

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON YÖNTEMİYLE 7075
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ BOR İÇERİKLİ ELEKTROLİT
ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDE KAPLANMASI**

BERKE GÜLTEKİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: PROF. DR. METİN USTA

OCAK 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON YÖNTEMİYLE
7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ BOR İÇERİKLİ
ELEKTROLİT ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDE KAPLANMASI

BERKE GÜLTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. METİN USTA

OCAK 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**COATING OF 7075 ALUMINUM ALLOY USING THE
PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION METHOD IN A
BORON CONTAINING ELECTROLYTE SOLUTION**

BERKE GÜLTEKİN

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND
ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. METİN USTA

JANUARY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 13/01/2025 tarih ve 2025/05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/01/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Berke GÜLTEKİN'in tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Salim Levent AKTUĞ

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇAVUŞLU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

7075 alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi çinko olup %5 ile %6 arasında değişen çinko oranına sahiptir. yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde tercih edilmektedir.

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımı üzerine plazma elektrolitik oksidasyon işlemi kullanılarak bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde kaplanması ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada sodyum silikat ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve potasyum hidroksit (KOH) içeren ana çözelti içerisine farklı oranlarda sodyum tetraborat ($\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) ilave edilerek iki farklı elektrolit çözeltisi hazırlanmış, 0.702 A/cm^2 sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık sürelerde kaplamalar başarıyla üretilmiştir. Değişen sodyum tetraborat miktarının ve kaplama sürelerinin; kaplama kalınlığı, kaplama faz kompozisyonu, yüzey pürüzlülüğü, mikro yapı, elementel kompozisyon, aşınma direnci ve sertlik gibi malzeme özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kaplama yapısında alüminyum borat ($\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), gama alümina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ve alfa alümina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) fazlarının olduğu belirlenmiştir. İki farklı elektrolit çözeltisinde ve farklı sürelerde gerçekleştirilen kaplamalar sonucunda elde edilen ortalama kaplama kalınlığı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artan sodyum tetraborat oranı ve kaplama süresiyle birlikte arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerde gözenekli morfoloji gözlemlenmiştir. 40 g/L sodyum tetraborat içeren elektrolit çözeltisinde 20 dakikalık kaplama süresinde üretilen kaplamada altlık metale göre 15 kat daha yüksek aşınma direnci elde edilmiştir. Sertlik değerleri tüm deney parametrelerinde ortak olarak altlık metale göre artış belirlenmiştir.

Elde edilen veriler ışığında plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi kullanılarak bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde üretilen kaplamaların 7075 alüminyum metalinin kullanım alanını genişletebileceği düşünülmüş ve bu kullanım alanlarındaki servis ömrünü uzatabileceğine dair olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO), Alüminyum ve Alaşımları, Yüzey Modifikasyonu, Aşınma Direnci.

ABSTRACT

The main alloying element of 7075 aluminum alloys is zinc, with a zinc content ranging from 5% to 6%. 7075 alloys, are preferred in sectors such as automotive and aerospace due to their high strength- to-weight ratio.

In this study, it was aimed to coat 7075 aluminum alloy in boron-containing electrolyte solution using plasma electrolytic oxidation process and to improve its mechanical properties. In the study, two different electrolyte solutions were prepared by adding different ratios of sodium tetraborate ($\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) into the main solution containing sodium silicate ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) and potassium hydroxide (KOH), and coatings were successfully produced at a constant current density of 0.702 A/cm^2 for 5, 10, 15, 20 and 25 minutes. The effects of varying sodium tetraborate amount and coating times on material properties such as coating thickness, coating phase composition, surface roughness, microstructure, elemental composition, wear resistance and hardness were investigated. According to the results obtained, it was determined that aluminum borate ($\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$), mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) and alpha alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) phases were formed in the coating structure. It was determined that the average coating thickness and average surface roughness values obtained as a result of coatings performed in two different electrolyte solutions and for different times increased with increasing sodium tetraborate ratio and coating time. In the electrolyte solution containing 40 g/L sodium tetraborate, 15 times higher wear resistance was obtained in the coating produced in 20 minutes coating time compared to the base metal. Hardness values were determined to increase in common in all experimental parameters compared to the base metal.

In the light of the data obtained, it is thought that coatings produced in boron-containing electrolyte solution using plasma electrolytic oxidation method can expand the usage area of 7075 aluminum metal and positive results have been obtained that can extend the service life in these usage areas.

Keywords: Plasma Electrolytic Oxidation (PEO), Aluminum and Alloys Surface Modification, Wear Resistance.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan ve yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Metin USTA'ya ve süreç boyunca değerli destekleri için hocam Dr. Öğr. Üyesi Salim Levent AKTUĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında ve sonrasında yardımcı olan Adem ŞEN'e, Ahmet NAZIM'a, Öğr. Gör. Hatice Yasemin İSKENDER'e, Arş. Gör. Ahmet KAVUKCU'ya, Arş. Gör. Seda KOL'a ve Arş. Gör. Dr. Mehmet SEZER'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana yol gösteren, ilham veren ve destekleyen tüm hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında, her kararında beni destekleyen ve yanımda olan annem Aylin GÜLTEKİN'e ve babam Şevki GÜLTEKİN'e teşekkür ederim.

Son olarak varlığını ve desteğini her zaman hissettiğim, her anımda yanımda olan kız arkadaşım Pınar ÇETİN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM METALİNİN ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	4
2.1.1. 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	4
2.1.2. 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	5
2.1.3. 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	5
2.1.4. 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	5
2.1.5. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	5
2.1.6. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	6
2.1.7. 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	6
2.1.8. 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	6
2.2. 7075 Alüminyum Alaşımı Özellikleri	6
3. PEO KAPLAMA YÖNTEMİ	8
3.1. PEO Prosesi	8
3.2. PEO'ya Etki Eden Parametreler	11
3.2.1. Altlık Malzeme	12
3.2.2. Elektrolit Çözeltisi	12
3.2.3. İşlem Süresi	16
3.2.4. Akım Yoğunluğu	17
3.2.5. Frekans	18
3.3. 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Bor İçerikli Elektrolit Çözeltisinde Gerçekleştirilen PEO Uygulamaları	19
4. ÇALIŞMANIN AMACI	20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
5.1. Deneyde Kullanılan Altlık Malzeme	21
5.2. PEO Kaplama İşlemi	21
5.3. X-Işınları Kırınımı Analizi	23
5.4. Yüzey ve Mikroyapı Karakterizasyonu	23
5.5. Yüzey Pürüzlülüğü	23
5.6. Kaplama Kalınlığı	23
5.7. Aşınma Testi	24
5.8. Mikro Sertlik Ölçümü	24

6. BULGULAR ve TARTIŞMA	25
6.1. X-Işınları Kırınımı Analizi	25
6.2. Yüzey Pürüzlülüğü	29
6.3. Kaplama Kalınlığı	32
6.4. Aşınma Testi	33
6.5. Sertlik Testi	36
6.6. Yüzey ve Mikroyapı Karakterizasyonu	39
6.6.1. Yüzey Karakterizasyonu	39
6.6.2. Kesit Karakterizasyonu	43
6.6.3. Yüzey ve Kesit EDS Sonuçları	45
7. GENEL SONUÇLAR	58
 KAYNAKLAR	 60
ÖZGEÇMİŞ	67
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Alfa
θ	: Teta
%	: Yüzde
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
μm	: Mikrometre
$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	: Mullit
A	: Amper
Al	: Alüminyum
$\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$	: Alüminyum Borat
$\text{Al}(\text{OH})_3$	: Alüminyum Hidroksit
$\text{Al}_2\text{H}_2\text{O}$	: Alümina Hidrat
Al_2O_3	: Alümina
AlOOH	: Alüminyum Oksihidroksit
B	: Bor
$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	: Karbamid
cm	: Santimetre
Cu	: Bakır
CVD	: Kimyassal Buhar Biriktirme
dk	: Dakika
dm	: Desimetre
EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
F	: Flor
Fe	: Demir
gr	: Gram
H	: Hidrojen
H_2O	: Su
HV	: Vickers Sertliği
K	: Kelvin
K_2TiF_6	: Potasyum Florotitanat
K_2ZrF_6	: Potasyum Florozirkonat
KF	: Potasyum Florür
KMnO_4	: Potasyum Permanganat
KOH	: Potasyum Hidroksit
L	: Litre
$\text{La}(\text{NO}_3)_3$	: Lantanyum Nitrat
Li	: Lityum
m	: Metre
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
N	: Newton
$\text{Na}_2(\text{B}_2\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	: Sodyum Tetraborat
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat
$\text{Na}_2\text{SiO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	: Sodyum Metasilikat
$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	: Sodyum Tungstat Dihidrat
Na_3PO_4	: Trisodyum Fosfat

NaAlO ₂	: Sodyum Alüminat
NaH ₂ PO ₄	: Monosodyum Fosfat
Nb	: Niyobyum
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂ •4H ₂ O	: Amonyum Molibdat Tetrahidrat
O	: Oksijen
OH ⁻	: Hidroksil
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
sn	: Saniye
Ti	: Titanyum
V	: Volt
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektrometresi
XRD	: X-Işını Kırınımı
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: 7075 alaşımı içerisinde ekstrüzyon yönünde yönlenmiş çökeltiler.	7
Şekil 3.1: PEO yöntemiye üretilen kaplamaların oluşum aşamaları.	9
Şekil 3.2: Alüminyum alaşımı üzerine PEO yöntemiyle elde edilen kaplamaların mikro yapısı.	11
Şekil 5.1: PEO kaplama sistemi şeması.	22
Şekil 6.1: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda 5 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait XRD grafiği.	25
Şekil 6.2: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda 40 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait XRD grafiği.	26
Şekil 6.3: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin süreye bağlı değişimi.	29
Şekil 6.4: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının 3 boyutlu yüzey haritalama görüntüleri; 5 g/L: (a) 5 dk, (c) 10 dk (e) 15 dk, (g) 20 dk (j) 25 dk, 40 g/L: (b) 5 dk, (d) 10 dk (f) 15 dk (h) 20 dk (k) 25 dk.	31
Şekil 6.5: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama kalınlık değerlerinin süreye bağlı değişimi.	32
Şekil 6.6: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama aşınma hızı değerlerinin süreye bağlı değişimi.	33
Şekil 6.7: Gerçekleştirilen aşınma analizi sonrasında elde edilen aşınma izi örneği.	34
Şekil 6.8: 0.702 A/cm ² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama sertlik değerlerinin süreye bağlı değişimi.	36
Şekil 6.9: Elde edilen kaplamaların ortalama sertlik değerlerinin ölçüm örneği.	37
Şekil 6.10: 5 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisi içinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait yüzey morfolojisi görüntüleri; (a) (b) 5 dk, (c) (d) 10 dk, (e) (f) 15 dk, (g) (h) 20 dk, (j) (k) 25 dk.	40
Şekil 6.11: 40 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisi içinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait yüzey morfolojisi görüntüleri; (a) (b) 5 dk, (c) (d) 10 dk, (e) (f) 15 dk, (g) (h) 20 dk, (j) (k) 25 dk.	41
Şekil 6.12: Kaplama yüzeyinde yer alan deşarj kanalı ve mikro çatlak yapıları.	42
Şekil 6.13: 5 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisi içinde 25 dakika kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait kesit görüntüsü.	43
Şekil 6.14: Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait kesit morfolojisi görüntüleri; 5 g/L: (a) 5 dk (c) 10 dk, (e) 15 dk, (g) 20 dk, (j) 25 dk, 40 g/L: (b) 5 dk (d) 10 dk, (f) 15 dk, (h) 20 dk, (k) 25 dk.	44
Şekil 6.15: AA7075-T6 alaşımına ve çökeltilere ait EDS sonuçları.	45

Şekil 6.16:	5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 5 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit	48
Şekil 6.17:	5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 10 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	49
Şekil 6.18:	5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	50
Şekil 6.19:	5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	51
Şekil 6.20:	5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 25 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	52
Şekil 6.21:	40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 5 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	53
Şekil 6.22:	40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 10 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	54
Şekil 6.23:	40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	55
Şekil 6.24:	40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	56
Şekil 6.25:	40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 25 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.	57

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1: Çalışmada kullanılan AA7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu.	21
Tablo 5.2: Kaplama parametreleri.	21

1. GİRİŞ

Yer kabuğunda en fazla bulunan 3. element olan alüminyum metali; hafifliği, iyi korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, inşaat, ambalaj ve elektronik gibi birçok farklı endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geri dönüştürülebilir bir malzeme olması performans ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Doğada oldukça bol bulunmasına karşın 1800'lü yılların başlarına kadar yeterli oranda saflaştırılamayan alüminyum metali, o dönemlerde altından daha pahalı olarak görülüyordu. 1825 yılında Danimarkalı kimyager Orsted ve 1827 yılında Alman kimyager Wöhler tarafından yapılan benzer deneylerle alüminyum metali yüksek oranda saflaştırılabilmesine karşın çalışmalar esnasında kullanılan yüksek maliyetli potasyum, bu prosesi ticari açıdan uygulanabilir olmasını engellemiştir. Alüminyum metalinin ilk büyük ölçekli endüstriyel üretimi 1886 yılında Amerikalı mühendis Charles Martin Hall ve Fransız mühendis Paul Heroult tarafından eş zamanlı gerçekleştirilen ve günümüzde Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen saflaştırma prosesiyle mümkün olmuştur. Ticari olarak kullanımı 19.YY sonlarında başlamış ve yeni alaşımların ortaya çıkışıyla artarak günümüze ulaşmıştır [1]-[4]. Alüminyum alaşımlarının sınıfları arasında yer alan 7XXX serisi (Al-Zn-Mg-Cu alaşım sistemi), düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım ve gerilim korozyon çatlamasına karşı direnç gibi üstün özelliklere sahiptir. 7075 Al alaşımı düşük yoğunluk, yüksek dayanım, süneklik, yorulma dayanımı gibi avantajlı özellikleri sayesinde başta havacılık olmak üzere yüksek gerilimli yapısal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Çökeltme sertleşmesi prosesi uygulanarak oluşturulan intermetalik bileşik çökeltileri sayesinde mukavemeti arttırılabilmektedir [5], [6].

Oksijene karşı güçlü bir çekim gücüne sahip son derece reaktif bir metal olduğundan, doğada saf alüminyum bulunmasını neredeyse imkansız hale getirir. Ancak, oksijenle birleşerek oluşturduğu alümina (Al_2O_3) yapısı sayesinde korozyon direnci gibi önemli özellikler kazanır [1]. Alüminyum metalinin ve alaşımlarının hafiflik, iyi dayanım, iyi korozyon direnci, kolay işlenebilirlik iyi elektrik ve ısı direnci gibi endüstriyel anlamda kullanım alanını genişleten avantajlı özellikleri bulunsa da mekanik ve tribolojik streslere maruz kaldığındaki servis ömürlerinin uzatılabilmesi için çeşitli

yüzey modifikasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknikler; plazma elektrolitik oksidasyon (mikro ark oksidasyon), anodik oksidasyon (elokal kaplama), soğuk püskürtme, termal püskürtme, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) şeklinde sıralanabilir [7]–[9]. Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi temel olarak malzeme yüzeyinde kararlı oksit tabakası oluşturarak malzemenin mekanik ve kimyasal dayanımını arttırmayı amaçlayan, başta alüminyum olmak üzere titanyum, magnezyum, zirkonyum, niyobyum ve alaşımlarına uygulanabilen bir yüzey modifikasyon tekniğidir [10]. Bu süreç güçlü bir elektrik alan varlığında katot ve anot arasında oluşan plazma durumu ve deşarj kanallarıyla karakterize edilmektedir [11], [12]. Elektrokimyasal reaksiyonlar, plazma kimyasal reaksiyonlar ve termal oksijen difüzyonu reaksiyonları gibi bir dizi karmaşık reaksiyon sonucunda gözenekli dış katman, yoğun iç katman ve arayüzeyden oluşan üç tabakalı kaplama elde edilir [13]. Bu teknik kullanılarak aşınma ve korozyon direnci yüksek, refrakter özellikte, termal olarak kararlı ve yüksek sertliğe sahip kaplamalar üretilebilirken, geliştirilen malzemeler biyomedikal, elektronik, otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi birçok farklı endüstride kullanılmaktadır [13], [14]. Akım yoğunluğu, frekans, işlem süresi gibi parametrelerde yapılan değişiklikler de kaplama morfolojisi ve özellikleri üzerinde farklılıklar yaratmaktadır [15]. Elde edilen kaplamaların kimyasal kompozisyonunu ve yapısını etkileyen en önemli parametre elektrolit çözeltisidir [16], [17].

Literatürde bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen plazma elektrolitik kaplama çalışmalarında altlık metal olarak; magnezyum alaşımları [18]–[25], titanyum alaşımları [26]–[30], alüminyum alaşımları [31]–[39] kullanılarak başarılı kaplamalar gerçekleştirilmiş elde edilen kaplamaların çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi kullanılarak bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde farklı sürelerde 7075 alüminyum alaşımı altlık metalinin yüzeyi kaplanarak sert, aşınma direnci yüksek kaplamalar elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen kaplamaların yapısı X-Işını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) yöntemleriyle analiz edilmiş, mekanik özellikleri ise aşınma testi, yüzey pürüzlülüğü analizi, kaplama kalınlığı analizi, mikro sertlik testi gibi yöntemler kullanılarak elektrolit çözeltisi kompozisyonundaki ve kaplama süresindeki değişimin malzeme özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

2. ALÜMİNYUM METALİNİN ÖZELLİKLERİ

Alüminyum; oksijen (%46) ve silisyumun (%28) ardından %8’lik oranıyla yerkürede en fazla bulunan 3.elementtir. Metalik ve parlak bir görünüme sahiptir. Yüzey merkezli kübik (YMK) birim hücre yapısına sahip olup ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 660°C’dir. Saf haliyle oldukça yumuşak ve sünek bir metal olarak tanımlanabilir. Yoğunluğu 2.7 g/cm³ olup yüksek bir güç-ağırlık oranına sahiptir. Ferromanyetik olmayan bir metal olduğu için elektrik ve elektronik endüstrisi için cazip bir malzemedir. Yüksek yorulma direncine sahiptir, mükemmel derecede elektrik ve ısı iletkenliği sağlamaktadır [1], [2].

Alüminyum üretimi genellikle gibsit, böhmit, diyaspor gibi toplu olarak boksit mineralleri şeklinde isimlendirilen cevherler üzerinden gerçekleştirilir. Boksit, ilk olarak 1821’de Fransız kimyager P.Earthier tarafından keşfedilmiş ve güney Fransa’da ki Arles kenti yakınlarında bulunan Les Beaux köyünden esinlenilerek bu cevhere “alumine hydrate des Beaux” adını vermiştir. Kırmızı renginden yola çıkılarak ilk keşfedildiğinde yüksek fırında kullanılabilecek demir cevheri olduğu zannedilmiş ancak bu amaçla kullanılmak için çok fazla Al₂O₃ içerdiği anlaşılmıştır. 1861’de Fransız metalurjist Henri Saint-Claire Deville tarafından “boksit” adlandırılmıştır. İlk yıllarda Al₂H₂O içerdiği düşünülürken gerçekleştirilen termal analizler sonucunda Al(OH)₃ ve AlOOH karışımını içerdiği belirlenmiştir [40]. 1825 yılında Danimarkalı kimyager Ørsted ve 1827’de Alman meslektaşı Wöhler, alümina kullanarak alüminyum metalini yüksek saflıkta elde etmek için benzer deneyler gerçekleştirdiler. Ancak bu süreçte kullanılan potasyumun yüksek maliyeti, ticari olarak uygulanabilirliğini sınırlamıştır. Alüminyum metalinin ilk büyük ölçekli üretimi ise 1886 yılında, Amerikalı mühendis Charles Martin Hall ve Fransız mühendis Paul Héroult tarafından eş zamanlı olarak geliştirilen ve günümüzde Hall-Héroult yöntemi olarak bilinen saflaştırma süreci sayesinde mümkün olmuştur [1]–[4]. 1888 yılında Karl Joseph Bayer tarafından geliştirilen ve patenti alınan, alüminanın saflaştırılması esasına dayanan Hall-Heroult prosesine ek olarak günümüzde dahi ticari anlamda kar getirecek şekilde boksit cevherinden alüminyum üretimine imkan tanıyan Bayer prosesi geliştirilmiş ve birincil alüminyum endüstrisinin bel kemiği oluşturulmuştur [2].

Boksit mineralinden alüminyum eldesi Bayer ve Hall-Heroult proseslerinin birbiri ardına uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. İlk aşamada Bayer prosesi kullanılarak boksit mineralleri içerisinde bulunan alüminyumun sıcak NaOH çözeltisi içerisinde $Al(OH)_3$ olarak çökmesi esasına dayanmaktadır ardından Hall- Heroult prosesi yani elektroliz uygulanarak alüminadan saf alüminyum üretilmektedir [41], [42].

2.1. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

Alüminyum alaşımları; TS2349'a göre dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılarak incelenmektedir. Döküm alüminyum alaşımlarının üretiminde tipik döküm işleminde olduğu gibi ergitme, kalıba dökme ve soğutma prosesleri kullanılmaktadır. Dövme alüminyum alaşımları ise bu proses adımlarına ek olarak dövülerek plastik deformasyona maruz bırakılır. Bu plastik deformasyon adımı iç yapıdaki süreksizliklerin giderilmesini sağlayarak daha kararlı bir iç yapı elde edilmesini sağlar. Amerikan Alüminyum Derneği'nin yayımlamış olduğu standarda göre dövme alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesinde dört rakam kullanılmaktadır. İlk rakam alüminyuma eklenen alaşım elementlerini belirtirken ikinci rakam alaşım elementlerinde herhangi bir değişiklik yapıp yapılmadığını simgeler. Üçüncü ve dördüncü rakamlar ise alaşımı etiketlemek için kullanılır. Benzer olarak döküm alüminyum alaşımları da isimlendirilirken dört rakam kullanılmaktadır. Kullanılan ilk rakam eklenen alaşım elementini temsil ederken ikinci ve üçüncü rakam alaşımı etiketlemek için kullanılır. Son iki rakam arasına nokta konularak dövme alüminyum alaşımlarından ayrılmaktadır. Noktadan sonraki rakam ise döküm sonrası elde edilen son ürünü temsil eder [43], [44].

2.1.1. 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

1XXX serisi alüminyum alaşımları yüksek saflıkta alüminyum alaşımı olarak nitelendirilebilir. Minimum %99 oranında alüminyum içermektedir [43]. Korozyon dayanımının yüksek ve elektriksel iletkenliğin önemli olduğu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Folyo üretimi, elektrik malzemeleri üretimi, tanker ve kamyon gövdeleri, mutfak araç gereçleri gibi kullanımları mevcuttur [45].

2.1.2. 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

2XXX serisi alüminyum alaşımları ana alaşım elementi olarak Cu içermektedir ancak düşük oranlarda başta Mg olmak üzere diğer alüminyum alaşım elementlerini de içerebilmektedir. Korozyon dayanımı diğer alüminyum alaşımı serilerine göre düşüktür. Çökelme sertleşmesi prosesi uygulanması sonrasında malzeme içerisinde Al_2CuMg bileşiği oluşturularak mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Havacılık sanayi, askeri ekipmanlar, otomotiv, hidrolik valf parçaları gibi birçok farklı alanlarda kullanılabilir [43], [45], [46].

2.1.3. 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

3XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi Mn'dir fakat az miktarda Fe ve Si de içerebilmektedir. Diğer alüminyum alaşımı serilerine göre en büyük avantajı kolay işlenebilmesi ve kaynaklanabilme kabiliyetinin yüksek olmasıdır. Çökelme sertleşmesi uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilemez. Yüksek boyut toleransı istenen çalışma alanlarında tercih edilmektedir [43], [45].

2.1.4. 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

4XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi Si'dir. Diğer alüminyum alaşımı serilerinden ayrılan özellikleri düşük ergime sıcaklığı sağlaması, esnekliği ve dökülebilirliğinin yüksek olmasıdır. Farklı yüzey modifikasyon işlemleriyle estetik görünüm kazandıklarından mimari uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Yüksek Si içeriği sayesinde yüksek korozyon direnci sağlar. Otomotiv sektöründe kullanılan birçok parçanın üretiminde tercih edilir [43], [45], [46].

2.1.5. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

5XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi Mg'dir. Mg içeriğinin yüksek olmasından dolayı dökülebilirliği ve sünekliği düşüktür fakat sertlik ve mukavemetlerini yüksektir. Özellikle deniz suyu korozyonuna karşı oldukça yüksek direnç sağlar. Havacılık, otomotiv, deniz taşımacılığı gibi endüstrilerde sıklıkla tercih edilir [45], [46].

2.1.6. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

6XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri Mg ve Si'dir. Çökelme sertleşmesi uygulandığında Mg_2Si bileşiği oluşturarak mukavemeti artırılabilir. 2XXX ve 7XXX serilerine göre dayanımları düşük olmasına rağmen şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve iyi korozyon direnci bu alaşım serisinin avantajlarındandır. Tüp, boru, çubuk ve profil gibi ekstrüzyon yöntemiyle üretilebilen ürünler için sıklıkla tercih edilir [43], [45], [46].

2.1.7. 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

7XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi Zn'dir. Çökelme sertleşmesi prosesi uygulandığında yapısında barındırdığı Zn ve Mg elementleri $MgZn_2$ bileşiğini meydana getirerek malzeme dayanımında artış sağlar. Yüksek mukavemet sağlayabilmesinden dolayı havacılık ve madencilik endüstrisi gibi yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Bununla birlikte çeşitli ev aletlerinin üretiminde de tercih edilmektedir [43], [45].

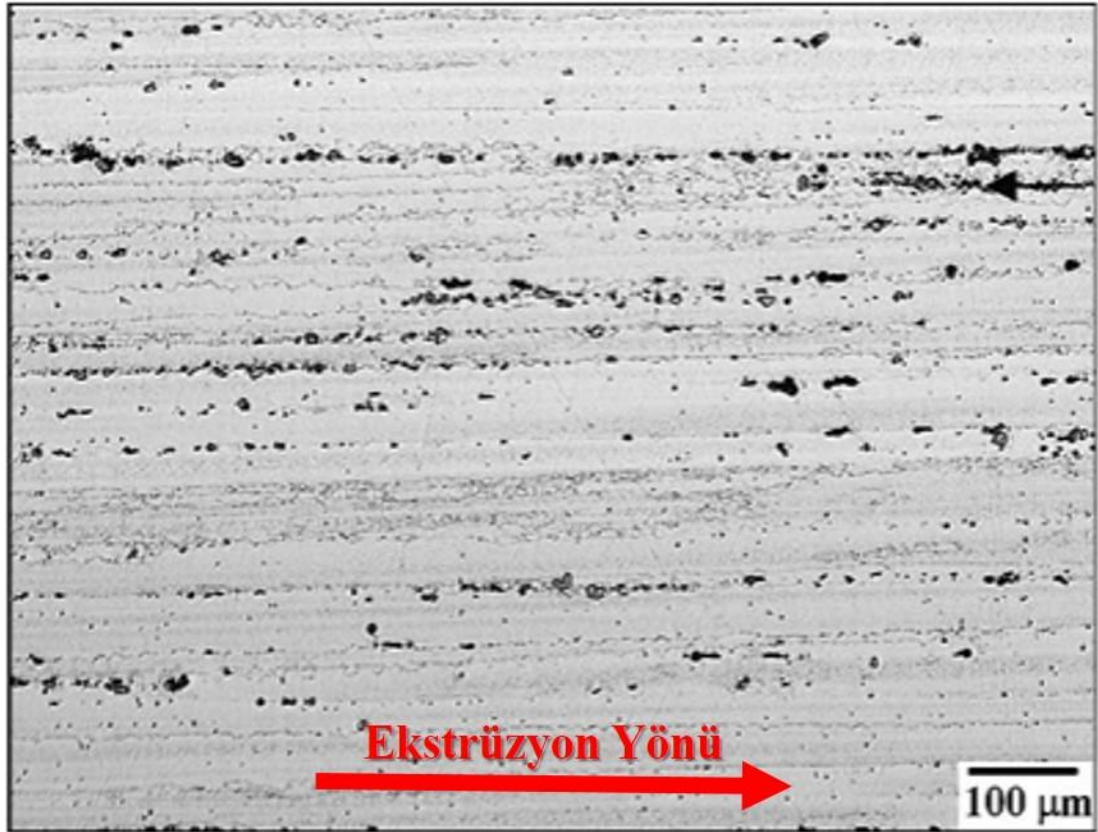
2.1.8. 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

8XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi Li'dir. İyi yorulma direnci ve tokluk özellikleri sağlamasıyla karakterize edilebilir. Diğer alüminyum alaşım serileriyle karşılaştırıldığında üretim maliyeti daha yüksektir. Hafiflik, çekme ve akma mukavemetlerinin yüksekliği sayesinde havacılık endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir [45], [46].

2.2. 7075 Alüminyum Alaşımı Özellikleri

7075 alüminyum alaşımları içerdiği maksimum %5.1 - %6.1 arasında değişen çinko miktarından dolayı alüminyum-çinko alaşımı olarak da adlandırılmaktadır. Ek olarak Mg ve Cu içerebilmektedir. Çökelme sertleştirilmesi uygulandığında $MgZn_2$ bileşiği oluşarak mukavemeti artırılabilir [47]. 7075 alüminyum serisi yüksek mukavemet/ağırlık oranıyla birlikte sağladığı iyi kullanım performansı ile birçok sektörde tercih edilmektedir [48].

Sağladığı yüksek mukavemet alaşım içerisinde yer alan Al-Zn-Mg-Cu sistemine dayalı heterojen mikroyapıların bir sonucudur. Oluşturabildiği intermetalik parçacıkların sayısı ve çeşitliliği oldukça fazladır [49]. 7075 alüminyum alaşımının mikroyapısı ile ilgili genelleme yapıldığında içeriğinde büyüklükleri 1 ile 20 mikrometre arasında değişen intermetalik bileşik çökeltileri içermektedir. $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$ ve Mg_2Si bileşikleri 7075 alüminyum alaşımı içerisinde sıklıkla bulunabilen intermetalik bileşiklerdendir. Bu bileşiklerin boyutu ve morfolojisi; döküm ve homojenizasyon prosesleri esnasında belirlenir ve yapıya bir miktar mukavemet kazandırır. Isıl işlem veya çökeltme sertleşmesi prosesleriyle faz yapıları değiştirilemez [50], [51]. Şekil 2.1’de taramalı elektron mikroskobunda çekilmiş 7075 alüminyum alaşımına ait intermetalik bileşik çökeltilerini içerren görüntü yer almaktadır. Bu bileşiklerin ipliksi formda ekstrüzyon yönüne doğru bir yönlenme eğiliminde olduğu görülebilmektedir [52].



Şekil 2.1 : 7075 alaşımı içerisinde ekstrüzyon yönünde yönlenmiş çökeltiler [52].

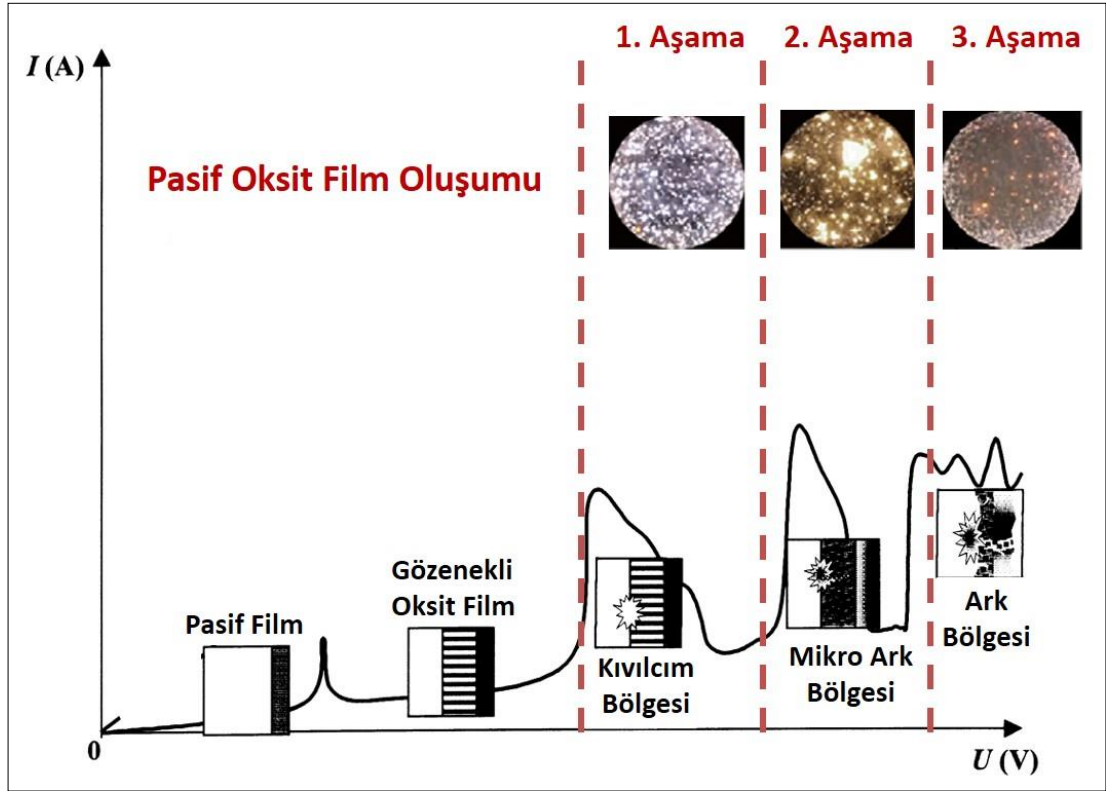
3. PEO KAPLAMA YÖNTEMİ

3.1. PEO Prosesi

Plazma elektrolitik oksidasyon; plazma kimyasal oksidasyon, kıvılcım deşarjı ile anodik oksidasyon [11], mikro ark oksidasyon veya anodik kıvılcım biriktirme olarak da bilinen [14], valf metallerin (Al, Ti, Mg, Zr, Nb ve alaşımları) yüzeyinde dayanıklı oksit seramik kaplamaların elde edilmesini sağlayan bir yüzey kaplama işlemidir. Geleneksel anodik oksidasyon kaplama prosesinin aksine plazma elektrolitik oksidasyon prosesi; genellikle silikat, fosfat, florür veya alüminat içerikli zayıf alkali olduklarından çevreye duyarlı olarak nitelendirilebilecek elektrolit çözeltileri içerisinde yüksek voltaj akımı ile oluşan elektrokimyasal oksidasyon temelinde gerçekleşmektedir [53], [54]. Plazma elektrolitik oksidasyon kaplamalarının oluşum mekanizmaları elektro-termal ve plazma-kimyasal reaksiyonların etkileşimleri nedeniyle karmaşıktır. Kaplama esnasında altlık metalin ve elektrolit çözeltisinin etkileşimleri ile birlikte amorf ve/veya kristalin fazlar içeren morfolojiler elde edilebilir [13], [16].

Bu kaplama prosesi ile birlikte; yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, refrakterlik, elektrik yalıtımı, yüksek termal kararlılık gibi özellikleri sağlayan kaplamalar üretilebilmektedir [14]. Elde edilen ürünler biyomedikal, otomotiv, havacılık, uzay ve elektronik gibi sektörlerde tercih edilmektedir Plazma elektrolitik oksidasyon tekniği ile kaplama oluşturulurken sistemde bir elektriksel bozunma yardımıyla bir plazma durumu üretilmektedir. Bu plazma durumu esnasında anodik polarizasyon altında altlık metal, oksijen ve elektrolit çözeltisi bir bileşim oluşturmaktadır [11].

Temel olarak işlem prosesi üç ana aşamaya ayrılabilir. Bu aşamalar Şekil 3.1’de verilmiştir. Elektrolit çözeltisi içerisine daldırılan numune valf malzeme olduğundan metal/elektrolit ara yüzeyinde yalıtkan pasif oksit film oluşturur [54].



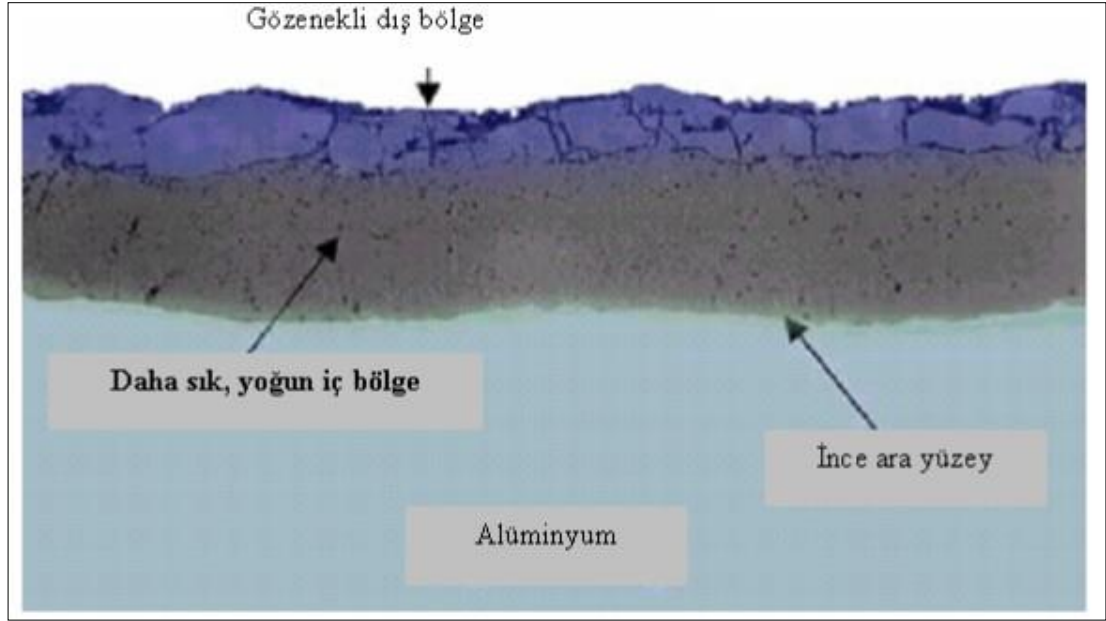
Şekil 3.1: PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların oluşum aşamaları [55].

İlk aşamada dielektrik kararlılığın kaybedilmesinin bir sonucu olarak deşarj kanallarının oluştuğu görülür. Dielektrik bozulma, altlık metal yüzeyinde oluşan pasif oksit filminin çeşitli zayıf bölgelerinde kıvılcım deşarjı ile birlikte meydana gelir. Ardından yüzeyde çok sayıda ince, beyaz ve uniform kıvılcım ortaya çıkar; bu durum, pasif oksit filmin bozulması ile ilişkilidir. Bu aşamada çok sayıda küçük ve uniform mikropor meydana gelmektedir [56]. Pasif oksit film tabakası bozulduğu esnada kıvılcımlar oluşmadan hemen önce altlık metal yüzeyinde ince buhar tabakası oluşur. Bu durum sistem üzerindeki anodik potansiyel yükselmesi ile açıklanabilir. Oluşan buhar tabakası, sistemin elektrik direncini artırıcı etki yapabilir dolayısıyla dielektrik bozulmayı başlatacak elektrik alanının belirli kritik değere ulaşması ve bozulma gerçekleşene kadar potansiyelinin artırılması gerekmektedir [11].

Uniform mikroporlar, altlık metal ile elektrolit çözeltisi arasında bağlantıyı sağlayan ve oksidasyon prosesinin gerçekleştiği deşarj kanallarını oluşturur. Deşarj kanalları içerisindeki sıcaklık, yüksek elektrik alanların ve beraberinde elektron hareketlerinin sonucunda 10.000 K'ye kadar ulaşabilmektedir. Deşarj kanallarındaki yüksek sıcaklık değerleri, kristalin fazların (örn; $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) oluşumunu tetiklemektedir. Bununla birlikte işlem zamanı içerisinde halihazırda oluşmuş olan oksit tabakasının faz dönüşümünü de sağlar. Fakat deşarj kanalları çoğunlukla mikro boyut ve hacimde olduklarından dolayı bu sıcaklık artışı altlık malzemenin geneline yayılmaz, bölgesel kalır. Kanalin ve çevresinin sıcaklık artışı sonucunda dielektrik kararlılığının bozulma voltajı azalır böylece bir deşarj kanalının yakınında yeni bir deşarj kanalının oluşumu desteklenir. Deşarj kanalı içerisindeki güçlü elektrik alan sayesinde elektrolit çözeltisinde yer alan anyonik bileşikler kanal içerisine çekilirken, artan sıcaklıkla birlikte ergiyen altlık metal de kanala girer ve oksitlenerek yüzeye doğru püskürür. Bu püskürme sonucunda deşarj kanalı dışındaki kaplama kalınlığında artış elde edilir [57].

Üçüncü aşamada ise artan elektrik gerilimi ile birlikte kıvılcımların yani deşarj kanallarının boyutu büyürken, arkların renkleri beyazdan sarıya dönmektedir [56]. Deşarj kanalları soğuyarak reaksiyon ürünleri deşarj kanallarında ve yüzeyde birikir. Bu oluşumun kaplama yüzeyinde birçok bölgede tekrar etmesi neticesinde kaplama kalınlığında ve yüzey pürüzlülüğünde artış elde edilir [55].

Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamaları morfolojik olarak olarak 3 ana bölgeye ayrılarak incelenebilir. Bu bölgeler; gözenekli dış bölge, yoğun iç bölge ve ara yüzey bölgesi olarak sıralanır. Bu bölgeler **Şekil 3.2**'de gösterilmiştir. Bu üç ana bölgenin oluşumu plazma elektrolitik oksidasyon sırasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar, plazma kimyasal reaksiyonlar ve oksijenin termal difüzyonu süreçleriyle ilişkilendirilebilir [58].



Şekil 3.2: Alüminyum alaşımı üzerine PEO yöntemiyle elde edilen kaplamaların mikro yapısı [54].

Gözenekli veya poroz dış bölge; aşınma direnci ve sertlik gibi malzeme özelliklerine katkısı olmayan kırılkan davranış gösteren yapıdır. Genellikle düşük sıcaklıklarda oluşabilen ve amorf yapıli fazlardan meydana gelmektedir. Yoğun iç bölge ise malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren, çeşitli dönüşümler sonrasında oluşan α - Al_2O_3 gibi dayanıklı fazları barındıran bölgedir. Yapı içerisindeki miktarı kullanılan kaplama parametrelerine ve elektrolit çözeltisinin kimyasal özelliklerine göre değişim göstermektedir. İnce ara yüzey bölgesi ise her plazma elektrolitik oksidasyon uygulamasında görülmemekle birlikte kalınlığı 5 mikronu aşmayan altlık malzeme ile oksit tabakası arasında yer alan kaplama yapısıdır [54].

3.2. PEO'ya Etki Eden Parametreler

Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi çok faktörlü fiziko-kimyasal bir süreçtir. Elde edilen kaplamaların özellikleri farklı parametreler ile kontrol edilebilmekte ve geliştirilebilmektedir. Bu parametreler akım yoğunluğu, frekans, işlem süresi, altlık malzemenin türü, elektrolit çözeltisi şeklinde sıralanmaktadır [15].

3.2.1. Altlık Malzeme

Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi bazik konsantrasyonlu sulu çözeltilerde gerçekleştirilen bir dönüşümsel kaplama işlemidir. Sistemin mekanizması gereği oluşan oksitin kimyasal ve fiziksel yapısı uygulanan altlık malzemeyle doğrudan ilişkilidir [11]. Altlık malzemenin içerdiği alaşım elementleri, oksit kaplamanın oluşumu sırasında kaplamanın bileşimini ve özelliklerini etkileyen temel parametrelerden biridir. Örneğin alüminyum için gerçekleştirilen plazma elektrolitik oksidasyon kaplamalarda oluşacak alümina (Al_2O_3) tabakasının hangi faz yapısında olacağı ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$) altlık malzemede yer alan alaşım elementleri ve diğer parametreler tarafından belirlenir.

Yong ve arkadaşları; 2024, 6061 ve 7075 alüminyum alaşımlarına plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi kullanarak kaplamalar yapmış ve altlık metalde bulunan alaşım elementlerinin kaplamadaki faz morfolojisini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Elde ettikleri kaplamalardaki $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ faz oranının kaplamada yer alan Mg, Cu ve Zn iyonlarına ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte özellikle Mg iyonlarının $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'dan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ya dönüşümü baskıladığı bu durumun Mg iyonlarının hem $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının tane büyümesini yavaşlatıcı etkisinden hem de deşarj kanallarının karakteristik özelliklerini etkilediğinden kaynaklanabileceği yorumu yapılmıştır [59].

3.2.2. Elektrolit Çözeltisi

Plazma elektrolitik kaplama işleminin gerçekleştirildiği elektrolit çözeltisi, kaplama sonunda elde edilecek kaplamanın kimyasal kompozisyonunu belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Elektrolit bileşimini değiştirmek, kaplama özelliklerini iyileştirmek için mikroyapıyı ve bileşimi optimize etmenin etkili bir yoludur [16]. Altlık malzeme ve elektrolit çözeltisinin reaksiyonları neticesinde kaplama oluşturulmaktadır. Örneğin alüminyum altlık malzemesi kullanılarak silikat içerikli kaplama gerçekleştirildiğinde yüzeyde kimyasal kompozisyonu $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ olan mullit fazını oluşturmak mümkündür [60]. Bununla birlikte elektrolit kompozisyonunun değiştirilmesi elektrik iletkenliğini etkileyerek plazma elektrolitik oksidasyon işlemindeki deşarj kanallarının karakteristik özelliklerini de

farklılaştırmaktadır. Örneğin elektrolit çözeltisinde F iyonu bulunması dielektrik bozulma gerilimini ve toplam gerilimi azaltarak elde edilen kaplamanın iç yapısının daha kusursuz olmasını sağlar. Bununla birlikte silikat içerikli elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda pasif oksit film ve oksit tabakalarının çok daha hızlı oluştuğu belirlenmiştir. Aynı zamanda alüminyum altlık üzerine plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamaların homojenliği açısından değerlendirildiğinde silikat bazlı elektrolit sisteminin fosfat bazlı elektrolit sistemlerine göre daha homojen yapıda olduğu tespit edilmiştir. Elektrolit çözeltisindeki değişimler deşarj kanalları içerisindeki maksimum sıcaklık değerlerini de değiştirerek kaplama morfolojisini etkilemektedir. Silikat bazlı elektrolit çözeltileri için deşarj kanalı içerisindeki sıcaklık değeri 6000-12000 K, alüminat bazlı elektrolit çözeltileri için 6000-10000 K, fosfat bazlı elektrolit çözeltileri için ise 4000-5000 K arasında değişmektedir [61]. Silikat ve alüminat bazlı elektrolitik çözeltisinde deşarj kanalları içerisindeki, sıcaklık daha yüksek olduğundan alüminyum altlık malzemeler için kristalin Al_2O_3 ve $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ yapılarını elde etmek mümkündür [62].

Khan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı konsantrasyonlara sahip elektrolit çözeltisinde alüminyum altlık kullanarak gerçekleştirdikleri deneyler kapsamında artan elektrolit konsantrasyonunun kaplama kalınlığını arttırdığı azalan konsantrasyonun ise kaplama kalınlığını azalttığı sonucuna varmıştır. Bununla birlikte daha düşük konsantrasyona sahip çözeltide daha yüksek oranda $\alpha-Al_2O_3$ tespit edilmiştir. Bu durum düşük konsantrasyonlu elektrolit çözeltisinde $\gamma-Al_2O_3$ 'dan $\alpha-Al_2O_3$ 'ya gerçekleşen faz dönüşümünün daha fazla olduğu şeklinde yorumlanmaktadır [15].

Sreekanth ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AZ31 magnezyum alaşımı altlık kullanarak farklı elektrolit çözeltilerinin malzeme özelliklerine etkisini incelemiştir. Farklı katkı maddelerinin temel elektrolit sistemine eklenmesi; plazma elektrolitik kaplamaların yüzey yapısında, faz bileşiminde ve elektrokimyasal özelliklerinde belirgin değişikliklere yol açtığı belirlenmiştir. Özellikle baz elektrolit çözeltisine eklenen $Na_2(B_4O_5(OH)_4) \cdot 8H_2O$ çözeltisi kaplamanın daha az gözenekli morfoloji geliştirmesini sağlayarak korozyon direncini arttırdığı tespit edilmiştir [21].

Lee ve arkadaşları alüminyum altlık kullanarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle kaplama yaptıkları çalışma sonucunda elektrolit çözeltisi içerisindeki Na_2SiO_3 konsantrasyonunun kaplama özellikleri üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Düşük Na_2SiO_3 konsantrasyonu daha ince taneli mikroyapı elde edilmesini sağlayarak yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etki yaparken, yüksek Na_2SiO_3 konsantrasyonunda gözenekli yapının arttığını ve dielektrik bozunma geriliminin azaldığını belirlemişlerdir [63].

Honping ve arkadaşları; AZ91D magnezyum alaşımı kullanarak Na_2SiO_3 ve KOH içeren baz elektrolit çözeltisinin içine NaH_2PO_4 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, ve KF katkı maddelerini ekleyerek 3 farklı elektrolit çözeltisi hazırlamış ve bu bileşiklerin kaplama özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde kaplanan numunenin en yüksek kaplama kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini sağladığı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen potansiyodinamik polarizasyon ve EIS deneyleri sonucunda da en yüksek korozyon direncinin $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve KF bileşiklerini içeren çözeltilerden elde edildiği tespit edilmiştir [19].

Arunnelliappan ve arkadaşları; 7075 alüminyum altlık üzerine $\text{Na}_2\text{SiO}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ve KOH baz elektrolitik çözeltisini kullanarak çözeltiliye eklenen $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, K_2TiF_6 , $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ katkı maddelerinin kaplama özelliklerine etkisini araştırmıştır. Katkı maddelerinin eklenmesi kaplama kalınlığında farklılıklara sebep olmuş ve en yüksek kaplama kalınlığı K_2TiF_6 içeren elektrolit çözeltisinde elde edilmiştir [64].

Pezzato ve arkadaşları; plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 7075 alüminyum alaşımı altlık malzemesi kullanarak Na_2SiO_3 , NaOH ve farklı konsantrasyonlarda $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ içeren elektrolit çözeltisinde kaplama işlemi gerçekleştirmiş ve farklı konsantrasyonlarda eklenen $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ bileşiğinin kaplama özellikleri üzerinde olan etkilerini araştırmıştır. Gerçekleştirilen anodik polarizasyon ve EIS testlerine göre $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ ilavesi 7075 alüminyum alaşımının korozyon direncini belirgin şekilde arttırmıştır. Bu artış temelde $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ ilavesiyle malzeme yüzeyinde daha kalın, daha yoğun ve daha homojen bir oksit tabakası oluşturulmasıyla ilişkilendirilmiştir. $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ bileşiğinin daha kalın oksit tabaka oluşturabilme yeteneği ise altlık malzemede mikro deşarjların sayısını arttırabilmesi yorumuyla açıklanmıştır [65].

Mengesha ve arkadaşları; saf alüminyum altlık metali üzerine Na_2SiO_3 , KOH , Na_3PO_4 ana elektrolitik çözeltisi içerisine farklı oranlarda $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ilave ederek plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle kaplamış ve kaplama morfolojisini incelemiştir. Kaplama morfolojisinde yer alan bor içeriği, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ artışıyla doğru orantılı biçimde artış göstermiştir. Bununla birlikte artan konsantrasyon miktarının $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı oluşumunu tetiklediği XRD verilerince tespit edilmiştir. Gözeneklilik yoğunluğunun ve gözenek boyutunun ise artan $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ konsantrasyonuna zıt olarak azaldığı belirtilmiştir [32].

Sreekanth ve arkadaşları; AZ31 magnezyum alaşımı kullanarak Na_2SiO_3 ve KOH içeren baz elektrolit çözeltisinin içine ayrı ayrı NaAlO_2 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, K_2TiF_6 , Na_3PO_4 , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ilavelerini gerçekleştirerek farklı katkı maddelerinin kaplama özelliklerini nasıl değiştirdiğini incelemiştir. Elde edilen verilere göre en yüksek kaplama kalınlığının K_2TiF_6 bileşiğiyle elde edildiğini ikinci en yüksek kaplama kalınlığının ise $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ bileşiğiyle elde edildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte baz elektrolit çözeltisine $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ilavesinin kaplama korozyon direncini 35 kat arttırdığı, daha az gözenekli bir morfoloji geliştirdiği tespit edilmiştir [21].

Shen ve arkadaşları; AZ31 magnezyum alaşımı altlık malzemesi kullanarak Na_2SiO_3 ve KOH içerikli baz elektrolit çözeltisi içerisine $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ilave etmiş ve plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamanın özelliklerini araştırmıştır. Yapılan XPS ve EDS analizleri sonucunda kaplama yapısında bor içeren faz tespit edilmiştir. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan numunenin en yüksek aşınma direncini ve sertliği sağladığı belirlenmiştir [24].

Aliramezani ve arkadaşları; hazırladıkları Na_2SiO_3 ve KOH içerikli elektrolit çözeltisine KMnO_4 ekleyerek plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle kaplanan 7075 alüminyum alaşımının kaplama özelliklerini üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elektrolit çözeltisine KMnO_4 eklenmesi hem yüzey morfolojisini hem de kesit yapısını değiştirmiştir. Özellikle bu katkı malzemesiyle metal/kaplama arayüzeyindeki gözeneker azalmış, kaplama kalınlığı da KMnO_4 konsantrasyonunun artmasıyla paralel olarak artmıştır.. Gerçekleştirilen testler neticesinde de KMnO_4 ilave edilmiş elektrolit çözeltisinde kaplanan 7075 alüminyum alaşımının korozyon direncinin baz elektrolit çözeltisinde kaplanan malzeye göre 3 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir [66].

Tüm bunlardan yola çıkılarak elektrolit çözeltisi gerek deşarj kanallarının karakteristik özelliklerini etkilemesi gerek kaplamanın kimyasal bileşimini direkt olarak belirlemesiyle birlikte plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamalar için oldukça önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

3.2.3. İşlem Süresi

Plazma elektrolitik oksidasyon yönteminde kaplama morfolojisini etkileyen önemli parametrelerden biri de işlem süresidir. Kaplama süresinde yapılan değişiklikler; korozyon direnci, kalınlık, homojenlik ve gözeneklilik miktarı gibi özellikleri doğrudan etkilemektedir [67].

Sundararajan ve Krishna yaptıkları çalışmada kaplama oluşum kinetiğinin işlem süresiyle doğrusal bir ilişki içerisinde olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte işlem süresinin her dakikasında biriktirilen ortalama kaplama kalınlığının oldukça yakın olduğunu ortaya koymuşlardır. Kaplama kalınlığının süreyle birlikte doğrusal artışı, yüzey pürüzlülüğünde de doğrusal artış meydana getirmiştir. İşlem süresinin artmasıyla birlikte deşarj kanallarının çapında da artış tespit edilmiştir. Bu durum kaplama oluşum esnasında oluşan mikro boyuttaki deşarj kanallarının, sürenin artmasına paralel olarak birbiri ile birleşerek çaplarının büyüdüğü yorumunu destekler [57].

Gu ve arkadaşları alüminyum altlık kullanarak gerçekleştirdikleri plazma elektrolitik oksidasyon işlemi sonucunda deşarj kanallarının boyutlarının işlem süresi arttıkça arttığını ancak kanal yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. İşlem süresinin artmasının bununla birlikte kaplama kalınlığında da gözlemlenen paralel artışın oksit tabakasındaki faz dönüşümlerini desteklediği yorumu yapılmıştır [68].

Bu tespitlerden yola çıkılarak artan işlem süresinin kalınlık, yüzey pürüzlülüğü, deşarj kanalları boyutu ve bu özelliklerle bağlantılı olarak aşınma dayanımı, korozyon direnci gibi malzemenin performans özelliklerinde etkisi olduğu söylenebilir.

3.2.4. Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu, sisteme verilen elektrik akımının yüzey alanına oranı olarak tanımlanabilir ve plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamaların özelliklerini belirleyen önemli bir elektriksel parametredir. Srinivasan ve arkadaşları; üç farklı akım yoğunluğu altında AM50 magnezyum altlık kullanarak gerçekleştirdikleri plazma elektrolitik oksidasyon çalışmaları sonucunda artan akım yoğunluğuyla birlikte kaplama kalınlığının ve pürüzlülüğün arttığını belirlemişlerdir. Ek olarak düşük akım yoğunluğu altında daha ince ve sıkı bir kaplama elde edildiğinden bu akım değerlerinde daha yüksek korozyon direnci elde etmişlerdir [69].

Khan ve arkadaşları; 6082 alüminyum alaşımı üzerinde farklı akım yoğunlukları kullanarak kaplama işlemi gerçekleştirmiş, artan akım yoğunluğunun kaplama kalınlığını artırıcı etki yaptığını belirlemiştir. Alümina yapısının termodinamik olarak kararlı olan faz yapısı α -Al₂O₃'ün içeriğinin artan akım yoğunluğuyla birlikte artma eğiliminde olduğunu ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte artan akım yoğunluğunun kaplama içerisindeki kalıntı gerilmeleri azalttığını belirleyip, bu durumun kaplama içerisindeki gerilim gevşemesini teşvik eden mikro deşarj kanallarının sayısının artmasına ve mikro çatlakların daha fazla oluşmasına bağlı olduğu yorumunu yapmışlardır [15].

Moon ve Jeong 1050 alüminyum alaşımı ve farklı akım yoğunlukları kullanarak gerçekleştirdikleri plazma elektrolitik oksidasyon kaplama işlemleri sonrasında artan akım yoğunluğunun mikro deşarj oluşum süresini kısalttığını belirlemişlerdir [70].

Erdenebat ve arkadaşları; 8.8 A/dm², 13.5 A/dm², 17.8 A/dm² ve 22.3 A/dm² akım yoğunlukları kullanarak 7075 alüminyum alaşımı üzerine plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle Na₂SiO₃ ve KOH içerikli elektrolit çözeltisinde kaplamalar yapmış ve bu kaplamaların özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar neticesinde artan akım yoğunluğunun kaplama kalınlığını artırıcı etki yaptığı, iç katmanların daha sıkı ve ince gözenekli hale geldiği belirlenmiştir. En yüksek korozyon direnci ise 17.8 A/dm² akım yoğunluğunda elde edilmiştir. Yapılan aşınma testleri sonrasında 17.8 A/dm² akım yoğunluğunda elde edilen kaplamanın aşınma derinliğinin ana malzemeye göre düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle yapılan kaplamaların malzemenin aşınma

direncini arttırıcı ve buna bağılı olarak servis ömrünü uzatıcı etki yaptığı söylenebilir. Ancak 22.3 A/dm^2 akım yoğunluğunda ise kaplamanın üst tabakasında kalınlığın daha fazla artmasına bağılı olarak amorf bölgeler oluştuğundan aşınma derinliği 17.8 A/dm^2 akım yoğunluğuna göre bir miktar fazladır. Sertlik özellikleri karşılaştırıldığında ise akım yoğunluğu farketmeksizin ana malzemeye kıyasla artış elde edilmiştir. Sertlikteki artış, plazma elektrolitik oksidasyon işlemi sonrasında elde edilen ince ve homojen dağılmış seramik karakterli partiküllerin varlığıyla ilişkilendirilerek açıklanmıştır [71].

Barati ve arkadaşları; 7075 alüminyum alaşımı kullanarak K_2ZrF_6 , NaH_2PO_4 ve KOH içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde farklı voltaj değerleri kullanarak kaplama özelliklerini incelemiştir. Voltajın artmasına paralel olarak kaplama kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte 425 V'nin üzerine çıkılan değerlerde artan sıcaklığın etkisiyle $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazlarının varlığı belirlenmiştir [72].

3.2.5. Frekans

Plazma elektrolitik oksidasyon yönteminde kaplama morfolojisini etkileyen bir diğer elektriksel parametre frekans değeridir.

Martin ve arkadaşları 1050 ve 2214 alüminyum alaşımları üzerine farklı frekans ve akım yoğunlukları ile kaplama işlemi gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda artan frekans değerinin kaplama büyüme hızını doğrusallaştırdığı ve yapının homojenliğine katkı sağladığı tespit edilmiştir. Düşük frekans değerlerinde kaplama yüzeyinde bölgesel pürüzlülük artışı olduğunu belirlemişlerdir [73].

Dehnavi ve arkadaşları; 6061 alüminyum alaşımı üzerine farklı frekans ve görev döngüsü (duty cycle) değerleri kullanarak gerçekleştirdikleri plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle kaplama çalışmaları sonucuna göre frekansın kaplama kalınlığındaki artışa direkt olarak bir etkisinin olmadığını belirlemiştir. Hazırladıkları Na_2SiO_3 içerikli elektrolit çözeltisinin bir sonucu olarak düşük frekans kullanımı sonrasında yüksek frekans değerine göre kaplama yapısında daha yüksek oranda $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ fazı tespit edilmiştir. Bu durum düşük frekans değerlerinin daha yüksek yoğunlukta mikro deşarjlar oluşturarak yüzeyde daha yüksek konsantrasyonda Si bulundurabilmesi ile açıklanmıştır [8].

3.3 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Bor İçerikli Elektrolit Çözeltilisinde Gerçekleştirilen PEO Uygulamaları

Yuanji ve arkadaşları; 7075 alüminyum alaşımı altlık metali kullanarak doğru akım ile çalışan plazma elektrolitik oksidasyon cihazı ile 15 g/L Na_2SiO_3 , 8 g/L $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 3 g/L KOH, ve 2 g/L gliserin içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde voltaj ve frekansı sabit tutarak farklı görev döngüsü (duty cycle) değerlerinde kaplamalar gerçekleştirmiştir. Üretilen kaplamaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için farklı malzeme karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tüm görev döngüsü değerlerinde kaplamanın ana yapısının mikroporlarla karakterize edilebileceği söylenmektedir. %20 görev döngüsü kullanılan proseste yüzeyin daha küçük ve homojen dağılmış porlardan oluştuğu belirtilirken görev döngüsü değeri %80'e çıktığında bazı porların kaybolduğu ve bazı porların büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. Bu durum alternatif akım ile çalışan bir sistemde kaplama süresinin ve akım yoğunluğunun artışıyla gözlenen yüzey değişimiyle benzer şekilde değerlendirilebilir. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı değerlerinin de artan görev döngüsü değeri ile birlikte arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen X-ışını kırınımı analizi (XRD) sonuçlarına göre üretilen kaplamanın genel olarak $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazlarından oluştuğu bulunmuştur. Elektrolit çözeltisi içerisinde Na_2SiO_3 ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ kimyasallarının 7075 alüminyum altlık metaliyle yapacağı bileşikler sonucunda oluşması beklenen $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ve $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazlarından bahsedilmemektedir. Kaplamadaki sertlik artışının $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının varlığıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri %40 görev döngüsü ile elde edilirken bu durum aşınma testi sonuçlarıyla uyum göstermiştir. Korozyon direncinin artan görev döngüsü ile arttığı, %80 görev döngüsü ile elde edilen kaplamada en üstün korozyon direncinin elde edildiği belirtilmiştir. [31].

4. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın temel amacı plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi kullanılarak bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde 7075-T6 alüminyum alaşımı altlık metalinin yüzeyinde aşınma direnci yüksek kaplamalar oluşturmak bununla birlikte çözelti içerisindeki $\text{Na}_2(\text{B}_2\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonun ve kaplama süresinin değişiminin kaplama özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Literatürde, bor içerikli elektrolit çözeltileri kullanılarak gerçekleştirilen plazma elektrolitik kaplama çalışmalarında, altlık metal olarak magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımları tercih edilmiştir. Bu çalışmalar, söz konusu alaşımlar üzerinde başarılı kaplamaların elde edildiğini göstermiş ve üretilen kaplamaların çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri çeşitli malzeme karakterizasyon yöntemleriyle incelenmiştir. Tez çalışmasında farklı $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonlarının ve farklı kaplama sürelerinin malzeme özelliklerine etkisinin belirleneceği bir deney tasarlanmıştır. Bu kapsamda;

- 7075-T6 alüminyum alaşımı metalinin yüzeyinde plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle kaplamalar elde edilmesi,
- Elde edilen kaplamaların yüzey ve kesitlerinin mikro yapı ve kimyasal olarak analiz edilmesi,
- Kaplamaların; yüzey pürüzlülüklerinin, kalınlıklarının, aşınma dirençlerinin sertliklerinin belirlenebilmesi için aşınma testi, mikro sertlik analizi, kaplama kalınlığı ölçümü ve profilometre analizleri uygulanması planlanmıştır.

Sonuç olarak üretilen kaplamalar ve yapılan analizler sonucunda bor içerikli elektrolit çözeltisi içerisinde plazma elektroliz oksidasyon yöntemiyle kaplama prosesinin 7075-T6 alüminyum alaşımı için uygulanabilirliği belirlenerek, çözelti içerisindeki bor konsantrasyonu ve kaplama süresinin başta aşınma direnci olmak üzere malzeme özelliklerine etkisi incelenecektir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneyde Kullanılan Altlık Malzeme

Çalışma kapsamında altlık malzeme olarak AA7075-T6 alaşımı kullanılmıştır. Altlık metalin kimyasal kompozisyonu Spectro – SPECTROMAXx marka optik emisyon spektrometresi cihazı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları **Tablo 5.1**'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Çalışmada kullanılan AA7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
%wt.	0.23	0.26	1.68	0.12	2.47	0.23	5.58	89.30

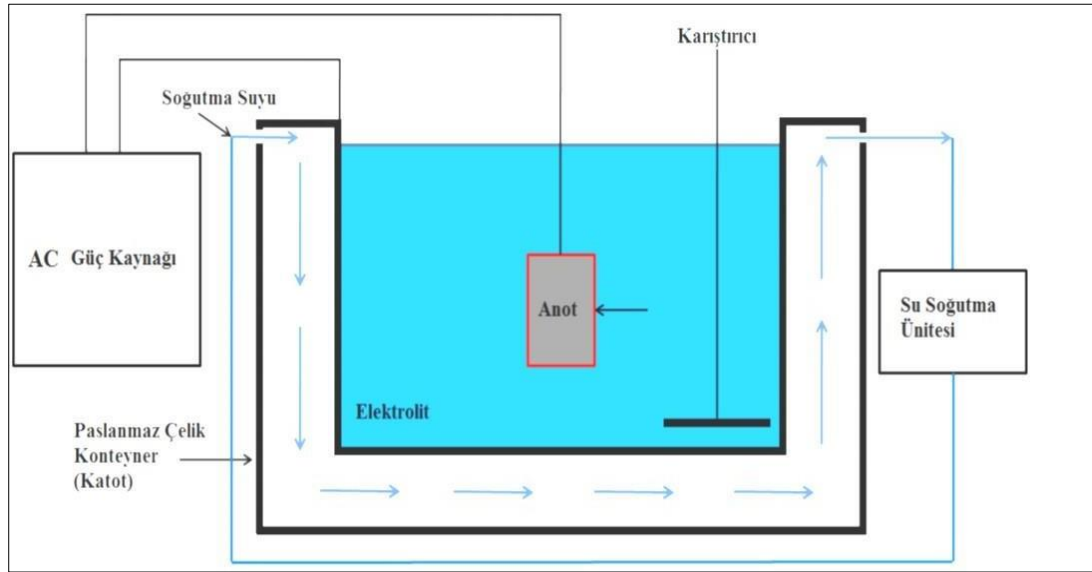
5.2. PEO Kaplama İşlemi

Kaplama çalışmaları alternatif akımla çalışan MDO-100WS su soğutmalı plazma elektrolitik oksidasyon cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında kullanılan elektrolit çözeltisi kompozisyonu, kaplama süresi, akım yoğunluğu gibi parametreler gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda belirlenip gerçekleştirilen denemelerle desteklenmiştir. Çalışma için kullanılan parametreler **Tablo 5.2**'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Kaplama parametreleri.

Kaplama Altlık Malzemesi	AA7075-T6
Elektrolit Çözeltisi Kompozisyonu 1	10 g/L Na ₂ SiO ₃ •5H ₂ O 2 g/L KOH 5 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O
Elektrolit Çözeltisi Kompozisyonu 2	10 g/L Na ₂ SiO ₃ •5H ₂ O 2 g/L KOH 40 g/L Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄)•8H ₂ O
Kaplama Süresi (dk)	5 – 10 – 15 – 20 – 25
Kaplama Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	0.702

Altlık metali kaplama işleminden önce 40 mm x 25 mm x 5 mm boyutlarında kesilmiştir ve kaplama düzeneğinde yer alan numune sabitleyicisine bağlantısı yapılabilmesi adına numunelerin üst kısımlarına 4 mm çapında delik delinmiştir. Bu işlemin ardından numune yüzeyleri sırasıyla 80, 500 ve 1200'lük zımparalar kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma işleminin ardından etanol ve saf su kullanılarak temizlenmiştir. Çalışmada kullanılan elektrolit çözeltisini hazırlamak için ilk olarak saf su içerisine sırasıyla 10 g/L $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ve 2 g/L KOH eklenerek çözünene kadar karıştırılmıştır. Son olarak 5 g/L ve 40 g/L olmak üzere iki farklı oranda $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ eklenmiş ve çözündürülmüştür. Kaplanacak numuneler, numune sabitleyicisine bağlanarak hazırlanan elektrolit çözeltisi içine daldırılmış, **Tablo 5.2'**de yer alan süre ve akım parametrelerine göre kaplamalar elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan plazma elektrolitik oksidasyon sisteminin gösterimi **Şekil 5.1'**de verilmiştir.



Şekil 5.1: PEO kaplama sistemi şeması [55].

Kaplama esnasında çelik kazan katot, bağlanan altlık malzeme ise anot görevi görmektedir. Sistem alternatif akımla çalışmaktadır. İşlem esnasında elektrolit çözeltisinin ısınarak konsantrasyonunun değişmemesi ve kullanılan kimyasalların bozunmaması amacıyla elektrolit çözeltisinin yer aldığı çelik kazan sürekli soğutulmaktadır.

Bununla birlikte çözeltinin homojenliğini kaybetmemesi ve numune yüzeyindeki her noktada aynı özelliklere sahip kaplama elde edilmesi adına karıştırıcı ekipman yardımıyla daima karıştırılmaktadır. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından numune sabitleyicisinden ayrılan numuneler elektrolit çözeltisinin kalıntılarından uzaklaştırılması adına saf su ile yıkanmış ve basınçlı hava ile kurutulmuştur.

5.3. X-Işınları Kırınımı Analizi

Çalışma kapsamında hazırlanan kaplamaların içerisinde yer alan fazların tayini için Rigaku Dmax 2200 marka X-ışınları kırınımı cihazı ve Cu K α ışınımı yapan bakır anotlu tüpler kullanılmıştır. Tarama 10-90° aralığında ve 2°/dk hızında gerçekleştirilmiştir.

5.4. Yüzey ve Mikroyapı Karakterizasyonu

Kaplama yüzeyinin ve kesitteki mikroyapının karakterizasyonu için Philips XL30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Enerji Dağılımı Spektroskopisi yöntemiyle yapıda var olan elementlerin kantitatif analizi gerçekleştirilmiştir.

5.5. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü analizi, elmas sivri ucun kaplama yüzeyinde gezdirilerek yükselti farklarının belirlenerek yüzey profilinin çıkarılması temeline dayanan “Veeco Dektak 8” marka mekanik profilometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yüzeylerinde 1 mm x 1 mm alan üzerinde 32 farklı noktadan tarama yapılarak yüzey profili ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) alınmıştır.

5.6. Kaplama Kalınlığı

Numunelerde oluşturulan kaplamaların kalınlıkları girdap akımlarında meydana gelen kayıpların belirlenmesi esasına dayanan “Fischer Dualscope MP20” marka cihaz ile ölçülmüştür. Her bir numuneden 15 farklı ölçüm alınmıştır.

5.7. Aşınma Testi

Kaplama yapılmış ve yapılmamış numunelerin aşınma değerlerinin belirlenmesi için “CSM Tribometer” marka aşınma test cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Her bir parametreye ait numune 5 N yük, 10 mm/sn kayma hızı, 100 m mesafe boyunca 6 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılarak kuru ortamda aşındırılmıştır. Oluşan aşınma izleri ise “Veeco Dektak 8” marka mekanik profilometre kullanılarak ölçülmüştür.

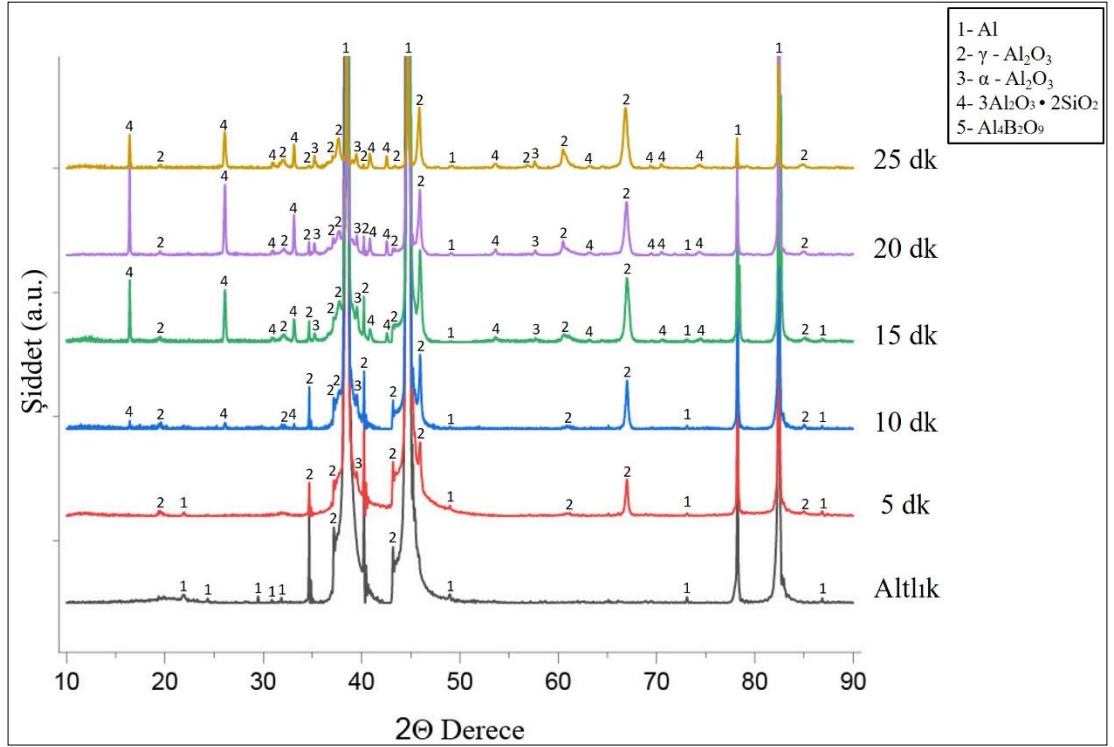
5.8. Mikro Sertlik Ölçümü

Kaplamaların mikro sertlik ölçümleri ZEISS Axio Imager M1m model optik mikroskop ve mikroskoba bütünleşik Anton Paar MHT-10 marka mikro sertlik cihazı kullanılarak 50 gr yük, 5 gr/sn ve 10 sn tutma süresi kullanılarak ölçülmüştür.

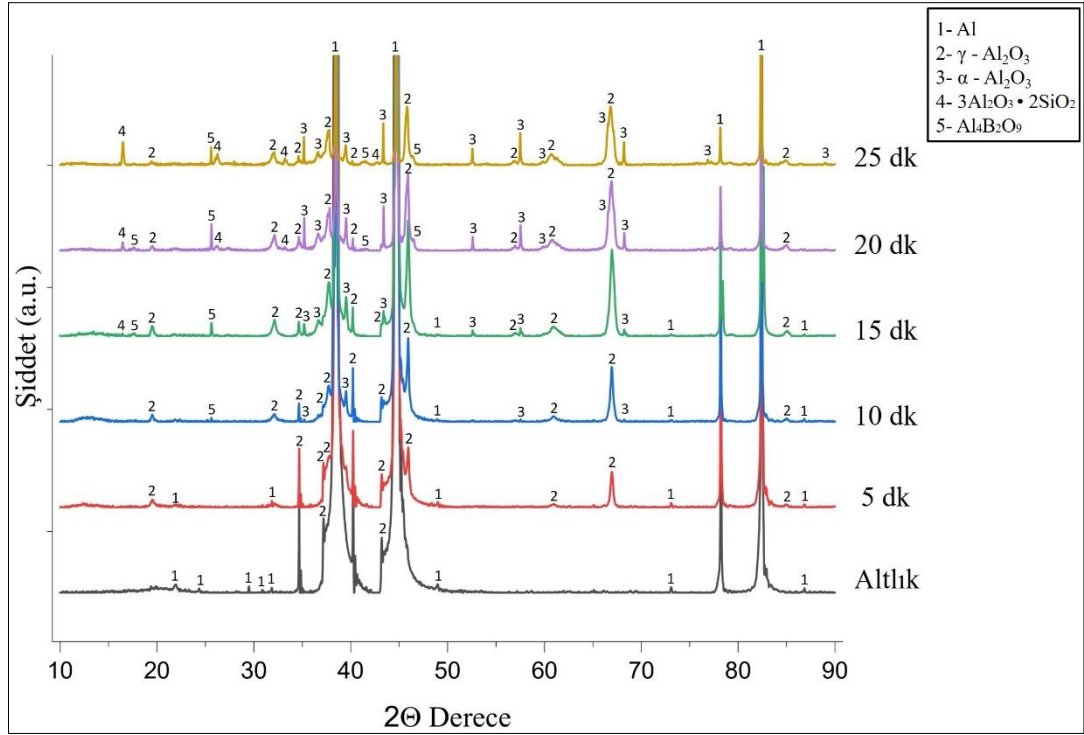
6. BULGULAR ve TARTIŞMA

6.1. X-Işınları Kırınımı Analizi

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak 0.702 A/cm^2 akım yoğunluğunda 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık kaplamalar sonucunda elde edilen numunelere ait X-ışınları kırınımı analizi sonuçları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1: 0.702 A/cm^2 akım yoğunluğunda 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait XRD grafiği.



Şekil 6.2: 0.702 A/cm² akım yoğunluğunda 40 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait XRD grafiği.

5 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren çözelti içerisinde kaplanan numunelerde ana kaplama yapısının γ -Al₂O₃, α -Al₂O₃ ve 3Al₂O₃•2SiO₂ fazlarından oluştuğu görülmüş, Al₄B₂O₉ gibi bor içeren herhangi bir faza rastlanmamıştır. Bununla birlikte kaplama süresi arttıkça alüminyum altlık metaline ait pik değerlerinin azalması kaplama kalınlığının artışıyla ilişkilendirilmiştir. 3Al₂O₃•2SiO₂ fazı; 5 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren çözelti için 15 dakikalık kaplamayla oluşmuş, 20 ve 25 dakikalık kaplamada bu faza ait piklerin sayısı artmıştır. 3Al₂O₃•2SiO₂ fazının oluşumu için gerekli silisyum, elektrolit çözeltisinde bulunan (Na₂SiO₃•5H₂O) bileşiğinden gelmektedir [74]. Kaplamalarda görülmekte olan 3Al₂O₃•2SiO₂ fazı elektrolit çözeltisinde yer alan Na₂SiO₃•5H₂O bileşiğinden sağlanan Si ile oluşmaktadır.

40 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren çözelti içerisinde kaplanan numunelerde ana kaplama yapısı 5 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren elektrolit çözeltisi içerisinde kaplanan numunelerle benzer olarak γ -Al₂O₃, α -Al₂O₃ ve 3Al₂O₃•2SiO₂ fazlarından oluşurken ek olarak Al₄B₂O₉ fazı da görülmektedir.

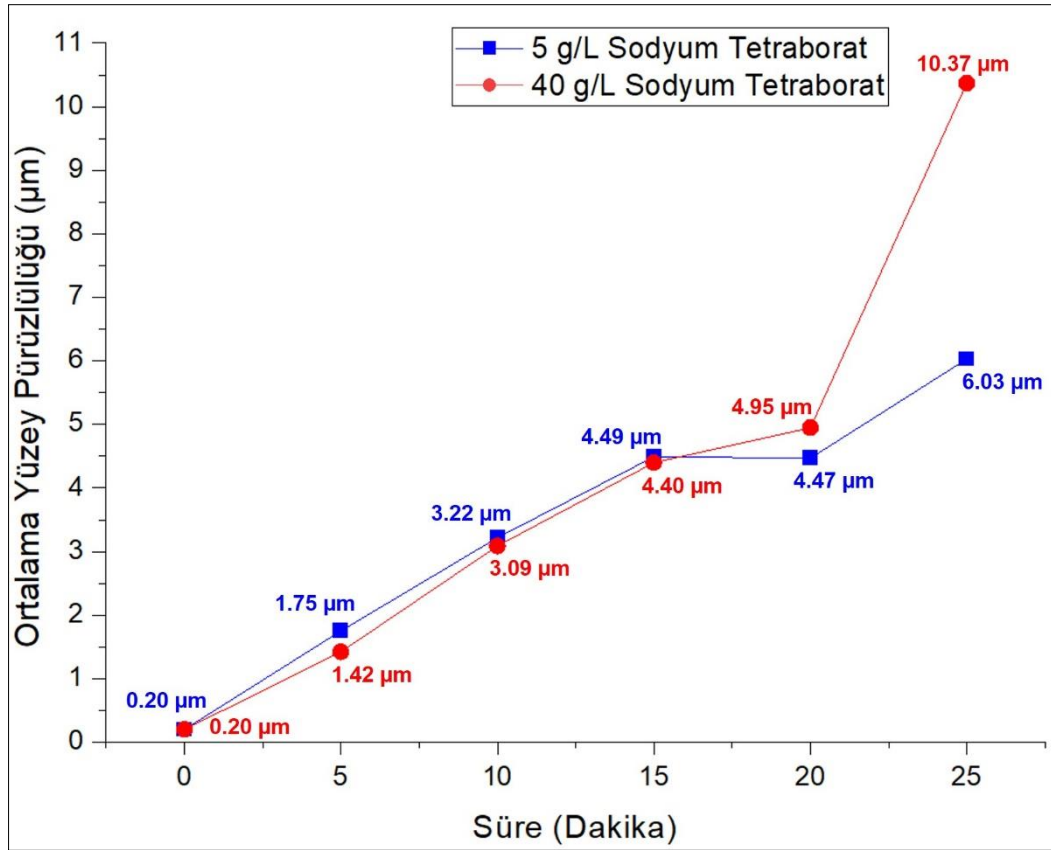
$\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazı, 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren çözeltide gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplama sonrasında $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının ortaya çıkmasıyla birlikte görülmeye başlanmıştır. Daha kısa süreli kaplamalarda $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazının görülmemesi bu yapının $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı ve B_2O_3 bileşiği varlığında 1000°C ve üzeri sıcaklıklarda oluştuğu bilgisiyle desteklenmektedir [75]. Ek olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazına ait bazı piklerin şiddetinin azalırken $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazına ait piklerin şiddetinin artması uygun koşullar altında bir faz dönüşümünün gerçekleştiği düşünülmektedir.

Her iki çözelti için $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı 10 dakikalık kaplama sonrasında oluşmaktadır. Bu durum kaplama tabakasının kalınlığının faz dönüşümüne uygun koşulları sağlayacak kalınlığa ulaşamaması ile ilişkilendirilmiştir. Kplama işleminin başlarında oksit tabakası altlık metal ile elektrolit çözeltisi arasında termal yalıtım sağlayacak kalınlıkta değildir. Dolayısıyla oksit yüzey sıcaklığı $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dönüşümünü sağlayamadığından yapıda $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazı baskındır. Kplama yapısı incelendiğinde $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının daha çok yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaştığı, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının ise daha çok “yoğun bölge” olarak adlandırılan gözenekli dış bölgenin altında bulunduğu bilinmektedir [54]. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının oluşumu basit olarak;deşarj kanallarında ortaya çıkan küçük hacimli ve bölgesel sıcaklık değeri artışıyla birlikte kanal dışına püsküren alüminyumun hızlı bir şekilde nispeten soğuk elektrolit çözeltisiyle temas etmesinin bir sonucu olarak açıklanmaktadır. Süre arttıkça ve buna bağlı olarak kaplama kalınlaştıkça termal yalıtkanlık özelliği yüksek olan oksit tabaka dönüşüm için gerekli olan sıcaklığı muhafaza eder ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dönüşümü sağlanır. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının kaplamanın iç bölgelerinde yoğunlukta olması bu mekanizmayla ilişkilendirilmektedir [33], [57], [76]. Kplama kalınlığının süreye bağlı olarak artış göstermesi termal iletkenliği düşük olan oksit tabakasının 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde gerçekleştirilen kaplamalar sonucunda elde edilen yapıda genel olarak $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ yapılarının hakimdir. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dönüşümünde ara faz olarak oluşan $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ yapısı tespit edilmemiştir. Bu durumdeşarj kanalları içerisindeki termal döngülerin kısa süreli olarak gerçekleştiği ve dolayısıyla $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının kaplama yapısında görülmediği şeklinde yorumlanmaktadır [76].

$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ fazının oluşumu Al_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerinin varlığında 1000°C ve üstü sıcaklıklara çıkıldığında görülmektedir [8]. Elde edilen sonuçlara göre $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ fazının oluşumu; 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplama sonrasında, 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi için ise 10 dakikalık kaplama sonrasında olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın sebebinin $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ilavesinin çözelti iletkenliğini azaltıcı etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışma ışığında $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ miktarının elektrolit çözeltisi iletkenliğini azaltıcı etki yaptığı bilinmektedir. Elektrolit çözeltisinin elektriksel iletkenliği, mevcut iyonik türlerin konsantrasyonu, hareketliliği ve değeri tarafından belirlenmektedir [25].

6.2. Yüzey Pürüzlülüğü

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak $0,702 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık kaplamalar sonucunda elde edilen yüzeylere ait pürüzlülük değerleri Şekil 6.3’de verilmiştir.



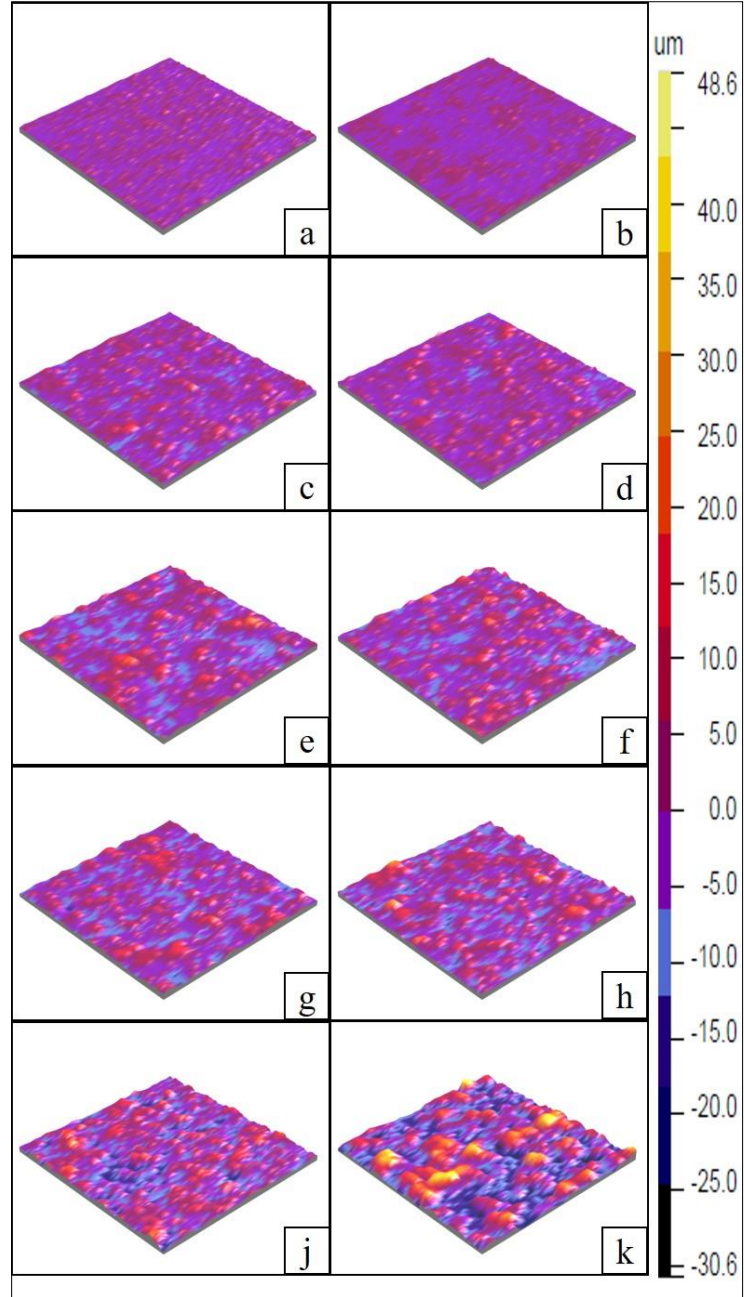
Şekil 6.3: 0.702 A/cm^2 akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin süreye bağlı değişimi.

Yüzey pürüzlülüğü değerleri artan kaplama süresiyle birlikte artış göstermektedir. 5, 10, 15 ve 20 dakikalık kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri birbirine yakın ve süreye bağlı olarak doğrusal artış gösterirken 25 dakikalık kaplamalar sonrasında 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde daha yüksek yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir.

Elde edilen en yüksek pürüzlülük değerleri göz önüne alındığında 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kaplama sonrasında altlık metale göre 30 kat, 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kaplama sonrasında ise 52 kat pürüzlülük artışı tespit edilmiştir. Kplama prosesi esnasında oluşan deşarj kanalları kaplama başlangıcında homojen şekilde malzeme yüzeyine dağılmaktadır. Dolayısıyla kısa süreli kaplamalarda elde edilen düşük kaplama kalınlığına sahip numunelerde yüzey pürüzlülüğü daha düşüktür. Kplama süresinin uzamasına bağlı olarak kaplama kalınlığı arttıkça; deşarj kanallarının çapı artmakta ve kanal etrafındaki krater yapısı büyümektedir. Deşarj kanallarının yüzeydeki dağılımı homojen olmamaktadır. Sonuç olarak kaplama süresinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır [54], [55].

25 dakikalık kaplama süresi için 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplama sonucunda sonucunda 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamaya göre yaklaşık olarak 1.5 kat daha pürüzlü yüzey elde edildiği görülmektedir. Bu durum artan $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ miktarının malzeme yüzeyindeki deşarj kanalı dağılımının homojenliğini bozarak daha pürüzlü yüzey elde edilmesiyle ilişkilendirilmektedir [32]. Ek olarak artan $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ miktarı sonucunda elde edilen deşarj kanallarının daha az sayıda fakat daha büyük çapta olmasının yüzey pürüzlülüğünü arttırıcı bir diğer etken olduğu şeklinde yorumlanmaktadır [25].

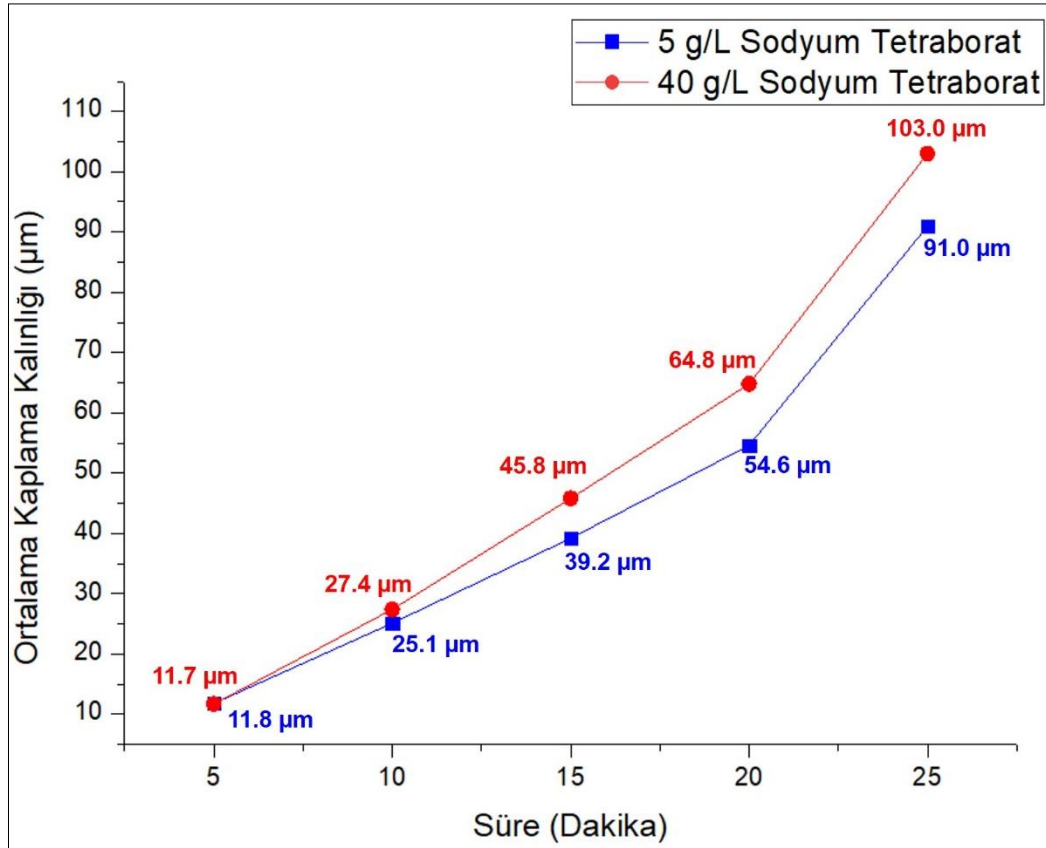
Numunelerin 1 mm x 1 mm boyutundaki alandan 32 farklı çizgisel tarama yapılarak gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü analizi sonrasında elde edilen 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü görüntüleri **Şekil 6.4**'de verilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü analizlerinin 3 boyutlu modellemesinde görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğünün kaplama süresi arttıkça arttığı görülmektedir



Şekil 6.4: 0.702 A/cm² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının 3 boyutlu yüzey haritalama görüntüleri; 5 g/L: (a) 5 dk, (c) 10 dk (e) 15 dk, (g) 20 dk (i) 25 dk, 40 g/L: (b) 5 dk, (d) 10 dk (f) 15 dk, (h) 20 dk (j) 25 dk.

6.3. Kaplama Kalınlığı

Kaplanan numunelerin yüzeyinden girdap akımları tekniğı kullanılarak 15 farklı ölçümün ortalaması alınarak elde edilen kaplama kalınlığı değeri Şekil 6.5’de verilmiştir.

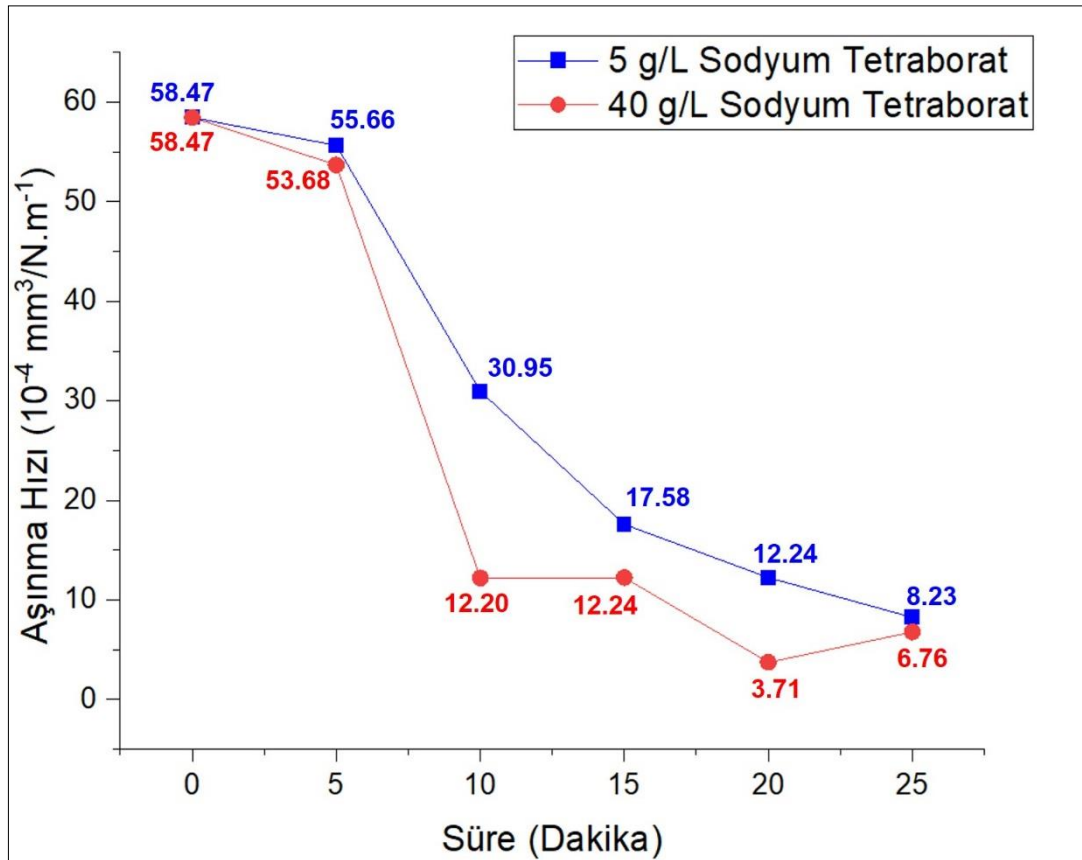


Şekil 6.5: 0.702 A/cm² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama kalınlık değeri süreye bağlı değişimi.

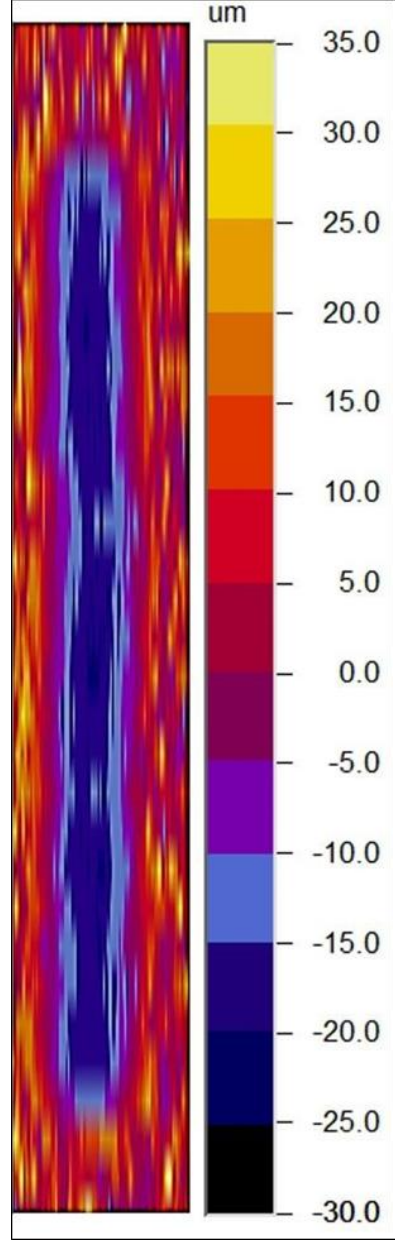
Artan sürenin kaplama kalınlığını arttırıcı etki yaptığı belirlenmiştir. 40 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O ilave edilen elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda ortalama kalınlık değeri 5 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O eklenmiş elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalardan daha yüksektir. Bu durum artan Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O miktarının çözeltinin elektrik iletkenliğini değiştirerek deşarj kanallarının karakteristik yapısını değiştirmesiyle açıklanmaktadır [25].

6.4. Aşınma Testi

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 0.702 A/cm^2 sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık değişen kaplama sürelerinde 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde kaplanmış numunelerin 5 N yük altında 10 mm/sn kayma hızında 100 m mesafe boyunca 6 mm çapında Al_2O_3 aşındırıcı bilye ile aşındırılması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 6.6'da, elde edilen aşınma izinin haritalama örneği Şekil 6.7'de verilmiştir. Veriler, aşınma deneyi sonrasında elde edilen izlerin profilometre cihazı kullanılarak taranması sonucu elde edilmiştir.



Şekil 6.6: 0.702 A/cm^2 akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama aşınma hızı değerlerinin süreye bağlı değişimi.



Şekil 6.7: Gerçekleştirilen aşınma analizi sonrasında elde edilen aşınma izi örneği.

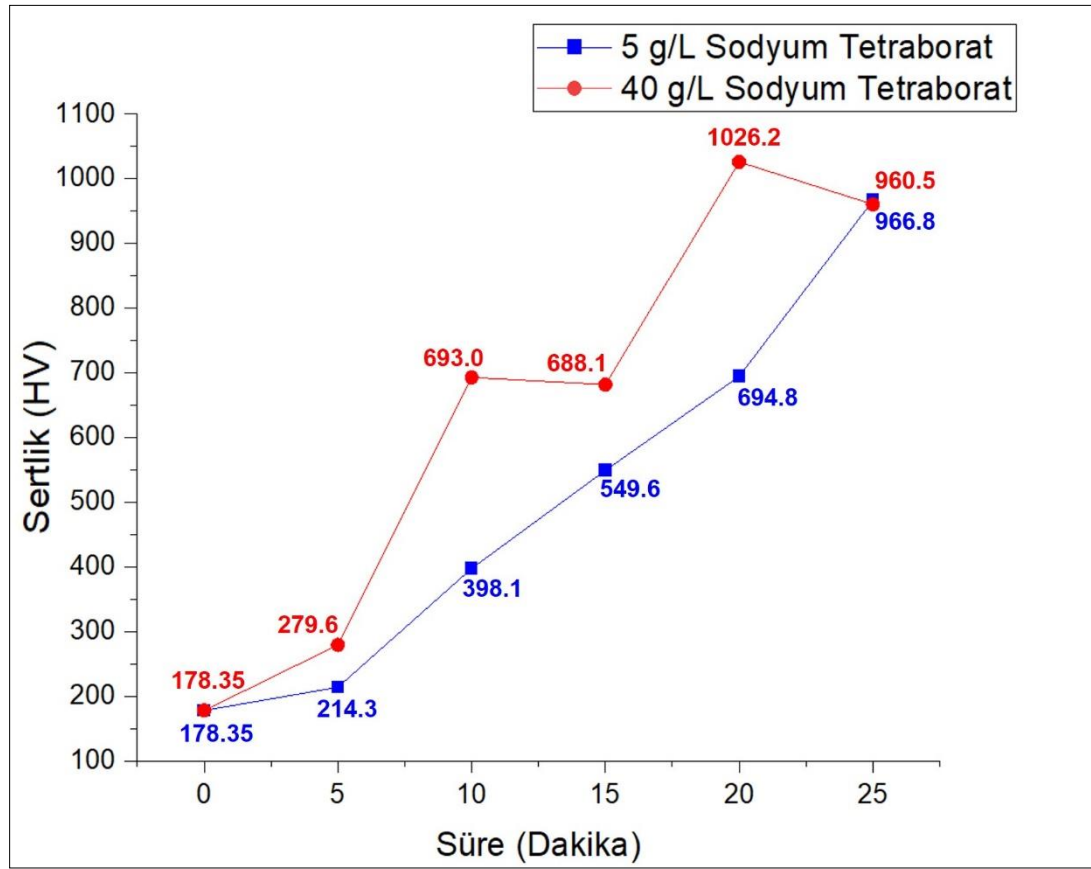
Elde edilen verilere göre en düşük aşınma hızı 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonrasında elde edilen $3.71 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}^{-1}$ değeri ile en yüksek aşınma hızı ise 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 5 dakikalık kaplama sonrasında hesaplanan $55.66 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}^{-1}$ sonucu ile elde edilmiştir.

Altlık metale yapılan aşınma analizi sonrasında aşınma hızı $58.47 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}^{-1}$ belirlenmiştir. En yüksek aşınma direncinin elde edildiği 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonucunda altlık metale göre aşınma direncinin 15 kat arttığı görülmüştür. Kaplamanın aşınma direncinin temel olarak sertlik, pürüzlülük, kalınlık, faz dağılımı ve yapısı gibi kaplama özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir [78].

Aşınma direncinin her iki elektrolit çözeltisi için ortak olarak artan süreyle birlikte artması, süreye bağlı olarak kaplama kalınlığının artmasıyla ilişkilendirilmiştir. 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kaplamalarda, kaplama süresinin ve dolayısıyla kaplama kalınlığının daha yüksek olmasına rağmen 20 dakikalık kaplamada 25 dakikalık kaplamaya göre daha yüksek aşınma direnci elde edilmiştir. Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamalarda gözenekli dış bölge, yoğun iç bölge ve ara yüzey şeklinde isimlendirilen 3 farklı bölge bulunmaktadır. Gözenekli dış bölge genellikle amorf fazları içerir ve kaplama mukavemetine belirgin bir katkısı yoktur. Yoğun iç bölge kaplama iç yapısında faz dönüşümleri sonucunda meydana gelen dayanıklı fazların bulunduğu, kaplamaya aşınma direncini ve mukavemeti sağlayan bölgedir. Ara yüzey ise altlık metal ile yoğun iç bölge arasında oluşan kalınlığı yaklaşık olarak $5 \mu\text{m}$ olan bölgedir [54]. Kaplama süresinin artışı faz dönüşümlerini tetikleyerek kaplama kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü artırır. Kaplama kalınlığının artışı iç yapıdaki yoğun iç bölgenin kalınlığını arttırırken ek olarak gözenekli dış bölgenin de büyümesini sağlar. 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren 25 dakikalık kaplama için yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı değerleri 20 dakikalık kaplamaya göre fazla olmasına rağmen aşınma direncini arttırıcı etki göstermeyen gözenekli dış bölgenin de daha kalın olmasıyla ilişkilendirilmiştir. **Şekil 6.1** ve **Şekil 6.2** incelendiğinde yüksek dayanım sağlayan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda daha fazla sayıda pik verdiği görülmüştür. **Şekil 6.6**'ya göre genel olarak aşınma direncinin 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi kullanılarak elde edilen kaplamalarda daha yüksek olması yapı içerisinde $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının daha yoğun olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte yüksek dayanıma sahip olan ve aşınma direncini iyileştiren $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ [77] yapısı yalnızca 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde 15, 20 ve 25 dakikalık kaplamalarda tespit edilmiştir.

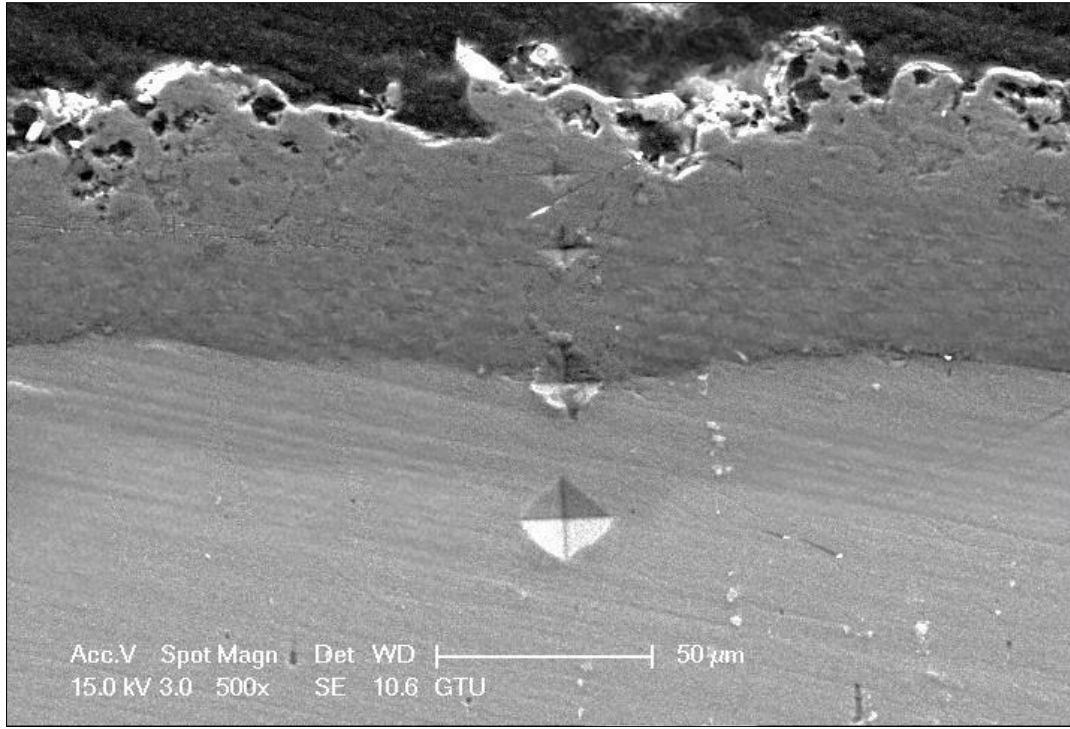
6.5. Sertlik Testi

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 0.702 A/cm² sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık değişen kaplama sürelerinde 5 g/L ve 40 g/L Na₂(B₄O₅(OH)₄)•8H₂O içeren elektrolit çözeltilerinde kaplanmış numunelere ait ortalama sertlik değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8: 0.702 A/cm² akım yoğunluğunda kaplanan AA7075-T6 alaşımının ortalama sertlik değerlerinin süreye bağlı değişimi.

Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamalar genel olarak gözenekli morfoloji göstermektedir. Bu durumdan dolayı kaplamaların sertlik değerleri malzeme yüzeyi boyunca homojen bir dağılım göstermemektedir. Sertlik değerlerini belirlemek adına numune yüzeyindeki homojen bölgelerden çeşitli ölçümler yapılarak ortalaması alınmıştır. Alınan ölçümlere örnek Şekil 6.9’de verilmiştir.



Şekil 6.9: Elde edilen kaplamaların ortalama sertlik değerlerinin ölçüm örneği.

Elde edilen verilere göre sonuçlar aşınma testi sonuçlarıyla benzerlik göstermiş en yüksek ortalama sertlik değeri 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonrasında elde edilen 1026.2 HV değeri ile elde edilmiştir. En yüksek ortalama sertlik değerinin elde edildiği 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonrasında sertlik değerinin yaklaşık olarak 6 kat arttığı görülmüştür.

Sertlik değerinin her iki elektrolit çözeltisinde tüm kaplama sürelerinde ortak olarak artış göstermesi kaplama morfolojisinde elde edilen ve dayanımı arttıran $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ve $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazlarının oluşumu ve artan kaplama süresiyle meydana gelen faz dönüşümleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Bu fazların kaplama içerisindeki dağılımı ve miktarı sertlik değeri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır [54]. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de yer alan XRD grafikleri incelendiğinde her iki çözelti için de ortak olarak artan kaplama süresiyle birlikte kaplamanın genel iç yapısını oluşturan ve yapıya mukavemet kazandıran $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının pik şiddetinin arttığı ve yeni piklerin oluştuğu görülmektedir.

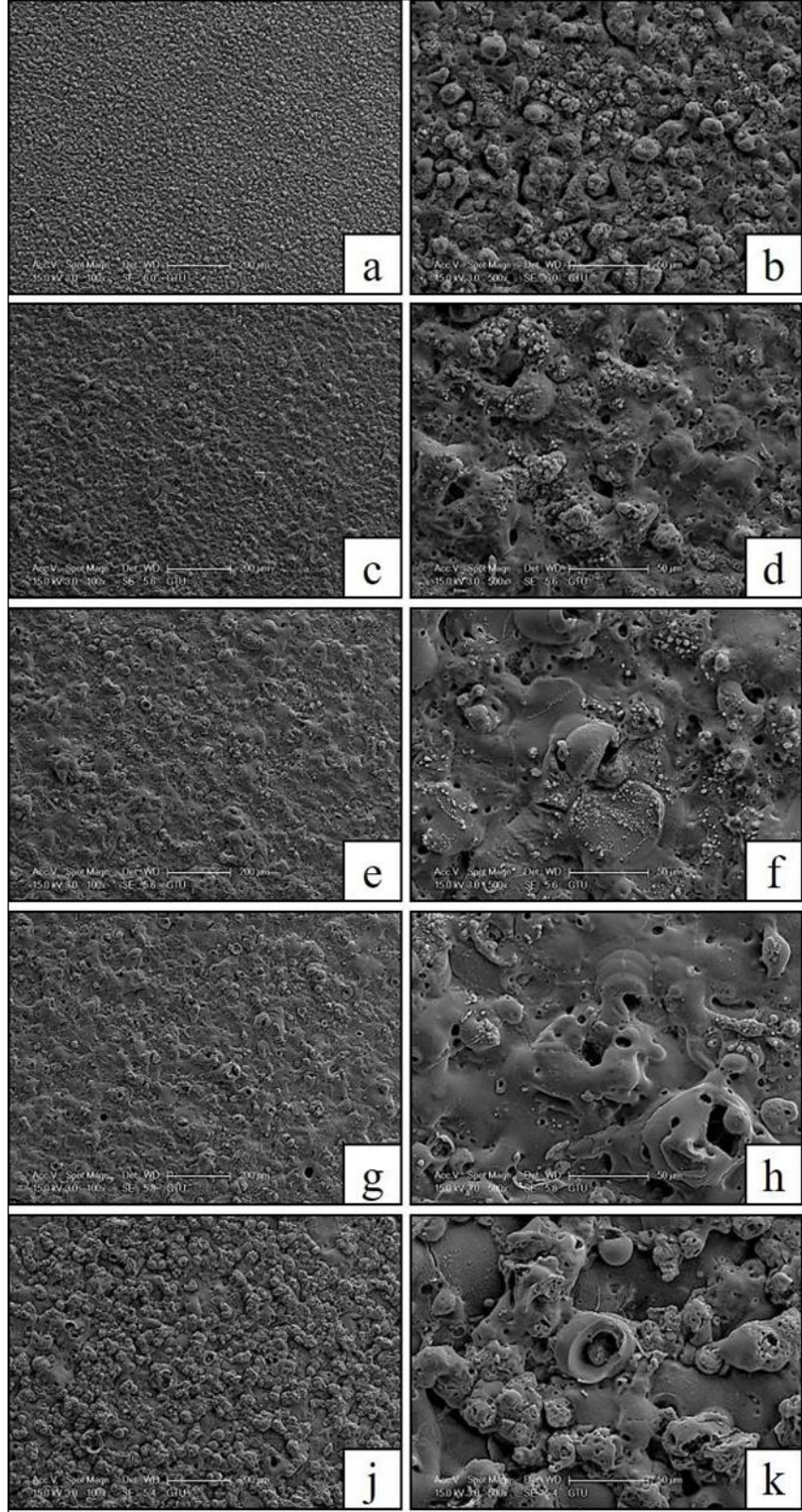
Bu durum artan kaplama süresinde $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ faz dönüşümünün fazlaştığı ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının kaplamanın iç bölgelerinde yoğunlukta olması dolayısıyla ortalama sertlik değerinin artması sonucunu doğurmaktadır [33], [57], [76]. **Şekil 6.2'**de yer alan XRD grafikleri incelendiğinde en yüksek ortalama sertlik değerinin elde edildiği 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamada yer alan $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazının bu parametrelerde en yüksek şiddette pik verdiği görülmektedir. Bununla birlikte **Şekil 6.6'**da yer alan aşınma analizi sonucunda göre en yüksek aşınma direncinin yine 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonrasında elde edilmiştir. Bu bulgular gerçekleştirilen sertlik analizi sonrası elde edilen en yüksek ortalama sertlik değerini destekler ve doğrular niteliktedir.

Şekil 6.8'e göre 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen 10 ve 15 dakikalık kaplamalar sonrasında birbirine yakın ortalama sertlik değerleri elde edilmiştir. Ek olarak **Şekil 6.6'**da yer alan aşınma hızı grafiği incelendiğinde ise birbirine yakın aşınma hızı verileri hesaplanmıştır. **Şekil 6.2'**de yer alan XRD grafiği incelendiğinde bu sürede faz yapılarının birbiriyle benzer olarak $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ten oluştuğu tespit edilmiştir. $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazı ilk olarak 10 dakikalık kaplamada görülmüş, 15 dakikalık kaplamada pik şiddetinde az miktarda artış saptanmıştır. 10 ve 15 dakikalık kaplama süreleri arasında yapıya mukavemet kazandıracak yeni bir faz oluşmaması, yapıda mevcut olan mukavemet kazandıran faz miktarlarının birbirine yakın olması sonucunda ortalama sertlik değeri ve aşınma hızı verilerinde artış görülmemiştir.

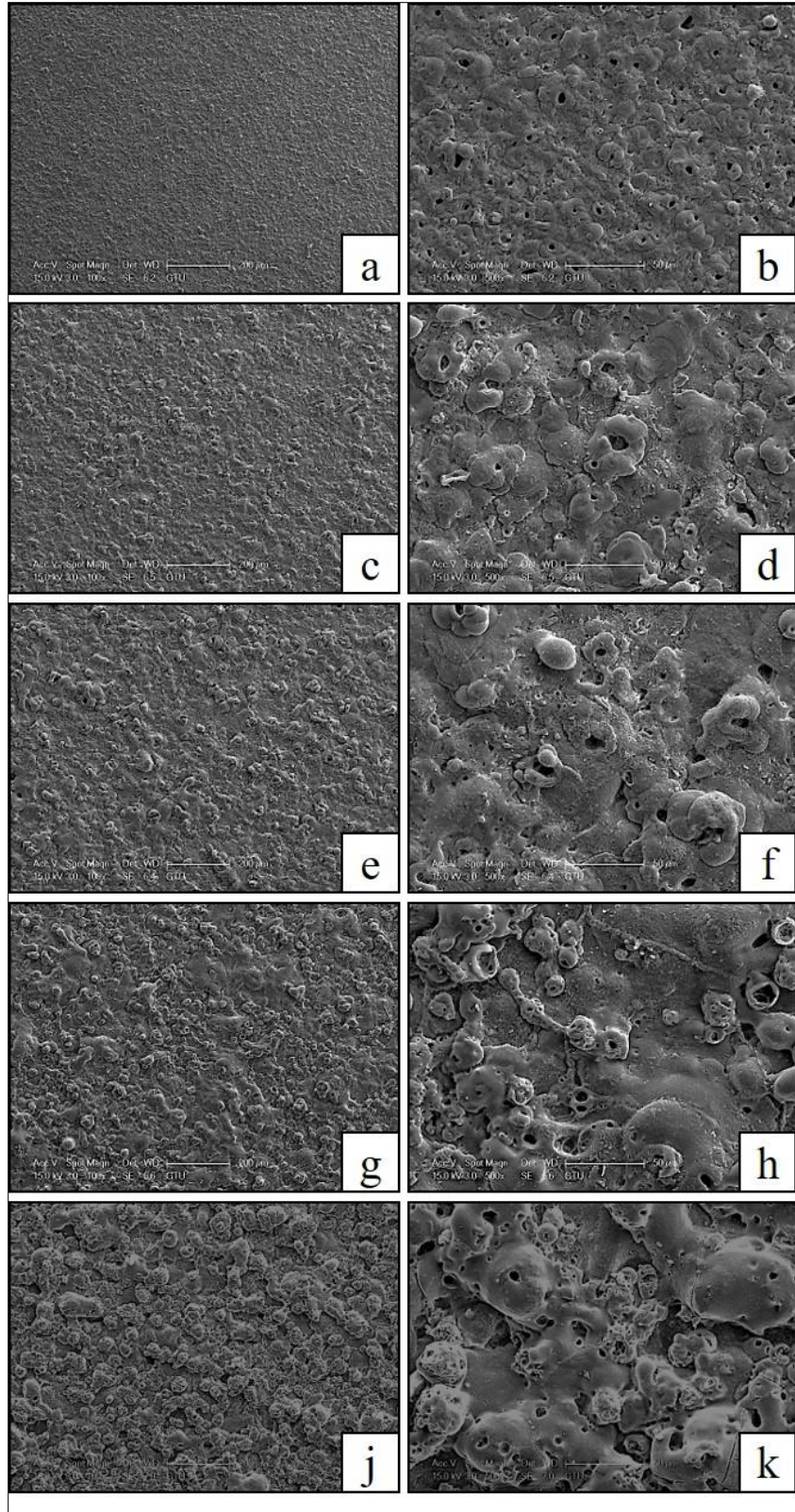
6.6. Yüzey ve Mikroyapı Karakterizasyonu

6.6.1. Yüzey Karakterizasyonu

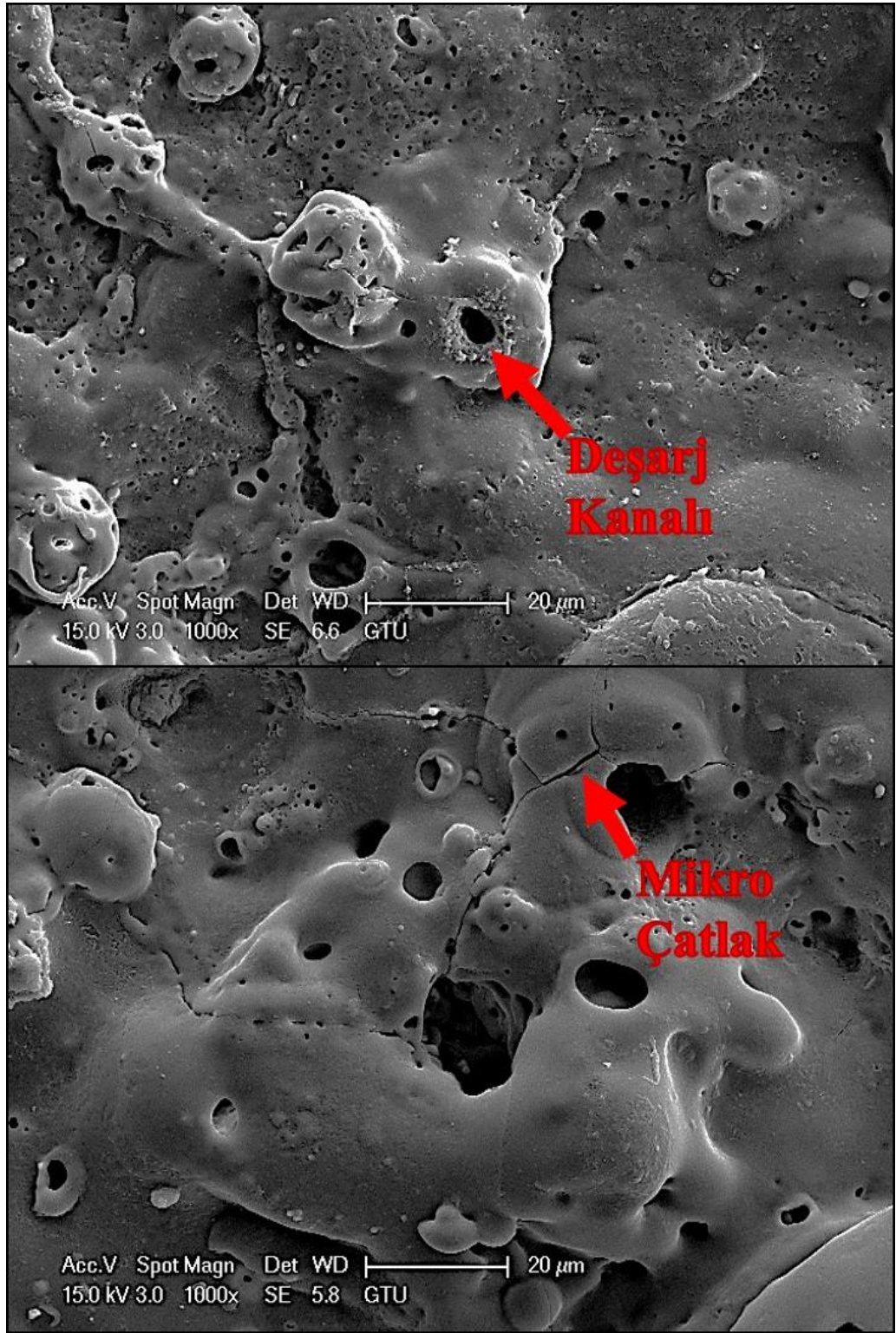
7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 0.702 A/cm^2 sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık değişen kaplama sürelerinde 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde kaplanmış numunelere ait taramalı elektron mikroskobu kullanılarak çekilmiş kaplama yüzey görüntüleri **Şekil 6.10** ve **Şekil 6.11**'de verilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde her numunede gözenekli bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Bu gözeneklere deşarj kanalı adı verilir. 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde gerçekleştirilen düşük süreli kaplamalarda yüzeyin uzun süreli kaplamalarda elde edilen yüzeylere göre daha homojen yapıda olduğunu görülmektedir. Kaplama yüzeyinde deşarj kanallarıyla birlikte bölgesel olarak bazı mikro çatlakların bulunduğu da belirlenmiştir. 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde oluşturulan kaplamanın 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde elde edilen kaplamaya göre daha sıkı ve yoğun yapıda olduğu ek olarak mikro çatlakların sayısının az ve boyutlarının küçük olduğu belirlenmiştir. Deşarj kanallarındaki yüksek sıcaklık ile birlikte altlık metalden gelen ergimiş alüminyum, deşarj kanalı dışında soğuk elektrolit çözeltisiyle karşılaştığı anda hızlıca katılaşmaktadır. Bu hızlı katılaşma, mikro çatlaklara sebebiyet verdiği düşünülen termal gerilimlere yol açabilmektedir. Aynı zamanda plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle elde edilen kaplamalar içerisinde deşarj kanallarında elde edilen sıcaklığa bağlı olarak alümina tabakasında sıklıkla $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dönüşümü görülebilmektedir. Temel olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ten daha küçük birim hücre hacmine ve daha yüksek yoğunluğa sahiptir [54]. Bu faz dönüşümü meydana getirdiği gerilim ile birlikte **Şekil 6.12**'de yer aldığı gibi kaplama yapısındaki mikro çatlakların oluşumuna sebep olabilmektedir. **Şekil 6.10** ve **Şekil 6.11** incelendiğinde aynı akım yoğunluğu ve aynı süre kullanılarak 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde kaplanarak elde edilen yüzey morfolojileri görülmektedir.



Şekil 6.10: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait yüzey morfolojisi görüntüleri; (a) (b) 5 dk, (c) (d) 10 dk, (e) (f) 15 dk, (g) (h) 20 dk, (j) (k) 25 dk.



Şekil 6.11: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait yüzey morfolojisi görüntüleri; (a) (b) 5 dk, (c) (d) 10 dk, (e) (f) 15 dk, (g) (h) 20 dk, (i) (j) 25 dk.

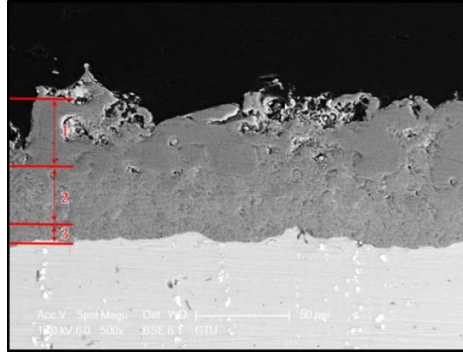


Şekil 6.12: Kaplama yüzeyinde yer alan deşarj kanalı ve mikro çatlak yapıları.

Çözeltiye eklenen $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonu arttıkça meydana gelen deşarjların yoğunluğunun arttığı ancak sayılarının azaldığı gerçekleştirilen literatür çalışmalarıyla belirlenmiştir [25]. Elde edilen sonuçlara göre 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren çözeltide gerçekleştirilen kaplamalar sonucunda elde edilen yapıdaki gözenek miktarının daha azken, şiddetlerinin 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren çözeltide gerçekleştirilen kaplamalara göre daha yüksek olduğu yorumlanmıştır.

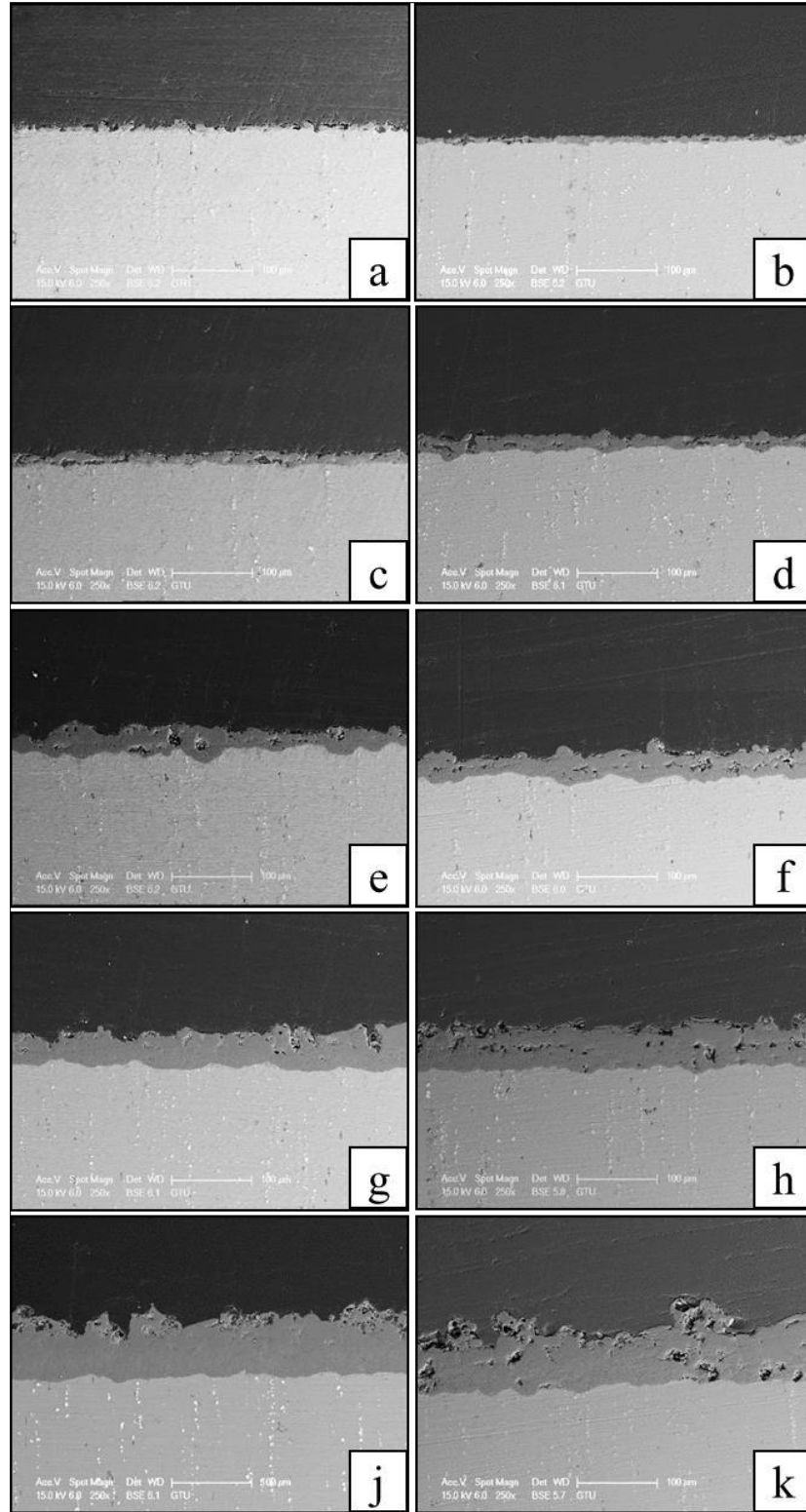
6.6.2. Kesit Karakterizasyonu

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 0.702 A/cm^2 sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık değişen kaplama sürelerinde elde edilen kaplamalarda üç farklı bölgenin varlığı görülmektedir. **Şekil 6.13**'de verilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde gözenekli dış bölge 1 numara ile, yoğun iç bölge 2 numara ile, ince ara yüzey bölgesi ise 3 numara ile belirtilmiştir[54].



Şekil 6.13: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde 25 dakika kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait kesit görüntüsü.

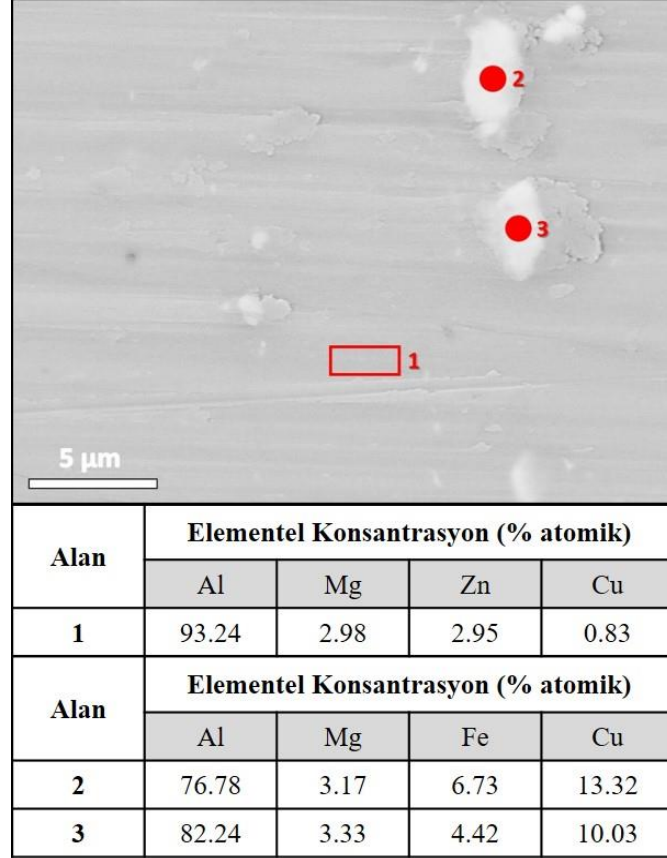
5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltilerinde kaplanmış numunelere ait taramalı elektron mikroskobu kullanılarak çekilmiş kaplama kesit görüntüleri **Şekil 6.14**'de verilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde artan kaplama süresiyle birlikte kaplama kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Bütün kaplama sürelerinde ve iki farklı çözeltide gerçekleştirilen kaplamalarda ortak olarak gözenekli bir yapının hakim olduğu görülmektedir. Bu gözenekler deşarj kanallarının varlığı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 6.14: $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde kaplanan AA7075-T6 alaşımına ait kesit morfolojisi görüntüleri; 5 g/L: (a) 5 dk, (c) 10 dk (e) 15 dk, (g) 20 dk (j) 25 dk, 40 g/L: (b) 5 dk, (d) 10 dk (f) 15 dk, (h) 20 dk (k) 25 dk.

6.6.3. Yüzey ve Kesit EDS Sonuçları

AA7075-T6 alaşımı kullanılarak plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 0.702 A/cm^2 sabit akım yoğunluğunda 5, 10, 15, 20 ve 25 dakikalık değişen kaplama sürelerinde 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kaplamaların yüzey ve kesitlerinden alınan enerji dağılımı spektrometresi sonuçları Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25'te verilmiştir. Şekil 6.15'te 7075 altlık metaline ve malzemede yer alan çökeltilere ait SEM-EDS sonuçları verilmiştir. 7075 alüminyum alaşımlarında döküm ve homojenizasyon prosesleri esnasında boyutları 1 ile 20 mikron arasında değişen $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$ ve Mg_2Si bileşikleri oluşabilmektedir [50], [51]. Elde edilen SEM-EDS sonuçlarından ve literatürde yer alan benzer analizlerden [79] yola çıkılarak analiz edilen çökeltilerin bileşimlerinin sitokiyometrik olarak $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ fazına yakın olduğu tespit edilmiştir.

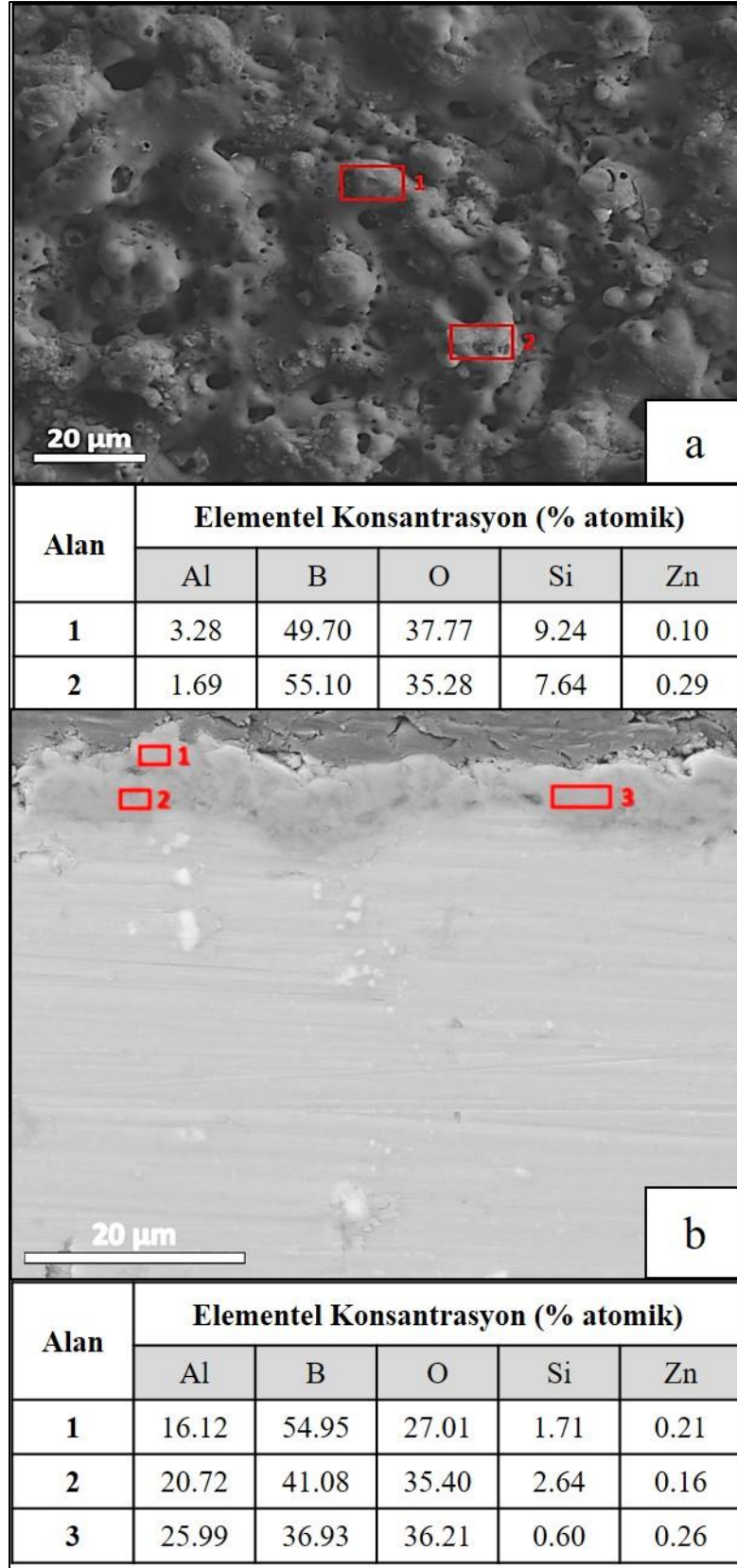


Şekil 6.15: 7075 altlık metaline ve çökeltilere ait EDS sonuçları.

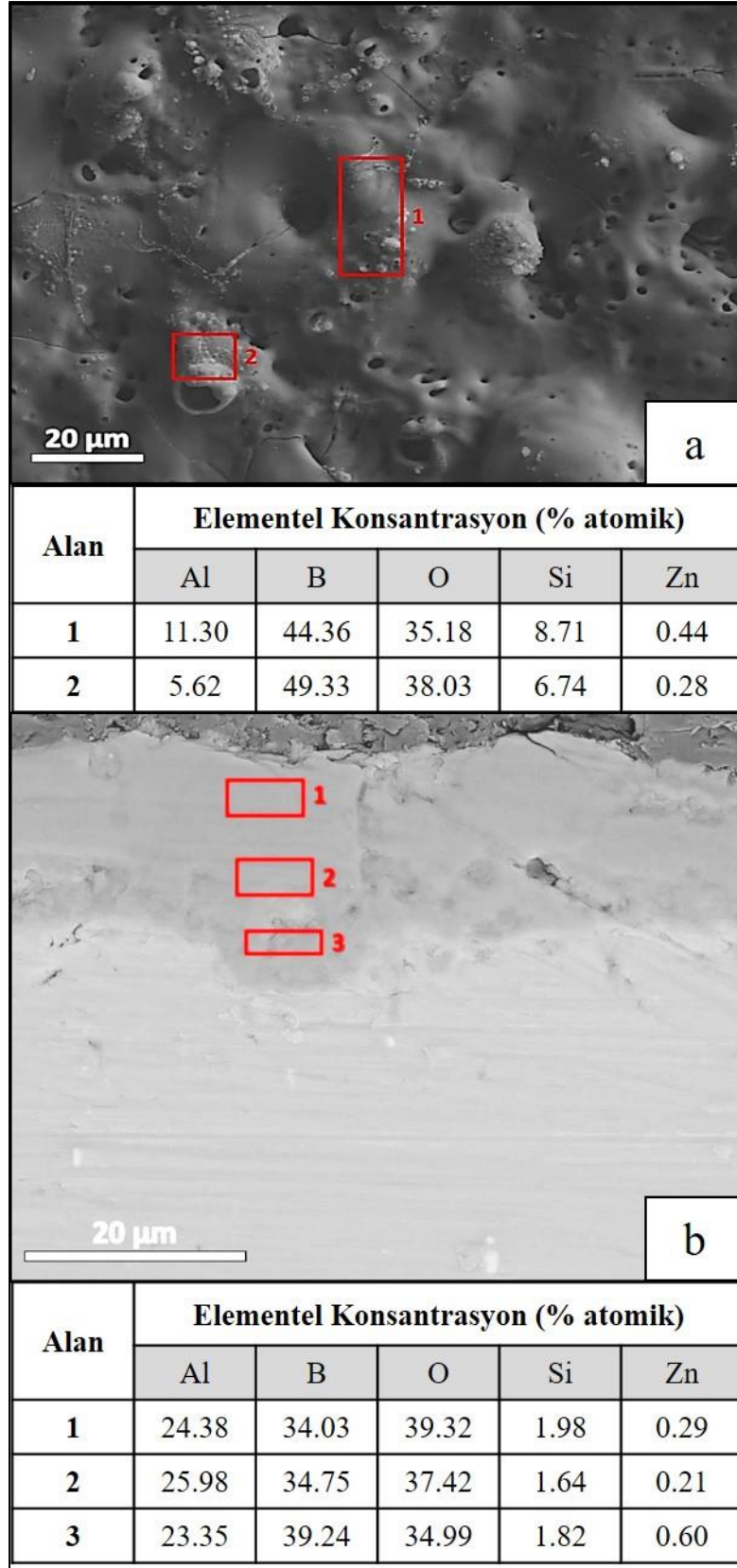
Elde edilen sonuçlara göre kaplama yapısında Al, B, O, Si ve Zn elementleri tespit edilmiştir. 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde üretilen kaplamaların yüzey ve kesit analiz sonuçları **Şekil 6.16**, **Şekil 6.17**, **Şekil 6.18**, **Şekil 6.19** ve **Şekil 6.20**'de yer almaktadır. Ortalama % atomik B miktarları 5 dakikalık kaplama için %44.31, 10 dakikalık kaplama için %37.74, 15 dakikalık kaplama için %38.38, 20 dakikalık kaplama için %39.35, 25 dakikalık kaplama için %38.17 şeklinde analiz değerleri elde edilmiştir. 10, 15 ve 20 dakikalık kaplama sürelerinde yüzde atomik B oranlarında doğrusal artış görülmektedir. 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde üretilen kaplamaların yüzey kesit analiz sonuçları **Şekil 6.21**, **Şekil 6.22**, **Şekil 6.23**, **Şekil 6.24** ve **Şekil 6.25**'de yer almaktadır. Ortalama yüzde atomik bor miktarları 5 dakikalık kaplama için %42.99, 10 dakikalık kaplama için % 39.48, 15 dakikalık kaplama için %41.83, 20 dakikalık kaplama için %45.41, 25 dakikalık kaplama için %41.03 şekilde hesaplanmıştır. 10, 15 ve 20 dakikalık kaplamalarda 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda elde edilen analizlere benzer olarak doğrusal artış söz konusudur. Bu veriler **Şekil 6.1**'de verilen X-ışını kırınımı analizi sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamaların analizinde B içeren faza ait bir pike rastlanmazken enerji dağılımı spektrometresi sonuçlarında yüzde atomik olarak belirli oranda B elementi görülmektedir. Bu durum B elementinin kristalin yapıya dahil olmadığı, morfolojide yalnızca amorf halde yer aldığı, dolayısıyla XRD sonuçlarında görülmeyeceği şeklinde yorumlanmıştır. SEM-EDS analizlerini gösteren şekiller incelendiğinde yüzey kesit yapısında elde edilen en yüksek bor oranı, 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamayı temsil eden **Şekil 6.23**'te görülmektedir. **Şekil 6.2**'de yer alan X-ışını kırınımı analizi sonuçlarına göre bu parametrelerde gerçekleştirilen kaplamada $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazı görülmüştür. Bu durum SEM-EDS sonuçlarıyla yüksek oranda tespit edilen ve çözeltiye eklenmiş olan $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinden sağlanan B elementinin amorf halde kalmadığı, malzeme mekanik özelliklerine katkı sağlayabilecek şekilde kristal yapıya dahil olarak bileşik oluşturduğu şeklinde yorumlanmaktadır. **Şekil 6.6**'da yer alan aşınma analizi sonuçları incelenerek bu durumun malzeme dayanımına etkisi görülmektedir.

En yüksek B içeriğinin tespit edildiği 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama ile en yüksek aşınma direnci elde edilmiştir.

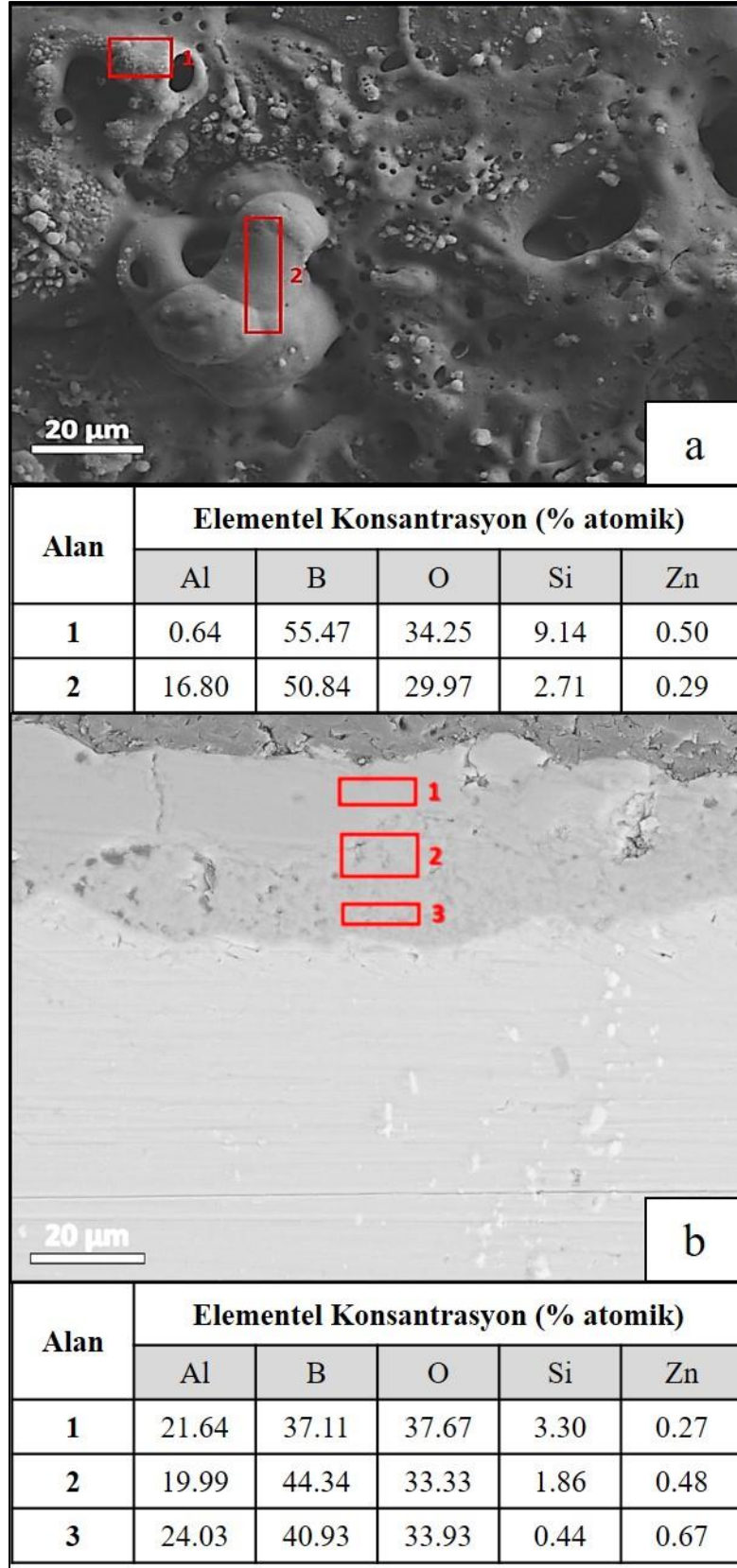
Yüzeyde yer alan Si miktarı kesit alanında tespit edilen Si miktarından yüksektir. Bu durum genellikle kaplamanın dış katmanında oluşma potansiyeli gösteren $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ fazıyla ilişkilendirilebilir [80]. Bu durum kesitten alınan EDS analizleri sonucunda genel olarak 1 ve 2 numaralı analiz alanlarında yani yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştirilen analizlerde % atomik Si miktarının 3 numaralı analiz bölgesine göre daha yüksek çıkmasıyla desteklenmektedir. 5 g/L ve 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltileri içerisinde gerçekleştirilen kaplamalar Si oranı açısından incelendiğinde yüzeyde yer alan yüzde atomik Si oranlarının birbiriyle yakın olduğu görülürken kesitte yer alan yüzde atomik Si oranları için 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda daha yüksek oranlarda Si bulunmaktadır. Düşük orandaki $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunun Si birikimi açısından daha uygun ortam hazırladığı düşünülmektedir.



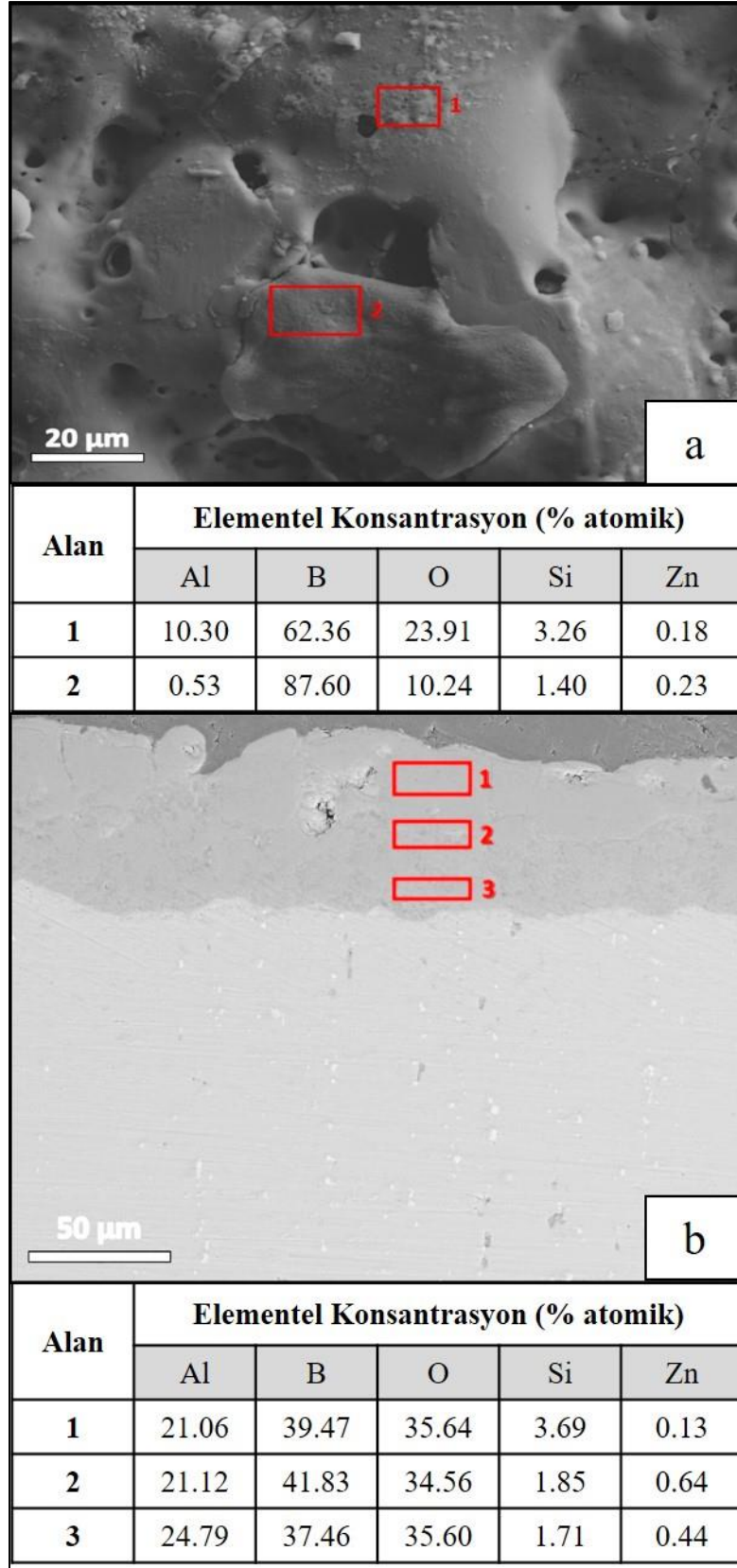
Şekil 6.16: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 5 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit.



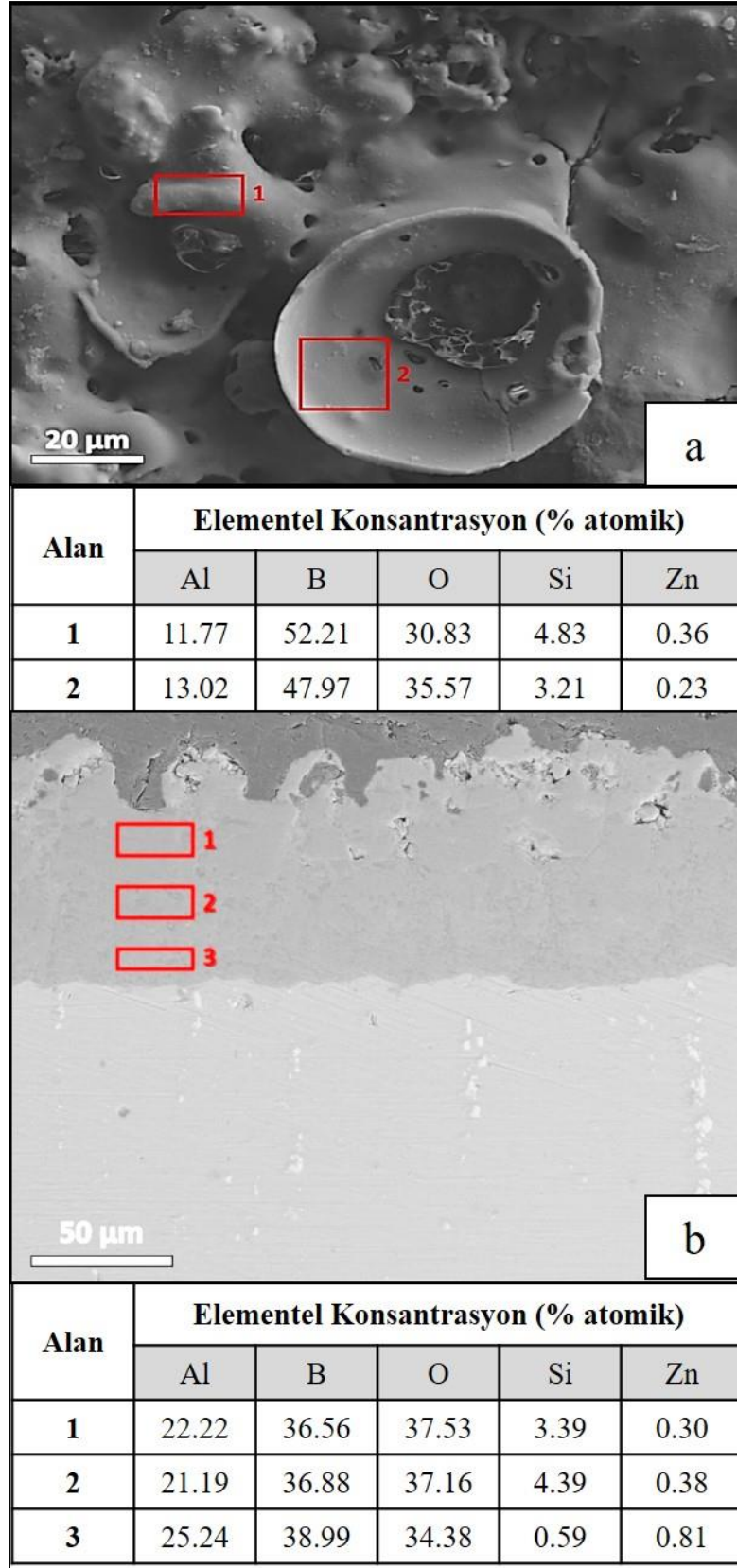
Şekil 6.17: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 10 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



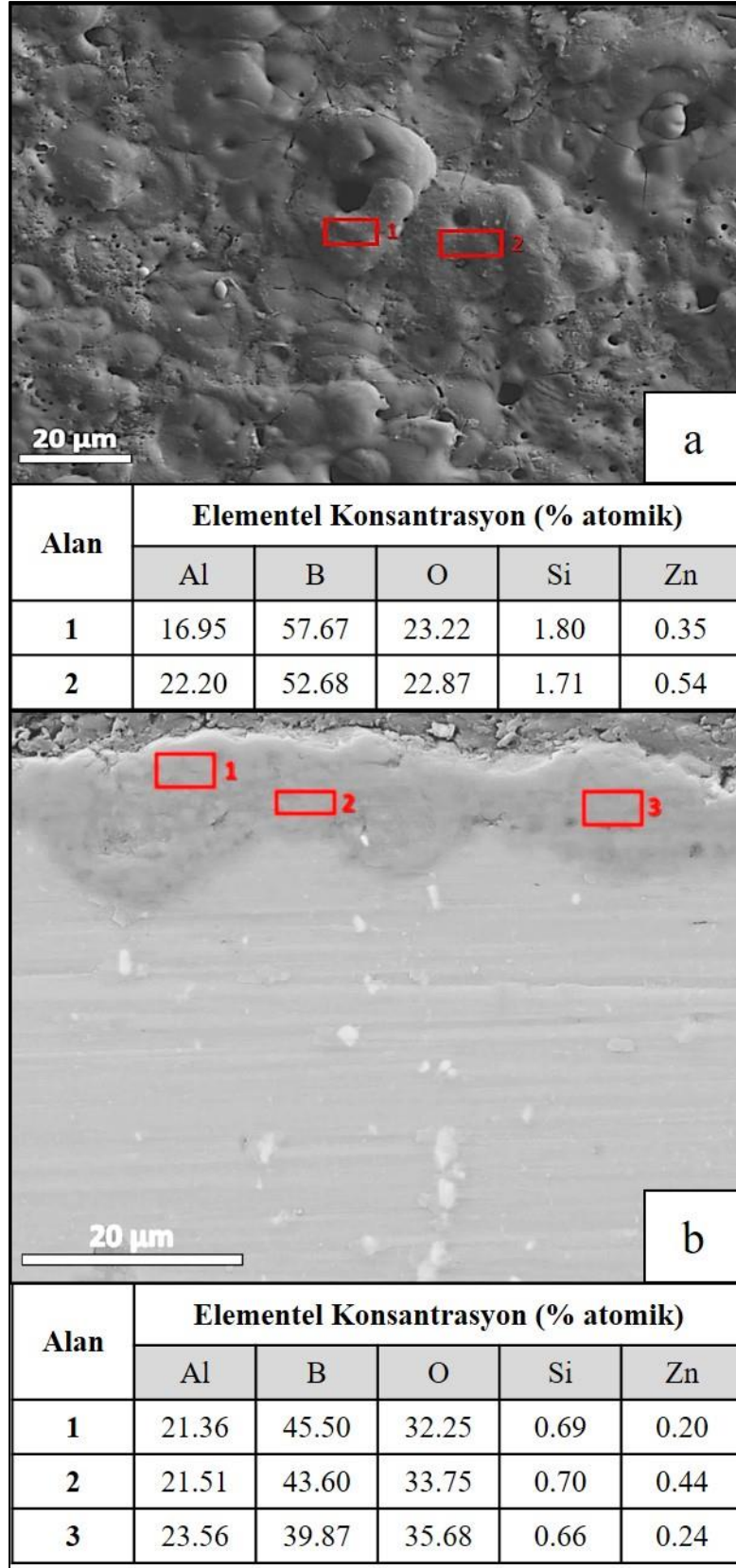
Şekil 6.18: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



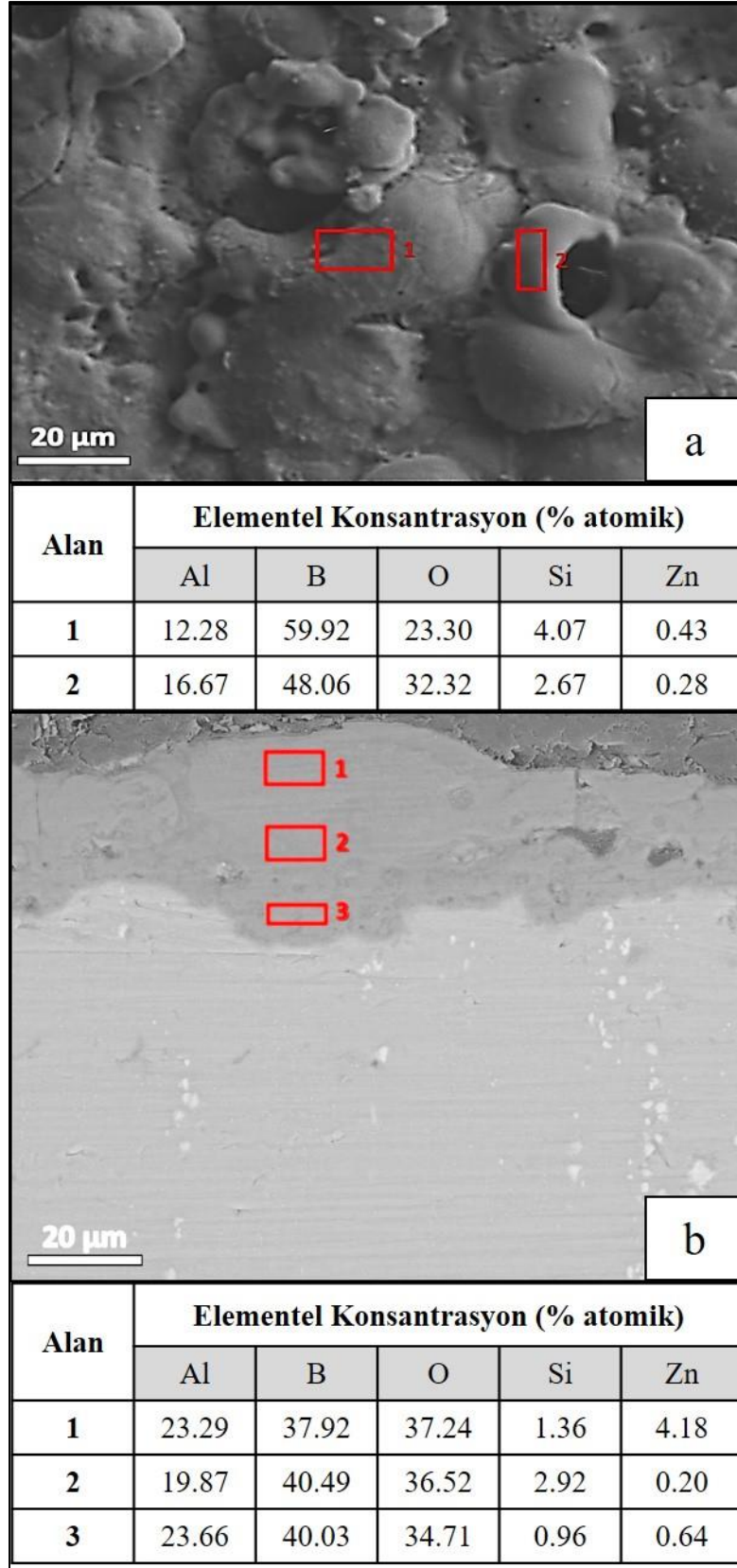
Şekil 6.19: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



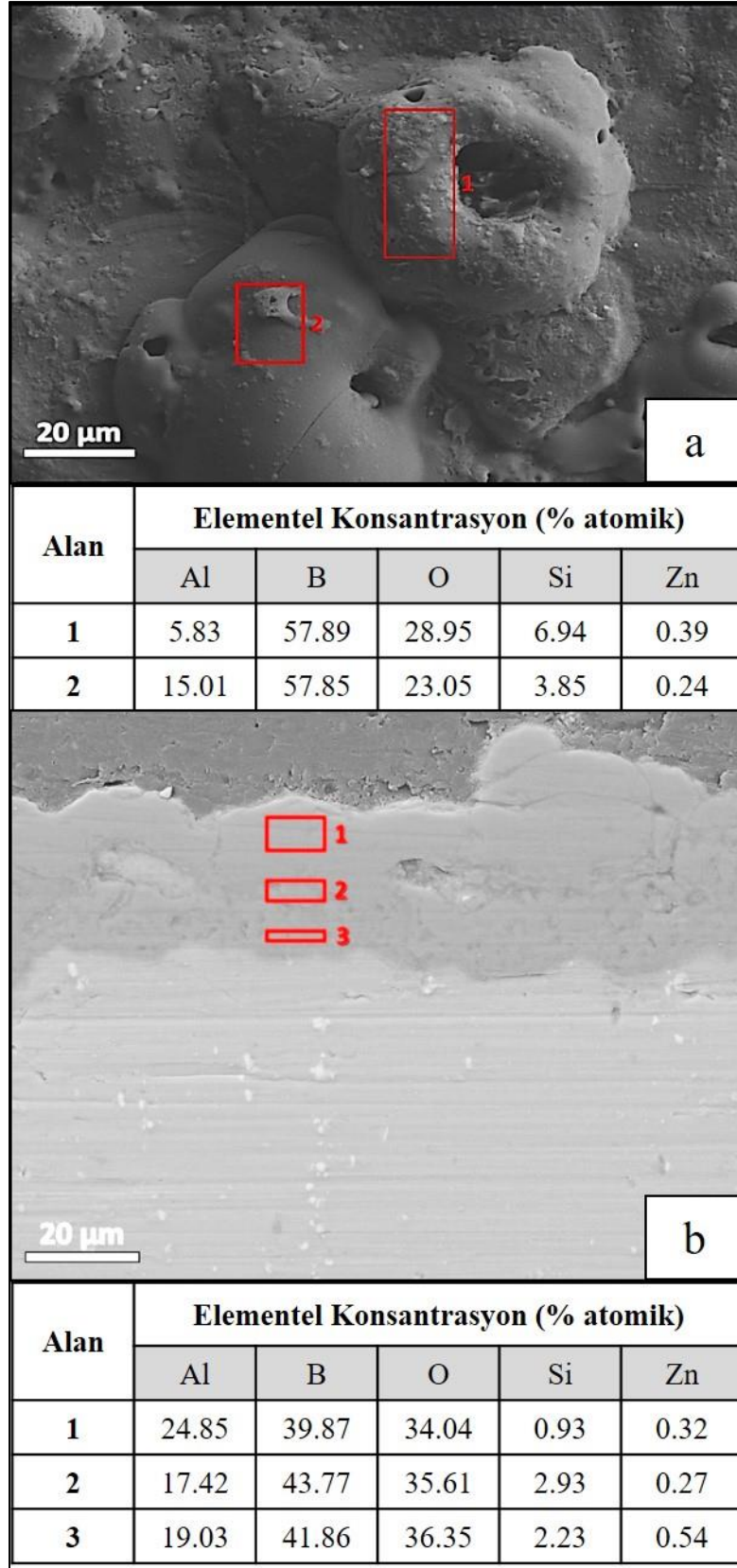
Şekil 6.20: 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 25 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



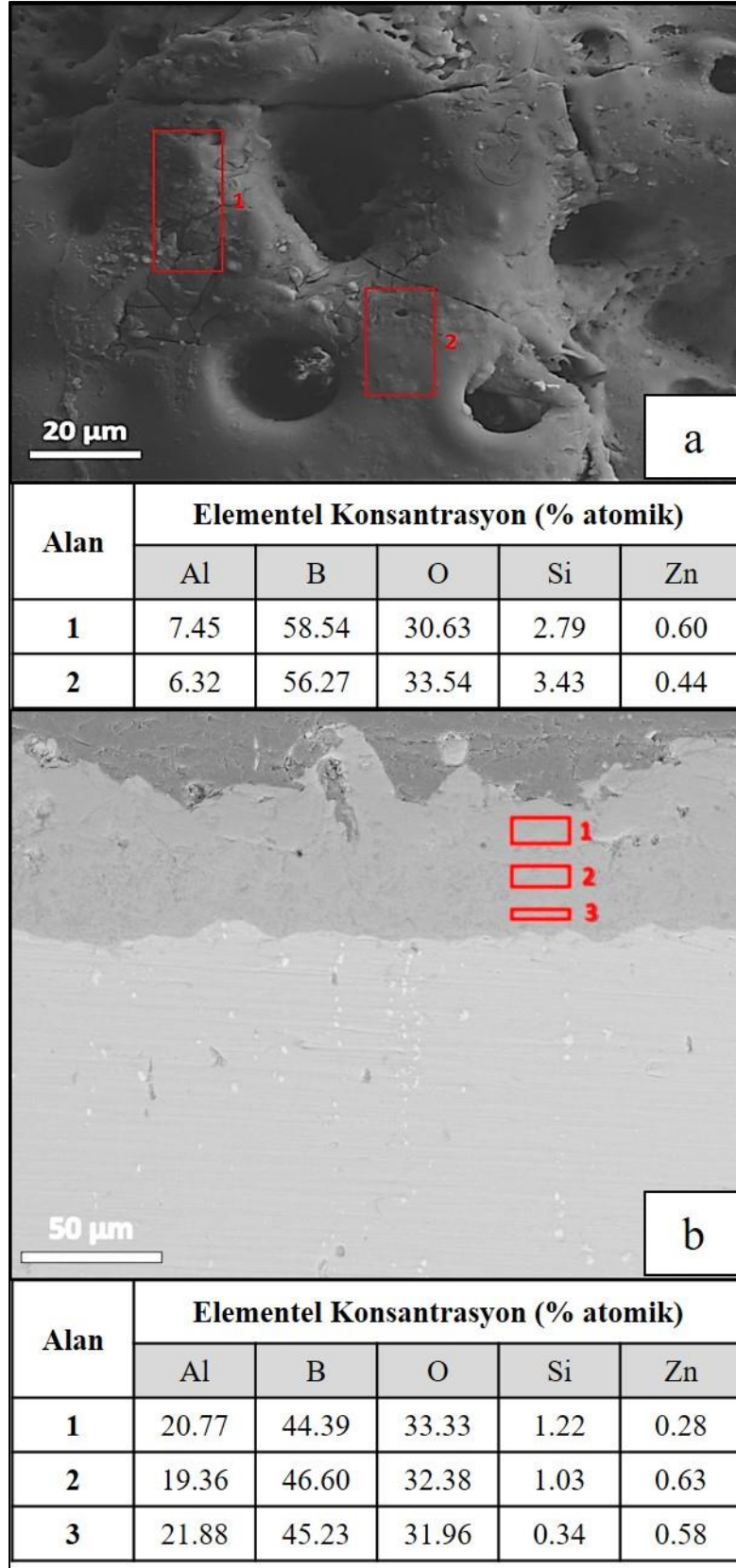
Şekil 6.21: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 5 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



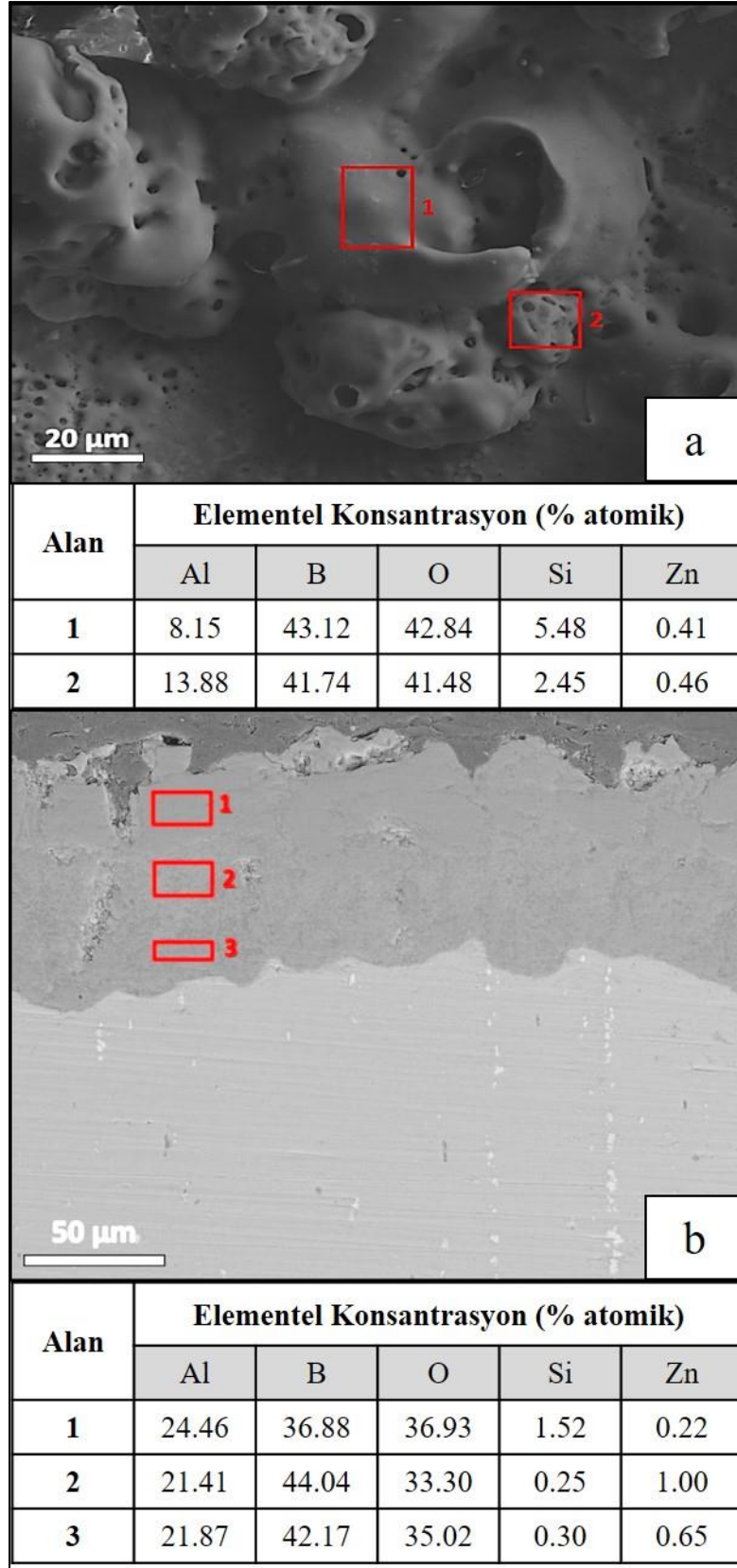
Şekil 6.22: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 10 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



Şekil 6.23: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 15 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



Şekil 6.24: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit



Şekil 6.25: 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içinde gerçekleştirilen 25 dakikalık kaplamaya ait EDS sonuçları (a) yüzey (b) kesit

7. GENEL SONUÇLAR

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle 7075 alüminyum altlık metali kullanılarak Na_2SiO_3 ve KOH içeren elektrolit çözeltisi içerisine 5 g/L ve 40 g/L miktarlarında $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ eklenerek 5, 10, 15, 20, 25 dakikalık kaplama sürelerinde sabit akım yoğunluğunda başarı ile kaplanmıştır. Kaplama prosesi sonrasında numuneler; kalınlık ölçümü, X-ışını kırınımı analizi, yüzey ve mikroyapı karakterizasyonu, enerji dağılımı spektrometresi, yüzey pürüzlülüğü, aşınma testi, mikrosertlik ölçümü analizleri uygulanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kaplamaların kalınlıkları artan kaplama süresiyle birlikte artış göstermektedir. 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ilave edilen elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalarda ortalama kalınlık değeri 5 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ eklenmiş elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen kaplamalardan daha yüksektir. Düşük kaplama sürelerinde kaplamanın daha ince ve düzensiz olduğu görülürken artan kaplama süresiyle daha homojen yapılar tespit edilmiştir.
- Genel faz yapısı elektrolit çözeltileri için ortak olarak $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ fazlarından oluştuğu görülürken, 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ilave edilen elektrolit çözeltisinde ek olarak 10 dakikalık kaplama süresinden itibaren $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ yapısı görülmeye başlanmıştır. Akım yoğunluğu sabit tutularak kaplama süresinin artışıyla birlikte $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ ve bunlara ek olarak $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ gibi faz dönüşümüyle meydana gelen fazların pik şiddetleri artmıştır.
- Artan kaplama süresiyle birlikte yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. Düşük süreli kaplamalarda yüzeyin uzun süreli kaplamalarda elde edilen yüzeylere göre daha homojen yapıda olduğu görülmüştür. Bu durum deşarj kanallarının malzeme yüzeyindeki döngüleriyle açıklanmıştır. Kaplama yüzeyinde deşarj kanallarıyla birlikte bölgesel olarak bazı mikro çatlakların bulunduğu da belirlenmiştir.

- SEM-EDX analizi sonuçlarına göre kaplama yapısında Al, B, O, Si ve Zn yapıları tespit edilmiştir. XRD sonuçları incelendiğinde 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ilave edilen elektrolit çözeltisinde 10 dakikalık kaplama süresinden itibaren $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ yapısı görülmeye başlanmışken, SEM-EDX sonuçlarına iki elektrolit çözeltisinde gerçekleştirilen tüm kaplamalarda değişken oranlarda B elementi tespit edilmiştir.
- Mikro sertlik analizi sonuçlarına göre ile en yüksek sertlik değeri 1026.2 HV olarak ölçülerek 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonunda elde edilmiştir. Bu değer ile 7075 alüminyum alaşımı altlık metalin 178.35 HV olarak ölçülen sertlik değerine göre 6 kat artış tespit edilmiştir. Bu iyileşme; kaplama morfolojisinde elde edilen ve dayanımı arttıran $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ve $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ fazlarının oluşumu ve artan kaplama süresiyle meydana gelen faz dönüşümleriyle ilişkilendirilmiştir.
- Kaplamasız AA7075-T6 alaşımı altlık metale yapılan aşınma analizi sonrasında aşınma hızı $58.47 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. En yüksek aşınma direncinin elde edildiği 40 g/L $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ içeren elektrolit çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen 20 dakikalık kaplama sonucunda elde edilen aşınma hızı ise $3.71 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}^{-1}$ 'dir. Sonuçlar, gerçekleştirilen kaplama işlemiyle optimum parametrelerde altlık metale göre aşınma direncinin 15 kat arttığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ashkenazi, D., (2019), “How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, 143, 101–113.
- [2] Lumley, R. N., (2011) “Introduction to aluminium metallurgy”, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, 1–19.
- [3] Rabinovich, D., (2013), “The allure of aluminium,” *Nature Chemistry*, 5(1), 76.
- [4] Williams, T. I., (1993), “Aluminium: latecomer to the metal industry.”, *Endeavour*, 17(2), 89-93.
- [5] Abolhasani, A., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R., Rokni, M. R., (2012), “The room temperature mechanical properties of hot rolled 7075 aluminum alloy”, *Mater. Des.*, 34, 631–636.
- [6] Isadare, A. D., Aremo, B., Adeoye, M. O., Olawale, O. J., Shittu, M. D., (2013), “Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 Aluminium alloy”, *Mater. Res.*, 16 (1), 190–194.
- [7] Kuruveri, U. B., Panemangalore, D. B., Kuruveri, S. B., John, M., Menezes, P. L., (2022), “Surface Modification of 6xxx Series Aluminum Alloys,” *Coatings*, 12(2).
- [8] Dehnavi, V., Liu, X. Y., Luan, B. L., Shoesmith, D. W., Rohani, S., (2014), “Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloy”, *Surf. Coatings Technol.*, 251, 106–114.
- [9] Abbas, A., Wang, T. Y., Lin, H. C., (2023), “Effects of Electrolyte Compositions and Electrical Parameters on Micro-Arc Oxidation Coatings on 7075 Aluminum Alloy”, *J. Compos. Sci.*, 7 (11).
- [10] Matykina E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G. E., (2009), “Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium,” *Electrochim. Acta*, 54 (27), 6767–6778.
- [11] Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T., (2020), “Introduction to plasma electrolytic oxidation-an overview of the process and applications,” *Coatings*, 10 (7).
- [12] Jadhav P., Bongale A., Kumar S., (2021), “A review of process characteristics of plasma electrolytic oxidation of aluminium alloy”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1854 (1).

- [13] Sikdar S., Menezes P. V., Maccione R., Jacob T., Menezes P. L., (2021), “Plasma electrolytic oxidation (Peo) process-processing, properties, and applications,” *Nanomaterials*, 11 (6).
- [14] Rodriguez L., Paris J. Y., Denape J., Delbé K., (2023), “Micro-Arcs Oxidation Layer Formation on Aluminium and Coatings Tribological Properties-A Review,” *Coatings*, 13 (2).
- [15] Khan R. H. U., Yerokhin A., Li X., Dong H., Matthews A., (2010), “Surface characterisation of DC plasma electrolytic oxidation treated 6082 aluminium alloy: Effect of current density and electrolyte concentration,” *Surface and Coatings Technology*, 205 (6), 1679–1688.
- [16] Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K., Zheludkevich M., (2016), “Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review”, *Surface and Coatings Technology*, 307, 1165–1182.
- [17] Yerokhin A. L., Lyubimov V. V., Ashitkov R. V., (1998), “Phase During Formation in Ceramic Coatings Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium Alloys.”, *Ceramics International*, 24, 1-6.
- [18] Dehnavi V., Binns W. J., Noël J. J., Shoesmith D. W., Luan B. L., (2018), “Growth behaviour of low-energy plasma electrolytic oxidation coatings on a magnesium alloy”, *J. Magnes. Alloy.*, 6(3), 229–237.
- [19] Duan H., Yan C., Wang F., (2007), “Effect of electrolyte additives on performance of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D”, *Electrochim. Acta*, 52 (11), 3785–3793.
- [20] Sreekanth D., Rameshbabu N., Venkateswarlu K., Subrahmanyam C., Krishna L. R., Rao K. P., (2013), “Effect of K_2TiF_6 and $Na_2B_4O_7$ as electrolyte additives on pore morphology and corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings on ZM21 magnesium alloy,” *Surface and Coatings Technology*, 222, 31–37.
- [21] Sreekanth D., Rameshbabu N., Venkateswarlu K., (2012), “Effect of various additives on morphology and corrosion behavior of ceramic coatings developed on AZ31 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation”, *Ceram. Int.*, 38(6), 4607–4615.
- [22] Senocak T., Yılmaz T., Budak H., Gülten G., Yılmaz A., Ezirmik K., Totik Y., (2022), “Influence of sodium pentaborate ($B_5H_{10}NaO_{13}$) additive in plasma electrolytic oxidation process on WE43 magnesium alloys”, *Mater. Today Commun.*, 30.
- [23] Wang H. M., Chen Z. H., Li L. L., (2010), “Corrosion resistance and microstructure characteristics of plasma electrolytic oxidation coatings formed on AZ31 magnesium alloy”, *Surf. Eng.*, 26 (5), 385–391.

- [24] Shen M. J., Wang X. J., Zhang M. F., (2012), "High-compactness coating grown by plasma electrolytic oxidation on AZ31 magnesium alloy in the solution of silicate- borax", *Appl. Surf. Sci.*, 259, 362–366.
- [25] Zhang R. F., Zhang S., Shen Y., Zhang L., Guo S., (2012), "Influence of sodium borate concentration on properties of anodic coatings obtained by micro arc oxidation on magnesium alloys," *Appl. Surf. Sci.*, 258 (17), 6602–6610.
- [26] Musanovna R. Z., Grigorievna Z. M., Vitalievna K. M., (2022), "Investigation of the properties of oxide coatings on titanium alloys obtained by plasma electrolytic oxidation", *Candidate of Chemical Sciences*, 321 (2), 5-13.
- [27] Zeng Q., Wang Z., He W., Pang Z., Ning Z., Chen R., Zheng C., Yan C., Guo L., (2023), "Improved Tribocorrosion Properties of Ti₆Al₄V Alloy by Anodic Plasma Electrolytic Oxidation", *Adv. Eng. Mater.*, 25 (17).
- [28] Zhai D., Feng K., Yue H., (2019), "Growth Kinetics of Microarc Oxidation TiO₂ Ceramic Film on Ti₆Al₄V Alloy in Tetraborate Electrolyte", *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 50 (5), 2507–2518.
- [29] Liu Z., Wang W., Liu H., Wang T., Qi M., (2013), "Formation and Characterization of Titania Coatings with Cortex-like Slots Formed on Ti by Micro-arc Oxidation Treatment", *Appl. Surf. Sci.*, 266, 250-255.
- [30] Wang X., Zhang F., (2022), "Influence of Anions in Phosphate and Tetraborate Electrolytes on Growth Kinetics of Microarc Oxidation Coatings on Ti₆Al₄V alloy", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*, 32 (7), 2243-2252.
- [31] Shi Y., Wang Y., Cheng C., Guo X., Teng B., Yu Z., Li J., Li W., (2021), "Properties and Structure of PEO Treated Aluminum Alloy", *Journal of Wuhan Uni. of Tech. Mater-Sci. Ed. . Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 36 (3), 424–432.
- [32] Mengesha G. A., Chu J. P., Lou B. S., Lee J. W., (2020), "Corrosion performance of plasma electrolytic oxidation grown oxide coating on pure aluminum: effect of borax concentration", *J. Mater. Res. Technol.*, 9 (4), 8766–8779." *Appl. Surf. Sci.*, 266, 250–255.
- [33] Li H. X., Rudnev V. S., Zheng X. H., Yarovaya T. P., Song R. G., (2008), "Characterization of Al₂O₃ ceramic coatings on 6063 aluminum alloy prepared in borate electrolytes by micro-arc oxidation", *J. Alloys Compd.*, 462(1–2), 99–102.
- [34] Sarvan M., Radić-Perić J., Kasalica B., Belča I., Stojadinović S., Perić M., (2014), "Investigation of long-duration plasma electrolytic oxidation of aluminum by means of optical spectroscopy", *Surf. Coatings Technol.*, 254, 270–276.
- [35] Zong Y., Cao G. P., Hua T. S., Cai S. W., Song R. G., (2019), "Effects of electrolyte system on the microstructure and properties of MAO ceramics coatings on 7050 high strength aluminum alloy", *Anti-Corrosion Methods Mater.*, 66 (6), 812–818.

- [36] Sowa M., Olesinski A., Szumski B., Maciej A., Bik M., Jelen P., Sitarz M., Simka W., (2022), “Electrochemical characterization of anti-corrosion coatings formed on 6061 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in the corrosion inhibitor- enriched aqueous solutions”, *Electrochim. Acta*, 424.
- [37] Xiang N., Song R. G., Li H., Wang C., Mao Q. Z., Xiong Y., (2015), “Study on Microstructure and Electrochemical Corrosion Behavior of PEO Coatings Formed on Aluminum Alloy”, *J. Mater. Eng. Perform.*, 24 (12), 5022–5031.
- [38] Wu X., Liu Q., Li H., (2014), “Effects of electrolyte composition on the properties of micro-arc oxidation coatings formed on 6063 alloy”, *Key Engineering Materials*, 609–610, 232–237.
- [39] Sunilraj S., Blessto B., Sivaprasad K., Muthupandi V., (2019), “Microstructural and corrosion behavior of MAO coated 5052 aluminum alloy”, *Materials Today: Proceedings*, 41, 1120–1124.
- [40] Habashi F., (1988), “A Hundred Years of The Bayer Process For Alumina Production”, *Light Metals*, 85-93.
- [41] Mahecha-Rivas J. C., Fuentes-Ordoñez E., Epelde E., Saldarriaga J. F., (2021), “Aluminum extraction from a metallurgical industry sludge and its application as adsorbent”, *J. Clean. Prod.*, 310.
- [42] Hind A.R., Bhargava S. K., Grocott S. C., (1999), “The Surface Chemistry of Bayer Process Solids: A Review”, *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 146, 359-374.
- [43] Sarı B., (2019), “Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) Yöntemi İle Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Korozyon Ve Aşınma Davranışının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- [44] Kalyoncu S., (2020), "Alüminyum Alaşımlarında Alçak Basıncılı Döküm Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- [45] Gül A. O., (2020), "Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Grafit İlavesinin Aa-2024 Alüminyum Alaşımının Yüzey Özelliklerine Etkisi Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [46] Nalbantoğlu S., (2020), "Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemiyle Kaplanmış Al2024 Alüminyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- [47] Yazbahar G., (2021), "Mikro Ark ve Sert Anotlama İle Kaplanmış Alüminyum 7075 Alaşımının Karakterizasyonu Ve Aşınma Özelliklerinin Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [48] Imran M., Khan A. R. A., (2019), “Characterization of Al-7075 metal matrix composites: A review,” *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (3), 3347–3356.

- [49] Birbilis N., Cavanaugh M. K., Buchheit R. G., (2006), "Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al₇Cu₂Fe particles in aluminum alloy 7075- T651," Corros. Sci., 48 (12), 4202–4215.
- [50] Andreatta F., Terryn H., De Wit J. H. W., (2004), "Corrosion behaviour of different tempers of AA7075 aluminium alloy", Electrochimica Acta, 49(17–18), 2851–2862.
- [51] Atkinson H. V., Burke K., Vaneetveld G., (2008), "Recrystallisation in the semi- solid state in 7075 aluminium alloy," Mater. Sci. Eng. A, 490 (1-2), 266–276.
- [52] Chayong S., Atkinson H. V., Kapranos P., (2005), "Thixoforming 7075 aluminium alloys," Mater. Sci. Eng. A, 390(1–2), 3–12.
- [53] Chen Z., Zhou Y., (2006), "Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization", Surf. Coatings Technol., 201(3–4), 1503–1510.
- [54] Polat A., (2009), "2017A, 6061 ve 7039 Alüminyum Alaşımlarının Mikroark Oksidasyon Yüzey Kaplama Yöntemi İle Sert Seramik Kaplanması", Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- [55] Aktuğ S. L., (2017), "Mikroark Oksidasyon Yöntemiyle Zirkonyum/Magnezyum Üzerine Hidroksiapatit Kaplanması", Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [56] Yao W., Wu L., Wang J., Jiang B., Zhang D., Serdechnova M., Shulha T., Blawert C., Zheludkevich M., Pan F., (2022), "Micro-arc oxidation of magnesium alloys: A review", Journal of Materials Science and Technology, 118, 158–180.
- [57] Sundararajan G., Krishna L. R., (2003), "Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology", Surf. Coatings Technol., 167 (2–3), 269–277.
- [58] Oh Y. J., Mun J. I., Kim J. H., (2009), "Effects of alloying elements on microstructure and protective properties of Al₂O₃ coatings formed on aluminum alloy substrates by plasma electrolysis", Surf. Coatings Technol., 204 (1–2), 141–148.
- [59] Sieber M., Simchen F., Morgenstern R., Scharf I., Lampke T., (2018), "Plasma electrolytic oxidation of high-strength aluminium alloys—substrate effect on wear and corrosion performance", Metals (Basel), 8 (5).
- [60] You J. L., Chang C. J., Jian S. Y., (2023), "Correlation between Microstructural Properties and Electric Parameters of Micro-Arc Oxidation Coatings on 5052 Aluminum Alloys with Improving Wear and Corrosion Resistance" Coatings, 13 (11).

- [61] Yeshmanova G., Blaweret C., Serdechnova M., Wieland D., Starykevich M., Gazenbiller E., Höche D., Smagulov D., Zhedulkevich M., (2024), “Effect of electrolyte composition on the formation of PEO coatings on AA2024 aluminium alloy”, *Surfaces and Interfaces*, 44.
- [62] Lee J. H., Kim S. J., (2017), “Effects of silicate ion concentration on the formation of ceramic oxide layers produced by plasma electrolytic oxidation on Al alloy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56 (1).
- [63] Arunnellaiappan T., Krishna L. R., Anoop S., Rani R. U., Rameshbabu N., (2016), “Fabrication of multifunctional black PEO coatings on AA7075 for spacecraft applications”, *Surf. Coatings Technol.*, 307, 735–746.
- [64] Pezzato L., Brunelli K., Dabalà M., (2016), “Corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coated AA7075 treated using an electrolyte containing lanthanum-salts”, *Surface and Interface Analysis*, 48 (8), 729–738.
- [65] Aliramezani R., Raeissi K., Santamaria M., Hakimizad A., (2017), “Characterization and properties of PEO coatings on 7075 Al alloy grown in alkaline silicate electrolyte containing KMnO_4 additive”, *Surf. Coatings Technol.*, 329, 250–261.
- [66] Hussein R. O., Northwood D. O., Nie X., (2013), “The effect of processing parameters and substrate composition on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloys,” *Surf. Coatings Technol.*, 237, 357–368.
- [67] Gu W. C., Lv G. H., Chen H., Chen G. L., Feng W. R., Yang S. Z., (2007), “Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, 447 (1–2), 158–162.
- [68] Srinivasan P. B., Liang J., Blawert C., Störmer M., Dietzel W., (2009), “Effect of current density on the microstructure and corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation treated AM50 magnesium alloy”, *Appl. Surf. Sci.*, 255 (7), 4212–4218.
- [69] Moon S., Jeong Y., (2009), “Generation mechanism of microdischarges during plasma electrolytic oxidation of Al in aqueous solutions”, *Corros. Sci.*, 51 (7), 1506–1512.
- [70] Erdenebat T. O., Telmenbayar L., Yang D., Song M., Ramu A. G., Choi D., (2023), “Influence of Alternating Current Density on the Mechanical Behavior and Microstructure of PEO-Coated 7075 Aluminum Alloy”, *J. Compos. Sci.*, 7 (2).
- [71] Barati N., Meletis E. I., Fard F. G., Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M. A., (2015), “ Al_2O_3 - ZrO_2 nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates”, *Appl. Surf. Sci.*, 356, 927–934.

- [72] Martin J., Melhem A., Shchedrina I., Duchanoy T., Nominé A., Henrion G., Czerwicz T., Belmonte T., (2013), "Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium", *Surf. Coatings Technol.*, 221, 70–76.
- [73] Nie X., Meletis E. I., Jiang J. C., Leyland A., Yerokhin A. L., Matthews A., (2002), "Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al_2O_3 coatings fabricated using plasma electrolysis", *Surf. Coatings Technol.*, 149, 245-251.
- [74] Yerokhin A. L., Snizhko L. O., Gurevina N. L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A., (2003), "Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 2110-2120.
- [75] Fisch M., (2011), "Crystal Chemistry of Boron-Bearing Mullite-Type Compounds", PhD Thesis, Universitat Bern.
- [76] Yerokhin A. L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland A., Matthews A., (2005), "Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process", *Surf. Coatings Technol.*, 199 (2-3), 150–157.
- [77] Mo Z. J., Hao Z. H., Yang Q., Zhao L., Xu J. P., Li L., (2016), "Controllable synthesis of the $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ nanowhisker and their applications in reinforced polyhydroxyalkanoate composites" *RSC Adv*, 6(48), 42627 – 42632.
- [78] Durdu S., (2010), "Saf Magnezyumun Mikroark Oksidasyon Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [79] Lin Y. C., Jiang Y. Q., Chen X. M., Wen D. X., Zhou H. M., (2013), "Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, 588, 347-356.
- [80] Çavuşlu F., (2021), "Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemi İle Yüzeyi Oksitlenen Alüminyum Köpük Malzemelere Alüminyum İnfiltrasyonu İle Kompozit Malzeme Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Berke Gültekin; 2022 yılında Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun olup 2023 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. Halen Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

B. Gültekin, M. Usta, (2024), “Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle 7075 Alüminyum Alaşımının Bor İçerikli Elektrolit Çözeltisi İçerisinde Kaplanması”, Sözlü Sunum, 8. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu.