	12
3.2.6. Erozyon Aşınma	13
3.2.7. Öğütme Aşınma	13
3.2.8. Oymalı Aşınma	13
3.2.9. Kazımalı Aşınma.....	13
3.3. Sürtünme	14
3.3.1. Sürtünme Katsayısı	14
3.3.2. Sürtünme Çeşitleri.....	16
3.3.2.1. Kuru Sürtünme	16
3.3.2.2. Sıvı Sürtünme	16
3.3.2.3. Sınır Sürtünme.....	17
3.3.3. Sürtünme Kuvvetine Etki Eden Faktörler	17
3.3.3.1. Genel Faktörler.....	17
3.3.3.2. Yüzey Sıcaklığının Etkisi	17

4. YÜZEY KAPLAMA	19
4.1. Yüzey Kaplamanın Tanımı	19
4.2. Buhar Fazı Yöntemleri	19
4.3. Sol - Jel Yöntemi	20
4.4. Kaplama ve Anotlama Yöntemleri (Elektrolitik Kaplama)	20
4.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey)	21
4.4.2. Alevle Püskürtme Yöntemleri	22
4.4.3. Plazma Püskürtme Yöntemi	23
4.4.4. Patlamalı Püskürtme (D-Gun)	25
4.4.5. Elektrik Ark İle Püskürtme	26
4.4.6. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi	27
4.5. Ergitme Yöntemleri	29
4.5.1. Plazma Sprey Kaplama Yöntemi	29
4.5.2. Plazma Kaplama Sistemi	29
4.5.3. Plazma Kaplama Teknolojisinin Fiziksel Esasları	32
4.5.4. Yüzey Hazırlama	34
4.5.5. Ön Isıtma ve Soğutma	34
4.5.6. Kaplama İşleminin Gerçekleştirilmesi	35
4.5.7. Plazma Kaplama Yöntemleri	35
4.5.8. Plazma Sprey Kaplamaların Uygulama Alanları	36
5. MATERYAL ve METOT	37
6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	39
6.1. Mikroyapı ve Sertlik	39
6.2. Aşınma ve Sürtünme	65
7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	93

ÖZET

Bu çalışmada, AZ91D magnezyum alışımin yüzeyi Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40 TiO_2 ve Cr_2O_3 -40 TiO_2 tozları ile kaplandı. Yüzey kaplama yöntemi olarak plazma sprej yöntemi kullanıldı. Yüzey kaplama işlemi iki farklı sprej mesafesi (110 mm ve 130 mm) ve iki farklı akım (580 A, 500 A) değerinde yapıldı. Kaplanan yüzey tabakalarının mikroyapıları optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve enerji dağılımlı X-ışınları (EDS) yöntemleriyle analiz edildi. Mikrosertlik ölçümleri, mikrosertlik test cihazında gerçekleştirildi. Kuru kaymalı aşınma özellikleri disk-on-disk tip aşınma deney cihazı kullanılarak belirlendi. Aşınma testleri 2.5 N, 5 N, 7.5 N yükte ve 150 m kayma mesafesinde gerçekleştirildi. Cr_2O_3 ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Cr_2O_3 ve Cr tespit edilmiştir. Al_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Al_2O_3 , Ti_2O_3 ve TiO tespit edilmiştir. Cr_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Cr_2O_3 , TiO_2 ve TiO tespit edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olan numuneler Cr_2O_3 ile kaplanan numunelerdir. En yüksek sertlik değeri Al_2O_3 -40 TiO_2 ile yüksek ısı girdisi ve düşük sprej mesafesinde kaplanan numunede 845 $\text{HV}_{0.1}$ ölçülmüştür. Uygulanan tüm kuvvet değerlerinde, kaplanmış numunelerin aşınma dirençleri altlık malzemedenden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek aşınma direncine sahip numune, Cr_2O_3 ile yüksek ısı girdisi ve düşük sprej mesafesinde kaplanan numune olmuştur. Tüm yük değerlerinde altlık malzemenin sürtünme katsayısı (μ), kaplanmış numunelerden daha düşük olmuştur. AZ91D' nin ve kaplanmış numunelerin μ değerleri normal kuvvet arttıkça artmıştır. Al_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerin μ değerleri diğer numunelere göre daha düşük olmuştur. Ayrıca kaplanmış numunelerin μ değerleri, akımın azalması ve sprej mesafesinin artmasıyla artmıştır.

Anahtar Kelimeler : Yüzey kaplama, Plazma sprej, Magnezyum alaşımları, Seramikler, Sürtünme, Aşınma

SUMMARY

Investigation of Surface Coating Properties of Magnesium Alloy Coated with Ceramic Based Powders by Plasma Spraying Method

In this study, the surface of AZ91D magnesium uptake was coated with Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40 TiO_2 and Cr_2O_3 -40 TiO_2 powders. Plasma spray method was used as surface coating method. Surface coatings were carried out at two different spray distances (110 mm and 130 mm) and two different currents (580 A, 500 A). The microstructures of the coated surface layers were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive X-ray (EDS) methods. Microhardness measurements were performed on microhardness test device. Dry sliding wear properties were determined using disc-on-disc type wear test device. Wear tests were performed at a load of 2.5 N, 5 N, 7.5 N and a sliding distance of 150 m. Cr_2O_3 and Cr were detected in the coating layers of the samples coated with Cr_2O_3 . Al_2O_3 - Ti_2O_3 and TiO were determined in the coating layers of the samples coated with Al_2O_3 -40 TiO_2 , Cr_2O_3 , TiO_2 and TiO were determined in the coating layers of the samples coated with Cr_2O_3 -40 TiO_2 . The samples with the highest surface roughness are those coated with Cr_2O_3 . The highest hardness value was measured at 845 $\text{HV}_{0.1}$ in the sample coated with Al_2O_3 -40 TiO_2 at high heat input and low spray distance. At all applied force values, the wear resistance of the coated samples was higher than the substrate material. The sample with the highest abrasion resistance was the sample coated with Cr_2O_3 at high heat input and low spray distance. At all load values, the coefficient of friction (μ) of the substrate was lower than the coated samples. AZ91D and coated samples μ values increased as normal force increased. Al_2O_3 -40 TiO_2 coated samples μ values were lower than other samples. In addition, the μ values of the coated samples increased with decreasing current and increasing spray distance.

Keywords : Surface coating, Plasma spray, Magnesium alloys, Ceramics, Friction, Wear.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Magnezyum alaşımlarında kodlama yöntemi	7
Şekil 3.1. Tribolojik sistem.	10
Şekil 3.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayısı.....	15
Şekil 3.3. μ s-zaman ve μ k-hız grafikleri.	15
Şekil 3.4. Sürtünmede nominal ve gerçek temas alanı.....	16
Şekil 3.5. Sıvı sürtünmenin şematik gösterimi.....	17
Şekil 4.1. Termal püskürtme yöntemlerinin temel oluşum aşamalarının gösterilişi	21
Şekil 4.2. Alevle püskürtme yönteminin şematik gösterilişi	22
Şekil 4.3. Alevle püskürtme yönteminin torna tezgâhı kullanılarak uygulanması.....	23
Şekil 4.4. Eksenel toz enjeksiyonlu plazma püskürtme yöntemi.	24
Şekil 4.5. Dikey toz beslemeli plazma püskürtme yöntemi.	25
Şekil 4.6. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal spreyle kaplama.....	26
Şekil 4.7. Elektrik arkı ile püskürtme	27
Şekil 4.8. HVOF ısı püskürtme düzeneğinin şematik gösterimi	28
Şekil 4.9. Plazma kaplama sistemi.	30
Şekil 4.10. Plazma spreyle tabancasının şematik görünüşü.	31
Şekil 4.11. Plazma kaplama.	32
Şekil 4.12. Plazma spreyle yöntemlerinin sınıflandırılması.....	36
Şekil 4.13. Plazma spreyle kaplamaların kullanıldığı genel endüstri dalları.	36
Şekil 5.1. Disk-on-disk aşınma deney cihazı	38
Şekil 6.1. Cr_2O_3 kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları	39
Şekil 6.2. $Al_2O_3-40TiO_2$ kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları	39
Şekil 6.3. $Cr_2O_3-40TiO_2$ kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları	40
Şekil 6.4. Cr_2O_3 ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N1 Numunesi b) N4 Numunesi	42
Şekil 6.5. $Al_2O_3-40TiO_2$ ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N5 Numunesi b) N8 Numunesi	43
Şekil 6.6. $Cr_2O_3-40TiO_2$ ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N9 Numunesi b) N12 Numunesi	44
Şekil 6.7. Cr_2O_3 ile kaplı numunelerin OM görüntüleri	46

Şekil 6.8. Al_2O_3 -40TiO ₂ ile kaplı numunelerin OM görüntüleri.....	48
Şekil 6.9. Cr_2O_3 -40TiO ₂ ile kaplı numunelerin OM görüntüleri.....	50
Şekil 6.10. Cr_2O_3 ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri	53
Şekil 6.11. Al_2O_3 -40TiO ₂ ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri.....	55
Şekil 6.12. Cr_2O_3 -40TiO ₂ ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri	57
Şekil 6.13. Cr_2O_3 kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri.....	60
Şekil 6.14. Al_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri	62
Şekil 6.15. Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri	64
Şekil 6.16. Cr_2O_3 kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları.....	66
Şekil 6.17. Al_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları	66
Şekil 6.18. Cr_2O_3 Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları	67
Şekil 6.19. Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40TiO ₂ ve Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları.....	68
Şekil 6.20. Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40TiO ₂ ve Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma oranları	69
Şekil 6.21. Cr_2O_3 kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları.....	71
Şekil 6.22. Al_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları.....	72
Şekil 6.23. Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları.....	72
Şekil 6.24. Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40TiO ₂ ve Cr_2O_3 -40TiO ₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları.....	73
Şekil 6.25. AZ91D' nin yüzey aşınmalarının SEM görüntüleri.....	74
Şekil 6.26. N1 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	75
Şekil 6.27. N2 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	76
Şekil 6.28. N3 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	77
Şekil 6.29. N4 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	78

Şekil 6.30. N5 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	79
Şekil 6.31. N6 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	80
Şekil 6.32. N7 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	81
Şekil 6.33. N8 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	82
Şekil 6.34. N9 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	83
Şekil 6.35. N10 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	84
Şekil 6.36. N11 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	85
Şekil 6.37. N12 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri	86



TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Literatür çalışmaları ve kaplama parametreleri	4
Tablo 2.1. Magnezyum elementinin özellikleri	6
Tablo 2.2. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri [ASTM B 93/B 93M -94 ve ASTM B94]	7
Tablo 4.1. Plazma gazlarının kimyasal özellikleri.....	33
Tablo 5.1. AZ91D' nin kimyasal kompozisyonu (ağ.-%)	37
Tablo 5.2. HVOF kaplama parametreleri	38
Tablo 6.1. Kaplamaların genel özellikleri.....	41

SEMBOLLER LİSTESİ

AZ91D	: Döküm yöntemiyle üretilmiş magnezyum alaşımı
Cr₂O₃	: Krom oksit
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
TiO₂	: Titanyum oksit
AZ31	: Magnezyum alaşımı
ThO₂	: Toryum oksit
Mg	: Magnezyum
Al	: Alüminyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
Mn	: Manganez
Ti	: Titanyum
Cr	: Krom
Si	: Silisyum
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
C	: Karbon
N	: Azot
Ar	: Argon
He	: Helyum
H	: Hidrojen
F_s	: Sürtünme kuvveti (Newton)
F_N	: Normal kuvvet (Newton)
F_k	: Kaldırma kuvveti (Newton)
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı
μ_k	: Dinamik sürtünme katsayısı
A	: Akım (Amper)
V	: Voltaj (Volt)

N	:Newton (kg.m/s ²)
R_a	:Yüzey pürüzlülüğü
HV	:Vickers sertliği
kW	:Kilowatt
m	:Metre
mm	:Milimetre
µm	:Mikrometre
g	:Gram
mg	:Miligram
m/s	:Metre/saniye
mm/s	:Milimetre/saniye

KISALTMALAR

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını kırınımı
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışınları
OM	: Optik mikroskop
ağ.%	: Yüzde ağırlık
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüleri standartı
ASTM	: Amerikan test ve materyalleri topluluğu standartı
HVOF	: Yüksek hızlı oksı-yakıt
PEO	: Plazma elektrolitik oksidasyon
PVD	: Fiziksel buhar çökmesi
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
IPS	: İnert plazma sprey
VPS	: Vakum plazma sprey
SPS	: Sualtı plazma sprey

1. GİRİŞ

Düşük yoğunluklarından dolayı, magnezyum alaşımları, alüminyumun yanında hafif yapılar gerektiren alanlarda en umut verici ticari metallerden biri olarak düşünülmektedir [1]. Magnezyum alaşımları ticari metaller arasında en hafif metallerdir ve yüksek özgül mukavemet, iyi ısı yayma özellikleri, mükemmel işleme ve geri dönüşüm yetenekleri gibi özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve iletişim endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bu gibi olumlu özelliklerinin yanında mg alaşımlarının korozyon ve aşınma dayanımları oldukça zayıftır [3].

Aşınma ve korozyondan dolayı her yıl dünyada önemli malzeme kayıpları oluşmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafi milli hasıllarının %3.5-5' i arasında değişmektedir [4]. Bu kayıpları bertaraf etmek için aşınmayı en aza indirmede uygun yağlama, malzeme ve tasarım seçimi yapılmalıdır [5,6]. Aşınma, temelde bir yüzey hasarı olayıdır. Yüzeyi etkileyen her durum aşınma davranışını etkiler [7]. Birçok endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek statik ve dinamik yüklerin bulunduğu sistemlerde, makine parçalarının bu yüklere dayanıklı olmasının yanında, özel çevre şartlarından da etkilenmemesi gerekir. Ancak her yönden bu çalışma koşullarına dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi çok masraflı olmakta ve parçaların oldukça pahalı malzemelerden imal edilmesi gerekmektedir. Tüm bu olumsuzlukları gidermek için “yüzey kaplama teknolojisi” ile nispeten daha ucuz olan ve asıl yükü taşıyan ana malzemeler, uygun kaplama malzemeleri ile kaplanarak aşınmaya, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilebilir [8].

Mg alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için kimyasal dönüşüm kaplamaları, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO), fiziksel buhar çökmesi (PVD), yüksek hızlı oksiyakıt kaplama (HVOF) ve plazma sprej gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir [9,10,11]. Bu teknikler arasında atmosferik plazma püskürtme, esnekliği, yüksek biriktirme hızı ve çok fonksiyonlu olması nedeniyle en yaygın kullanılan termal püskürtme yöntemlerinden biridir. Plazma püskürtmeyle, metal alaşımları, seramikler ve sermetler içeren hemen hemen tüm malzemelerin kaplamalarını, uyumlu bir erime noktası ile alt tabakaya kaplamak mümkündür. Plazma spreyleme kaplamanın özellikleri, toz besleme hızı, püskürtme gücü, püskürtme mesafesi ve ısı girdisi gibi plazma püskürtme işleminin

birçok parametresi ile ilişkilidir ve bu parametrelerin değişmesiyle farklı mikroyapılar ve kaplama özellikleri elde edilebilmektedir [9,12].

Seramik kaplamalar, ciddi çalışma koşullarında çalışan metal bileşenlerinin aşınmaya karşı dirençli hale getirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [13]. Al_2O_3 esaslı kompozit kaplamalar, yüksek sertlik, yüksek erime noktaları ve mükemmel kimyasal ve termal kararlılığın olağanüstü kombinasyonundan dolayı yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Yine Krom Oksit (Cr_2O_3) seramik kaplamalarda aşınma, sürtünme ve korozyona dayanıklı kaplamaların elde edilmesinde sıklıkla kullanılır [15].

Thirumalaikumarasamy vd. [9], AZ31 magnezyum alaşımının yüzeyini farklı güç, sprej mesafesi ve toz besleme oranında Al_2O_3 ile plazma sprej metodunu kullanarak kaplamışlardır. Kaplamaların mikroyapılarını incelemişler, ayrıca mikrosertliklerini ve mikro gözeneklilik oranlarını belirlemişlerdir. Mikrosertlik üzerinde en büyük etkinin giriş gücü olduğu sonucuna varmışlardır.

Gao vd. [16], AZ91 magnezyum alaşımının yüzeyini plazma sprej metodu ile işlem parametrelerini sabit tutarak Al_2O_3 kaplamışlardır. Kaplanmış numunenin mikroyapı incelemelerini gerçekleştirmişlerdir. Mekanik özellikler olarak mikrosertlik, elastiklik modülü ve aşınma dayanımlarını tespit etmişlerdir. Kaplanmış numunenin mikrosertlik, elastiklik modülü ve aşınma dayanımının magnezyum alaşımından daha yüksek olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Kubatık vd. [17], AZ91 magnezyum alaşımının yüzeyini saf Al ve $AlCr_6Fe_2$ (Mn, Si, Ti) ile farklı sprej mesafelerinde plazma sprej metodunu kullanarak kaplamışlardır. Çalışmalarında kaplanmış numunelerin mikroyapı, korozyon ve bağlanma dayanımlarını araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada, saf Al ile gerçekleştirilen kaplamanın bağlanma dayanımının $AlCr_6Fe_2$ (Mn, Si, Ti) ile gerçekleştirilen daha fazla olduğu ve bağ kalınlığının ön ısıtma ve kalınlık ile optimize edilebileceği sonuçlarına varmışlardır.

Kubatık vd. [18], yine AZ91' in yüzeyini $NiAl_{10}$ ve $NiAl_{40}$ tozları ile plazma sprej yöntemini kullanarak sabit parametrelerde kaplamışlardır. Kaplanmış numunelerin mikroyapılarını, bağlanma dayanımlarını ve korozyon dayanımlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında, $NiAl_{10}$ kaplamanın bağlanma dayanımının daha yüksek olduğu, en yüksek kaplama kalınlığının 350 °C ön ısıtmaya tabi tutulmuş parçada elde edildiği ve korozyon direncinin $NiAl_{10}$ kaplamada en yüksek olduğu sonuçlarına varmışlardır. Kaplanmış numunenin mikroyapı ve mikrosertliğini incelemişlerdir.

Ge vd. [19], AZ31' in yüzeyini plazma sprej ile sabit parametrelerde Al-Si + nano Si_3N_4 ile kaplamışlardır ve kaplanmış tabakayı lazer ile tekrar ergiterek yüzeyde yeni bir kaplama tabakası oluşturmuşlardır. Çalışmalarında, AZ31' in yüzeyinin plazma sprej ile başarılı bir şekilde kaplandığı, lazer ile tekrar ergitilen kaplama tabakasının metalürjik olarak altlık malzemeye bağlanmasının mükemmel olduğu ve kaplamanın mikrosertliğinin 200-514 $\text{HV}_{0.05}$ arasında olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Xu vd. [20], MB26 magnezyum alaşımının yüzeyini sprej ile önceden meydana getirdikleri ZrC-ZrB₂/Ni sermeti ile farklı karışım oranlarında ve sabit kaplama parametrelerinde kaplamışlardır. Kaplamaların mikroyapı, mikrosertlik, bağlanma dayanımı ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Tüm kaplamaların altlık malzeme yüzeyine başarıyla bağlandığı, en yüksek sertlik değerinin 30 ağırlık-% Ni-Zr-B₄C sistemiyle gerçekleştirilen kaplamada yaklaşık 525.02 olduğu ve en yüksek aşınma direncine sahip numunenin de bu numune olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Zou vd. [21], MB26 magnezyum alaşımının yüzeyini sprej ile önceden meydana getirdikleri TiC-TiB₂ kompoziti ile sabit işlem parametrelerinde kaplamışlardır kaplamaların, mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında en yüksek sertlik değerinin Ni katkısız numunede olduğu ve kaplanmış numunelerin aşınma direncinin altlık malzemeye göre çok daha yüksek olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Li vd. [22], AZ91 magnezyum alaşımının yüzeyini nano Al_2O_3 -13 ağırlık-% TiO_2 ile sabit işlem parametrelerinde plazma sprej ile kaplamışlar ve kaplana yüzeyleri lazer ile ergiterek yüzeyi modifiye etmişlerdir. Numunelerin mikroyapı ve mikrosertliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında yoğun kaplama tabakaları meydana getirmek için lazer ile tekrar ergitmenin uygun olduğu, plazma sprej ile kaplamanın mikrosertliğinin 700-1000 $\text{HV}_{0.3}$ ve lazer ile ergitmeden sonraki mikrosertliğin ise 1000-1500 $\text{HV}_{0.3}$ olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Çelik [11], AZ31' in yüzeyini plazma sprej yöntemini kullanarak Al_2O_3 -13 ağırlık-% TiO_2 ve Al_2O_3 -40 ağırlık-% TiO_2 toz ile sabit işlem parametrelerinde kaplamıştır. Kaplanmış yüzeylerin mikroyapısını inceledikten sonra, kaplama tabakalarının yüzey pürüzlülük değerlerini, sertliklerini ve aşınma dayanımlarını araştırmıştır. En yüksek sertlik değeri Al_2O_3 -13 ağırlık-% TiO_2 ile kaplanmış numunede yaklaşık 950 $\text{HV}_{0.1}$ olarak ölçülmüştür. Kaplanmış numunelerin aşınma dayanımının AZ31' e göre oldukça yüksek olduğu ve Al_2O_3 -13 ağırlık-% TiO_2 kaplamanın aşınma dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Tablo 1.1.' de literatür çalışmalarında izlenen yöntemlere ait bilgiler ve çalışmamıza uygun hangi özelliklerin incelendiği görülmektedir.

Tablo 1.1. Literatür çalışmaları ve kaplama parametreleri

Yapılan işlemler ve incelenen özellikler	Thirumalaikumarasamy vd. [9]	Gao vd. [16]	Kubatık vd. [17]	Kubatık vd. [18]	Ge vd. [19]	Xu vd. [20]	Zou vd. [21]	Li vd. [22]	Çelik [11]
Mg alaşımı	AZ31	AZ91	AZ91	AZ91	AZ31	MB26	MB26	AZ91	AZ31
Kaplama tozu	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ve AlCr6Fe2 (Mn, Si, Ti)	NiAl10 ve NiAl40	Al-Si + nano Si ₃ N ₄	ZrC-ZrB ₂ /Ni	TiC-TiB ₂	nano Al ₂ O ₃ -13 ağı.%TiO ₂	Al ₂ O ₃ -13 ağı.%TiO ₂ ve Al ₂ O ₃ -40 ağı.%TiO ₂
Plazma sprey kaplama	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Akım değişimi	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Püskürtme mesafesi değişimi	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Toz besleme oranı değişimi	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Mikroyapı incelemesi	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Mikrosertlik incelemesi	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Aşınma incelemesi	-	+	-	-	-	+	+	-	+
Sürtünme incelemesi	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Yukarıdaki tablo incelendiğinde magnezyum ve alaşımlarının plazma sprey yöntemi ile seramik esaslı tozlarla kaplanmasıyla ilgili pek fazla bir çalışmanın bulunmadığı görülmüştür. Yine magnezyum alaşımlarıyla ilgili yapılan çalışmalar son yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada mevcut literatür çalışmalardan farklı olarak AZ91D' in yüzeyi Cr₂O₃, farklı oranlarda karıştırılan Al₂O₃-TiO₂ ve üçlü Cr₂O₃-Al₂O₃-

TiO₂ ile iki farklı akım (580 ve 500 A) ve üç farklı sprej mesafesinde (110, 120 ve 130 mm) plazma sprej kaplama yöntemi ile kaplanmıştır.

Kaplanan yüzeylerin mikro yapıları OM, SEM ve EDS ile incelendi. Kaplamaları oluşturan fazlar XRD ile tespit edildi. Kaplamaların mikro sertlikleri mikro sertlik cihazı kullanılarak belirlendi. Kaplamaların aşınma ve sürtünme davranışları disk-on-disk tip aşınma deney cihazında farklı kuvvetlerde (2.5, 5 ve 7.5 N) ve 150 m kayma mesafesinde belirlendikten sonra aşınma yüzeyleri SEM ile incelendi.



2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

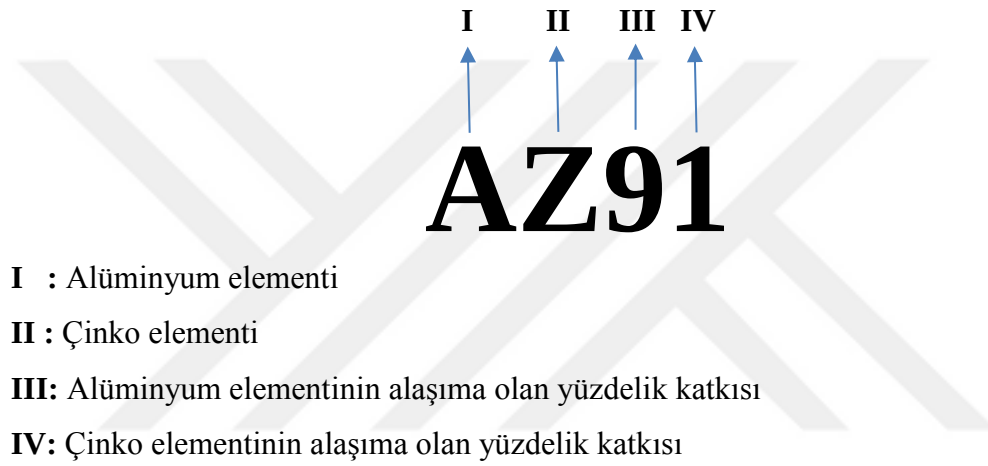
2.1. Magnezyum ve Alaşımları

Magnezyum elementi Sir Humphrey Davey tarafından 1808 yılında keşfedildi. Konstrüksiyon metalleri içinde bilinen en hafif malzemedir. [22]. Magnezyumun hafiflik yönünden plastiklere benzemekle beraber, mukavemet açısından ise metalleri aratmayacak özelliklere sahiptir. Yerkabuğunun % 2.7'sinde ve okyanusların % 0.13'ünde bulunması sebebiyle Mg elementi rezervleri oldukça zengindir [23]. Doğada Magnezyum elementi, en çok tuzlu su, tuz gölleri ve okyanuslardan elde edilmektedir. Periyodik tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir. Tablo 2.1.' de Magnezyum elementine ait genel özellikler verilmiştir.[24]

Tablo 2.1. Magnezyum elementinin özellikleri [24]

Simgesi	Mg
Atom ağırlığı	24.312 g/mol
Atom numarası	12
Kaynama noktası	1107 °C
İyon değeri	+2
Yoğunluğu	1.74 g/cm ³
Ergime noktası	650 °C
Kristal yapısı	Hekzagonal Kovalent
Elektron düzeni	3S ²
Yarıçapı	1.36 °A
Atom yarıçapı	1.60 °A (12 koordinasyon sayılı metalik durumda)
İyon yarıçapı	0.65 °A (6 koordinasyon sayılı kristaldeki)
Atom hacmi	14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)
Özgül ısı	0.25 cal/g °C
Birinci iyonlaşma enerjisi	176 kcal/mol
Isı iletkenliği	0.38 cal/cm ² , s.cm.°C (oda sıcaklığında)
Erime ısı	2.14 kcal/atomgram
Elektrik iletkenliği	0.224 mikroohm -1 (0° ile 20 °C arasında)
Kaynama ısı	32.517 kcal/atomgram
Asit-Baz özelliği	Baz

Yoğunluğu 1.7 g/cm^3 olan magnezyum elementi, çeliğin yoğunluğundan %78 (5.5 kat), çinkonun yoğunluğundan %76 (4.1 kat) ve alüminyumun yoğunluğundan da %38 (1.53 kat) daha hafif olması nedeniyle, yapı malzemesi olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Özgül mukavemet değerleri bakımından kendisi gibi hafif alüminyuma nazaran daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Özellikle de otomotiv ve hava araçlarında, spor aletlerinde, imalat sanayinde ve elektronik cihazlarda hafifliği ve dayanımı yönünden tercih edilen bir elementtir. Şekil 2.1.'de Magnezyum alaşımlarında kullanılan kodlama sistemi gösterilmektedir. Bu şematik kodlama göre, magnezyum alaşımının da % 9 alüminyum ve % 1 çinko içerdiğini göstermektedir [24].



Şekil 2.1. Magnezyum alaşımlarında kodlama yöntemi [24]

Magnezyum alaşımlarının standartları [ASTM B 93/B 93-94 ve ASTM B94] dokümanlarında belirlenmiş olup alaşım elementi ve oranı Tablo 2.2.'de verilmiştir [24].

Tablo 2.2. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri [ASTM B 93/B 93M -94 ve ASTM B94] [24]

Mg Alaşımı	Alaşım elementi ve Oranı %											
	Al	Zn	Mn	Si (Mak)	Fe (Mak)	Cu	Ni (Mak)	Be	Ce	Zr	Diğer	Mg
AM50	4.5-5.3	0.20	0.28	0.05	0.004	0.008	0.001	-	-	-	0.01	Kalan
AM60	5.6-6.4	0.20	0.26	0.05	0.004	0.008	0.001	-	-	-	0.01	Kalan
AS21	1.9-2.5	0.15	0.20	0.70	0.004	0.008	0.001	-	-	-	0.01	Kalan
AS41	3.7-4.8	0.10	0.35	0.60	0.0035	0.001	0.001	-	-	-	0.01	Kalan
AZ31	2.5-3.5	0.7-0.13	0.20	0.05	0.005	0.005	0.005	-	-	-	-	Kalan
AZ91	8.5-9.5	0.45	0.28	0.05	0.004	0.001	0.001	-	-	-	0.01	Kalan
ZE10	0.05	1-1.5	0.1	0.05	0.03	0.005	0.005	0.002	0.12	-	-	Kalan
ZK60	0.05	4.8-6.2	0.1	0.05	0.03	0.005	0.005	0.002	-	0.3-0.9	-	Kalan

Deney numunesi olarak kullanılan AZ91 magnezyum alaşımda en fazla Mg daha sonra ise en çok Al bulunmaktadır. Buna binaen Mg esaslı alaşımlarında Al elementi en fazla kullanılan elementtir. Al elementi çekme dayanımını, yüksek sertlik ve katılaşma hızını artırdığından dolayı tercih edilmektedir. Nispeten darbelere karşı olan dayanımını ve sünekliği istenmeyen yönde etkilemektedir. Al elementi malzemenin dökülebilme kabiliyetini geliştirmekte ve oluşabilecek mikro gözeneklerini azalttığı varsayılmaktadır. Magnezyum alaşımda ısıtma işlem kabiliyetinin artırılması için katkı maddesi olarak Al oranı, %6'dan fazla tutulmaktadır. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalikliği düşük sıcaklıklarda ($\leq 120^{\circ}C$) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir [24].

2.2. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum elementi endüstriyel alanda her iki dünya savaşı sırasında kara ve hava nakil araçlarında kullanılmıştır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte elektromekanik ve bilişim alanlarında kullanım yeri bulmuştur. Son yıllarda özellikle enerji verimliliğinin arttırmaya yönelik çalışmalarda hafiflik ön plana çıktığı için magnezyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Otomotiv imalatında jant gibi dökümle elde edilen parçalarda kullanılmıştır. Bu kullanım, araçların toplam ağırlıklarından yapısal olarak taviz vermeden oldukça önemli bir oranda azalabilmeyi sağlamaktadır. Bunların bazıları; silindir kapakları, iç kapı kolları, karter taban kısmı şanzıman gövdesi, emme manifoldu ve bazı kaporta kısımları gibi yerlerde kullanılmıştır [25]. Magnezyum alaşımlarının birçok farklı türleri uygulamalarda kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Elektronik dünyasında, bazı firmalar ürettikleri laptop kasalarının %30'unu AZ91D alaşımlarından üretmişlerdir [26].

Otomotiv endüstrisinde yapılan çalışmalarda, özellikle araçlardan enerji sarfıyatını azaltarak daha yüksek verim elde etmeyi amaçlayan, ayrıca çevreye duyarlı yakıt verimliliğini elde etmek için bazı çalışmalar önem kazanmıştır. Bu hedef doğrultusunda yapılan çalışmaların yanı sıra araçların ağırlıklarının da azaltılması öncelenmiştir. Hafif metaller sınıfına giren Alüminyum, Magnezyum ve benzeri alaşımları bu amaçla kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarından AZ91 malzemesini kullanan otomobil üreticilerinden BMW, bu malzemeden motor bloğu üreterek piyasaya sürmeye başlamıştır. Bu motorun bazı kısımlarında kullanılan AZ91'in kullanımı dolayısıyla emsallerine göre 10 kg kadar hafiflik sağlamamıştır [24].

Diğer magnezyum alaşımlarıyla da fren, debriyaj pedalları, hava yastıkları ekipmanları ve koltuk parçaları üretilerek alüminyuma göre % 30, çeliğe göre ise de %75 oranında bir hafiflik sağlanmıştır. Magnezyum alaşımları hava araçlarında da aşırı mukavemet gerektirmeyen parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle uçak koltuklarında ve depolarında kullanılmaktadır. Helikopterlerin quadrant kısımlarında ve hidrolik depolarında magnezyumun AZ91 alaşımı ön plana çıkmaktadır. Magnezyum alaşımlarının günümüzde en yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de elektronik endüstrisine bağlı olarak elektronik cihazlardır. Örnek olarak cep telefonları, tabletler, dizüstü bilgisayarlar, kamera ve fotoğraf makinelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanda kullanımın başlıca nedenleri arasında hafiflik ön plana çıkmaktadır [24].

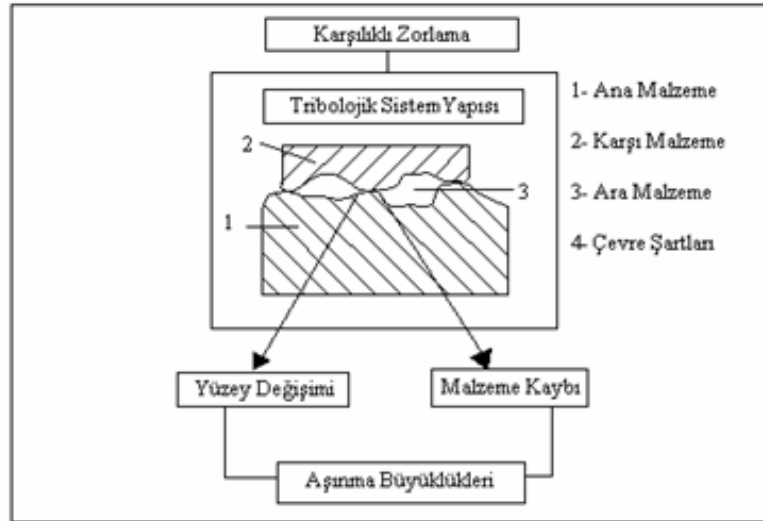


3. AŞINMA ve SÜRTÜNME

3.1. Aşınma

Aşınma hem teknik hem de ekonomik bir problemdir. Aşınma genel olarak mekanik ve kimyasal etmenlerden dolayı malzemelerde meydana gelen istenmeyen parçacık kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma istenmeyen bir durumdur ve önemli işletme ve bakım maliyetleri doğurur. Aşınma genel olarak; yataklarda, pistonlarda, supaplarda, kesici takımlarda dişlilerde, kırma ve öğütme değirmenlerinde, madencilik endüstrisinde kullanılan makinelerde, türbin kanatçıklarında sıklıkla görülür [27].

Malzemelerdeki parçacık kayıplarının aşınma sayılabilmesi için mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması, yavaş fakat sürekli olması, malzeme yüzeyinde deformasyon meydana getirmesi ve istem dışı meydana gelmesi gerekmektedir. Birçok makine parçasının ve mühendislik malzemesinin ömrüne etki eden aşınma tamamen ortadan kaldırılamasa da malzemelerin ve parçaların yüzey özelliklerini geliştirmek ve uygun yağlayıcı kullanmak ile etkileri azaltılabilir [27]. Aşınma sistemindeki bütün bileşenlerin oluşturduğu sisteme “Tribolojik Sistem” denilmektedir (Şekil 3.1.) [27].



Şekil 3.1. Tribolojik sistem [27,28].

Tribolojik sistemdeki bileşenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Aşınan (Ana malzeme): Fiziksel özellikleri, kimyasal özellikleri, boyutları ve yüzey durumu bilinen, aşınma özellikleri incelenecek cisimlerdir [27,28].

Aşındıran (Karşı malzeme): Aşınmayı oluşturan karşı sürtünme elemanıdır. Bu malzemeler katı, sıvı veya gaz olabilirler. Aşındıran ve aşınan elemanlar birlikte bir aşınma çiftini oluşturur [27,28].

Ara Malzeme: Aşınan ve aşındıran elemanlar arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı halinde bulunan malzemedir. Bu malzeme bir yağ, aşınma sırasında ortaya çıkan parçacık veya kum tanesi olabilir [27,28].

Temas Kuvveti (Yük): Yüzeye etki eden kuvvetin büyüklüğü, statik, dinamik, darbeli veya titreşimli oluşu, doğrultusu ve uygulama zamanı birlikte yükün şiddetine belirleyen etmenlerdir [27,28].

İzafi Hareket: Aşınan ve aşındıran elemanlar arasındaki kayma, yuvarlanmaya veya çarpma izafi hareketi ile izafi hareketin yönü ve büyüklüğü ile belirlenir. İzafi hareket ve yük tribolojik sistemde en önemli faktörlerdir [27,28].

Çevre: Çevre tribolojik sistemi içine alan katı sıvı ve gaz halinde bulunabilen ortamdır. Ortamın durumuna göre sürtünme ve aşınma önemli oranda etkilenmektedir [27].

3.2. Aşınma Çeşitleri

3.2.1. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma yırtılma veya çizilme aşınması olarak da bilinmektedir. Sürtünen iki malzemeden sert ve pürüzlü olanı diğer malzemeden küçük parçacıklar kazıyarak, bu malzemede kayıplara neden olur. Abrasif aşınmanın gerçekleşmesi için bir malzemenin diğerinden daha sert olması gereklidir [27]. Bu aşınma türünde aşındırıcılar genellikle metal olmayan malzemelerdir [27,29]. Sertliği yüksek olan malzeme diğer yumuşak malzemeyi çizerek aşındırır. Sanayideki uygulamalarda en sık karşılaşılan aşınma türü abrasif aşınmadır. Bu tip aşınma; özellikle madencilik sektöründe kullanılan makinelerde, kazıma aletlerinde ve makinelerinde, mineral endüstrisinde, tarım alet ve makinelerinde görülmektedir [27].

3.2.2. Adhesif Aşınma

Adhesif aşınma yapışma aşınması olarak bilinen aşınma türüdür [27]. Adhesif aşınmada iki metal malzeme birbirine sürtünürken pürüzlerin bulunduğu tepeciklerde birbirlerine geçici olarak kaynarlar ve bu mikro kaynaklar kayma hareketi devam ettikçe, yüzeydeki gerilmelerin etkisiyle koparak yüzeyden uzaklaşırlar. Böylelikle malzeme kayıpları

neticesinde aşınma meydana gelmiş olur [27,28]. Metal malzemelerde yapışma işlemi sıcak ve soğuk durumlarda gerçekleşebilir. Soğuk durumda yapışmanın ana nedeni malzemeye uygulanan yüküdür. Malzeme yüzeylerindeki pürüz azaldıkça abrasif aşınma miktarı da azalmaktadır. Sürtünen iki yüzey arasında oluşan ısı da yapışmayı artıran etkenlerden biridir. Ayrıca birbiriyle temas halinde olan hareketli metal malzemelerin kristal kafes yapıları birbiriyle aynısı veya yakın ise adhesif aşınma daha hızlı gerçekleşmektedir [27].

3.2.3. Korozi Aşınma

Aşınma ve korozyonun birlikte etkiyerek daha büyük malzeme kayıplarına neden olduğu aşınma tipidir. Korozyon vakum ve soy gaz atmosferi ortamı haricindeki tüm ortamlarda oluşabilir ve aşınmaya eşlik eder [27,28]. Malzemeler çalışma koşullarında, çevrede bulunan kimyasallar ve havayla tepkimeye girerler. Bu tepkimeler sonucunda malzeme yüzeylerinde oksit tabakası meydana gelir. Oluşan oksit tabakaları sürtünme ve aşınma esnasında malzeme kayıplarına neden olur. Ayrıca yüksek sertliğe sahip oksitler kırıldıktan sonra malzeme yüzeylerini çizerek de aşınma miktarını artırır [27].

3.2.4. Kavite Aşınması

Kavite aşınması çukurcuk aşınması olarak da isimlendirilmektedir. Bu aşınmada; metal yüzeyinde kabarcıklar oluşmakta ve ani bir hız etkisi altında bu kabarcıklardaki basıncın düşmesi ile kabarcıklar patlamakta ve yüzeyde oluşan şok etkisi ile yüzeylerin aşınması oluşmaktadır. Kavite aşınması genelde, gemi ve pompa pervanelerinde, ayrıca kompresör silindirlerinin cidarlarında oluşmaktadır [27,28].

3.2.5. Yorulma Aşınması

Bu aşınma tekrarlı ve değişken yükler altında gerçekleşir. Aşınma sürecinde malzeme yüzeyleri değişken yük ve gerilmelere maruz kaldığından, bu aşınma tipi aşınmaya maruz kalan birçok makine parçasında görülebilir. Yorulma aşınmasında aşınma süresince, malzeme yüzeylerinde küçük çatlaklar oluşur. Bu çatlaklarda kırılarak yüzeyden parça kopmasına, çukur ve olukların meydana gelmesine sebebiyet verir [27].

Yorulma aşınmasında, yüzeyde oluşan kayma gerilmelerinin en yüksek değere ulaştığı bölgelerde plastik deformasyon ve dislokasyon neticesinde küçük çatlak ve mikro gözenekler oluşur. Bu mikro gözenek ve çatlaklar zamanla yüzeye doğru ilerler ve çukurlar oluşturur. Yorulma aşınması genellikle; dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmalarda görülür [27].

3.2.6. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınmada aşındırıcı parçacıklar sıvı veya gaz bir ortam vasıtası ile malzeme yüzeyine çarparak, yüzeyden malzeme koparılır. Bu aşınmada, normal şartlarda aşınma hızları düşüktür, fakat yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımı düştüğünden eroziyon aşınma miktarı artmaktadır. Eroziyon aşınmada, aşındırıcı parçacıkların yüzeye çarpma açısı oldukça etkilidir. Düşük püskürtme açılarında, yumuşak malzemelerin aşınma miktarları yüksek olurken, sert ve gevrek malzemeler yüksek püskürtme açılarında eroziyon aşınma dirençleri yüksektir [27,28]. Bu tip aşınma genellikle, buhar ve jet türbinleri, boru hatları, parçacık madde taşıyıcı valfler gibi sistemlerde görülmektedir [27,29].

3.2.7. Ögütme Aşınma

Bu aşınma, yüksek basınca maruz kalan parçacıkların malzeme yüzeyleri ile düşük hızlarda karşı karşıya gelmeleri sonucu oluşur. Bu durumda, malzeme yüzeyinden parçacıklar kesilir veya küçük çizikler oluşarak yüzeyden malzeme kaybolur [27].

3.2.8. Oymalı Aşınma

Bu aşınmada, yüzeyler kütsel olarak deformasyona uğrar. Oymalı aşınmada, malzeme yüzeyleri yüksek gerilmelerdeki çarpmaya maruz kalırlar ve yüzeyden parçacıklar kesilerek kopar. Aşırı yüklemelerden dolayı meydana gelen oymalı aşınmaya örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı ve kırıcı gibi makineler gösterilebilir [27].

3.2.9. Kazımalı Aşınma

Bu aşınma şekli korozyonla birlikte oluşan aşınma türleri arasında en yaygın olanıdır ve iki yüzey arasındaki hafif titreşimli hareket neticesinde meydana gelir. Bu titreşim oksitlenmiş yüzeylerde oyuklar meydana getirir. İki metal birbiriyle temas ettiğinde,

yüküm etkisiyle yüzeylerde bulunana düzensizlikler birbirine yapışır. Hareket devam ettikçe bu yapışkan bağlantılar yüzeyden koparlar. Yüzeyden kopan parçacıklar hareketlerin küçük olması nedeniyle yüzeyden uzaklaşamaz ve oksitlenerek yüksek sertliklere ulaşırlar. Bu parçacıklar, abrasif karakterli olmalarından dolayı yüzeyleri kazıyarak aşındırırlar. Kazımalı aşınma genelde gemi, uzun süre çalışan makine ve uzun yol giden araçlarda görülür [27].

3.3. Sürtünme

Sürtünme, temas halindeki iki cismin arasında oluşan izafi harekete karşı gösterdikleri dirençtir. Sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı, malzemelerin ve yağlayıcıların çalışma performanslarını etkileyebilir. Ayrıca temas eden malzemelerin ya da yüzey filmlerinin özelliklerini değiştirebilir ve bazı durumlarda yağlayıcının ve malzemenin özelliklerini değiştirebilir. Sürtünme ısısı sonucu parçalarda yapısal zayıflama, aşınma ve yanma sebebiyle parçalar mekanik hasara uğrar. Mekanik hasara uğrayan parçalar maliyet ve güvenlik sorunları doğurur [27,29].

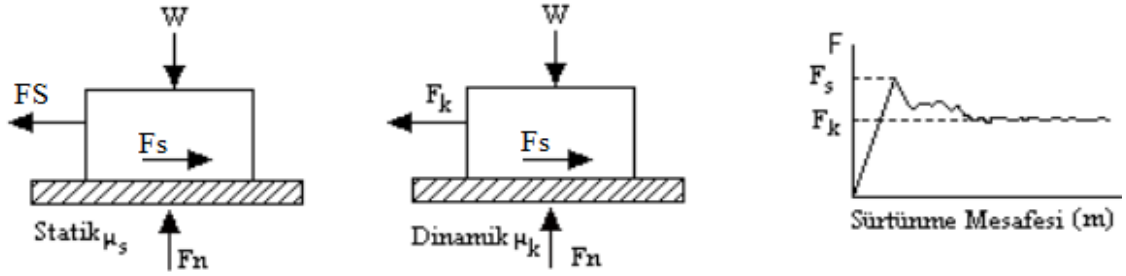
Hareketli makinelerde sürtünme, daha fazla enerji kaybına neden olan bir etkidir. Sistemde kaybolan bu enerji, ısı enerjisi ve kayan yüzeylerin aşınması neticesinde oluşan çeşitli deformasyon işlemlerinde harcanırlar. Yine ortaya çıkan yüksek ısı enerjisinin de soğutularak tahliye edilmesi gerekmektedir. Bunun içinde ek bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulur ve yüksek sürtünme ısıları sistemin çalışma sınırlarını sınırlandırabilir. Malzeme işleme, yataklar ve dişlilerde düşük sürtünme katsayısı tercih edilirken, frenler, kavramalar, vida dişleri gibi parçalarda yüksek sürtünme katsayılarına ihtiyaç duyulur. Tüm durumlarda malzemelerin ve makine elemanlarının sürtünme katsayıları değerlerinin tahmin edilebilir ve mümkün olduğunca sabit olması istenir. Böylelikle makine tasarımları daha verimli ve sağlıklı yapılabilir [27,29].

3.3.1. Sürtünme Katsayısı

İki katı cisim birbirine temas ettirildiğinde, bu cisimlerin birbiri üzerinde kaymasını sağlayan bir sürtünme kuvveti (F_s) ve dik yönde de normal kuvvet (F_N) meydana gelir. Bu iki kuvvet arasındaki oran ise sürtünme katsayısı (μ) olarak adlandırılır ve aşağıdaki 3.1 denklemiyle ifade edilir [27]:

$$\mu = F_s / F_N \quad (3.1)$$

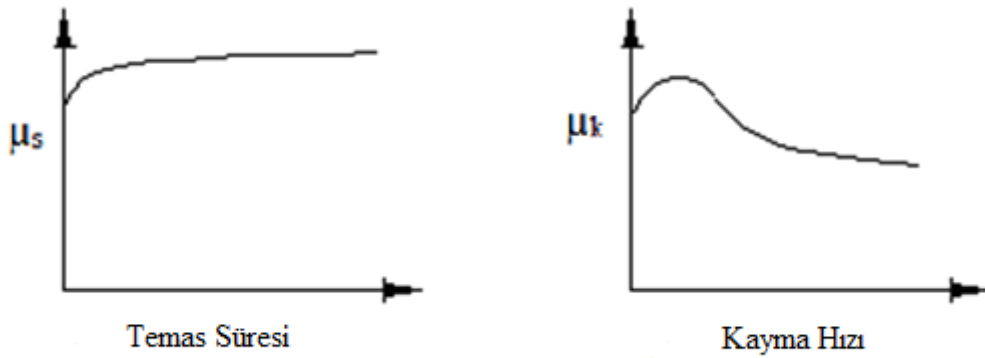
Sürtünme katsayısı statik (μ_s) ve dinamik (μ_k) olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.2.) [27]. μ_s kaymaya başlama kuvveti ile μ_k ise hareketi devam ettirme kuvveti ile izah edilir [27].



Şekil 3.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayısı [27].

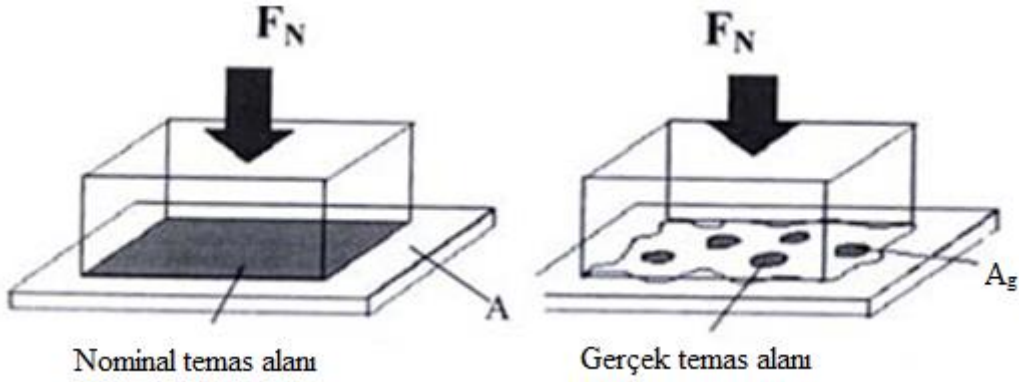
Yani $F_s = F_s$ ise statik ve $F_k > F_s$ ise dinamik sürtünme şartları olarak ifade edilir.

Yine (μ_k) hızın bir fonksiyonu iken (μ_s) temas süresinin fonksiyonudur. μ_s -zaman ve μ_k -hız grafiği Şekil 3.3.' de verilmiştir [27].



Şekil 3.3. μ_s -zaman ve μ_k -hız grafikleri [27].

Sürtünme katsayısının en yüksek olduğu değer hareketin ilk başlangıcıdır. Sürtünmede yüzeylerin pürüzlülüğü ve temizliği göz önünde bulundurulmalıdır. Yüzeyler birbiri ile pürüzlerin tepelerinde temas ederler (Şekil 3.4.). Küçük temas alanlarının toplamı gerçek temas alanını verir ve bu alan nominal geometrik alandan daha küçüktür [27].



Şekil 3.4. Sürtünmede nominal ve gerçek temas alanı [27].

3.3.2. Sürtünme Çeşitleri

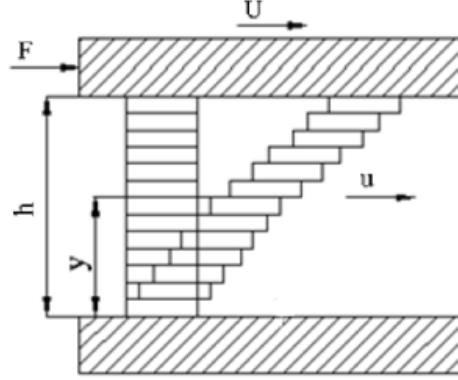
3.3.2.1. Kuru Sürtünme

Sürtünme denilince akla ilk gelen sürtünme kuru sürtünmedir. Aşınma ve ısı meydana gelişi daha çok kuru sürtünme sonucu oluşur. En genel haliyle toz, kir ve yağlardan temizlenmiş yüzeylerin, maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer ortamındaki sürtünme halidir. Bu sürtünmede, yük uygulanmadan önce temas halindeki yüzey tabakaları arasında bir bağlantı meydana gelir ve yük uygulandıktan sonra tabakanın bir kısmı koparak küçük temas alanlarında metaller arası kaynak olayı meydana gelir. Sürtünme kuvveti ile bu kaynak bağları zamanla koparak aşınma meydana gelir. Kuru sürtünme genellikle kavrama ve fren gibi sürtünme esasına göre çalışan parçalarda görülür [27].

3.3.2.2. Sıvı Sürtünme

Sıvı sürtünmesi, metal yüzeylerinin bir yağ filmi tarafından tamamen ayrıldığı sürtünme çeşididir. Metal yüzeyleri ile doğrudan doğruya temas halinde bulunan yağ filmleri adsorpsiyon yolu ile malzeme yüzeylerine tamamen yapışır. Şekil 3.5.' de Sıvı sürtünmesi şematik olarak görülmektedir. U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan yağ filminin hızı U iken, sabit yüzey üzerindeki yağ filminin hızı ise sıfırdır. Yağ filminin ara tabakasının hızı ise y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişiklik gösterir.

Böylelikle sürtünme esasen birbiri üzerinde kayan yağ filmi tabakaları arasında oluşur [27].



Şekil 3.5. Sıvı sürtünmenin şematik gösterimi [27].

3.3.2.3. Sınır Sürtünme

Temas eden iki yüzey arasında ince bir yağ filmi olması haline sınır sürtünme hali denir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde vardır fakat yağ tabakası sıvı sürtünme meydana getirecek kadar kalın değildir. Pratikte en çok rastlanan sürtünme çeşidi bu sürtünmedir [27].

3.3.3. Sürtünme Kuvvetine Etki Eden Faktörler

3.3.3.1. Genel Faktörler

Keskin uçlu geometriye sahip sert bir yüzeyin yumuşak bir yüzey üzerinde hareket etmesi durumunda yumuşak yüzey üzerinde sertliği ve keskinliği oranında çentik meydana getirir. Çentiğin açılmasında sarf edilen deformasyon enerjisinin sürtünme kuvvetinden sağlandığı söylenebilir. Çentik etkisinden dolayı sürtünme kuvveti değeri çentik büyüklüğüne bağlı olarak artmış olur [27].

3.3.3.2. Yüzey Sıcaklığının Etkisi

Sürtünme olayında harcanan gücün büyük bir bölümü sürtünme sonucu meydana gelen ısıya dönüşür. Bu ısı enerjisinin neredeyse tamamı yüzeylerin temas bölgelerinde üretilir. Bu durumdan dolayı ortaya çıkan ısı enerjisinin dağılımını belirlemek oldukça güçtür.

Çünkü sıcaklık yüzeylerin farklı noktalarında farklı büyüklüklerde ortaya çıkar. Yüzey sıcaklığını ölçmede kullanılan termokupllar, sürtünen yüzeylerin etrafına yerleştirilerek sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı değerleri tahmin edilebilir fakat kesin bir sonuç vermez [27].



4. YÜZEY KAPLAMA

4.1. Yüzey Kaplamanın Tanımı

Yüzey kaplama; yeni bir yüzey tabakası elde etmek amacıyla kimyasal özellikleri bilinen bir metal veya alaşımın kaynak yöntemleri kullanılarak farklı kimyasal özellikteki başka bir malzeme yüzeyine kaplanması işlemidir. Bu işlem sonrasında malzemenin dış yüzeyinde dayanımı yüksek, daha sert ve korozyon direncine sahip bir tabaka meydana gelir. Kaplama işleminin amacı malzemenin yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılmaktadır.

Kaplamanın amacına uygun olması için kaplama malzemesinin kaplanan yüzeye göre daha iyi dayanım, aşınma, sürtünme ve korozyon direncine sahip olması gerekir. Günümüz şartlarında dört değişik yüzey kaplama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; dolgu kaplama, sert yüzey kaplama, koruyucu kaplama ve kademeli kaplama olarak adlandırılır [30].

4.2. Buhar Fazı Yöntemleri

Amacı doğrultusunda malzemelerin yüzeyinde sert tabakalar elde etmek için kullanılan bu yöntemde farklı yöntemlerle elde edilen kaplama malzemesi buharları kaplanacak malzeme üzerine gönderilir. İki temel yöntemi vardır. Bunlar; fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olmakla beraber değişik varyasyonlara sahiptirler [31].

PVD yönteminde kaplama için kullanılacak malzemenin sıcaklık yoluyla buharlaştırılması ile veya enerjisi yüksek partikül bombardımanı şeklinde malzemedan ayrılan partiküller aracılığıyla meydana getirilen iyon söktürme işlemidir. Bazı PVD işlemlerinde iyonize olmuş buhar plazma veya gaz ile reaksiyona girerek kaplanacak malzemeye ulaştırılır. Bunun sonucunda oluşan film tabakasının kimyasal özellikleri değiştirilmiş olur.

CVD yönteminde ise, buharlaşması kolay bir malzeme ile birlikte bir termal, gaz ya da başka tekniklerle malzemenin yakınında kimyasal reaksiyona sokulur. Katı fazdaki ve sıcak ana malzemenin üzerine oluşan buhar gönderilir [31]. PVD ve CVD teknikleri kullanılarak farklı bileşikteki birçok malzemeye geniş bir yelpazede kaplamaların yapılması olanak dâhilindedir. Bu yöntemlerle mukavemeti yükseltmek için yapılan sert kaplamalar içinde en gözde olanları amorf karbon, titanyum nitrid ve titanyum karbür

olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu metotlarda diğer yöntemlere göre biriktirme miktarı daha düşük olmaktadır. İyon demeti kullanılarak yapılan bazı söktürme ya da kaplama yöntemleri için biriktirme miktarı $< 0.1 \mu\text{m}/\text{dak}$ olmakla birlikte, CVD yöntemi ya da aktivasyonu yükseltilmiş buharlaştırmalar için bu değer $25 \mu\text{m}/\text{dak}$ ya kadar çıkabilmektedir. PVD yöntemindeki işlemler vakum altında yapılırken, CVD yöntemindeki işlemler ise atmosferik basınçtaki bir reaksiyon alanında yapılabilmektedir [32-34].

4.3. Sol - Jel Yöntemi

Bu yöntem kalitesi yüksek seramik ve cam ürünleri imal etmekte kullanılan bir yöntemdir. Sol-jel yönteminin geometrisi karmaşık ve farklı alt tabakalara sahip malzemelerin kaplanabilmesindeki sağladığı avantaj ve işlem maliyetinin düşük olması sebebiyle beraber düşük sıcaklık kullanımı gibi avantajları mevcuttur [31].

Sol-jel çözeltisinde derin bir biçimde filmler ayrıca püskürtme yani spreyci şeklinde de elde edilebilir. Jel tabakası organik bileşenlerinden uzak olarak ince bir film şeklinde 70°C de kurutulduktan sonra meydana gelen kristal katman, kalan organik bileşenler ile amorf tabakasını pirolize edebilmek için $400-700^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır [35]. Elde edilen çözelti bir jel haline dönüşünce kurutulur ve son hâlini alması için ısı işleme tabi tutulur. Sol-jel yöntemiyle elde edilen kaplamalarda ön çözelti tabakası ince olacak şekilde kaplamanın yüzeyine gönderilir ve reaksiyon başlar. Son olarak oluşan jel tabakası korunma amaçlı termal işlemlerle birlikte kristalleşme aşamalarından geçirilmek suretiyle işlem tamamlanır [31].

4.4. Kaplama ve Anotlama Yöntemleri (Elektrolitik Kaplama)

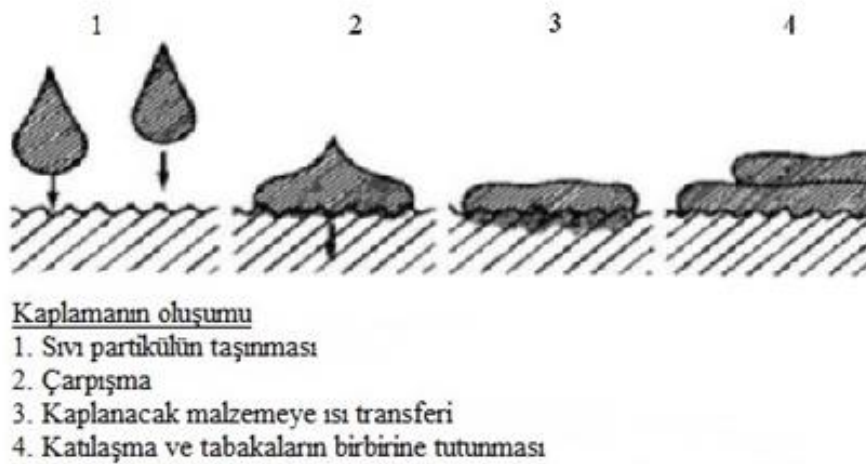
Kaplama ve anotlama tekniklerinde metal yüzeylerinde metali koruyacak ikinci bir film veya tabaka şeklinde kaplama yöntemlerinin uygulandığı tekniklerdir. Elektrolitik kaplama yöntemi altı farklı şekildedir. Bunlar;

1. Isıl püskürtme yöntemleri,
2. Alevle püskürtme yöntemleri,
3. Plazma püskürtme yöntemi,
4. Patlamalı püskürtme,
5. Elektrik ark ile püskürtme,
6. Yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) püskürtme yöntemleridir [36].

4.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey)

Termal sprey ya da diğer adıyla ısı püskürtme yöntemiyle kaplama işlemlerinde; çubuk, tel şeklinde veya toz halindeki kaplama materyalleri; yakıcı, taşıyıcı ve yanıcı gaz topluluklarının desteğiyle ve bir tabanca yardımıyla malzeme yüzeyine püskürtülme şeklinde katı bir kaplamanın oluşturulması şeklinde olur. Bu işlem hem kullanılan malzemeye göre hem işlemin farklılığı ile değişken uygulama yöntemlerine sahiptir. Buna örnek olarak elektrik ark püskürtme, toz-tel alev püskürtme, plazma püskürtme, patlamalı püskürtme (D-Gun) ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme yöntemleri gösterilebilir [31].

Isıl püskürtme yöntemleri; çok farklı ve geniş bir yelpazeye sahip malzemeler üzerine yine aynı çeşitlilikteki kaplama malzemelerinin uygulanabildiği bir tekniktir. Kaplama malzemesinden ısı yoluyla elde edilen partiküller kaplanacak malzeme üzerine doğru yüksek bir hızla gönderilir. Bunun neticesinde malzeme yüzeyinde meydana gelen bağlanma ile birlikte çabucak oluşan katılaşma sayesinde kaplama meydana gelmiş olur [31]. Yüzeyde oluşan kaplamanın dayanımı, kaplama esnasında kullanılan parametrik değerlerin yanı sıra kaplanan malzemenin yapısına ve kaplanan malzemenin de kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Isıl püskürtme yöntemleri farklı uygulama teknikleriyle beraber kullandığı enerjinin türüne göre değişiklik göstermesine rağmen temel anlamda 4 metottan oluşmaktadır. Bunlar; sıvı partikülün taşınması, çarpışma kaplanacak malzemeye ısı transferi ve kaplama tabakalarının katılaşması ve birbirine tutunmasıdır (Şekil 4.1) [37].



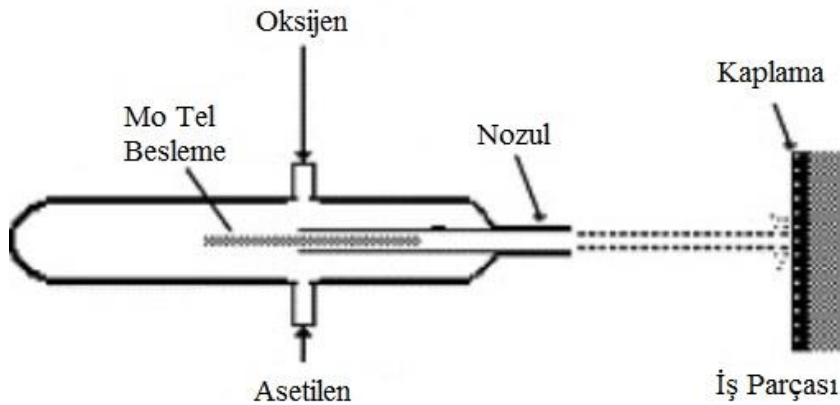
Şekil 4.1. Termal püskürtme yöntemlerinin temel oluşum aşamalarının gösterilişi [37].

4.4.2. Alevle Püskürtme Yöntemleri

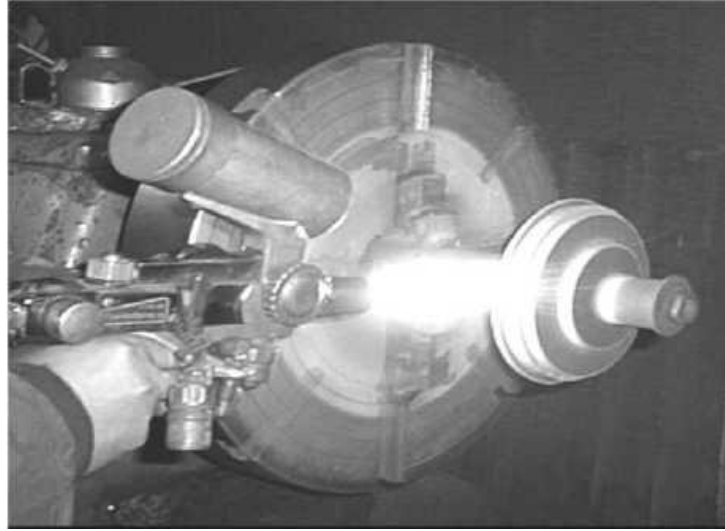
Bu yöntemde daha çok toz şeklindeki malzemeleri ana malzeme üzerine kaplamak mümkün olmaktadır. Alevle püskürtme yöntemi ekonomik olmasıyla birlikte çok geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabiliyor olmasıyla da sürekli kullanılan bir yöntemdir. Bu püskürtme yöntemi; pompa elemanlarında, hadde işlemi için kullanılan merdane aksamalarında ve mukavemeti yüksek sac plakalarda kullanılabilmektedir. Alevle püskürtme yöntemindeki kaplamanın fazla olmakla birlikte (% 10-20), kaplanacak malzemeye birleşme yeteneği [31].

Alevle püskürtme tekniğinde, kullanılan kaplama malzemesi kimyasal bir yanma sonucu elde edilmektedir. Yanma için gerekli olan gaz veya sıvı yakıt, sıkıştırılan hava ya da oksijen gazı kullanılarak yanmaktadır. Asetilen gazının maliyetinin düşük olmasıyla birlikte meydana getirdiği yüksek sıcaklık tercih sebebidir. Bunun yanı sıra hidrojen, propan ve doğal gaz da bu yöntemde kullanılabilmektedir. Bu yöntemde proses şöyle işlemektedir; Alev sayesinde ergimiş kaplama malzemesi partiküller haline getirilmek için hızlandırılırlar. Bu hızlandırma işlemi için oksidasyondan uzak durmak için sıkıştırılmış kullanmak yerine azot gazı ya da argon gazı tercih edilmelidir. Bu yöntemin işletilmesinde kullanılan ekipmanlar ucuz olmasının yanı sıra taşıma kolaylığı da sağlamaktadır [31]. Daha güvenli bir çalışma için kapalı başlıklı sprej ve egzoz kullanmak idealdir [36].

Diğer yöntemlere nazaran partiküllerinin hızının düşük olması sebebiyle alevle püskürtme yöntemi ile elde edilmiş kaplamaların kalitesi daha düşük olmakla beraber gözenekli yapı daha yoğun ve bağlanma dayanımları yüksektir. Bu yöntemin olumsuz yanı kaplama yapılırken ana malzemeye uygulanan aşırı sıcaklığın malzemenin kristal yapısında deformasyona sebep olma olasılığının var olmasıdır [38].



Şekil 4.2. Alevle püskürtme yönteminin şematik gösterilişi [39].



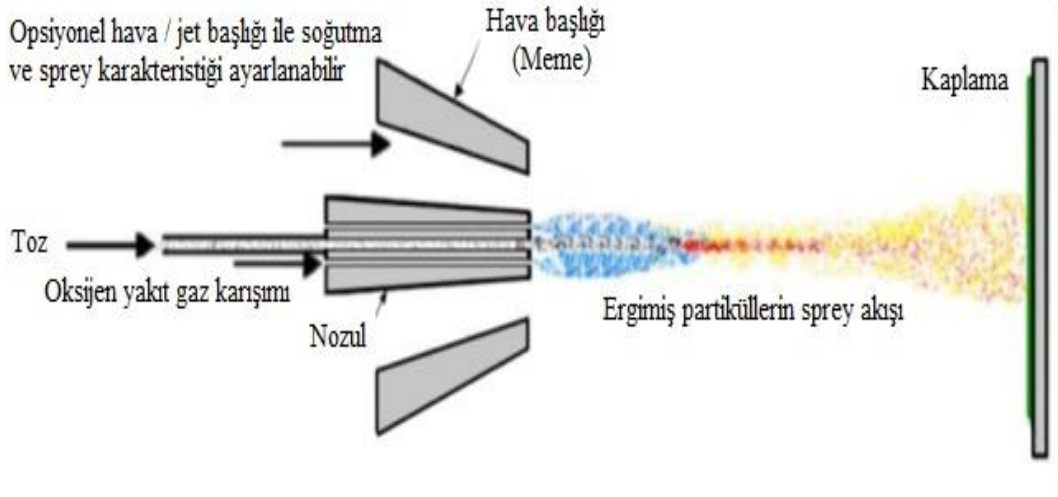
Şekil 4.3. Alevle püskürtme yönteminin torna tezgâhı kullanılarak uygulanması [38].

4.4.3. Plazma Püskürtme Yöntemi

Uygulamada kullanılan diğer termal tekniklere nazaran plazma püskürtme tekniği kullanım alanı oldukça geniş ve kullanımı bakımından esneklik düzeyi yüksek bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem sayesinde yüksek sıcaklıklarda bile sıvı konumuna çok yakın bölgelerde çalışma imkânı mevcuttur. Tekniğin çok yönlülüğü sayesinde çok geniş bir kullanım alanı bularak; elektrik, termal koruma gibi özel alanlarda da etkin olarak kullanılır. Bu yöntemin çalışma prensibine bakacak olursak; frekansı üst seviyedeki bir kıvılcım sayesinde meydana gelen elektrik kıvılcımı bu yöntemin esas enerji kaynağını meydana getirir. Doğrusal akım kullanan bir tabancada meydana gelen ark, içerisinde silindir şeklindeki bir tungsten katot bulunan ve buna dik bir pozisyonda bulunan bakırdan oluşan bir anodun etkileşiminin sonucunda oluşur. Bu lülelerin içerisinde genellikle kullanılan gazlar; helyum, azot, argon ya da bu gazlardan meydana gelen karışımlar kullanılır. Bahsi geçen gaz çeşitleri kıvılcımın üzerinden geçerek, katot bölümünden gelen elektronlar ile gazların molekülleri arasında bir tepkime oluşur ve bunun neticesinde iyon haline gelen gaz da plazmayı meydana getirir [31].

Yukarıda anlatılan tepkimeler sonucu meydana gelen plazmanın sıcaklık değeri ile enerji kapasitesini kullanılan gazların özellikleri büyük oranda etkilemektedir. Bunun yanı sıra kaplama malzemesi için kullanılacak toz kendisini taşıyan bir gaz sayesinde akışkan duruma gelerek enerji seviyesi yüksek olan plazma jetine doğru yönlendirilir. Enjekte edilecek malzemenin formu plazma enjektörünün tasarımıyla doğru orantılıdır. Bu

sistemde bulunan toz kanalları istenilen açılarda plazma jetinin eksenine göre yer edebilir. Partiküllerin değişik hız ve tasarımlarına göre kaplama yapılacak malzemenin hızı 300 ile 700 m/s aralığında değişebilmektedir. Hem eksenel yönde hem de radyal yönde olmak üzere toz partiküllerinin gösterdiği davranış biçimi plazma jeti istikametince değişik yörüngelerde olabilirler [31,37].



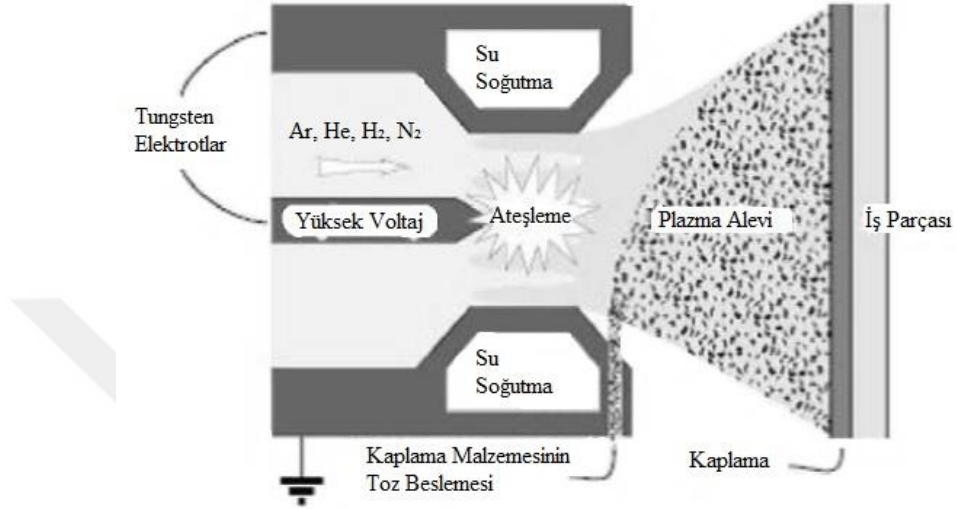
Şekil 4.4. Eksenel toz enjeksiyonlu plazma püskürtme yöntemi [41].

40 kW ve ya 80 kW termal enerjili elektrik arkı ile oluşan bu yöntemde partiküllerin kaplama hızı 600 m/s yi bulmaktadır [31]. Yaklaşık 16.000 °C kadar sıcaklıkların oluştuğu bu yöntemde genelde toz olarak kullanılan kaplama malzemesi ile yapılan kaplamalar yüksek derecede dayanıklılığa sahip bir bağlanma özelliği göstermektedir [33].

Yukarıda bahsi geçen sıcaklık değerlerine ulaşabilmek için kullanılan helyum ve argon gibi gazlar bu işlem için uygundur. Azot ve hidrojen gibi gazlar moleküler yapısından dolayı daha düşük plazma sıcaklıkları meydana getirmektedir. Bu yöntem refrakterli bileşiklerle sert yüzeyli kalın kaplamaların yapılmasında kullanılan hızlı ve etkili bir yöntemdir. Plazma püskürtme yöntemi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında kaplama hızının yüksek oluşu ile beraber kaplamanın yüzeye bağlanma derecesinin iyi oluşu ve yoğunluk fazlalığı bu yöntemi diğer yöntemlerden üstün kılmıştır. Soy gazlar yüksek saflık derecesini elde etmekte kullanıldığı için bu yöntemde kullanılması oksidasyona meydan vermeyen kaplamaların elde edilmesine olanak sağlar. Plazma püskürtme yöntemi ile kaplanan malzemeler arasında uçak motoru ve ekipmanları, valf parçaları, tarım

makinelerinin elemanları, yataklar gibi korozyona karşı dayanıklı ve aşınma direnci yüksek malzemeler bulunmaktadır [31].

Şekil 4.5.'de gösterilen şematik görüntüde plazmaya dik bir şekilde yapılan toz besleme ifade edilmiştir [41].



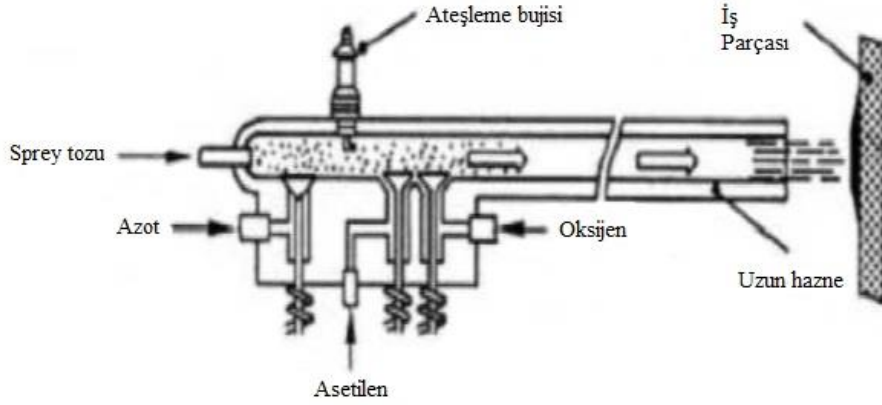
Şekil 4.5. Dikey toz beslemeli plazma püskürtme yöntemi [41].

4.4.4. Patlamalı Püskürtme (D-Gun)

Seri patlamalarla hızlandırılmış partiküllerin eriyik durumda ana malzemeye kaplayacak şekilde gönderilmesiyle elde edilen bir yöntemdir. Oksi-asetilen gazı ile bir odacık içindeki toz partikülleri tutuşturularak elde edilir. Bunun neticesinde meydana gelen patlama dalgası sayesinde kapsülde bulunan toz zerrecikleri aşırı sıcak değerlere ulaşarak hızlanır. Süre gelen her patlama dolayısıyla odacık içine gönderilen azot gazı ile kapsül temizlenerek bu işlem sürekli tekrar eder [31].

Patlamalı püskürtme ile oluşan kaplamalar oldukça yüksek kalitede olmaktadır. Bu yöntemle elde edilen kaplamaların üstün bağlanma dayanımları ve yoğun oluşu ile dikkat çekmektedir. Patlamalı Püskürtme (D-Gun) yönteminin pahalı oluşu dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır [31]. Bunun yanı sıra 140 desibel oranında yüksek bir gürültü çıkması sebebiyle de bir takım özel yalıtım ve dayanıklı patlatma hücrelerinin olması da yöntemin dezavantajları arasında sayılabilir [38].

HVOF tekniği ile patlatmalı püskürtme yöntemi arasında bulunan öncelikli farklar; soğutma sistemi, yakıt türü, yanmanın ayarlı buji ile yapılması olmakla birlikte teorik olarak her iki teknikte aynı yöntemlerle yapılmaktadır [42].



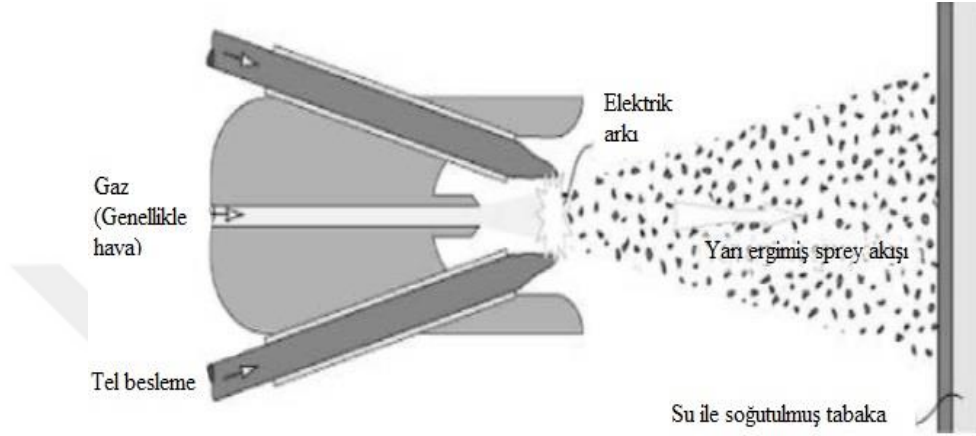
Şekil 4.6. Patlamalı püskürtme işlemi ile termal spreycaplama [31,37].

4.4.5. Elektrik Ark İle Püskürtme

Elektrik arkı ile püskürtme yönteminde tel biçimindeki kaplama malzemeleri değişik şekildeki alt tabakalara uygulanabilen bir yöntemdir. Potansiyel farkları 18 ile 40 V arasında değişen motorlar iki adet elektrik ile yüklenmiş tele hareket vermesi sonucunda bu teli kaplamada kullanılan tabancanın ucuna bağlı bir ark mekanizmasına doğru yönlendirir. Bunun sonucunda oluşan arkın sıcaklığı 6000 ye kadar ulaşabilmektedir [31]. Ergiyen malzemeyi atomize etmek için kullanılan sıkıştırılmış hava sayesinde kaplama malzemesi ana malzeme üzerine doğru gönderilerek işlem gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen bu işlem sayesinde elektriksel iletkenliği olan ve süneklik özelliklerine sahip kaplama malzemeleri elde edilebilmektedir [43].

Bu yöntemde diğer termal yöntemlerde kullanılan bir ısı kaynağına gereksinim duyulmamaktadır. Aralarında bir ark oluşan iki adet elektrot sayesinde yüksek sıcaklıklara ulaşarak ergiyen bir yöntemdir. Ark sonucu ergiyen bu partiküller atomize olmuş halde sıkıştırılan bir hava vasıtasıyla hızlandırılmış bir şekilde ana malzemeye doğru gönderilirler. Oksidasyonun önüne geçmek ve daha iyi bir kaplama elde etmek için sistemde bir soy gaz kullanılması doğru bir tercih olmaktadır. Sistemde telin kullanılmasından dolayı daha dengeli ve sabit bir kaplama elde etmek mümkündür. Kaplamanın uygulandığı ana malzemeye sıcaklık teması olmadığı için kaplama bölgesinde

sıcaklık değişimleri olmamaktadır. Buda yöntemin avantajlarından biri olarak görülebilir. Aynı yöntemlerle yapılan öteki alevle püskürtme tekniklerine göre çok daha dayanıklı bağlanma meydana gelmektedir. Paslanmaz çelik, bakır ve metal karışımlarını bu yöntemle yapmak kolaylık sağlamaktadır. Yöntem Şekil 4.7.'de şematik olarak gösterildiği şekilde uygulanmaktadır [41].



Şekil 4.7. Elektrik arkı ile püskürtme [41].

4.4.6. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi

Yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme olarak bilinen HVOF yöntemi bahsi geçen diğer ısı püskürtme yöntemleri arasında kısmi derecede bulunan tekniklerden biridir. Bu yöntemin başarılı yönlerinden biri kaplama malzemesinin ana malzemenin alt tabakalarına daha iyi bağlanması yönünden diğer püskürtme yöntemlerine göre daha üstünlük göstermesidir. Ayrıca yüksek sertlik değerleri göstermekle birlikte daha az gözenekli yapı oluşumu ve mukavemetinin yüksek oluşu tekniğin üstünlüklerindendir. Bu tekniğin kullanım alanları genel olarak; otomotiv sektörü, imalat sanayi, gaz türbinleri ve ekipmanları ile beraber petrol sektörü olarak karşımıza çıkmaktadır [43]. Şekil 4.8'de HVOF sistemini gösteren çalışma şeması görülmektedir.

4.5. Ergitme Yöntemleri

4.5.1. Plazma Sprey Kaplama Yöntemi

Plazma; maddenin dördüncü halidir, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulundurur ve yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazmanın en önemli iki avantajı vardır. Birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek kadar yüksek sıcaklığın elde edilebilmesi, ikincisi diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır. Plazma sprej tekniğinin ise yüksek işlem sıcaklığı sayesinde, ergime noktası yüksek olan metal ve alaşımlarla çalışma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca, inert ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir. Belirli tane boyutlarında üretilen toz biçiminde ki tüm malzemeler bu işlemde başarıyla kullanılabilir [36].

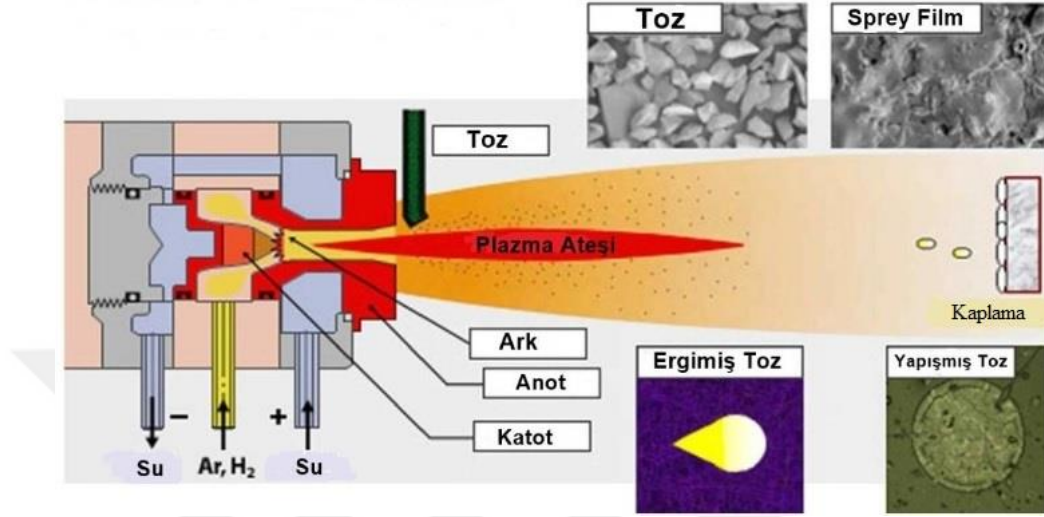
Seramiklere plazma sprej yöntemiyle yapılan kaplamalar yüksek aşınma ve erozyon direncine sahip olurlar. Dizel motorları da dahil erozyon ve aşınma direnci olan uygulamalarda bu yöntem yaygın olarak kullanılır. Plazma spreyle oluşturulan kaplamalar mikro gözenekler nedeni ile korozyon için yetersiz kalabilmektedir ancak alevle spreje göre bu konuda daha avantajlıdır. [45]. Bir termal sprej kaplama yöntemi olan plazma sprej kaplama ile metaller çeşitli tozlarla kaplanırlar. Bu sayede metaller aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya daha dayanıklı hale gelirler. Plazma sprej kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, ana malzemenin önemli özelliklerinden olan tokluk ve kolay şekillendirilebilirlik gibi özellikleri de korunmaktadır. Böylece bu yöntem ile metal ve seramiklerin kendi özelliklerinin yanı sıra daha üstün özellikli yeni bir malzeme elde edilmiş olur [46].

4.5.2. Plazma Kaplama Sistemi

Pahalı olmayan bir ana malzemenin üzerine, ince ve koruyucu değeri yüksek olan bir tabaka oluşturarak yeni özellikli bir malzeme elde etmek, plazma sprej tekniğinin esas amacıdır. İşlemin uygulanma şekli ise, iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz şeklindeki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesidir. Plazma kaplama sisteminin şematik görüntüsü Şekil 4.9.'da verilmiştir. Bu şematik görünüşte, plazma kaplama sistemi [36];

- Sprej tabancası (plazma üfleci),
- Güç ünitesi,

- Gaz besleme ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Soğutma ünitesi ve
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

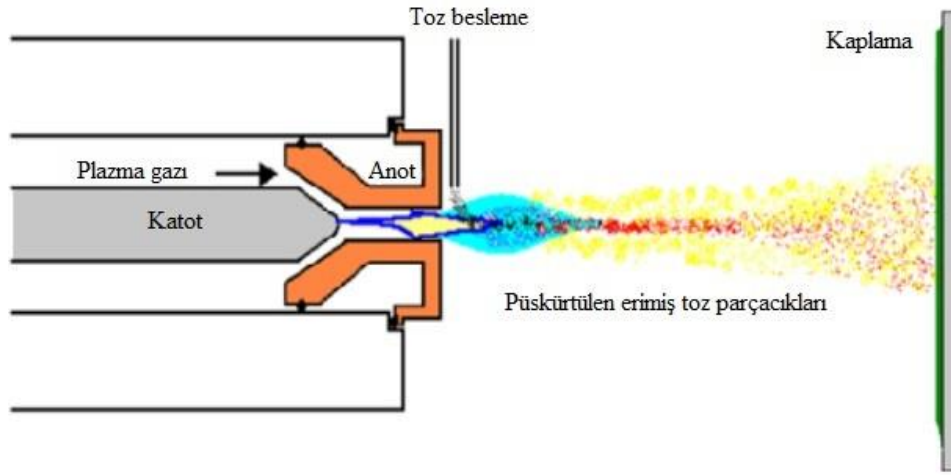


Şekil 4.9. Plazma kaplama sistemi [46].

Kaplama sisteminin en önemli çalışma elemanı spray tabancasıdır (plazma üfleci). Şematik görünüşü Şekil 4.10.'da verilmiştir. Spray tabancasında plazma, anot ve katot arasında meydana gelen elektrik arkında plazma gazlarının iyonizasyonu ile oluşturulur. Anot olarak saf Cu ve katot olarak da %2 ThO₂ katkılı W'ın kullanılır. Kullanılan plazma gazları, katottan etrafından ve nozul görevini gören anodun içerisinden geçirilir. Genellikle yüksek frekans akışı ile başlayan doğru akım arkı elektrotlar ile devam eder. Plazma gazı katot boyunca verilirken bu ark içerisinde ısıtılır ve plazma sıcaklığına gelen gaz, plazma alevi olarak nozul anottan püskürtülür [36].

Gaz bileşimi, gaz akış hızı, anot-katot tasarımı gibi etmenlere bağlı olarak ark akımı ve voltajı değişmektedir. Arkın ateşlenmesi ise genelde anot katot temasıyla gerçekleşir. Anot boş bir nozul şeklinde tasarlanmıştır. Bunun sebebi ise uygulamada nötr plazmanın gerekli olmasıdır. Böylece ark devresi nozul içinde tamamlanmış olur ve serbest halde plazma elde edilir. Bu plazma elektrik akımını iletmemektedir.

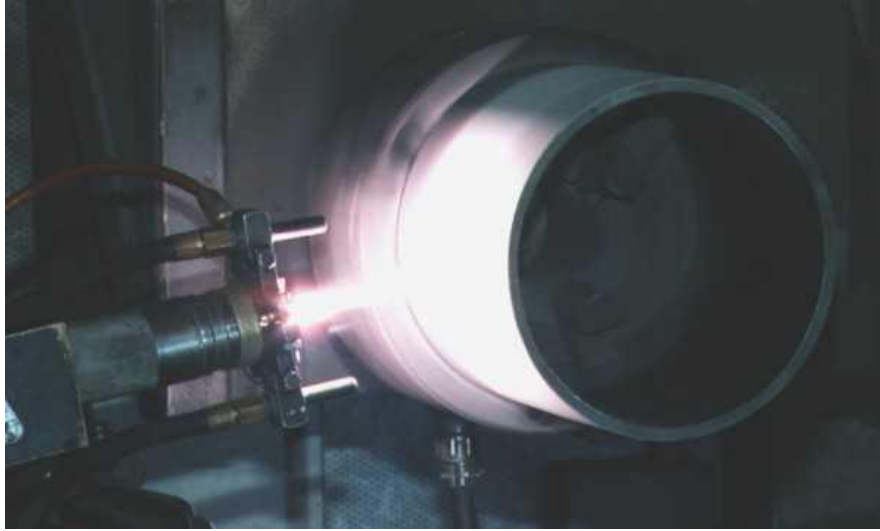
Kaplama işleminde oluşan disosyasyon, iyonizasyon, plazma hali gibi bütün olaylar spray tabancasının içerisinde gerçekleşmektedir [36].



Şekil 4.10. Plazma sprej tabancasının şematik görünüşü [47].

Yüksek gerilim veya yüksek frekans ile tabancaya gelen plazma gazları tutuşturulur. Kaplama tozları, plazma gazları, çalışma voltajı ve çalışma arkı ile alakalı tüm ayarlamalar kontrol ünitesinde manuel olarak veya bilgisayar yardımı ile yapılır [36]. Plazma spreyle kaplama işlemi esnasında, kaplanan malzemenin kalitesi püskürtme hızına göre değişkenlik göstermektedir. Yani kaplamaların özellikleri ile güç ünitesinin kapasitesi doğrudan ilişkilidir. Plazma sprej işleminde ana malzemenin üzerine püskürtülen erimiş toz parçacıklarının hızı, güç kaynağının gücüne bağlı olarak değişir. Konvansiyonel kaplama sistemlerinin gücü 40 kW iken günümüzde 80 ve 120 kW gücünde sistemler kullanılarak partikül püskürtme hızı artırılmış ve bu sayede düşük mikro gözenekli, mekanik özelliği daha iyi olan yoğun kaplamalar elde edilmiştir. Şekil 4.11.'de döner disk üzerine bağlanan silindirik malzeme yüzeyine plazma kaplama yapıldığı görülmektedir [36].

Plazma gazları olan N_2 , Ar, H_2 ve He' un akış hızları, işlem parametrelerine uygun karışımları gaz besleme ünitesinden ayarlanır. Bu ayarlama ile plazma spreynin büyüklüğü, sıcaklığı ve elektriksel arkın düzenliliği kontrol altına alınmış olur [36].



Şekil 4.11. Plazma kaplama [47].

4.5.3. Plazma Kaplama Teknolojisinin Fiziksel Esasları

Plazma, genellikle maddenin 4. hali olarak adlandırılan elektrik yükü nötr olan eşit sayıda serbest elektron ile iyon bulunduran yoğunlaştırılmış bir gazdır. Kimyager Irving Langmuir'e göre ise plazma; içerisinde molekül, atom, iyon, elektron ve kuantum bulunduran malzemenin iyonize edilmiş halidir [36].

Plazma oluşturmak için genelde kullanılan gazlar tek atomlu Ar ve He ile iki atomlu N_2 ve H_2 'dir. Plazma oluşturmak için gazları seçerken, plazma alevi için istenen sıcaklık ve hız değerleri ile ana malzemenin ve kaplama malzemesinin kararlılığına bakılır [36]. Plazma gazları genellikle belirli oranlarda karışımlar halinde kullanıldığı gibi tek tek de kullanılabilir. Amaç, plazma alevinin entalpisini ve hızını artırmaktır. Yaygın olarak kullanılan gaz karışımları $Ar+H_2$ ve $Ar+N_2$ 'dir [36]. Toz partiküllerinin şekline ve boyutuna bağlı olarak taşınım özelliği değişir. Toz partiküllerinin şekli mümkün oldukça küresel ve boyut dağılımı üniform olmalıdır. Aksi takdirde plazma alevinde çok ince tozlar buharlaşmaya, iri tozlar ise tam olarak ergimemeye neden olurlar. Plazma tabancasının anot ile katodu arasındaki ark bölgesine sprey tozlarının beslenmeleri ile tozların tamamen erimesi mümkün olur. Günümüzde kullanılan sistemlerin büyük bir kısmında toz, nozul dışında plazma alevine reaktif olmayan bir gaz vasıtasıyla radyal olarak enjekte edilmektedir. Plazma gazlarının temel ve kimyasal özellikleri aşağıda Tablo 4.1.'de belirtilmiştir [36].

Tablo 4.1. Plazma gazlarının kimyasal özellikleri [48].

Özellik	Plazma Gazları			
	Ar	He	N ₂	H ₂
Relatif molar ağırlık	39.944	4.0002	28.016	2.0156
Özgül ağırlık (0 °C, 100 kpa) (kg/m ³)	1.783	0.1785	1.2505	0.0898
Isıl iletkenlik katsayısı (0 °C) (W/mK)	0.01633	0.14363	0.0238	0.1754
Özgül ısı kapasitesi (20 °C) (kJ/kgK)	0.511	5.233	1.046	14.268
İlk kademe	15.7	24.05	14.5	13.5
Son kademe	27.5	54.01	29.4	-
Sıcaklık (K)	14000	20000	7300	5100
Ark voltajı (V)	40	47	60	62
Ark girişi (kW)	-	50	65	120

Toz partikülleri, plazma alevinin ısı ve kinetik etkileri sayesinde erir ve ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Plazma alevi ile toz partikülü arasında ki ısı transfer mekanizması çok karmaşık bir olay olup bugüne kadar tam olarak anlaşılamamıştır. Plazma alevinde eriyen toz partiküllerinin kimyasal aktiviteleri yüksektir. Bu sebeple, partiküller ile ortam atmosferini oluşturan gazlar arasında bir takım karşılıklı etkileşim mekanizması söz konusudur ki bunlar gaz adsorbsiyonu, kimyasal etkiler, oksit tabakalarının oluşumu ve difüzyon işlemleri gibi olaylardır. Plazma püskürtme kaplama yönteminde kaplama işlemi, kaplama malzemesi olarak kullanılan tozların 8000 – 20000 °C gibi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmış bir plazma alevinde ergitilerek kaplama yapılacak ana malzeme yüzeyine püskürtülmesidir. Bu işlemten sonra elde edilen kaplamalar lamelli bir yapıya sahiptir. Meydana gelen kaplamaların özellikleri kullanılan kaplama sistemine göre önemli oranda etkilenir [49]. Plazma alevinde erimiş toz partikülleri kaplanacak olan ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman sahip oldukları kinetik enerjileri ısı enerjisi ve deformasyon enerjisine dönüşür. Partiküller ana malzemeye temas ettiklerinde mevcut ısılarını kaplanacak olan yüzeye aktarır hızla soğur ve katılırlar. Partiküllerin sıcaklıklarına, soğuma oranlarına ve hızlarına bağlı olarak o andaki soğuma ve katılma davranışları değişir [36].

Kaplama esnasında plazma alev sıcaklığının çok yüksek olması ile mevcut fiziksel ve kimyasal işlemler, erimiş malzemede birtakım değişikliklere neden olur. Kaplama yapılan yüzeylerde, erimiş toz partiküllerinin ortam gazları ve plazma gazları ile reaksiyonunun sonucunda, oldukça yüksek oranlarda oksit oluşmaktadır. Ayrıca az miktarda N_2 'de bulunur [36].

4.5.4. Yüzey Hazırlama

Kaplanacak yüzeyin işleme uygun hale getirilmesi önem arz etmektedir. Kaplama malzemesinin numuneye istenilen şekilde bağlanması için yüzeylerin çok iyi bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Bu etken mekanik olarak bağlanmayı sağlayarak, taneciklerin esas malzeme ile kimyasal bağ oluşumuna ve tanecikler arasındaki mikro yapıda kaynamalara neden olmaktadır. Temas alanının artırılması ve malzeme yüzeyinde gerçekleşen mikro aktivasyonlar bağlanma mekanizmasını olumlu yönde etkilemektedir. Esas malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki güçlü bir bağlanma, uygun yüzey pürüzlülüğü için gerekli olan, yüzeylerde oluşan yağ, nem ve korozyona sebep olan oksit tabakasının temizlenmesiyle elde edilmektedir. Kaplanacak malzemenin cinsine ve tabaka kalınlığına bağlı olarak çeşitli yüzey hazırlama yöntemleri mevcuttur. [50].

Silindirik malzemeler olan mil, şaft ve merdane gibi malzemelerin kanal ve oluk şeklinde 500 μm 'nin üzerindeki pürüzlendirilme işleminde mekanik işleme tercih edilmektedir. Esas malzemenin yumuşak olması klasik yöntemlerle işlenmesini kolaylaştırmaktadır. Kompleks, çok sert ve kırılgan bir yapıya sahip olan malzemelerin mekanik olarak işlenmesi mümkün olmamaktadır. [50]. En iyi yöntem olarak bilinen kumlama yöntemi, bir aşındırıcı yardımıyla yüzeyi temizlenmiş olan malzemenin pürüzlendirilmesi işlemi plazma sprej yönteminin bulunmasından bu yana kullanılmaktadır. [51].

4.5.5. Ön Isıtma ve Soğutma

Genel olarak soğuk işleme yöntemi olarak bilinen Plazma sprej yöntemiyle kaplama bazı uygulamada esas malzemenin ön ısıtılması işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Esas malzemenin nemini almak, bağlanmayı sağlamak ve farklı sıcaklık genleşmeleri dengelemek için ön ısıtma işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. [47].

4.5.6. Kaplama İşleminin Gerçekleştirilmesi

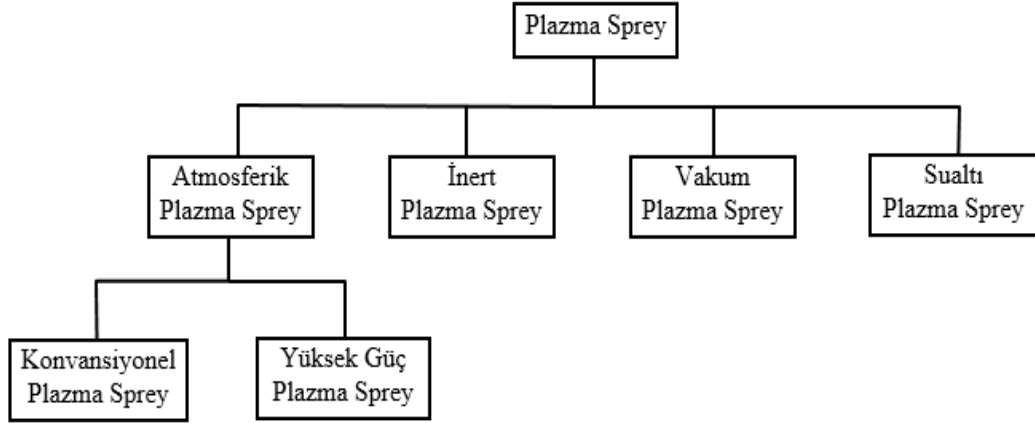
Boyutu belirlenen esas malzeme, kaplanacak yüzeyin yüzey pürüzlülüğünün ayarlanması, maskelemenin yapılması, işlem parametrelerinin belirlenmesi, ölçü aletlerinin hazırlanması ve gerekli güvenlik önlemleri alındıktan sonra kaplanacak esas malzeme plazma alevine dik yerleştirilerek sabitlenir ve bir sprej tabancası yardımıyla işlem gerçekleştirilir. İstenilen kaplama özelliklerini elde etmek için ana malzeme yüzeyine 90°'lik açıyla sprej tozlarının çapması sağlanmalıdır [36].

4.5.7. Plazma Kaplama Yöntemleri

Plazma sprej yönteminde inert plazma gazları kullanılmasına rağmen kaplama işlemin atmosferik şartlarda yapıldığından dolayı, alevin hareketleri, tozların ana malzemeye çarpmaları ve erimiş halde bulunan tanecikler gibi faktörler oksitlenmelere neden olmaktadır. Bu taneciklerin tam erimemesine, oksitlenmelere, aşırı mikro gözeneklere, karbon yığılmalarına, diğer alaşım elementlerinin yanması ve bağlanmalarının kalitesinde düşüş gibi kaplama hatalarına neden olmaktadır. Bu faktörleri azaltmak için plazma sprej işleminin koruyucu atmosferik ortamlarda yapılması gerekmektedir. Şekil 4.12.'de plazma sprej yöntemleri sınıflandırılmıştır [47].

İnert plazma sprej (IPS) yönteminde genellikle oksitlenmeyi engelleyici inert koruyucu gaz olarak Ar kullanılmaktadır. Refrakter metaller gibi plazma sprej yöntemiyle atmosferik ortamda kaplanamayan, reaktivitesi yüksek ve parçalanmaya olanak veren TiN, TiC ve B₄C gibi malzemelerle çalışma olanağı sağlamaktadır.[47]. Vakum Plazma sprej (VPS) düşük basınçlı gaz ortamında veya vakum altında, Sprej tanecikleri seyreltilmiş daha az soğutulan ve yavaşlatılan gaz ortamında gerçekleştirilmektedir. Oluşan kaplama yüzeyi yüksek kinetik enerjiye sahip tanecikler oluşturur. VPS yöntemiyle kaplamalarda düşük mikro gözenek ve oksit içermektedirler [36].

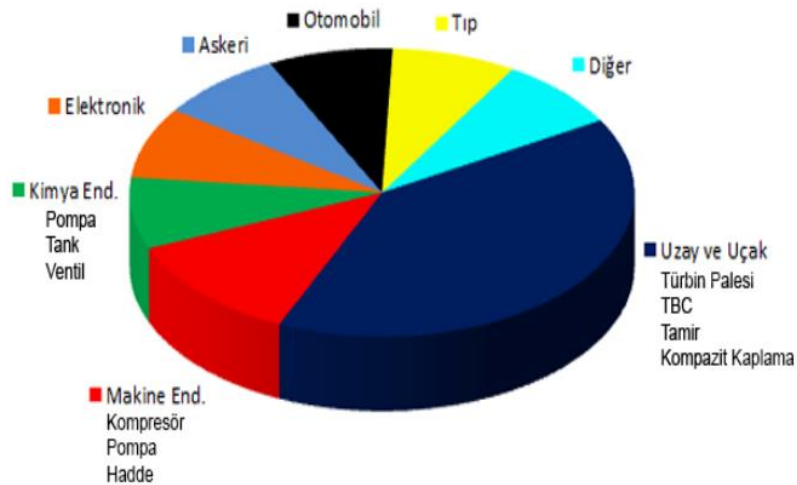
En son geliştirilen yöntem arasında yer alan ve su altında gerçekleştirilen bir kaplama yöntemi olan (SPS) kullanılmaktadır [36].



Şekil 4.12. Plazma sprej yöntemlerinin sınıflandırılması [47].

4.5.8. Plazma Sprej Kaplamaların Uygulama Alanları

Günümüzde endüstriyel alanda birçok yerde kullanılan Plazma sprej yöntemi, özellikle uçak ve uzay sanayisi, Makine endüstrisi, Tıp, Otomobil, Kimya endüstrisi, Elektronik ve Askeri alanlarda kullanılmaktadır. Plazma sprej yönteminin en önemli özellikleri arasında yer alan yüksek ergime noktasına sahip olan metal ve metal alaşımlarının çalışılabilmesidir. Bu özelliği baz alındığında bir çok kaplama tozlarının ve karışımlarının ana malzeme üzerine uygulanmasına olanak sağlamakta ve üretimi gerçekleştirilen kaplamaların kullanılabilirliğini artırdığı gözlenmektedir. Şekil 4.13.'te plazma sprej yönteminin endüstride kullanım alanları grafik halinde verilmiştir. [45].



Şekil 4.13. Plazma sprej kaplamaların kullanıldığı genel endüstri dalları [47].

5. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, piyasadan temin edilen 20 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda AZ91D magnezyum alaşımı altlık malzeme olarak kullanılmış ve kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1.' de verilmiştir. Numuneler ilk olarak 15 dakika ultrasonik banyoda etanol ile temizlenmiş ve daha sonra yine ultrasonik banyoda saf su ile 15 dakika durulanmıştır. Numunelerin üzerindeki nem sıcak hava ile giderilmiştir. Kaplamadan önce yüzeyler 5 bar basınçta Al_2O_3 kumu ile kumlanmış ve yüzeyleri pürüzlendirilmiştir. Yüzeyler GTV marka -45 ile +20 μm boyutunda Cr_2O_3 , $Al_2O_3-40TiO_2$ ve $Cr_2O_3-40TiO_2$ tozları ile plazma spreyl yöntemi kullanılarak Tablo 5.2.' de verilen parametrelerde kaplanmıştır. Kaplama yüzeylerinin yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-201 profilometre kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler kaplamanın 10 farklı noktasından gerçekleştirilmiş ve ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Kaplanan numuneler tel erozyon yöntemi ile aşınma deneylerinde kullanılmak üzere 10 mm' lik parçalara bölünmüştür. Kesilen parçalar 15 dakika ultrasonik banyoda etanol ile temizlenmiş, daha sonra yine ultrasonik banyoda saf su ile durulanmış ve üzerindeki nem sıcak hava ile giderilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için gerekli numuneler bakalite alındıktan sonra metalografik olarak parlatılmıştır. Parlatılan numunelerin ara yüzey tabakaları Nikon Eclipse NA200 marka optik mikroskop (OM) ile incelendi. Yapıyı oluşturan fazların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ZEISS EVO-MA10 SEM cihazı kullanılarak elde edildi. Kaplanmış yüzeyleri meydana getiren bileşiklerin kimyasal kompozisyonu ZEISS EVO-MA10 SEM cihazına bağlı Bruker marka EDS dedektörü kullanılarak ölçüldü. Kaplanmış yüzeyleri oluşturan fazların çeşidi ise, BRUKER AXS D8 ADVANCE marka X-ışını kırınımı (XRD) cihazında bakır α -ışını tüpüne sahip cihazda 1.5406 Å dalga boyunda $2\theta = 20 - 80$ derece açısında, 40 kV ve 40 mA' de Cu-K α radyasyonu kullanılarak tespit edildi.

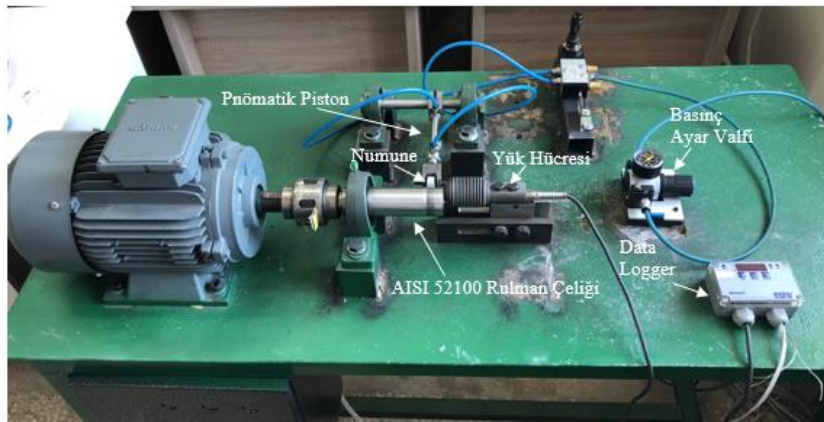
Tablo 5.1. AZ91D' nin kimyasal kompozisyonu (ağ.-%)

Mg	Al	Zn	Mn	Cu	Si	Diğer Elementler
88-90.50	8.5-9.5	0.45-0.9	0.17-0.4	0.025 max.	0.050 max.	Kalan

Tablo 5.2. HVOF kaplama parametreleri

Numune	Akım (A)	Sprey mesafesi (mm)	Toz besleme miktarı (g/dk)	Voltaj (V)	Plazma gazı debisi (lt/dk)	Koruyucu gaz debisi (lt/dk)
N1	580	110	30	150	13 (H)	38 (Ar)
N2	580	130				
N3	500	110				
N4	500	130				
N5	580	110				
N6	580	130				
N7	500	110				
N8	500	130				
N9	580	110				
N10	580	130				
N11	500	110				
N12	500	130				

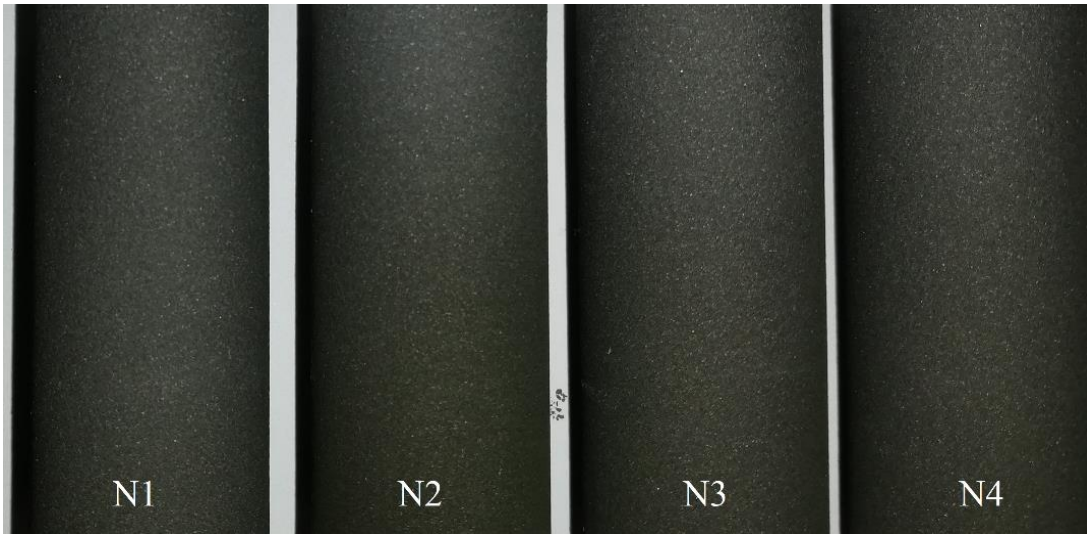
Kaplama tabakalarının sertlikleri 5 farklı noktadan ölçülen değerlerin ortalaması alınarak bulundu. Her ölçüm 10 saniye boyunca 100 g kütle uygulanarak yapıldı. Aşınma deneyleri disk-on-disk tip aşınma deney cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirildi (Şekil 5.1.). Aşındırıcı olarak 40 mm çapında AISI 52100 rulman çeliği kullanıldı ve aşınma testi sırasıyla 2.5, 5, 7.5 N normal kuvvet, 150 m kayma mesafesi ve 100 mm/s kayma hızı ile yapıldı. Aşınma kayıpları 10-5 (g) hassasiyetindeki terazi ile ölçüldü. Her test üç kez tekrar edildi ve bunların ortalaması alındı. Son olarak aşınma yüzeyleri SEM ile incelendi.

**Şekil 5.1.** Disk-on-disk aşınma deney cihazı

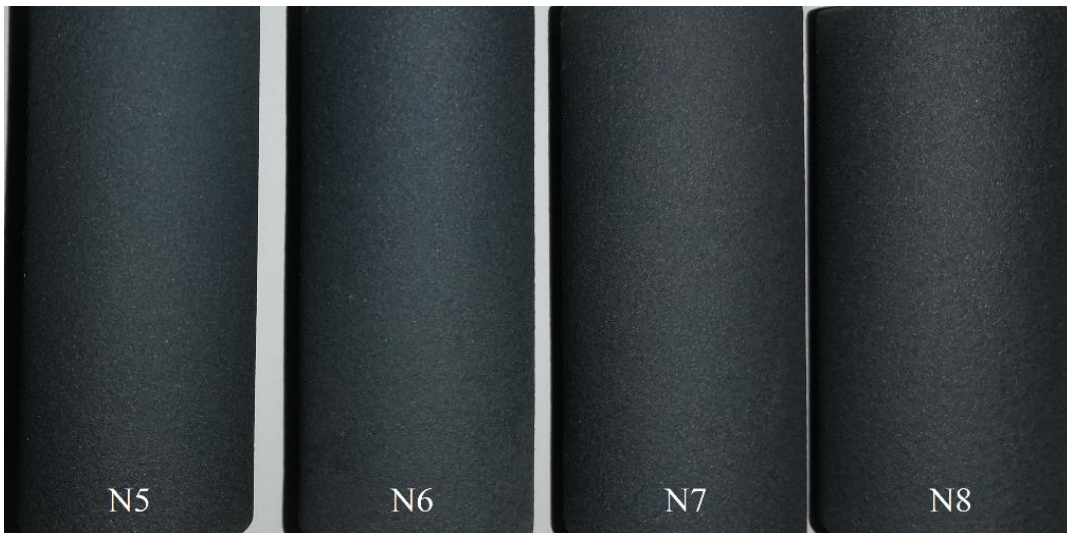
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Mikroyapı ve Sertlik

Şekil 6.1., Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.' te sırasıyla plazma sprej yöntemiyle Cr_2O_3 , Al_2O_3 - 40TiO_2 ve Cr_2O_3 - 40TiO_2 kaplı numunelerin makro fotoğrafları görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi yüzeyde gözle görülür herhangi bir çatlak veya mikro gözeneğe rastlanmamıştır ve kaplama tozlarının ergiyerek yüzeye birleştiği görülmektedir.



Şekil 6.1. Cr_2O_3 kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları



Şekil 6.2. Al_2O_3 - 40TiO_2 kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları



Şekil 6.3. Cr_2O_3 -40 TiO_2 kaplanmış numunelerin makro fotoğrafları

Tablo 6.1.' de kaplama tabakalarının bazı genel özellikleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri Cr_2O_3 kaplamalarda 5.602-5.788 μm arasında, Al_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerde 5.090-5.656 μm arasında ve Cr_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerde ise 5.306-5.720 arasında değişmektedir. Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri AZ91D' nin yüzey pürüzlülük değerinden (0.298 μm) daha yüksektir. Yüzey pürüzlülüğünün fazla olması plazma sprej kaplama yönteminin doğası gereğidir [11]. Kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri enerji girdisinin azalmasıyla ve sprej mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Bunun nedeni olarak ergimemiş partiküllerin enerji girdisinin azalmasıyla ve sprej mesafesinin artmasıyla artması gösterilebilir. Akım arttıkça, plazma ısı artar, bu yüzden daha fazla parçacık erir ve kaplanacak yüzeyde biriktirilir. Ayrıca, püskürtme mesafesinin artırılması, bazı küçük parçacıkların plazma bölgesinden komşu yörüngelere geçmesine ve bir miktar ısı emmesine neden olur. Bunun, erimeyen parçacıkların sayısında bir artışa yol açtığı düşünülmektedir. Püskürtme mesafesinin yanı sıra akımın değiştiği bir literatür çalışmasında da benzer sonuçlar elde edilmiştir [52].

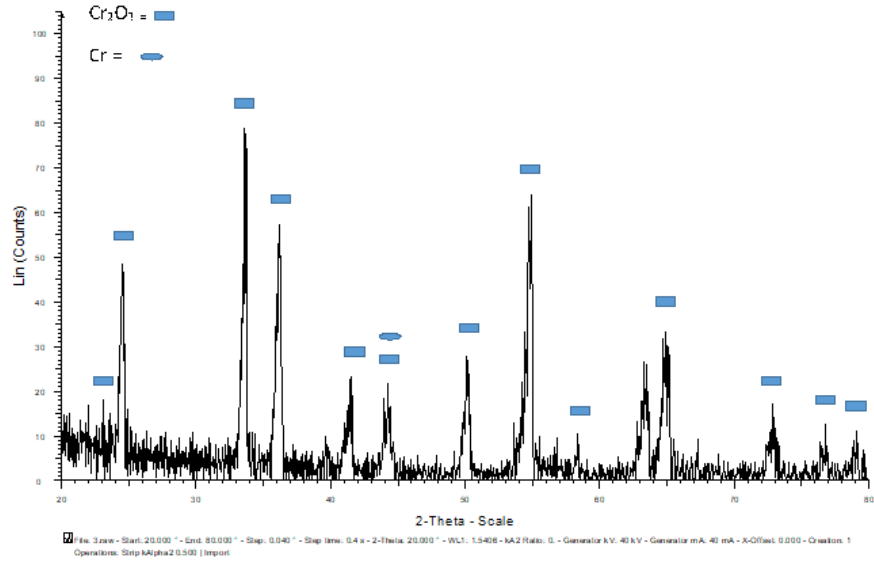
Cr_2O_3 kaplamaların yüzey pürüzlülükleri en yüksek Al_2O_3 -40 TiO_2 kaplamaların ki ise en düşüktür. Bunun nedeni olarak Cr_2O_3 tozlarının ergime ısının Al_2O_3 ve TiO_2 ' den daha yüksek olması gösterilebilir. Ergimemiş toz oranı arttıkça kaplamalarda mikro gözenek ve ergimemiş partiküller artmaktadır [52]. Kaplama tabakalarının ortalama sertlik değerleri incelendiğinde sertliklerin 656-845 $\text{HV}_{0.1}$ arasında değişmekte ve altlık malzemenin sertlik değerinden (70 $\text{HV}_{0.1}$) oldukça yüksektir. Ayrıca toz çeşidi, akım ve sprej mesafesi

değiştikçe farklılaşmaktadır. Bunun nedeni olarak partiküllerin ergime ısılarının farklı olmasından kaynaklı mikro gözenek miktarlarının değişmesi ve kaplama tozlarının sertliklerinin birbirlerinden farklı olması gösterilebilir. Benzer toz karışımlarıyla literatürde yapılan çalışmalarda da toz çeşidinin [53] ve üretim parametrelerinin değişmesiyle kaplama sertliklerinin değiştiği görülmüştür [54]. Sertlik değerleri akım arttıkça artmakta sprej mesafesinin artmasıyla ise azalmaktadır. Sertliği en yüksek olan numune yüksek akım ve düşük sprej mesafesinde $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile kaplanan numune (N5), sertliği en düşük olan numune ise $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile en düşük akım değerinde ve en yüksek sprej mesafesinde kaplanan numunedir (N12). Cr_2O_3 kaplı numunelerin numunelerin sertlikleri tüm akım ve sprej mesafelerinde $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerden daha yüksektir bunun nedeni olarak TiO_2 ' nin sertliğinin Cr_2O_3 ' den daha düşük olması gösterilebilir. 600 A akım değerinde $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplanan numunelerin sertlikleri ise aynı parametrelerde Cr_2O_3 kaplı numunelerden daha yüksektir. Bu durumun, bu parametrelerde $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ' nin ergime ısının düşük olmasından dolayı daha iyi ergimesi ve kaplama yoğunluğunun daha iyi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

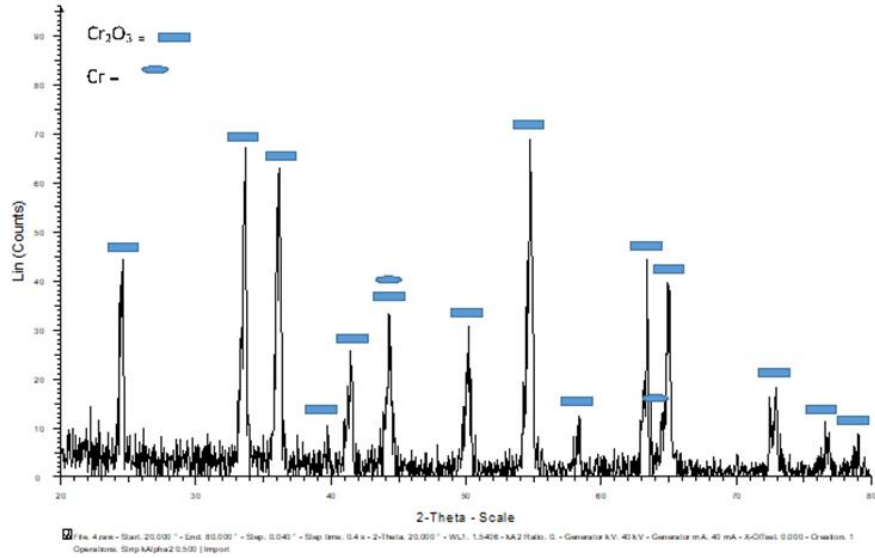
Tablo 6.1. Kaplamaların genel özellikleri

Numune	Akım (A)	Sprej mesafesi (mm)	Yüzey pürüzlülüğü ($R_a=\mu\text{m}$)	Sertlik (HV _{0.1})	Kaplama kalınlığı (μm)
N1	580	110	5.602	785	42.748
N2	580	130	5.682	772	42.024
N3	500	110	5.702	759	36.917
N4	500	130	5.788	730	28.261
N5	580	110	5.090	845	48.975
N6	580	130	5.324	782	47.102
N7	500	110	5.444	705	43.857
N8	500	130	5.656	665	48.243
N9	580	110	5.306	730	50.731
N10	580	130	5.500	701	50.723
N11	500	110	5.626	689	29.709
N12	500	130	5.720	656	30.432

Şekil 6.4., Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.' da sırasıyla plazma sprej yöntemiyle Cr_2O_3 , Al_2O_3 - 40TiO_2 ve Cr_2O_3 - 40TiO_2 kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. XRD analiz sonuçlarına göre Cr_2O_3 kaplı numunelerin kaplama tabakalarında Cr_2O_3 ve Cr, Al_2O_3 - 40TiO_2 kaplı numunelerin kaplama tabakalarında Al_2O_3 , Ti_2O_3 ve TiO , Cr_2O_3 - 40TiO_2 kaplı numunelerin kaplama tabakalarında ise Cr_2O_3 , TiO_2 ve TiO oksitleri tespit edilmiştir.

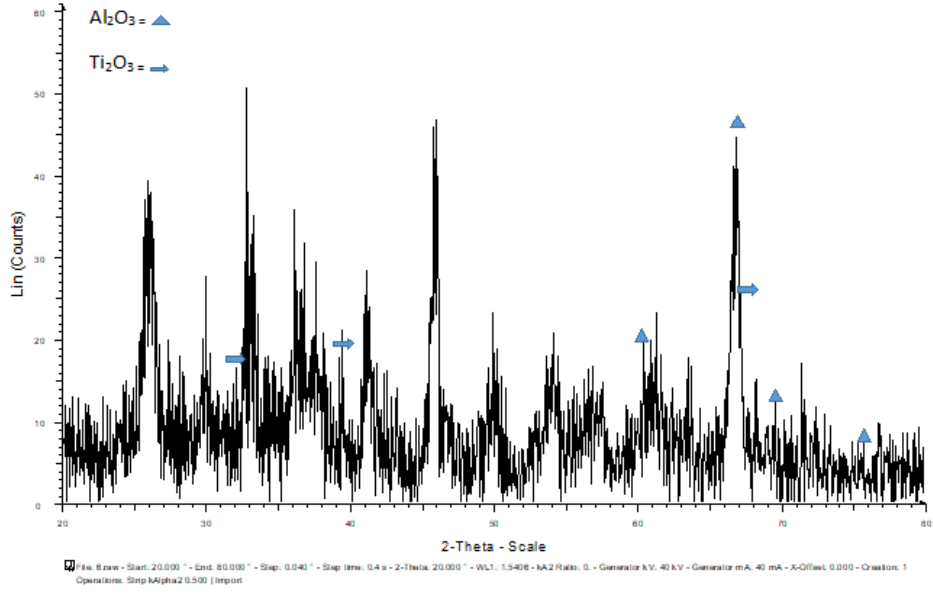


a)

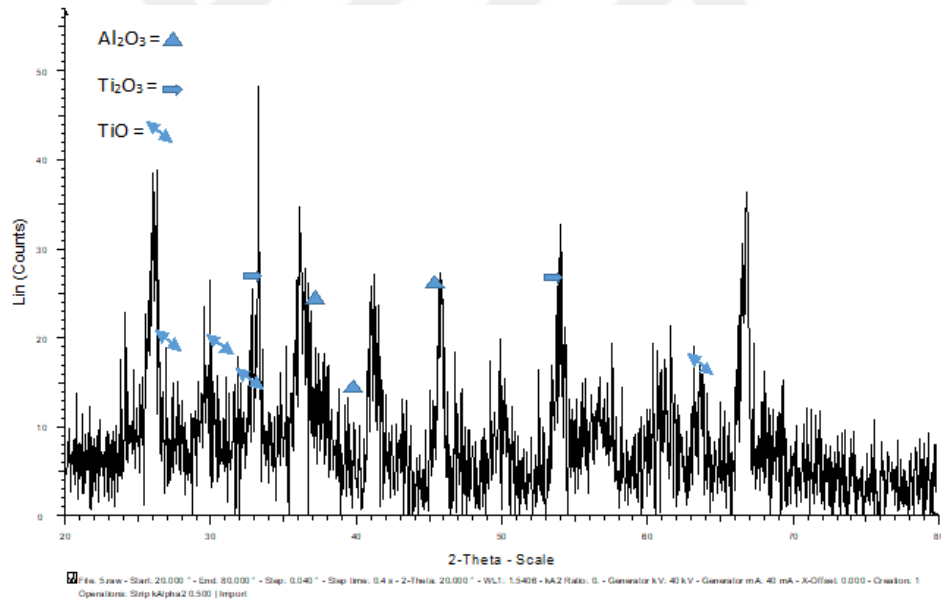


b)

Şekil 6.4. Cr_2O_3 ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N1 Numunesi b) N4 Numunesi

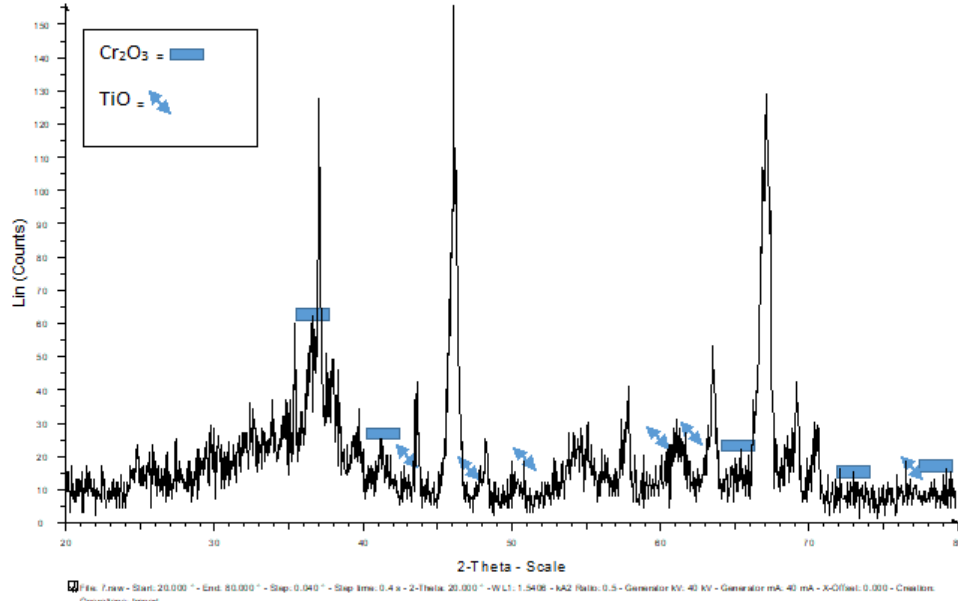


a)

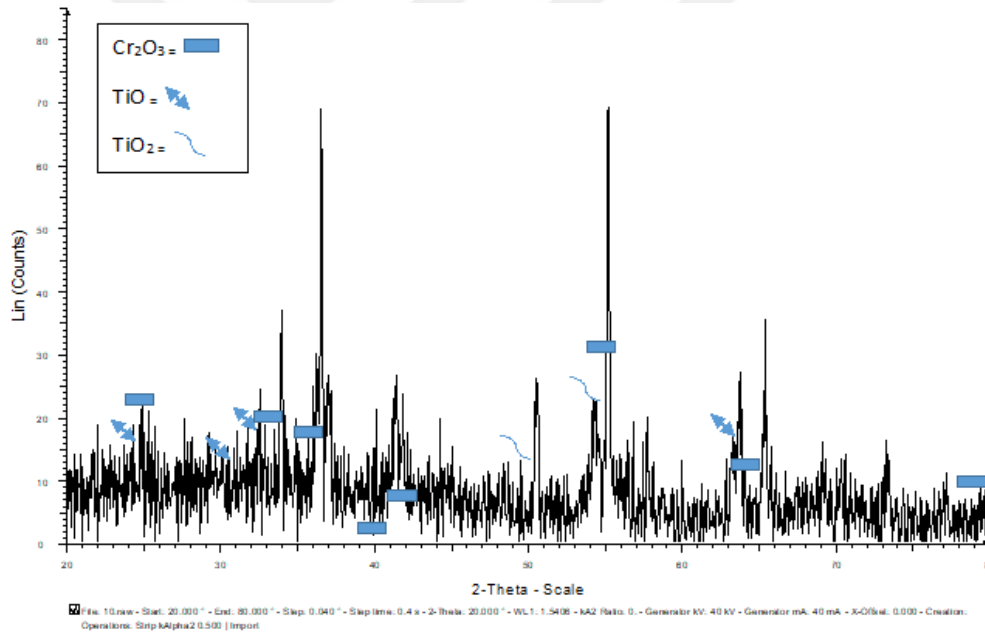


b)

Şekil 6.5. Al_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N5 Numunesi b) N8 Numunesi



a) N9 Numunesi

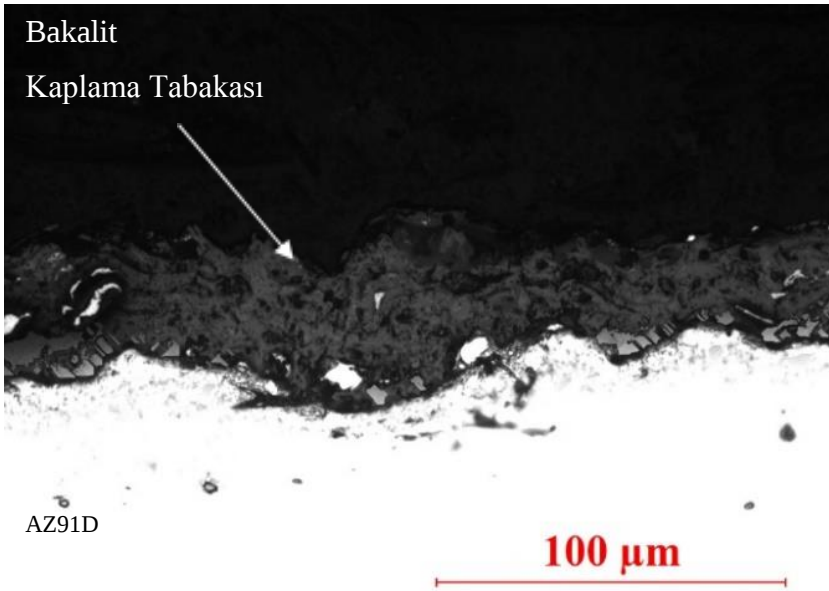
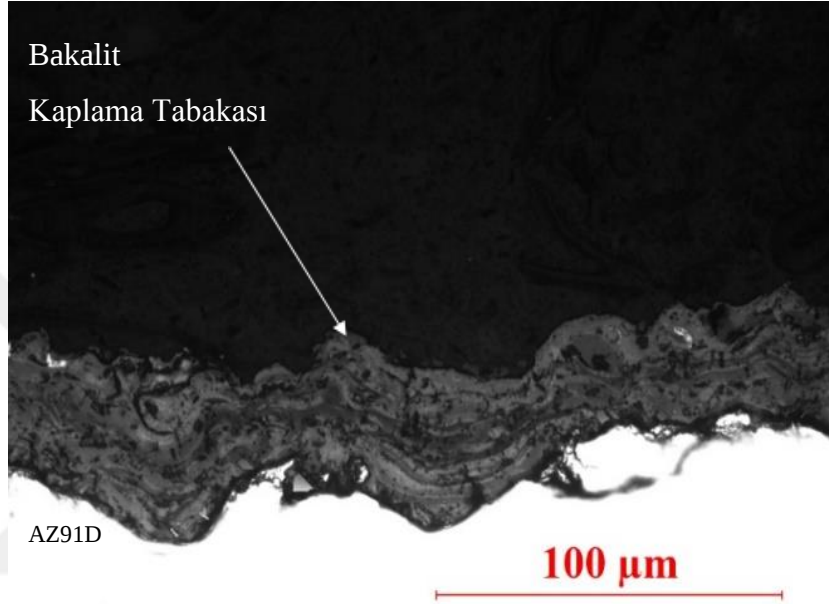


b) N12 Numunesi

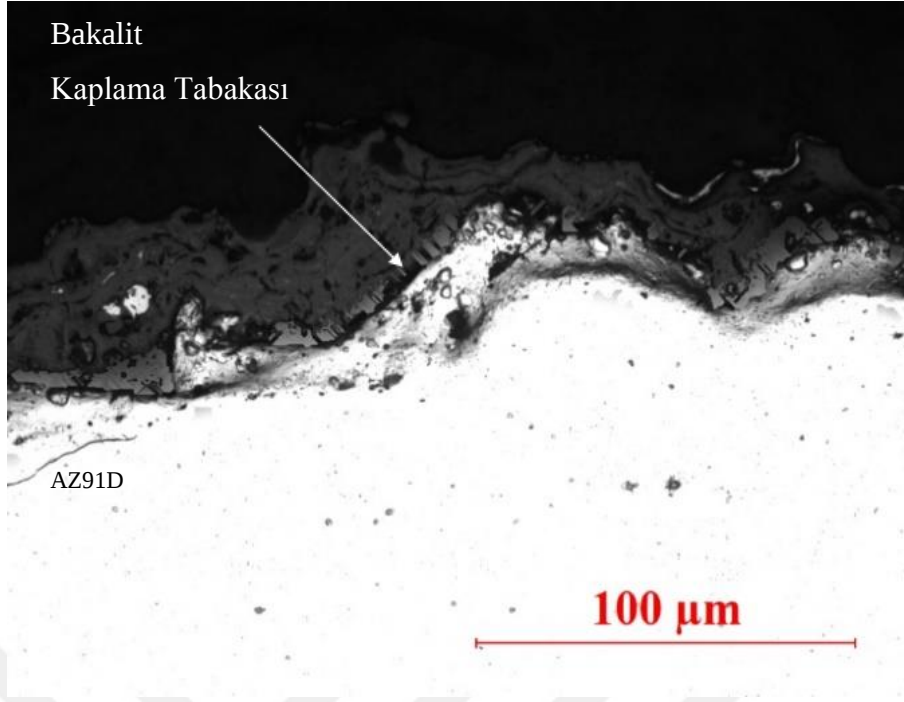
Şekil 6.6. Cr_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplı numunelerin XRD analiz sonuçları a) N9 Numunesi b) N12 Numunesi

Şekil 6.7., Şekil 6.8. ve Şekil 6.9.' da sırasıyla plazma sprej yöntemiyle Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40 TiO_2 ve Cr_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerin OM görüntüleri görülmektedir. Görüldüğü gibi kaplama tozları eriyerek altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmiş ve metalürjik olarak AZ91D' nin yüzeyine bağlanmıştır. Bunun, yüzeye ilk çarpan erimiş parçacıkların yüksek

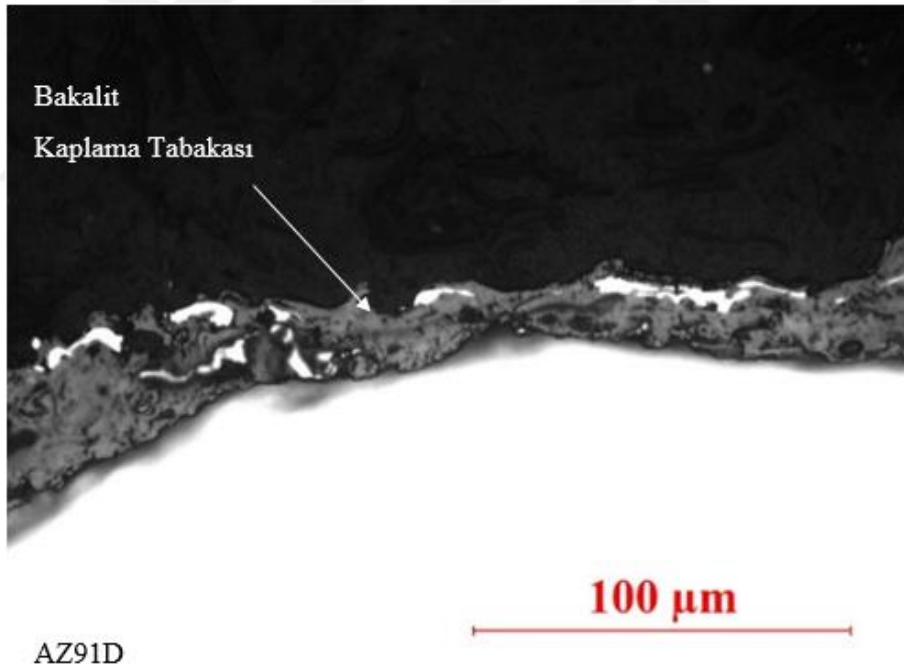
ısından ve ayrıca magnezyumun oksijene olan yüksek ilgisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Oksidasyonun yüksek sıcaklıkta arttığı da bilinmektedir. OM görüntülerinden kaplama tabakalarının genellikle, plazma spreycaplamalarda oluşan bazı mikro gözenekler, oksitler ve lamelli yapılardan oluşan kaplama katmanlarından oluştuğu görülmektedir. Plazma püskürtme kaplamaları esas olarak basık şapırtılardan oluşur ve yüzeye çarptıklarında, bu şapırtılar, erimiş haldeki kaplama katmanlarında birbirlerinin üzerinde birikerek lamelli yapıyı oluştururlar [52].



Şekil 6.7'nin devamı

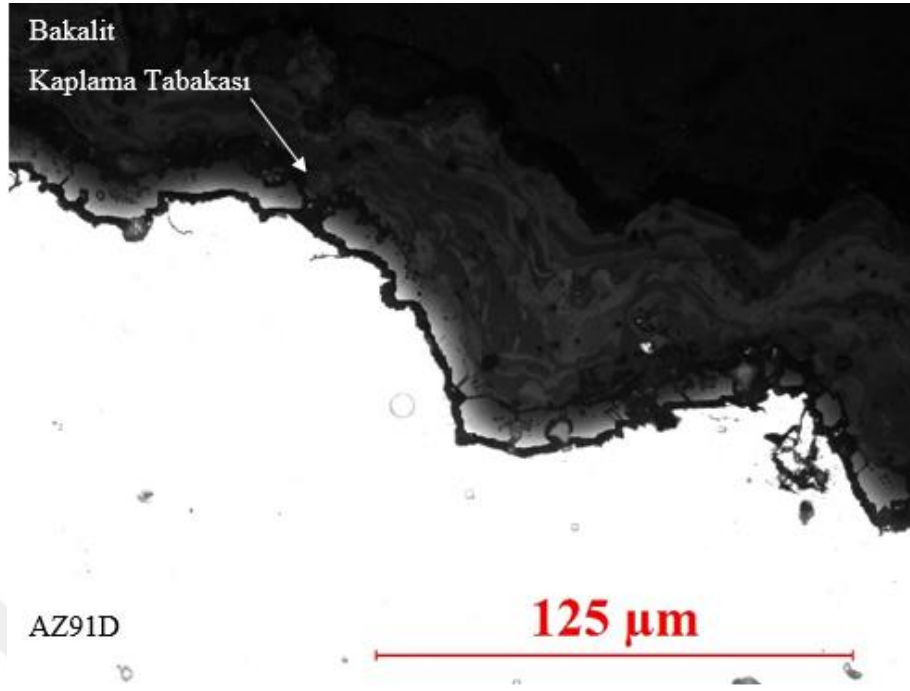


c) N3

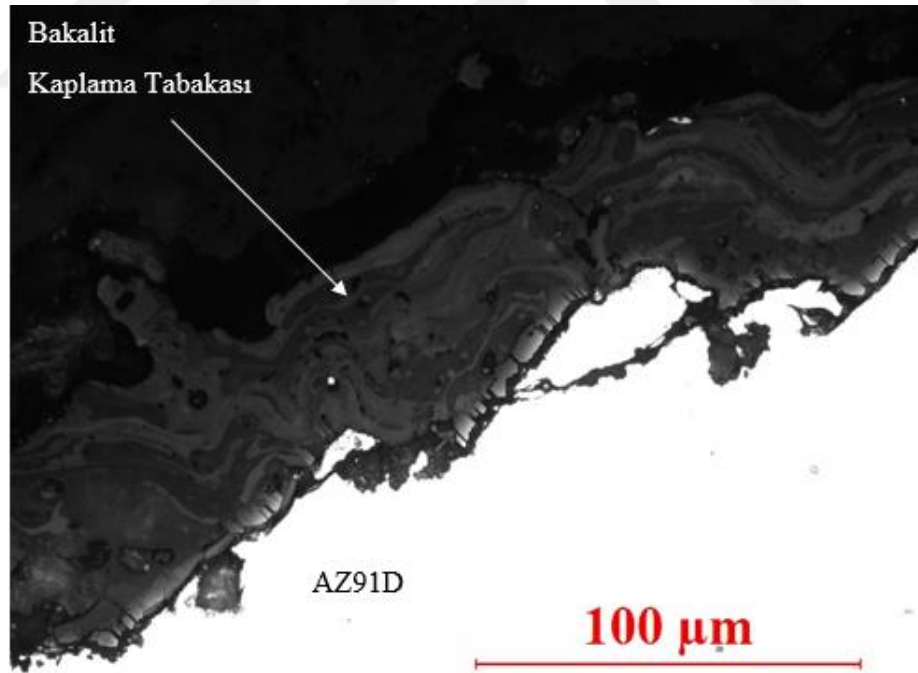


d) N4

Şekil 6.7. Cr_2O_3 ile kaplı numunelerin OM görüntüleri

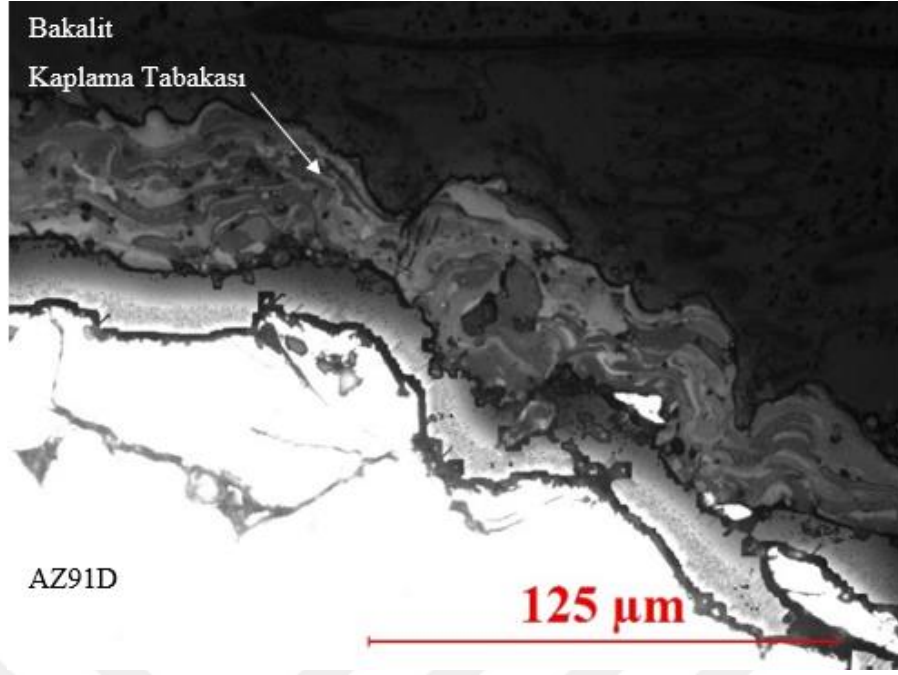


a) N5

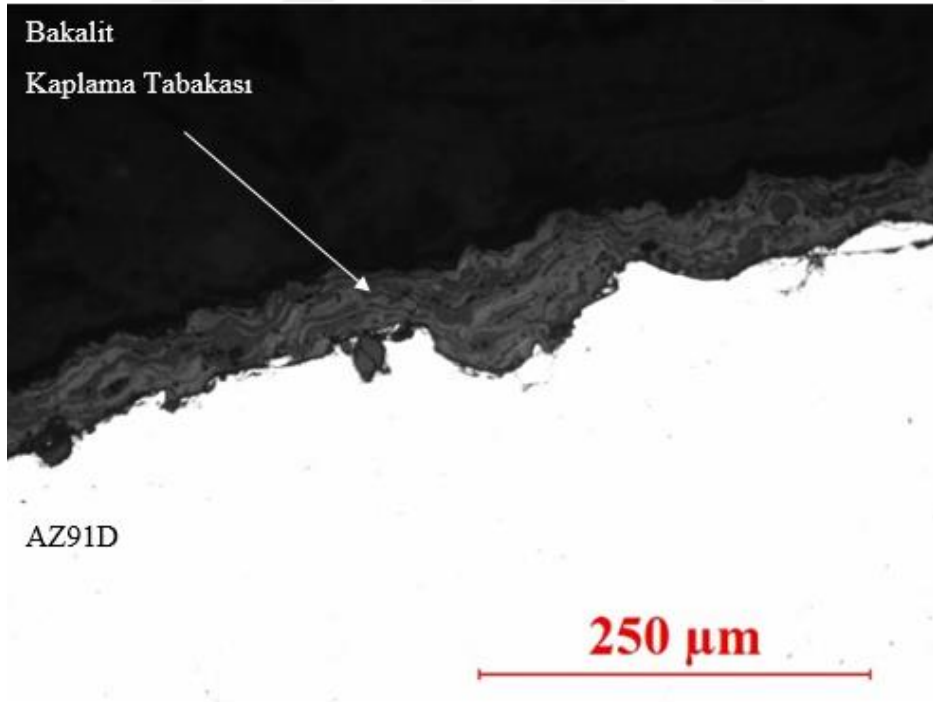


b) N6

Şekil 6.8.'in devamı

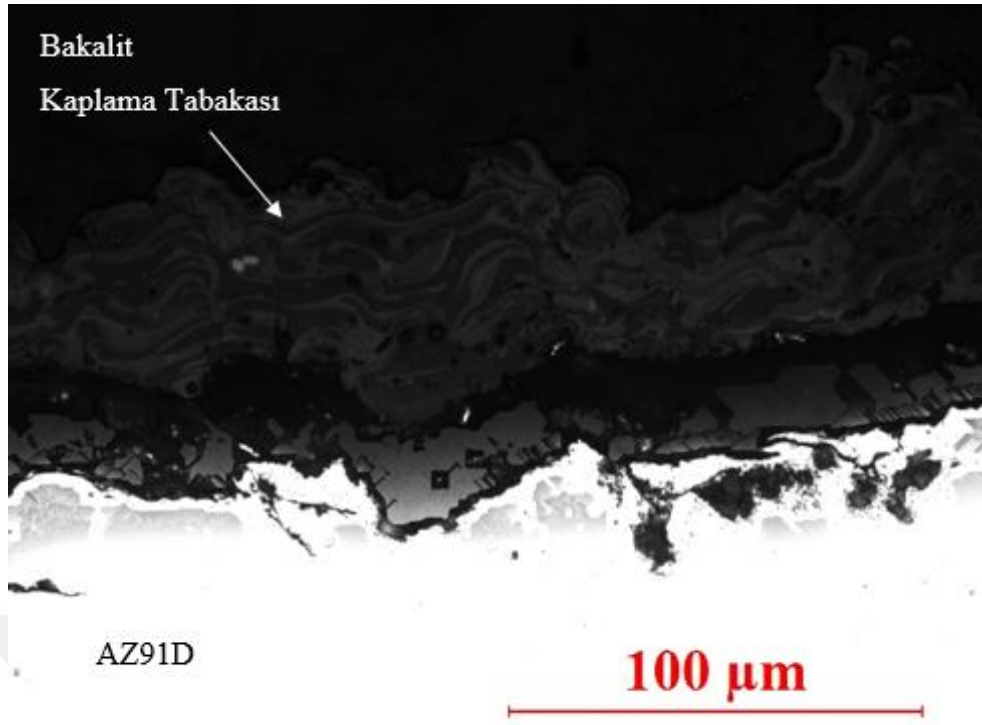


c) N7

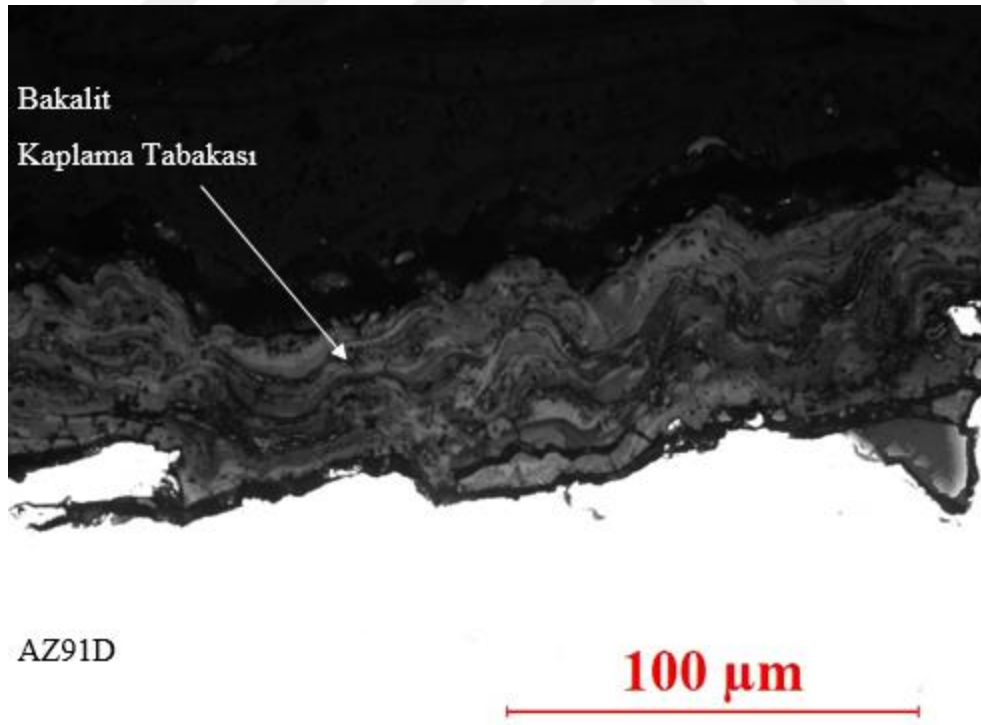


d) N8

Şekil 6.8. Al_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplı numunelerin OM görüntüleri

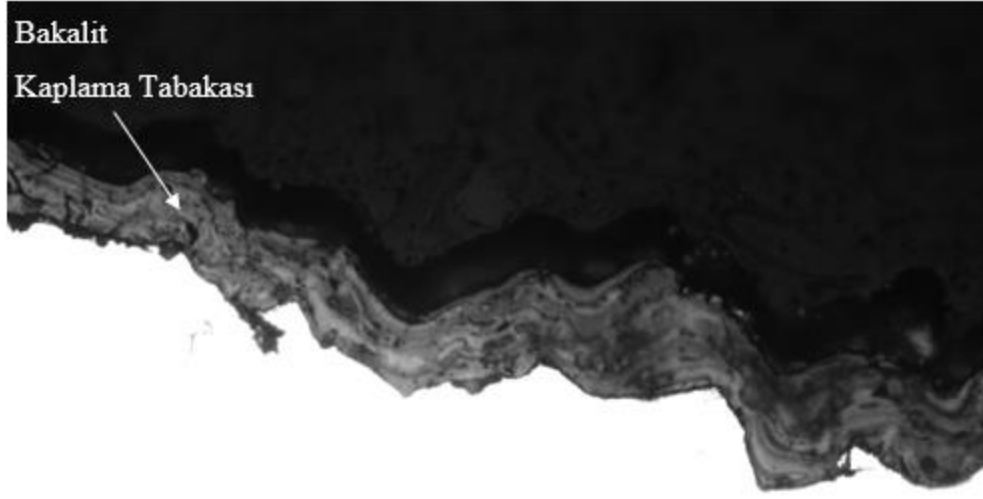


a) N9



b) N10

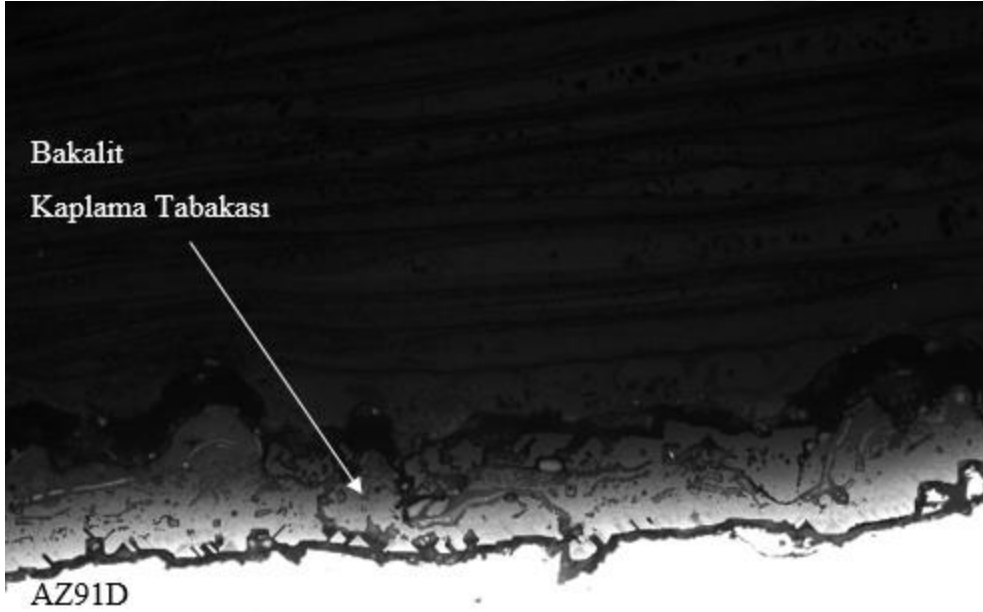
Şekil 6.9.'un devamı



AZ91D

100 μm

c) N11



AZ91D

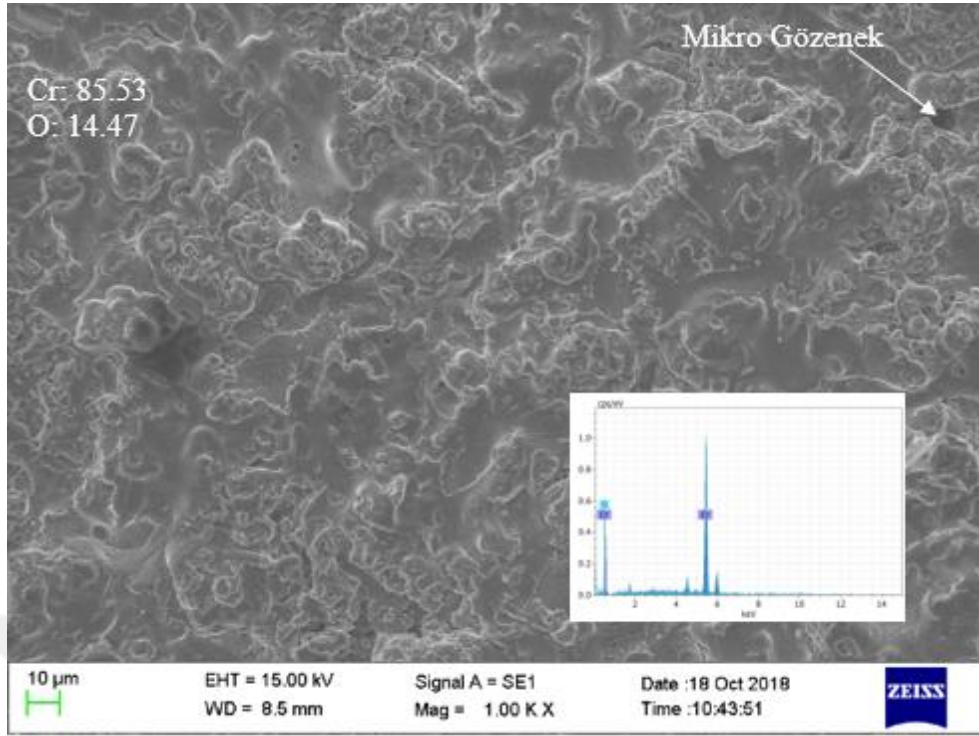
100 μm

d) N12

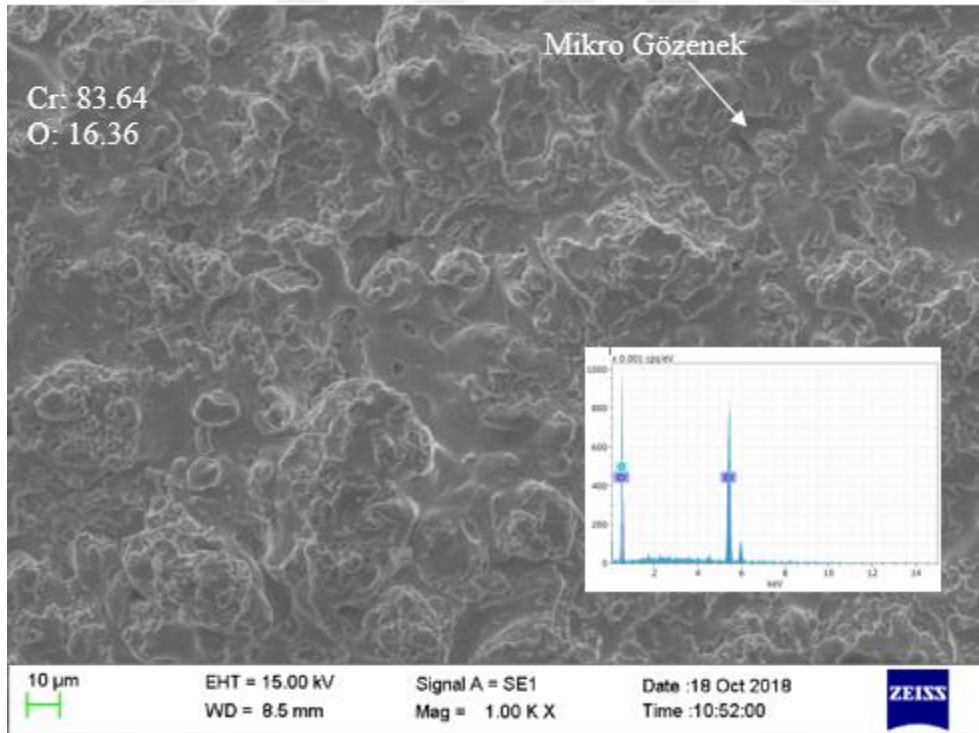
Şekil 6.9. Cr_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplı numunelerin OM görüntüleri

Şekil 6.10., Şekil 6.11. ve Şekil 6.12.' de plazma sprej kaplama yöntemi ile kaplanmış numenlerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Görüldüğü gibi kaplama yüzeyleri ergimiş parçacıkların üst üste binmesinden oluşmuş pürüzlü bir yapıya sahiptir. Ayrıca yüzeylerde yer yer mikro gözenekler görülmektedir. N1 numunesinin yüzeylerden alınan EDS analiz sonuçlarına göre N1 numunesi (ağ.-%) 85.53Cr-14.47O, içermektedir. N2 numunesi (ağ.-%) 83.64Cr-16.36O, N3 numunesi (ağ.-%) 84.40Cr-15.60O, N4 numunesi (ağ.-%) 85.62Cr-14.38O, N5 numunesi (ağ.-%) 42.79Ti-16.51Al-40.70O, N6 numunesi (ağ.-%) 51.90Ti-9.20Al-38.55O, N7 numunesi (ağ.-%) 10.51Al-45.09Ti-41.84O, N8 numunesi (ağ.-%) 7.59Al-54.81Ti-36.05O, N9 numunesi (ağ.-%) 18.61Cr-47.80Ti-34.04O, N10 numunesi (ağ.-%) 20.81Cr-44.68Ti-34.51O, N11 numunesi (ağ.-%) 23.67Cr-26.06Ti-36.72O ve N12 numunesi de (ağ.-%) 37.39Cr-32.44Ti-30.17O içermektedir.



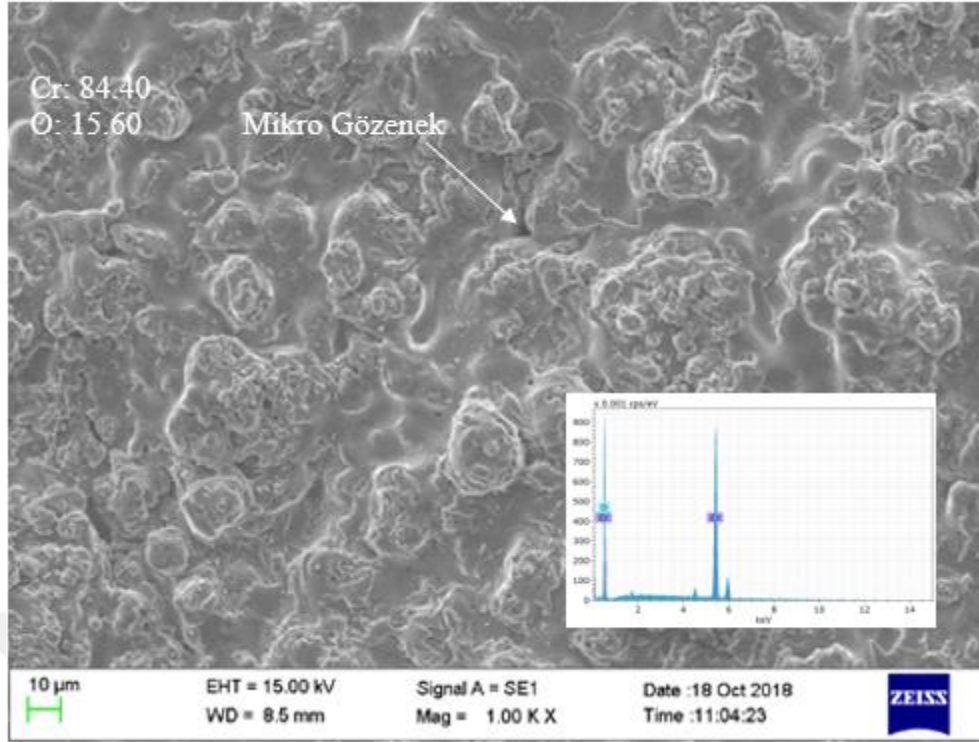


a) N1

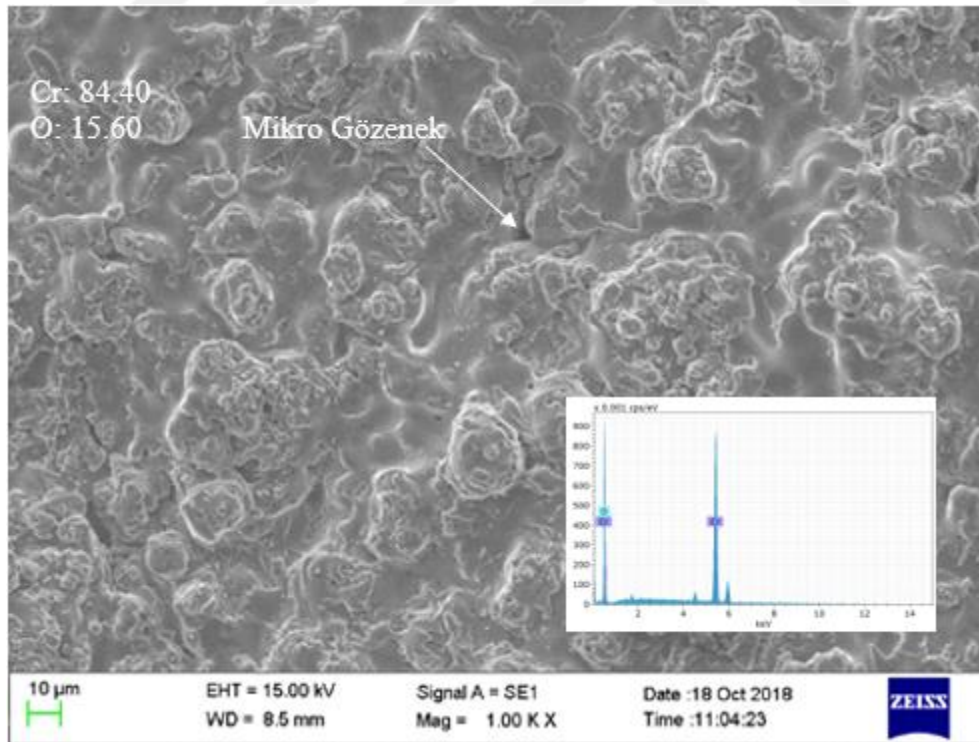


b) N2

Şekil 6.10.'un devamı

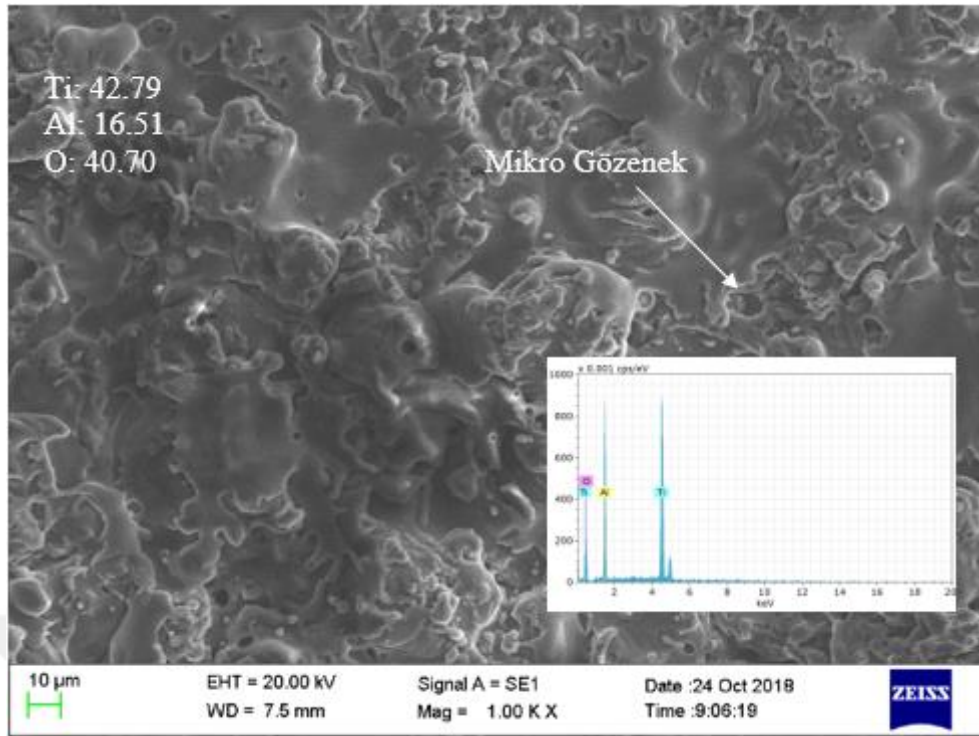


c) N3

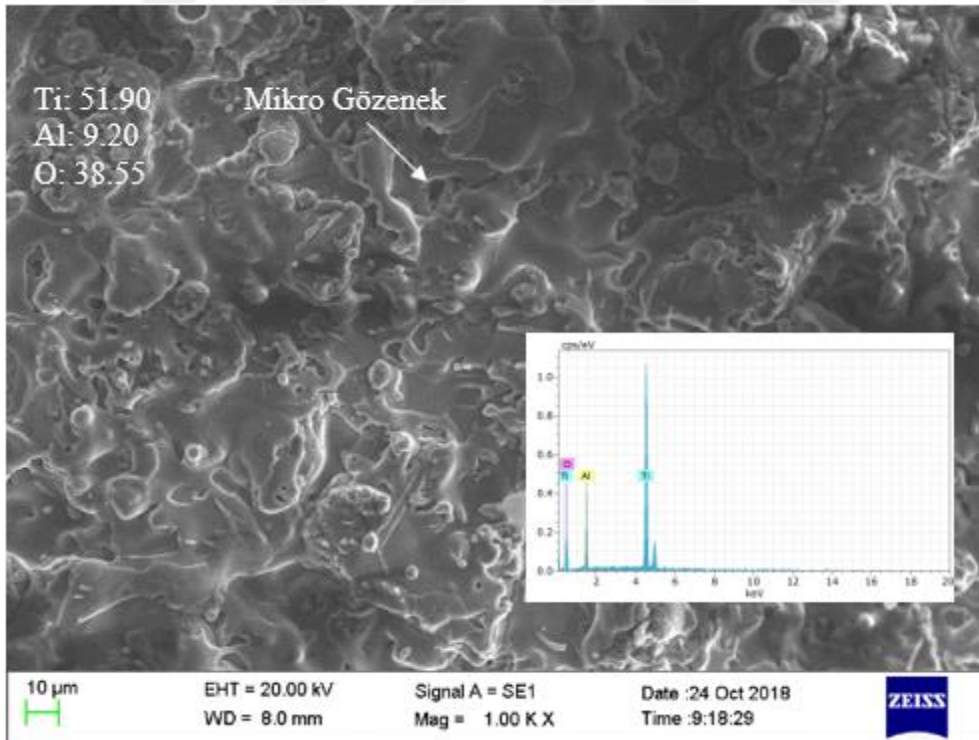


d) N4

Şekil 6.10. Cr_2O_3 ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

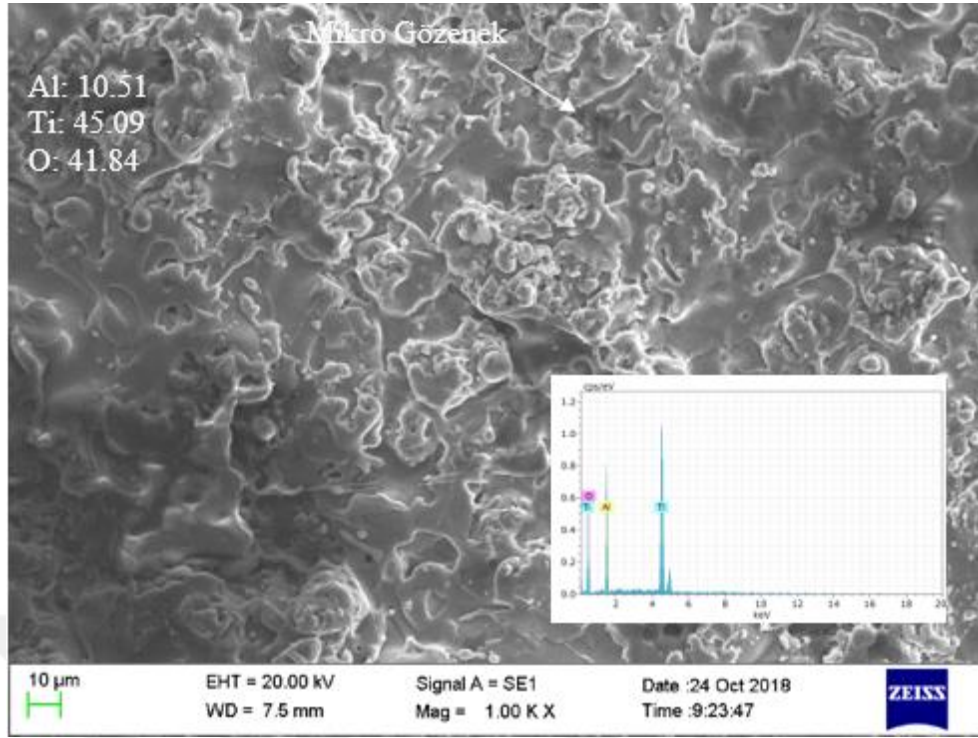


a) N5

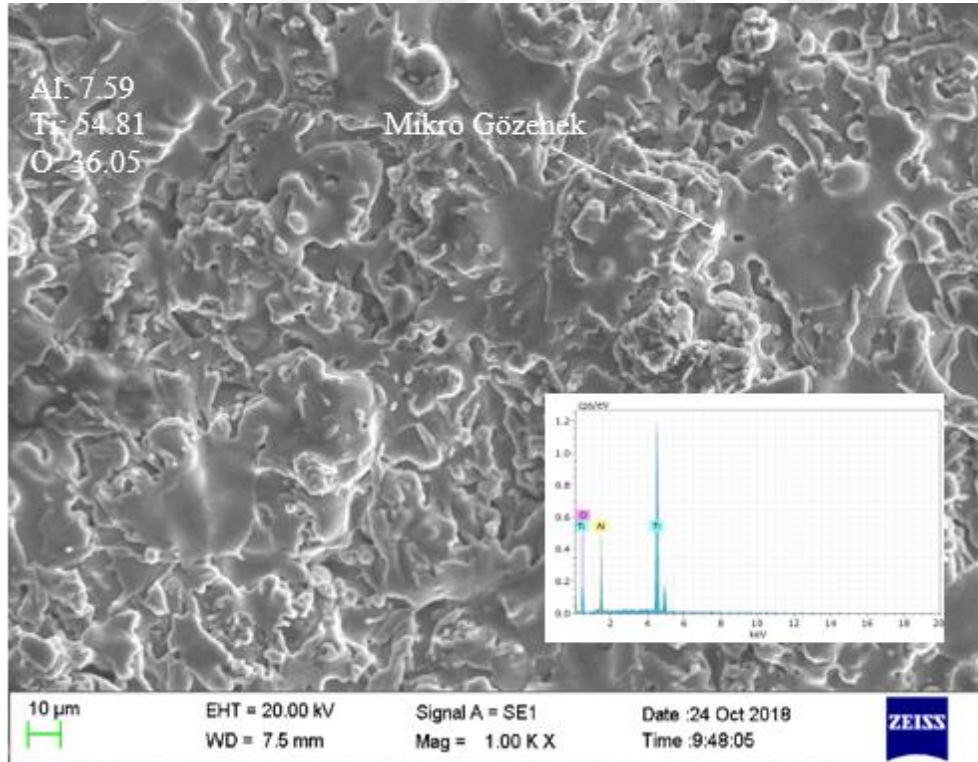


b) N6

Şekil 6.11.'in devamı

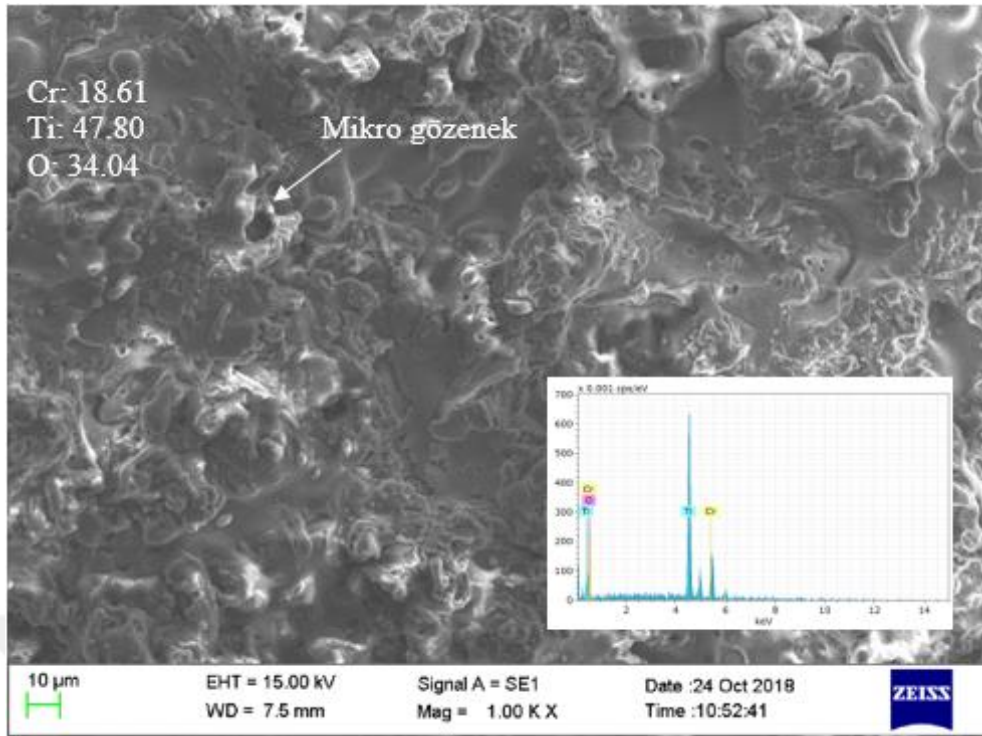


c) N7

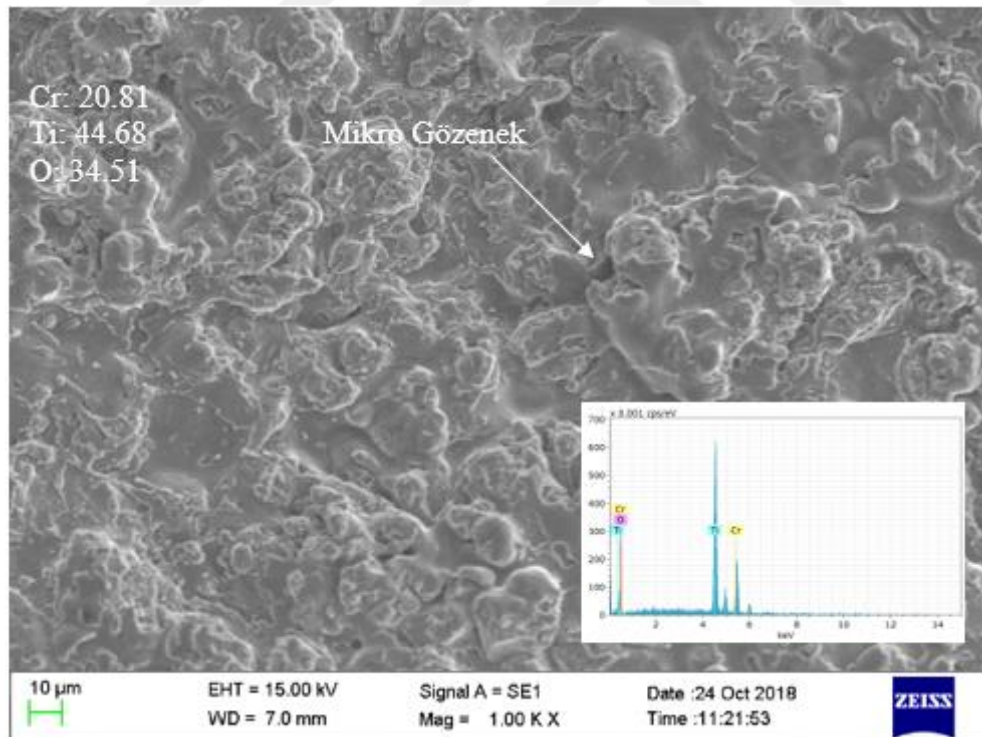


d) N8

Şekil 6.11. Al_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

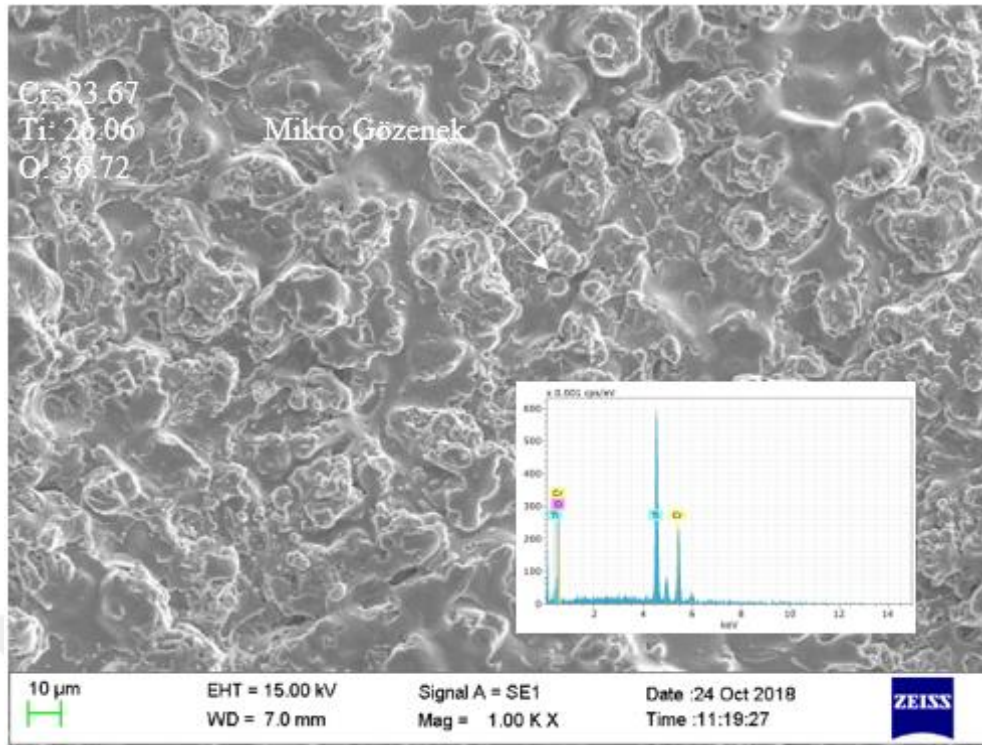


a) N9

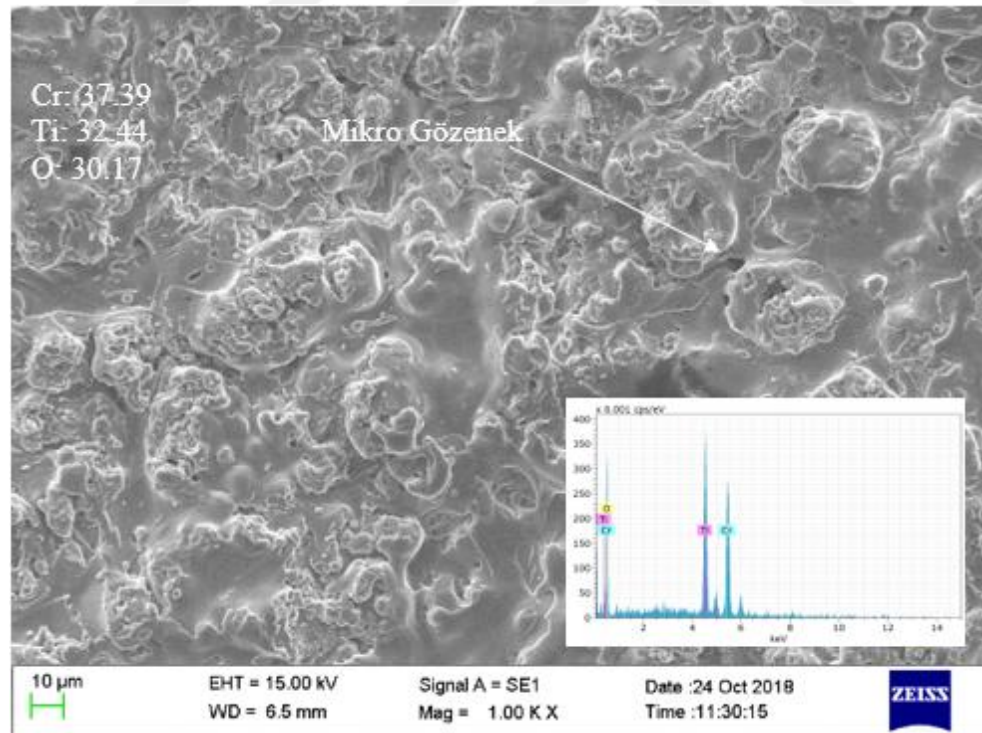


b) N10

Şekil 6.12.'nin devamı



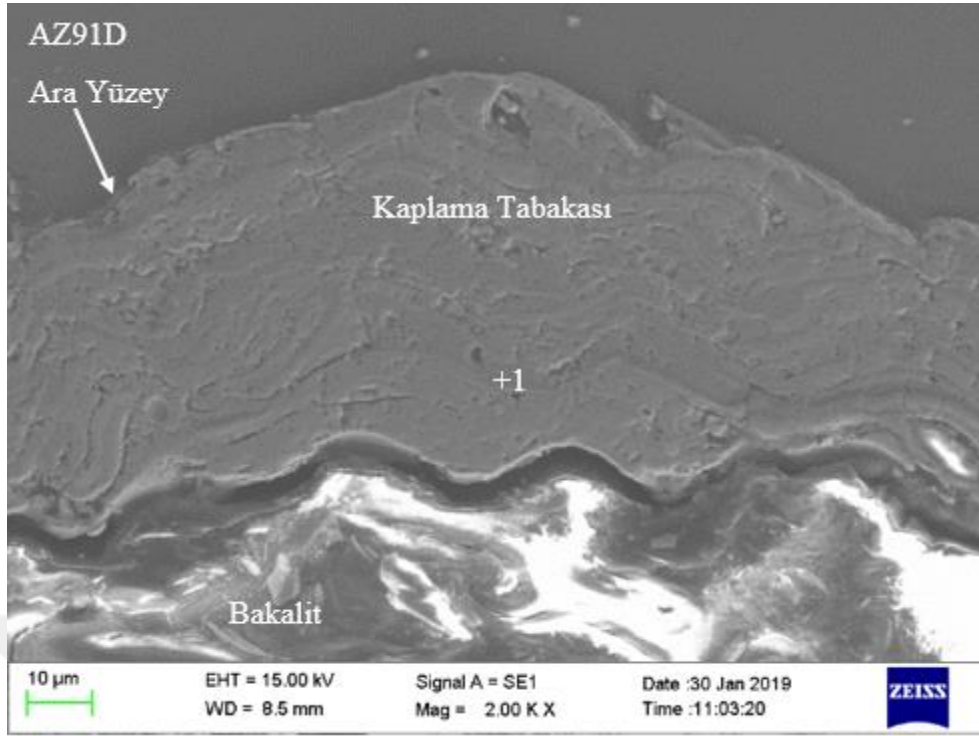
c) N11



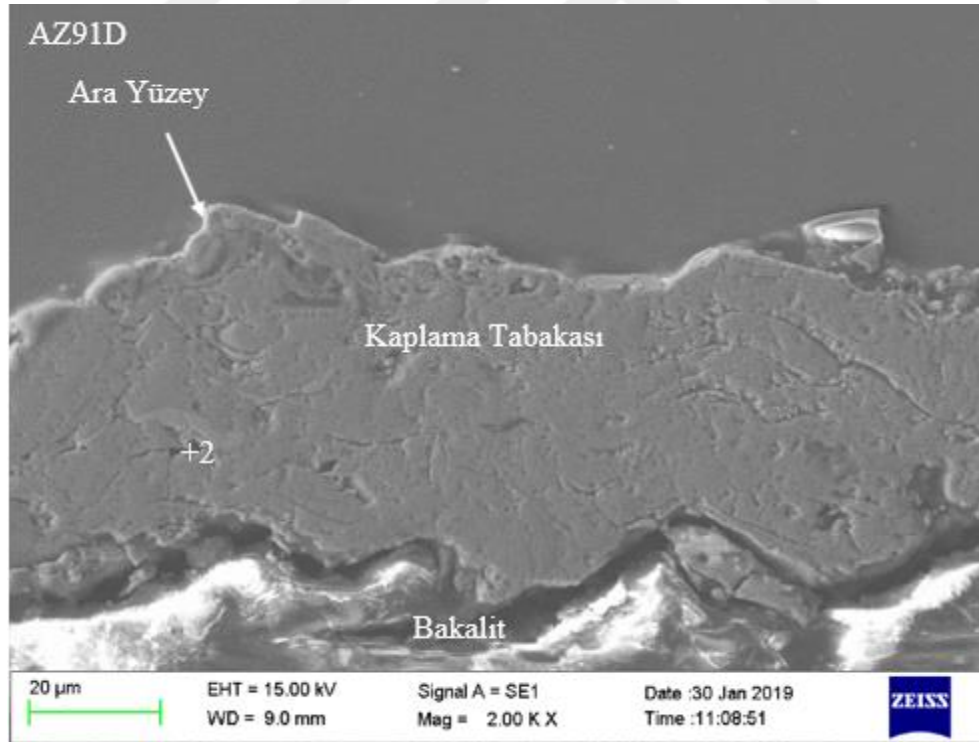
d) N12

Şekil 6.12. Cr_2O_3 -40 TiO_2 ile kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Şekil 6.13., Şekil 6.14. ve Şekil 6.15.' te sırasıyla plazma sprey yöntemiyle Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40 TiO_2 ve Cr_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri görülmektedir. N1 numunesinin 1 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 75.96Cr-24.06O içermektedir. N2 numunesinin 2 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 95.22Cr-4.78O içermektedir. N3 numunesinin 3 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 95.69Cr-4.31O içermektedir. N4 numunesinin 4 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 81.97Cr-18.63O içermektedir. N5 numunesinin 5 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 81.97Cr-18.63O içermektedir. N6 numunesinin 6 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 53.63Al-42.54O-3.83Ti içermektedir. N7 numunesinin 7 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 52.76Al-56.73O-4.33Ti içermektedir. N8 numunesinin 8 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 52.33Al-43.46O-4.22Ti içermektedir. N9 numunesinin 9 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 0.19Cr-28.70O-71.11Ti içermektedir. N10 numunesinin 10 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 0.41Cr-33.55O-66.04Ti içermektedir. N11 numunesinin 11 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 0.25Cr-27.85O-71.89Ti içermektedir. N12 numunesinin 12 numaralı noktasından alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu nokta (ağ.-%) 3.32Cr-42.67O-50.76Ti içermektedir.

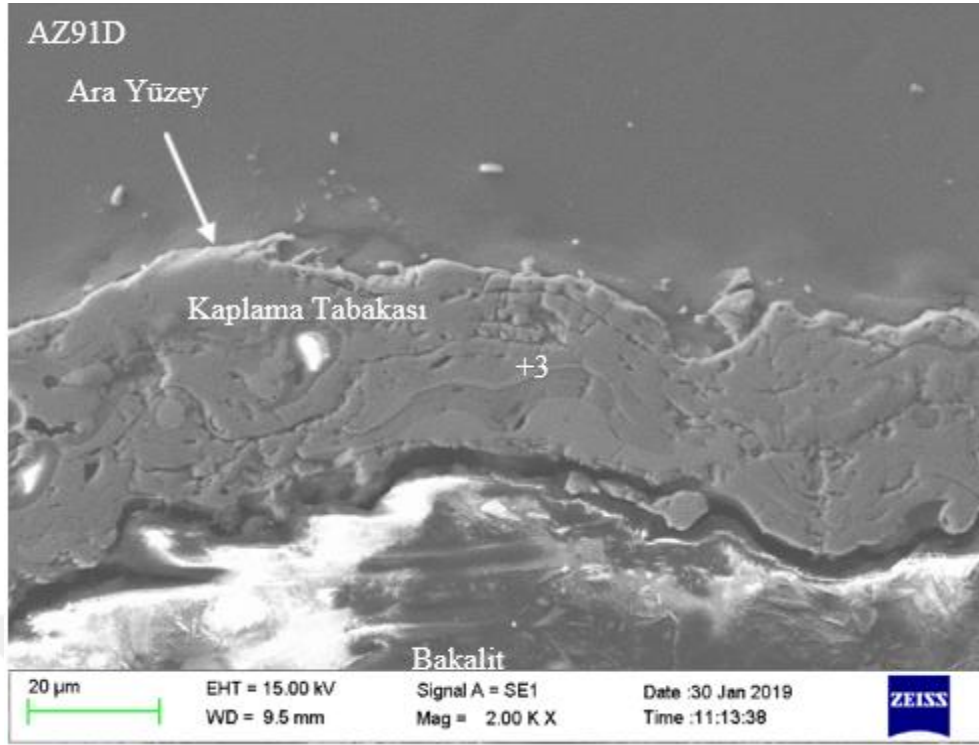


a) N1

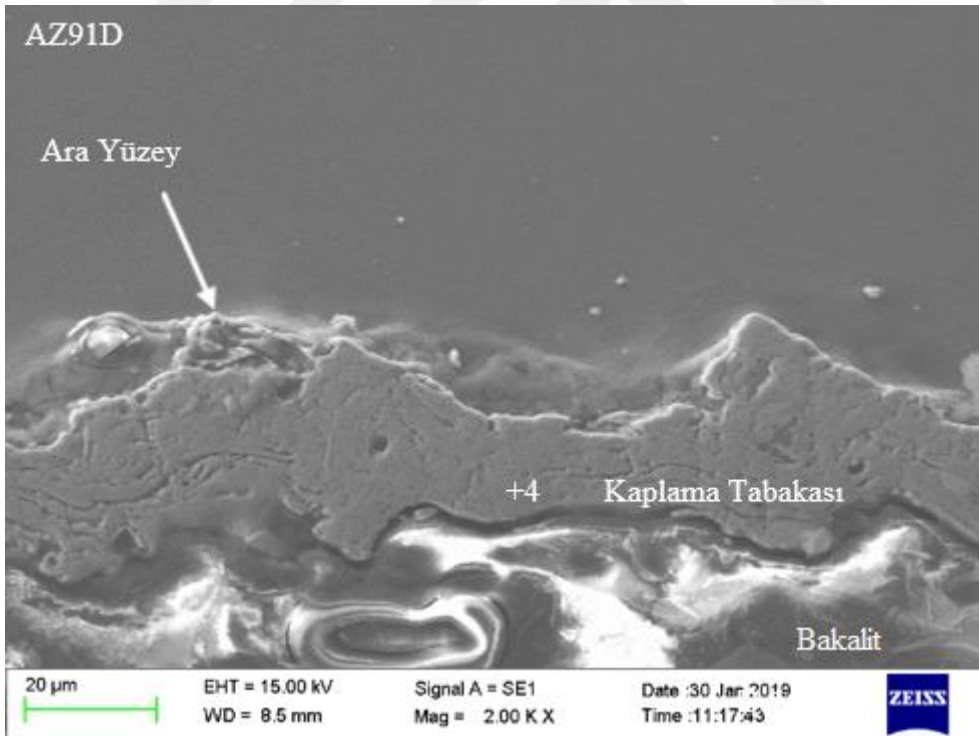


b) N2

Şekil 6.13.'ün devamı

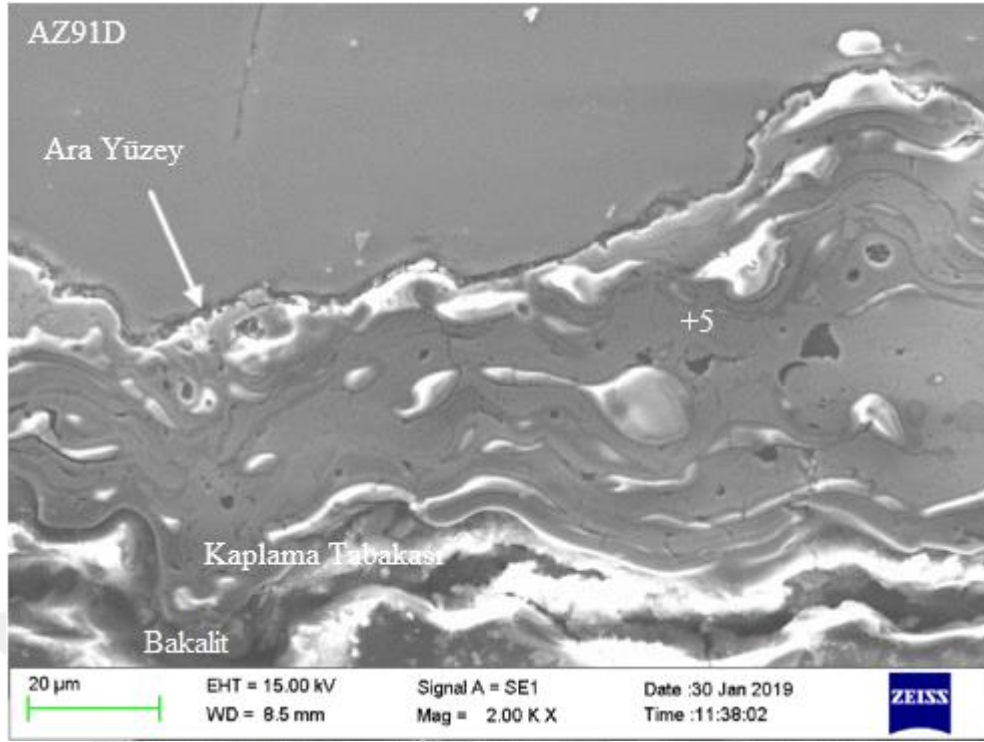


c) N3

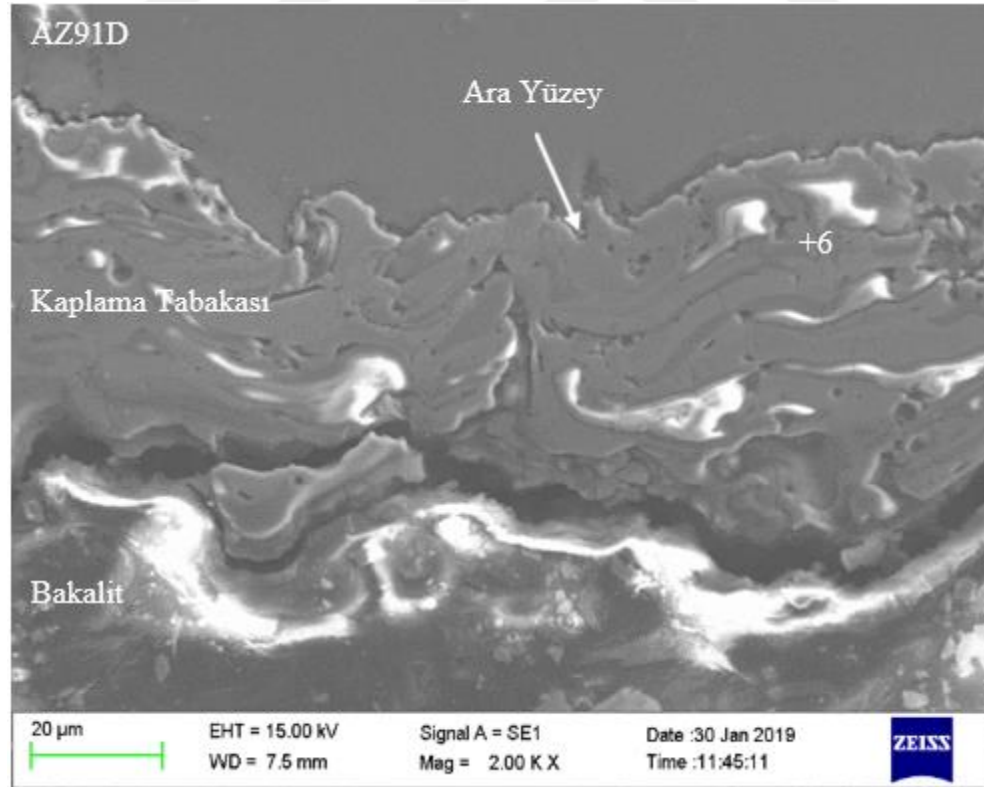


d) N4

Şekil 6.13. Cr₂O₃ kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri

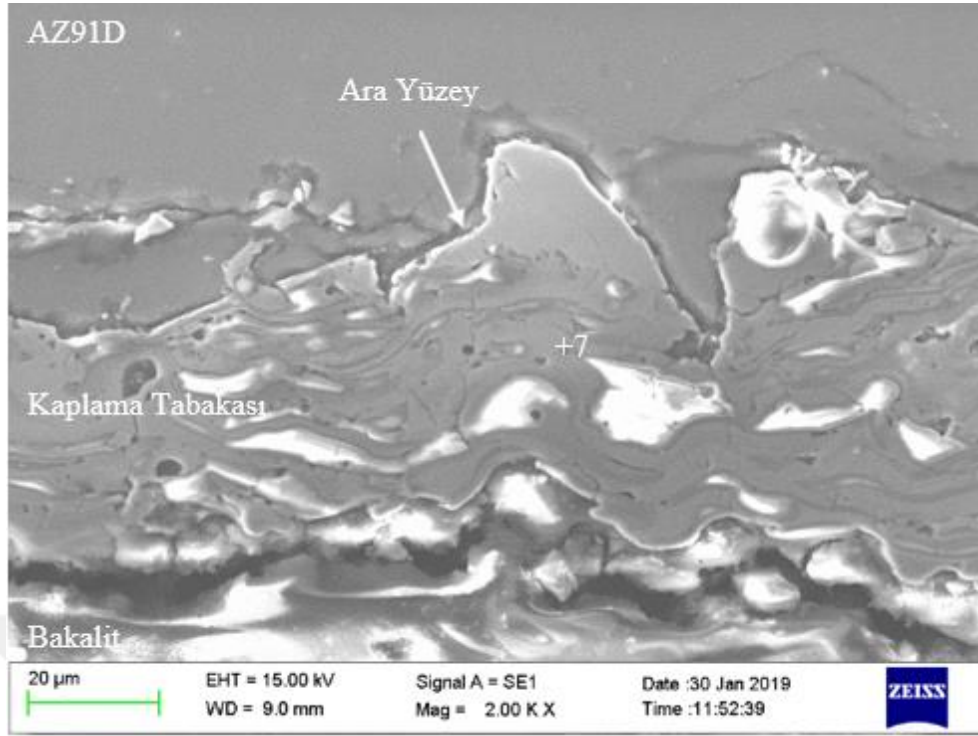


a) N5

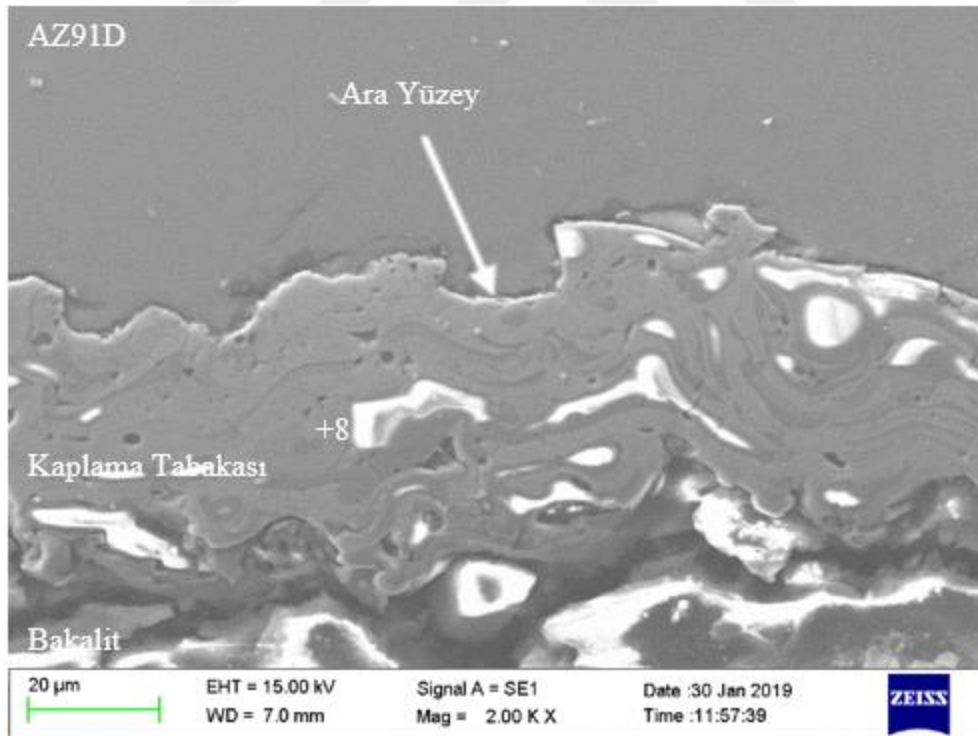


b) N6

Şekil 6.14.'ün devamı

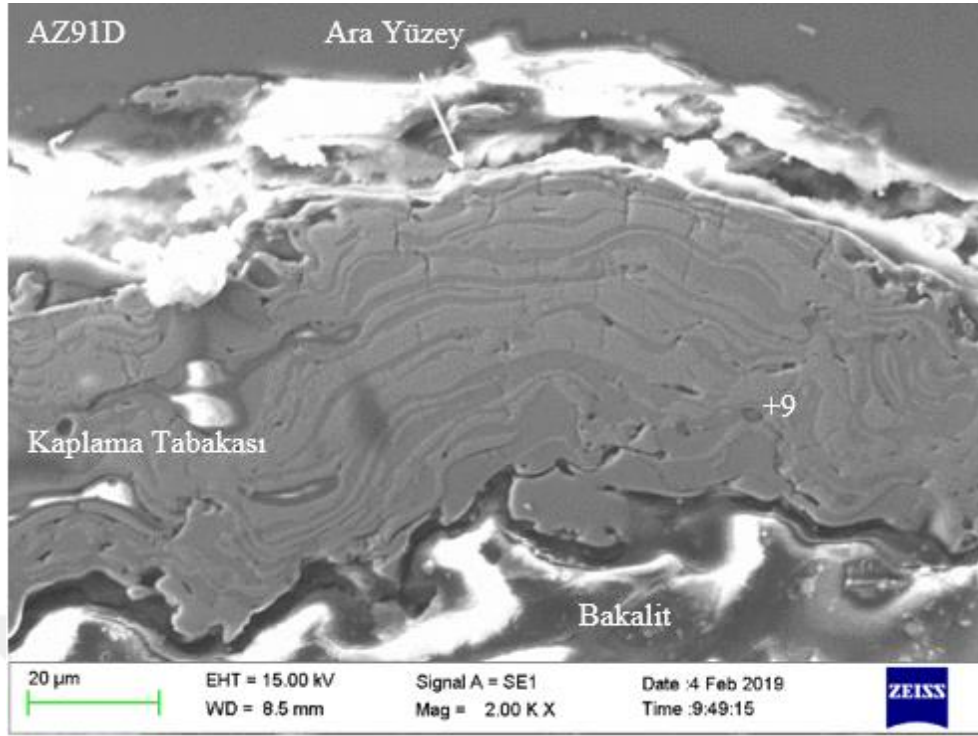


c) N7

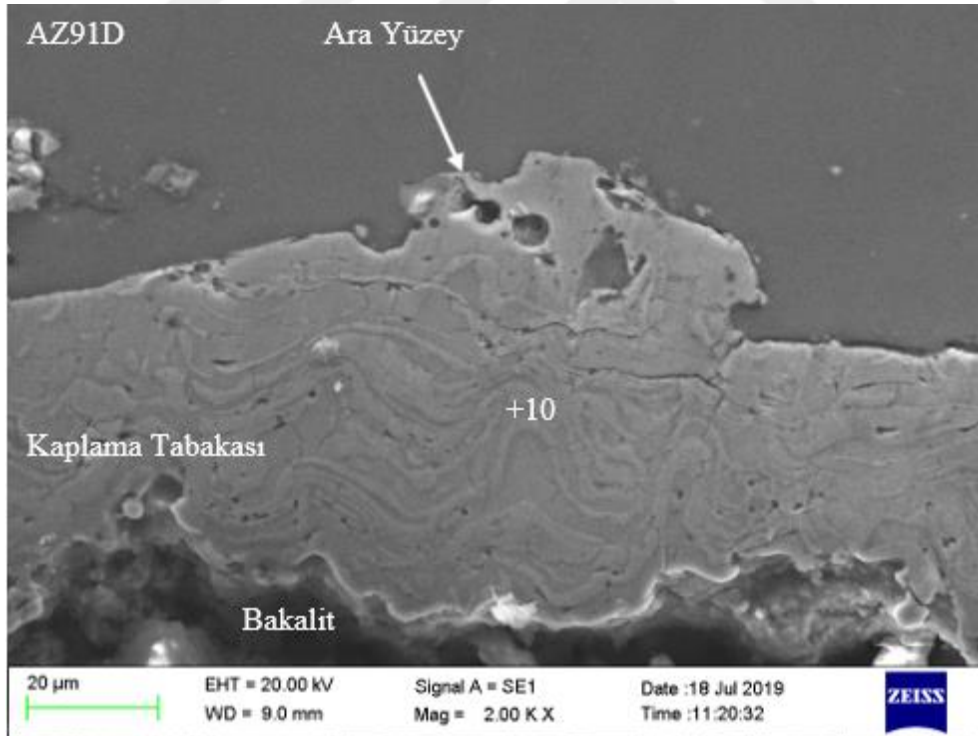


d) N8

Şekil 6.14. Al_2O_3 -40TiO₂ kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri

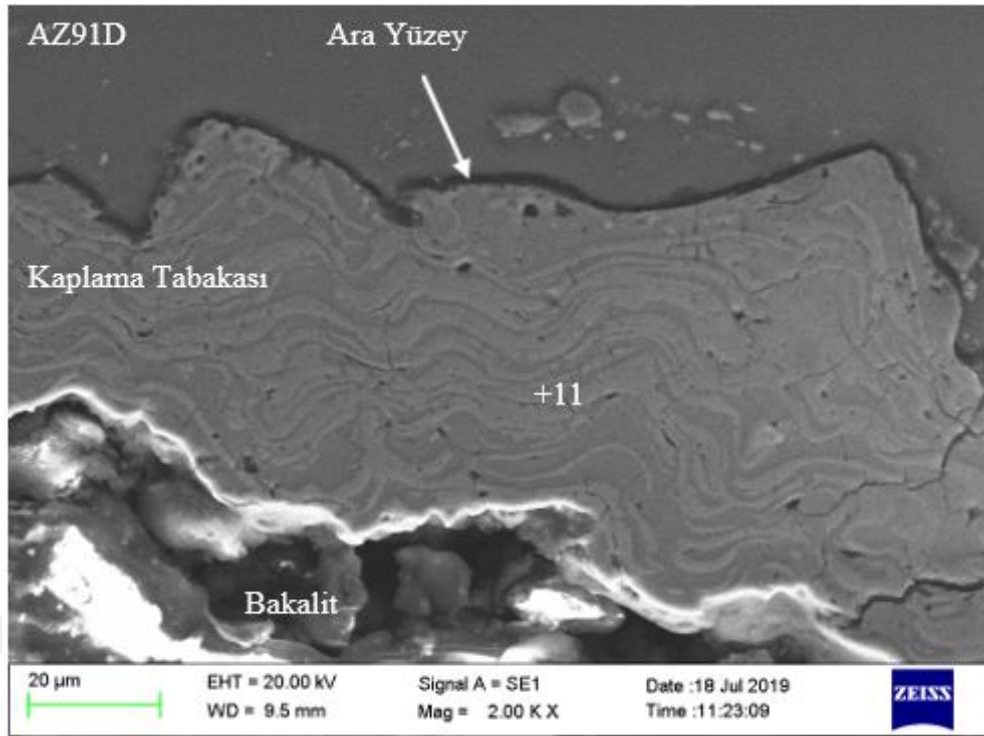


a) N9

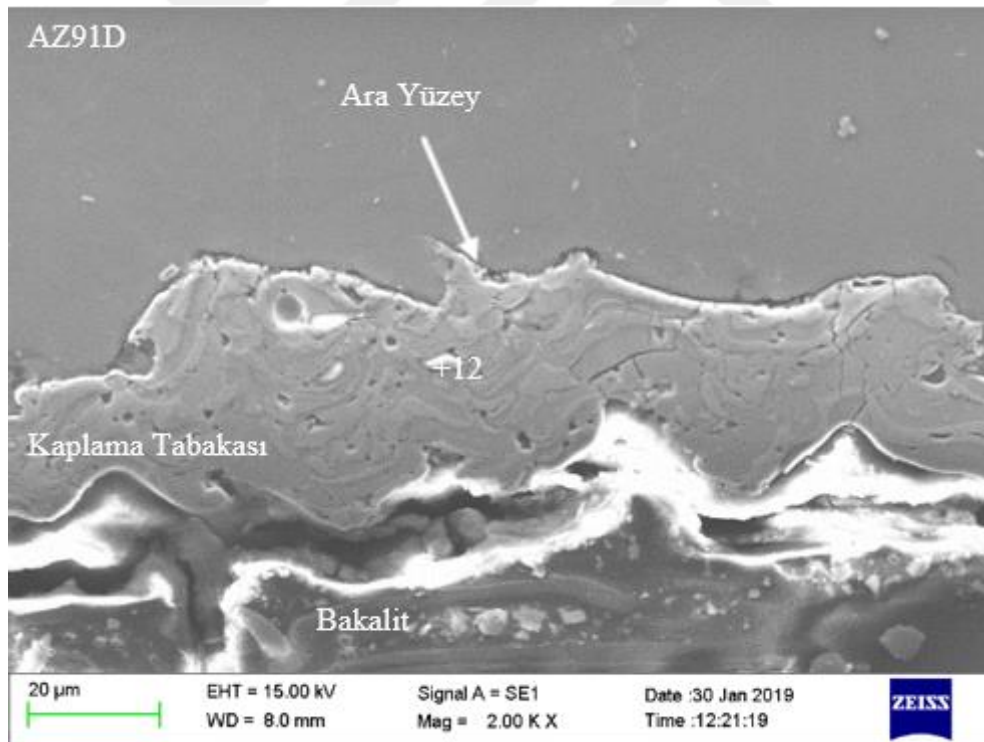


b) N10

Şekil 6.15.'in devamı



c) N11



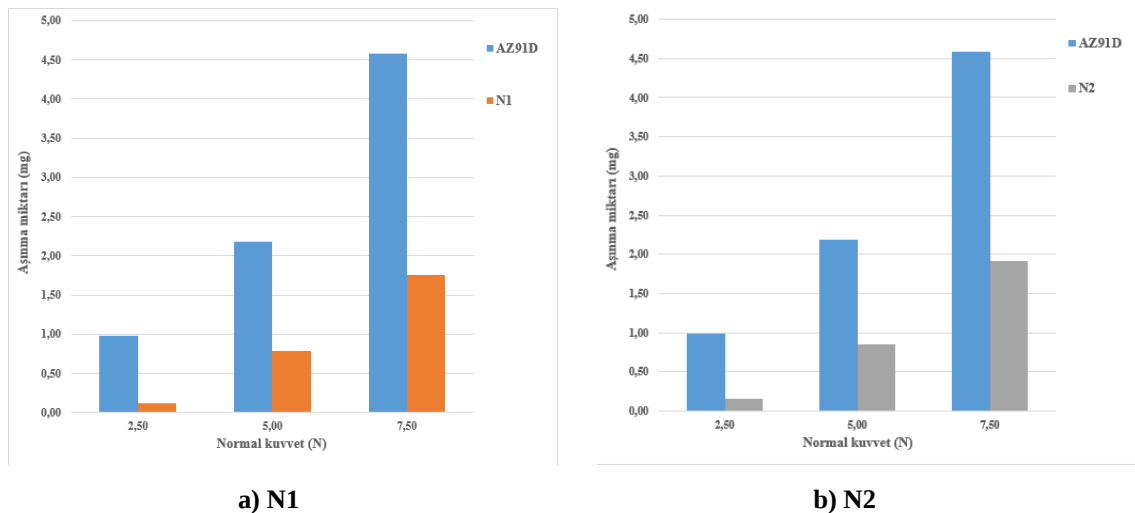
d) N12

Şekil 6.15. $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri

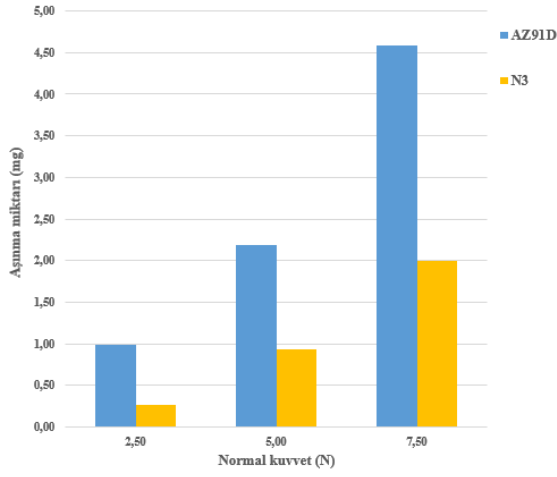
6.2. Aşınma ve Sürtünme

Şekil 6.16.' dan Şekil 6.19.'a kadar, plazma spray yöntemiyle Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin 150 m kayma mesafesindeki aşınma miktarları (mg) grafik halinde verilmiştir. Tüm kuvvet değerlerinde kaplanmış numunelerin aşınma miktarları AZ91D' ye göre daha düşüktür. Bunun nedeni olarak kaplanmış numunelerin sertlik değerlerinin altlık malzemeye oranla çok daha yüksek olması gösterilebilir. Sertliğin aşınma üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu literatür çalışmasında da belirtilmiştir [55]. Tüm kuvvet değerlerinde aşınma direnci en fazla olan numune N₁ numunesi, aşınma direnci en düşük olan numune ise N12 numunesidir. Yine kuvvet arttıkça altlık malzemenin ve kaplanmış numunelerin aşınma miktarlarında artış meydana gelmiştir. Bu durumun kuvvet arttıkça temas noktalarına gelen kuvvetlerin artması ve böylelikle temas noktalarının daha erken kırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [55].

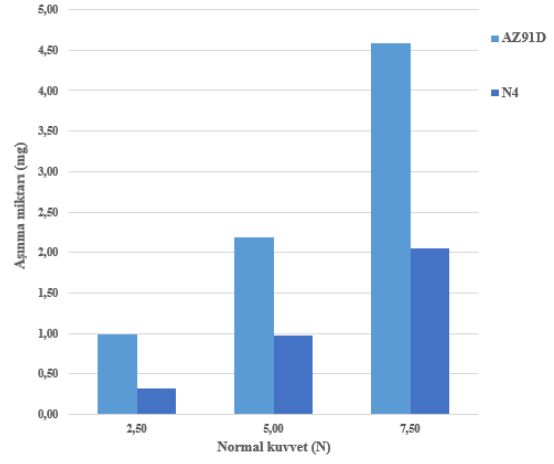
Tüm kuvvet değerlerinde Cr_2O_3 kaplı numunelerin aşınma direnci en yüksek iken, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin aşınma dirençleri en düşüktür. Bunun nedeni olarak Cr_2O_3 ' in sertliğinin daha fazla olması gösterilebilir. Yine Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerde akım değerinin düşmesiyle ve spray mesafesinin yükselmesiyle aşınma miktarları artmaktadır. Bunun nedeni olarak, kaplama tabakalarındaki mikro gözeneklerin artması ve sertliğin azalması gösterilebilir [55].



Şekil 6.16.'nın devamı

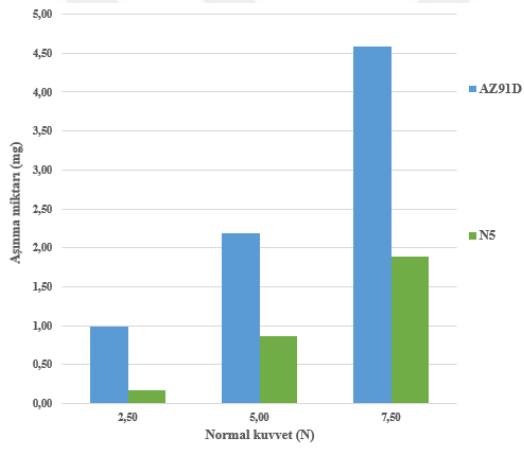


c) N3

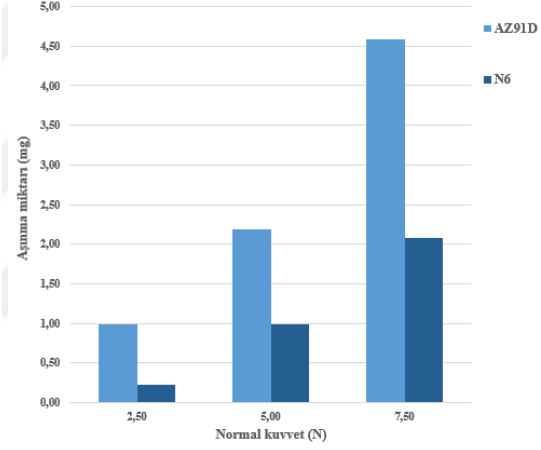


d) N4

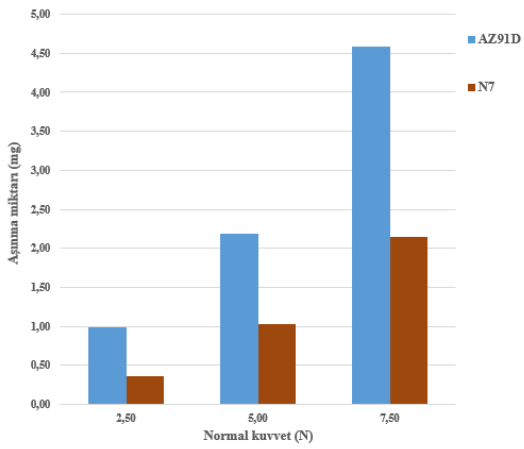
Şekil 6.16. Cr_2O_3 kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları



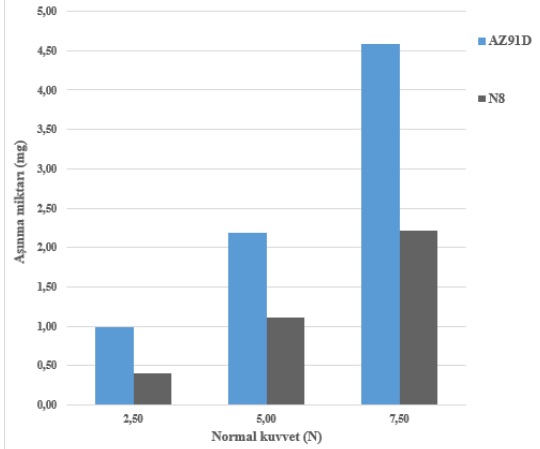
a) N5



b) N6

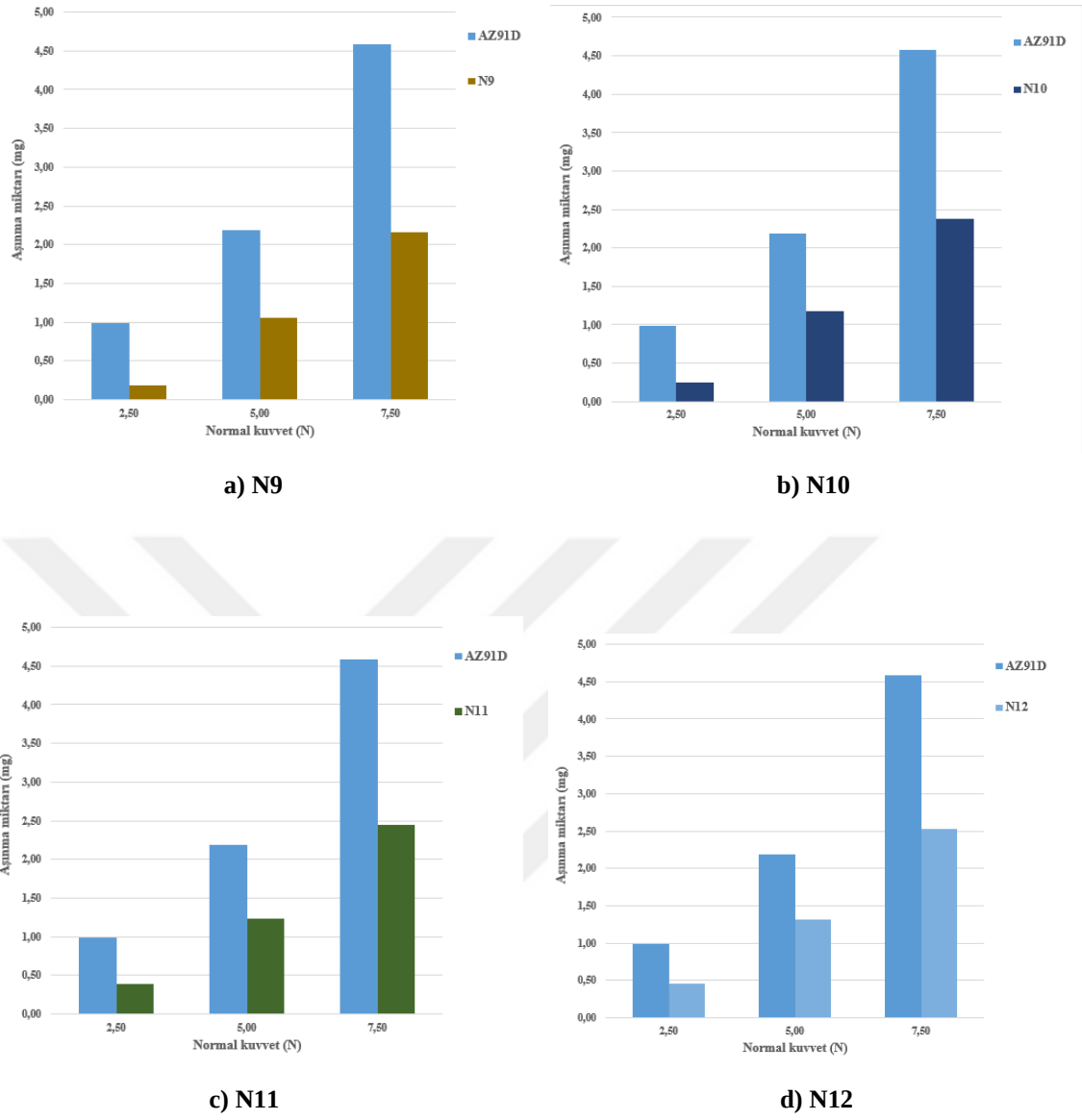


c) N7

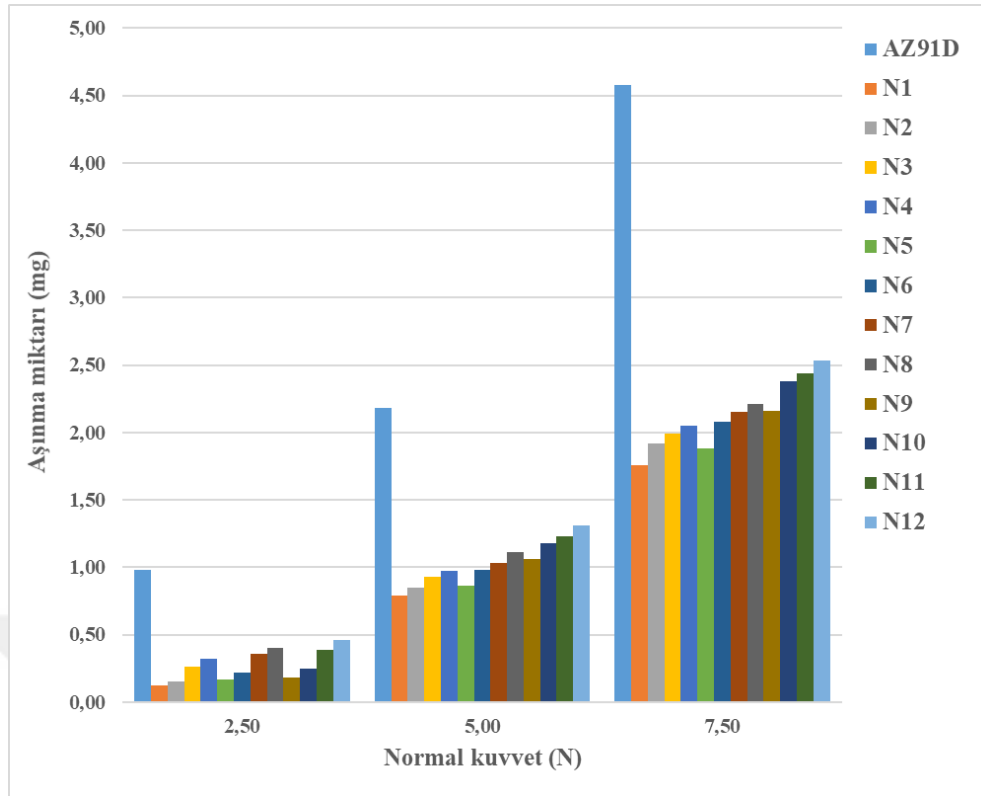


d) N8

Şekil 6.17. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\text{TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları

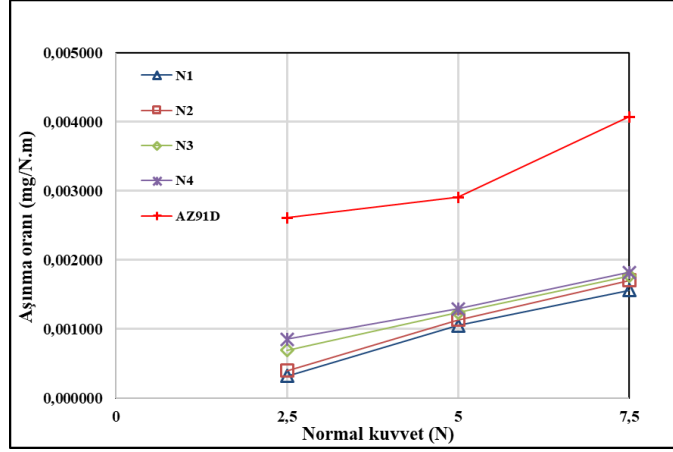


Şekil 6.18. $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}40\text{TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları

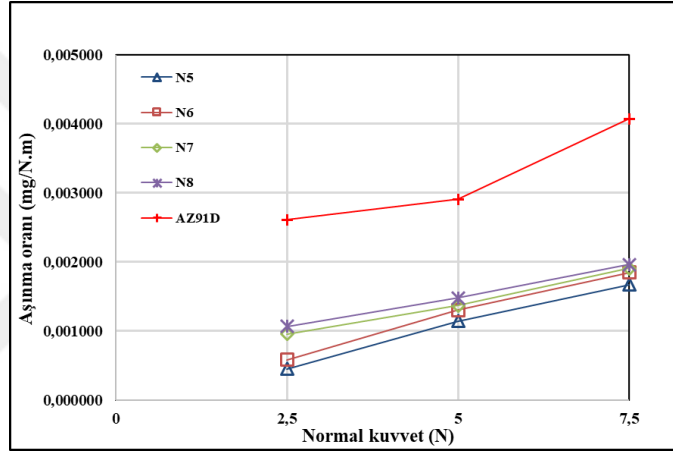


Şekil 6.19. Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma miktarları

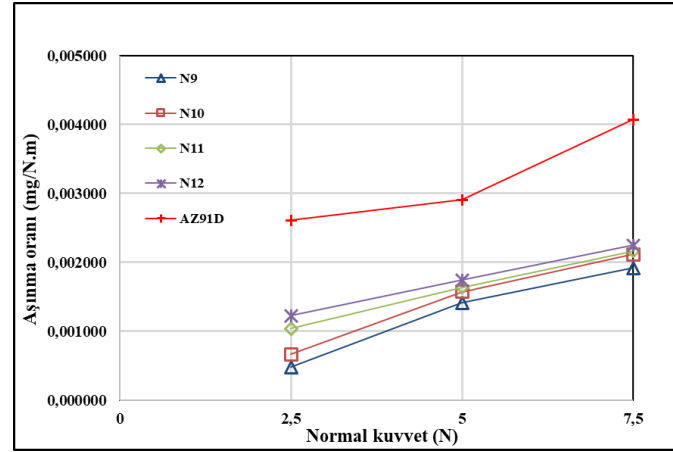
Şekil 6.20.' de plazma spre y yöntemiyle Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma oranları verilmiştir. Tüm kuvvet değerlerinde altlık malzemenin aşınma oranı kaplanmış numunelerden daha yüksektir. Cr_2O_3 kaplı numunelerin (N1-N4) aşınma oranlarında altlık malzemeye göre 2.5 N kuvvet yükte % 67 – 88 arasında, 5 N kuvvette % 56 – 64 arasında ve 7.5 N kuvvette % 55 – 61 arasında bir iyileşme olmuştur. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin (N5-N8) aşınma oranlarında altlık malzemeye göre 2.5 N kuvvet yükte % 59 – 83 arasında, 5 N kuvvette % 44 – 61 arasında ve 7.5 N kuvvette % 52 – 58 arasında bir iyileşme olmuştur. $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin (N9-N12) aşınma oranlarında ise; altlık malzemeye göre 2.5 N kuvvet yükte % 53 – 81 arasında, 5 N kuvvette % 35 – 47 arasında ve 7.5 N kuvvette % 45 – 53 arasında bir iyileşme olmuştur.



a) AZ91D, N1-N4 numuneleri



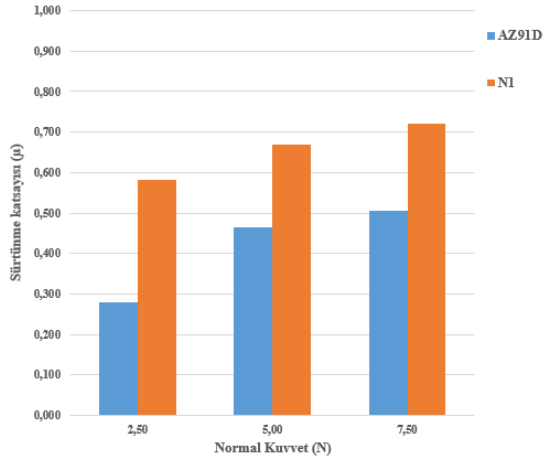
b) AZ91D, N5-N8 numuneleri



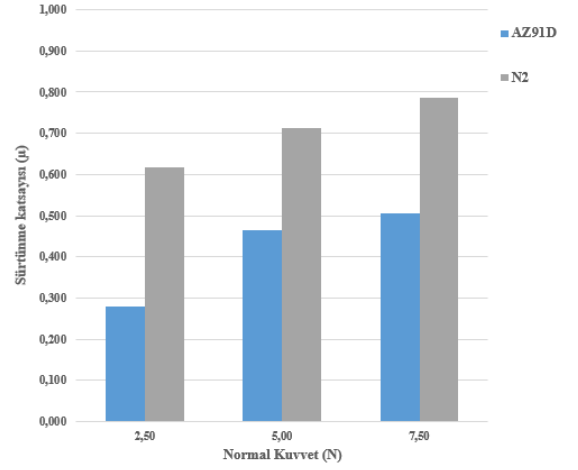
c) AZ91D, N9-N12 numuneleri

Şekil 6.20. Cr₂O₃, Al₂O₃-40TiO₂ ve Cr₂O₃-40TiO₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre aşınma oranları

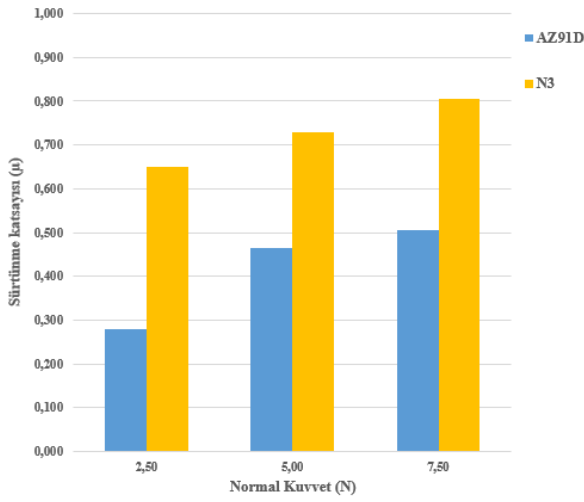
Şekil 6.21.'den Şekil 6.24.'e kadar, plazma sprej yöntemiyle Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları görülmektedir. Altlık malzemenin sürtünme katsayısı (μ) tüm kuvvet değerlerinde kaplanmış numunelerden daha düşüktür ve 2.5 N kuvvette 0.278, 5 N kuvvette 0.464 ve 7.5 N kuvvette ise 0.507' dir. Altlık malzemenin μ değerinin kaplanmış numunelerden daha düşük olmasının yüzey pürüzlülüğünün daha az olmasından, ayrıca yapısının daha homojen olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylelikle yüzey temas alanı arttığından μ değerinin azaldığı düşünülmektedir. Cr_2O_3 kaplı numunelerin (N1-N4) μ değerleri 2.5 N kuvvette 0.582 – 0.676 arasında, 5 N kuvvette 0.668 – 0.788 arasında ve 7.5 N kuvvette 0.720 – 0.833 arasında değişmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin (N5-N8) μ değerleri 2.5 N kuvvette 0.535 – 0.612 arasında, 5 N kuvvette 0.564 – 0.675 arasında ve 7.5 N kuvvette 0.651 – 0.738 arasında değişmektedir. $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin (N9-N12) aşınma oranlarında ise; altlık malzemeye göre 2.5 N kuvvette 0.590 – 0.658 arasında, 5 N kuvvette 0.659 – 0.732 arasında ve 7.5 N kuvvette 0.694 – 0.817 arasında değişmektedir. AZ91D' nin ve kaplanmış numunelerin μ değerleri kuvvet arttıkça artmıştır. Bu durumun kuvvetin artmasıyla malzeme yüzeylerinden kopan parçacıkların fazla olması ve bu nedenle temas alanının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin sürtünme katsayıları en düşük, Cr_2O_3 kaplı numunelerinki ise en yüksektir. Bu durumun aynı üretim parametrelerinde Cr_2O_3 ' ün ergime ısısının yüksek olmasından ve bu numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin de bu durumdan dolayı yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumdan dolayı Cr_2O_3 içeren numunelerdeki mikro gözenekler artmış ve temas alanı azaldığı için sürtünme katsayısı artmış olabilir. Yine kaplanmış numunelerin μ değerleri akımın azalması ve sprej mesafesinin artmasıyla artmaktadır.



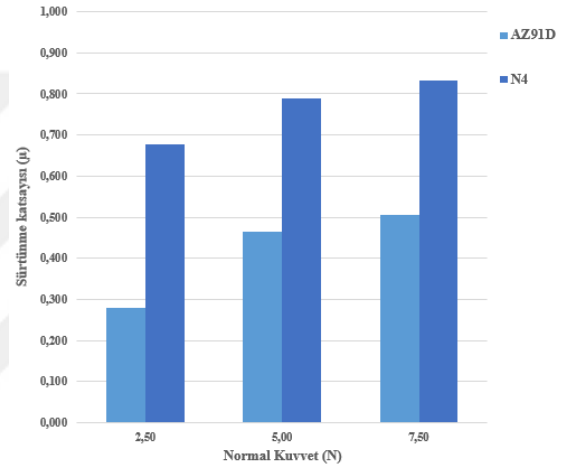
a) N1



b) N2

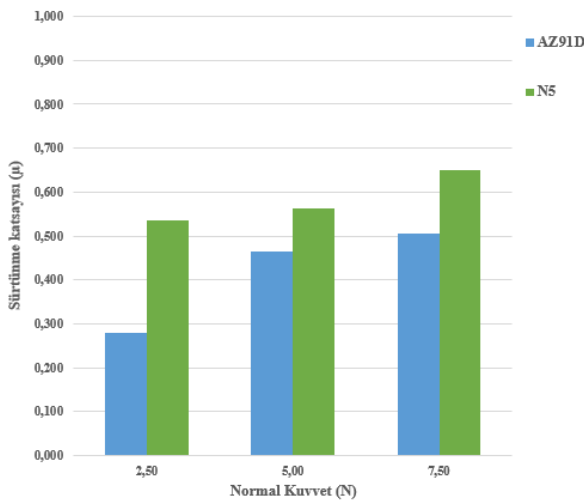


c) N3

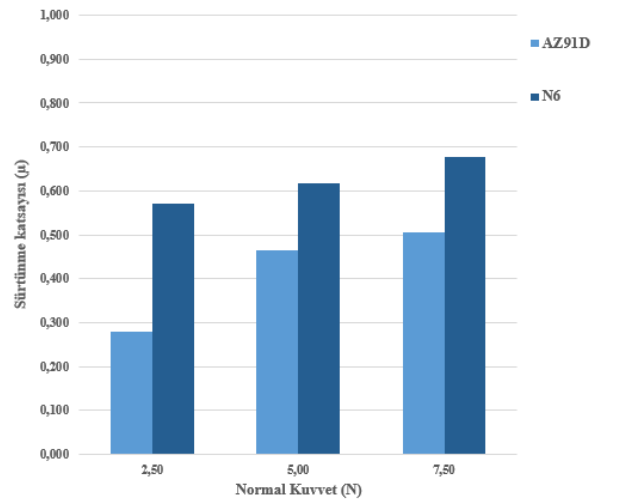


d) N4

Şekil 6.21. Cr₂O₃ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları

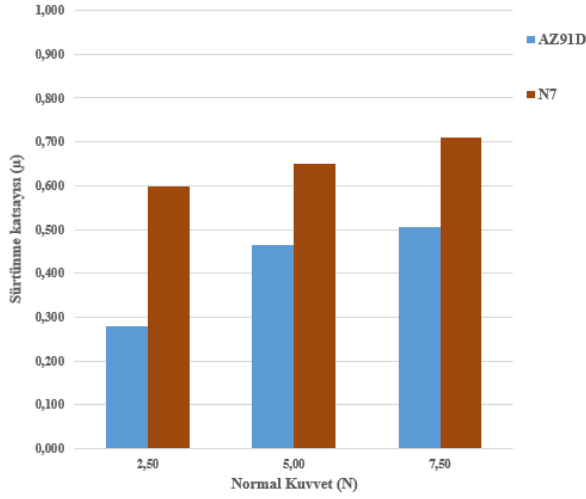


a) N5

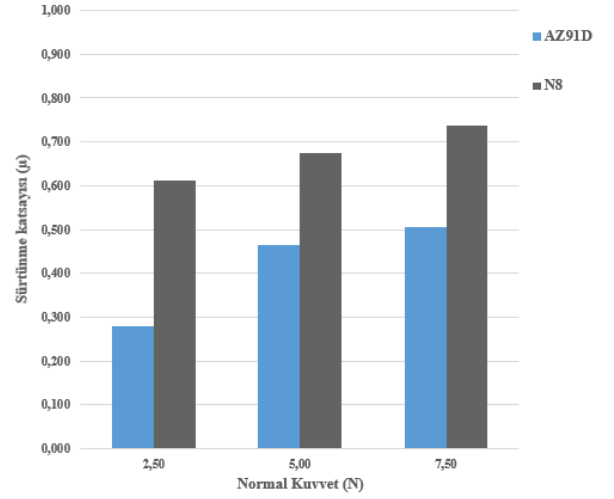


b) N6

Şekil 6.22.'nin devamı

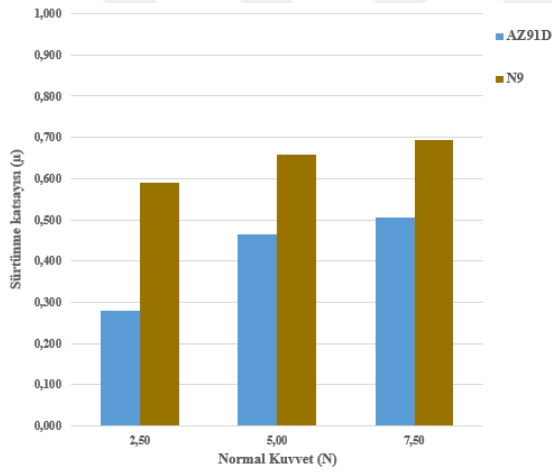


c) N7

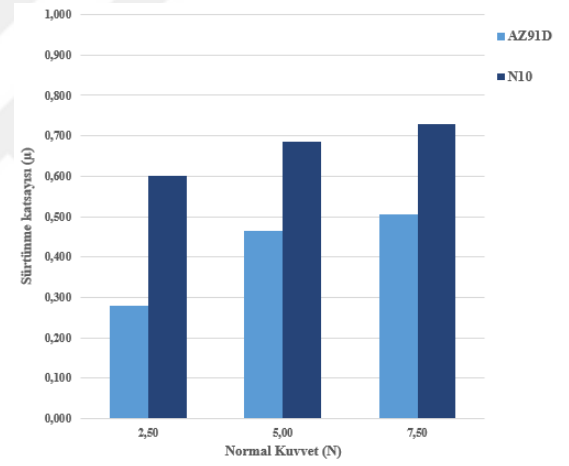


d) N8

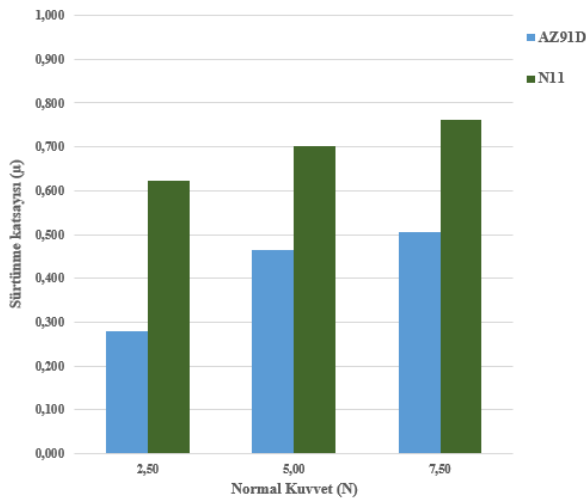
Şekil 6.22. Al_2O_3 -40TiO₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları



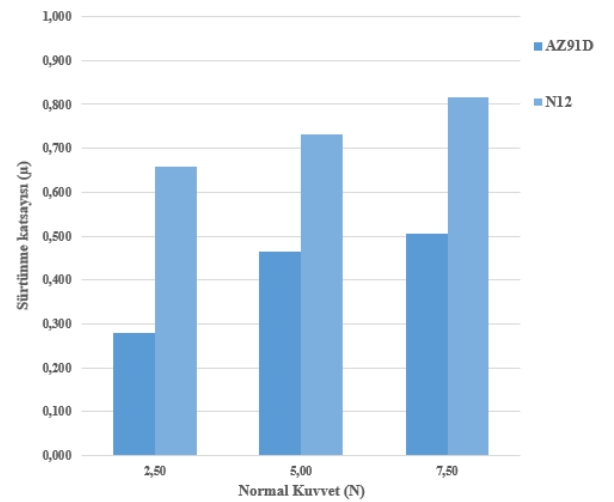
a) N9



b) N10

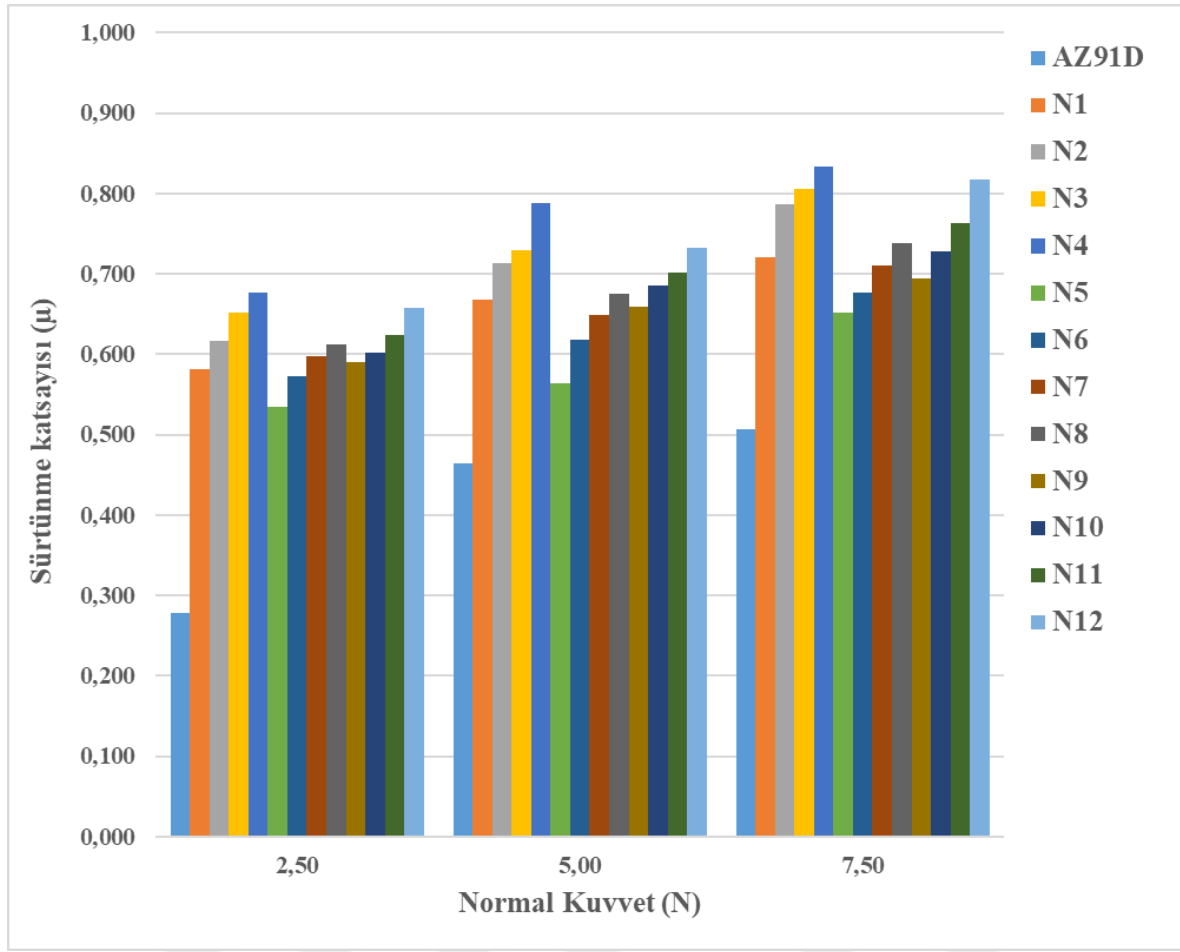


c) N11



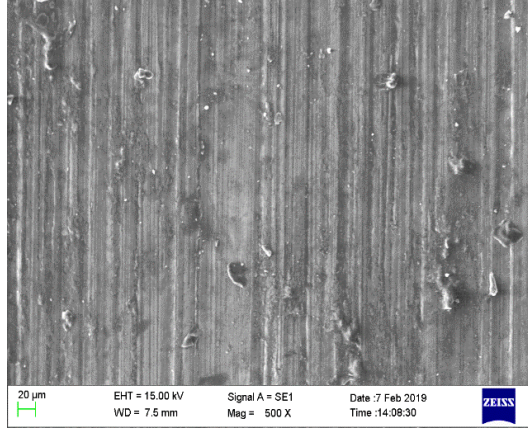
d) N12

Şekil 6.23. Cr_2O_3 -40TiO₂ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları

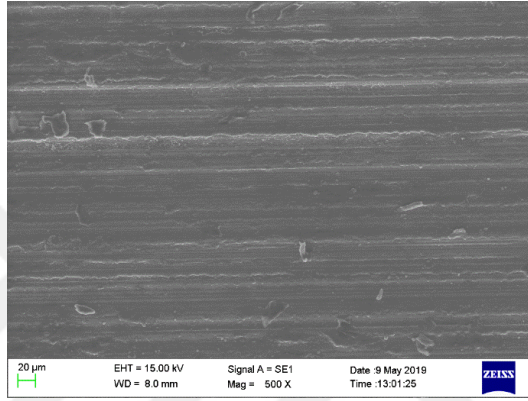


Şekil 6.24. Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ kaplı numunelerin ve altlık malzemenin normal kuvvete göre sürtünme katsayıları

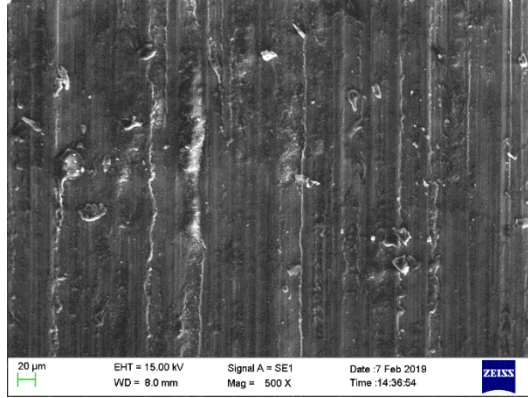
Şekil 6.25.'te AZ91D' nin aşınma yüzey SEM fotoğrafları görülmektedir. Görüldüğü gibi aşınma yüzeylerinden önemli miktarda parçacık kaybı meydana gelmiştir. Ayrıca aşınma yüzeylerinde oluklar oluşmuş ve bu olukların derinliği ve genişliği kuvvet arttıkça artmıştır.



a) 2,5 N



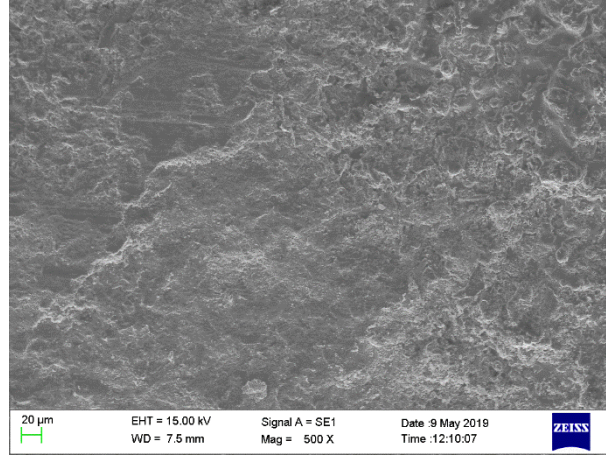
b) 5 N



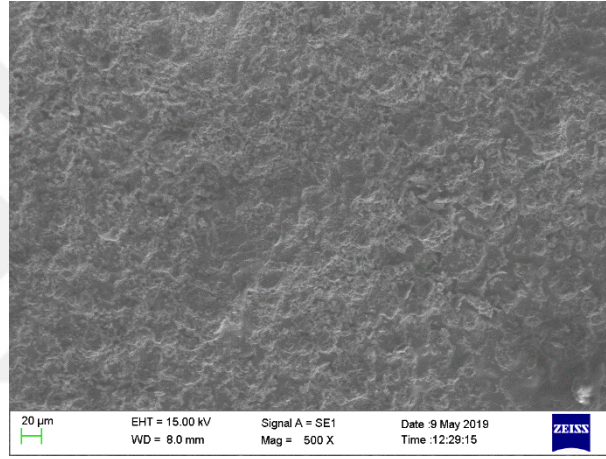
c) 7,5 N

Şekil 6.25. AZ91D' nin yüzey aşınmalarının SEM görüntüleri

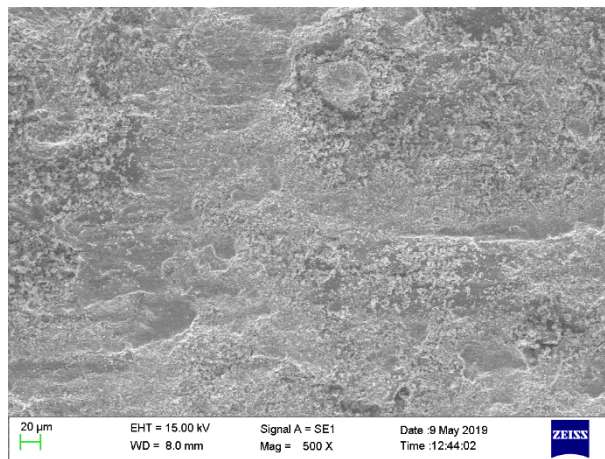
Şekil 6.26.'dan Şekil 6.37.'ye kadar, kaplanmış numunelerin aşınma yüzey fotoğrafları verilmiştir. Görüldüğü gibi aşınma genellikle yüzeyden parça kopması şeklinde gerçekleşmiş ve altlık malzemede oluşan oluklar gözlenmemiştir. Ayrıca yüksek yüklerde kaplanmış yüzeylerin aşınma miktarının daha fazla olmasından dolayı ve temas alanının artmasına bağlı olarak yüzeyler daha düzleşmiştir. Ayrıca yüksek yüklerde genellikle yüzeyden kopan parçacıkların sıvandığı görülmektedir.



a) 2,5 N

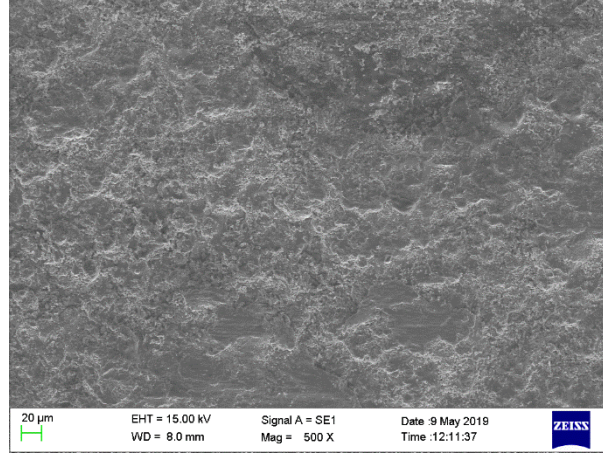


b) 5 N

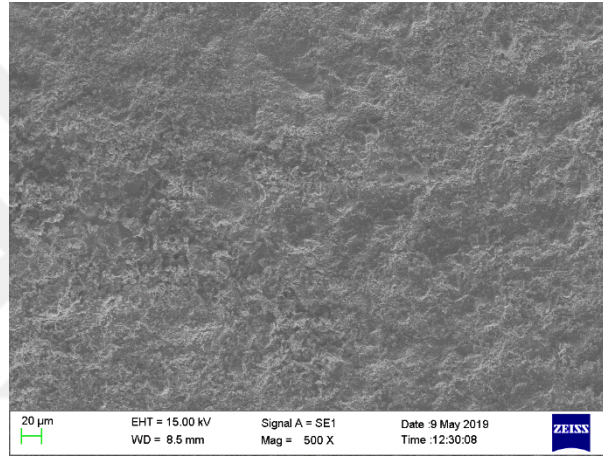


c) 7,5 N

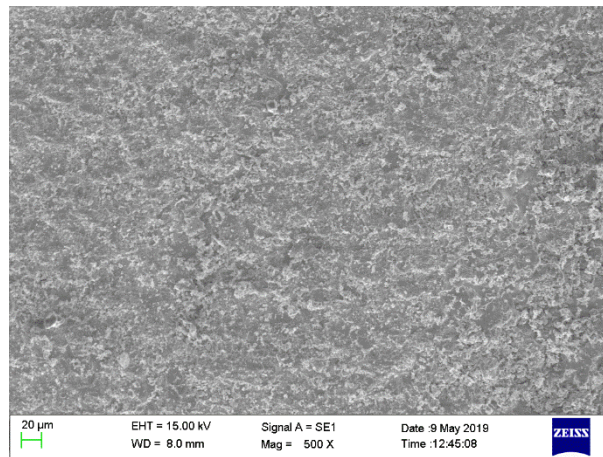
Şekil 6.26. N1 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

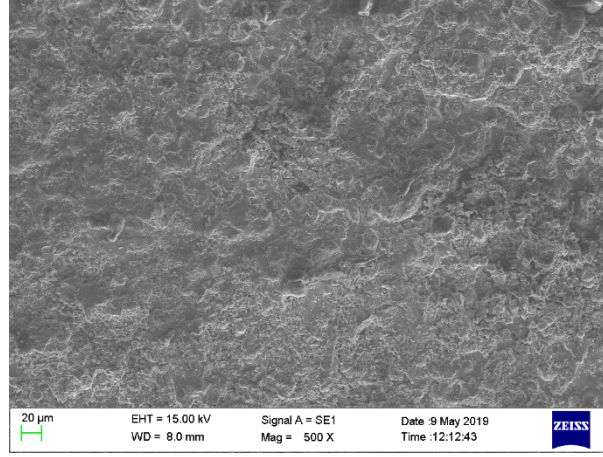


b) 5 N

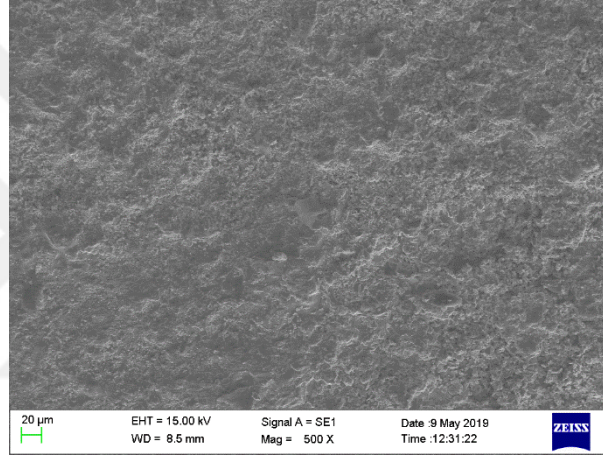


c) 7,5 N

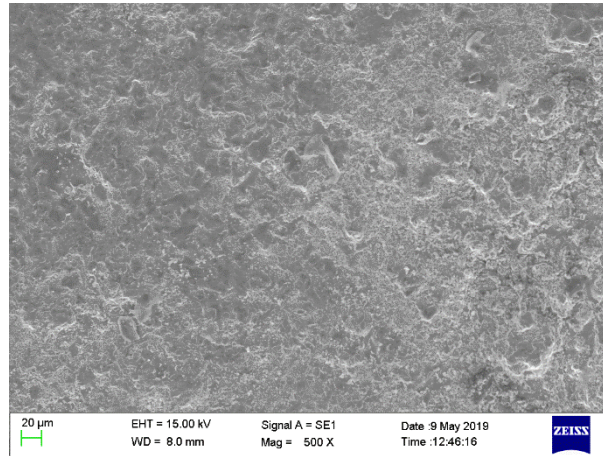
Şekil 6.27. N2 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

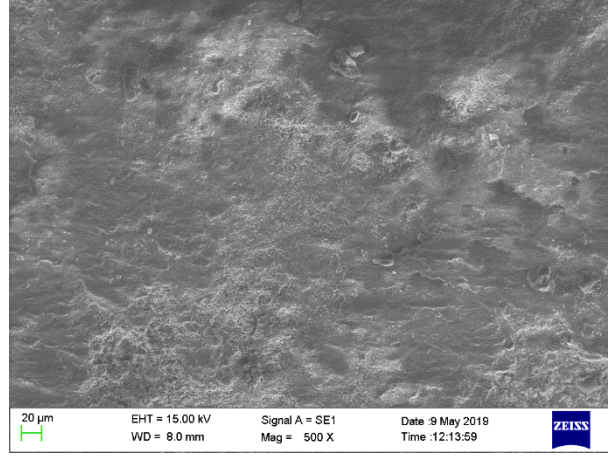


b) 5 N

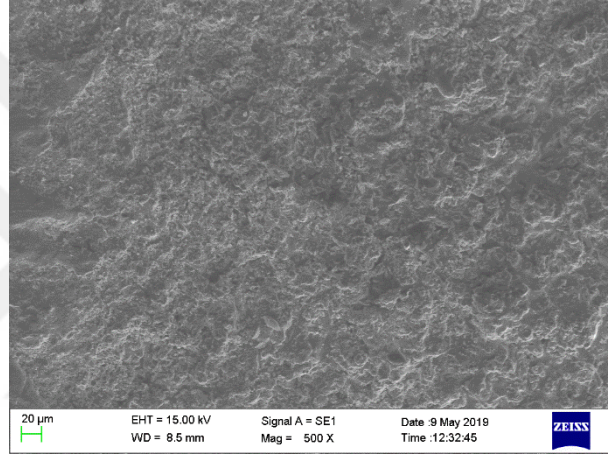


c) 7,5 N

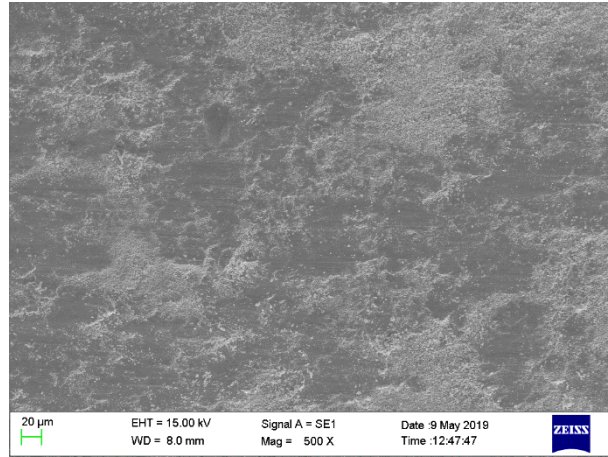
Şekil 6.28. N3 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

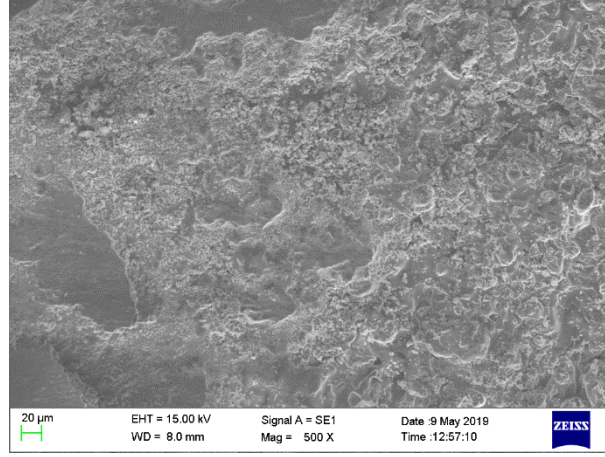


b) 5 N

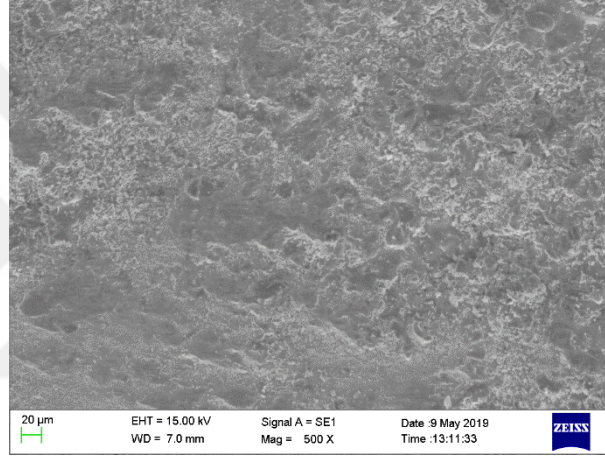


c) 7,5 N

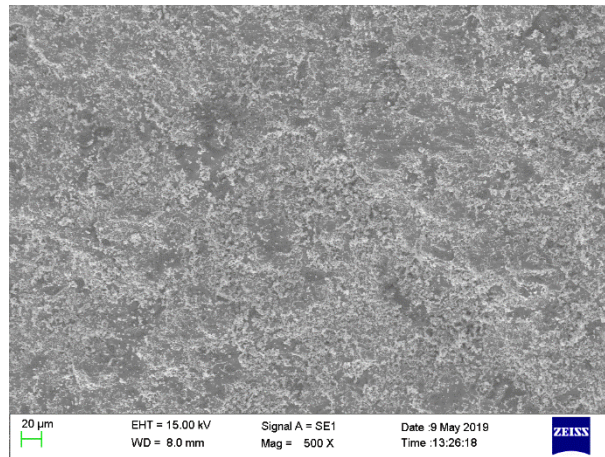
Şekil 6.29. N4 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

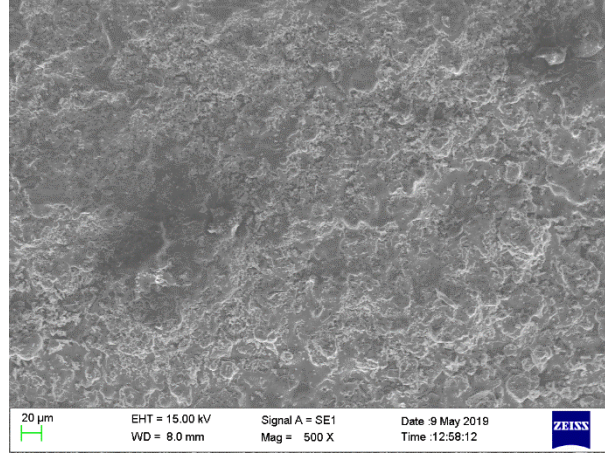


b) 5 N

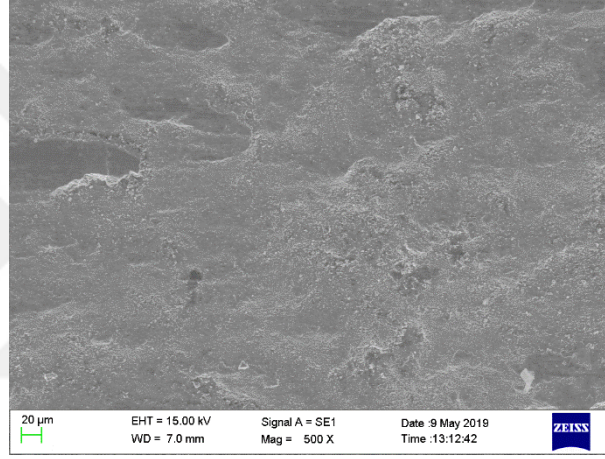


c) 7,5 N

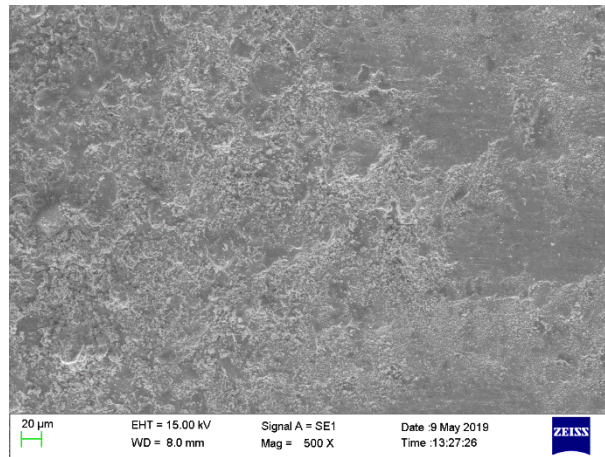
Şekil 6.30. N5 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

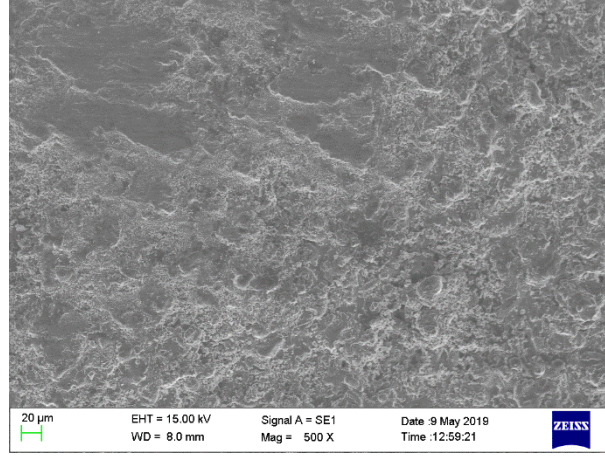


b) 5 N

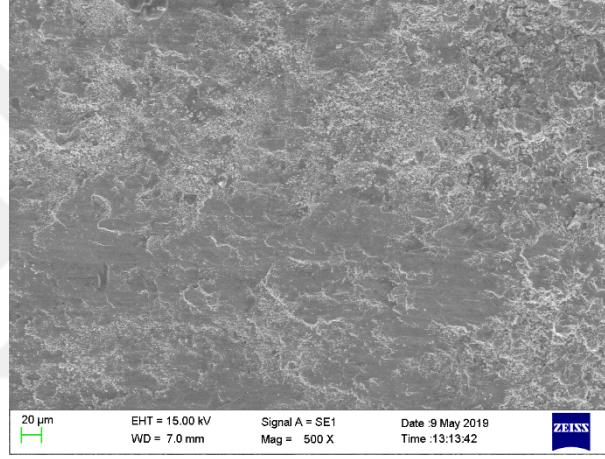


c) 7,5 N

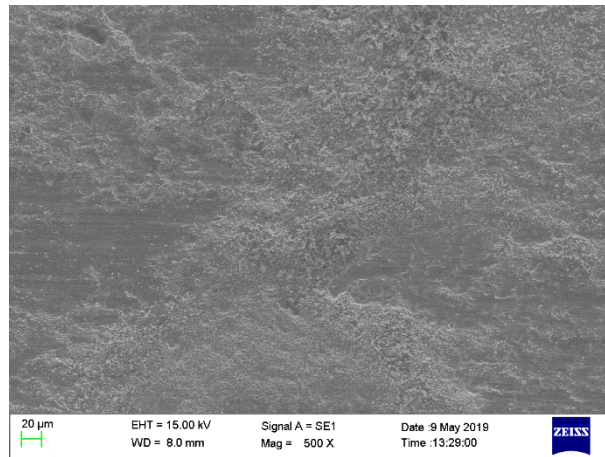
Şekil 6.31. N6 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

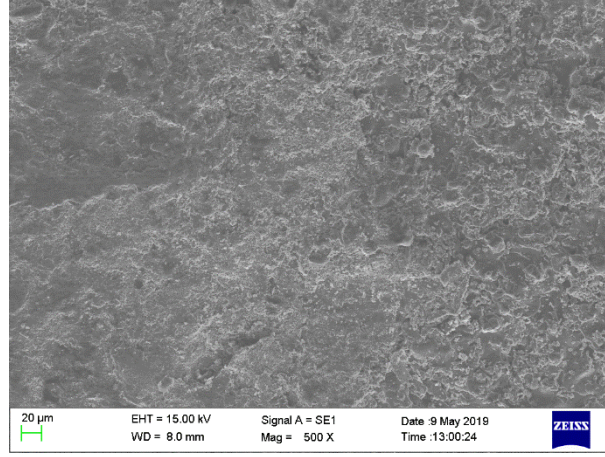


b) 5 N

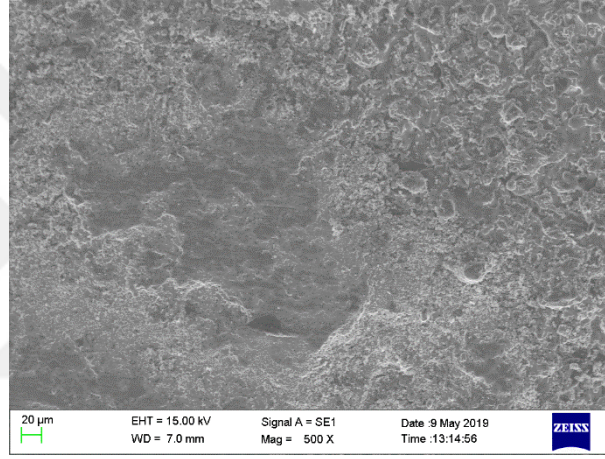


c) 7,5 N

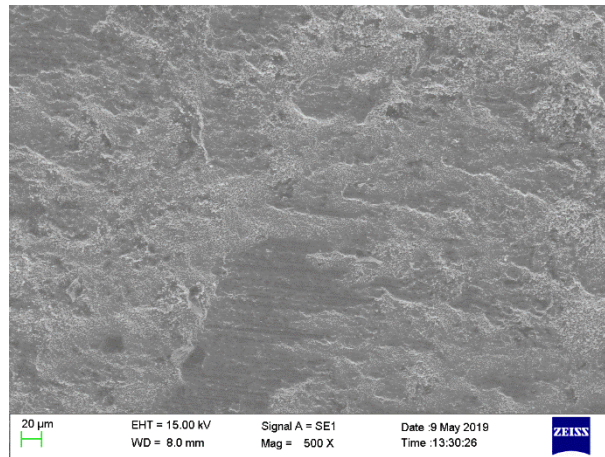
Şekil 6.32. N7 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

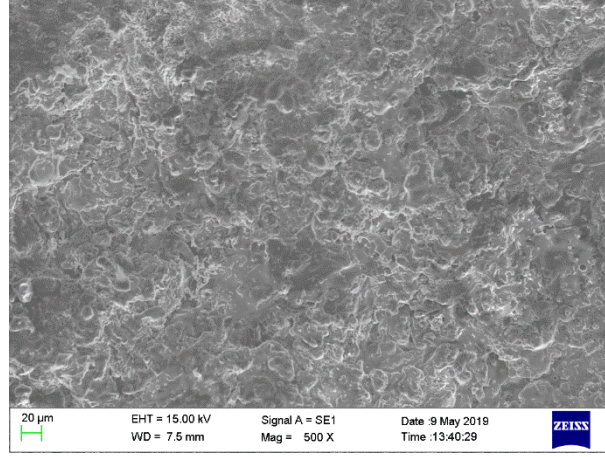


b) 5 N

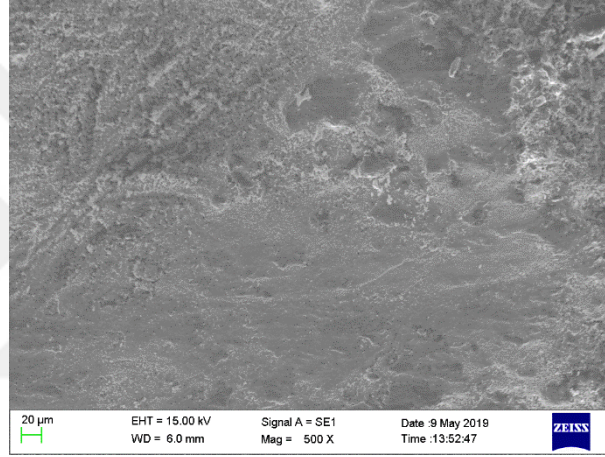


c) 7,5 N

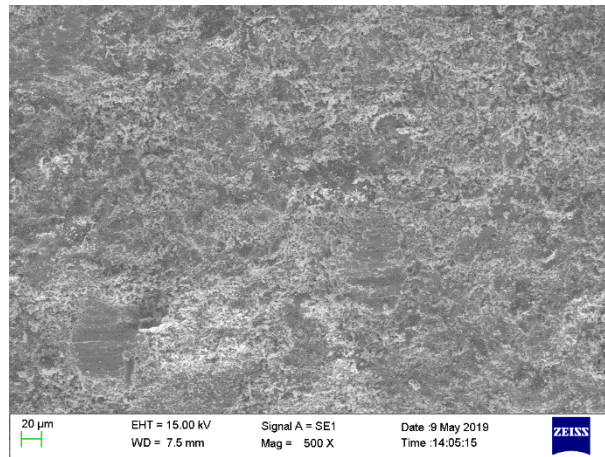
Şekil 6.33. N8 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

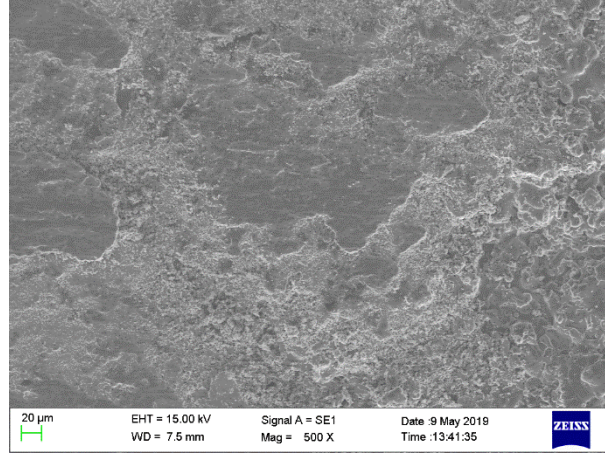


b) 5 N

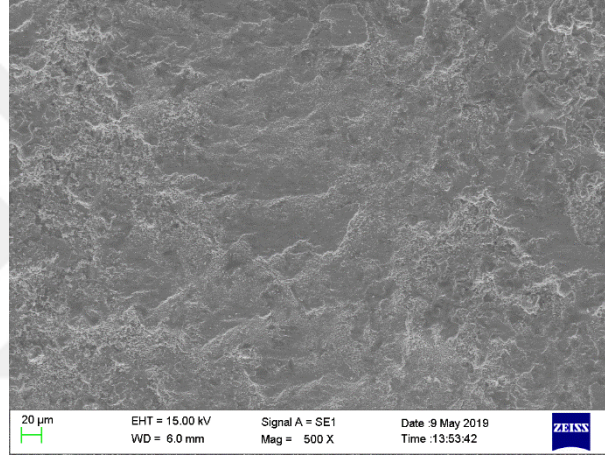


c) 7,5 N

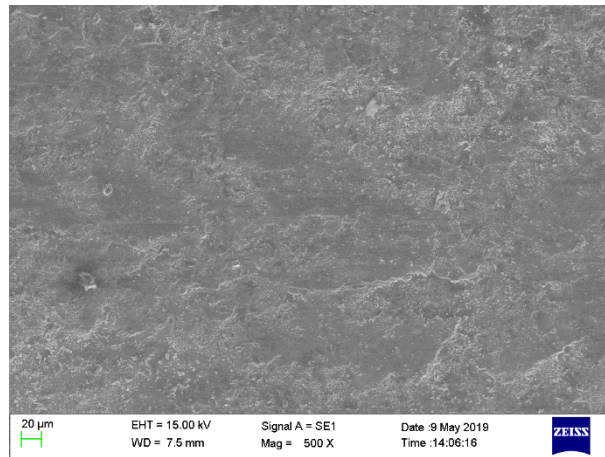
Şekil 6.34. N9 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

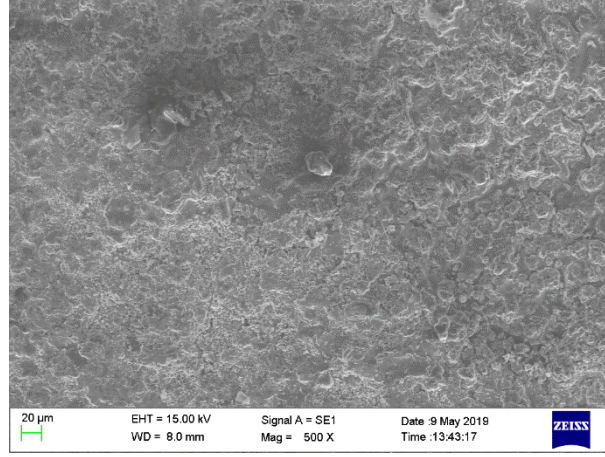


b) 5 N

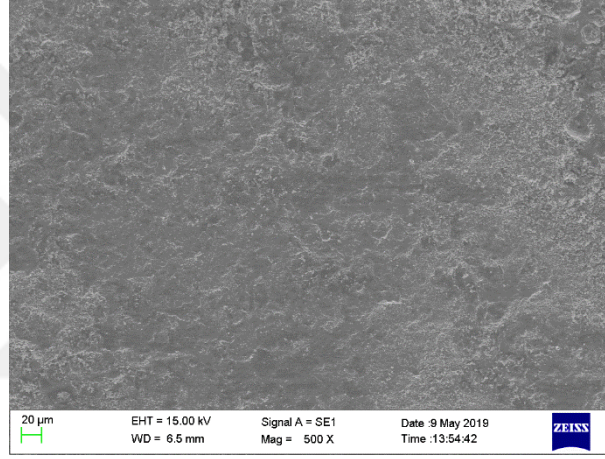


c) 7,5 N

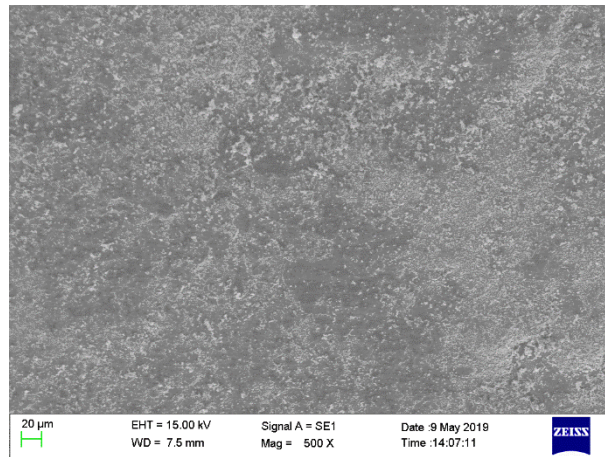
Şekil 6.35. N10 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N

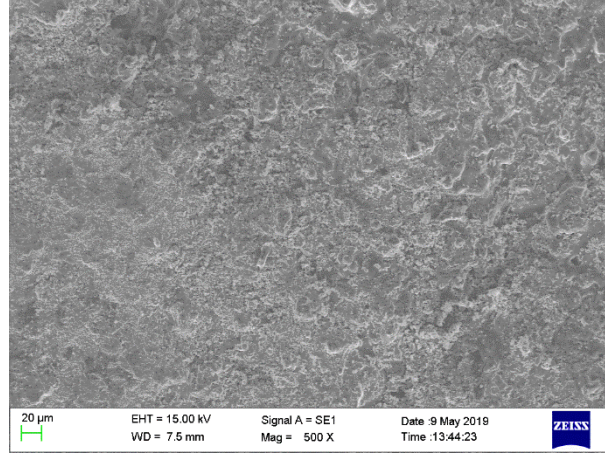


b) 5 N

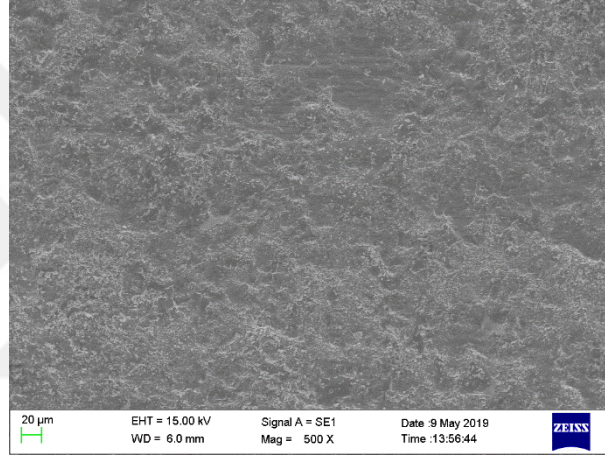


c) 7,5 N

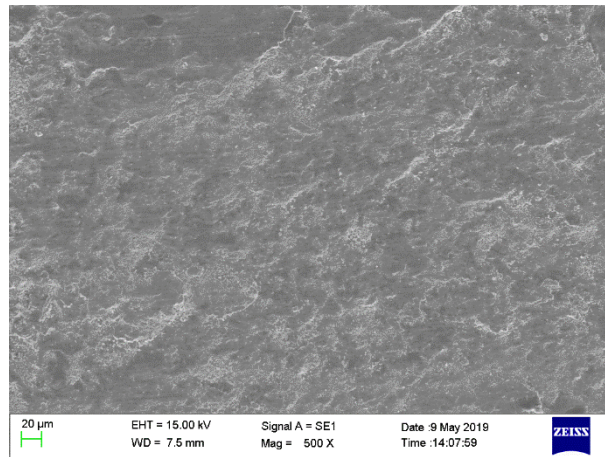
Şekil 6.36. N11 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri



a) 2,5 N



b) 5 N



c) 7,5 N

Şekil 6.37. N12 Numunesinin aşınma SEM görüntüleri

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AZ91D magnezyum alaşımının yüzeyi plazma sprej yöntemi ile farklı akım ve sprej mesafelerinde Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ tozları ile kaplanmıştır. Yapılan mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri ve aşınma testleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. AZ91D' nin plazma sprej yöntemi kullanılarak Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ve $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ tozları ile kaplanabileceği görülmüştür.
2. Kaplama yüzeylerinde gözle görülür bir çatlğa veya gözeneğe rastlanmamıştır.
3. Cr_2O_3 ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Cr_2O_3 ve Cr tespit edilmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Al_2O_3 , Ti_2O_3 ve TiO tespit edilmiştir. $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile kaplanan numunelerin kaplama tabakalarında Cr_2O_3 , TiO_2 ve TiO tespit edilmiştir.
4. En yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olan numuneler Cr_2O_3 ile kaplanan numunelerdir.
5. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri $5.788\ \mu\text{m}$ olarak Cr_2O_3 ile düşük ısı girdisi ve yüksek sprej mesafesinde kaplanan numunede ölçülmüştür.
6. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile en yüksek ısı girdisi ve en düşük sprej mesafesinde kaplanan numunede 5.090 olarak ölçülmüştür.
7. En yüksek sertlik değeri $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile yüksek ısı girdisi ve düşük sprej mesafesinde kaplanan numunede $845\ \text{HV}_{0.1}$ ölçülmüştür.
8. Kaplanmış numunelerin sertlikleri ısı girdisinin azalması ve sprej mesafesinin artmasıyla düşmektedir.
9. Tüm normal kuvvetlerde kaplanmış numunelerin aşınma dirençleri altlık malzemeden daha yüksektir.
10. En yüksek aşınma direncine sahip numune Cr_2O_3 ile yüksek ısı girdisi ve düşük sprej mesafesinde kaplanan numunedir.
11. En düşük aşınma direncine sahip numune ise $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-40TiO}_2$ ile düşük ısı girdisi ve yüksek sprej mesafesinde kaplanan numunedir.
12. Kaplanmış numunelerin aşınma dirençleri ısı girdisi arttıkça ve sprej mesafesi azaldıkça artmaktadır.

13. Altlık malzemenin sürtünme katsayısı tüm yük değerlerinde kaplanmış numunelerden daha düşüktür.
14. AZ91D' nin ve kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları kuvvet arttıkça artmaktadır.
15. Al_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerin sürtünme katsayısı değerleri en düşüktür ve kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları akımın azalması ve sprej mesafesinin artmasıyla artmaktadır.

İleriki çalışmalarda Cr_2O_3 , Al_2O_3 -40 TiO_2 ve Cr_2O_3 -40 TiO_2 kaplı numunelerin korozyon dayanımları incelenebilir. Kaplanmış numunelerin yağlı ortamda aşınma davranışları incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Nam, D., Lim, D., Kim, S. D., Seo, D., Shim, S. E., and Baeck, S. H.** 2018. "The fabrication of a conversion film on AZ31 containing carbonate product and evaluation of its corrosion resistance." *Journal of Alloys and Compounds*, 737, 597-602.
- [2] **Chen, D., Wang, R., Huang, Z., Wu, Y., Zhang, Y., Wu, G., ... and Shen, D.** 2018. "Evolution processes of the corrosion behavior and structural characteristics of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31 magnesium alloy." *Applied Surface Science*, 434, 326-335.
- [3] **Nouri, M., and Li, D. Y.** 2017. "Maximizing the benefit of aluminizing to AZ31 alloy by surface nanocrystallization for elevated resistance to wear and corrosive wear." *Tribology International*, 111, 211-219.
- [4] **Fenker, M., Balzer, M., Kappl, H.** 2014. "Corrosion protection with hard coatings on steel: Past approaches and current research efforts", *Surface and Coating Technology*, 257, 182-205.
- [5] **Man, H. C., Zhang, S., Cheng, F. T.** 2007. "Improving the wear resistance of robotic AA6061 by laser surface alloying with NiTi", *Materials Letters*, 61, 4058-4061.
- [6] **Tekin, M.** 2009. "Alüminyum Titanyum Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışına Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [7] **Cöcen, Ü., Belevi, M., Önel, K.** 1997. "Tane silisyum karbür katkılı alüminyum alaşımı bazlı kompozitlerin aşınma davranışı", 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 146-156.
- [8] **Ceylan, İ.** 2006. "Toz Püskürtme Yöntemi ile Boru İç Yüzey Kaplamanın İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [9] **Thirumalaikumarasamy, D., Kamalamoorthy, K. S. and Visvalingam, V. B.** 2015. "Effect of experimental parameters on the micro hardness of plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy." *Journal of Magnesium and Alloys*, 3(3), 237-246.
- [10] **Kubatik, T. F., Pala, Z., Neufuss, K., Vilemova, M., Musalek, R., Stoulil, J., ... and Chraska, T.** 2015. "Metallurgical bond between magnesium AZ91 alloy and aluminium plasma sprayed coatings." *Surface and Coatings Technology*, 282, 163-170.
- [11] **Çelik, İ.** 2016. "Structure and surface properties of Al₂O₃-TiO₂ ceramic coated AZ31 magnesium alloy." *Ceramics International*, 42(12), 13659-13663.
- [12] **Thirumalaikumarasamy, D., Balasubramanian, V., and Sabari, S. S.** 2017. "Prediction and optimization of process variables to maximize the Young's modulus of plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy." *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(1), 133-145.

- [13] **Thirumalaikumarasamy, D., Shanmugam, K., and Balasubramanian, V.** 2014. "Corrosion performance of atmospheric plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy under immersion environment." *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2(4), 403-415.
- [14] **Li, H., Ke, Z., Li, J., Xue, L., and Yan, Y.** 2017. "An effective low-temperature strategy for sealing plasma sprayed Al₂O₃-based coatings." *Journal of the European Ceramic Society*.
- [15] **Babu, P. S., Sen, D., Jyothirmayi, A., Krishna, L. R., and Rao, D. S.** 2018. "Influence of microstructure on the wear and corrosion behavior of detonation sprayed Cr₂O₃-Al₂O₃ and plasma sprayed Cr₂O₃ coatings." *Ceramics International*, 44(2), 2351-2357.
- [16] **Gao, Y., Jie, M., and Liu, Y.** 2017. "Mechanical properties of Al₂O₃ ceramic coatings prepared by plasma spraying on magnesium alloy." *Surface and Coatings Technology*, 315, 214-219.
- [17] **Kubatik, T. F., Lukac, F., Stoulik, J., Ctibor, P., Prusa, F., and Stehlikova, K.** 2017. "Preparation and properties of plasma sprayed NiAl₁₀ and NiAl₄₀ coatings on AZ91 substrate." *Surface and Coatings Technology*, 319, 145-154.
- [18] **Ge, Y., Wang, W., Wang, X., Cui, Z., and Xu, B.** 2013. "Study on laser surface remelting of plasma-sprayed Al-Si/1 wt% nano-Si₃N₄ coating on AZ31B magnesium alloy." *Applied Surface Science*, 273, 122-127.
- [19] **Xu, J., Zou, B., Zhao, S., Hui, Y., Huang, W., Zhou, X., ... and Cao, X.** 2014. "Fabrication and properties of ZrC-ZrB₂/Ni cermet coatings on a magnesium alloy by atmospheric plasma spraying of SHS powders." *Ceramics International*, 40(10), 15537-15544.
- [20] **Zou, B., Tao, S., Huang, W., Khan, Z. S., Fan, X., Gu, L., ... and Cao, X.** 2013. "Synthesis and characterization of in situ TiC-TiB₂ composite coatings by reactive plasma spraying on a magnesium alloy." *Applied Surface Science*, 264, 879-885.
- [21] **Li, C., Wang, Y., Wang, S., and Guo, L.** 2010. "Laser surface remelting of plasma-sprayed nanostructured Al₂O₃-13 wt% TiO₂ coatings on magnesium alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 503(1), 127-132.
- [22] **Şık, A.,** 2002. "Otomobil saclarının MIG/MAG kaynağında gaz karışımlarının bağlantının mekanik özelliklerine etkisi", *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 38-46.
- [23] **Zeytin, H. K.** 1999; *Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği*, Marmara Araştırma Merkezi, Gebze Kocaeli.
- [24] **Buldum, B.,** 2013. "AZ91 Magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin incelenmesi", *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 12-19.
- [25] **Buldum, B., şık, A., Özkul, İ.,** 2012 "Investigation of magnesium alloys machinability" *International Journal of Electronics Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2 (3): 261-268.
- [26] **Kimura, K., Nishii, K., Kawarada, M.,** 2002 "Recycling magnesium alloy housings for notebook computers", *Fujitsu Science Technology Journal*, 38 (1): 102-111.

- [27] **Gürgeç T.** 2017 “AISI 1020 çeliğinin plazma transfer ark yöntemi ile alaşımlandırılmasında bor katkısının yüzey özellikleri üzerine etkisi”, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 40-53.
- [28] **Gür, A.K.**, 2009. Plazma (PTA) yöntemiyle düşük karbonlu çeliğin yüzey modifikasyonuna koruyucu gazların etkisi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [29] **Selçuk, N.**, 2014. Toprak işleme tarım makinelerinde kullanılan 5630 kalite çeliğinin aşınma direncinin değişik yüzey prosesleri ile iyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [30] **Avcı, A.**, 2003 “Benzinli Motorlarda Lpg Kullanımının Supaplar Üzerindeki Isıl Etkisinin İncelenmesi”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 8 (1): 165-172.
- [31] **Ulutan, M.**, 2007 “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 26-63.
- [32] **Bhushan, B** 2001., “Modern Tribology Handbook”, CRC Press LLC, 13:1-18, 7:1-28.
- [33] **Kreith, F. and Goswami, D. Y** 2005., “The CRC Handbook Of Mechanical Engineering Second Edition”, CRC Press LLC, 2619: 129-137.
- [34] **Çakan, A.**, 2006 “AISI 1070 Çeliğinden Üretilen İşlemsiz, Yüzey İşlemli Ve Sert Yüzey Kaplamalı Kesici Takımların Mekanik Özelliklerinin, Mikroyapı Ve Kesme Performanslarının İncelenmesi”, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 125.
- [35] **Liu, D. M., Yang, Q. and Troczynski, T.**, 2002 “Sol-gel Hydroxyapatite Coatings On Stainless Steel Substrates”, *Biomaterials*, 23: 691-698.
- [36] **Apay S.**, 2013 “farklı yöntemler ile stellite kaplanan yapı çeliğinin mikroyapı ve aşınma özelliklerinin incelenmesi” Temmuz Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, Ankara.
- [37] **Bhushan, B** 2001., “Modern Tribology Handbook”, CRC Press LLC, 13:1-18, 7:1-28.
- [38] **Schwartz, M.**, 2002 “Encyclopedia Of Materials, Parts, And Finishes 2nd ed.”, CRC Press LLC, 895.
- [39] **Gonzalez, R., Cadenas, M., Fernandez, R., Cortizo, J.L. and Rodriguez, E.**, 2007 “Wear Behaviour Of Flame Sprayed NiCrBSi Coating Remelted By Flame Or By Laser”, *Wear*, 262 (3-4): 301-307.
- [40] **Salman, S., Köse, R., Urtekin, L. and Findik, F.** 2006, ”An Investigation Of Different Ceramic Coating Thermal Properties”, *Materials and Design*, 27: 585-590.
- [41] **Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W.**, 2000 “Engineering Tribology (2nd ed.)”, Publisher Butterworth Heinemann, 769: 430-440.
- [42] **Buytoz, S.**, 2004 “AISI 4340 Çeliğinin Nitrürasyon ve GTA Kaynak Yöntemi İle Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışlarının Araştırılması”, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 190.

- [43] **Stokes, J.**, 2003 “Production Of Coated And Free-Standing Engineering Components Using The HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Thermal Spray Process,” PhD thesis, Dublin University, 256: 1-31.
- [44] **Stokes, J.** 2006., “The Theory And Application Of The HVOF Thermal Spray Process”, Publisher Dublin University, 204.
- [45] **Oerlikon** 2012, “Tozaltı ve Elektrocüruf Bant Kaplama Yöntemleri”, Hızlı Sert Dolgu Kaynak Yöntemleri, Oerlikon Yayınları, Ankara 12-14.
- [46] **Candan, Ş.**, 2002 “Çelik Yüzeylerin Silikon Temelli RF Plazma Filmler İle Kaplanması”, Mühendis ve Makine, 43 (512): 142-147.
- [47] **Arabacı, U.**, 2009 “Supap Yüzeylerinin TIG Kaynak Yöntemi İle Kaplanması ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 48-63.
- [48] **Büyükkaya, E.**, 1997 “Termal Bariyer Kaplamanın Turbo doldurmalı Bir Dizel Motorunun Egsoz Emisyonlarına Etkileri”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 8-10.
- [49] **Aydınlı, N.**, 2008 “Plazma Sprey Kaplamada Olivinin Değerlendirilmesi ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 30-31.
- [50] **Aydınlı, N.**, 2008 “Plazma Sprey Kaplamada Olivinin Değerlendirilmesi ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 30-31.
- [51] **Kaya, A. Ö.**, 2007 “Plazma Püskürtme ve HVOF Yöntemleri Kullanılarak, Cr₃C₂-NiCr(75/25) ve CrNiBSi+%80 WC-Co Tozlarıyla Kaplanan Çeliğin Yapısı ve Yüzey Özellikleri”, Yüksek lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 28-31.
- [52] **S. Kar, P. P. Bandyopadhyay, S. Paul** 2018: Effect of arc-current and spray distance on elastic modulus and fracture toughness of plasma-sprayed chromium oxide coatings, Friction 6), No. 4, pp. 387 – 394, DOI: 10.1007/s40544-017-0166-6.
- [53] **Sert Y., Toplan N.** 2012 “tribological behavior of a plasma-sprayed Al₂O₃-TiO₂-Cr₂O₃ coating.” Sakarya University, Department of Metallurgical and Materials Engineering Sakarya, Turkey.
- [54] **H. Luo, P. Song, A. Khan, J. Feng, J.J. Zang, X.P. Xiong, J.G. Lü, J.S. Lu** 2017 “Alternant phase distribution and wear mechanical properties of an Al₂O₃-40 wt%TiO₂ composite coating” Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology Kunming, China.
- [55] **Özel, C., Gürgeç, T.**, 2018“ Effect of heat input on microstructure, wear and friction behavior of (wt.-%) 50FeCrC-20FeW-30FeB coating on AISI 1020 produced by using PTA welding” Fırat University Turkish Journal of Science & Technology.

ÖZGEÇMİŞ

24.12.1981 tarihinde Diyarbakır' da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Diyarbakır' da tamamladım. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Öğretmenliği lisans eğitimine başladım. 2006 yılında bu bölümden mezun oldum. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne Mühendislik Tamamlama ile başladım ve 2014 yılında mezun oldum. 2014 yılından itibaren de M.E.B.'nda Makine Teknolojisi ve Makine Kalıp Öğretmeni olarak görev yapmaktayım.

