

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

**SAF MAGNEZYUMUN MİKRO ARK OKSİDASYONDA DEĞİŞEN ELEKTROLİT
BİLEŞİMİNİN VE İŞLEM SÜRESİNİN KAPLAMALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE
VE AŞINMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve SÖĞÜT

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aysun AYDAY

Aralık 2021

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

**SAF MAGNEZYUMUN MİKRO ARK OKSİDASYONDA DEĞİŞEN ELEKTROLİT
BİLEŞİMİNİN VE İŞLEM SÜRESİNİN KAPLAMALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE
VE AŞINMA DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve SÖĞÜT

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 21.12.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile
kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

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

MERVE SÖĞÜT

21.01.2022

TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim boyunca, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, birlikte gerçekleştirmiş olduğumuz tüm çalışmalarda konu her ne olursa olsun benden desteğini hiç esirgemeyen, tezin araştırma, planlama ve yazılma süreçleri boyunca bana hep destek çıkan, karşılaştığım tüm problemlerde bana anlayış gösteren, akademik başarısı ile kendime örnek aldığım ve benim için çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Aysun AYDAY'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca laboratuvar çalışmalarım için bana her türlü yardımda bulunan biricik hocalarım Sayın Doç. Dr. Tuba YENER ve Sayın Arş. Gör. Dr. Derya KIRSEVER'e, herhangi bir problemle karşılaştığımda hep yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Hasan ALGÜL'e ve Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü tüm laboratuvar çalışanlarına bütün destek ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek mühendis ünvanını alma sürecimde bugüne kadar bilgi birikimleri ve bütün emekleri ile benim buraya kadar gelmemi sağlayan tüm Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü hocalarıma bir teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan, beni yetiştirip bugünlere kadar getiren canım annem Sevim SÖĞÜT, babam Nizamettin SÖĞÜT ve ablam Gamze SÖĞÜT ERGÜZELOĞLU'ya tüm fedâkarlıkları için sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak bu süreç boyunca bana hep destek olan ve hiçbir sorumu karşılıksız bırakmayan Ahmet Buğra KEYVANKLI ve Mustafa Cihan EROL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. Magnezyum (Mg)	3
2.2. Magnezyum Alaşımları.....	6
2.2.1. Magnezyum alaşımlarının sınıflandırılması	7
2.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	10
2.3.1. Otomotiv sektöründe magnezyum	10
2.3.2. Havacılık sektöründe magnezyum.....	11
2.3.3. Biyomalzeme sektöründe magnezyum	12
BÖLÜM 3.	
MİKRO ARK OKSİDASYON PROSESİ.....	15
3.1. Mikro Ark Oksidasyon Tekniğinin Tarihsel Gelişimi	15
3.2. Mikro Ark Oksidasyon Düzenegi Ve Proses	16
3.3. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulandığı Alanlar.....	18
3.4. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantajları Ve Dezavantajları ..	20

BÖLÜM 4.

AŞINMA	22
4.1. Aşınma Türleri	23
4.1.1. Adhesif aşınma	23
4.1.2. Abrazif aşınma	24
4.1.3. Yorulma aşınması	24
4.1.4. Korozyon aşınması	25

BÖLÜM 5.

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MİKRO ARK OKSİDASYONU	26
--	----

BÖLÜM 6. 32

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
6.1. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi	32
6.2. Yüzey Karakterizasyonu	34
6.3. Sertlik Ölçümleri.....	34
6.4. Aşınma Deneyleri	35

BÖLÜM 7. 38

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	38
7.1. Mikro Yüzey İncelemeleri	38
7.2. EDS Analizleri	42
7.3. XRD Analizleri	47
7.4. Sertlik Sonuçları.....	48
7.5. Aşınma Analizi Sonuçları	49
7.5.1. Aşınma hızı	53
7.5.2. Aşınma izlerine ait taramalı elektron mikroskop görüntüleri....	55

BÖLÜM 8.

SONUÇLAR	59
----------------	----

BÖLÜM 9.	
ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	66



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

°C	: Derece Santigrat
μ	: Mikron
μ	: Ortalama Sürtünme Katsayısı
μm	: Mikrometre
μs	: Mikrosaniye
Ω	: Ohm
2θ	: 2 Deta Açısı
A	: Amper
Ag	: Gümüş
AgNO ₃	: Gümüş Nitrat
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alümina
As	: Arsenik
ASTM	: Amerika Malzeme Test Derneği
Be	: Berilyum
Bi	: Bizmut
Ca	: Kalsiyum
cal	: Kalori
(CaMg)(CO ₃) ₂	: Dolomit
Cd	: Kadmiyum
Ce	: Seryum
cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
CO ₂	: Karbon Dioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır

CuK_α	: Bakır Işın Demeti
DIN	: Deutsches Institut für Normung
dk	: Dakika
dm	: Desimetre
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
Fe	: Demir
g	: Gram
GPa	: Gigapaskal
HB	: Brinell
HV	: Vickers
HSP	: Hekzagonal Sıkı Paket
KF	: Potasyum Florür
kg	: Kilogram
kg-f	: Kilogram-kuvvet
$\text{K}_2\text{MgCl}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	: Karnolit
KOH	: Potasyum Hidroksit
kV	: Kilovolt
kW	: Kilowatt
L	: Litre
Li	: Lityum
m	: Metre
mA	: Miliamper
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
mg	: Miligram
Mg	: Magnezyum
MgCO_3	: Magnezit
$\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$	: Dolomit
Mn	: Manganez
MgO	: Magnezyum Oksit
$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: Serpantin
Mg_2SiO_4	: Forsterit
mm	: Milimetre

Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
mV	: Milivolt
MW	: Megawatt
N	: Newton
Na	: Sodyum
NaCl	: Sodyum Klorür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na ₃ PO ₄	: Tri Sodyum Fosfat
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
Nd	: Neodimyum
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
Re	: Renyum
s	: Saniye
SCE	: Doygun Kalomel Elektrot
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
t	: Voltaj Uygulanma Süresi
Th	: Toryum
TiO ₂	: Titanyum Oksit
V	: Voltaj
Y	: İttriyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
XRD	: X-ışınları Difraksiyonu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kaplama düzeneğinin şematik görüntüsü	17
Şekil 5.1. Mikro ark oksidasyon işleminde uygulanan süreye göre deşarj kanallarında meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları	27
Şekil 5.2. Değişik elektrolitler kullanılarak üretilen kaplamalardaki taramalı elektron mikroskop görüntüleri	29
Şekil 6.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihaz görüntüsü	34
Şekil 6.2. Sertlik testlerinin gerçekleştirilmiş olduğu cihaz	35
Şekil 6.3. Aşınma test cihazı	36
Şekil 6.4. Aşınma sonrası oluşan izin şematik görünümü	37
Şekil 7.1. Kaplama işlemi sonrasında X100 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1)-5, (b) (M-Si-2)-5, (c) (M-Si-3)-5, (d) (M-Si-1)-10, (e) (M-Si-1)-15	39
Şekil 7.2. Kaplama işlemi sonrasında X1000 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1)-5, (b) (M-Si-2)-5, (c) (M-Si-3)-5, (d) (M-Si-1)-10, (e) (M-Si-1)-15	40
Şekil 7.3. Kaplama işlemi sonrasında X100 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1-Ag)-1, (b) (M-Si-1-Ag)-2, (c) (M-Si-1-Ag)-4, (d) (M-Si-1-TiO ₂)-5	41
Şekil 7.4. Kaplama işlemi sonrasında X1000 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1-Ag)-1, (b) (M-Si-1-Ag)-2, (c) (M-Si-1-Ag)-4, (d) (M-Si-1-TiO ₂)-5	41
Şekil 7.5. (M-Si-1)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	42
Şekil 7.6. (M-Si-2)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	43

Şekil 7.7. (M-Si-3)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	43
Şekil 7.8. (M-Si-1)-10 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	44
Şekil 7.9. (M-Si-1)-15 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS Analizi	44
Şekil 7.10. (M-Si-1-Ag)-1 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	45
Şekil 7.11. (M-Si-1-Ag)-2 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	45
Şekil 7.12. (M-Si-1-Ag)-4 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi	46
Şekil 7.13. (M-Si-1-Ti)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS Analizi	47
Şekil 7.14. Saf Mg, (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10, (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin X-ışını difraksiyon paterni	48
Şekil 7.15. M-Si-1, M-Si-2, M-Si-3 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler	51
Şekil 7.16. Saf magnezyum ve M-Si-1, M-Si-2, M-Si-3, M-Si-10, M-Si-15 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler	51
Şekil 7.17. Saf magnezyum ve (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler	52
Şekil 7.18. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4, (M-Si-1-TiO ₂)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler	53
Şekil 7.19. Saf magnezyum ve M-Si-1, M-Si-2, M-Si-3, M-Si-10, M-Si-15 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler	54

Şekil 7.20. Saf magnezyum ve (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler	54
Şekil 7.21. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4, (M-Si-1-TiO ₂)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler	55
Şekil 7.22. (a-b) Saf magnezyum ve (c-d) M-Si-1, (e-f) M-Si-2, (g-h) M-Si-3 kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları.....	56
Şekil 7.23. (a-b) Saf magnezyum ve (c-d) (M-Si-1)-5, (e-f) (M-Si-1)-10, (g-h) (M-Si-1) 15, kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları.....	57
Şekil 7.24. (a)(b) (M-Si-1-Ag)-1, (c)(d) (M-Si-1-Ag)-2, (e)(f) (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları.....	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Saf magnezyum elementinin birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri	4
Tablo 2.2. Magnezyum alaşım elementlerine karşılık gelen harf sembolleri	8
Tablo 2.3. Magnezyum alaşımları, standartları ve bileşim değerleri	9
Tablo 2.4. İmplant sektöründe kullanılan farklı malzeme gruplarının birtakım fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal kemiğin özellikleri ile karşılaştırılması	13
Tablo 6.1. MAO kaplama işlemi parametreleri	33
Tablo 7.1. Saf magnezyum ve M-Si-1, M-Si-3 ile (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin sertlik ölçüm değerleri	49
Tablo 7.2. Aşınma deneyi sonrasında numuneler için hesaplanan aşınma alanı ile hacmi değerleri	50

ÖZET

Anahtar kelimeler: Aşınma dayanımı, Mikro Ark Oksidasyon, Elektrolit bileşimi, Kaplama süresi, Yüzey özellikleri

Bu çalışmada, Mikro Ark Oksidasyon yüzey teknolojisi kullanılarak değişen elektrolit bileşimi ve oksidasyon süresinin saf magnezyum metali ve kaplanmış numunelerin aşınma dayanımı ve yapısal özellikleri üzerinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmiştir. Kaplama prosesinin tamamlanmasının ardından kaplanmış numunelerin karakterizasyon çalışmaları, mikro yapı incelemeleri, tabaka sertliği ölçümleri ve aşınma özellikleri ile ilgili ölçümler detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.

Oksidasyon süresi ve elektrolit içerisinde yer alan Na_2SiO_3 miktarı değiştirilerek kaplama işlemi yapılmıştır. Buna ek olarak kaplanmış olan numunelere belirli bileşim değerlerinde gümüş ve titanyum ilave edilerek katkılarının kaplama özelliklerinde meydana getirdiği sonuçlar değerlendirilmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre, değişen Na_2SiO_3 , AgNO_3 elektrolit bileşimleri ve oksidasyon süresi ile birlikte kaplama numunelerinin yüzey ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş, artan Na_2SiO_3 ve AgNO_3 miktarı ile birlikte sertlik ve buna bağlı olarak aşınma dayanımı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Artan oksidasyon süresi de kaplama tabakalarının kalınlık değerlerinde artışa sebep olarak numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırmış ve daha homojen bir mikro yapı görünümü elde edilmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PURE MAGNESIUM CHANGING ELECTROLYTE COMPOSITION AND PROCESSING TIME ON THE SURFACE PROPERTIES AND WEAR RESISTANCE OF COATINGS IN MICRO ARC OXIDATION

SUMMARY

Keywords: Abrasion resistance, Micro Arc Oxidation, Electrolyte composition, Coating time, Surface properties

In this study, the effects of changing electrolyte composition and oxidation time on the wear resistance and structural properties of pure magnesium metal and coated samples using Micro Arc Oxidation surface technology were investigated. After the coating process was completed, the characterization studies, microstructure studies, layer hardness measurements and wear properties of the coated samples were carried out in detail.

The coating process was carried out by changing the oxidation time and the amount of Na_2SiO_3 in the electrolyte. In addition, silver and titanium at certain composition values were added to the coated samples the results of the additives on the coating properties were evaluated.

According to the results of the research, the surface and mechanical properties of the coating samples were improved with the changing Na_2SiO_3 , AgNO_3 electrolyte compositions and oxidation time, and an increase was observed in the hardness and accordingly wear resistance values with the increasing Na_2SiO_3 and AgNO_3 content. Increasing oxidation time also caused an increase in the thickness values of the coating layers, increasing the surface roughness values of the samples and a more homogeneous microstructure appearance was obtained.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Magnezyum ve çeşitli alaşımları, sahip oldukları üstün özelliklerin onlara kazandırdığı çok sayıda avantaj sayesinde, geçmişten günümüze kadar uzanan süreçte birçok sektörde son derece yaygın olarak kullanılan bir malzeme grubu haline gelmiştir. Magnezyum alaşımlarının bu noktaya ulaşmasında ona katkı sağlayan ve en ön plana çıkaran özellikleri; yoğunluk değerinin son derece düşük olmasının beraberinde getirdiği hafiflik, yüksek özgül dayanım değeri, biyouyumluluk özelliği, iyi dökülebilirlik ve işlenebilirlik ile ses absorbe etme özelliklerinin yüksek olması şeklinde ifade edilebilir. Bunların yanı sıra bünyelerinde barındırdıkları daha birçok çeşitli özellikten dolayı havacılık endüstrisi, otomotiv sektörü, biyomedikal uygulama alanları, savunma sanayi vb. çeşitli üretim sektörlerinde kullanılmaktadır.

Mikro ark oksidasyon kaplama tekniğinin tarihsel gelişme süreci Sovyetler Birliği'nin gerçekleştirmiş olduğu çalışmalardan başlayarak, bu çalışmaların ardından 1970'li yıllarda Amerika'da yapılan keşifler ile birlikte devam ettirilmiştir. 1980'li yıllara gelindiğinde de artık tüm bilim dünyası tarafından tanınır bir yöntem haline dönüşmüştür. Kaplama yöntemi farklı bileşimlere sahip elektrolitlerden oluşan bir kaplama banyosu içerisinde sistemin gerektirdiği prensiplere dayalı olarak çalışan, malzeme yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirme amaçlı uygulanan bir yüzey prosesidir. Bu yöntem ile birlikte, kaplama işlemi gerçekleştirilen malzemede gözenekli, dayanım değerleri yüksek ve kaplama malzemesine kuvvetli bir şekilde yapışma sağlayan bir seramik oksit tabakası meydana gelir.

Magnezyum metali ve alaşımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için birçok farklı yüzey kaplama teknolojisi mevcuttur. Mikro ark oksidasyon yöntemi

sağlamış olduğu birden fazla avantaj sayesinde son yıllar içerisinde kullanımı giderek artan bir yüzey teknolojisi haline gelmiştir.

Bu çalışmada farklı işlem parametrelerinin mikro ark oksidasyonla kaplanmış magnezyum numunelerinin yüzey ve aşınma özelliklerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. İşlem 310V, 330V ve 390V voltaj değerlerinde farklı bileşimlerde Na_2SiO_3 , Na_3PO_4 , AgNO_3 ve TiO_2 ’den oluşan elektrolitlerde 5, 10 ve 15 dakika sürelerde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında aşınma özelliklerini belirlemek amacıyla aşınma deneyleri yapılmış ve çözelti parametreleri ile işlem şartları değiştirildiğinde kaplama tabakasında meydana gelen değişimler ortaya konulmuştur.



BÖLÜM 2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Magnezyum (Mg)

Günümüzde özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe ağırlık azaltma amacı ile düşük ağırlıklı ve yüksek dayanımlı malzeme üretimi için yapılan çalışmalar artış göstermektedir ve özellikle magnezyum ve alaşımları bu konuda bir ilgi odağı haline gelmiştir [1].

Yapı malzemeleri alanında son derece düşük yoğunluğu ile ilk sırada yer alan metalik karakterli magnezyum elementi, yerkabuğunda mineral şeklinde ve denizlerde çözelti olarak geniş bir alanda dağılım gösteren, doğada en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir [2].

Yerkabuğundaki minerallerin yaklaşık %3'ü magnezyum ihtiva eder. Doğada saf olarak bulunamadığı için magnezit ($MgCO_3$) ve dolomit ($MgCO_3.CaCO_3$) başlıca magnezyum kaynaklarıdır. Ayrıca en büyük magnezyum kaynağı deniz suyudur [3-4].

Günümüzde aktif olarak kullanılan tüm yapısal malzemeler içerisinde sahip olduğu 1.74 g/cm^3 yoğunluk değeri sayesinde alüminyum metaline kıyasla %33, çelik ile karşılaştırıldığında ise %75 oranında bir hafiflik sergilemektedir [4-5].

Hafiflik avantajı ve mekanik özellikleri sayesinde çeşitli birçok sektörde kendisine geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmuştur [4].

Magnezyum metali hava ile etkileşime girdiği zaman kolay bir şekilde oksitlenme özelliğine sahiptir. Bu oksitlenme sonucunda metal yüzeyinde mat bir renge sahip

seramik karakterli bir oksit filmi meydana gelir. Bu oksit filmi 500°C civarı bir sıcaklık değerinin üzerine çıkılmaya başlandığı zaman yüzeyde bulunan seramik karakterli bileşik, oluşan ark etkisi ile parlak bir alev görüntüsü alarak magnezyum oksit (MgO) bileşiği haline gelir. Magnezyum metali oksijene karşı olan yüksek afinitesi ve oksijen ile bir araya gelerek meydana getirdiği bu oksit tabakasının 2800°C gibi oldukça yüksek bir sıcaklığa kadar kararlılığını koruyabilmesi sebebi ile refrakter malzeme sektöründe kendisine önemli bir yer edinmiştir [2].

Magnezyum doğada saf halde yer aldığı oksijene karşı olan yüksek ilgisinden dolayı oksijen ile hızlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girer ve bileşik oluşturur. Bu özellikleri sebebi ile magnezyum elementine doğada saf halde rastlamak mümkün değildir. Magnezyum metalinin elde edilmesinde magnezit (MgCO_3), karnolit ($\text{K}_2\text{MgCl}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) veya dolomit ($(\text{CaMg})(\text{CO}_3)_2$) ve bunların yanı sıra serpantin ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cevherlerinden yararlanılmaktadır. Üretimde kullanılan bu cevherlere iki farklı yöntem uygulanarak magnezyum metalinin eldesi gerçekleştirilmektedir. Uygulanan yöntemlerden ilki klorür tuzlarının elektroliz işlemini kapsamaktadır. İkinci üretim yöntemi ise dolomit ve magnezit cevherlerinin termal redüksiyonu ile magnezyum üretimini belirtmektedir [6].

Saf magnezyum elementinin sahip olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerin bir bölümü aşağıda yer alan Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Saf magnezyum elementinin birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri [2,6].

Özellikler	Değeri
Atom Numarası	12
Atom Kütlesi	24.3 g/mol
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1.74 g/cm ³
Ergime Noktası	651°C
Kaynama Noktası	1110°C
Kaynama Gizli Isısı	46.5 cal/°C
Termal İletkenlik (20°C'de)	0.038 cal/cm.s.°C
Lineer Genleşme Katsayısı (25°C'de)	26x10 ⁻⁶
Elektrik Direnci (20°C'de)	4.5 x 10 ⁻⁶ μΩ.m
Elektrik İletkenliği (Cu=100)	36.5 ohm.cm

Tablo 2.1. (Devamı).

Özellikler	Değeri
Young Modülü	4570 kg-f/mm ²
Sertlik	30-47 HB
Kristal Kafes Yapısı	Hekzagonal Sıkı Paket (HSP)

Magnezyum elementi ve alaşımlarının sahip oldukları çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler birtakım avantaj ve dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu avantajlara bakılacak olursa kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Yapısal metalik malzemeler ele alındığında bu grup içerisinde en düşük yoğunluk değeri gösteren malzeme grubudur.
- Sergilemiş oldukları özgül dayanım (dayanım/yoğunluk) değeri oldukça yüksektir.
- Kontrollü atmosfer ortamı şartları sağlandığında kaynak yapılabilirlikleri iyidir.
- Dökülebilirlik ve işlenebilirlik özellikleri iyidir.
- İyi biyouyumluluk özelliği gösterirler.
- Ses absorpsiyon özellikleri iyidir.

Yukarıda bahsedilen çeşitli avantajların yanı sıra sahip oldukları birtakım dezavantajlar ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Elastisite modülü değerleri düşüktür.
- Sertlik değerleri düşüktür ve soğuk işlenebilirlik özellikleri sınırlıdır.
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanım değerleri düşüktür ve yüksek sıcaklık değerlerinde düşük sürünme sergilerler.
- Katılaşma işlemi esnasında çekme oranı oldukça yüksektir.
- Kimyasal reaksiyona girme kabiliyeti son derece yüksektir.
- Korozyon ortamlara karşı düşük direnç sergilerler ve aşınma dayanımı değerleri düşüktür [7-17].

2.2. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum metalinin kimyasal reaktifliğinin yüksek olması magnezyumun mühendislik uygulamalarında saf hali ile kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu dezavantajına rağmen elektrokimyasal açıdan geri dönüştürülebilirliğe imkân sağlaması, beraberinde getirmiş olduğu maliyet üstünlüğü ve düşük yoğunluğu sebebi ile günümüzde endüstri alanında önemi son derece yüksek bir malzeme konumunda yer almaktadır.

Uygulanan çeşitli alaşımlandırma işlemleri sayesinde özel uygulamalar için kullanılabilir duruma getirilen magnezyum alaşımları, sahip oldukları yüksek özgül dayanım avantajı ile havacılık ve taşıma sektörü gibi hafifliğin son derece ön planda olduğu alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Fakat düşük değerlerde korozyon özellikleri sergilediklerinden dolayı bu alaşımların uygulama alanları kısıtlanmaktadır [2].

Magnezyum alaşımları bünyelerinde safsızlık bulundurdıkları veya klor iyonu içeren ortamlar içerisinde yer aldıklarında korozif dayanım bakımından son derece zayıf hâle gelirler. Fakat yüzeylerinde meydana getirdikleri koruyucu özellik gösteren oksit karakterli film tabakası sayesinde atmosferik korozyona karşı oldukça dayanıklı hâle dönüşebilmektedirler [6].

Bu elemente ait alaşımlar sergilemiş oldukları mekanik özellikler ile önem kazanmaktadır. Alaşımlar 160 ile 300 N/mm^2 değerleri arasında bir çekme mukavemeti, 80 ile 190 N/mm^2 değerleri arasında değişen bir akma mukavemeti ve %2 ila %15 değerleri arasında bir kopma uzaması özelliği göstermektedir. Göstermiş oldukları bu özelliklerden dolayı magnezyum elementinin birçok farklı uygulama alanında kullanılmasına imkân sağlayan en çok göze çarpan alaşım grupları magnezyum ve alüminyum, magnezyum ve çinko, magnezyum ve nadir toprak elementlerinden oluşan ikili gruplar olarak sınıflandırılabilir. Yüksek sıcaklığın ön planda tutulduğu uygulama alanlarında yeni geliştirilmeye başlanan alaşımlar için nadir toprak elementleri tercih edilmektedir [2].

Magnezyum alaşımları, üretilmiş olduğu yöntem göz önünde bulundurulduğunda kendi içerisinde döküm ve dövme alaşımları şeklinde iki alt grup olarak sınıflandırılmaktadır. İlk alt grup olan döküm alaşımları incelendiğinde kum ve kokil kalıba döküm ürünleri, ikinci alt grup olan dövme alaşımları incelendiğinde ise şerit, plaka, ekstrüzyon ürünleri ve dövme alaşımları şeklinde gruplandırılabilir. Döküm ve dövme alaşımları kıyaslandığında dövme yöntemi ile üretilen alaşımların döküm yöntemi ile üretilen alaşımlara kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilediği ön plana çıkmaktadır [4].

2.2.1. Magnezyum alaşımlarının sınıflandırılması

Magnezyum alaşımlarının sınıflandırılmasında Amerikan topluluğu tarafından malzemelerin test edilmesi için oluşturulmuş standartlardan meydana gelen ve kısaca “ASTM” olarak adlandırılan bir sistem kullanılmaktadır. Bu sistem farklı malzeme gruplarını ayırt edebilmek için çeşitli kodlamalardan meydana gelmektedir ve magnezyum esaslı alaşımlar için ASTM A275 standardı kullanılmaktadır [2].

Sınıflandırmanın nasıl yapıldığına bakılacak olursa çoğunlukla iki tane büyük harf ve bunların ardından iki veya üç adet rakamdan meydana gelmektedir. Sınıflandırmada kullanılan harfler ana alaşım elementlerinin neler olduğu hakkında bilgi verirken; kullanılan ilk harf konsantrasyonu yüksek olan elementi, kullanılan ikinci harf de konsantrasyonu düşük olan elementi ifade etmektedir. Harflerin devamında gelen rakamlardan ilki birinci elementin ağırlıkça yüzde değerini, rakamlardan diğeri de ikinci elementin ağırlıkça yüzde değerini temsil etmektedir. Ayrıca standart gösteriminde rakamların ardında A, B gibi harfler yer alıyorsa bu harfler çoğunlukla safsızlık olarak adlandırılacak değerlerdeki bir element için modifikasyonu temsil etmektedir [5].

Tablo 2.2.’de en çok kullanılan magnezyum alaşım elementlerinin ASTM standartlarına göre isimlendirilmiş kısaltmaları yer almaktadır.

Tablo 2.2. Magnezyum alaşım elementlerine karşılık gelen harf sembolleri [1].

Element	Harf Sembolü
Alüminyum (Al)	A
Bizmut (Bi)	B
Bakır (Cu)	C
Kadmiyum (Cd)	D
Nadir Toprak Elementleri	E
Demir (Fe)	F
Toryum (Th)	H
Zirkonyum (Zr)	K
Berilyum (Be)	L
Manganez (Mn)	M
Nikel (Ni)	N
Kurşun (Pb)	P
Arsenik (As)	Q
Krom (Cr)	R
Silisyum (Si)	S
Kalay (Sn)	T
Çinko (Zn)	Z

ASTM standartlarına uygun şekilde isimlendirilen magnezyum alaşımına bir örnekle şekil etmesi için AZ91 alaşımı seşilerek açıklaması yapılmıştır. Bu doğrultuda alaşımda yer alan A harfi, alüminyum elementini yani magnezyum elementinden sonra alaşım içerisinde konsantrasyon bakımından en çok yer alan metali göstermektedir. Alaşımda yer alan Z harfi de, çinko elementini yani konsantrasyon bakımından en çok bulunan ikinci metali göstermektedir. Rakamlar incelenecek olursa; 9 rakamı alaşım içerisinde yer alan alüminyum oranının ağırlıkça yaklaşık olarak %8,6 ile %9,4 değerleri arasında yer alacağına, 1 rakamı da alaşımda yer alan çinko oranının ağırlıkça yaklaşık olarak %0,6 ile %1,2 değerleri arasında yer alacağına işaret etmektedir [6].

Aşağıda yer alan Tablo 2.3.'de ASTM B93/B93M ve ASTM B94 sınıflandırması kapsamında magnezyum alaşımlarına ait standartlar ve bileşim değerleri yer almaktadır.

Tablo 2.3. Magnezyum alaşımları, standartları ve bileşim değerleri [2].

Alaşım Elementi	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	1,9-2,5	3,7-4,8	2,5-3,5	7,8-9,2	8,5-9,5	0,05
Zn	0,2	0,2	0,15-	0,1	0,7-1,3	0,2-0,8	0,45-	1,0-1,5
Mn	0,28-	0,26-	0,2	0,35-	0,2	0,15-	0,17-	0,1
Si(max)	0,05	0,05	0,70-	0,60-	0,05	0,1	0,05	0,05
Fe(max)	0,004	0,004	0,004	0,0035	0,005	0,05	0,004	0,03
Cu	0,008	0,008	0,008	0,015	0,05	0,05	0,025	0,025
Ni(max)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005	0,001	0,005
Be	-	-	-	-	-	0,002	-	0,002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0,12-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-
Diğer	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

Döküm ve dövme alaşımları adı altında iki gruba ayrılan magnezyum alaşımlarından döküm yöntemi ile elde edilen alaşımlara bakıldığında zirkonyum elementi ihtiva eden ve etmeyen alaşımlar olarak iki ayrı grupta sınıflandırma yapılmaktadır. Zirkonyum elementi bulundurmeyen grup Mg-Al ikilisinden meydana gelen alaşımlar ve Mg-Zn-Cu elementlerinin meydana getirdiği alaşımlardan oluşmaktadır.

Bünyesinde zirkonyum elementi bulunduran grup ise daha çeşitli alaşım grupları oluşturmakta olup bunlar; Mg-Zn-Zr, Mg-Re-Zn-Zr, Mg-Th, Mg-Ag-Re ve Mg-Y-(Nd) element gruplarının meydana getirdiği alaşımlardan meydana gelmektedir.

Dövme yöntemi ile elde edilen alaşımlar ise haddeleme yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen plaka, levha ve folyo şeklinde üretilen hadde ürünleri; ekstrüzyon yöntemi kullanılarak elde edilen çubuk, boru ve profil ürünleri ve dövme ürünleri olarak farklı gruplarda yer almaktadır [2].

2.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum metalinin diğer elementlerle bir araya gelerek meydana getirdiği alaşımlar mühendislik uygulamaları açısından en önemli avantajlarından biri olan hafiflikleri sayesinde uzay ve havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde spesifik bir yere sahiptir. Bu alaşımlar sahip oldukları mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde bilgisayar, haberleşme, savunma, biyomalzeme ve elektrik-elektronik gibi daha birçok sektörde tercih edilmektedirler [11,18-20].

2.3.1. Otomotiv sektöründe magnezyum

Son zamanlarda otomotiv üreticileri araçların ağırlığını azaltma, yakıt ekonomisine katkı sağlama, gaz emisyonlarını azaltma ve araçların güvenliğini artırma gibi araç performansını etkileyen konularda çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Karşılaşılan bu sorunlar otomotiv sektöründe magnezyum alaşımlarını ilgi odağı haline getirmiştir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde magnezyum ve alaşımları ağırlık azaltmanın önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Bu tercihin en önemli nedenlerinden biri, magnezyum alaşımlarının hafiflik özelliğinden yararlanılarak araç yükünde meydana getirilebilecek olan azalmanın yakıttan tasarruf edilmesine olanak sağlaması ve akabinde araçların gaz çıkışlarında meydana gelecek olan azalma ile birlikte bu durumdan kaynaklanan hava kirliliğinin de önüne geçilmesine imkân tanınmasıdır [13-15,17,21].

Otomobillerde gözlemlenen yakıt harcamasının %60'lık bir bölümü aracın ağır olması sebebi ile gerçekleşmektedir. Araç yükünün hafifletilmesi direkt olarak yakıt harcamasını ve bunun bir sonucu olarak CO₂ gaz emisyonlarını düşürmektedir. Araç performansını etkileyen daha birçok etkenin yarattığı sorunların giderilmesi noktasında magnezyum alaşımları günden güne artan bir önem kazanmaktadır.

Bu alaşımların otomotiv sektöründe yer aldıkları uygulamalara bakılacak olursa genel olarak; araçta yer alan iç parçaların çoğu, aracın iskeletini ve kaportayı

oluşturan elemanlar, direksiyona bağlı olan bileşenler, jantlar, fren ve debriyaj pedalları gibi daha birçok alanda kullanılmaktadırlar [22].

2.3.2. Havacılık sektöründe magnezyum

1930 yılının başlarından bu yana havacılık sektöründe kullanılacak olan araçların üretiminde yer alan magnezyum metalinin 1950 yılına gelindiğinde artık tamamıyla geniş bir alanda kullanımının gerçekleşmesine adım atılmıştır. İfade edilen bu tarihlerde askeriye'nin kullanmış olduğu uçaklar ile hava araçlarında magnezyum metalinden büyük oranda yararlanılmıştır. Helikopterlerde vites kutularında tercih edilen bu metal uçak sektöründe 1990 yıllarından günümüze doğru kullanımı azalan bir şekilde yerini devam ettirmektedir [5].

Düşük yoğunluk, termal şok dayanımı ve titreşim sönümleme kabiliyeti magnezyumun havacılık sektöründe tercih edilme sebepleri arasında yer alırken, korozyona karşı dayanımının zayıflığı ve kolaylıkla tutuşma özelliği göstermesi sebeplerinden dolayı sektörde kullanımı sınırlanmaktadır. Magnezyum üretiminde tercih edilse dahi saf hali ile mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı havacılık sektörünün beklediği özellikleri karşılaması çok zordur.

Magnezyum metali kimyasal reaktifliğinin yüksek olmasından dolayı, yüzeyinde meydana gelen seramik karakterli bileşiklerden oluşan film tabakası korozyonun olmadığı ortam koşullarında bile yeteri kadar bir koruma gerçekleştirilememektedir. Ancak malzemenin koroziif ortamlara karşı olan dayanımı malzemeye yönelik bir kaplama prosesi seçildiğinde ciddi oranda artış gösterebilmektedir.

Son derece hafif malzemeler olsa da Mg alaşımları korozyon dayanımlarının zayıf olmasından dolayı kendilerine geniş bir uygulama alanı bulamamaktadır. Havacılık sektöründe tercih edilecek alaşımların hem mekanik özellikler hem de korozyon dayanımı bakımından gerek duyulan yüksek performansı aynı anda sağlamaları gerekmektedir. Günümüzde 20 tane standart Mg döküm alaşımı olmasına rağmen bu alaşımlardan modern havacılık sektörünün ihtiyaçlarını karşılayabilecek olanların

son derece az olması bu sektör açısından büyük bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır [20].

2.3.3. Biyomalzeme sektöründe magnezyum

Son yıllarda magnezyum alaşımları sahip oldukları hafiflik ve ağırlık taşıma kapasitesi sayesinde biyomalzeme sektörü adı altında üzerinde yoğun çalışmalar sürdürülen, kendisine bu alanda ciddi bir kullanım potansiyeli yaratan bir malzeme sektörü haline gelmiştir. Özellikle doğal kemiğe benzer mekanik özellikler sergilediği için ortopedik implant malzemeleri alanında büyük ilgi görmüştür [23-25].

Magnezyum zehirleyici özelliği çok düşük olduğu için biyouyumluluk özelliği iyi bir metalik malzemedir. Magnezyum hızlı bir şekilde korozyona uğrayabildiği için vücut içerisinde çözünme tipinde bir reaksiyon gösterir ve çevresinde yer alan hücre dokusu bu magnezyum implantın yerine geçer.

Geleneksel metal esaslı biyomalzemeler kullanılarak elde edilen metalik implantlar vücutta yer alan dokunun iyileşme sürecinin tamamlanmasının ardından ekstra bir cerrahi işlem uygulanarak vücut içerisinden alınma işlemi gerektirir. Bu şekilde gerçekleşen tekrarlı müdahaleler hasta sağlığı açısından kötü bir tablo oluşmasına sebep olmaktadır [2].

Aşağıda yer alan Tablo 2.4.'de implant sektöründe kullanılan farklı malzeme gruplarının birtakım fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal kemiğin özellikleri ile karşılaştırılması yer almaktadır.

Tablo 2.4. İmplant sektöründe kullanılan farklı malzeme gruplarının birtakım fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal kemiğin özellikleri ile karşılaştırılması [5].

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Kemik	Magnezyum	Titanyum Esaslı Alaşımlar	Cr-Co Esaslı Alaşımlar	Paslanmaz Çelik	Sentetik Hidroksiapatit
Özkütle (g/cm^3)	1.8-2.1	1.74-2.0	4.4-4.5	8.3-9.2	7.9-8.1	3.1
Elastik Modül (GPa)	3-20	41-45	110-117	230	189-205	73-117
Akma Mukavemeti (MPa)	130-180	65-100	758-1117	450-1000	170-310	600
Kırılma Tokluğu ($\text{MPa.m}^{1/2}$)	3-6	15-40	55-115	-	50-200	0.7

Tablo 2.4. incelendiğinde, magnezyumun yoğunluk değerinin düşük olmasına ilaveten tabloda yer alan seramik karakterli biyomalzemeler ile kıyaslandığında onlara göre daha üst seviye kırılma tokluğu değeri gösterdiği açıkça görülmektedir. Elastik modül ve akma mukavemeti değerleri diğer metalik malzemeler ile kıyaslandığında da kemiğe daha benzer değerler gösterdiği görülmektedir.

Magnezyum vücut içerisinde çözünebilir ve toksik özelliği oldukça düşüktür, çözülmüş olan magnezyumun vücut içerisinden atılımı gerçekleşir. Bunun yanı sıra magnezyum metalinin kemik gelişimine hızlandırıcı yönde bir etkisi vardır. Alaşımlar vücut içerisine nüfuzunun gerçekleşmesinin ardından 3-12 hafta arasında değişen bir süre içerisinde yeni vücut dokusu oluşmasına katkıda bulunur. Doku bölgesinin iyileşmesi tamamlandıktan sonra ekstra bir cerrahi müdahaleye ihtiyaç duyulmadan çözünme yolu ile vücuttan atılımı gerçekleşir [2].

Bu uygulamalardaki ana sınırlama magnezyum alaşımlarının korozyona karşı dayanıklı olmamalarıdır. Bundan dolayı eğer magnezyum saf halde kullanılırsa vücut

içerisinde oldukça hızlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girerek vücut dokusu daha iyileşmesini tamamlamadan mekaniksel özelliklerini yitirir. Oluşan kimyasal reaksiyon esnasında ani bir gaz çıkışı meydana geldiği için bu olay dokuların hasara uğraması ile sonuçlanır. Ancak saf magnezyum metali uygun yüzey kaplama işlemleri kullanılarak korozyona karşı dayanıklı hale getirilirse biyomalzeme alanında tercih edilebilir [5,26].



BÖLÜM 3. MİKRO ARK OKSİDASYON PROSESİ

3.1. Mikro Ark Oksidasyon Tekniğinin Tarihsel Gelişimi

Mikro ark oksidasyon prosesinin tarihsel gelişim süreci ortalama olarak 50 sene öncesinde Sovyetler Birliği'nden ileri gelmektedir. Proses üretime uyarlanmadan öncesinde, ilk başta yöntem ile ilgili akademi alanında birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve daha sonrasında yıllar içerisinde deniz araçlarında yer alan parçaların üretilmesi ile ilgili uygulamalarda kullanıma sunularak ileri seviye bir yüzey kaplama tekniğine dönüşmüştür. 1970 yıllarına bakıldığında zaman Amerika, 1980 yıllarının sonlarında da bütün dünyaca bilinen bir proses haline gelmiştir. Günümüz araştırmalarına bakıldığında ise hâlâ güncelliğini korumaya devam eden ve üzerinde yoğun çalışmalar sürdürülen bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mikro ark oksidasyon kaplama yöntemini açıklamak adına kullanılan birden fazla teknik adı mevcuttur. Proses adı olarak mikro ark oksidasyon yerine; “anodik kırılcım depolama”, “plazma elektrolitik kaplama”, “mikro ark altında anotlama”, “elektro plazma biriktirme” gibi teknik adları da kullanılabilir [1].

En ön plana çıkan düşük yoğunluk, yüksek mukavemet/ağırlık oranı gibi daha birçok üstün malzeme özelliğini bünyesinde bulundurması sebebi ile kendisine oldukça büyük bir sektörde uygulama alanı yaratan magnezyum metali ile alaşımları, yüksek kimyasal reaktiflik ve düşük aşınma direnci özelliklerinden dolayı bir yüzey kaplama işlemine ihtiyaç duymaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak amacı ile kimyasal buhar biriktirme, plazma püskürtme, fiziksel kaplama ve sol-jel daldırma kaplama tekniği vb. çeşitli yüzey teknolojileri bulunmaktadır [2].

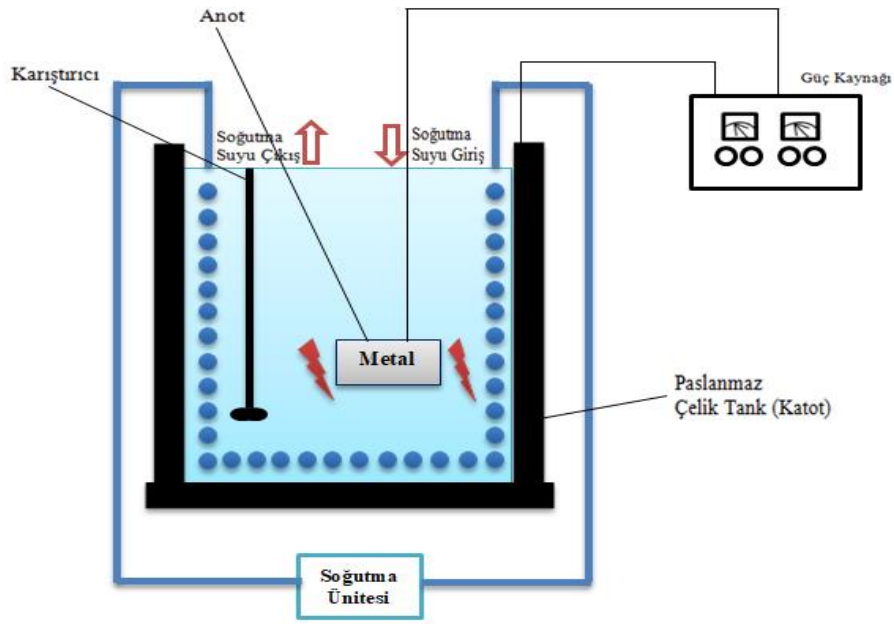
Birçok farklı malzeme grubuna uygulanabilen bu yüzey teknolojileri arasından gelecek vaat ettiği öngörülen bir uygulama olarak karşımıza çıkan mikro ark oksidasyon yöntemi; magnezyum, alüminyum, titanyum vb. düşük yoğunluklu metalik malzemeler ve diğer elementlerle yapmış olduğu alaşımların yüzeylerinde son derece dayanıklı bir koruyucu oksit film tabakası oluşturabilmek için kullanılan bir kaplama yöntemidir [1].

Bu kaplama tekniği sayesinde yüzeyde, altlık olarak kullanılan malzemenin yüzeyine güçlü bağlarla bağlanan seramik karakterli bir koruyucu film tabakası elde edilir ve bunun yanı sıra kaplama işlemi uygulanan malzemenin aşınma ve korozyon dayanımı, sertlik değerleri, termal dayanım şartları vb. daha birçok mekanik özellikler istenilen şartlara bağlı olarak ciddi oranda geliştirilebilir [6].

3.2. Mikro Ark Oksidasyon Düzeneği Ve Proses

Yüzey kaplama tekniklerinden biri olan, plazma elektrolitik oksidasyon olarak da bilinen bu yöntem yüksek voltaj ve elektrokimyasal oksidasyonu birleştirerek alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif alaşımlar üzerinde yoğun, dayanıklı ve korozyona karşı direnç gösteren bir seramik oksit tabakası oluşturmak için kullanılan kaplama tekniğidir [2,16].

Mikro ark oksidasyon işleminin gerçekleştirilmesi için birtakım alet ve cihazlardan meydana gelen bir sistem oluşturulması gerekir. Bu sistem içerisinde yer alan öğelere bakılacak olursa; sisteme elektrik girişini sağlayabilmek adına bir güç ünitesi, kaplamada kullanılacak çeşitli elektrolit çözeltilerinden meydana gelen bir banyo, kaplamak istenilen malzemenin bağlanılacağı bir anot kutbu, buna karşılık gelecek olan bir katot malzemesi ile işlem esnasında artan sıcaklık değerinin kaplamanın bileşimine verebileceği zararı önlemek adına ortamı belirli sıcaklık aralığında tutabilecek bir soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Tüm bu elemanların yer aldığı düzeneğin şematik görüntüsü Şekil 3.1.'de yer almaktadır.



Şekil 3.1. Kaplama düzeneğinin şematik görüntüsü [27].

Kaplamanın meydana gelişi; istenen özellikleri karşılayacak doğrultuda hazırlanan elektrolit karışımının içerisinde, daldırılan yüzeyinde kaplama oluşumu beklenen anot olarak kullanılacak numuneye negatif voltaj değeri, çoğunlukla paslanmaz çelik tercih edilen katot bölmesine pozitif voltaj değeri uygulanması neticesinde anot kutbuna bağlı olan numune yüzeyinde ark oluşumları meydana getirilmesi, bu doğrultuda seçilen metalik malzemede kendi yapısında var olan ince oksit filminin kalınlaşmasına yardımcı olarak koruyuculuk özelliğinin artırılması şeklinde ifade edilebilir [28-29].

Mikro ark oksidasyon prosesinde tercih edilen elektrolitler genel olarak bazik karaktere sahiptir. İşlem esnasında meydana gelen ark oluşumları ciddi oranda bir ısı meydana getirmektedir. Bu sebeple sıcaklık 10°C ile 60°C aralığında tutulmaktadır. İşlem boyunca voltaj ve akım değerleri yükseldiğinden, banyo sıcaklığını belirli bir aralık içerisinde tutabilmek için bir soğutma ünitesi kullanılması gerekmektedir [5,30].

Sistemde anot olarak görev alacak kaplama numunesine negatif voltaj, katot davranışını üstlenecek parçaya pozitif voltaj uygulanarak kaplanacak numunenin yüzeyinde küçük ark oluşumu gerçekleşir, bu ark oluşumu sayesinde metal üzerinde

oksit tabakası oluşmaya başlar. Ama voltaj değerinde bir artış gözlemlenmesi ile bu değer belirli bir limit değerini geçtiği zaman, numune yüzeyinde ark oluşumları meydana gelerek oksidasyon sürecine giriş yapılmaktadır [31].

Numune üzerinde ilk ark oluşumu başladığı zaman boyutları çok küçük olan bu kıvılcımların ortaya çıkmaya başladığı gerilim değeri, bozunma gerilim değeri (dielectric breakdown voltage) şeklinde adlandırılmaktadır. Bozulma voltaj değerine erişildiğinde, parçanın yüzey bölümünde metalik iyonlar ile hidroksil iyonları birbirlerine ters doğrultularda harekete başlayıp hareketlerini sürdürerek oksit filminin meydana gelme sürecini başlatırlar. Ark oluşumunun başlayabilmesi için gereken voltaj değeri, elektrotların hangi malzemeden yapıldığı ile kullanılan elektrolitin bileşim değerlerinden etkilenmekten; ortam sıcaklığı, elektrolitin konsantrasyon değeri ve yüzey gerilimi gibi özelliklerden herhangi bir etkilenme göstermemektedir. Şu ana kadar sürdürülen araştırmalar, numunelerin yüzey bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerinin birkaç bin Kelvin sıcaklığına erişebildiğini gözler önüne sermektedir [30].

3.3. Mikro Ark Oksidasyon Prosesinin Uygulandığı Alanlar

Bu yöntem, günümüzde yaygın olarak kullanılan malzemelere getirdiği çeşitli alternatif özellikler sebebiyle diğer kaplama prosesleri ile pek çok alanda rahatlıkla rekabet edebilecek seviyeye ulaşmıştır [31].

Mikro ark oksidasyon tekniği ile elde edilen kaplamaların çok iyi aşınma ve korozyon direncinin yanı sıra yüksek termal özellikleri sayesinde bu yöntem taşıt ve havacılık sektöründe en ön planda yer alırken ayrıca makine ve motor parçaları imalatında, elektrik-elektronik malzeme alanında, biyomedikal ve denizcilik endüstrisindeki çoğu uygulama alanlarında yer almaktadır [14,31-32].

Seramik esaslı kaplama tercih edilen uygulama alanlarında kullanılabilen, mikro ark tekniğiyle elde edilen kaplamalar boya malzemelerine yatkın olmaları sebebi ile harika bir boya malzemesi tabanlılığı olarak performans gösterebilirler [2].

Bu teknik kullanılarak üretimi gerçekleştirilen kaplama malzemelerinin sıcaklık artışına karşı gösterdikleri direnç sebebiyle uzaya gönderilecek olan araçlarda ve roket gibi yapılarda bu koruyuculuk özelliğinden yararlanılabilmektedir. Bunlara ek olarak kaplamalar yüksek dielektrik özelliğe sahip oldukları için iletken olmayan ortam koşullarında kullanılabilmektedirler [5].

Diğer uygulamalar kimyasal, mekanik, termal, elektrik-elektronik şeklinde sınıflandırılabilir.

Kimyasal Uygulamalar: Seramik karakterli oksit filmi malzeme doğası gereği kuvvetli asit ve baz özelliği gösteren bileşiklere karşı son derece dayanıklıdır. Bünyelerinde barındırdıkları bu özellik sebebiyle kimya ve gıda sektöründe kullanılabilmektedir. Ayrıca bu filmin orta düzey sıcaklık değerlerinde dayanımı iyidir.

Mekanik Uygulamalar: Seramik tabakası 1300 kg/mm^2 'den yüksek sertlik değerine sahiptir. Sertliğin yüksek olması, kayma ve abrazif aşınma dayanımı ile erozyon aşınması dayanımı değerlerinin artmasına sebep olan bir etkidir. Bunlara ek olarak tabakanın düşük sürtünme katsayısı değeri yağlamanın kısıtlı olarak yapılabilceği ortam şartlarında kullanılabilmesine olanak tanır.

Termal Uygulamalar: Kaplama tabakası başka metalik malzemeler ile kıyasladığında ısı iletkenlik bakımından daha alt seviyede bir değer sergilemektedir. Bundan dolayı sıcaklık dağılımının denk olmasına yardımcı olmak ve termal şok dayanımını yükseltmek amacıyla tercih edilebilirler.

Elektrik-Elektronik Uygulamalar: Film tabakası sahip olduğu dielektrik özellik sebebiyle yalıtkanlık görevi üstlenerek bu alanda kullanılan sistem bileşenlerinde tercih edilebilir [2].

3.4. Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantajları Ve Dezavantajları

Bu yüzey kaplama tekniğinde uygulama öncesinde numunenin hazırlık süreci öbür yöntemlerde olduğu gibi çok ayrıntılı bir şekilde gerçekleşmez. Bu sürecin daha çabuk gerçekleşmesi üretimin de hızına katkıda bulunur. Ayrıca uygulama öncesinde numune hazırlığında kullanılan solüsyonların çevreye verdikleri zararların minimum seviyede tutulmasına olanak sağlar.

Magnezyum, titanyum, alüminyum, zirkonyum, niyobyum vb. daha birçok çeşitli malzemeye uygulanabilir bir yöntem olması sağlamış olduğu avantajlar arasındadır.

Kaplama yönteminde kullanılacak olan sulu çözelti koroziv özellik göstermeyen, çevresel kirlilik oluşturmayan ve kolaylıkla hazırlanan bir karışım olmakla beraber maliyet açısından bakıldığı zaman da uygun fiyatlıdır. Ayrıca geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerinin diğerlerinde gözlemlenen tutuşma hadisesi ile kaplama sonrasında kırılma dayanımında ortaya çıkan azalış mikro ark prosesinde meydana gelmez [5,33].

Oksidasyon işlemi süresince ortamda zehirleyici gazların ve etrafa zarar verebilecek atık malzemelerin bulunmaması prosesi çevre dostu bir yöntem haline getirmektedir. Ayrıca son derece ekonomik bir yöntemdir [34].

Bu teknolojinin beraberinde getirdiği eşsiz aşınma ve korozyon dayanımı bilhassa otomotiv sektöründe kullanımı yaygın olan çelik malzemeler yerine magnezyum, alüminyum gibi hafif malzeme alaşımlarının kullanılabilirliğine imkân sağlamaktadır [35].

Başka bir avantaj olarak, yüzey geometrisi kompleks olan parçalarda bütün yüzeylerde eş kalınlık ve özellikler taşıyan sertliği yüksek, aşınma ile korozyona dayanıklı film oluşumuna olanak sağlamasıdır. Böylelikle malzeme yüzeyinde tek bir bölgeye yönelik kaplama uygulaması gerçekleştiren diğer yüzey iyileştirme yöntemlerinden daha üstün davranış sergilemektedir [36].

Yukarıda prosesin her ne kadar olumlu yönlerinden bahsedilsede öbür yüzey kaplama işlemlerinde karşımıza çıktığı üzere, mikro ark oksidasyon yönteminin de beraberinde getirmiş olduğu birtakım kısıtlamalar ile dezavantajları mevcuttur.

Proseste kullanılan değişkenlere göre 1000V'luk bir potansiyel değeri ve kapasite olarak takribi 1MW'a kadar enerji üretebilecek bir güç kaynağı gerektirmektedir.

Harcanan enerji miktarları göz önünde bulundurulduğunda diğer geleneksel anodik kaplama teknolojilerine kıyasla mikro ark uygulamasında ortaya çıkan üretim maliyetinde meydana gelen artış gözle görülmektedir. Bunlara ek olarak, kaplama işlemi esnasında malzemenin yüzey bölgesinde sıcaklık değeri yükseldiği için bu süreçte çözeltinin sıcaklığını düşürebilmek adına yüksek kapasiteye sahip bir soğutma sisteminin bulundurulması gerekmektedir.

Kaplama sonucunda elde edilen oksit tabakasının pürüzlülük değeri yüksektir, ayrıca son derece kırılabilir olmasından kaynaklı olarak kaplama tabakasının en dışında bulunan katmanın aşınma dayanımı son derece düşüktür. İçeride yer alan tabakalar dış tabakaya göre epeyce sertlik değerleri yüksek ve aşınma direnci de aynı şekilde özellik gösteren kısımlardır. Malzemenin yüzey bölgesinde meydana gelen bu seramik karakterli tabakanın dış katman kısmının uzaklaştırılması açığa çıkan maliyetler ve üretimsel süreç tarafından değerlendirildiğinde verimliliği düşürmektedir. Bu prosesin birçok olumlu özelliğinin yanı sıra bahsedilen birtakım olumsuzlukları bu yöntemin kullanım spektrumunu daraltmaktadır [5].

BÖLÜM 4. AŞINMA

Aşınmanın tanımı, birbirleri ile temas halinde çalışan malzeme yüzeylerinden mekaniksel etkilerden kaynaklı parça uzaklaşması sonucunda meydana gelen bir hasar mekanizması olarak ifade edilir. Aşınmanın hasar mekanizması olarak kabul edilebilmesi için, malzeme yüzeyleri arasında bir yüzeyden diğerine izafî hareket gerçekleşmesi ve parça yüzeylerinin ikisinde de ya da tek bir tanesinde malzemeden kayıp olması gerekir [3,37].

Bu tanıma ek olarak malzeme standartlarına göre oluşturulmuş sistemlerde ayrı bir aşınma tanımı yer almaktadır. Örnek olarak, Alman Standartlar Enstitüsü tarafından oluşturulan 50320 numaralı DIN standardına bakılırsa; sürekli olarak çalışan bir sistem düşünüldüğünde bu sistemin işleyişinde yer alan parçaların diğer parçalarla etkileşiminin bir sonucu olarak mekanik etkilerden kaynaklı yüzeyden malzeme kaybı ile sonuçlanan ve arzu edilmeyen bir bozulma olarak ifade edilmektedir [37].

Aşınma sistemi; üzerinde aşınmanın gerçekleştirileceği esas parça, aşınmaya sebep olacak aşındırıcı, bu iki parça arasında yer alan ara malzeme, iki yüzey arasında meydana gelecek hareket ve parçaya uygulanacak yük olmak üzere 5 maddeden meydana gelir. Arada yer alan malzemenin formu katı, sıvı veya gaz şeklinde yer alabilir. Yüzeyden ayrılan parçalar ara malzemeyle aynı görevi üstlenerek sisteme dâhil olabilirler. Aşınan parça ile diğer malzeme arasında meydana gelen hareketssel değişim aşınma olayının türünü belirlemektedir.

Malzemeye uygulanacak yükün miktarı, yüzeyin pürüzlülük derecesi ve sertlik değeri, kayma hızı ve mesafesi, işlem süresi ve uygulanan çevrim sayısı aşınmayı genel olarak etkileyen bileşenlerdir. Bu faktörlerin yanı sıra malzemelerin birbirleri ile çalışabilirliğine uygun olarak seçilmesi, yüzeye uygulanabilecek olan işlemler,

yağlayıcılık özelliği olan malzeme kullanımı, çevresel koşullar ve parçaların geometrisel özellikleri gibi etkenlerin aşınma davranışı üzerinde ciddi bir etkisi söz konusudur [3].

4.1. Aşınma Türleri

Birden fazla aşınma mekanizması olmakla birlikte genel olarak en çok rastlanan aşınma çeşitleri adhesif ve abrazif aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınmasıdır [3,37].

4.1.1. Adhesif aşınma

Adhesif aşınma, adhezyon aşınması adıyla da bilinmektedir. Aşınma mekanizmaları arasında sıklıkla karşılaşılmaktadır ve genel olarak hasarların hızlanmasına sebep olabilecek bir etkisi söz konusu değildir. Tanımı en bilinen hali ile iki tarafın bağlantı içinde çalıştığı ve arada izafi bir hareketin mevcut olduğu, yüzeylerden birinden parçacıkların kopup uzaklaşarak öteki yüzey üzerine yapışma işlemi neticesinde yüzeyler arasında meydana gelen malzeme aktarımı şeklinde açıklanabilir [37].

Etkileşim halinde bulunan yüzeylerin temas bölgelerinde sertliği yüksek parçacıklar yer alıyorsa adhesif aşınma meydana gelmez. Çünkü parçacıkların sertliğinin yüksek olması abrazif aşınma türüne geçişe sebep olmaktadır. Bundan dolayı adhesif aşınma, abrazif aşınmaya sebep olabilecek herhangi bir etken maddenin bulunmadığı durumlarda ortaya çıkan aşınma mekanizması şeklinde karşımıza çıkmaktadır [3]. Genel olarak aralarında bir sürtünmenin söz konusu olduğu yüzeylerde mukavemet ile sertlik değerleri bakımından çok fazla farklılık bulunan parçalarda görülmektedir [37].

Bu aşınma türünü önleyebilmek adına yapılması gerekenler ise;

Karşılıklı olarak çalışma sürdürecektir olan malzemeler birbirleri ile uyum içerisinde bağlantı sağlayabilecek şekilde tercih edilmelidir. Yağlayıcı özellik gösteren maddelerden yararlanılarak yüzeyler arasında aşınma ciddi oranda azaltılabilir [3].

4.1.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, çizilme veya abrazyon aşınması şeklinde de adlandırılmaktadır. Adhesif aşınmada olduğu gibi yavaş bir hasar burada söz konusu değildir. Meydana gelen hasarlar oldukça yüksek hızda gerçekleşir. Malzemenin yüzeyi kendisinin sertlik değerinden daha yüksek olan parçacıklarla etkileşime girdiğinde, sertliği yüksek olan parçacıkların malzemenin yüzey bölgelerinden parçaları koparması ile oluşmaktadır [37].

Burada gerçekleşen aşınma olayının mekanizması diğerlerine göre bir hayli farklılık göstermektedir. Öncelik olarak fiziksel şekilde gerçekleşmediği için, sistemde yer alan yüksek sertliğe sahip parçacıklardan kaynaklı malzemenin deformasyona uğraması söz konusudur.

Abrasif aşınmadan korunmak amacıyla uygulanabilecek yöntemler:

Malzeme yüzeylerinin sertliği artırılmalıdır. Ara yüzeylerde geçirgenlik sağlamayan bir sistem oluşturularak malzemelerin ara yüzeyine yerleşebilecek sertliği yüksek madde girişinin önüne geçilmelidir. Makine elemanları ve sistem parçalarında yer alan talaş, çapak gibi her türlü atık malzeme uzaklaştırılmalıdır [3].

4.1.3. Yorulma aşınması

Tipik olarak temas olayının gerçekleştiği bölgelerde minik çukur oluşumu görüntüsü ile ortaya çıkar. En çok rulman, dişli çark vb. sistem parçalarında, şöyle ki yuvarlanarak hareket eden parça yüzeylerinde gözlemlenir. Aslında malzemenin

yorulmasından kaynaklanmaktadır. Parçalardaki temas alanı az olduğu için yüzey bölgelerinde “Hertz” adı verilen basınç oluşumu gerçekleşir. Bu basınçla beraber yüzeyin alt kısmında kayma gerilmeleri meydana gelir. Zorlanmanın etkisiyle malzeme yorulması başlayarak en üst seviye gerilme değerinin olduğu bölgede minik boşluk oluşumları başlar. Zaman içerisinde boşlukların yüzey bölgesine hareketiyle beraber büyüme gerçekleşir ve bu boşlukların çukur haline dönüşmesi ile sonuçlanır [38].

4.1.4. Korozyon aşınması

Malzeme yüzeylerinin ortamda bulunan havayla etkileşime girmesiyle beraber aşınma oranının yükselmesini engelleyen oksit tabakası ve öteki tabakalar oluşmuş olur. Ayrıca bilhassa kimyasal madde bulunduran ortamlara maruz kalan makine elemanları yüzey bölgeleri de kimyasallarla tepkime oluşturarak ince ve sertliği yüksek tabakalar ortaya çıkarırlar. Değişen yük ile birlikte tabakaların kırılması ve kırılan parçacıkların yerlerini terk ederek uzaklaşması sayesinde aşınma parçacıkları oluşur. Geride kalmış olan temiz bölgede yüzeylerde tepkime sonucunda yine tabaka oluşumu gözlemlenir ve yük uygulandığında yine kırılma gerçekleşir. Olayın böyle tekrarlanarak sürmesi olayına korozyon aşınması adı verilir.

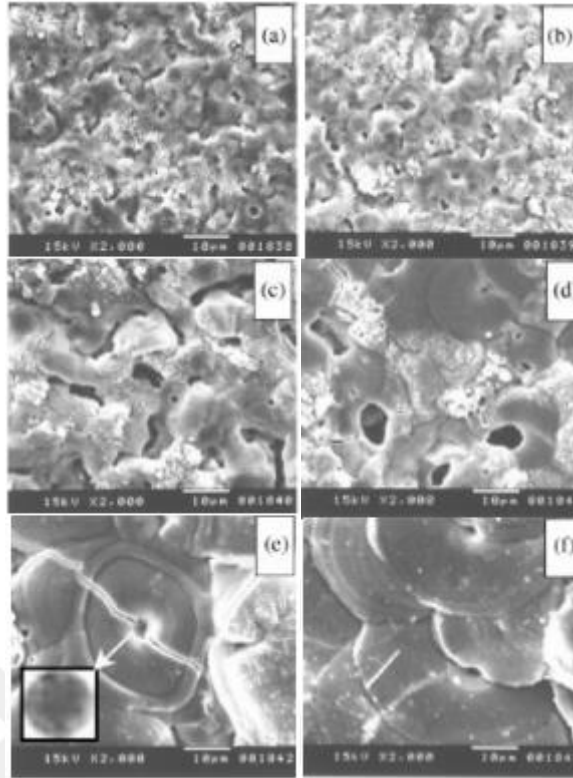
Aşınma oluşumunu en çok etkileyen etken pas olmakla beraber pas oluşumu oksitlenmeyi beraberinde getirmektedir. Korunma amaçlı oksidasyon olayını engellemeye yarayan özel yağlayıcı maddeler tercih edilmelidir. Buna ek olarak fosfat ya da sülfat bileşiklerini içeren kaplamalar yüzeylere uygulanabilir [38].

BÖLÜM 5. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MİKRO ARK OKSİDASYONU

Mikro ark oksidasyon tekniği kullanılarak magnezyumun diğer elementlerle yapmış olduğu alaşımların hemen hemen hepsinde tercih edilen kalınlık değerlerinde seramik oksit kaplama tabakaları üretilmektedir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen kaplamalarda kaplama tabakası ile altlık olarak kullanılan malzeme arasında kurulan bağ kuvvetleri son derece güçlüdür [2,5].

Kaplama prosesi birtakım aşamalardan oluşmaktadır. Öncelikle güç ünitesi aracılığıyla uygulanan yüksek potansiyel değeri sayesinde dielektrik kararlılık kaybolur ve neticesinde deşarj kanalları meydana gelir. Bu kanallardaki sıcaklık seviyesi 10^4 Kelvin değerine dek ulaşabilir. Bölgede oluşan kuvvetli elektriksel alandan kaynaklı olarak elektrolit içerisinden gelmekte olan iyonlar kanal içerisine girerler. Sıcaklığın yüksek olması sebebiyle altlıktan gelen magnezyum metali deşarj kanallarının içerisinde oksidasyona uğrar, elektrolit içinden gelen iyonlar da oksidasyona uğramış yapının içerisine nüfuz ederek bu yapıyı değiştirir. Sonrasında soğukluk derecesi daha yüksek elektrolitle etkileşime giren oksitin katılaşması başlar ve işlemin devamı ile birlikte kaplamanın kalınlık miktarı artış gösterir. Bu yüzden kaplamanın karakteristik yapısını ortaya çıkarmada büyük önem taşıyan etkenin deşarj kanalları olduğu bariz bir şekilde ortadadır.

Oksidasyon işleminde lineer birikme kinetiği en basit haliyle Faraday'ın elektroliz için ortaya koyduğu kurallar çerçevesinde şekillendirilebilir. Şekil 5.1.'de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama işlemi boyunca var olan reaksiyon oluşumlarıyla birlikte deşarj kanalları ve elektrolitin devamlı birbirilerini etkilediği görülmektedir.



Şekil 5.1. Mikro ark oksidasyon işleminde uygulanan süreye göre deşarj kanallarında meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları [5].

Deşarj kanallarının ömürleri sınırlıdır. Bundan dolayı işlem süresince bu kanalların devamlı olarak oluşup sonrasında kapanması ile birlikte malzemenin yüzey tabakasında oksit karakterli film birikimi meydana gelir.

Malzemenin kalınlık değeri işlem süresinin artmasıyla beraber artış göstermektedir. Kaplamanın pürüzlülük oranında meydana gelen doğrusal artış doğrudan deşarj kanalı çap değeriyle ve işlem süresinin artmasıyla ilişkilendirilir. Kanal ve etrafında ortaya çıkan yapının çapındaki artış, kanal yoğunluğunun azalmasıyla birlikte bir denge haline girerek doğrusal olarak devam eden bir proses şeklinde ilerler. Mikro ark oksidasyon yöntemi içerisinde birçok değişken bulunduran bir işlem sürecinden oluşmaktadır. Kaliteli kaplamalar elde edebilmek için birbirleri ile uyum içerisinde çalışan parametreler seçilmesi gereklidir. Geçmişten günümüze bu yöntemle ilgili çok sayıda çalışmalar yürütülmüştür. Sistemin işleyişine dair önemli buluşlar olmasına rağmen hâlâ sistem çalışma koşulları tam anlamıyla belirlenememiştir. Daha iyi kalitelerde kaplamalar üretebilmek adına mevcut faz bileşimleri ve mikro yapısal incelemelerle ilgili daha çok bilgi gerekmektedir. Yöntemin anlaşılabilirliğini

arttırmak amacıyla, kaplamanın fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişikliğe sebep olan parametre değerleri hakkında detaylı olarak araştırmalar yapılmalıdır.

Parametrelerden ilki tercih edilen elektrolit ile ilgilidir. Kaplama morfolojisi ile kaplamayı oluşturan bileşenler belirlenirken elektrolitin türü büyük önem taşımaktadır. Kaplamaları iyileştirmek adına çeşit türlü elektrolit bileşimleri denensede genel olarak silikat ve fosfattan meydana gelen elektrolitler daha çok tercih edilmektedir.

Literatürde Liang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

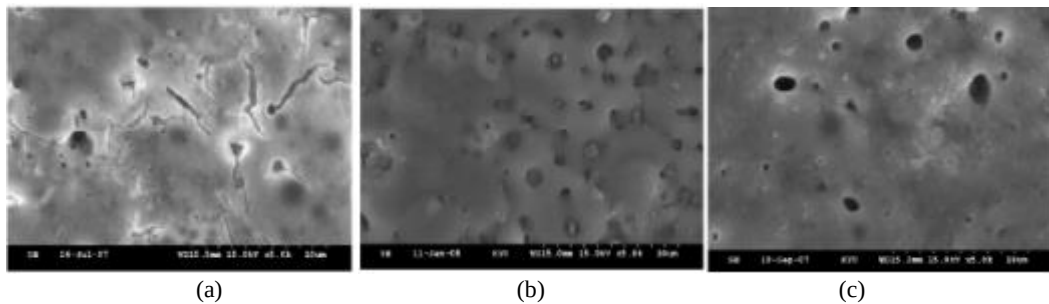
Yapmış oldukları deneyleri AM60B kodlu magnezyum alaşımı üzerinde gerçekleştirmeyi tercih ederek, hem silikat esaslı hem de fosfat esaslı elektrolit kullanarak elektrolit türünün prosese nasıl bir etkisi olduğunu incelemeyi hedeflemişlerdir. Silikat esaslı elektrolitte Na_2SiO_3 ve KOH bileşiklerinden oluşan bir karışım, fosfat esaslı elektrolitte ise KOH ve Na_3PO_4 'den meydana gelen bir karışım tercih etmişlerdir. İki karışım içinde aynı süre tutularak sonuçlar arasında karşılaştırma yapıldığında fosfatlı olan karışımın bozunma ile kritik voltaj değerinin ve eşit işlem süresi sonucunda bitişteki voltaj değerinin daha yüksek çıktığını ortaya koymuşlardır. Yapı morfolojisi açısından bakıldığında silikat içeren elektrolit kullanılan kaplamada diğerine göre homojenlik ve kompaktlık bakımından daha düzgün gözüktüğünü, fosfat içeren kaplamada ise por oranının daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Faz yapıları incelendiğinde silikatlı çözeltide elde edilen malzemenin yapısı MgO ile Mg_2SiO_4 fazlarından meydana gelmekteyken, fosfatlı çözeltide sadece MgO fazının elde edildiği görülmüştür. Kaplama tabakalarının yüzeylerinden sertlik değerleri alındığında silikat içeren çözeltinin fosfat içeren çözeltiliye göre bir miktar daha yüksek sertlik değerine sahip bir yüzey tabakası oluşmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Sebebi ise Mg_2SiO_4 faz bileşeninin sertliğinin MgO'ya oranla yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Silikatlı çözelti kullanılarak gerçekleştirilen kaplama tabakasının aşınma dayanımının daha iyi olduğu belirlenmiştir. Korozyon dayanımları incelendiğinde ise silikatlı elektrolit

içerisinde oluşan kaplama tabakası korozyon dayanımı bakımından daha üstün özellik göstermiştir.

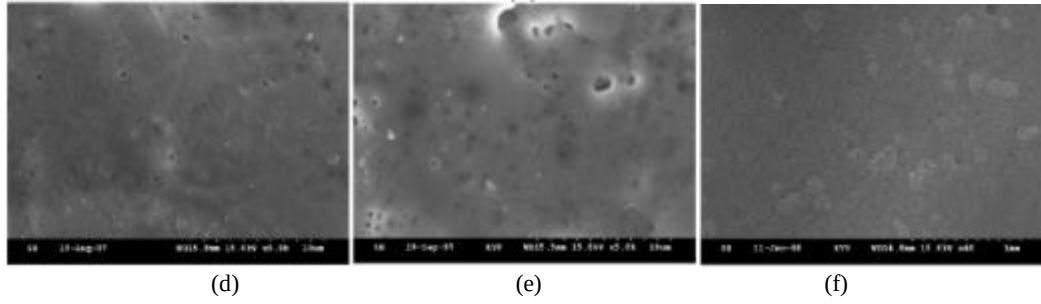
Alen Bai ile arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu bir diğer çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Bu araştırmacılar, alkali silika fosfat içeren çözeltiye farklı eklemeler yaparak kaplama tabakasının korozyon dayanımını iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu amaçla ilk başta üç tane çözelti hazırlamışlardır. Çözeltilerden biri fosfat ve diğeri silikat içermekte, son çözelti de bu iki bileşiğin karışımından oluşmaktadır. Birbirinden farklı bu elektrolit çözeltilerinin bozulma voltaj değerleri kıyaslandığında sırasıyla fosfat, silikat ve ikili karışımdan meydana gelen elektrolitler 410, 300 ve 210 V potansiyel değeri sergilemişlerdir. Sonrasında alkali silika fosfat içeren çözeltinin baz alınması ile birlikte sırayla 0.1 mol hexamethylenetetramine, 0.1 mol sodyum borat bileşiği ve ikisinin karışımından oluşan çözelti katkısı yapılmıştır. Silikat ve fosfat içeren karışımın tercih sebebi, bu elektrolit kullanıldığı zaman bozulma voltajında en düşük değer eldesi gerçekleşmektedir. Bozulma voltajının yükselmesi kıvılcımların şiddetinin artmasına yol açtığı için, tabaka yüzeyinin çok fazla por içermesi ve pürüzlülük değeri artışını beraberinde getirerek korozyon dayanımının düşmesine sebep olmaktadır.

Üretilen kaplamalara ait taramalı elektron mikroskop incelemeleri Şekil 5.2.'de yer almaktadır.



Şekil 5.2. Değişik elektrolitler kullanılarak üretilen kaplamalardaki taramalı elektron mikroskop görüntüleri [5].
(a) Fosfat tabakası, (b) Silikat tabakası, (c) Fosfat-Silikat tabakası, (d) Fosfat-Silikat tabakasına 0.1 mol Hexamethylenetetramine ilavesi, (e) Silikat-Fosfat tabakasına Sodyum borat katkısı, (f) Silikat-Fosfat tabakasına sodyum borat ve hexamethylenetetramine karışımı ilavesi



Şekil 5.2. (Devamı).

Mikroyapı görüntülerine bakıldığında, silikat ve fosfattan oluşan elektrolit içerisine yapılan 0.1 mollük hexamethylenetetramine katkısı eriyen oksit tabakasının katılma sürecinde meydana gelen termal gerilme değerlerini düşürerek, mikro çatlakların ve gözenek miktarının azalmasıyla birlikte korozyon dayanımının arttığını ön plana koymuştur. Ayrıca sodyum borat katkısı yapılmasının da mikro yapı ile yüzeyin pürüzlülük oranında herhangi bir etki oluşturmadığı görülmüştür. Ama sodyum miktarındaki artış kaplama tabakasının korozyon dayanımının artmasına sebep olmaktadır.

Kullanılan elektrolitte yer alan bileşenler kaplamayı morfolojik ve mekaniksel özellikler bakımından iki türde etkilemektedir. İlk olarak kaplama tabakasının kimyasal yapısında bir değişim ortaya koyarlar, ikinci olarak ise tabakanın morfoloji özelliklerini etkilerler.

Kaplamada kullanılan elektriksel parametre değerleri de kaplamanın özelliklerine etki eden faktörlerden biridir. Bu değişkenler uygulanan akımın yoğunluğu, işlem sonunda yer alan gerilim, frekans ve güç ünitesi şeklinde ifade edilebilir. Akım yoğunluğundaki değişim kaplamadaki mekaniksel özellikleri ve mikro yapısını ciddi oranda etkilemektedir.

Elektriksel parametrelerin etkisi üzerine çalışma yapan Srinivasan ile arkadaşları, AM50 magnezyum alaşımı kullanarak mikro ark yöntemiyle uygulanan akım yoğunluğu değerlerinin nasıl bir değişime sebep olduğunu araştırmışlardır. Süre olarak 15 dk ve 15, 75, 150 mA.cm⁻² olmak üzere üç tane farklı akım yoğunluk

değeri kullanarak elde edilen kaplama tabakasının mikroyapısal özelliklerini ve korozyon dayanımlarını kıyaslamışlardır. Uygulanan akım değerinin artmasıyla kaplama kalınlık değerleri, pürüzlülük oranı ve gözenek ile çatlak miktarının da artışı gözlemlenmiştir. Korozyon bakımından incelendiğinde, akım yoğunluğunun az olduğu değerlerde üretilen kaplama tabakasının korozyon dayanımının diğerine göre daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır. Sebebi ise düşük akım yoğunluğunda oluşturulan kaplamalarda daha az miktarda çatlak oluşumu ve gözenek miktarının düşük olmasıdır.

Son olarak elektriksel parametrelerden frekans ile ilgili çalışma yürüten Lv ile diğer araştırmacılar da ZM5 magnezyum alaşımını tercih etmişlerdir ve doğru akım ile çalışan bir güç ünitesi kullanmışlardır. 110 dk süre ve 2 A.dm^{-2} sabit akım yoğunluğu değerinde sodyum hidroksit, sodyum fosfat ile sodyum florür bileşiklerinin karışımıyla oluşturulan elektrolitin içerisinde malzemeye 100 ve 800 Hertz frekans değeri uygulanarak kaplama prosesi sürdürülmüştür. Kaplama sonucunda malzemenin faz yapısı herhangi bir değişime uğramamıştır ama mikroyapı görüntüleri birbirinden farklı sonuçlar ortaya koymuştur. 100 Hertz'lik frekansta gerçekleştirilen kaplama sonucundaki tabakanın pürüzlülük ve por miktarı oranının daha yüksek sonuç verdiği, böyle çıkmasının sebebinin ise proses esnasında oluşum gösteren kıvılcımlar daha uzun süre sürdüğü için olabileceği söylenmiştir. Korozyon dayanımının da gözenek ve çatlak oranından etkilenerek 100 Hertz değerinde daha az olduğu ortaya konulmuştur [5].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneylerde üzerinde kaplama işlemi gerçekleştirilecek olan malzeme grubu olarak saf magnezyum metali seçilmiştir. Seçilen bu metale mikro ark oksidasyon kaplama tekniği uygulanarak, elde edilen seramik esaslı oksit tabakasının yapısal ve mekaniksel özelliklerinde tercih edilen parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan değişimler değerlendirilmiştir.

Kaplama prosesinde; voltaj ile akım değerleri belirli bir değerde sabitlenmiş, oksidasyonun gerçekleştiği süre ve çözelti bileşimleri ve oranları değiştirilmiştir. Sonrasında elde edilen kaplamaların morfolojisi ile mekanik özellikleri test edilmiştir ve en iyi sonuçlara ulaşabilmek adına uygun sistem değişkenleri bulunması için araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar ile ilgili tüm ayrıntılar sonraki kısımlarda detaylı olarak anlatılmaktadır.

6.1. Mikro Ark Oksidasyon Prosesi

Kaplama işleminde alternatif akım prensibine dayalı olarak çalışmasını sürdüren, 10 kW'lık güç potansiyeli değeri olan bir kaplama düzeneği yer almıştır. Kaplama süresince uygulanan akım değeri sabit tutulmuş, voltaj değeri olarak 310V, 330V ve 390V voltaj değerinde gerçekleştirilmiştir.

Kaplama prosesi gerçekleştirilmeden önce ilk olarak işlemde kullanılacak olan magnezyum numuneler 30x10x5 mm ölçülerinde kesilmiştir. Daha sonra 240 ile 1200 grid arasında yer alan SiC zımpara kağıtları kullanılarak numune yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Bu işlemin ardından parçalar saf su kullanılarak

yüzeylerinde kalan artıklardan arındırılmış ve sonrasında sıcak hava ile kurutularak numunelerin kaplama işlemine uygun şekle getirilmesi sağlanmıştır.

Kaplama prosesi Na_3PO_4 , NaOH , Na_2SiO_3 , AgNO_3 ve nano- TiO_2 bileşiklerinden meydana gelen bir elektrolit içinde ve 310V, 330V ve 390V voltaj değerleri uygulanarak yapılmıştır. İlk grup numunelerde silikat esaslı çözelti bileşimi değiştirilmiş ve değişen silikat etkisi ile kaplamanın nasıl değiştiği incelenmiştir.

İkinci grup numunelerde farklı süre etkisi araştırılmıştır. Kaplama süresi 5, 10 ve 15 dk seçilmiş ve değişen süreye bağlı olarak kaplama karakteristiği incelenmiştir.

Üçüncü grup numunelerde ise silikat esaslı numune (M-Si-1)-5'in parametreleri baz alınmış ve farklı konsantrasyonlarda AgNO_3 'ün (%0,1, %0,2, %0,4) etkisi ile nano- TiO_2 'nin (%5) etkisi araştırılmıştır.

Yapılan işlemlerde kullanılan elektrolit bileşimleri, uygulanan voltaj değerleri, oksidasyon süresi, pH değerini içeren kaplama parametreleri Tablo 6.1.'de verilmiştir. Banyonun sıcaklık değeri kaplama süresi boyunca 30°C 'nin altında bırakılmıştır.

Tablo 6.1. MAO kaplama işlemi parametreleri

Numune Kodu	Na_2SiO_3 (g/L)	NaOH (g/L)	Na_3PO_4 (g/L)	AgNO_3 (g/L)	TiO_2 (g/L)	Voltaj (V)	Oksidasyon Süresi (dk)	pH
(M-Si-1)-5	5	3	1	-	-	310	5	11.5
(M-Si-2)-5	8	3	1	-	-	310	5	12.0
(M-Si-3)-5	10	3	1	-	-	310	5	12.5
(M-Si-1)-10	5	3	1	-	-	310	10	11.5
(M-Si-1)-15	5	3	1	-	-	310	15	11.5
(M-Si-1-Ag)-1	5	3	1	0.1	-	330	5	11.5
(M-Si-1-Ag)-2	5	3	1	0.2	-	330	5	11.5
(M-Si-1-Ag)-4	5	3	1	0.4	-	330	5	11.5
(M-Si-1-Ti)-5	5	3	1	-	5	390	5	11.5

6.2. Yüzey Karakterizasyonu

Kaplama işleminden sonra, yüzey görüntüleri Şekil 6.1.'de verilen EDS donanımına sahip “JEOL JSM-6060LV” markalı taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 6.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihaz görüntüsü

X-ışını kırınımı (XRD) analizi, CuK_α tüp kullanan “RIGAKU D/MAX/2200/PC” marka analiz cihazında 28.5 mA ile 35 kV güç değerinde, parçanın yüzey bölgesi 0.2° 'lik artışlar ile $2\theta = 20 - 90^\circ$ aralığında taranarak deney bitirilmiştir.

6.3. Sertlik Ölçümleri

Şekil 6.2.'de verilen “Nikon Eclipse L150” markalı sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihazda 100 gr yük, 10 sn uygulanarak deneyler yapılmıştır. Mikro sertlik değerlerinin belirlenmesi için kaplamanın kesitinin değişik bölgelerinden üç ve üzeri ölçümler elde edilerek ortalama bir değer tespit edilmiştir.



Şekil 6.2. Sertlik testlerinin gerçekleştirilmiş olduğu cihaz

6.4. Aşınma Deneyleri

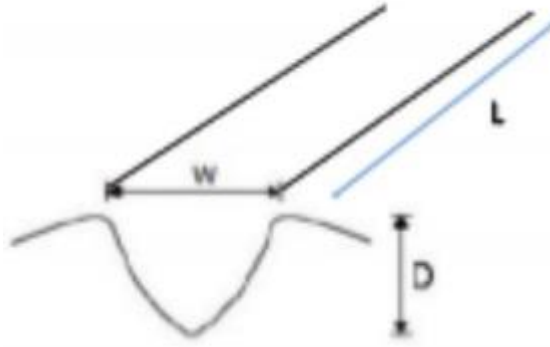
Mikro ark oksidasyon (MAO) kaplama sonrası, numunelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerini tespit etmek amacı ile çalışma metodu olarak karşıt hareketli aşınma (reciprocating wear) veya lineer aşınma tekniğini esas alan “CSM-Tribometer” markalı aşınma test cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.3.). Deneyler kuru bir ortam içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Aşınma test cihazı

Aşınma deneyinden önce ilk olarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen düşük yoğunluk değerine sahip tabakayı ortadan kaldırmak için yüzeyler parlatılmıştır. Deneyde 6 mm çapa sahip tungsten karbür (WC) bilye aşındırıcı malzeme görevindedir. Uygulanan yük olarak 3N ve kayma hızı olarak 10 cm/sn değerleri kullanılmış, karşıt hareket genliği 20 mm ve toplam kayma mesafesi de 100 m tercih edilmiştir. Ortam sıcaklığı 25°C de tutulmuş ve nem miktarı %25 seviyesine ayarlanmıştır Kuru ortam içerisinde lineer aşınma yöntemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan aşınma testleri sonrasında aşınmayla ortaya çıkan izler ve aşınan yüzey görüntüleri SEM ile desteklenmiştir.

Aşınma hacmini hesaplamak için oluşan izin genişliği (W) taramalı elektron mikroskobu kullanılarak, iz derinliği (D) profilometreyle ölçülmüştür. Hacim hesabını yapmak için 6.1. eşitliğinden yararlanılmıştır. Oluşan izin şematik olarak görünümü Şekil 6.4.'de yer almaktadır.



Şekil 6.4. Aşınma sonrası oluşan izin şematik görünümü[39].

$$A = \pi/4 \cdot W \cdot D \cdot L \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'de:

A: Oluşan aşınma izinin hacim değeri,

W: Oluşan aşınma iz genişlik değeri,

D: Aşınma iz derinlik değeri şeklinde ifade edilmiştir.

Aşınma alanı hesaplandıktan sonra sonucu lineer şekilde belirlenen yol mesafesi (L) ile çarparak aşınma hacmi hesabı yapılmıştır.

Bunlara ilave olarak, testler tamamlandıktan sonra numune yüzeylerinde meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacı ile aşınma yüzeyleri incelenmiştir.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Tezin bu bölümünde saf magnezyum metalinin mikro ark oksidasyonunda farklı elektrolit bileşimleri denenerek ve işlem süresi değiştirilerek elde edilen kaplamaların yüzey karakterizasyonu, EDS ve faz analizleri yapılarak sertlik ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar irdelenmiş, uygulanmış olan parametre değerlerinin yüzey özellikleri üzerinde nasıl bir etki yarattığı detaylı olarak araştırılmıştır.

7.1. Mikro Yüzey İncelemeleri

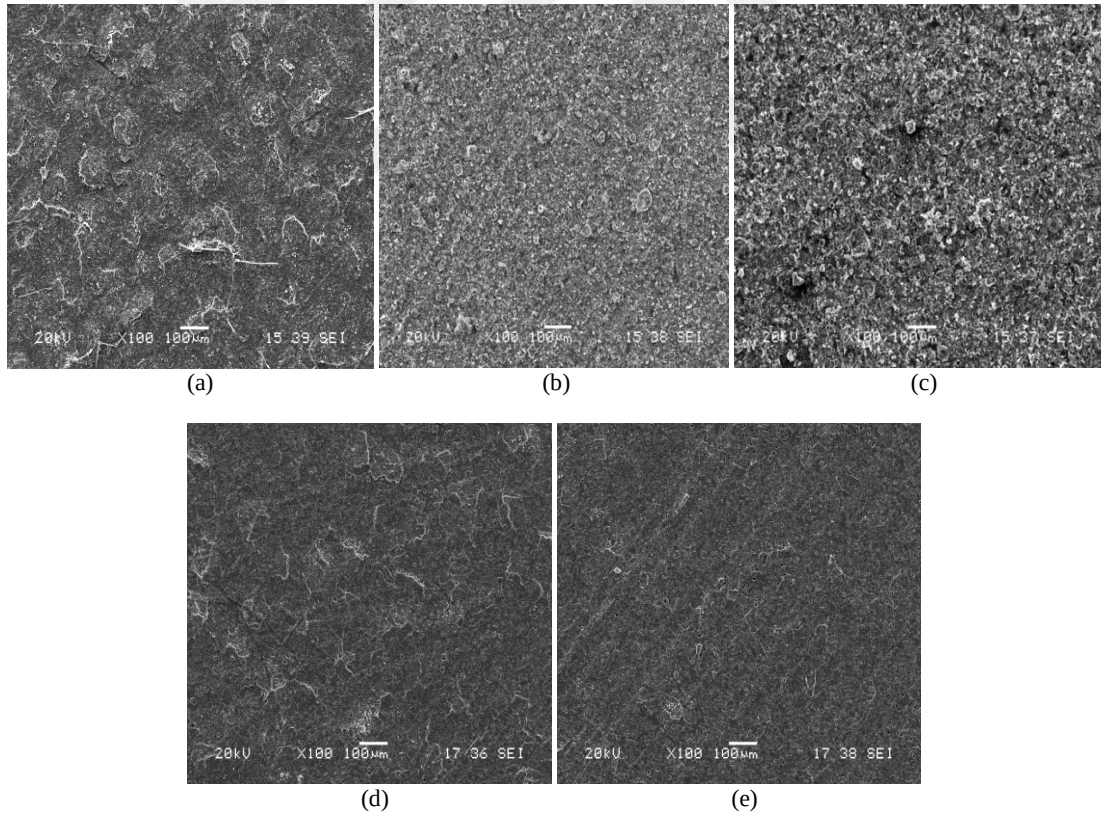
Metalografik olarak hazırlanan numuneler bir önceki bölümde verilen Tablo 6.1.'e göre farklı parametrelerde üretilmiş ve SEM görüntüleri alınarak detaylı olarak incelenmiştir.

Sırasıyla birlikte (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin X100 büyütme değerindeki SEM görüntüleri Şekil 7.1.'de verilmiştir. Mikro yapı görüntülerini daha ayrıntılı inceleyebilmek adına büyütme değeri artırılarak, 1000X büyütmedeki numune SEM'lerinden alınan görüntüler de Şekil 7.2.'de verilmiştir.

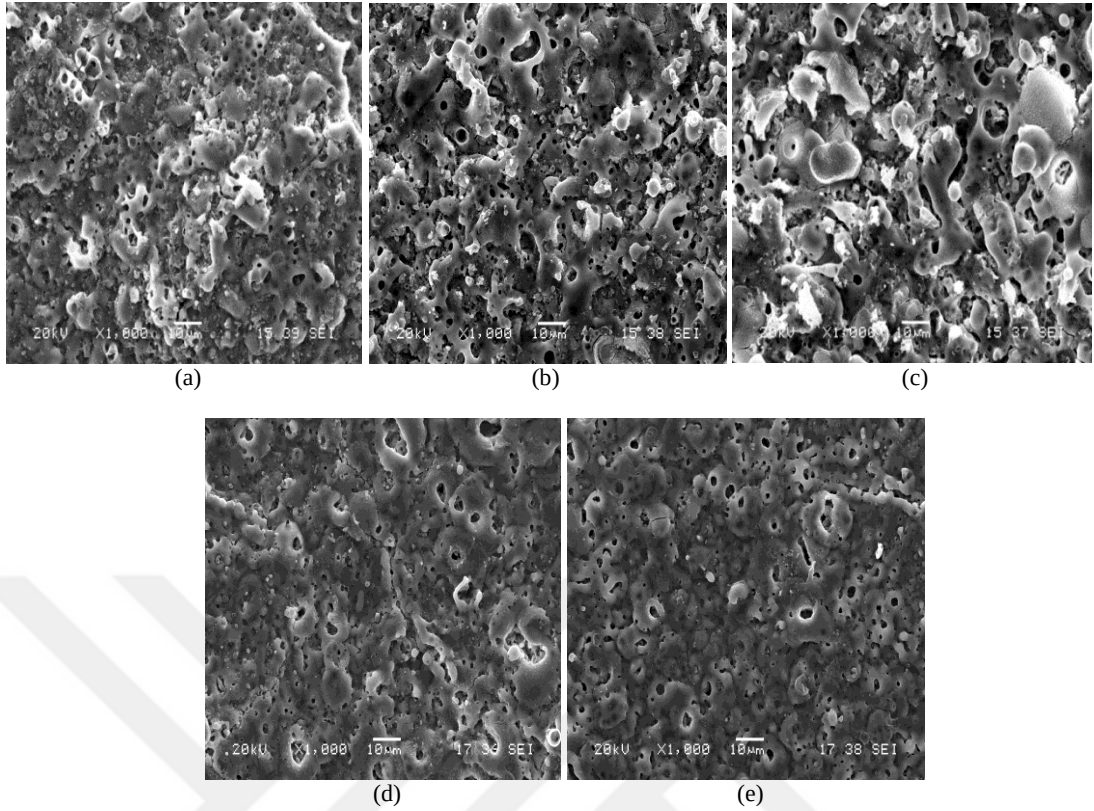
Düşük ve yüksek büyütmelerdeki SEM görüntülerinden görüldüğü üzere Şekil 7.1. (a), Şekil 7.1. (b), Şekil 7.1. (c) ve Şekil 7.2. (a), Şekil 7.2. (b), Şekil 7.2. (c) kodlu numunelerde değişen silikat konsantrasyonu ile beraber numune yüzeyinde porlu bir yapı meydana geldiği ve bu porların her yerde homojen bir şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir. Na_2SiO_3 konsantrasyonunun 5 g/l'den 10 g/l'ye artırılmasıyla, ortalama gözenek boyutu ile gözeneklilik yüzdesi ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Bununla birlikte Na_2SiO_3 konsantrasyonunun 10 g/l'ye çıkarılması kaplama üzerinde

olumsuz etkiye neden olmuştur ve Şekil 7.1. (c) ile Şekil 7.2. (c) kodlu numunede görüldüğü gibi bazı mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Bunun nedeni şiddetli kıvılcım deşarjı yayan, geniş gözenekli ve mikro çatlaklı MAO kaplamanın oluşumuna yol açan elektriksel iletkenlikte meydana gelen büyük artış olabilir.

Diğer taraftan düşük ve yüksek büyütme değerlerindeki Şekil 7.1. (d), Şekil 7.1. (e) ve Şekil 7.2. (d), Şekil 7.2. (e) kodlu numunelerde kaplama süresinin artışı ile beraber yüzey morfolojisinin giderek pürüzsüzleştiği, gözeneklerde biriken elektrolit nedeniyle mikro gözenek çaplarının azaldığı ve kaplama yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, iletken partiküllerin artması ve deşarj kanallarından daha fazla erimiş malzeme artışı nedeniyle reaksiyonun yoğunlaşması olabilir. Pankek benzeri istifleme, kalınlığı arttırmış, yüzeyi daha pürüzsüz hale getirmiş ve bazı kusur yerlerini onarmıştır.



Şekil 7.1. Kaplama işlemi sonrasında X100 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1)-5, (b) (M-Si-2)-5, (c) (M-Si-3)-5, (d) (M-Si-1)-10, (e) (M-Si-1)-15

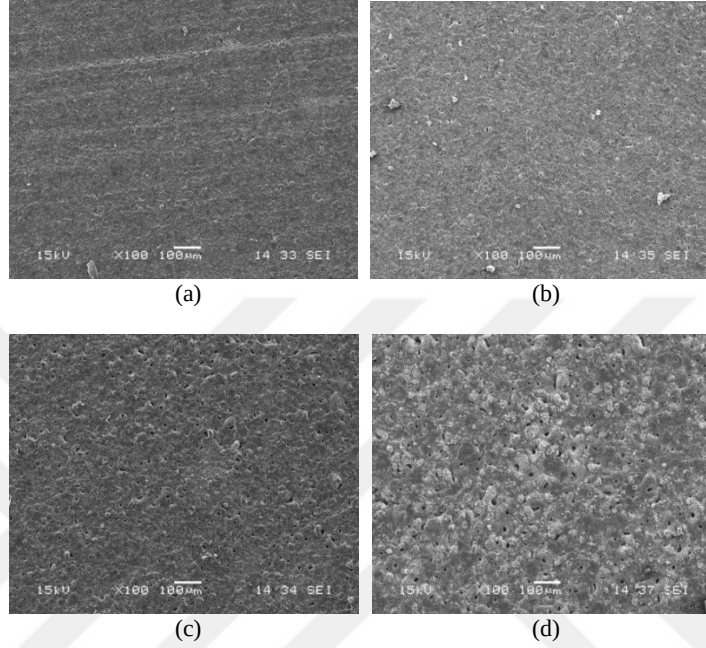


Şekil 7.2. Kaplama işlemi sonrasında X1000 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1)-5, (b) (M-Si-2)-5, (c) (M-Si-3)-5, (d) (M-Si-1)-10, (e) (M-Si-1)-15

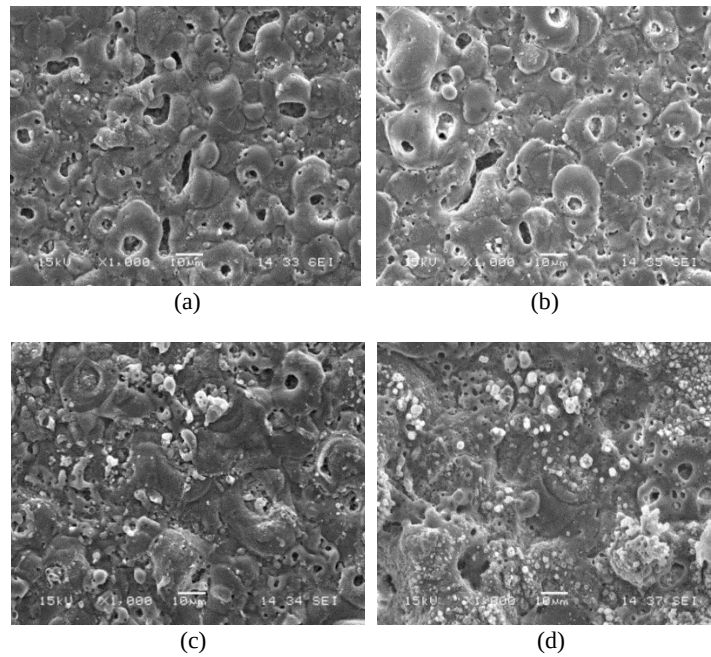
İlk grupta gerçekleştirilen kaplama sonuçlarına göre (M-Si-1)-5 kodlu numunenin SEM analizi sonrası MAO kaplamanın başarılı olduğu görüşüne varılmıştır. Bu sebeple (M-Si-1)-5 kaplama parametresi baz alınarak aynı çözeltiye farklı oranlarda (%0.1 g/l, 0.2 g/l ve 0.4 g/l) AgNO_3 ilavesi yapılmıştır. Ag ilaveli numunelerin X100 büyütme ve X1000 büyütmedeki SEM yüzey görüntüleri sırasıyla Şekil 7.3. ve Şekil 7.4.'de verilmiştir.

Sırasıyla düşük ve yüksek büyütmelerde Şekil 7.3. ve Şekil 7.4.'de verilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde ilave edilen gümüş çözeltisi (%0.1, %0.2 ve %0.4 g/l) ile yüzeydeki mikroporların azaldığı ve ortalama $2\pm 1\mu\text{m}$ civarında olan mikroporların neredeyse tamamının yok olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü artan çözelti konsantrasyonu ile azalmıştır. Artan çözelti konsantrasyonu kaplama kalitesi ve deşarj karakteristiği açısından önemli bir parametredir [5]. Çözelti konsantrasyonundaki artış ile çözelti iletkenliği artmış (gümüş metalinin iletkenliğinin yüksek olması sebebi ile) olacağından, artan iletkenlik büyüme hızını

iyileştirir. Ergimiş oksit miktarının artışı ile mikroporlar daha yoğun bir kaplama tabakası ile kaplanmıştır. Artan iletkenlik ile mikroporların azalması ve çaplarının küçülmesi ile daha yoğun bir tabaka elde edilmesi literatüre göre de beklenen bir sonuçtur [5].



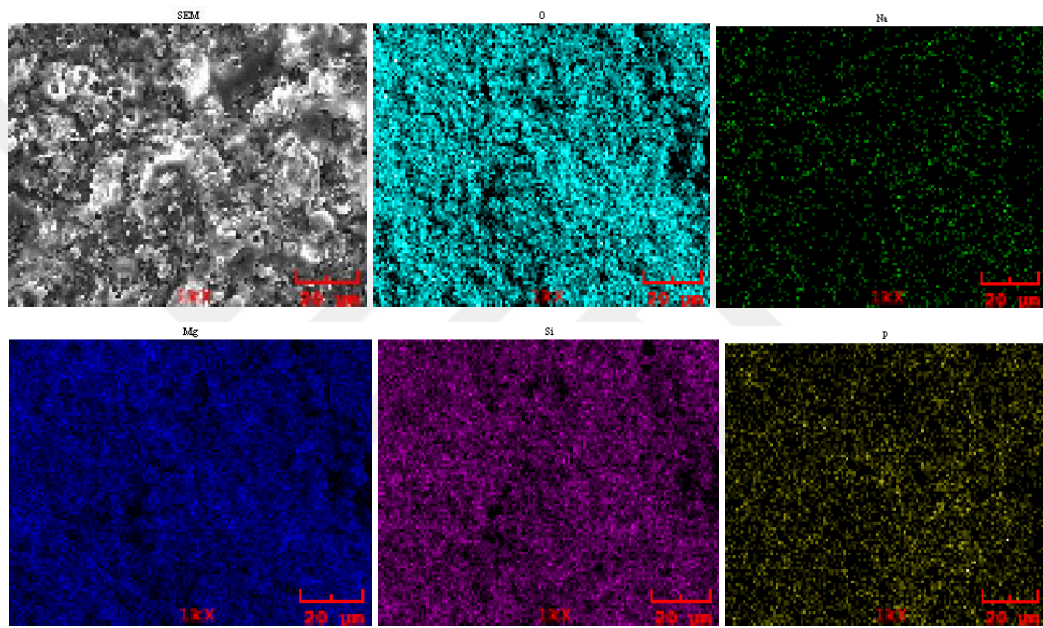
Şekil 7.3. Kaplama işlemi sonrasında X100 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1-Ag)-1, (b) (M-Si-1-Ag)-2, (c) (M-Si-1-Ag)-4, (d) (M-Si-1-TiO₂)-5



Şekil 7.4. Kaplama işlemi sonrasında X1000 büyütme değerinde elde edilen SEM fotoğrafları (a) (M-Si-1-Ag)-1, (b) (M-Si-1-Ag)-2, (c) (M-Si-1-Ag)-4, (d) (M-Si-1-TiO₂)-5

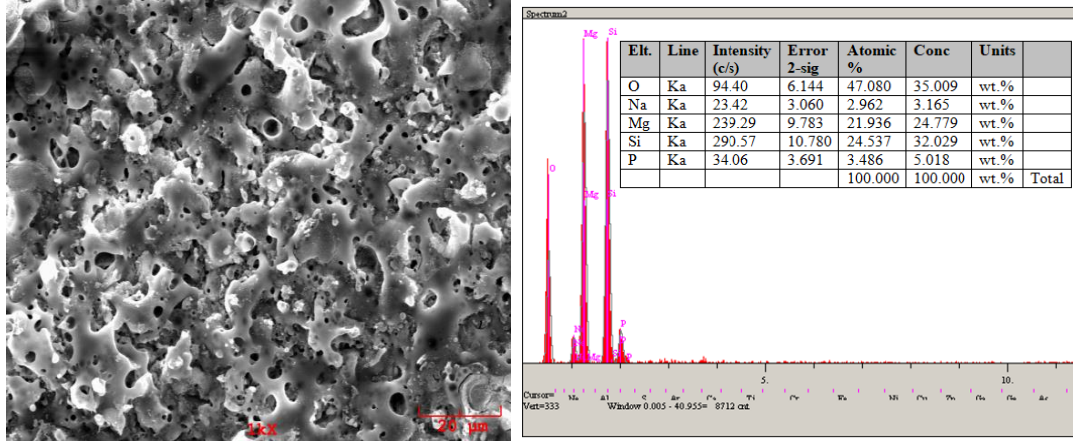
7.2. EDS Analizleri

Şekil 7.5.'de (M-Si-1)-5 numunesinin SEM morfolojisi ve EDS harita sonuçları verilmiştir. Alınan analiz sonrası kaplama yüzeyinin eşit olarak dağılmış Mg, O, Na, Si ve P elementlerini içerdiği görülmektedir. Si, Na ve P elektrolitik çözeltiden gelmektedir. Alınan elementel analiz neticesinde kaplama yüzeyinin esas olarak MgO ve Mg_2SiO_4 'den oluşabileceği çıkarımı yapılmış ve bu durum XRD analizi kapsamında detaylı olarak açıklanacaktır.

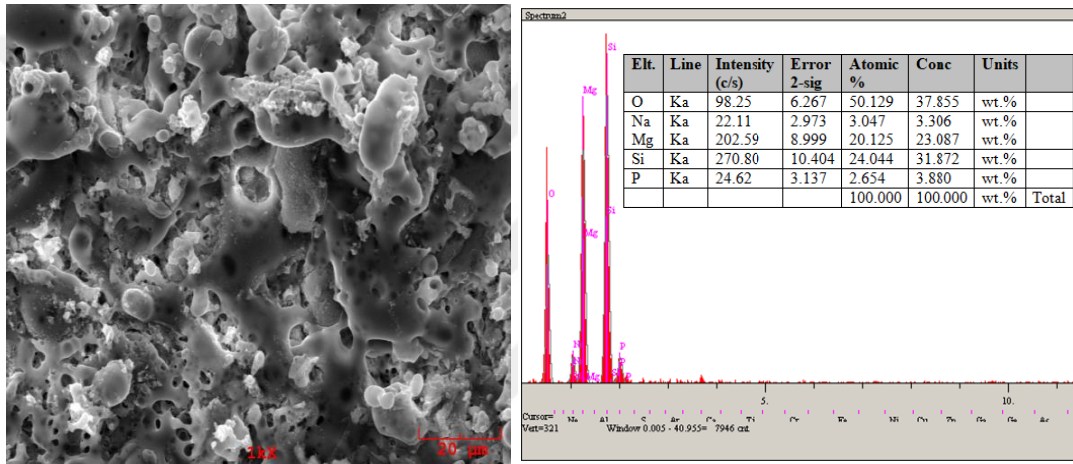


Şekil 7.5. (M-Si-1)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

Farklı silikat oranlarında yapılan kaplamaların SEM morfolojilerini ve EDS analizi sonuçları Şekil 7.6. ve Şekil 7.7.'de verilmiştir. Artan silikat çözeltisi ile yüzeyde silisyum oranında artış görülmüşken maksimum ilave edilen silikatta azalma olmuştur. Şekil 7.7.'de (M-Si-3)-5 kodlu numunede kaplama sonrası dökülmeler görüldüğü için elementel analiz sonuçlarında oransal olarak azalma tespit edilmiştir.

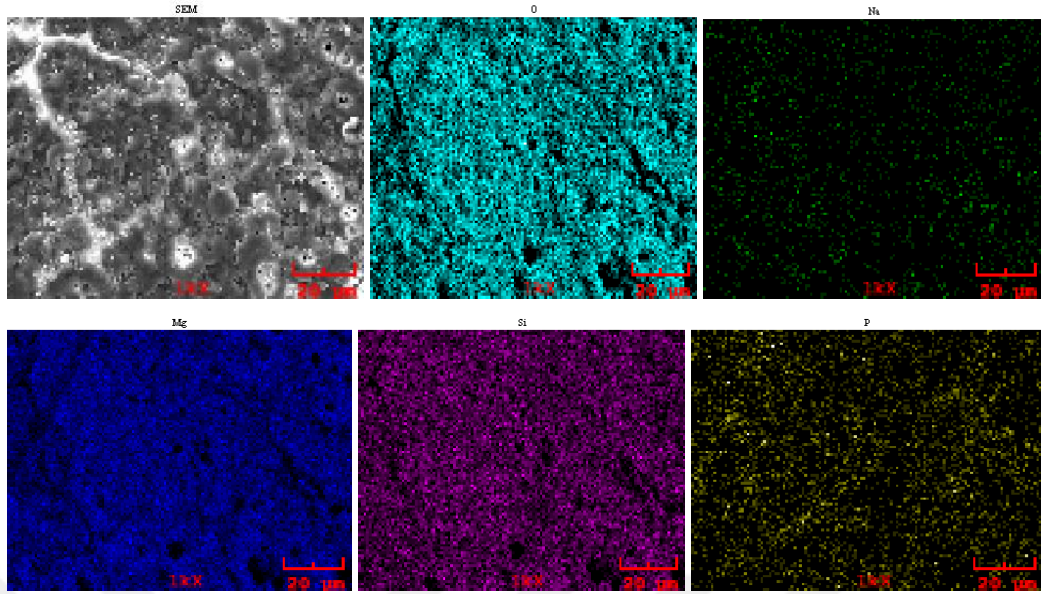


Şekil 7.6. (M-Si-2)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

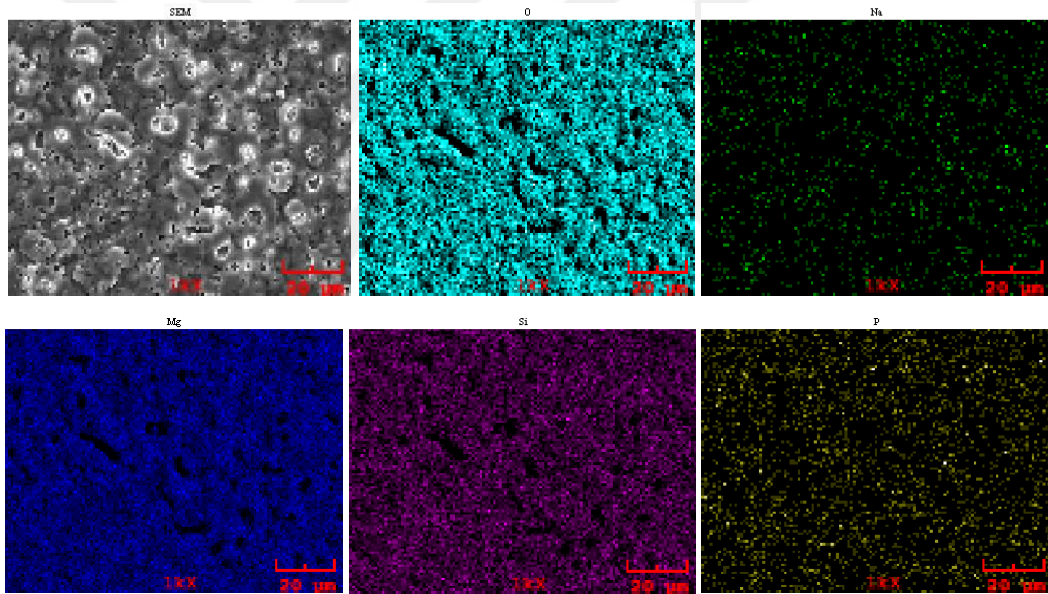


Şekil 7.7. (M-Si-3)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

Farklı sürelerde üretilen (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin SEM morfolojileri ve EDS harita sonuçları Şekil 7.8. ve Şekil 7.9.'da verilmiştir. Benzer şekilde yüzey tabakasına eşit olarak dağılmış Mg, O, Na, Si ve P görülmektedir. Kaplama süresinin artmasıyla yüzeydeki mikro gözenekler çözelti partikülleri ile kaplanmıştır. Na, P ve Si elementlerinin varlığı deşarj kanallarında görülmüş ve yoğun olarak tespit edilmiştir.

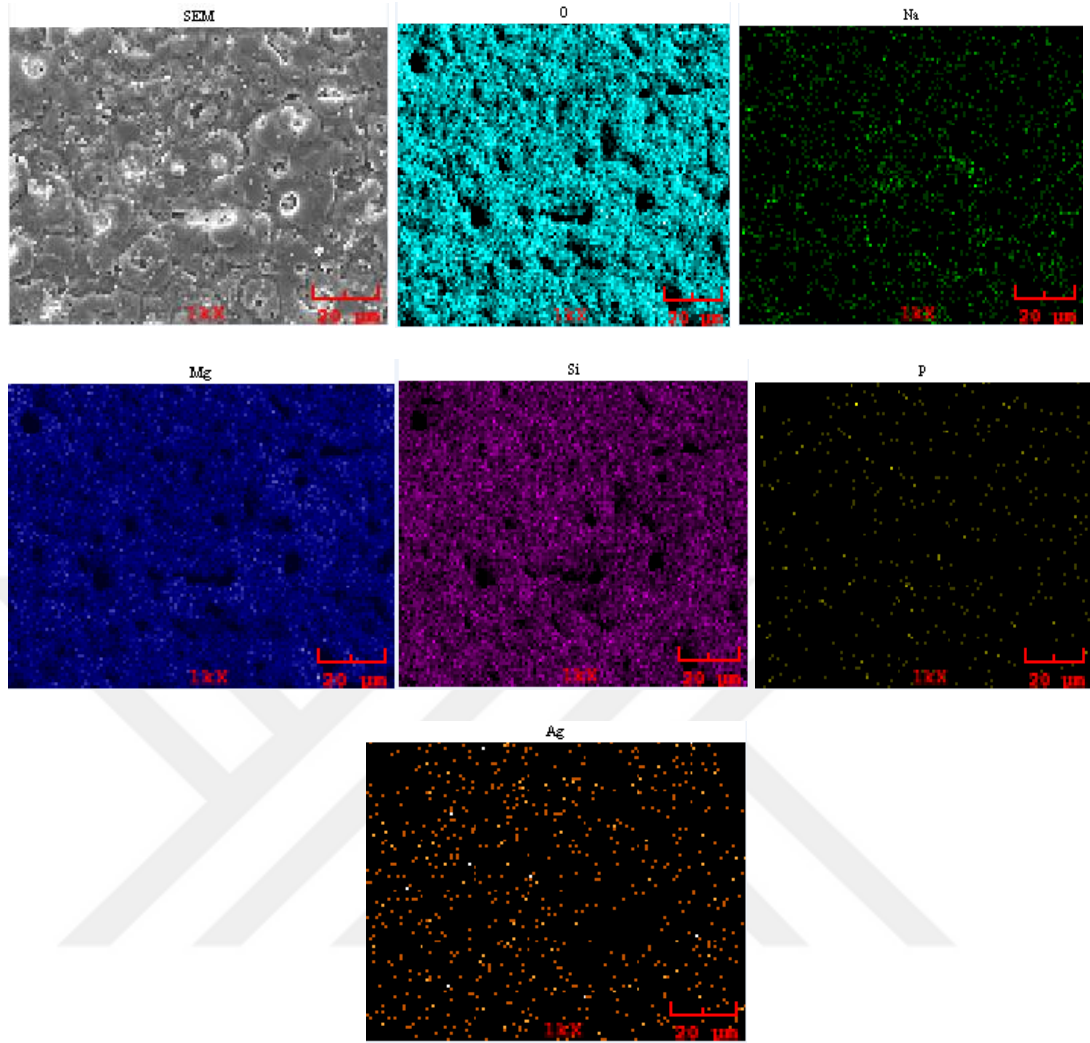


Şekil 7.8. (M-Si-1)-10 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

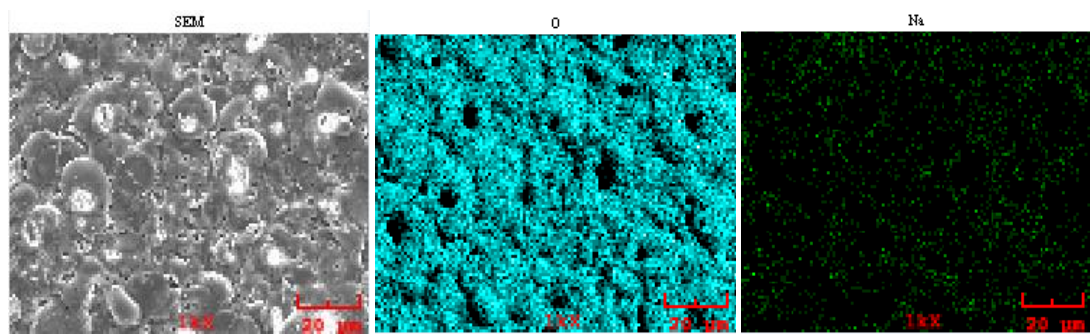


Şekil 7.9. (M-Si-1)-15 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

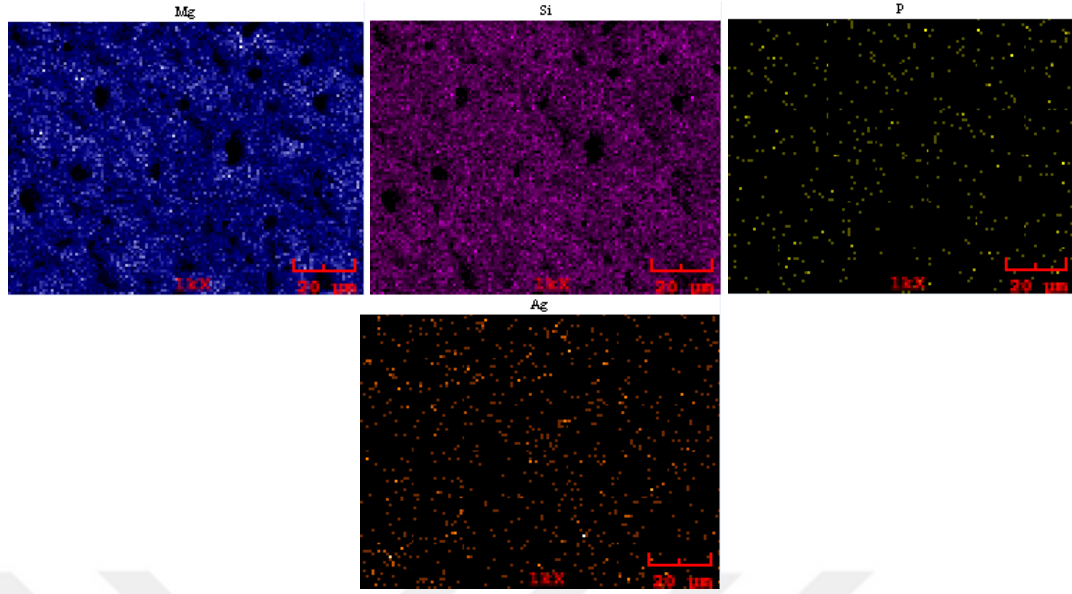
Şekil 7.10., Şekil 7.11. ve Şekil 7.12.'de %0.1, %0.2, %0.4 AgNO_3 takviyeli ve TiO_2 takviyesi yapılan numunelerin SEM morfolojisi ve EDS harita sonuçları sırasıyla verilmiştir. Alınan EDS analizleri sonucu yüzeyde benzer olarak Mg, O, Na, Si ve P elementlerinin yanında Ag'nin homojen olarak dağılım gösterdiği görülmektedir. TiO_2 takviyeli numunede ise Ti ve O elementlerinin elementel oranlarında artış tespit edilmiştir.



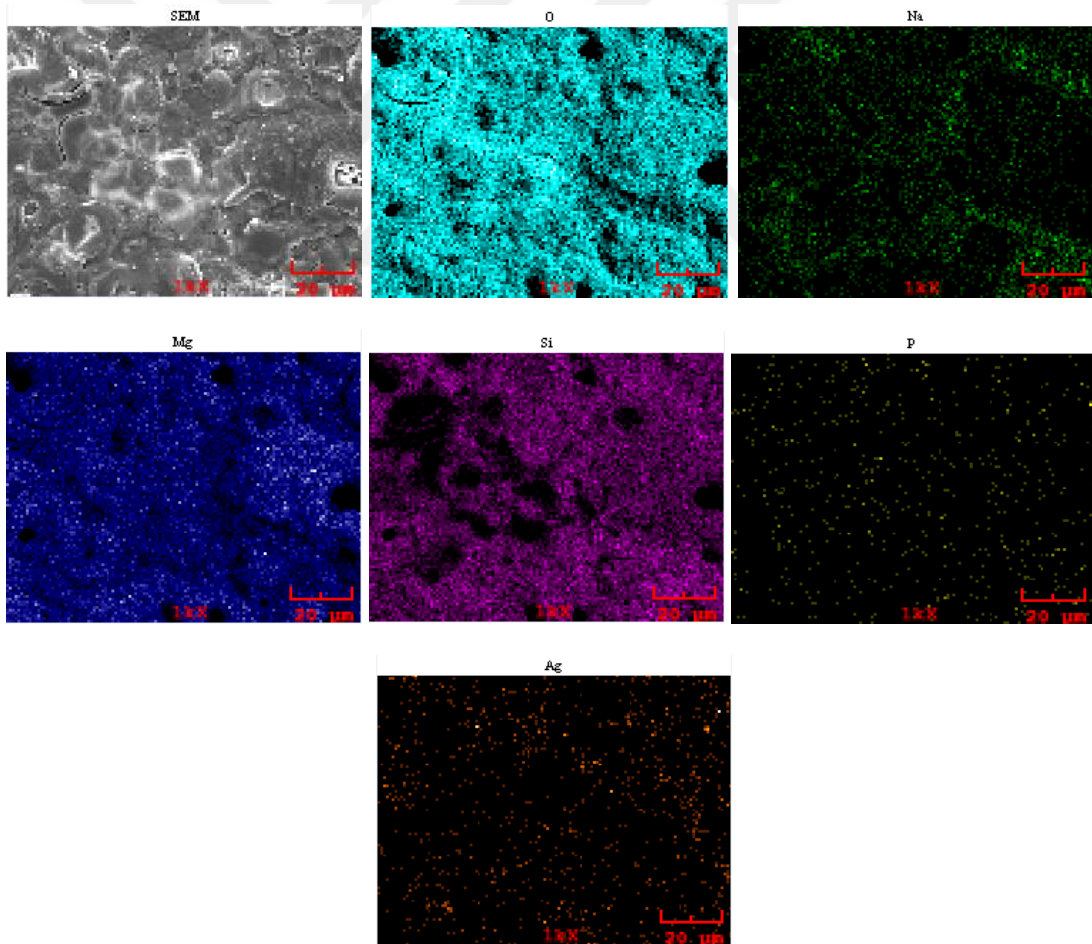
Şekil 7.10. (M-Si-1-Ag)-1 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi



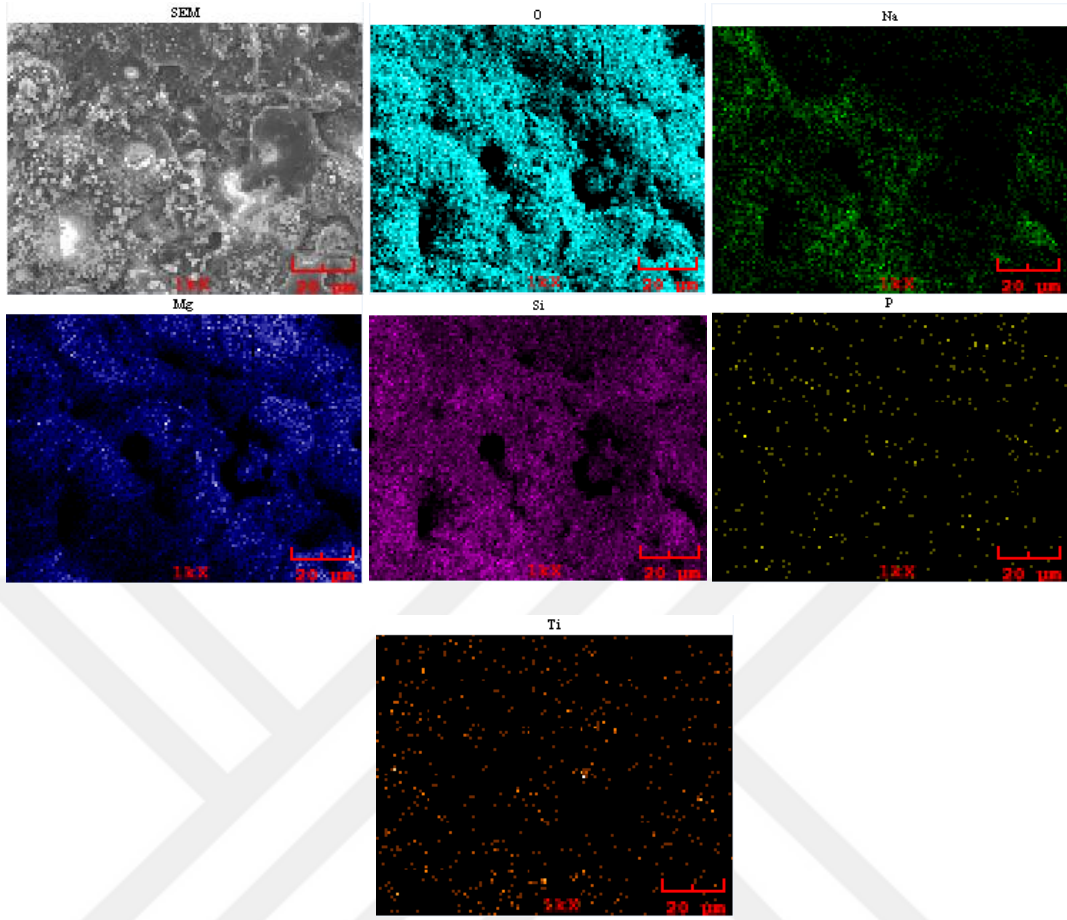
Şekil 7.11. (M-Si-1-Ag)-2 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi



Şekil 7.11. (Devamı).



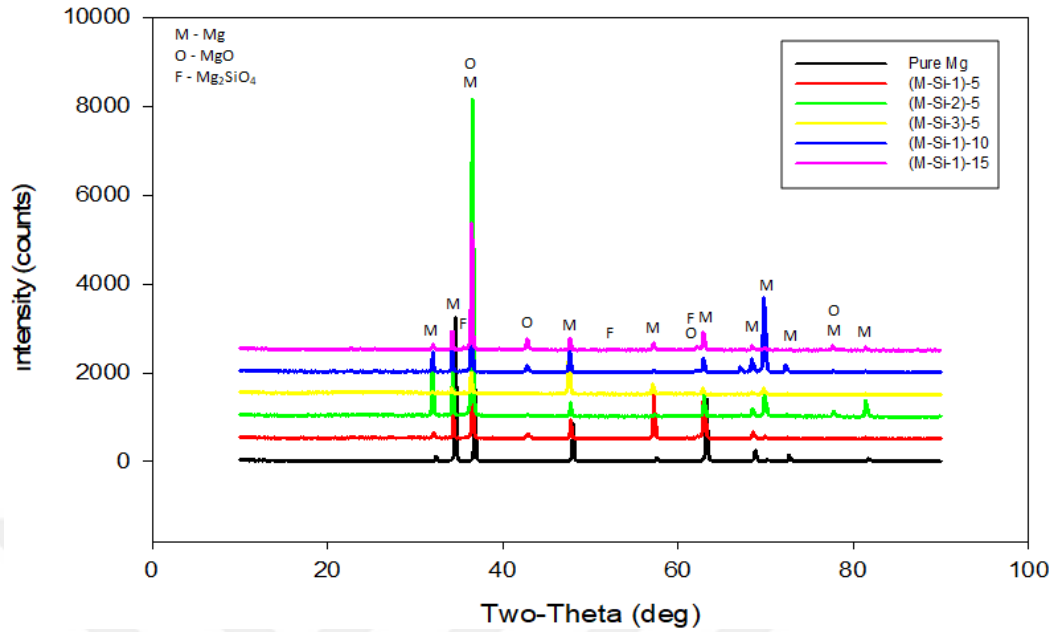
Şekil 7.12. (M-Si-1-Ag)-4 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi



Şekil 7.13. (M-Si-1-Ti)-5 numaralı numunenin mikro ark oksidasyon sonrasındaki SEM fotoğrafı ve EDS analizi

7.3. XRD Analizleri

Şekil 7.14.'de sırası ile Mg, (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10, (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin XRD analizleri verilmiştir. Alınan XRD analizi sonrası yüzeyde Mg, MgO ve Mg_2SiO_4 fazlarına rastlanmıştır. Saf magnezyum numunesinde sadece Mg pikleri görülmektedir. Kaplama sonrası yüzeyde oksit filmi oluşumu alınan XRD analizi sonrasında ispatlanmıştır. Artan kaplama süresi ile (M-Si-1)-15 kodlu numunede eser miktarda Mg_2SiO_4 piklerine de rastlanmıştır.



Şekil 7.14. Saf Mg, (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10, (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin X-ışını difraksiyon paterni

7.4. Sertlik Sonuçları

Oksidasyon işlemi sonrasında 10 saniyelik bir süre boyunca 100 gram yük uygulanarak gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen değerler Tablo 7.1.'de verilmiştir.

Saf magnezyum metalinin sertlik değeri 60 HV şeklinde çıkmıştır. (M-Si-1)-5, (M-Si-3)-5 ve (M-Si-1)-15 numunelerinden alınan sertlikler sırasıyla 134 HV, 188 HV ve 193 HV'dir. Saf magnezyum ile kıyaslandığında sertlik değerinde meydana gelen artış gözle görülmektedir. (M-Si-1)-5 ve (M-Si-3)-5 numuneleri arasındaki sertlik artışının sebebi şudur. Bu iki numuneye uygulanan kaplama işleminde süre sabit tutulmuş ancak Na_2SiO_3 konsantrasyonu değerleri değişken olarak belirlenmiştir. Artan Na_2SiO_3 konsantrasyonundan dolayı sertlik değeri yüksek çıkmıştır. Sebebi ise, kaplama yüzeyinde magnezyumun çözeltiden gelen silisyum ile tepkimeye girerek ortaya çıkardığı Mg_2SiO_4 bileşiğinin sertliğinin yüksek olması sebebi ile sertlikte yarattığı artıştır. Artan bileşim değerlerine göre ortaya çıkan sertlikler bu şekildeyken bir diğer parametre olarak sürenin etkisi incelenmiştir. (M-Si-1)-15 kodlu numuneye 15 dakika boyunca oksidasyon işlemi uygulanmıştır ve bunun

sonucunda en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Bunun sebebi ise kaplama süresinde meydana gelen artış ile sertlikteki artışın doğru orantılı olarak ilerlemesidir. Oksidasyon süresinin artmasıyla beraber tabaka yoğunluğu da artmaktadır. Bu da sertlikte meydana gelen artışı açıklar.

Tablo 7.1. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-3)-5 ile (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin sertlik ölçüm değerleri

Numune	Sertlik Değeri (HV)
Saf magnezyum	60
(M-Si-1)-5	134
(M-Si-3)-5	188
(M-Si-1)-15	193

7.5. Aşınma Analizi Sonuçları

Mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanmış numuneler 100 m mesafede 10 cm/s hız uygulanarak 3N'luk bir yük altında aşınmaya maruz bırakılmıştır. İşlem sürecinde 25°C sıcaklıkta ve %25 nem oranında çalışılmıştır.

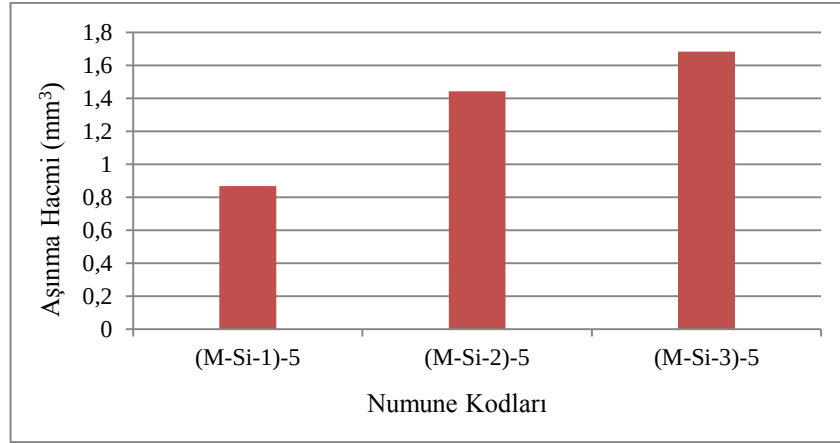
Deneyler sonrasında numunelerin hepsi için aşınma hız değeri ölçümü için deneysel çalışmalar bölümünde verilen eşitlikten yararlanılarak aşınma hacim değerleri bulunmuştur. Aşınma hacminden aşınma hızına geçiş yapılarak sonuçların tamamı grafiklerle açıklanmıştır.

Aşınmadan sonra meydana gelen aşınma izlerinin derinlik değerleri profilometreyle hesaplanmış, SEM cihazıyla da izlerin genişlik değerleri saptanmıştır. Derinlik ve genişlik değerlerinden aşınma alanıyla, hacmine geçilerek bütün numuneler için eşitlikten faydalanılarak sonuçlar ölçülmüştür. Numuneler için hesaplanmış değerlerin hepsi Tablo 7.2. 'de verilmiştir.

Tablo 7.2. Aşınma deneyi sonrasında hesaplanan aşınma alanı, aşınma hacmi ile aşınma hızı değerleri

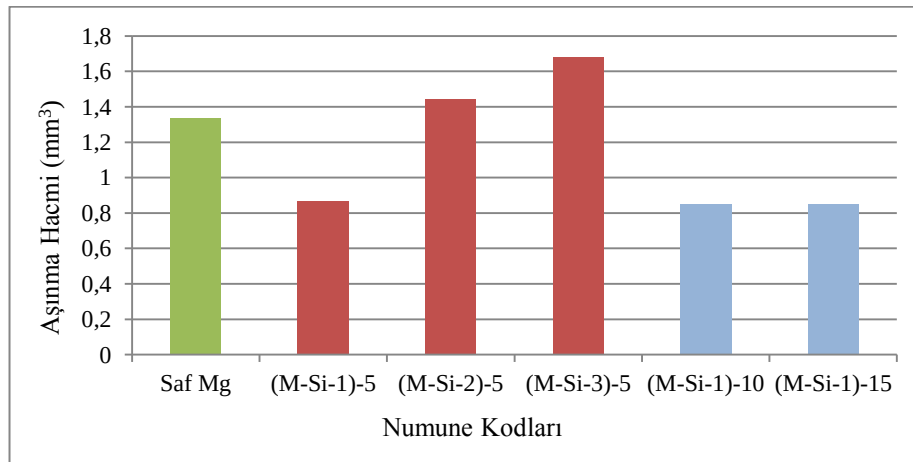
Numune kodu	Hız (cm/s)	Mesafe (m)	Yük (N)	Aşınma Alanı (mm ²)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Hızı (mm ³ /m)
Saf magnezyum	10	100	3	0,133633	1,33633	0,00445443
(M-Si-1)-5	10	100	3	0,086893	0,86893	0,00289643
(M-Si-2)-5	10	100	3	0,144155	1,44155	0,00480517
(M-Si-3)-5	10	100	3	0,168234	1,68234	0,0056078
(M-Si-1)-10	10	100	3	0,116041	0,8520	0,00284
(M-Si-1)-15	10	100	3	0,085229	0,85229	0,00284097
(M-Si-1-Ag)-1	10	100	3	0,029329	0,29329	0,0009776
(M-Si-1-Ag)-2	10	100	3	0,010737	0,10737	0,0003579
(M-Si-1-Ag)-4	10	100	3	0,005158	0,05158	0,0001719
(M-Si-1-Ti)-5	10	100	3	0,011792	0,11792	0,000393

Uygulanan kaplama işlemi sonrasında (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5 ve (M-Si-3)-5 kodlu numunelere 3N'luk bir yük uygulanması ile oluşan aşınma izinin genişlik ve derinliğine bağlı olarak ortaya çıkan aşınma kaybında gözlemlenen değişimler Şekil 7.15.'de grafik halinde verilmiştir. Bu üç numune kendi aralarında kıyaslandığında, (M-Si-1)-5 kodlu numuneye oranla (M-Si-2)-5 ve (M-Si-3)-5 numunelerinin aşınma kaybı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Na₂SiO₃ bileşiminde meydana gelen artışla birlikte aşınma dayanım değerlerinde azalma görülmüştür. Bunun sebebi Na₂SiO₃ bileşiminin artışıyla birlikte üretilen kaplamaların yüzeylerinde artan pürüzlülük oranının aşınma oranını arttırmasıdır. Aynı zamanda artan silikat çözültisi ile (M-Si-3)-5 kodlu numunelerde kaplama sonrası elle bile dökülmeler meydana gelmiştir.



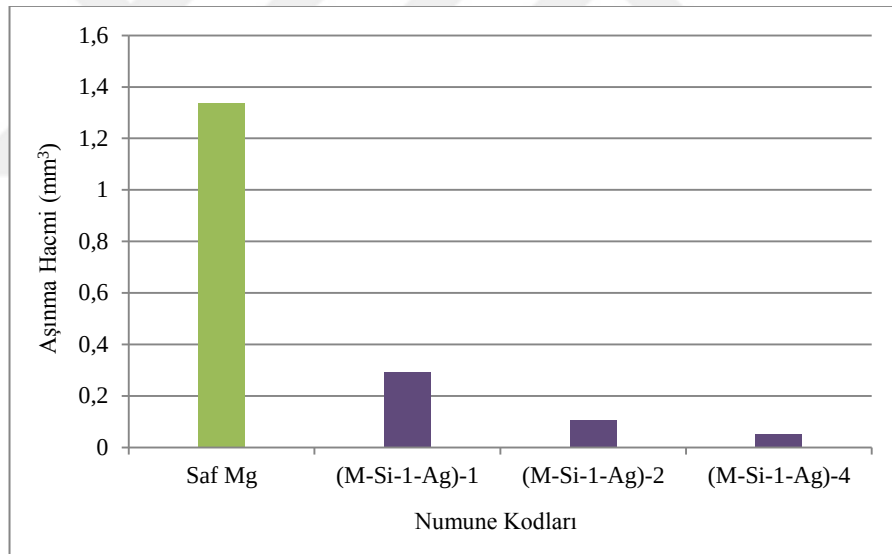
Şekil 7.15. (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler

Şekil 7.16.'da saf magnezyum numunesi ve farklı silikat çözeltisi ile farklı sürelerde kaplanan numunelerin aşınma hacim değerleri karşılaştırılmıştır. Saf magnezyum metaline kıyasla (M-Si-1)-5 kodlu numunede aşınma dayanımının arttığı gözlemlenmektedir. Silikat artışı ile birlikte artan aşınma oranı gerekçesi daha önceki bölümde tartışılmıştır. Artan kaplama süresi ile birlikte kaplanan numunelerin aşınma oranlarında saf numuneye oranla azaldığı görülmüştür. Ancak (M-Si-1)-5 nolu numuneye göre bu oran çok da farklı değildir. Numunelerin aşınma dayanımı değerlerinde, saf magnezyum metaline göre (M-Si-1)-5 kodlu numunede %30.77, (M-Si-2)-5 kodlu numunede %10.77 ve (M-Si-3)-5 kodlu numunede %29.23 oranında bir artış gözlemlenmiştir. (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerde ise %34.62 oranında bir azalma görülmüştür.



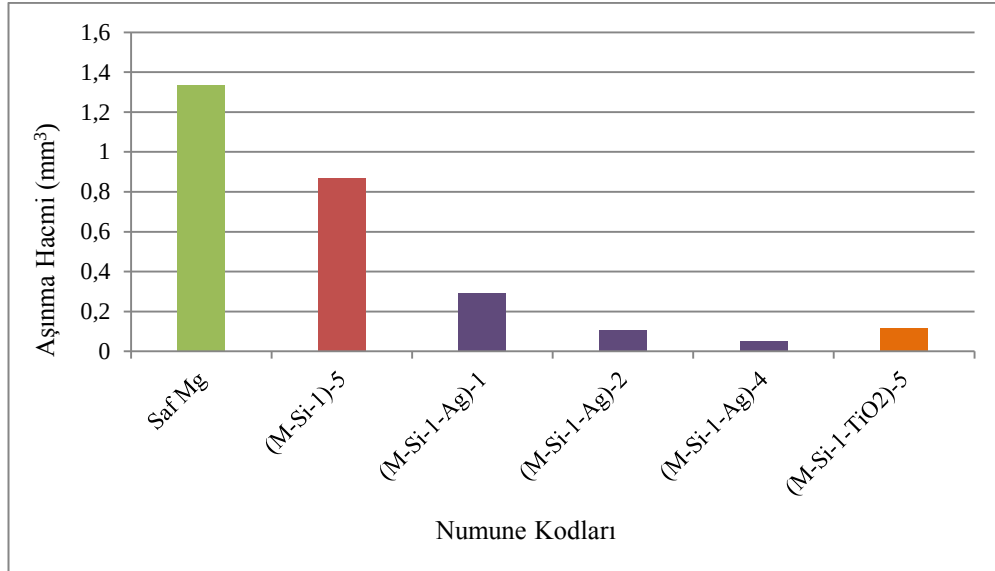
Şekil 7.16. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10, (M-Si-1)-15 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler

Şekil 7.17.'de saf magnezyum ile mikro ark işlemi uygulanmış gümüş katkılı numunelerin aşınma hacmi değerleri kıyaslanmıştır. Saf magnezyum metali ile farklı konsantrasyonlara sahip gümüş katkılı numuneler kıyaslandığında artan gümüş konsantrasyonuyla beraber aşınma dayanımının iyileştiği görülmüştür. Gümüş ilaveli numunelerin saf magnezyuma oranla aşınma kaybında azalma gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, gümüş metalinin iletkenlik değeri son derece yüksek olduğundan konsantrasyon değerinde meydana gelen artış beraberinde çözelti iletkenliğini de arttırdığı için büyüme hızı üzerinde olumlu etkiye sebep olmaktadır. Ergiyen oksit miktarındaki artışla birlikte kaplama yüzeyinde bulunan mikroporların çaplarında küçülme ve bununla birlikte daha pürüzsüz ve yoğun bir tabaka elde edildiği görülmüştür. Kaplama yüzeyindeki bu durum gümüş takviyeli numunelerin aşınma hacmi değerlerini (M-Si-1-Ag)-1 için %78.2, (M-Si-1-Ag)-2 için %91.73, (M-Si-1-Ag)-4 için %96.24 oranında iyileştirmiştir.



Şekil 7.17. Saf magnezyum ve (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler

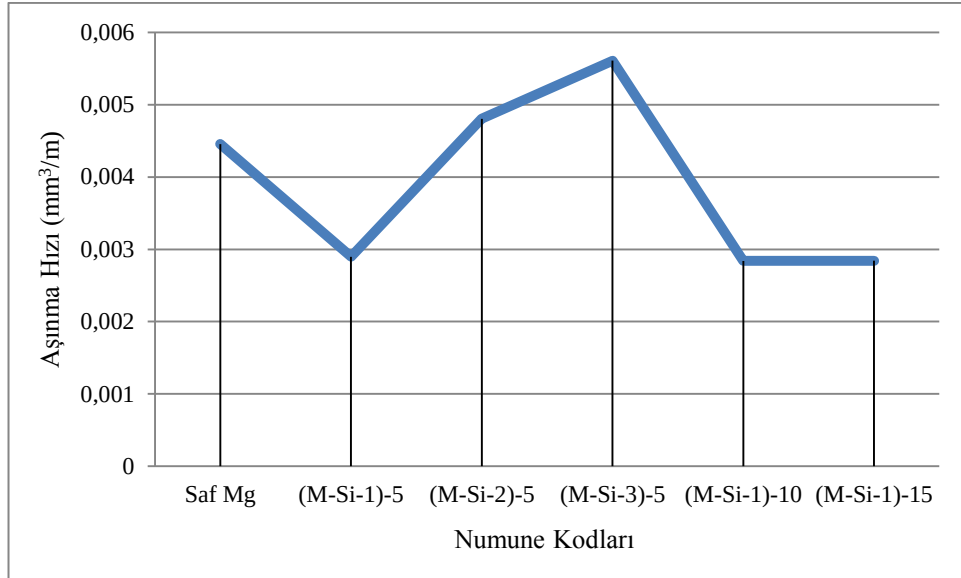
Şekil 7.18.'de saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 ve bunlara ek olarak TiO_2 katkılı (M-Si-1- TiO_2)-5 kodlu numunede meydana gelen aşınma hacim oranları verilmiştir. TiO_2 katkılı numunelerin aşınma dayanımında saf Mg ve (M-Si-1)-5 kodlu numuneye göre iyileşme görülmüştür. Ancak Şekil 7.18.'de de görüldüğü üzere en iyi aşınma dayanımı gümüş takviyeli numunelerde elde edilmiştir.



Şekil 7.18. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4, (M-Si-1-TiO₂)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma kaybında gözlemlenen değişimler

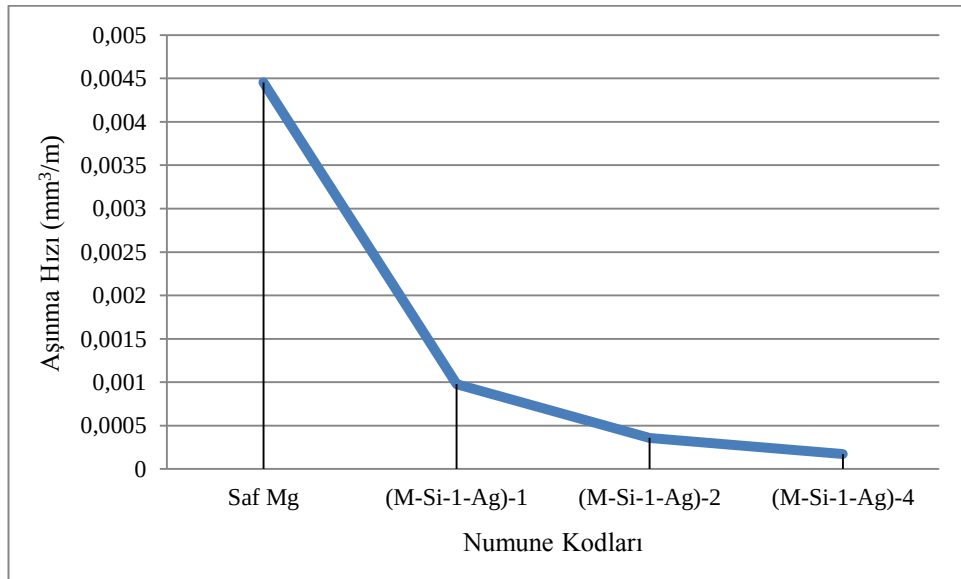
7.5.1. Aşınma hızı

Şekil 7.19.'da değişen silikat çözeltisine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin aşınma hızı değerleri verilmiştir. Artan silikat çözeltisi ile birlikte aşınma hızının arttığı görülmüştür. Silikat ilavesi ile kaplamalarda meydana gelen dökülmeler ve kaplamanın altlığa düzgün bir şekilde yapışmaması aşınma hızını arttırmıştır. Numunelerin aşınma hızı oranı sırasıyla (M-Si-1)-5 kodlu numunede %34.1, (M-Si-2)-5 kodlu numunede %9.1, (M-Si-3)-5 kodlu numunede %27.27 değerinde bir artış göstermiştir. (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerde ise %36.36 oranında bir azalma söz konusudur.



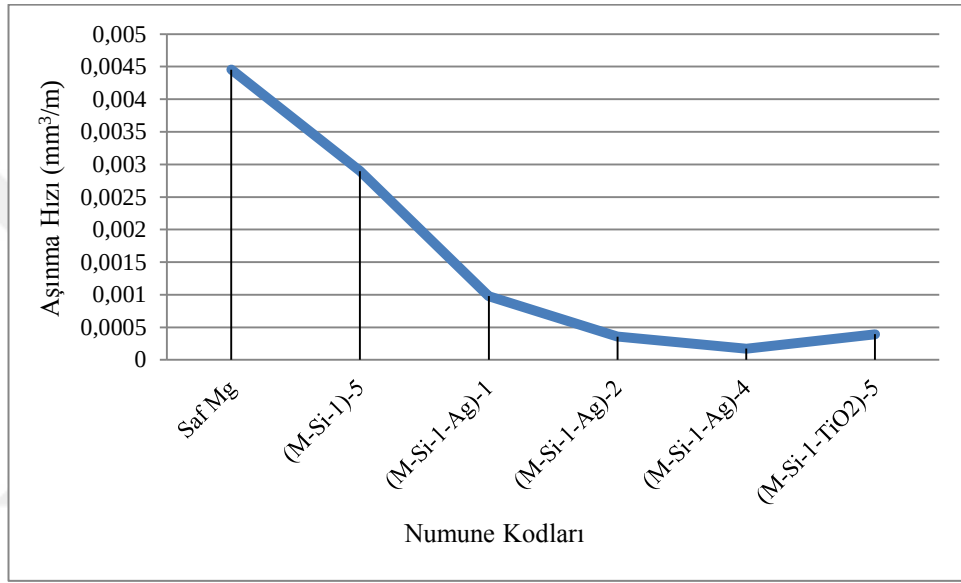
Şekil 7.19. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5, (M-Si-1)-10, (M-Si-1)-15 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler

Şekil 7.20.'de saf magnezyum ve gümüş takviyeli numunelerin aşınma hızı değerleri verilmiştir. Artan gümüş takviyesi ile birlikte numunelerin daha iyi aşınma dayanımı gösterdiği görülmüştür. (M-Si-1-Ag)-1 kodlu numunede %79.55, (M-Si-1-Ag)-2 kodlu numunede %90.91, (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunede %95.45 oranında iyileşme görülmüştür. Bu durum hakkında detaylı bilgi Bölüm 7.5.'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 7.20. Saf magnezyum ve (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler

Şekil 7.21.'de saf magnezyum, kaplama işlemi uygulanan gümüş katkılı numuneler ile (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4 ve TiO_2 katkılı (M-Si-1- TiO_2)-5 numunelerinin aşınma hızlarında meydana gelen değişimler grafik halinde verilmiştir. Tüm numuneler kıyaslandığında gümüş katkılı numunelerde diğerlerine oranla daha yüksek aşınma dayanımı gözlemlenmiştir. (M-Si-1)-5 kodlu numuneye yapılan TiO_2 ilavesinin de gümüş katkısı ile benzer özellikler ortaya koyduğu görülmektedir. Bu durumun sebepleri Bölüm 7.5.'de detaylı olarak belirtilmiştir.



Şekil 7.21. Saf magnezyum ve (M-Si-1)-5, (M-Si-1-Ag)-1, (M-Si-1-Ag)-2, (M-Si-1-Ag)-4, (M-Si-1- TiO_2)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında aşınma hızında gözlemlenen değişimler

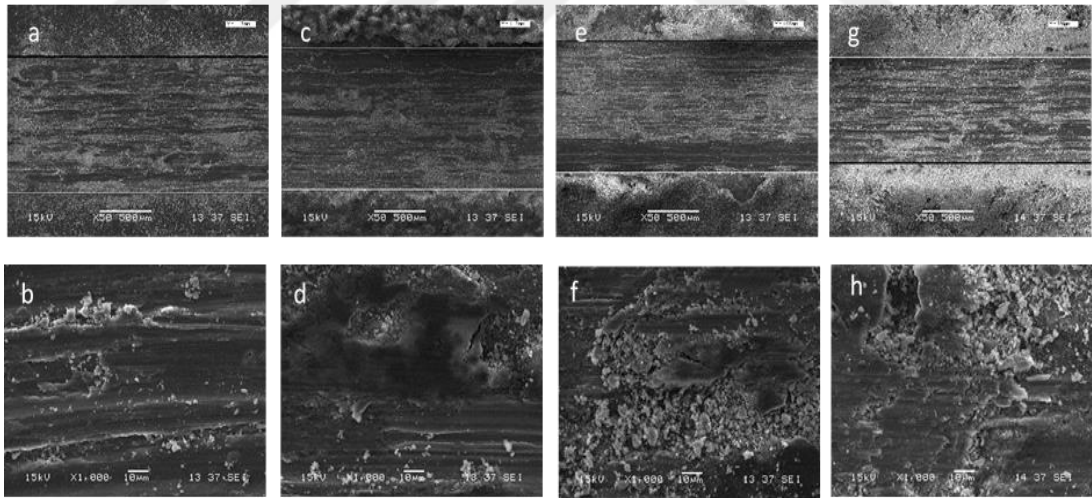
7.5.2. Aşınma izlerine ait taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 7.22.'de saf Mg, (M-Si-1)-5, (M-Si-2)-5, (M-Si-3)-5 kodlu numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntülerini göstermektedir.

Uygulanan 3N yük altında silikat esaslı kaplanan numuneler ile kaplanmış saf Mg'un aşınma izleri kıyaslandığında, saf Mg ve (M-Si-1)-5 kodlu numunelerin (M-Si-2)-5 ve (M-Si-3)-5 MAO kaplamalarından daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak buna rağmen bu numunelerin hacimsel aşınma oranları daha düşük hesaplanmıştır. Bu durum aşınma alanını hesaplarken iz derinliğinin de önemli olduğunu vurgulamaktadır. Profilometre ile aşınma izi derinliği ölçülen (M-Si-2)-5 ve (M-Si-

3)-5 nolu numunenin aşınma izi derinliği daha derindir. Şekil 7.22.(e) ve Şekil 7.22.(f)' de açıkça görülmektedir. Bu numunelerin MAO işlemi sonrası yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu, yüzeyden kopan ve aşındırıcı görevi gören kırılğan ve sert kısımlardan dolayı daha çok aşındığı görüşüne varılmıştır. Bu durum aşınma izi derinliğinde artışa neden olmuş ve hesaplamalarda alınan verilerde bu tezin doğruluğunu savunmaktadır.

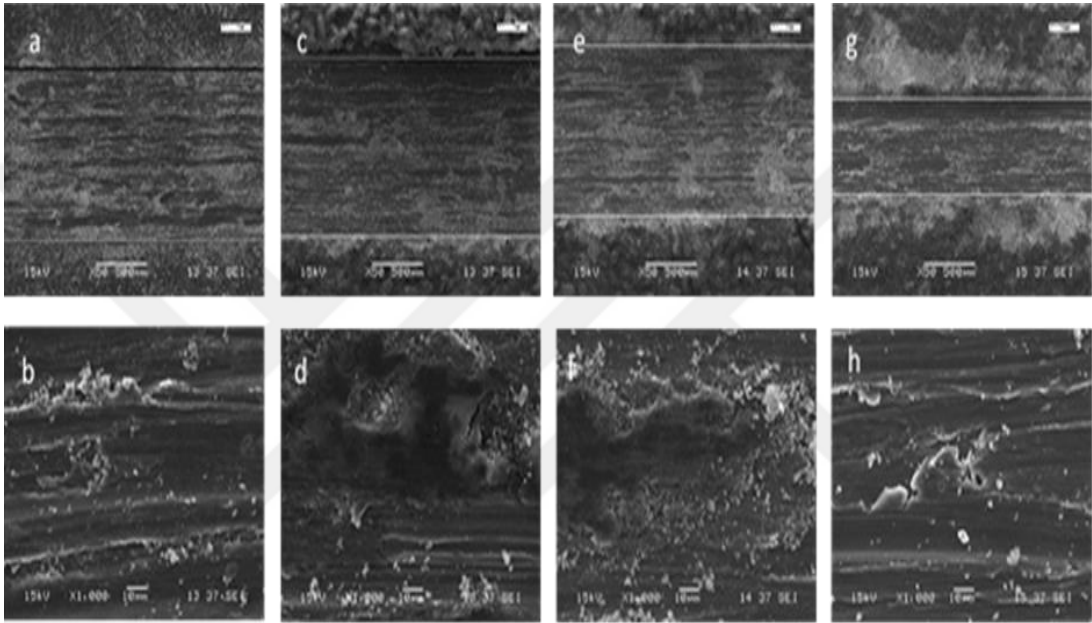
(M-Si-3)-5 kodlu numunede kaplama sonrası bile yüzeyde ufak dökülmeler meydana gelmiştir. Yani düşük adezyona sahip oksit tabakasının kalkması çok daha kolay olacaktır. Bu kopan parçalar hem yeniden bir pasif yüzey oluşmasına sebep olabilirler hem de karşı yüzeye sıvanabilirler. Bu tabaka da karşı yüzeye sıvanan bu parçaların etkisiyle sürekli olarak aşınmaya maruz kalır ve sonuçta bu sürekli aşınma hali hem taban malzemeyi ve hem de kaplamayı parçalar. Bu malzemenin ve tabakanın parçalanmasıyla metal kaybı artar ve yüzey gitgide daha pürüzlü bir hal alır.



Şekil 7.22. (a-b) Saf magnezyum ve (c-d) (M-Si-1)-5, (e-f) (M-Si-2)-5, (g-h) (M-Si-3)-5 kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları

Şekil 7.23.'de saf Mg, (M-Si-1)-5, (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.23.'de verilen görseller ile MAO kaplama süresinin aşınma davranışını nasıl etkilediğini tartışılmıştır. Saf magnezyum aşınmış yüzeyin kaplanmış numunelere göre maksimum olduğu görülmektedir.

Ayrıca zamanla aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Zamanın artması kaplamalı numunelerde aşınma şiddetinin azalmasına ve yivlerin derinliklerinin azalmasına neden olmuştur. Artan kaplama süresi ile daha yoğun bir tabaka oluşmakta, kaplama tabakası daha iyi bir yapışma dayanımı göstermektedir ve bu durum aşınma direncini iyileştirmiştir. Kaplamanın altlığı daha iyi yapışması daha yoğun bir kaplama olduğunu göstermekte olup aşınma izi derinliğini olumlu anlamda etkilemektedir.



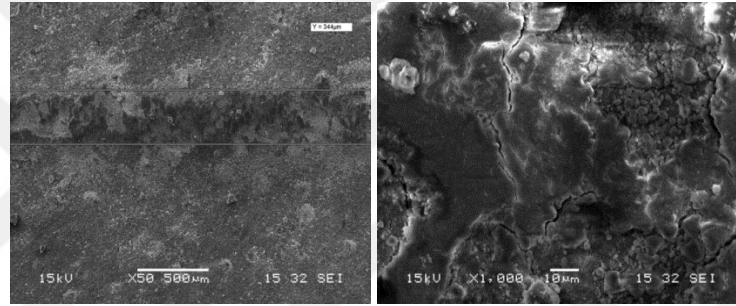
Şekil 7.23. (a-b) Saf magnezyum ve (c-d) (M-Si-1)-5, (e-f) (M-Si-1)-10, (g-h) (M-Si-1) 15, kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları

Şekil 7.24.'de içerisinde %0,1 g/L AgNO_3 , %0,2 g/L AgNO_3 , %0,4 g/L AgNO_3 katkısı bulunan numunelere ait aşınma iz genişliği görüntüleri sunulmuştur.

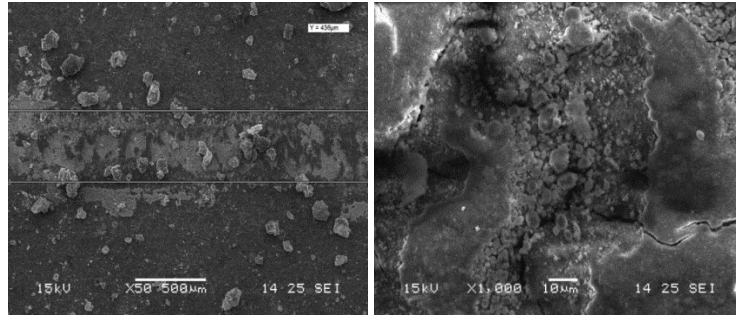
Gümüş ilavesi ile oksitlenmiş malzemelerin aşınma mekanizması doğrudan taban malzemeye oksit tabaka arasındaki adezyona, tabaka yoğunluğuna ve yüzey pürüzlülük durumuna bağlıdır. Gümüş ilaveli olan numuneler ilavesiz olanlara göre, daha yoğun bir tabaka oluşturduğu ve yüzey pürüzlülüğünün bir nebze azalması sebebi ile aşınma iz genişlikleri diğer grup numunelere göre daha ince ölçülmüştür. Bu durum daha yoğun bir tabaka oluşmuş olmasından ve mikroporların azalmış olmasından kaynaklanmaktadır. Alınan iz görüntülerinden de iz derinliğinin her üç

numune grubu içinde çok derinleşmediği Şekil 7.24. (a), (c), (e) 'de net olarak görülmektedir.

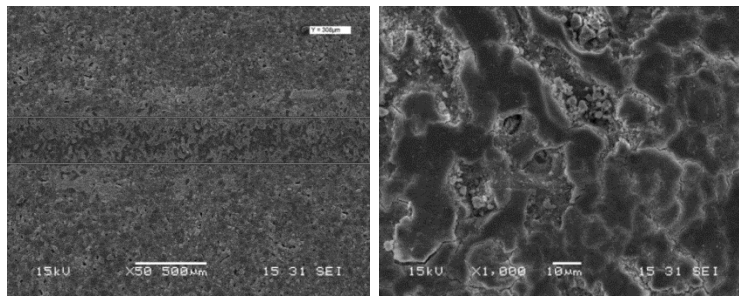
Şekil 7.24.'de yüksek büyütmelerde ki SEM görüntülerine bakıldığında, gümüş ilavesi ile birlikte aşınmanın abraziflik derecesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yer yer plastik deformasyonun olduğu ancak yüzeyde gümüş ilaveliler gibi derin yiv oluşumlarının meydana gelmediği görülmektedir. Gümüş konsantrasyonu düşük olan numunenin kaplama tabakasında aşınma sonucunda belirli bölgelerde meydana gelen mikro çatlak oluşumları görülmüştür. Mikro çatlaklar bir araya gelerek kaplamayı kazıyarak yüzeyden atılmasına sebep olan kaplama hasarlarına neden olmaktadır.



(a)(b) (M-Si-1-Ag)-1



(c)(d) (M-Si-1-Ag)-2



(e)(f) (M-Si-1-Ag)-4

Şekil 7.24. (a)(b) (M-Si-1-Ag)-1, (c)(d) (M-Si-1-Ag)-2, (e)(f) (M-Si-1-Ag)-4 kodlu numunelerde 3N yük altında kaplama yüzeyinin X1000 büyütmede aşınma izi SEM fotoğrafları

BÖLÜM 8. SONUÇLAR

Saf magnezyum alaşımına Na_2SiO_3 ve Na_3PO_4 çözeltisi, farklı oranlarda gümüş nitrat ilavesi ile nano- TiO_2 ilavesinin ve değişen kaplama süresine bağlı olarak elde edilen kaplamaların özellikleri ve işlem parametrelerindeki değişimlerin kaplama yapısına olan etkisi aşağıda özetlenmektedir.

1. Silikat esaslı ve gümüş takviyeli kaplamalarda numune yüzeyleri başarı ile kaplanmıştır. Elektrolitik çözeltisindeki değişim kaplama yüzey morfolojisini değiştirmiştir. Artan silikat ilavesiyle yüzeyde dökülmeler meydana gelmiş, gümüş takviyesiyle de daha yoğun bir kaplama tabakası elde edilmiştir.
2. Gümüş takviye edilen kaplamalarda mikroporlar küçülme göstermiş ve yüzey daha pürüzsüz bir hale dönüşmüştür. Kaplama sonrasında kaplamaların yapısında magnezyum, MgO , Mg_2SiO_4 fazları oluşmaktadır. Mg_2SiO_4 fazı artan süre neticesinde oluşum göstermiştir.
3. Silikat esaslı kaplamalarda aşınma dayanımı iyileşme göstermiştir. Artan silikatla birlikte aşınma dayanımı azalmıştır.
4. Gümüş ilaveli kaplamalarda aşınma dayanımı silikat esaslılara göre daha iyi sonuç vermiştir. Gümüş ilavesi ile azalan mikroporlar aşınma dayanımını iyileştirmiştir. Benzer durum TiO_2 takviyeli kaplamaların aşınma dayanımı için de söz konusudur.
5. SEM görüntüleri incelendiğinde silikat esaslı kaplanan numuneler ile kaplanmış saf Mg'un aşınma izleri kıyaslandığında, saf Mg ve (M-Si-1)-5 kodlu numunelerin aşınma izlerinin (M-Si-2)-5 ve (M-Si-3)-5 MAO kaplamalardan daha büyük olduğu görülmüştür. (M-Si-3)-5 kodlu numunede

kaplama sonrası bile yüzeyde ufak dökülmeler meydana gelmiştir. (M-Si-1)-10 ve (M-Si-1)-15 kodlu numunelerde süre artışı ile beraber kaplamalı numunelerin aşınma şiddeti azalmış ve daha yoğun bir tabaka elde edilmiştir. Gümüş ilaveli numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise gümüş ilavesi ile birlikte aşınmanın abraziflik derecesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük gümüş konsantrasyonu değerinde ise kaplama tabakasında aşınma sonucunda birtakım mikro çatlak oluşumları gözlemlenmiştir.

6. Yapılan ölçümler sonrasında kaplama sonrası elde edilen sertlik değerlerinde iki ila üç katlık artış tespit edilmiştir. Artan süre ve silikat çözeltisindeki artış sertlik sonuçlarını olumlu yönde etkilemiştir.

BÖLÜM 9. ÖNERİLER

1. Gümüş takviyesi yapılan malzemelerin antibakteriyellik özelliğini iyileştirmek amacı ile korozyon testi yapılabilir.
2. MAO ile kaplanan numunelerin korozyon dayanımları korozyon deneyi ile test edilebilir.
3. Aşınma deneyleri kuru ortam yerine farklı cins yağlayıcı içerisinde devam ettirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tatar, B., 2015, AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Homojenizasyonu İle Mikro Ark Oksidasyon Kaplama Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [2] Gözüaık, N.K., 2012, AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolit Bileşiminin Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Durdu, S., 2010, Saf Magnezyumun Mikroark Oksidasyon Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [4] Sener, E., 2014, AZ91D Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonu Ve Mühürleme Yöntemi İle Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Yavuz, H.G., 2011, Mikro Ark Oksidasyon İşlemi Uygulanan AZ91 Kalite Magnezyum Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Kılıç, D., 2013, AZ91D Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolite Karbon Nanotüp İlavesinin Yüzey Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Li, Y., Guan, Y., Zhang, Z., Ynag, S., 2019, Enhanced bond strength for micro-arc oxidation coating on magnesium alloy via laser surface microstructuring, Applied Surface Science, 478, 866-871.
- [8] Rúa, J.M., Zuleta, A.A., Ramírez, J., Fernández-Morales, P., 2019, Micro-arc oxidation coating on porous magnesium foam and its potential biomedical applications, Surface & Coatings Technology, 360, 213-221.
- [9] Bai, L., Dong, B., Chen, G., Xin, T., Wu, J., Sun, X., 2019, Effect of positive pulse voltage on color value and corrosion property of magnesium alloy black micro-arc oxidation ceramic coating, Surface & Coatings Technology, 374, 402-408.

- [10] Aktuğ, S.L., Durdu, S., Kutbay, I., Usta, M., 2016, Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentration on microstructure and mechanical properties of plasma electrolytic oxide coatings on AZ31 Mg alloy produced by twin roll casting, *Ceramics International*, 42, 1246-1253.
- [11] Li, N., Chen, Y., Deng, B., Yue, J., Qu, W., Yang, H., He, Y., Xia, W., Li, L., 2019, Low temperature UV assisted sol-gel preparation of ZrO_2 pore-sealing films on micro-arc oxidized magnesium alloy AZ91D and their electrochemical corrosion behaviors, *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1036-1044.
- [12] CHU, C., HAN, X., BAI, J., XUE, F., CHU, P., 2014, Surface modification of biomedical magnesium alloy wires by micro-arc oxidation, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24, 1058-1064.
- [13] Ge, Y., Jiang, B., Liu, M., Wang, C., Shen, W., 2014, Preparation and characterization of the micro-arc oxidation composite coatings on magnesium alloys, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2, 309-316.
- [14] Zhang, R.F., Zhang, S.F., 2009, Formation of micro-arc oxidation coatings on AZ91HP magnesium alloys, *Corrosion Science*, 51, 2820- 2825.
- [15] Singh, K., Singh, G., Singh, H., 2018, Review on friction stir welding of magnesium alloys, *Journal of Magnesium and Alloys*, 6, 399-416.
- [16] Ma, H., Gu, Y., Liu, S., Che, J., Yang, D., 2017, Local corrosion behavior and model of micro-arc oxidation HA coating on AZ31 magnesium alloy, *Surface & Coatings Technology*, 331, 179-188.
- [17] Martin, J., Nominé, A.V., Stef, J., Nominé, A., Zou, J.X., Henrion, G., Grosdidier, T., 2019, The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy, *Materials and Design*, 178, 107859.
- [18] Zhang, R.F., 2010, Film formation in the second step of micro-arc oxidation on magnesium alloys, *Corrosion Science*, 52, 1285-1290.
- [19] Oğuz, B., 1989, *Malzeme Bilgisine Giriş*, İstanbul: Oerlikon Yayını.
- [20] Öztürk, F., Kaçar, İ., 2012, Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 12-20.
- [21] Gao, H., , Zhang, M., Yang, X., Huang, P., Xu, K., 2014, Effect of Na_2SiO_3 solution concentration of micro-arc oxidation process on lap-shear strength of adhesive-bonded magnesium alloys, *Applied Surface Science*, 314, 447-452.

- [22] Mert, F., Özdemir, A., Karataş, Ç., 2010, Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi, Politeknik Dergisi, 13, (3), 165-176.
- [23] Yan, X., Zhao, M.C., Yang, Y., Tan, L., Zhao, Y.C., Yin, D.F., Yang, K., Atrens, A., 2019, Improvement of biodegradable and antibacterial properties by solution treatment and micro-arc oxidation (MAO) of a magnesium alloy with a trace of copper, Corrosion Science, 156, 125-138.
- [24] Tang, H., Gao, Y., 2016, Preparation and characterization of hydroxyapatite containing coating on AZ31 magnesium alloy by micro-arc oxidation, Journal of Alloys and Compounds, 688, 699-708.
- [25] Chen, J., Tan, L., Yu, X., Etim, I.P., Ibrahim, M., Yang, K., 2018, Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 87, 68-79.
- [26] Hornberger, H., Virtanen, S., Boccaccini, A.R., 2012, Biomedical coatings on magnesium alloys – A review, Acta Biomaterialia, 8, 2442-2455.
- [27] Yılmaz, S.M., Clare, T.A., Şahin, O., (2016). Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Prosesinin, Eklemeli Üretim (AM) Metodu ile Uyumluluğunun Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 (Özel Sayı), 36-41.
- [28] Xue, W.B., Deng, Z.W., Chen, R.Y. and Zhang, T.H., 2000, Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on AlCu-Mg alloy, Thin Solid Films, 372, 1-2, 114-117.
- [29] Blawert, C., Sah, S.P., Scharnagl, N., Kannan, M.B., 2015, Plasma electrolytic oxidation/micro-arc oxidation of magnesium and its alloys, Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications, 193-234.
- [30] Muhaffel, M.R., 2012, Mikro Ark Oksidasyon İşlemi Uygulanmış Silisyum Karbür Takviyeli AZ91D Magnezyum Alaşımının Korozyon Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Altay, M., 2012, AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektriksel Parametrelerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [32] Darband, G.B., Aliofkhazraei, M., Hamghalam, P., Valizade, N., 2017, Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications, *Journal of Magnesium and Alloys*, 5, 74-132.
- [33] Li, L., Kong, Y., Kim, H., Kim, Y., Kim, H., Heo, S., Koak, J., 2004, Improved Biological Performance of Ti Implants due to Surface Modification by Micro-arc Oxidation, *Biomaterials*, 25, 2867-2875.
- [34] Kalkancı, N.H., 2004, Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alaşımlı Malzemelere Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [35] Fukuda, T., Kakuhari, T., 2007, New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite, *Journal of The Surface Finishing Society of Japan*, 58,(6), 357-360.
- [36] Malayoğlu, U., Tekin, K.C., Çakmak, E., 2008, Plazma Elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, *Mühendis ve Makina*, 49,(582), 3-9.
- [37] Adalı, R., 2011, Alüminyum-Magnezyum İkili Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Kaplama Davranışına Magnezyum Miktarının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [38] Şenol, E., Ölüç, S., 2018, Şeffaf Camların Erozyon Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Trabzon.
- [39] Demirbaş, Ç., 2019, Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanmış Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve SÖĞÜT

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2022
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lise	Eskişehir Toki Şehit İsmail Tetik Anadolu Lisesi	2014

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanan Saf Magnezyuma Çözelti Parametrelerinin Etkisi