



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**1050 ve 3105 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MİKRO ARK  
OKSİDASYON YÖNTEMİYLE KAPLANMASI**

**Nurgül SEYMEN**

**DANIŞMAN  
Doç. Dr. Cem KAHRUMAN**

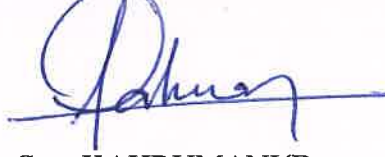
**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

**İSTANBUL-2019**

Bu çalışma, 19.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**



Doç. Dr. Cem KAHRUMANI(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Kimya-Metalurji Fakültesi



Doç. Dr. Sebahattin KIRTAY  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Cem KAHRUMAN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam için gerekli olan kaplamaları yapmama imkan sağlayan Sayın Öğr. Gör. Faiz MUHAFFEL'e, analiz ve karakterizasyon çalışmalarım süresince bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve desteğini esirgemeyen Sayın Mert GÜNYÜZ'e, Assan Alüminyum AR-GE merkezi ve laboratuvarlarında çalışan, yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen herkese teşekkürü borç bilirim.

Ve son olarak, tüm yaşamım boyunca ve eğitimim süresince, hep arkamda olduklarını bildiğim, beni her konuda destekleyen, dualarını eksik etmeyen sevgili anneme ve babama, aynı zamanda, hep yanımda olan ve bugünlere gelmemde büyük payı olan ablalarımaya sonsuz kez teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Nurgül SEYMEN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖZET .....	xii
SUMMARY .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>3</b>
2.1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI .....	3
2.1.1. Alüminyumun Genel Özellikleri .....	3
2.1.2. Alüminyum Alaşımları .....	3
2.1.3 Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlemler ve Homojenizasyon .....	4
2.2. ALÜMİNYUM LEVHA DÖKÜM TEKNİĞİ.....	6
2.2.1 Direk Soğutmalı İngot Döküm .....	6
2.2.2. Sürekli Levha Dökümü.....	6
2.2.2.1. <i>İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi</i> .....	8
2.3. MİKRO ARK OKSİDASYON .....	9
2.3.1. MAO İşleminin Tarihi .....	9
2.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Kaplama Yöntemi.....	11
2.3.4.1. <i>Akım-Voltaj Karakteristikleri</i> .....	13
2.3.4.2. <i>Voltaj-Zaman Karakteristiği</i> .....	16
2.3.4.3. <i>Mikro Ark Oksidasyonda Deşarjların Rolü</i> .....	17
2.3.4.4. <i>MAO İşlemine Etki Eden Parametreler</i> .....	17
2.3.4.5. <i>Mikro ark oksidasyon kaplamaların özellikleri</i> .....	21
2.3.3. MAO İşleminin Uygulama Alanları .....	22
2.3.4. MAO İşleminin Avantaj ve Dezavantajları .....	23
2.4. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETİ .....	24
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>32</b>
3.1. KULLANILAN ALTLIK MALZEMELER .....	32

3.2. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMLERİ .....	33
3.3. KARAKTERİZASYON İNCELEMELERİ .....	34
3.3.1. Kesit ve Yüzey İncelemeleri .....	34
3.3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçümü.....	35
3.3.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü .....	35
3.3.4. XRD Analizleri.....	36
3.3.5. Korozyon Testi .....	36
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>37</b>
4.1. YÜZEY İNCELEMELERİ .....	37
4.2. KESİT İNCELEMELERİ .....	45
4.3. KAPLAMA KALINLIĞI ÖLÇÜMÜ .....	49
4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ .....	53
4.5. XRD ANALİZLERİ.....	55
4.6. KOROZYON ÖLÇÜMÜ .....	57
<b>TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>60</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>70</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Sürekli Döküm Hattı Akış Şeması [18].	7
Şekil 2.2: İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi [17].	8
Şekil 2.3: TRC yöntemi ile üretilmiş AA5754 alaşımının, (a) yüzeyi az segregasyonlu (b) ripple yoğun bölge ve (c) iğnesel segregasyon yoğun bölgelerin L kesitinin optik mikroskop polarize ışık tam en mikroyapı fotoğrafları [59].	9
Şekil 2.4: Mikro ark oksidasyon prosesinin uygulandığı teçhizat şeması [5].	11
Şekil 2.5: Mikro ark oksidasyon işleminde oksit tabakasının oluşumu [28].	13
Şekil 2.6: MAO'da akım-voltaj diyagramında A-elektrot yakını alanda; B-elektrot yüzeyindeki yalıtkan (dielectric) film tabakasında meydana gelen boşalım olayları [30].	14
Şekil 2.7: Mikro ark oksidasyon esnasında gözlenen anodik voltaj eğrisi [34].	16
Şekil 2.8: Çeşitli elektrolitlerde MAO yöntemi ile kaplanan alüminyum için $I=f(U)$ fonksiyonu [30].	18
Şekil 2.9: Vuruş oranı ve bekleme sürelerini gösteren kare dalga akım grafiği [43].	20
Şekil 2.10: Al alaşımı üzerine yapılan MAO kaplama mikroyapısı [34].	21
Şekil 2.11: Kaplama kesitinin mikro sertlik dağılımı, 1) $\alpha$ -alümina; 2) $\gamma$ -alümina; 3) Mullit [30].	22
Şekil 2.12: Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmış a) Kompresör rotoru, b) Hidrolik silindir, c) bisiklet tekeri [5].	23
Şekil 3.1: İşlem öncesi kullanılan altlık malzemelerin makro görünüşleri.	33
Şekil 3.2: Proseste kullanılan mikro ark oksidasyon cihazı.	33
Şekil 3.3: Kullanılan yüzey pürüzlülük cihazları; (a) Veeco Dectac 6M , (b) Bruker GTK0X.	35
Şekil 3.4: Rigaku SmartLab3 marka XRD cihazı.	36
Şekil 4.1: Oluşan kaplamaların makro görüntüleri; (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.	37

<b>Şekil 4.2:</b> (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x350).....	39
<b>Şekil 4.3:</b> (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x600).....	41
<b>Şekil 4.4:</b> (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x900).....	43
<b>Şekil 4.5:</b> Zımpara uygulanmış 3105-H0 kaplamanın SEM görüntüleri (a) x350 (b) x600 (c) x900.....	45
<b>Şekil 4.6:</b> (a) 1050-H19, (b) 1050-H0 numunelerin optik mikroskopta dağlanmış görüntüleri (x20).....	46
<b>Şekil 4.7:</b> Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x850); (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.....	48
<b>Şekil 4.8:</b> Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 1050-H19.....	49
<b>Şekil 4.9:</b> Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 1050-H0.....	50
<b>Şekil 4.10:</b> Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 3105-H19.....	51
<b>Şekil 4.11:</b> Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 3105-H0.....	52
<b>Şekil 4.12:</b> Kullanılan altlık malzemelerin MAO öncesi yüzey pürüzlülük görüntüleri (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.....	53
<b>Şekil 4.13:</b> MAO öncesi ve sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.....	54
<b>Şekil 4.14:</b> Kaplanan numunelerin XRD analizleri; (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.....	56
<b>Şekil 4.15:</b> Kaplama öncesi ve MAO sonrası kaplama oluşturulmuş 1050 alaşımların elektrokimyasal polarizasyon eğrileri.....	57
<b>Şekil 4.16:</b> Kaplama öncesi ve MAO sonrası kaplama oluşturulmuş 3105 alaşımların elektrokimyasal polarizasyon eğrileri.....	58



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 2.1:</b> Dövme alüminyum alaşımlarının Alüminyum Birliği tarafından sınıflandırılması[15]. .....	4
<b>Tablo 3.1:</b> TS EN 573-3 Standardı 1050 ve 3105 alaşımlarının kimyasal bileşim aralıkları [57]. .....	32
<b>Tablo 4.1:</b> 1050 alaşımlarının Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon değerleri. ....	58
<b>Tablo 4.2:</b> 3105 alaşımlarının Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon değerleri .....	59

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	: Amper
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina
<b>Dt</b>	: Vuruş Oranı
<b>E</b>	: Elektrik alan kuvveti
<b>f</b>	: Frekans
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>I</b>	: Akım şiddeti
<b>°C</b>	: Derece (Santigrad)
<b>K</b>	: Kelvin
<b>kW</b>	: Kilowatt
<b>µs</b>	: Mikro saniye
<b>µm</b>	: Mikrometre
<b>nm</b>	: Nanometre
<b>Ra</b>	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
<b>Ton</b>	: Pozitif / negatif vuruş süresi
<b>Toff</b>	: Bekleme süresi
<b>T</b>	: Dalga periyodu
<b>U</b>	: Potansiyel Gerilim
<b>V</b>	: Volt

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AC</b>	: Alternatif akım
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>E</b>	: Elektrik alan kuvveti
<b>EB-PVD</b>	: Elektron demeti fiziksel buhar depozisyonu
<b>EDS</b>	: Enerji dispersif spektrometresi
<b>EIS</b>	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
<b>HV</b>	: Vickers sertliği
<b>MAO</b>	: Mikro ark oksidasyon
<b>PEO</b>	: Plazma elektrolitik oksidasyon

<b>SCC</b>	: Gerilimli korozyon çatlaması
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>TRC</b>	: Twin-roll casting
<b>XRD</b>	: X-ışınları difraksiyonu



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### 1050 ve 3105 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MİKRO ARK OKSİDASYON YÖNTEMİYLE KAPLANMASI

Nurgül SEYMEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Cem KAHRUMAN

Alüminyum,  $2,7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğu ile en hafif metaller arasında yer almakta ve bu hafifliği sayesinde otomotiv, inşaat, uzay, havacılık ve gıda gibi pek çok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Hafifliğinin yanı sıra, alüminyum ve alaşımlarının gösterdiği yüksek korozyon direnci, yüksek ısı iletkenlik, kolay şekillendirilebilir ve geri dönüştürülebilir olmaları, kullanımlarını daha da artırmaktadır. Sahip oldukları bu özellikleri ile alüminyum ve alaşımlarının, kullanıldıkları alanlarda aynı özellikleri gösterebilecek diğer malzemelere göre tüketimi azaltarak tasarruf sağladığı ve çevre dostu olduğu görülmektedir.

Alüminyum alaşımları, mekanik ve korozyon özellikleri açısından üstün olmalarına rağmen, düşük yüzey sertliği ve düşük aşınma dirençleriyle bazı uygulama alanlarında kullanım ömrünü azaltmakta ve problem teşkil etmektedir. Bu özelliklerin geliştirilmesi ve malzemelere ihtiyaç duyulan özelliklerin kazandırılması, çeşitli yüzey işlemleri ile mümkün olabilmektedir.

Son yıllarda devamlı gelişim gösteren yüzey teknolojilerinden biri olan mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi bir çok endüstriyel alanda bu tarz uygulamalara sahiptir. Mikro ark oksidasyon yöntemi ile alüminyum gibi hafif metallerin yüzeylerinde kaplamalar oluşturularak malzemelerin mekaniksel özellikleri, korozyon ve aşınma kabiliyetleri artırılabilir.

Bu çalışmada, “H19” ve “H0” kondisyonundaki 1050 ve 3105 Al alaşımlarına mikro ark oksidasyon prosesi uygulanmış ve yüzeyde seramik oksit tabakası oluşturulmuştur. Proses

süresince parametreler ve elektrolit bileşimi değiştirilmemiş, “H0” kondisyon özellikleri için uygulanan nihai tav işleminin ve alaşım elementlerinin, oluşturulan oksit tabakasının performansına olan etkileri incelenmiştir. Mikro ark oksidasyon işleminin ardından, yüzeyde oluşturulan oksit kaplamaların özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Temmuz 2019, 85 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Alüminyum alaşımları, mikro ark oksidasyon, kaplama, tavlama



## **SUMMARY**

### **M.Sc. THESIS**

#### **COATING OF 1050 AND 3105 ALUMINUM ALLOYS BY MICRO ARC OXIDATION METHOD**

**Nurgül SEYMEN**

**Istanbul University-Cerrahpasa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cem KAHRUMAN**

Aluminum is one of the lightest metals with a density of  $2,7 \text{ g/cm}^3$  and it finds an application in many sectors such as automotive, construction, space, aviation and food with its light-weight properties. In addition to this; its high corrosion resistance, high thermal conductivity, good formability and recyclability characteristics enhanced the use of aluminum and alloys. With these properties, it is seen that aluminum and its alloys reduce the consumption compared to other materials which shows the same characteristics in the applications where they are used and they are environmentally friendly.

Although, good mechanical and corrosion properties of aluminum alloys, it poses a problem that the poor surface hardness and abrasion resistance reduces the lifetime. Developing these properties and gaining the features needed for materials can be possible with various surface treatments.

Micro arc oxidation method (MAO) is one of the surface technologies which has been continuously developing in recent years, used in many industrial fields. The mechanical, abrasion and corrosion properties of light metals can be increased by using micro arc oxidation method by forming coatings on their surfaces.

In this work, micro arc oxidation process was applied to 1050 and 3105 Al alloys in “H19” and “H0” condition and formed ceramic oxide layer on the surface. During the process, the parameters and electrolyte composition were not changed because of the investigating the effects of the final annealing process for getting “H0” condition properties and alloying elements on the performance of the oxide layer. After micro arc oxidation process, some characterizations were made to determine the properties of the oxide coatings formed on the surface.

July 2019, 85 pages.

**Keywords:** Aluminum alloy, micro arc oxidation, coating, annealing

## 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisi, birçok endüstri dalında, her geçen gün geçtikçe daha karmaşık hale gelen çalışma koşulları için uygun yeni teknoloji ürünü malzeme taleplerini karşılamak için çok çaba sarf etmektedir. Bu amaç doğrultusunda; malzemelerin mevcut özelliklerinin, istenen şartlara bağlı olarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar da yürütülmektedir [1].

Yapılan çalışmalardaki en önemli hedeflerden biri, metal ve alaşımlarının korozyon, aşınma ve yorulma dayanımı gibi özelliklerini geliştirerek korozyon ve aşınmanın neden olduğu kayıpları azaltmaktır [2]. Hem metal malzemelerin hem de seramik malzemelerin özelliklerine sahip bir malzemenin ortaya çıkarılabilmesi için çok değişik yöntemler mevcuttur. Bunlardan en popüler olanı metalik malzemelerin yüzeylerinde seramik kaplama oluşturulmasıdır. Böylece, plastik olarak kolay şekillenebilir ve genel anlamda tok olan malzeme olarak tanımlanan metaller ile korozyon ve aşınma direnci yüksek malzemeler olan seramiklerin birleştirilmesiyle en ideal kullanım özelliklerine sahip malzemeler ortaya çıkabilir. Bu beklentiler doğrultusunda mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi bir çok endüstriyel alanda bu tarz uygulamalara sahiptir. Ticari olarak da uygulanabilirliği yaygın ve yüksek potansiyele sahip bir uygulamadır [3].

MAO yöntemi, malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşturarak hem aşınma hem de korozyon direncini artırmak için oldukça etkili bir yöntemdir. Özellikle malzemeye kazandırdığı yüksek sertlik ve aşınma dirençlerinden dolayı plazma sprey ve EB-PVD (elektron demeti fiziksel buhar depozisyonu) kaplamalar ile rekabet etmektedir [1]. Genel olarak bakıldığında, elektrokimyasal kullanılması ve anot metal yüzeyini oksitleyerek sertleştirilmesi nedeniyle anodik oksidasyon yöntemine oldukça benzemesine rağmen, mikro ark oksidasyon yönteminde daha yüksek akım yoğunluğu ve voltaj kullanılarak çalışılmaktadır. Bu yöntem, bir elektrolit içerisine daldırılan metal alaşımlarının, elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile oluşan plazma boşalmaları sayesinde yüzeylerinde mikro boyutta deşarj kanalları açarak kalın, sert, aşınmaya ve korozyona karşı dirençli bir oksit tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır [4, 5].

Bu yöntem, literatürde "Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO)", "Plazma Elektrolitik Anot İşlemi", "Mikro Plazma Oksidasyon", "Kıvılcımlı Anodik Oksidasyon", "Mikro Ark Anodik Oksidasyon", "Anodik Kıvılcımlı Biriktirme", "Mikro Plazma Anodik Oksidasyon", "Elektro Plazma Oksidasyon" gibi çeşitli isimlerle de anılmaktadır [6].



Mikro ark oksidasyon genellikle Al, Mg, Ta, W, Zn ve Zr gibi valf metaller ve alaşımlarına uygulanmaktadır. Son yıllarda özellikle otomotiv sektörü olmak üzere uzay ve elektronik endüstrisinde hafif metallerin ve alaşımlarının kullanımları artmaktadır. Bu durumun başlıca sebepleri olarak düşük yoğunluk, iyi mekanik özellikler, kolay işlenebilirlik, iyi dökülebilirlik, geri dönüştürülebilirlik ve potansiyel uygulamalara elverişli olmaları sayılabilir. Bu tür metallerde genellikle anodik akıma karşı koyabilen ve doğal olarak oluşan ince bir dielektrik tabakası vardır. Anot olarak bir valf metal kullanılması durumunda, anottan geçen akımın önemli miktarda olması için valf metal yüzeyindeki potansiyeli arttırmak gerekmektedir [4].

Hafif malzemelerden biri olan alüminyum, sanayinin ihtiyacına karşılık verebilecek potansiyele sahip bir metaldir. Yeryüzünde en çok bulunan ikinci metal olması, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyona karşı dayanımı, alaşımlarının sağlamlık ve yumuşaklık açısından çok çeşitli olması, kolay işlenebilmesi ve biçimlendirilebilmesi nedeniyle konvansiyonel malzemelerle kıyaslandığında daha üstün performans sergilemektedir. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının düşük sertlik ve kötü tribolojik özellik göstermeleri, akma dayanımlarının çeliklere ve dökme demirlere göre daha düşük olması, bu malzemeleri özellikle kayma ve yuvarlanma temaslı aşınmalarda yetersiz bırakmakta ve endüstrideki uygulamalarını kısıtlamaktadır [7].

Bu çalışmada, “H19” ve “H0” kondisyondaki 1050 ve 3105 Al alaşımlarına mikro ark oksidasyon prosesi uygulanarak yüzeylerinde oksit tabakası oluşturulması amaçlanmaktadır. Proses süresince parametreler ve elektrolit bileşimi sabit tutulacak ve “H0” kondisyon özellikleri için uygulanan nihai tav işleminin ve farklı alaşım elementlerinin, oluşturulan oksit tabakasının performansına olan etkileri incelenecektir. Proses sonucu üretilecek kaplamanın, kullanılacak olan 1050 ve 3105 altlık malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmesi beklenmektedir. Mikro ark oksidasyon işleminin ardından, yüzeyde oluşturulan kaplamaların özelliklerini belirlemek amacıyla kesit ve yüzey incelemeleri, kaplama kalınlığı ölçümü, yüzey pürüzlülük ölçümü, XRD analizleri ve korozyon testleri gerçekleştirilecektir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

#### 2.1.1. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyumun ardından en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çaptaki üretimi 1886 yılında Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul T. Heroult'un uyguladıkları elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Günümüzde hala kullanılmakta olan bu yöntem, alüminyum endüstrisinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir.

Alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olup, yüzeyinin oksijenle temas ettiği durumda, çok ince bir oksit film tabakası oluşur. Yüzeyde meydana gelen ve gözle görülemeyecek kadar ince olan bu şeffaf oksit film tabakası oksidasyonun devam etmesini engeller. Bu sayede, demir ve çeliklerin yüzeylerinde görülen renk değişimi ve paslanma gibi korozyon çeşitleri oksidasyona direnç gösteren alüminyumda görülmez. Aynı zamanda, alüminyumun yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olması, elektrik ve ısıya maruz ortamlarda kullanılacak parçaların üretiminde kullanımını avantajlı kılmaktadır.

Öne çıkan birçok özelliğinin yanı sıra, yüksek saflıktaki alüminyumdan kompleks bir alüminyum alaşımına kadar, alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Hafiflik, iyi şekillendirilebilme, korozyon direnci, fiziksel ve mekanik özellikleri, alüminyum ve alaşımlarını geniş bir uygulama alanında önemli kılmaktadır [8-10].

#### 2.1.2. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları, üretim metotlarına göre döküm alaşımları ve dövme alaşımlar olarak iki gruba ayrılabilir. Her grup aynı zamanda, ısı iletkenliği uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olarak iki alt gruba ayrılmaktadır [11].

Genel olarak döküm alaşımlarından beklenen bazı özellikler; akışkanlıklarının iyi olması, düşük ergime sıcaklığı, düşük katılma süresi ve böylece çevrim süresinin az olması, soğuma sırasında sıcak yırtılmalar ve çatlamların meydana gelmemesi ve parçanın dökümünün ardından fiziksel ve kimyasal olarak dengeli olması olarak sayılabilir [12].

Dövme alaşımları ise yüksek plastik deformasyon kabiliyetine sahip olup kolayca şekillendirilebilirler [11]. Alüminyum dövme alaşımlar, Alüminyum Birliği'nin belirlediği tanımlamaya göre 4 haneli bir simgeye sahiptir. Bu tanımda, bileşimdeki ilk rakam ana elementi gösterirken, ikinci rakam esas alaşımdaki oranından daha farklı bir oranda bulunan element sayısını göstermektedir. Buna göre, ikinci hanede 0 rakamının olması, serinin orijinal alaşımda olduğunu belirtmektedir [13].

Dökme alüminyum alaşımlarında ise alaşım elementleri dövme alaşımlara ait dört haneli sistemdeki ile aynı olup, 3 rakama sahip sınıflandırma sistemi kullanılmaktadır [14]. Tablo 2.1'de dövme alaşımları için yapılan sınıflandırma sistemi gösterilmektedir.

**Tablo 2.1:** Dövme alüminyum alaşımlarının Alüminyum Birliği tarafından sınıflandırılması[15].

Simge	Ana Alaşım Elementi
1XXX	% 99.00 veya daha fazla içerikteki alüminyum
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve Silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer elementlerin serileri
9XXX	Geniş kullanımı olmayan seriler

Alüminyumdaki alaşım elementleri, sünekliği ve korozyona olan direnci etkilemeden alüminyumun düşük akma sınırını yükseltirler, fakat bu elementlerin oranlarının çok fazla olması durumunda intermetalik bileşikler oluşur ve malzemenin sünekliği kaybolur. Bu sebeple, dövme alaşımları çok fazla alaşım elementi içermezler [13].

### 2.1.3 Alüminyuma Uygulanan Isıl İşlemler ve Homojenizasyon

Döküm veya biçimlendirme yoluyla elde edilen alüminyum ve alaşımlarına ısıl işlem uygulandığı durumda 4 tür ısıl işlem göstergesi kullanılmaktadır. Kondisyon (temperleme), malzemenin sahip olduğu sertliğin derecesini ifade etmektedir. Çeşitli ısıl işlemlerin özelliklerine ait açıklamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

**O-** Alüminyum ve alaşımlarının tavlama yapılarak yeniden kristalleşmesi sonucu sahip olduğu en yumuşak halini,

**F-** Üretimden sonraki halini,

**T-** Alüminyum ve alaşımlarının ısıtılma işlemi sonrası halini,

**W-** Solüsyona alma ısıtılma işleminin ardından kalıcı olmayan yapıyı,

**H-** Yassı mamullere kısmi bir yumuşama kazandırmak için yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı ifade eder. Burada, H'dan sonra gelen rakamlardan ilki asıl işlemi ifade ederken, ikinci rakamsa son fiziksel özelliklerini gösterir. Bu özellikler şu şekildedir:

- **H1:** “1” rakamı, malzemeye sadece gerinme sertleştirilmesi uygulandığını gösterir. Plastik şekillendirme sınırları içinde sadece şekil verilmiştir. İkinci rakamsa, yapılan soğuk işlemin derecesini ifade eder. 1'in yanındaki ikinci hanenin büyümesi, malzemenin sertliğinin arttığını ifade eder.
- **H2:** “2” rakamı, alaşıma gerinme sertleşmesi ve tavlama işlemi uygulandığını belirtir. Malzemenin plastik şekillendirilmesinin ardından kazanılan sertliğin belirli değerlere getirilmesi demektir.
- **H3:** Plastik şekillendirme ve stabilizasyon halidir. Haddelenmiş malzemeye üretim esnasında uygulanan ısı ile mekanik özelliklerin dengelendiği durumdur. Stabilizasyon genellikle tokluk özelliğini geliştirir ve yapılmadığı durumda uzun sürelerde oda sıcaklığında da elde edilebilir.

Aşağıdaki koşullar temel koşullardır:

- H22'nin üretiminde son tav işlemi vardır - 1/ 4 sertlik (çeyrek sert)
- H12'nin üretiminde ara tav işlemi vardır - 1/ 4 sertlik (çeyrek sert)
- H24'in üretiminde son tav işlemi vardır - 1/2 sertlik (yarım sert)
- H14'ün üretiminde ara tav işlemi vardır - 1/2 sertlik (yarım sert)
- H19'un üretiminde tav işlemi yoktur - tam sert [16].

## 2.2. ALÜMİNYUM LEVHA DÖKÜM TEKNİĞİ

Alüminyumun yassı mamul olarak üretimi iki yöntemle olmaktadır.

### 2.2.1 Direk Soğutmalı İngot Döküm

Direk soğutmalı ingot döküm DC (Direct Chill Casting) olarakta bilinmektedir. Bu üretim metodunda, üretilen alaşımlar öncelikle ergitilmiş bir biçimde ingot şeklinde sabit kalıplara dökülürler. Bu kalıplar içerisinde dolaşan su ile birlikte ergiyik metal katlaşır. DC döküm tekniği ile primer veya sekonder olarak kazanılmış alüminyum ergitilerek şekillendirilmek üzere yarımamül elde edilebilmektedir.

DC metodu, geniş katılma aralığına sahip alaşımların dökülmesine olanak sağlamaktadır. Prosesteki direk soğuma sayesinde daha ince taneli yapı elde edilmekle birlikte mikroyapıdaki varyasyonların ve segregasyonlarında önüne geçilir. Sağlamış olduğu mikroyapı avantajlarından dolayı nihai ürünün daha kaliteli olmasını sağlamasına rağmen, TRC yöntemi ile karşılaştırıldığında yatırım maliyetleri daha yüksektir [60].

Geleneksel yöntem için üretim adımları şu şekildedir;

Ergitme → Direk soğutma döküm → sıcak haddeleme → rulo sarma → soğuk haddeleme (birkaç ısı işlem uygulanabilir) → yarı mamul ya da mamul [17].

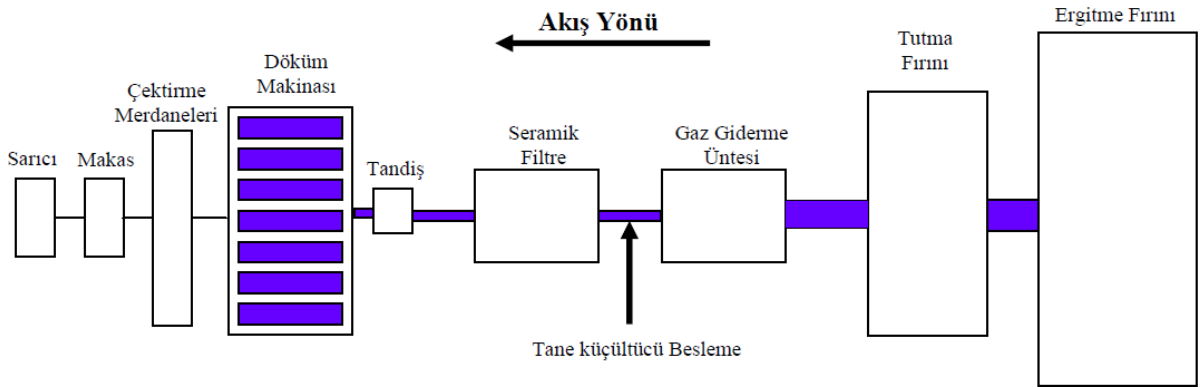
### 2.2.2. Sürekli Levha Dökümü

Alüminyumun sürekli levha döküm tekniği ile rulo haline getirilmesi, standart bir uygulama haline gelmiştir. Sürekli dökümü ön plana çıkartan temel avantajları enerji tasarrufu ve üniform ürün elde edilebilmesidir. Her yıl dünyada yaklaşık 500 milyon ton çelik, 20 milyon ton alüminyum ve 1 milyon ton bakır, çinko, kurşun, nikel ve diğer metaller bu yöntemle üretilmektedir.

Sürekli döküm yöntemi ardı ardına izlenen operasyon adımlarından oluşur. Proses, sürekli bir proses olduğu için döküm hattı, ergitme ve sıcak tutma işlemleri için kullanılan iki adet fırına sahiptir. Ergitme fırını alüminyumun ergitildiği büyük hacimli fırındır. Döküm hammaddesini oluşturan ingot, hurda, ergitme fırınına beslenir. Bu aşamada belirli elementler ilave edilerek dökülmek istenen alaşım kompozisyonu yaratılır ve ergimiş metal buradan döküm makinasına kesintisiz olarak istenilen sıcaklıkta metali sağlayacak olan tutma fırınına gönderilir. Sıvı metal

içinde kalmış olabilecek partiküller filtrasyon işlemi sonunda giderilmiş olur. Bu ünitelerde argon veya azot gazı metalin alt kısmından verilir ve bu gazlar baloncuk halinde yüzeye çıkarken metalde çözülmüş halde bulunan hidrojen gazı da bu baloncuklara tutunarak sistemi terk eder. Temizlenen sıvı metal tandiše iletilir ve tip yardımıyla döküm makinasına iletilir. Böylece ergitme fırını ve tutma fırını birlikte döküm makinasına sürekli sıvı metal besler ve kesintisiz döküme imkan sağlar. Ergimiş metal fırınından dökümün gerçekleşeceği bölüme getirilir ve tandiş (döküm işlemi sırasında sıvı metal akışını kontrol eden düzenek) bölümünden geçirilerek kalıba yönlendirilir. Metal, soğutulan kalıptan geçerken kalıp şeklini alarak katılaşır. Katılaştıran metal kalıptan sürekli şekilde alınır. Elde edilen ürün daha sonra kesme ünitesine gönderilir. Geleneksel döküm yöntemlerinde ürün ingot formunda üretilirken sürekli döküm yönteminde ürün silindirik ingot, levha halinde ve doğrudan rulo edilerek elde edilebilmektedir.

Döküm yönü dikey ya da yatay olabilir. Levhanın merdaneden çıktıktan sonraki sıcaklığı 400-550 °C arasında olup, bu yüksek sıcaklıkta rulo halinde sarılabilmektedir [17, 58]. Sürekli döküm hattının akış şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Sürekli Döküm Hattı Akış Şeması [18].

Sürekli levha döküm tekniği diğer yöntemlere göre hem ekonomik hem de daha avantajlıdır. TRC prosesinde, katılaşma ve sıcak haddeleme tek bir operasyon ile gerçekleştiğinden, geleneksel rulo üretimindeki ek bir sıcak haddeleme prosesine olan ihtiyaç ya azalır, ya da hiç kullanılmaz. Böylece, enerji ve üretim maliyetlerinden tasarruf sağlanır.

Sürekli levha döküm tekniği için gerekli yatırım maliyeti, geleneksel sıcak haddeleme yöntemine göre oldukça azdır. Metalurjik değerlendirme yapıldığında, proses sürecindeki yüksek katılaşma hızı, levhaların saf bir mikroyapıda olmasını sağlar. Ayrıca bu yöntem ile rulo

üretim prosesinde, katılaşma ve deformasyon aynı anda ele alınırken, var olan diğer proseslerde deformasyon yer almayıp yalnızca katılaşmayı içermektedirler [17].

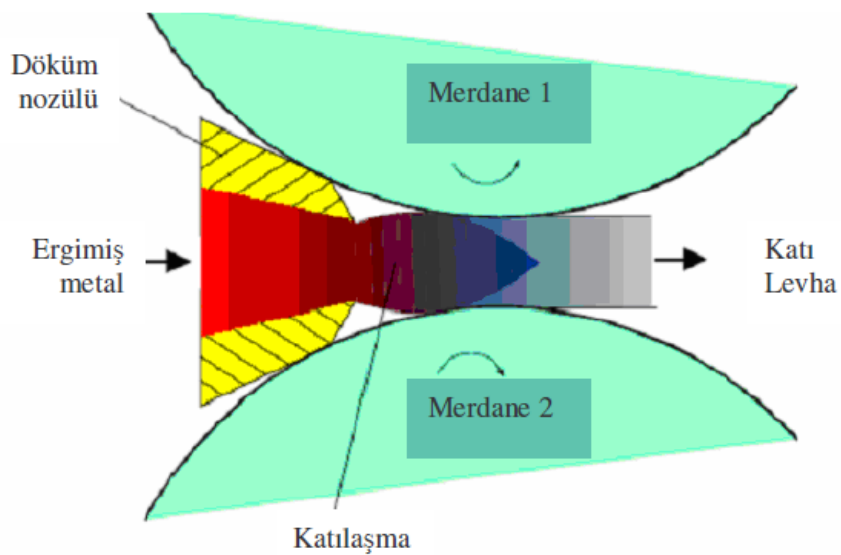
Sürekli döküm yöntemi ekonomik açıdan bazı avantajlara sahip olsa da, geleneksel yöntemle kıyaslandığında nihai ürün açısından daha sınırlı özellikler sunmaktadır. Merdaneli döküm sistemlerinde belirlenen temel problemler genellikle yapışma, ısı yolu, merkez hattı segregasyonu, tip içerisinde lokal donmalar, yüzey segregasyonları ve seviye çizgileri olarak sıralanabilir. Bu yöntem katılaşma aralığı dar alaşımlar için uygundur. Katılaşma aralığı arttıkça verimlilikte azalma meydana gelmektedir. Katılaşma aralığı geniş alaşımlarda üretilen levhalarda çatlaklar kalabilir. Malzeme sıvı veya yarı sıvı halde merdaneden çıkabilir.

Sürekli levha döküm yöntemi için proses akışı şu şekildedir;

Ergitme → Levha döküm → rulo sarma → soğuk haddeleme (birkaç ısıl işlem uygulanabilir) → yarı mamul ya da mamul [58].

#### 2.2.2.1. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi

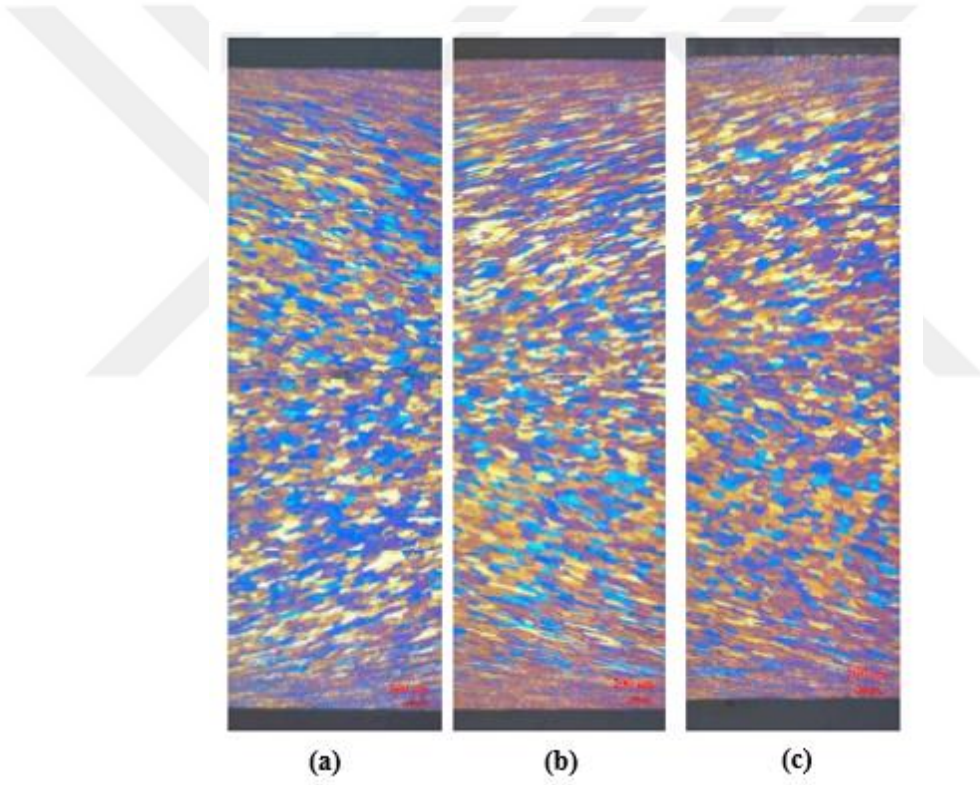
İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminde, ergimiş metal birbirine ters yönde dönen içten su soğutmalı iki merdane arasındaki boşluğa beslenmektedir. Bu nedenle, sürekli levha döküm tekniği “İkiz Döküm Merdane Döküm Yöntemi (TRC)” olarak bilinmektedir. İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir [18].



Şekil 2.2: İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi [17].

Bu proseste, katılaştırma ve sıcak hadde işlemleri tek bir adımda birleştirildiğinden geleneksel kalıba döküm adımı ortadan kaldırılmış olmaktadır. Sıcak alüminyumun, rulo olarak sarılacak levhalar halinde üretilmesi, geleneksel rulo üretiminde gerek duyulan sıcak haddeleme işlemini tamamen ya da kısmen ortadan kaldırmaktadır.

Proseste katılaştırma ve sıcak haddeleme işlemlerinin her ikisi de aynı anda gerçekleştiğinden, üretilen levhalar karakteristik bir mikroyapıya sahiptirler. Bu yapıda, yüzeyde çok küçük taneler, yüzeyle merkez arasında döküm esnasındaki haddelemeden dolayı merkeze doğru yönelmiş kolonsal taneler ve merkezde eş eksenli tanelerden oluşur [58]. Oluşan mikroyapıların fotoğrafları Şekil 2.3’de verilmiştir.



**Şekil 2.3:** TRC yöntemi ile üretilmiş AA5754 alaşımının, (a) yüzeyi az segregasyonlu (b) ripple yoğun bölge ve (c) iğnesel segregasyon yoğun bölgelerin L kesitinin optik mikroskop polarize ışık tam en mikroyapı fotoğrafları [59].

## 2.3. MİKRO ARK OKSİDASYON

### 2.3.1. MAO İşleminin Tarihi

MAO işlemi metal yüzeyinde gözenekli, nispeten kaba ve iyi yapışmaya sahip bir oksit tabakası oluşturmayı sağlayan ve gelişime açık bir tekniktir. Bu yöntemde, çözülmüş tuzlar kullanılarak



hazırlanan elektrolitin içerisinde yüksek voltaj akımı ile elektrokimyasal oksidasyon olayı gerçekleşmektedir [19].

Bu teknik iki kademe oluşur. İlk olarak çözelti ortamı içerisinde altlık malzeme ile katod arasına farklı elektrot potansiyelleri uygulanması ile elektroliz meydana gelir, ikinci aşamada ise kullanılan altlık malzemenin yüzeyinde oluşan elektriksel deşarjlar sonucunda metal, oksit tabakası ile kaplanır [20].

Elektroliz prosesi esnasında gözlenen bu boşalım olaylarının ilki, Fizeau ve Foucault'un 1844 yılında suyu elektroliz etmeleri sırasında elektrot yüzeylerinde ışıldama görmeleri ile kaydedilmiştir. Bu olayın sebebi hidrojen balonlarında oluşan ark deşarjlarıdır. Ardından 1880'lerde Rus bilim adamı Sluginov'un metalleri anotlama işlemi sırasında da benzer bir olay gözlemlenmiştir. Sluginov, elektroliz esnasında iki tür ışıldama keşfetmiştir. Anoda yakın bir yerde gaz kabarcıklarının olmadığı akışkan damlaları ve anot yüzeyinde ise ilk ışık parlamasını gözlemlemiştir. İkinci tür ışık parlaması ise katot yüzeyinde görülmüştür. Birinci tür ışık parlamasının analizi sonucunda elektrolit içerisinde, ilk defa alüminyum üzerine anodik oksit tabaka oluşumu gerçekleştirildiği görülmüş ve bu olay anodizasyon olarak adlandırılmıştır. Bu araştırmalar alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinin iyileştirilmesinde kullanılacak kaplama teknolojileri için başlangıç teşkil etmektedir [21].

Bu konu ile ilgili araştırma ve gelişmelerin devamı 1930'lu yıllarda Alman araştırmacılar Günterschultze ve Betz tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar, yüksek voltajlarda yaptıkları anodizasyon işlemi sırasında anot yüzeyinde kıvılcıkların meydana geldiğini keşfetmişlerdir. Ayrıca, bu esnada meydana gelen yüksek gaz çıkışının Faraday kanununa uymadığını ve kaplama özelliklerine zarar verdiği için bu tür kıvılcıklardan kaçınılması gerektiğini belirtmişlerdir [22].

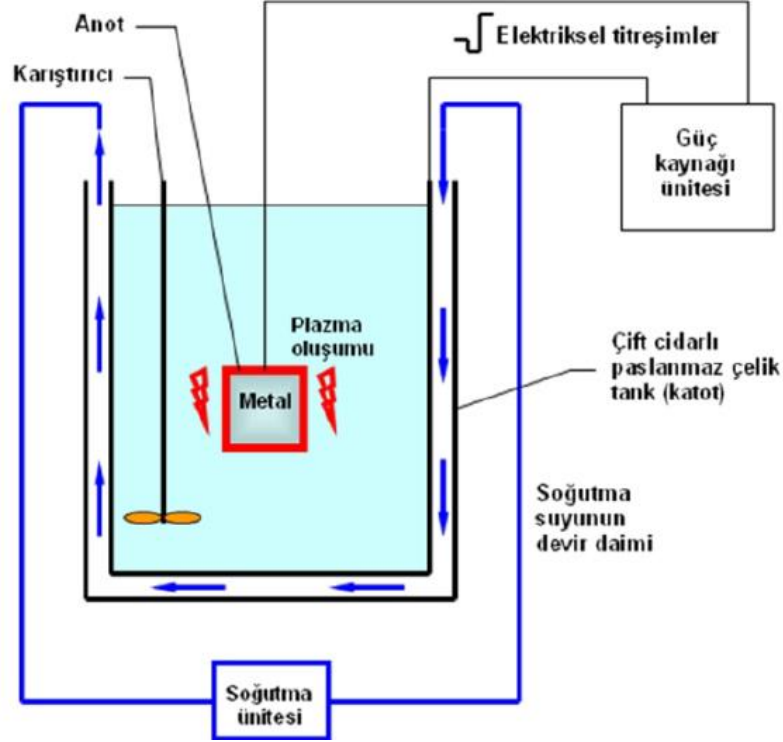
Elektrolizle ilgili deşarj olayı Günterschultze ve Betz tarafından ayrıntılı şekilde araştırılmış olmasına rağmen, MAO prosesinin ilk pratik faydası, 1960'lı yıllarda McNiell & Nordbloom'un Kd anot yüzeyine Nb içerikli elektrolit kullanarak kadmiyum niobat ( $Cd_2Nb_2O_7$ ) biriktirmeleri ile gerçekleşmiş ve 1966 yılında Mcniell "Anodik Spark Reaksiyon Prosesleri ve Reaksiyonlar" adlı çalışmasının patentini almıştır. Böylece, MAO prosesi, 1970'li yıllarda ABD'de, 1980'lerin sonunda ise tüm dünyada tanınmış olup, günümüzde hala araştırılmakta olan bir konudur [23].

Bu yöntemde, her bir alaşım ve proses parametresi en uygun hale getirilebilmektedir. Böylece, kaplamaya dahil edilen bileşenler değiştirilerek oluşan kaplamanın büyüme oranı ve özellikleri etkilenmektedir. MAO kaplamaların sürekli geliştirilen özellikleri sayesinde otomotiv, uzay endüstrisi ve biyomedikal malzemelerde de kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [24].

### 2.3.2. Mikro Ark Oksidasyon Kaplama Yöntemi

Bu proses, bir çeşit elektrokimyasal işlem olup, kontrollü doğru akım, alternatif akım, pulse akım ve çift kutuplu akım formları (DC, DA, AC, pulse, bi-polar) kullanılarak, kaplanacak malzemeyi belirli kompozisyondaki elektrolitik banyoya daldırmak suretiyle parça yüzeyinde modifiye bir tabaka oluşturmaya dayanan bir prosestir.

MAO ile kaplama işlemi yapılmak üzere hazırlanan düzenek genel hatlarıyla bir güç kaynağı, elektrolitik banyo, anot, katot ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. [5]. Sistemin şematik gösterimi Şekil 2.4'de yer almaktadır.

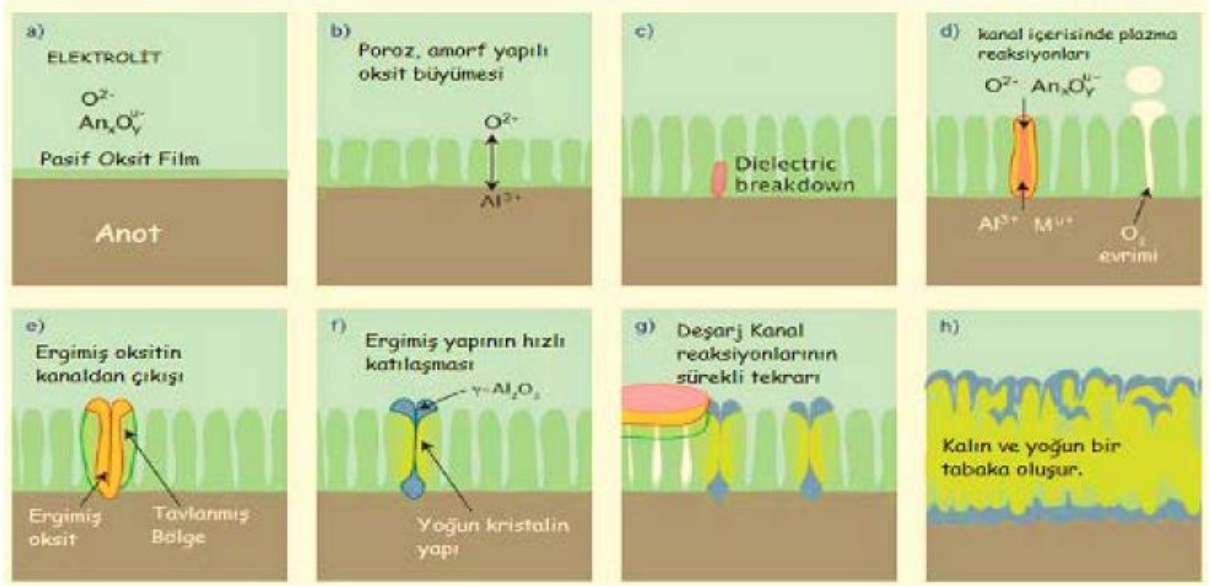


Şekil 2.4: Mikro ark oksidasyon prosesinin uygulandığı teçhizat şeması [5].

MAO yönteminde, kaplanılmak üzere yüzeyinde kararlı bir oksit film oluşturabilen metaller tercih edilir. Bu metaller güç kaynağına anot olarak bağlanırlar. Genel olarak paslanmaz çelikten yapılan elektrolit küveti, devreyi tamamlamak üzere katot görevi görür. Çözeltinin

homojenliğini sağlamak üzere çelik kazan içerisindeki çözelti sürekli olarak karıştırılır. Plazma oluşumu dolayısıyla metal çevresinde oluşan yüksek sıcaklık yüzünden çözeltinin ısınma ihtimaline karşı çift cidarlı çelik kazan içerisinde devamlı olarak soğutma suyu dolaştırılır [5]. Ardından akım ve voltaj değerlerinin girilmesiyle elektrolit içerisindeki numunenin yüzeyinde mikro arklar oluşturarak modifiye edilmiş bir oksit tabaka oluşumu sağlanır. Bu tabaka oldukça gözenekli olup bu açık poroziteler, voltajın düşürülmesi, çözeltiye katılan bileşenlerin değiştirilmesi ya da yüzeyin ani sinterlenmesi ile azaltılabilmektedir [27].

MAO işleminde malzeme yüzeyinde oksit filmi oluşumu, anot numuneye (-) voltajın uygulanması ile başlar. Bu aşama, klasik anodizasyon işlemidir. Malzeme yüzeyinde ark oluşumu ve mikro ark oksidasyon sürecinin başlaması ise, uygulanan voltajın belli bir kritik değeri aşması ile gerçekleşir. Malzeme yüzeyinde bu mikro boyuttaki arkların oluştuğu voltaj değeri, bozunum voltajı (dielectric breakdown) olarak tanımlanmakta ve bu kritik bozunum voltajı aşıldığında mikro arklar oluşmaktadır. Bu mikro arklar, deşarj kanallarının oluşumu ile, var oldukları bölgede sıcaklık ve basınç artışı oluştururlar. Bu aşamada, çözelti içerisine daldırılan iki elektrot arasında uygulanan voltaj sebebiyle oluşan potansiyel fark sayesinde elektrik alan oluşur. Bunun sonucu olarak, elektrolitik solüsyondaki (+) yüke sahip iyonlar elektrik alan ile aynı yönde hareket ederken, (-) yüklü iyonlar elektrik alana zıt yönde ilerlerler. Sıcaklık ve basınçta meydana gelen ani artış sebebiyle, taban malzemedan gelen alüminyum, gaz halindeki oksijen ile birleşir ve sinterlenerek yüzeyi kaplayan oksit tabakasını oluşturur. Elektrolitten gelen iyonlarda bu yapının içerisine girerek oksitin yapısını modifiye ederler. Daha sonra, oluşan bu oksitler, kendinden daha soğuk çözelti ile temas etmeleri sonucu katılaşır ve süreç bu şekilde devam ederken kaplama kalınlığı artar. Kaplamanın oluşumu Şekil 2.5’de şematize edilmiştir [28, 29].



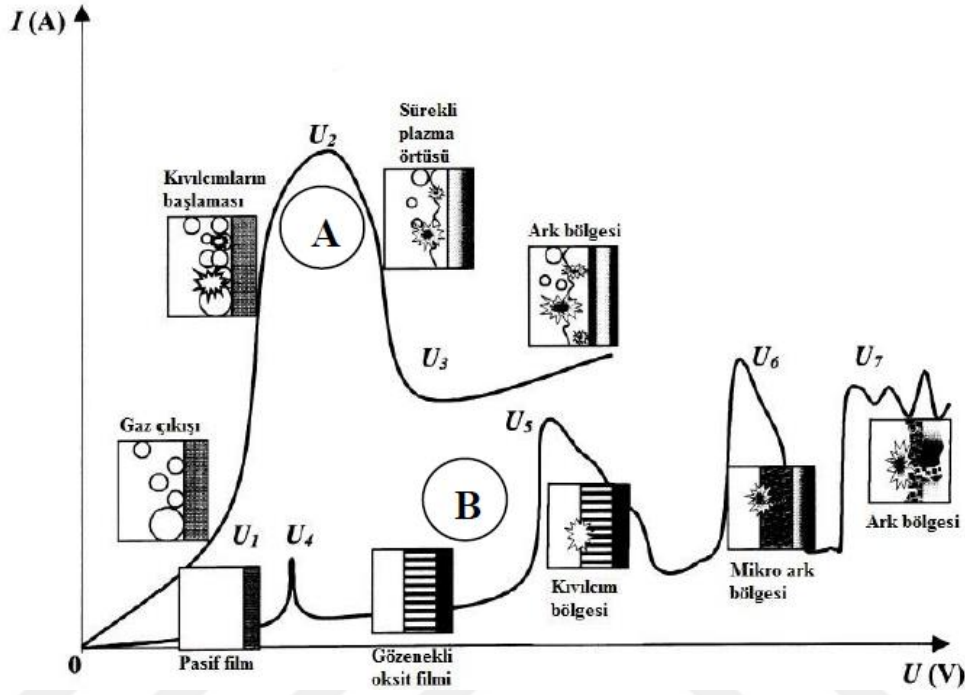
Şekil 2.5: Mikro ark oksidasyon işleminde oksit tabakasının oluşumu [28].

#### 2.3.4.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri

Geleneksel bir elektrolit işlemi incelendiğinde, elektrot prosesleri genellikle basitleştirilmiş bir model çerçevesi içerisinde değerlendirilir; burada elektrot-elektrolit ara yüzü, çift yüklü bir tabakadan oluşan tek faz sınırına sahip iki fazlı bir sistem (metal-elektrolit veya oksit elektrolit) ile temsil edilir. Fakat bu basitleştirme her zaman doğru değildir; çünkü belirli şartlar altında gerçekleşen işlemde elde edilen sonuçlarda, prosesle eş zamanlı yan ürün olarak oluşan ve elektrodu çevreleyen gaz ortamından ve/veya yüzey katmanları içerisinde meydana gelen proseslerden de dikkate değer ölçüde etkilenir [30].

Mikro ark oksidasyon yöntemi, elektrik gücünden faydalanılarak gerçekleştirilen bir kaplama tekniğidir. Sisteme ilk voltajın verilmesi ile birlikte, numune üzerinde nanometre seviyelerinde pasif, oksit bir film oluşur. Bundan sonra uygulanacak çok küçük bir anodik potansiyel bile bu pasif filmin büyümesini sağlar. Uygulanan voltaj büyüdükçe, kaplama kalınlığı da o oranda artmaktadır. Kaplamanın büyümesi çift taraflı bir mekanizmadır. Hem çözelti ile oksit kaplama arasında, hem de altlık metal ile oksit kaplama arasında Al katyonları ile oksijen iyonları birbirlerine doğru karşılıklı olarak hareket ederler. Dielektrik alan, oksidin bozulma sınırına ulaştığında kırılma meydana gelir. Bunun üzerine oluşmaya başlayan sert oksit kaplama sayesinde kaplamanın mekanik özellikleri gelişmektedir [31, 32].

Bu yöntemde iki türlü akım-voltaj eğrisi oluşmaktadır. A tipi akım-voltaj eğrisinde, anot veya katot yüzeyinde gaz çıkışı ile meydana gelen metal-elektrolit sistemi, B tipinde ise oksit tabakasının oluşumu gösterilmektedir. Bu eğriler, Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: MAO'da akım-voltaj diyagramında A-elektrot yakını alanda; B-elektrot yüzeyindeki yalıtkan (dielectric) film tabakasında meydana gelen boşalım olayları [30].

Diğerlerine oranla düşük voltaj uygulandığında ( $<U_1$ ), hem A hem B için elektrot prosesinin kinetiği Faraday kanunlarına uyar ve elektrolit hücresinin akım-potansiyel karakteristiği Ohm kanunlarına göre değişir. Bu nedenle voltajda meydana gelen bir yükseliş, A tipinde 0-U<sub>1</sub> ve B tipinde 0-U<sub>4</sub> bölgesinde akımda aynı oranda bir artışa sebebiyet verir. Malzemeler valf malzeme olduğundan pasif hale gelerek metal/elektrolit ara yüzeyinde yalıtkan pasif filmi oluştururlar.

A tipi eğride, U<sub>1</sub>-U<sub>2</sub> bölgesinde potansiyelde meydana gelen artış, yüzeyde ışık oluşması ile birlikte akım değerinde dalgalanmaya sebep olur. Akımdaki artış, elektrot yüzeyindeki reaksiyonların sonucu O<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> gazlarını açığa çıkarır. Elektrodun bu gazlar sebebiyle elektrolit ile teması kestiği bölgelerde tepkime sınırlandırılırken, temasın devam ettiği bölgelerde akım yoğunluğu artışı devam eder ve elektrolitin bölgesel olarak kaynamasına sebep olur. Akım U<sub>2</sub>'ye ulaştığında, elektrot yüzeyi, elektrik iletkenliği düşük bir gaz buhar plazması ile çevrelenir. Bu noktada, voltajın neredeyse tamamı, bu ince elektrot yakını bölgeye düşer ve elektrik alan kuvveti (E) bu bölgelerde, buhar örtüsü içerisinde iyonizasyon prosesinin

başlaması için yeterli olan değere ulaşır. İyonizasyon prosesi, dağınmık gaz kabarcıkları içerisinde ani kıvılcımlar şeklinde belirir, sonrasında buhar plazma örtüsü boyunca yayılır. Buhar örtüsünün hidrodinamik kararlılığından dolayı,  $U_2$ - $U_3$  bölgesinde akım düşer ve  $U_3$  noktasından itibaren parlak deşarjlar (glow discharge) yerini yoğun kıvılcımlara bırakır.

B tipinde ise, ilk olarak önceden oluşmuş pasif film, malzemenin korozyon potansiyeline denk gelen  $U_4$  bölgesinde çözünmeye başlar. Potansiyelin daha da arttığı  $U_4$ - $U_5$  aralığında yeniden pasifleşme olur ve gözenekli oksit film büyür.  $U_5$  noktasında, oksit film içerisindeki elektrik alan kuvveti kritik bir değere ulaşır ve bu değerın ötesinde çarpma (impact) veya tünelleme iyonizasyonundan (tunneling ionization) dolayı film kırılır. Bunun sonucunda, oksit film tabakası üzerinde hızlı şekilde hareket eden küçük ve parlak kıvılcımlar gözlemlenir, böylece film tabakasının büyümesi kolaylaşmaktadır.

$U_6$  noktasında çarpma iyonizasyon mekanizması, termal iyonizasyon prosesleri ile desteklenir ve daha yavaş fakat aynı zamanda da daha büyük ark deşarjları oluşturur.  $U_6$ - $U_7$  bölgesinde termal iyonlaşma, oksit film içerisindeki negatif yük atışı ile kısmen engellenerek substratın bozunumuna neden olur. Bu etki, mikro arkların sürekliliğini belirler ve bu mikro arklar sayesinde, oksit film tabakası elektrolitte bulunan elementlerle aşamalı şekilde kaynaşır ve alaşımlanır.

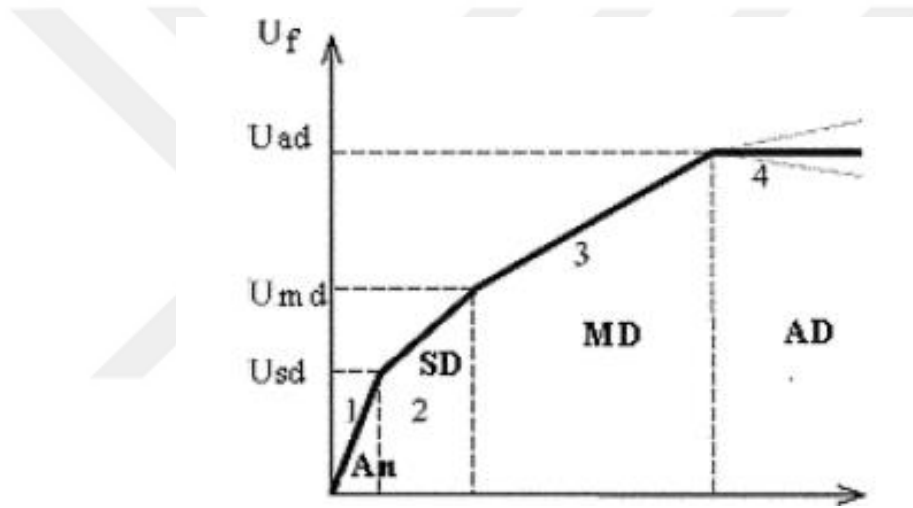
$U_7$  noktası ve üzerinde, film boyunca oluşan mikro arklar alt tabakaya nüfuz eder ve (negatif yük bloke edici etkiler artık oluşmadığından), filmde ısıl çatlaklar gibi tahrip edici etkilere neden olabilecek güçlü arklara dönüşür.  $U_5$  noktasından önceki voltaj değerleri geleneksel anotlamayı gösterirken, PEO prosesi bu voltaj değerinden daha yüksek değerdeki voltajlarda gerçekleşmektedir [30].

Mikro ark oksidasyon prosesi ile kaplanan numunelerin yüzeylerinde, farklı boyutlarda deşarj kanalları, gözenekler ve kraterimsi yapılar bulunmaktadır. Prosesin ilk evrelerinde deşarj kanalları çok fazla sayıda ve yapıya homojen şekilde dağılmış durumdadır. Ancak kaplama kalınlığı arttıkça deşarj kanallarının sayısı azalmakta ve boyutları artmakta, bunun sonucunda da homojen yapı gözlenmemekle birlikte yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [23].

### 2.3.4.2. Voltaj-Zaman Karakteristiği

Mikro ark oksidasyonun genel özelliği, elektrokimyasal işlem altında elektrot yüzeyinde elektrik deşarjlarının meydana gelmesidir. Şekil 2.7’de verilen anodik voltaj eğrisinin oluşumuna daha yüksek voltajlarda devam edildiği durumda, ardı ardına;

- 1- dar olan anodizasyon alanı (An),
- 2- kıvılcım deşarj alanı (SD),
- 3- mikro ark oksidasyon kaplamanın oluştuğu geniş 3 numaralı mikro deşarj alanı (MD),
- 4- ark deşarj alanları (AD) oluşur [33].



Şekil 2.7: Mikro ark oksidasyon esnasında gözlenen anodik voltaj eğrisi [34].

Mikro ark oksidasyon prosesi, alışılagelmiş elektroliz işleminden farklı olarak, elektrolit içerisindeki maddelerin çözeltiden elektrik ark deşarjı içerisine taşınmasını ve elektrik deşarjı ve civarındaki bölgeler içerisine elektrot maddelerinin katıldığı ya da katılmadığı yüksek sıcaklık kimyasal reaksiyonlarını kapsamaktadır [31].

Mikro ark oksidasyon işleminin farklı aşamalarında elektrokimyasal işlemden başka, difüzyon, kimyasal, plazma-kimyasal ve elektro-fiziksel işlemler oluşmaktadır. Bu bağlamda, MAO işleminin tamamı birkaç aşamaya ayrılabilir:

- Altlık malzeme ve oluşmakta olan kaplamanın elektrolitle kimyasal etkileşimi.
- Elektrik deşarjları başlamadan önce ve elektrik deşarjlarının sönüğü yerlerde meydana gelen elektrokimyasal işlemler (anodizasyon ve elektroliz).

- Mikro ark oksidasyon, kıvılcımların kısa süreli başlangıç aşamaları, mikro ark deşarj oluşumunun temel aşamaları ve belli bir kalınlıktaki kaplama oluşumunun ardından mikro ark deşarjlarının arka dönüşümünü içermektedir [35].

#### **2.3.4.3. Mikro Ark Oksidasyonda Deşarjların Rolü**

Mikro ark oksidasyon işleminde deşarj oluşumu, bariyer tabaka üzerinde bulunan gözenekli tabakanın mikro gözenekleri içerisindeki buhar-gaz kabarcıklarının elektriksel kırılımı ile meydana gelir. Mikro ark deşarjlarının işlevsel olduğu alan içerisinde, anodik oluşum eğrisindeki voltaj yükselmesi, kaplama kalınlığının büyümesi ile ilişkilidir.

Kaplama işlemi esnasında mikro ark deşarjlarının yüzey boyunca yer değiştirmesininin sebebini açıklayan iki görüş vardır. İlk görüş, kırılmanın kaplamanın elektriksel olarak en zayıf yerinde gerçekleştiği ve filmin bu yerlerde büyüyerek, kırılmanın daha zayıf başka yerlere geçtiği ve devam ettiği; diğer görüş ise, deşarjın, bulunduğu bölge yakınına termal olarak aktive etmesi, bu bölgedeki kırılma voltajını düşürerek buraya geçmesi ve böylece kırılma zincirini oluşturmasıdır [36, 22].

Mikro ark oksidasyon esnasında deşarjların, deşarj kanallarındaki plazma-kimyasal sentez dışında, elektrolit, oksit kaplama ve altlık malzeme üzerinde de önemli termal ve hidrodinamik etkileri bulunmaktadır. Hidrodinamik etkinin oluşumu, deşarjın başlaması ile mikro gözeneklerde ani sıcaklık ve basınç yükselmesi ve buhar-gaz kabarcıklarının patlaması ile oluşan çukurların bir sonucu olarak açıklanabilir. Bu tür patlamalar, belirli şartlarda kaplamanın kırılması ile sonuçlanabilir. Ancak buradaki en önemli etki, mikro deşarjların termal etkisidir. Sonradan oluşabilecek termal dehidrasyon veya elektrolit bileşenlerinin ürünlerinin termoliz olmasıyla hidroliz derecesinin artması, kaplamanın ve altlık malzemenin yeniden erimesi, element kompozisyonunun yeniden dağılması, faz oluşumu (altlık malzemenin ve elektrolitteki elementlerin oksitlerinden), yapı dönüşümleri (yeniden kristalleşme, fazların tekrar büyümesi gibi) mikro deşarjların termal etkisinin sonuçlarıdır. Mikro deşarjların altlık malzeme üzerindeki etkisi, deşarj kanalları altında kalan alan içerisinde metalin bölgesel olarak ısınması ile belirlenmektedir [37].

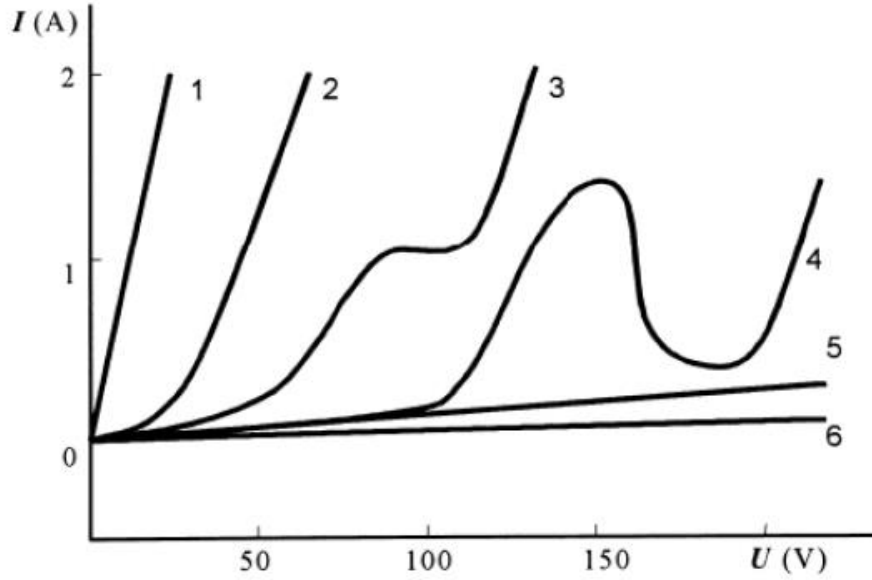
#### **2.3.4.4. MAO İşlemine Etki Eden Parametreler**

Tamamen karmaşık bir işlem olan MAO işleminin performansı hem dış (kompozisyon bileşenleri, konsantrasyon, pH ve elektrolit sıcaklığı; MAO modu: polarite, frekans-online zamanı (off-duty faktör), genlik ve voltaj şekli ve akım darbelerine, anodik ve katodik



karakteristiklerinin oranına; işlem zamanı vs) hem de iç faktörlere (alaşım kompozisyon ve yapısına, alaşımın ısıl işlemine, yüzey pürüzlülüğüne, malzemenin gözenekliliğine vs) bağlıdır. Bu faktörler kaplamaların kalınlığını, faz kompozisyonunu, yapısını, yoğunluğunu, gözenekliliğini, mikro sertliğini, altlık yapışma mukavemetini, aşınma ve korozyon direncini, elektrik ve ısı iletkenliğini, kırılma voltajını ve diğer özellikleri belirler [31]. Mikro ark oksidasyonda etki eden başlıca parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Elektrolit bileşimi:** Numunenin daldırıldığı elektrolitik çözeltinin kompozisyonu, istenen kaplamamanın özelliklerine ve altlık malzeme alaşımına uygun olmalıdır. Elektrolit içerisindeki komponentler, oksidasyonun gerçekleşmesi için gerekli iletkenliği sağlama ve kaplamayı gerçekleştirme fonksiyonuna sahiptirler. Kaplanacak metal ile çözeltinin uyumlu olması, proste ihtiyacı duyulan önemli parametrelerdendir. MAO'da kullanılan elektrolitler genellikle bazik karakterli olup, metalin pasifleşmesi için kullanılan polarizasyon test verileri göz önünde bulundurulmaktadır. Al, Mg, Ti ve alaşımlarının MAO ile kaplanması sırasında kullanılan elektrolitik solüsyonların akım-voltaj eğrileri Şekil 2.8'deki şekilde gruplara ayrılmıştır [38,20].



Şekil 2.8: Çeşitli elektrolitlerde MAO yöntemi ile kaplanan alüminyum için  $I=f(U)$  fonksiyonu [30].

Bu elektrolitler şu şekildedir:

- 1- Metalin hızlı çözünmesini sağlayan tuz çözeltileri,
- 2- Metalin yavaş çözünmesini sağlayanlar,

3- Dar voltaj aralığında metalin pasifleşmesini sağlayan çözeltiler,

4- Karmaşık davranış gösteren florid çözeltiler,

5- Metalin zayıf pasifleşmesini sağlayanlar,

6- Metalin güçlü pasifleşmesini sağlayan elektrolitler.

4-6 gruplarındaki çözeltiler, kritik bozunum voltajına ulaşılmasını kolaylaştırdıkları için, MAO prosesinde en kullanışlı olan elektrolitlerdir.

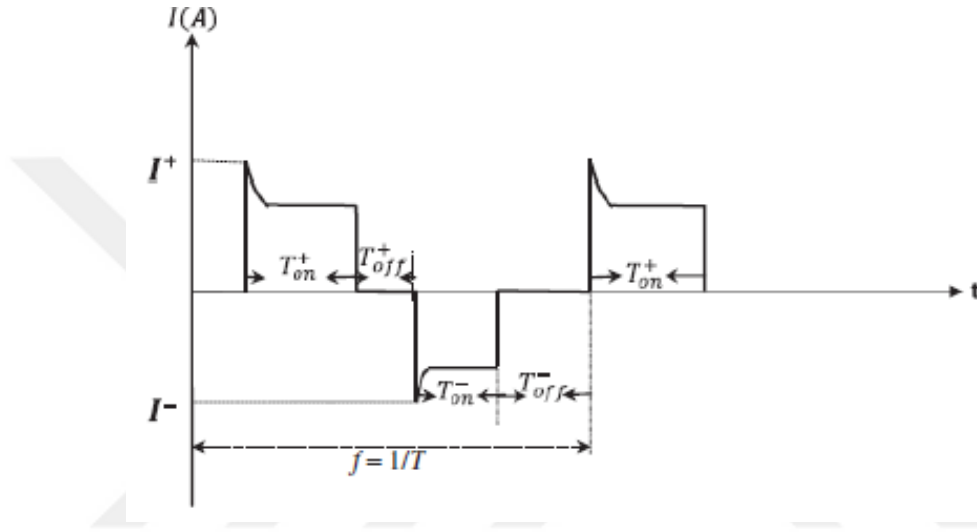
Çözeltinin sıcaklığı kullanım süresi bakımından önemlidir. Proseste yüksek voltaj ve akım değerlerine ulaşıldığından, elektrolit sıcaklığı soğutma ünitesi ile kontrol altında tutulmaktadır ve bu değer genel olarak 10-60 °C aralığındadır. Çünkü proses sırasında, kaplamanın çözelti ile etkileşmesi sonucu oluşan ve kaplamayı sağlayan reaksiyonlar termokimyasal reaksiyonlardır. Çözeltinin sıcak olması kaplamayı kolaylaştırıcı bir etken olmasına karşın, aktif bileşenlerin daha hızlı etki etmesiyle çözelti daha kısa zamanda tükenmektedir. Bu yüzden çözelti sıcaklığının oda sıcaklığında olması tercih edilir. Çözeltinin sıcaklığı, çift cidarlı kazan içerisinde kaplama süresince dolaştırılan soğutma suyu sayesinde sabit tutulmaktadır [38, 1].

- **İşlem süresi:** Prosesin işlem süresi, MAO ile oluşturulan kaplamaların kalınlığını etkileyen en önemli parametreler arasındadır. Oluşan akım yoğunluğunun işlem süresiyle doğru orantılı olarak artması, altlık malzeme yüzeyinde oluşan oksit filmin kalınlığının ve kaplamada var olan yoğun fazın miktarının da artmasını sağlamaktadır.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olarak bilinen bu fazın miktarının fazla olması kaplamanın sertliğini, korozyon ve aşınmaya olan direncini de artırarak kaplama kalitesinin iyileşmesini sağlamaktadır. Proses süresinin artışı ile deşarj kanallarının çapının etrafını saran yapının hacmine eşit şekilde lineer olarak artması ve malzeme biriktirmesi sonucu yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana gelmektedir [38, 39].
- **Elektriksel Parametreler:** Elektriksel parametrelerin değiştirilmesi, kaplama morfolojisi, iç yapı özellikleri ve kaplama büyüme hızını doğrudan etkilemektedir. Yapılan araştırmalar, voltaj arttıkça kaplamanın daha çok porozite içerdiğini ve yüzey pürüzlülüğünün de o ölçüde arttığını göstermektedir [40, 41].

MAO işlemi süresince uygulanan akım yoğunluğu ile plazma deşarj sınırının açılması ve buna bağlı olarak meydana gelen deşarj kanalları sayesinde, taban malzeme ve elektrolit arasında

kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bu söz konusu kimyasal reaksiyonlar sonucunda, oluşan hekzagonal bağ yapısı farklılaşmakta ve kaplamanın faz yapısı değişebilmektedir [42].

Yapılan araştırmalar, PEO'daki vuruş oranı etkisinin özellikle çift kutuplu çalışma şekillerinde büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir. 1 dalga periyodu içerisindeki iş yapan sürenin (negatif ve pozitif vuruş süresi) toplam 1 dalga periyoduna (çevrim süresi) oranı, vuruş oranı değerini belirtmektedir. Şekil 2.9'da bir kare dalga akım diyagramı gösterilmektedir [43].



Şekil 2.9: Vuruş oranı ve bekleme sürelerini gösteren kare dalga akım grafiği [43].

Frekans, 1 saniyede gerçekleşen vuruş sayısı olarak tanımlanmaktadır. Frekansın artması, çevrim süresini azaltmaktadır. Mikro ark oksidasyon prosesinde çalışma süreleri boyunca oksit tabakası gelişir ve bekleme süresinde ise çalışma süresinde meydana gelen ergiyikler donar. Bu sebeple, düşük vuruş oranlarında kısa kıvılcımlar ve daha küçük gözenekler meydana gelirken, yüksek vuruş oranlarında elektrolit sıcaklığı ve çalışma süresinin uzaması ile gözeneklilik artmaktadır [42]. Frekansa ait hesaplama aşağıda yer alan 2.2 ve 2.3'teki denklemlerle yapılmaktadır [43].

$$Dt = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.1)$$

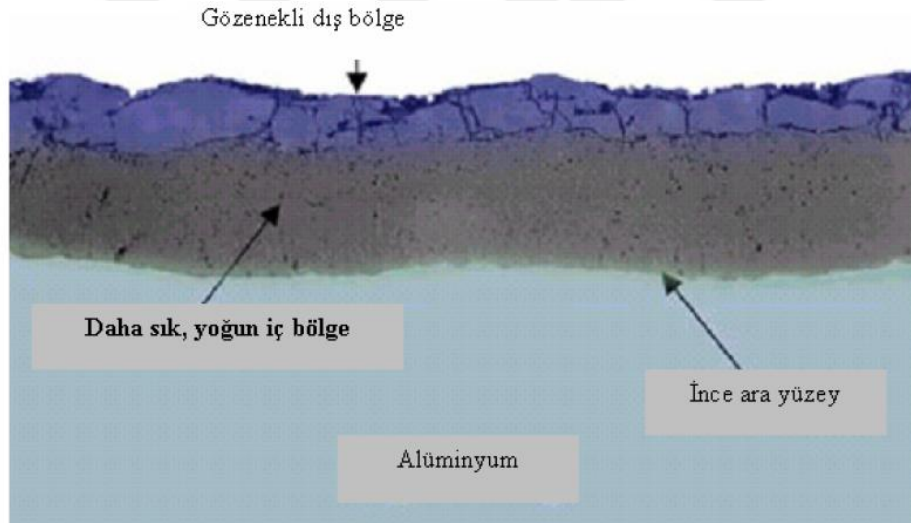
$$T = T^{+on} + T^{+off} + T^{-on} + T^{-off} \quad (2.2)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

Proses süresince oluşan deşarjların sayısı ve şiddeti, anodik ve katodik akım yoğunluğu şiddetlerinin birbirlerine yakınlığıyla orantılı olup ve kaplamanın büyüme hızını etkileyen bir faktördür. Alüminyum alaşımlarında PEO ile oluşturulan oksit kaplamaların bileşimi, mikroyapısı, gözenek miktarı ve hatta mekaniksel özellikler ve korozyona karşı gösterdikleri direnç, anodik akım yoğunluğundaki farklılık ile değişebilmektedir. Kaplama oluşurken yüksek anodik akım yoğunluğunda  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, düşük anodik akım yoğunluğunda ise  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazları meydana gelmektedir. Bu da kaplamanın sertliğini önemli ölçüde değiştirmektedir[38].

#### 2.3.4.5. Mikro ark oksidasyon kaplamaların özellikleri

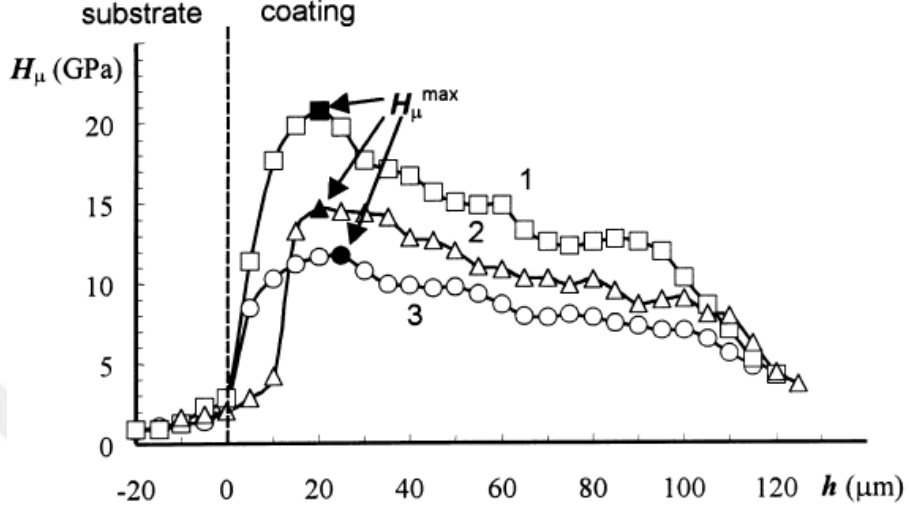
MAO tekniğiyle yapılan kaplama çalışmaları sonucunda oluşan kaplamaların, farklı tabakalardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Kaplama genellikle porozite oranı yüksek dış bölge ile daha az poroziteye sahip, daha sık ve yoğun iç bölgeden oluşmaktadır. Ana altlık malzeme ile yoğun kaplamanın oluştuğu kısım arasında çok ince bir tabaka bulunmaktadır. MAO kaplamalarda oluşan tipik mikroyapı Şekil 2.10'de verilmiştir.



Şekil 2.10: Al alaşımı üzerine yapılan MAO kaplama mikroyapısı [34].

Proses sonucu oluşan ve taban malzeme ile kaplama arasında yer alan yoğun alt katman, korozyon direncinin artmasını sağlarken, üst tabaka korozyona dayanımı geliştirmek için uygulanabilecek başka işlemler için altlık görevi görür [44]. Ayrıca oluşan oksit kaplamalar, kullanılan metal altlıklarda büyük ölçüde mukavemetlendirme etkisi sağlayabilirler. Mukavemetteki bu artış, altlık malzeme ve oksit tabakasının kalınlığına bağlıdır. Kaplama bölgesinin mikroyapısı ve oluşan fazların dağılımından dolayı, kaplamanın sertliğinde dalgalanmalar görülmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü üzere, altlık kısmın sertliği kaplamaya

göre oldukça düşüktür. Kaplama bölgesinden dışarı doğru uzaklaştıkça kaplama sertliğinde artış meydana geldiği, bir noktada zirve yaptığı ve ardından düşmeye başladığı görülmektedir [30].



Şekil 2.11: Kaplama kesitinin mikro sertlik dağılımı, 1)  $\alpha$ -alümina; 2)  $\gamma$ -alümina; 3) Mullit [30].

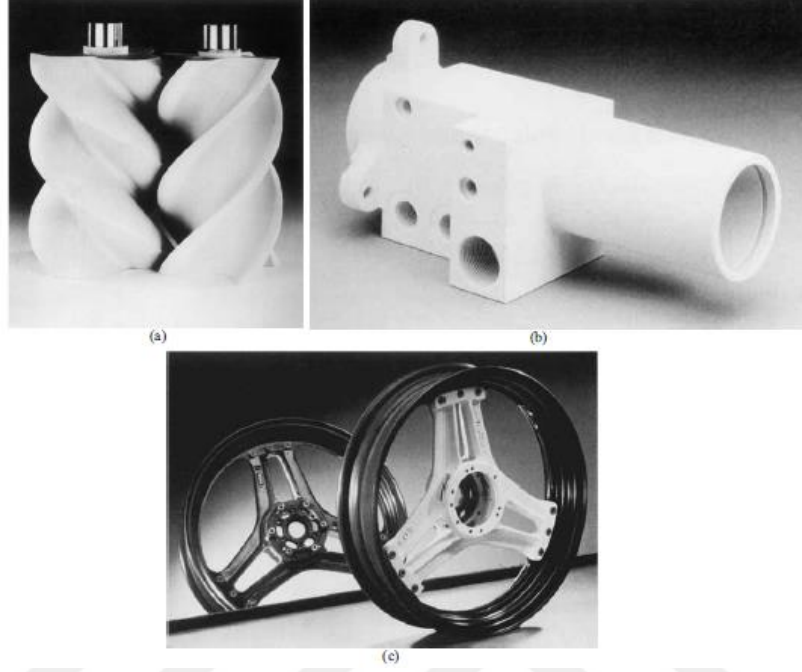
### 2.3.3. MAO İşleminin Uygulama Alanları

Mikro ark oksidasyon ile üretilen kaplamalar, gösterdiği üstün özelliklerinden dolayı otomotiv, uzay endüstrileri gibi pek çok alanda uygulama bulabilmektedir. Bu yöntemi tercih edilir kılan bir diğer faktör ise, geleneksel anodik oksidasyon prosesleri ile kaplanamayan yüksek silisyum içerikli alüminyum alaşımlarının kaplanabilmesidir [25].

MAO işlemi sonucu oluşan kaplamalar, mükemmel dielektrik ve ısıya dayanıklılık özellikleri ile, füzeler ve uzay mekiklerinde koruyucu olarak değerlendirilebilirler. Ayrıca bu kaplamaların farklı renklerde oluşturulabilmesi, mimari alanlarda da kullanılabilirliklerini sağlamaktadır [26].

MAO işlemi ile üretilen oksit kaplamalar, orta seviyedeki sıcaklıklara, güçlü asidik ve bazik ortamlara dirençleri ile gıda ve kimya sanayinde kullanılabilirler. Oluşturulan oksit tabakasının sahip olduğu yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı, aşınma direncinin gerekli olduğu mekanik uygulamalarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Yüzeydeki oksit tabakasının sahip olduğu termal iletkenlik, metallere nazaran daha düşük olduğundan, termal uygulamalarda kullanılan malzemelere alternatif olabilirler. Ayrıca, oluşturulan oksit kaplamalar elektronik endüstrisinde yalıtkan film görevini üstlenebilirler. Bu yöntem ile, değişik şekillere sahip ve

normalde kaplanması zor olan iç yüzeylerin kaplanması da mümkün olmaktadır [13]. PEO işlemiyle kaplama yapılmış bazı malzemelerin görüntüleri Şekil 2.12’de verilmiştir.



**Şekil 2.12:** Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmış a) Kompresör rotoru, b) Hidrolik silindir, c) bisiklet tekeri [5].

#### 2.3.4. MAO İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

MAO işlemi yüksek aşınma dirençli, korozyon dirençli, ısı dirençli elektrik yalıtkanlı ve dekoratif gösterişli çok fonksiyonlu seramik benzeri kaplamalar meydana getirir. Mikro ark oksidasyon, anodizasyonun tersine, zayıf alkali çözelti içerisinde yaklaşık 1000 V ve asimetrik alternatif akım veya darbeleri akımda meydana getirilir. Mikro ark oksidasyonu geleneksel anodizasyondan farklı kılan en önemli özellik, kullanılan taban malzemesinin yüzeyinde oluşan ve düzensiz hareket eden elektriksel mikro deşarjların varlığıdır. Proses süresince elektrolit ve altlık malzeme arasında oluşan bu mikro deşarjlar sayesinde termal, plazma-kimyasal ve hidrodinamik etkileşim oluşur. Oluşturulan kaplamaların kompozisyon ve özellikleri, geleneksel anodik oksit tabakalara kıyasla çok daha iyidir.

MAO prosesinin başlıca avantajları şu şekilde sayılabilir:

- Ön ya da son yüzey işlemlerine gerek yoktur.
- Elektrolit olarak çevreye duyarlı ve ucuz tuz çözeltileri kullanılır.
- Kaplama renginin değiştirilmesi ile dekoratif amaçlı kullanım sağlanabilmektedir.

- Yüksek sertliğe sahip oksit kaplamalar elde edilebilmektedir.
- Düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeyler oluşturulur.
- Oluşan kaplamalar yüksek aşınma direncine sahiptir.
- Yüksek sıcaklığa dayanım özelliği sayesinde, termal bariyer kaplama olarak kullanılmaktadır.
- Oluşan kaplama tabakasının sahip olduğu termal iletkenlik, metallere nazaran daha düşük olduğundan, termal uygulamalarda kullanılabilirler.
- Çeşitli ortamlarda korozyona karşı dayanıklı özellik gösterirler [5].

Yukarıda sıralanan bu avantajlar, PEO'nun geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine kıyasla tercih edilmelerini sağlamaktadır. Fakat yöntemin avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır:

- MAO işlemi için yaklaşık 1000 V'a kadar enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına ihtiyaç vardır ve bu değerdeki yüksek enerji değeri üretim maliyetini önemli derecede artıracak bir faktördür. Ayrıca bu kadar yüksek enerji kullanımı tehlikeli bir üretim süreci oluşturur.
- Proses süresince yüksek sıcaklık oluşmaktadır ve malzemenin içinde bulunduğu çözeltilerin soğutulması için yüksek kapasiteli bir soğutucu kullanılması gerekmektedir.
- Oluşan seramik kaplama çok pürüzlü bir yapı sergilemektedir, bu sebeple dış yüzeydeki yapının aşınma direnci çok düşük değerlerdedir. İç katmanlarsa oldukça sert ve yüksek aşınma dayanımına sahip bölgelerdir. Malzeme yüzeyindeki porozlu üst tabakanın kaldırılması maliyet ve üretim bakımından verimli değildir [25].

#### 2.4. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETİ

Wang ve diğerleri [45], 6061 Al alaşımını kullanarak farklı kompozisyonlardaki  $\text{Na}_2\text{AlO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  ve  $\text{NaOH}$  elektrolit karışımı ile mikro ark oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oda sıcaklığında 5 dk. işlem süresi ile gerçekleştirdikleri çalışmada, 200V AC (60Hz) ve 260V DC hibrid voltaj aralığında çalışmışlardır. Oluşturulan kaplama yüzeyleri incelendiğinde, kullanılan bütün elektrolitlerde deşarj kanallarının aynı koyu dairesel noktalar şeklinde ortaya çıktığı ve tüm yüzeye yayılan pankek benzeri mikroyapının olduğu görülmüştür. Alüminatlı elektrolit ile yapılan işlemlerde meydana gelen yüzeylerin silikatlı

elektrolitlere nazaran daha pürüzsüz olduğu görülmüştür.  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  eklentisinin yüzey pürüzlülüğünü etkilediği, oksit katmanlarının büyümesini hızlandırdığı ve bu katmanların yoğunluğunu arttırarak mikro sertliği önemli ölçüde arttırabileceği de edinilen sonuçlar arasındadır. Ayrıca flor iyonunun deşarj kanallarının çapını küçültmekle birlikte, oluşan seramik tabakanın gözenekliliğinin kontrol edilebilmesini de sağladığı görülmüştür. Silikatlı elektrolitler kullanılarak gerçekteşen proseslerde, alüminatlı elektrolitlere göre daha kalın oksit tabakası elde edilmiş ve alüminat esaslı elektrolitlerde elde edilen PEO tabakalarının yüzey morfolojileri pankek benzeri mikroyapı sergilerken, silikat bazlı elektrolitler kullanılarak gerçekteşirilen işlemlerde volkan benzeri mikroyapı katmanları elde edilmiştir. Tüm oksit tabakalarında meydana gelen ana fazlar  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  olurken, özellikle silikat bazlı elektrolitlerde, plazma deşarj kanalları çevresinde mullit partiküllerinin de oluştuğu gözlemlenmiştir.

Venugopal ve diğerleri [46], AA7075 alüminyum alaşımı üzerine mikro ark oksidasyon metodu kullanarak alümina kaplama oluşturmuş ve %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde malzemenin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve gerilimli korozyon çatlaması (SCC) davranışlarını incelenmişlerdir. Kullanılan altlık malzemeler iki aşamalı olarak sırasıyla 170 °C'de 8 saat ve 177 °C'de 8 saat yaşlandırılmıştır. MAO işleminde, 4 g.L<sup>-1</sup> KOH, 2 g.L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisi içerisinde 30 dk. süre ile gerçekteşirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kaplamanın 15 µm gözenekli dış ve 15 µm kalınlığında kompakt iğer tabakadan oluştuğu ve kaplama yüzeyinde mikro gözenekler olduğu görülmüştür. EIS incelendiğinde, oksit kaplamanın morfolojisi ve belli bir süre boyunca korozyon performansı arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermiştir. Mikro ark oksidasyon yöntemiyle seramik alümina kaplama, klorür ortamında AA7075 alüminyum alaşımının uzun vadede daldırma koşullarında lokalize korozyon direncini arttırmada iyi bir bariyer etkisi sunduğu gözlenmiştir. Dış katmanın korozyona direnç değerinin, iğer kompakt katmana göre çok daha düşük olduğu ve altlık metal iğer korozyon korumasının, dış gözenekli katman tarafından değil sadece iğer kompakt katman tarafından sağlandığı görülmüştür. Sonuçlar, Cu ve Fe bakımından zengin intermetalik fazlar tarafından başlatılan şiddetli lokal korozyona bağlı olarak alaşımın erken bozulmasını önlemek iğer MAO kaplama oluşturmanın kullanışlı bir yol olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sabit yük SCC testi sonuçları, alaşımın uzamasındaki azalmanın aşırı mekanik yüklenmeye neden olan lokal korozyondan kaynaklandığını ve gerçekte SCC değerini vermediğini, kaplama oluşturularak iyileştirilebileceğini fakat stres korozyon çatlağını tamamen önleyemediğini ortaya koymuştur.



Li ve diğerleri [47], 2024 alüminyum alaşımı üzerine, 10 g.L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 1 g.L<sup>-1</sup> KOH elektrolit, 150 Hz frekans, 1 ms (+) ve 1,5 ms (-) darbe genişliği kullanarak 520V sabit anodik voltaj ve 0V-190V aralığında değişken katodik voltaj değerlerinde PEO işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Kaplama kalınlığının aşınma direnci üzerindeki etkisini belirlemek için belirtilen katodik voltajlarda gerçekleştirilen proseslerde 30 ila 33 µm aralığında benzer kaplama kalınlıkları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, akım yoğunluğunun düşme hızı, kaplama büyüme hızı ile güçlü bir korelasyona sahiptir. Bu nedenle, PEO işlemlerinin erken aşamalarında kaplama büyüme oranının daha yüksek olduğu ve işlem süresi arttıkça azaldığı söylenebilir. Oluşan kaplamanın çoğunlukla kristal yapıdaki  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve amorf silikat oksitlerden oluştuğu ve katodik voltajın artmasıyla kaplamalardaki alümina içeriğinin arttığı, silikat oksitlerin azaldığı tespit edilmiştir. İşlem sonrası 0V ve 40V ile yapılan kaplamalarda büyük çukurlarla (esasen kaplama/altlık arayüzü yakınında oluşan) birlikte çok gözenekli bir yapı gözlenirken, 90V, 140V ve 190V ile gerçekleşen işlemlerde oluşturulan kaplamalar gözenekli dış tabaka ve kompakt iç tabakadan oluşan çift katmanlı bir yapı sergilemiştir. Oluşan mikro porların deşarj kanalları ve ergimiş oksitten dışarı çıkan gaz kabarcıkları ile meydana geldiği ve mikro çatlakların, nispeten soğuk elektrolit ile ergimiş oksidin hızlı teması ile katılaşması sonucu oluşan ısıl gerilimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Katodik voltaj olmadan oluşturulan PEO kaplamanın, çok gözenekli bir yapıya, nispeten yüksek pürüzlülüğe ve diğerlerine göre en zayıf aşınma direncine sahip olduğu, katodik voltajın artmasıyla birlikte kompakt iç katmanın kalınlaştığı, yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve gözenekli dış katmanın daha ince hale geldiği görülmüştür.

Arrabal ve diğerleri [48], yaptıkları çalışmada, 6082-T6 alüminyum alaşımı altlık malzeme kullanarak PEO kaplamaları oluşturmuşlar ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık konsantrasyonunun faz bileşimi ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. PEO işleminden önce numuneler, önceden anodize edilmemiş alaşıma kıyasla enerji tüketiminde önemli bir düşüşe neden olan 20 µm kalınlığında bir alümina tabakası üretmek amacıyla geleneksel anotlama ön işleminden geçirilmişlerdir. İşlem sonucu  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin, kaplamaların dış tabakasına ya biriktirme ya da deşarj kanallarından çıkan ergimiş metale elektroforez ya da mekanik tutunma yolu ile dahil edildiğini görmüşler ve PEO kaplamanın dış katmanın düşük gözeneklilik ve artan sertliğe sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Sonuçlar ayrıca, dahil edilen bazı partiküllerin erimeden ziyade katı hal sinterlemesine maruz kaldığını ve bunun da oksit malzemesini çevreleyen sınırlar ile kaynaşmalarını sağladığını göstermiştir. PEO

kaplamaların tribolojik performansı, elektrolitik sert krom kaplama ile karşılaştırılmış, PEO kaplamaların sürtünme katsayılarının uygulanan yük ile hafifçe artarak sert kromdakine benzer sonuç verdiğini görmüşlerdir. Elde edilen kaplamaların kesitlerinin SEM incelemesi, metalin yapışma kuvvetini aşan iç gerilimlerden kaynaklanan tipik mikro çatlak yapısını ortaya koymuştur. XRD sonuçları, kaplamaların ana bileşenlerinin  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve mullit olduğunu göstermiştir. Alümina parçacıkları içeren PEO kaplamaların, dış kaplama katmanında, parçacık içermeyen elektrolitte oluşturulandan daha az gözenekli ve daha sert olan, daha yüksek oranda  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı içerdiği görülmüştür. Alümina parçacıklarının elektrolite eklenmesinin, kaplamaların kalınlığını ve pürüzlülüğünü önemli ölçüde değiştirmedığı, ancak morfolojileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerine sahip PEO kaplamaların, test edilen tüm malzemeler arasında en düşük aşınma hacmine sahip olduğu ve sert krom kaplamalara alternatif olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Hakimizad ve diğerleri [49], 7075 alüminyum alaşımı üzerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> kompozit kaplamalar üretmek için, %20 ve %40 katodik çevrim oranındaki unipolar ve bipolar dalga formları ile çalışmışlardır. Proseste silikat bazlı elektrolit ve aynı elektrolite 30 nm büyüklüğünde TiO<sub>2</sub> eklentisi ile kompozit kaplamalar elde etmişlerdir. Akım dalga şeklini tek kutupludan çift kutupluya değiştirdiklerinde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>'nin her ikisinde pankek benzeri morfolojiden krater formuna dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Tek kutuplu dalga formu kullanılarak gerçekleştirilen PEO işleminde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> kompozit kaplamaların kalınlığının, çift kutuplu kullanılarak üretilenlere göre arttığı görülmüştür. Ayrıca, TiO<sub>2</sub> nano parçacıklarının kaplamada orijinal kristal yapılarında buldukları ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e dönüşümü kolaylaştırdıkları görülmüştür. Korozyon ölçüm sonuçları, tek kutuplu dalga formunda üretilen kompozit kaplamanın, onarım mekanizması nedeniyle kısa süreli daldırmalarda en yüksek korozyon direncini göstermesine karşın, daha yüksek oranda bozunduğunu göstermiştir. %40 katodik çevrim oranı ile bipolar dalga formu kullanılarak, daha yüksek kalınlık ve düşük gözeneklilikteki iç katmanlı kaplamalar elde edildiği ve bunun sonucunda da uzun süreli daldırmada maksimum korozyon koruması sağlandığı görülmüştür. Kompakt iç tabakadaki mikro gözenekleri kapatmanın, korozyon için etkili bir onarım mekanizması olabileceği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, daha yüksek yüzey gerilimi nedeniyle titanya nano-partikülleri eklentisinin kaplama kalınlığını düşürdüğünü ve ayrıca kaplamaların korozyondan korunmasını azaltabilecek daha geniş mikro gözenek ve daha fazla mikro çatlaklara neden olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, titanya nano-parçacıkları

varlığının, PEO işleminin voltaj-zaman davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı bulunmuştur. XRD ve EDS analizleri sonucu, TiO<sub>2</sub> nano-partiküllerinin kaplamalara etkisiz bir şekilde dahil olduğu, homojen dağılım ve konsantrasyonlarının uygulanan dalga formundan bağımsız olduğu görülmüştür.

Meshreghi ve Yerokhin [50], yaptıkları çalışmada, 0,05 mm kalınlığındaki Al folyoya PEO işlemi uygulamışlardır. Proseste birkaç dakika ile birkaç saat arasında değişen farklı işlem süreleri kullanılmış ve oksit tabakası kalınlığının PEO işlem süresinin artması ile birlikte arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, son aşamada, kaplama büyüme hızı, kaplamadaki anodik çözünme ve yeniden kristalleşme nedeniyle azalmıştır. Ayrıca işlem süresinin  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e dönüşümü de etkilediği ve 6 dk'lık işlem sonrası kaplama yapısında her ikisinde nispi oranda bulunduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, 4 dakika işleme tabi tutulan numunelerin üzerindeki kaplamada, neredeyse yalnızca  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğu görülmüştür. 12 dakikalık kaplama işleminin ardından elde edilen kaplama ve kalan (residual) Al kalınlığı  $75 \pm 1.5 \mu\text{m}$  olarak elde edilmiş ve kullanılan alüminyum folyo hacminin %1'ini geçmeyen çok küçük bir alan dışında tamamının alüminaya dönüşümü başarı ile tamamlanmıştır. Bununla birlikte numune yüksek gevreklik göstermiştir. Kullanılan tüm numunelerin kaplama yüzeyleri, düzensiz şekillideşarj gözenekleri bulunan pankek ve volkan benzeri özellik göstermiştir. Yapıda oluşan mikro çatlakların, hızlı soğuma nedeniyle kaplama oluşurken meydana gelen binlerce santigrat dereceye sahipdeşarjlar ve elektrolit arasındaki sıcaklık farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, kaplamanın merkez ve kenar bölgelerinde gözeneklilik azalmış ve yüzey pürüzlülüğü işlem süresi ile artmıştır. Bu özellikler sadece PEO kaplamanın oluşmaya başladığı numunenin yakın metal kısmında doğrusal olmayan bir davranış göstermiştir. Gözenek boyutu dağılım analizi, tüm işlem koşullarında gözeneklerin çoğunlukla  $6 \mu\text{m}$ 'dan küçük olduğunu ve bununla birlikte 6 dakikalık işlem sonrası oluşan kaplamada gözeneklerin daha küçük boyut ve düzgün dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

Jun Tian ve diğerleri [51], 2A12 Al alaşımını üzerine,  $30 \text{ g.L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SiO}_3$  ve  $5 \text{ g.L}^{-1} \text{ NaOH}$  karışımı elektrolit kullanarak farklı voltajlarda gerçekleştirdikleri MAO işlemi sonucu, altına iyi yapışan  $40\text{-}110 \mu\text{m}$  kalınlıkta kaplamalar elde etmişlerdir. Daha kalın kaplama kalınlığına sahip numunenin, ince kaplamaya göre nispeten daha pürüzlü olduğu, kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün kaplama kalınlığı arttıkça arttığı ve  $80 \mu\text{m}$ 'nin üzerine çıktığında hafifçe değiştiği görülmüştür. Sonuçlar, Al alaşımlarındaki mikro ark oksitlenmiş kaplamaların iki

farklı bölgeden oluştuğunu, gözenekli üst tabaka bölgesinin ağırlıklı olarak daha yüksek soğuma hızında üretilen  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazından ve yoğun iç bölgeninse ağırlıklı olarak düşük soğuma hızında elde edilen  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den meydana geldiğini göstermiştir. Kaplamaların iç ve dış tabakalarında bulunan  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  arasındaki fark, temel olarak mikro ark bölgesindeki ergimiş alüminanın soğuma hızındaki değişiklikten kaynaklanmaktadır. Oluşturulan kaplamaların makro incelemeleri yapıldığında, yüzeyde renk farklılıkları olduğu, yapıdaki kahverengi kaba yapının  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , daha yoğun koyu renkli iç tabakanın ise  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazından oluşan gözenekli tabakanın yüzeyden parlatılarak uzaklaştırılmasının ardından kalan kaplamanın, uzun yük taşıma kapasitesi gösterdiği görülmüştür.

Oh, Mun ve Kim [52], 6061, 2024 ve 7075 ticari alüminyum alaşımları ve ağırlıkça  $x=\%0,6-4,6$  aralığında değişen Al-x-Mg ikili alaşım malzemelere PEO işlemi uygulamışlardır. Üç alaşımdaki Mg içeriği  $6061 < 2024 < 7075$  şeklinde sıralanmaktadır. Kullanılan ticari alaşımlar 42 saat boyunca  $470^\circ\text{C}$ 'de homojenleştirilmiştir. Kesitler incelendiğinde, yapıda yoğun bölgedeki koyu renk bölgelerin  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazını, açık renginse  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazını gösterdiği görülmüştür. XRD sonuçları incelendiğinde, 2024 ve 6061 alaşımlarında hem  $\gamma$  hem de  $\alpha$  fazlarının pikleri görülürken, 7075 alaşımı üzerindeki kaplamada ise sadece  $\gamma$  fazı tespit edilmiştir. Al 6061 alaşımı üzerindeki kaplama kesitinin TEM analizinde amorf alt tabakada yüksek gözenekliliğe sahip birkaç mikrometrelik nano taneli  $\gamma$ -alümina tabakası gözlenmiştir. Altlık malzeme yüzeyinden uzaklaştıkça, tane boyutunun arttığı ve  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  katmanının önemli bir kısmının kaba taneli  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'e dönüştüğü görülmüştür. Al 6061 ve 2024 alaşımları üzerindeki kaplamalar, Al 7075 alaşımına göre daha yüksek gözeneklilik göstermiştir. Bununla birlikte, Al 7075 alaşımındaki sert kaplama tabakasının, çoğunlukla küçük çatlaklara sahip  $\gamma$ -fazından oluştuğu görülmüştür. Al-x-Mg ikili alaşımları incelendiğinde, Mg iyonlarının  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  den  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'e geçişi baskılamada önemli rol oynadığı ve oluşan  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının Mg içeriği ile ters orantılı olduğu elde edilmiştir. Mg'nin bu güçlü etkisine ek olarak, Cu ve Zn iyonlarında  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  faz oluşumunu engelleyebileceği bulunmuştur. Kaplamanın mikroyapısı üzerinde gözlenen bu değişikliğin, Mg'nin alümina faz geçiş sıcaklığını değiştirmesi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Olası bir diğer açıklama ise, Mg iyonlarının O ile düşük bağlanma enerjisi olabilir. Kaplamaların mekanik açıdan incelenmesi yapıldığında, yoğun  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriği daha yüksek olan kaplamaların daha iyi sertlik ve yüksek aşınma ve çatlama direnci verdiği belirlenmiştir.

Jing Guo ve arkadaşları [53], MAO prosesinde sodyum silikat-sodyum hidroksit karışımı çözelti ve 15, 25, 35, 45, 55 dk süreler ile çalışmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, düşük miktarlardaki Cu, Mg ve Si elementlerinin PEO reaksiyonlarını kolaylaştırırken, yüksek Cu, Mg ve Si miktarlarının bu reaksiyonlarını engellediği bulunmuştur. Bununla birlikte, Zn elementinin güçlü bir engelleyici etkisinin olduğu görülmüştür. Oluşan kaplamaların yüzeylerinin belirgin ergime izleri ile çok sayıda volkanik gözenek içeren pürüzlü bir mikroyapı sergilediği görülmüştür. Saf alüminyum üzerindeki kaplamanın, daha az gözenek ve dalgalanma gösterdiği, yapıdaki alaşım elementleri arttıkça, daha fazla reaksiyon meydana geldiği ve bu reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin kaplama yapısına katıldığı belirlenmiştir. Cu elementinin varlığında oluşan kaplama yüzeyi saf alüminyum kaplamaların yüzeyi kadar iyiyken; Mg, Si ve Zn eklentisi ile yüzey morfolojisinin kötüleştiği görülmüştür. Farklı kompozisyondaki altlık malzemeler üzerine yapılan kaplama kalınlıkları ise büyük farklılık göstermemiştir. Altlık malzemelerdeki Mg, Si ve Zn içerikleri arttıkça, oluşan kaplama yapısı daha gevşek bir yapı göstermiştir. XRD sonuçları incelendiğinde, farklı yüzeylerde oluşturulan seramik kaplamaların temel olarak  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' ten oluştuğu ve az miktarda da mullit içerdiği görülmüştür.  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği  $\omega$ (Cu) = %4.35 değerine kadar bir miktar artarken,  $\omega$ (Cu) = %6.5 olduğunda bir miktar azaldığı, düşük seviyelerdeki (%0.8) Mg seviyesinin  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumunu desteklediği,  $\omega$ (Mg) %0.85 - %2.5 aralığında iken yüksek sıcaklıkta alümina faz dönüşümünde engelleyici etkiye sahip olduğu,  $\omega$ (Mg) %2.5 değerinin üzerinde ise her zaman geçerli olmamakla birlikte yeniden  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumunu destekleyen etkiye sahip olduğu görülmüştür. Si ve Zn elementlerinde  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumunda güçlü etkisinin olduğu, yüksek miktarlardaki Si ve Zn içeriğinde  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşmadığı görülmüştür.

Muhaffel ve Çimenoglu [54], yaptıkları çalışmada AZ91 Mg alaşım altlık malzeme ve alüminat bazlı elektrolite 5 ve 10 g.L<sup>-1</sup> Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ilavesi yaparak MAO işlemi gerçekleştirmişlerdir. Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ilavesi ile elektrolitin iletkenliğinin arttığı ve MAO işleminin yoğun kıvılcımların görüldüğü daha yüksek akım yoğunluğu seviyelerinde ilerlediği görülmüştür. NaAlO<sub>2</sub> ve Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>'ün ayrıştırılması sonucu oluşan AlO<sub>2</sub><sup>2-</sup> ve PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> iyonlarının yüksek elektrik iletkenliğine sahip elektrolitte altlığa doğru hızlı şekilde hareket ettiği ve büyüyen MgO'ya hızlı şekilde dahil olduğu, en kalın ve en sert kaplamaların 10 g.L<sup>-1</sup> Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ilavesi ile yapılan işlem sonucu oluştuğu belirlenmiştir. XRD incelemelerinde, üretilen MAO kaplamaların Al ve Mg bakımından zengin iki tabakadan oluştuğu, dış tabakanın spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> bakımından zengin, iç tabakanınsa ağırlıklı olarak MgO fazından oluştuğu ve artan Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> konsantrasyonu ile MgO

fazı artarken, diğer fazların yoğunluklarının azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  konsantrasyonunun artması, mikro çatlakları daha görünür hale getirirken, yüksek akım yoğunluklarında kıvılcımların büyümesi ve daha büyük deşarj kanalları oluşumu sonucu mikro gözenek sayısında azalma ve boyutlarında bir artışa neden olmuştur. Elektrolitte  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  konsantrasyonunun artırılması kaplama kalınlığını arttırmakla birlikte, kaplama ve substrat arayüzünde homojenliği ve düzenliliği bozmakta, bu da kaplama kalınlığı değerlerinin standart sapmasındaki bir artışla ilişkilendirilebilmektedir. Oluşturulan kaplamaların tamamında malzemelerin korozyon ve aşınma dirençleri artmış,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  ilavesi ile daha iyi korozyon ve aşınma direnci elde edilmiştir. Elektrolitin  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  konsantrasyonunun  $5 \text{ g.L}^{-1}$  den  $10 \text{ g.L}^{-1}$  e yükseltilmesi sonucu, oluşan kaplamanın daha fazla yüzey pürüzlülüğü ve daha büyük mikro gözeneklere sahip olmasına bağlı olarak korozyon ve aşınma performansının bir miktar bozulduğu görülmüştür.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. KULLANILAN ALTLIK MALZEMELER

Sürekli levha döküm tekniğinin en bilinen özelliklerinden biri, merdanelerle ilk temas sonrası sıvı metalin aniden katılaşmasıdır. Bu süreçte hem katılaşma gerçekleşirken, hem de merdaneler aracılığıyla deformasyon meydana gelir. Sınırlı olan bu deformasyon, haddelenen malzemenin kesitinin tamamını etkileyemediği için, yüzeyden sınırlı bir derinlikte sertliğin artmasına sebebiyet verir [55]. Katılaşma esnasında ortaya çıkan konsantrasyon değişimlerini minimize etmek, alaşım elementlerinin yarattığı segregasyonu ortadan kaldırmak ve homojen bir tane yapısı elde etmek amacıyla haddelenmiş alüminyum malzemelere homojenizasyon tavlı uygulanmaktadır [56].

Bu çalışmada altlık olarak iki ayrı proses sonucu elde edilen “H19” ve “H0” kondisyondaki 1050 ve 3105 Al alaşımları kullanılmış olup, malzemeler Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. İkiz merdane döküm yöntemi ile üretilen 1050 ve 3105 alüminyum alaşımları döküm kalınlığından hadde ile kademeli olarak ezme işlemine tabi tutularak 1,5 mm kalınlığına getirilmiştir. Uygulanan proseslerden biri malzemenin son kalınlığında yeniden kristalleşme için nihai kondisyon tav işlemi içerirken, diğesinde tav işlemi uygulanmamıştır. Tav işlemi için 1050 ve 3105 alaşım alüminyum levhalar son kalınlıkta sırasıyla 410 °C ve 450 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca tavlanmış ve ardından havada soğutulularak “H0” kondisyon özellikleri kazandırılmıştır. Ardından kaplanacak olan her bir altlık malzeme 20 mm x 10 mm x 1,5 mm boyutlarına getirilmiştir. Numunelerin düzeneğe tutturulabilmesi için her bir numunenin üst köşesine 2 mm çapında delikler açılmıştır. Kullanılan alaşımların kimyasal bileşim aralıkları TS EN 573-3 Standardı’na uygun olup Tablo 3.1’de, makro görünümleri ise Şekil 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** TS EN 573-3 Standardı 1050 ve 3105 alaşımlarının kimyasal bileşim aralıkları [57].

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer		Alüminyum en az
									Her biri	Toplam	
1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	0,03	-	99,50
3105	0,60	0,70	0,30	0,30-0,8	0,20-0,8	0,20	0,40	0,10	0,05	0,15	Kalan



Şekil 3.1: İşlem öncesi kullanılan altlık malzemelerin makro görünüşleri.

### 3.2. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMLERİ

MAO kaplama prosesinde, 30 kW kapasiteye sahip bir güç kaynağı ve Şekil 3.2’de gösterilen mikro ark oksidasyon cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın sahip olduğu maksimum pozitif voltaj değeri 700 volt ve maksimum negatif voltaj değeri 300 volt, maksimum negatif ve pozitif akım değerleri ise 50 amperdir. Bu cihaz aynı zamanda kare dalga uygulayabilmekte ve çift kutup (bipolar) prensibine göre çalışmaktadır. Voltaj ve akım kontrollü prosesler gerçekleştirilebildiği gibi, pozitif ve negatif voltaj, pozitif ve negatif akım, işlem süresi, pozitif ve negatif vuruş süresi gibi parametreler kontrol edilebilmektedir. İşlem öncesi, 20 mm x 10 mm x 1,5 mm boyutlarına getirilen numuneler, saf su ile temizlenerek işleme hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.2: Proseste kullanılan mikro ark oksidasyon cihazı.



Mikro ark oksidasyon işlemleri, hazırlanan  $1 \text{ g.L}^{-1} \text{ KOH} + 7,5 \text{ g.L}^{-1} \text{ NaAl}_2 + 2,5 \text{ g.L}^{-1} \text{ Na}_3\text{PO}_4$  içeriğindeki sulu çözelti içerisinde voltaj kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemlerde sabit (V+) 450V pozitif voltaj, ve (V-) 80V negatif voltaj kombinasyonu kullanılmıştır. Toplam MAO proses süresi 5 dakika olarak ayarlanmış ve 600  $\mu\text{s}$  anot darbe vuruş, 400  $\mu\text{s}$  iki darbe arası bekleme ve 600  $\mu\text{s}$  katod darbe vuruş süreleri ile 500 Hz frekans değerinde çalışılmıştır. Elektrolitin karıştırılması için hava pompası kullanılmış ve dışarıdan bir soğutucu kullanılarak işlem süresince elektrolitin sıcaklığı yaklaşık  $20^\circ\text{C}$ 'nin altında tutulmuştur.

Numuneler üst köşelerine açılan delikten, elektrolitle temas halinde olacak yerleri izole edilmiş alüminyum telin ucuna yerleştirilerek hücreye anot olarak bağlanmıştır. Düzenekteki elektrolitin dolu olduğu paslanmaz çelik kap ise katod görevi görmektedir. Önceden belirlenmiş 5 dakikalık oksidasyon süresine ulaşıldıktan sonra, numuneler elektrolitik banyodan çıkarılarak distile su ile temizlenmiş ve oda sıcaklığında havada kurutulmuştur.

Tüm numunelerin MAO işleminde belirtilen parametreler değiştirilmeden kullanılmış ve nihai tav işlemi ve alaşımdaki elementlerin oksit tabakasının performansına olan etkileri incelenmiştir.

### 3.3. KARAKTERİZASYON İNCELEMELERİ

Mikro ark oksidasyon işlemleri sonrası numune yüzeylerinde oluşan oksit kaplamaların karakterizasyon işlemleri makro ve mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, kaplama kalınlığı ölçümü, yüzey pürüzlülük ölçümü, X-ışınları analizi (XRD) ve korozyon testi ile yapılmıştır.

#### 3.3.1. Kesit ve Yüzey İncelemeleri

Kaplama işleminin ardından, kesit analizi için kullanılacak olan numuneler kesitleri açığa çıkacak şekilde soğuk reçine kalıbına alınmıştır. Yüzeylerin incelemeye hazır hale gelmesi için kalıptaki numuneler 1200 ve 2400 gridlik aşındırıcı kağıtlar ile zımparalandıktan sonra 3 mikron elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Daha sonra kesit yüzeylerine silika uygulanmıştır.

Kaplamaların yüzey ve kesit morfolojilerini incelemek için EDS donanımlı JEOL JSM-5600 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Carl Zeiss HAL100 model optik mikroskop kullanılmıştır.

Oluşturulan oksit kaplamaların yüzey morfolojilerinin önce gözle makro incelemesi yapılmış, ardından SEM cihazı kullanılmıştır. SEM analizi öncesi numune yüzeyleri iletkenlik kazandırmak ve görüntü kalitesini arttırmak için altın ile kaplanmıştır. Numunelerin yüzeyleri ve kesitleri incelenerek farklı büyütmelerde görüntüler alınmıştır.

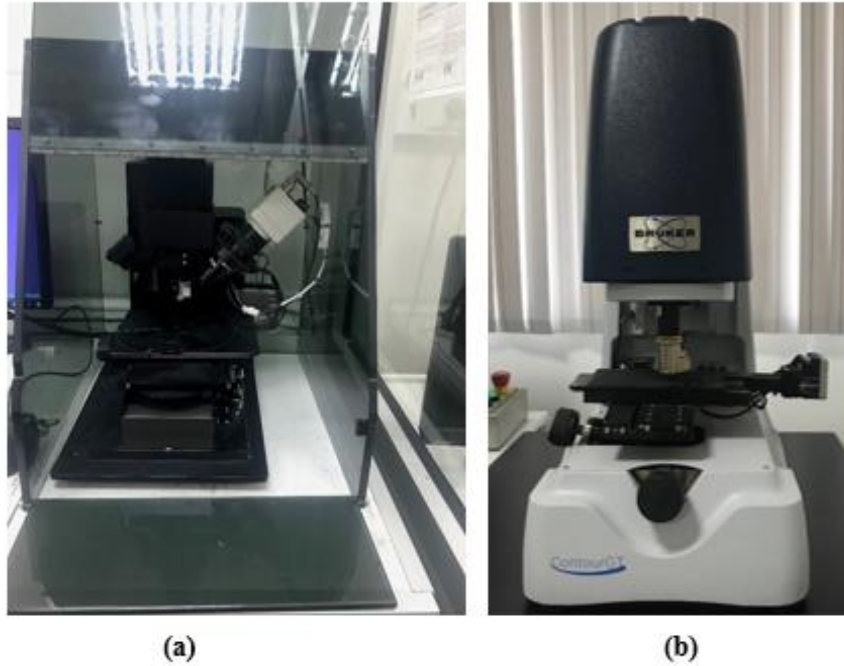
### 3.3.2. Kaplama Kalınlığı Ölçümü

Kaplama kalınlığı, numunelerin kesit SEM görüntüleri üzerinden, farklı bölgelerden yapılan ölçümler sonucu elde edilmiştir.

### 3.3.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

MAO işlemine tabi tutulmadan önceki numunelerin yüzey pürüzlülükleri (Ra) Bruker GTK0X model optik profilometre cihazı ile tahribatsız şekilde elde edilmiştir.

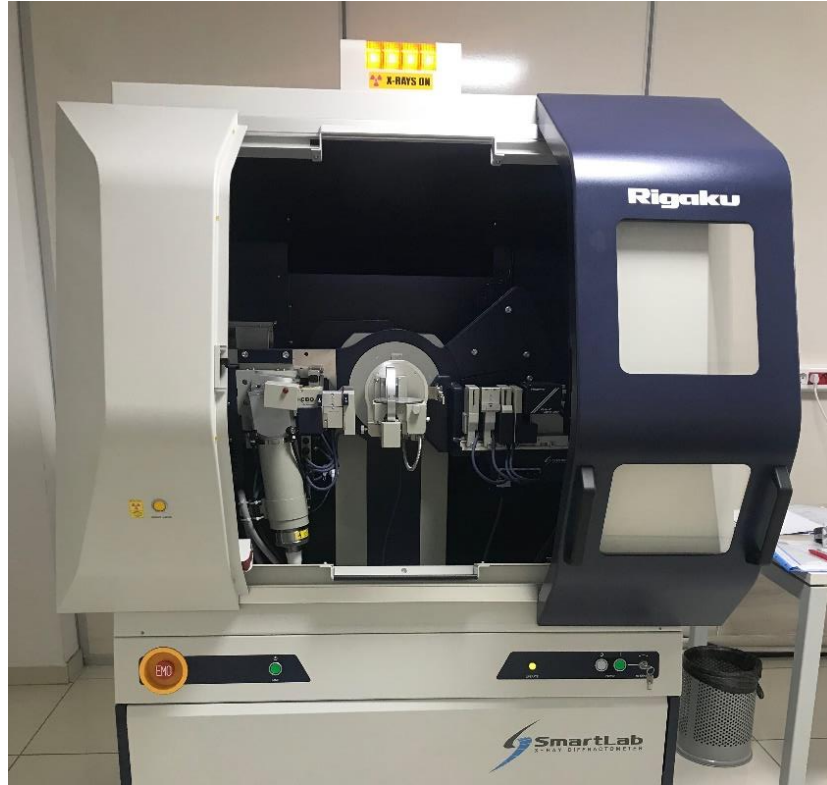
MAO işlemi sonrası kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri ise Veeco Dectac 6M marka profilometrede numune yüzeylerinde 5000  $\mu\text{m}$  mesafede, 3 mg yük altında 30 saniye süre ile tarama yapılarak gerçekleştirilmiş ve tekrarlanan ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) belirlenmiştir. Kullanılan cihazlar Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Kullanılan yüzey pürüzlülük cihazları; (a) Veeco Dectac 6M , (b) Bruker GTK0X.

### 3.3.4. XRD Analizleri

Kaplanan numunelerin yüzeylerinin kalitatif faz analizleri, Rigaku SmartLab3 marka X-ışını difraktometresi (XRD) ile Cu-K $\alpha$  ışını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hızlanma voltajı ve uygulanan akım sırasıyla 40 kV ve 30 mA olarak ayarlanmıştır. Numuneler, 0.02°'lik adımlar ile, dakikada 20° tarama hızında, 3°-90°'lik 2 $\theta$  açılardan taranmıştır. Kullanılan XRD cihazı Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Rigaku SmartLab3 marka XRD cihazı.

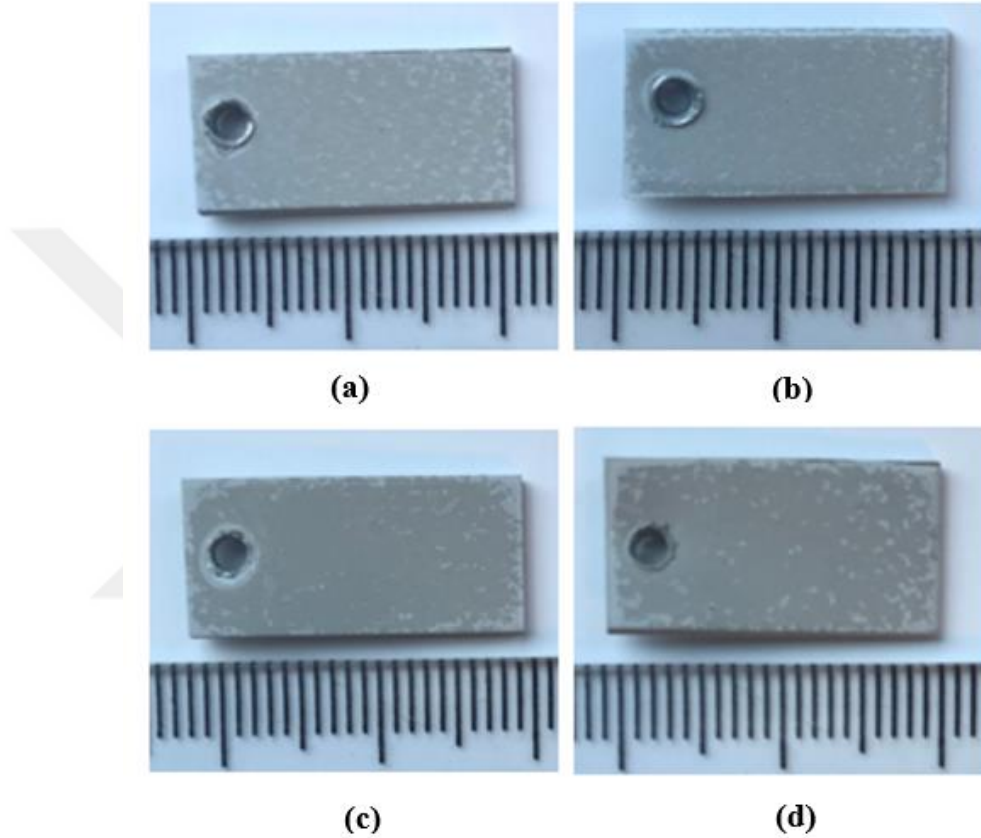
### 3.3.5. Korozyon Testi

Üretilen kaplamaların ve altlık malzemelerin korozyon deneyleri, elektrokimyasal polarizasyon ölçümleri ile yapılmıştır. Deneyler, klasik üç elektrotlu bir hücre kullanılarak ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1 cm<sup>2</sup> yüzey alanı çözeltiye maruz bırakılan numuneler çalışan elektrot olarak, platin karşıt elektrot olarak, doygun bir kalomel elektrotta referans elektrot olarak davranmıştır. Çözeltinin sıcaklığı tüm ölçümlerde oda sıcaklığında sabit tutulmuştur.

## 4. BULGULAR

### 4.1. YÜZEY İNCELEMELERİ

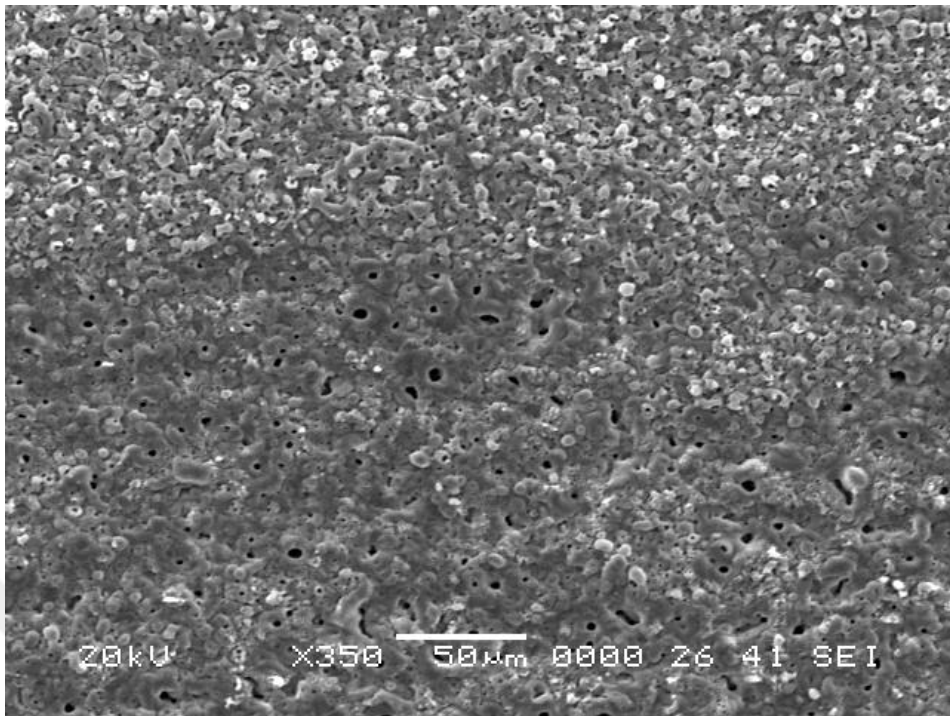
MAO işlemine tabi tutulmuş “H19” ve “H0” kondisyondaki 1050 ve 3105 Al alaşımı numunelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların makro görüntüleri Şekil 4.1.’de verilmiştir.



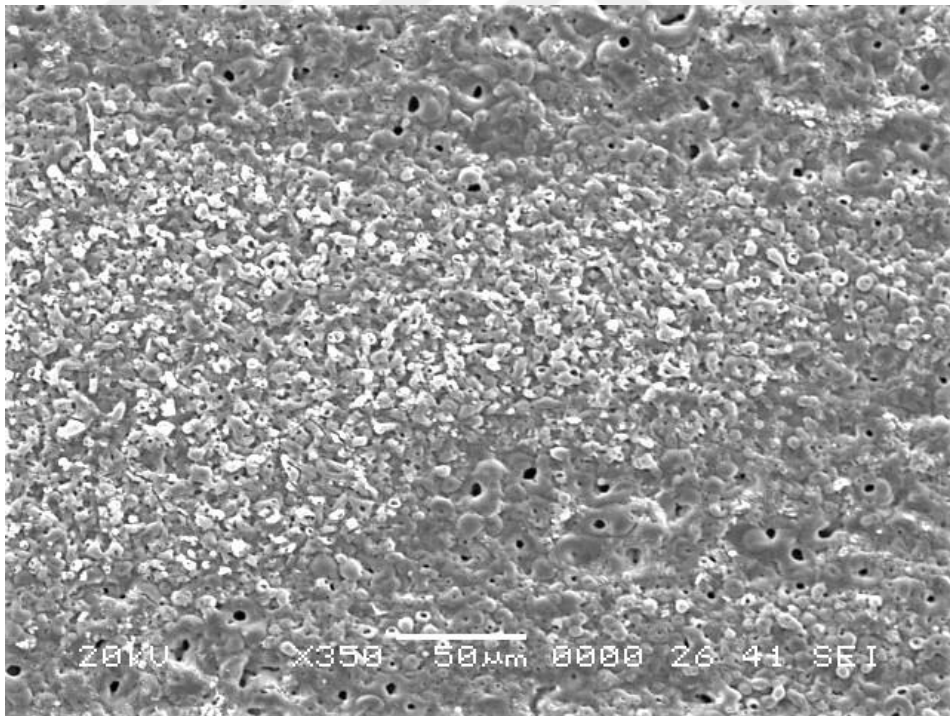
**Şekil 4.1:** Oluşan kaplamaların makro görüntüleri; (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.

Numunelerin makro görüntüleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerinde açık-koyu renk dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Açık bölgeler daha çok malzemenin köşelerinde yoğunken, orta kısımlarda koyu renk hakimdir.

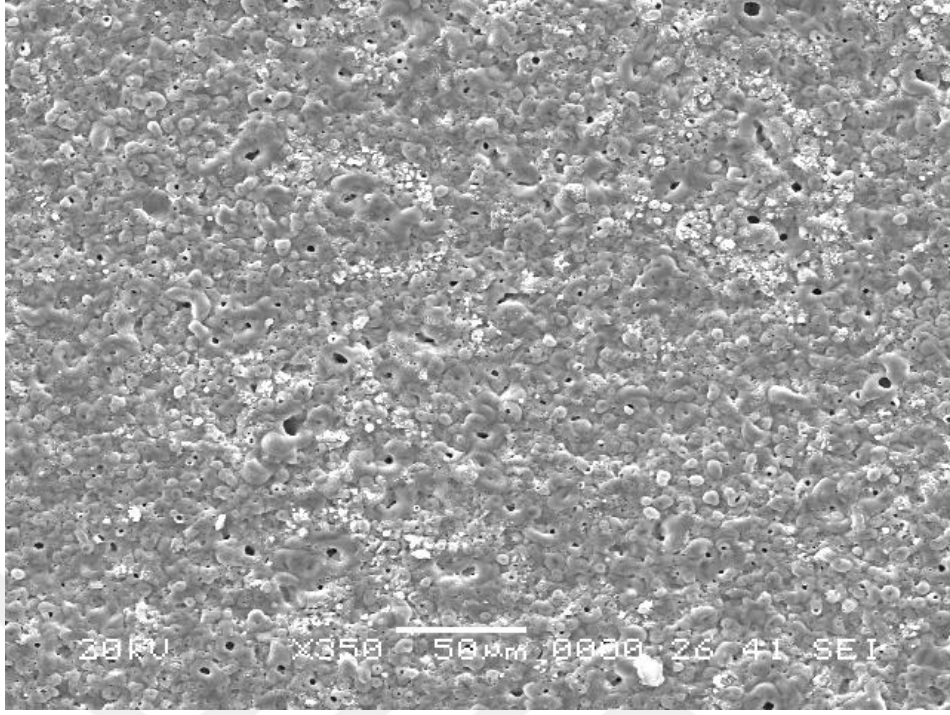
MAO işlemi ile oluşturulan kaplamaların yüzey morfolojilerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmektedir. MAO işlemi sonrası elde edilen tüm kaplamaların tipik görüntüsü pürüzlü, çukurlarla birlikte yüzeye dağılmış çeşitli büyüklükteki küresel mikro gözenekler içeren bir morfolojidir. Yüzeydeki mikroporların koyu renkli bölgelerde daha az sayıda ve büyük çapta yer alırken, açık renkli bölgelerde ise daha çok miktarda ve daha küçük çapa sahip oldukları görülmektedir.



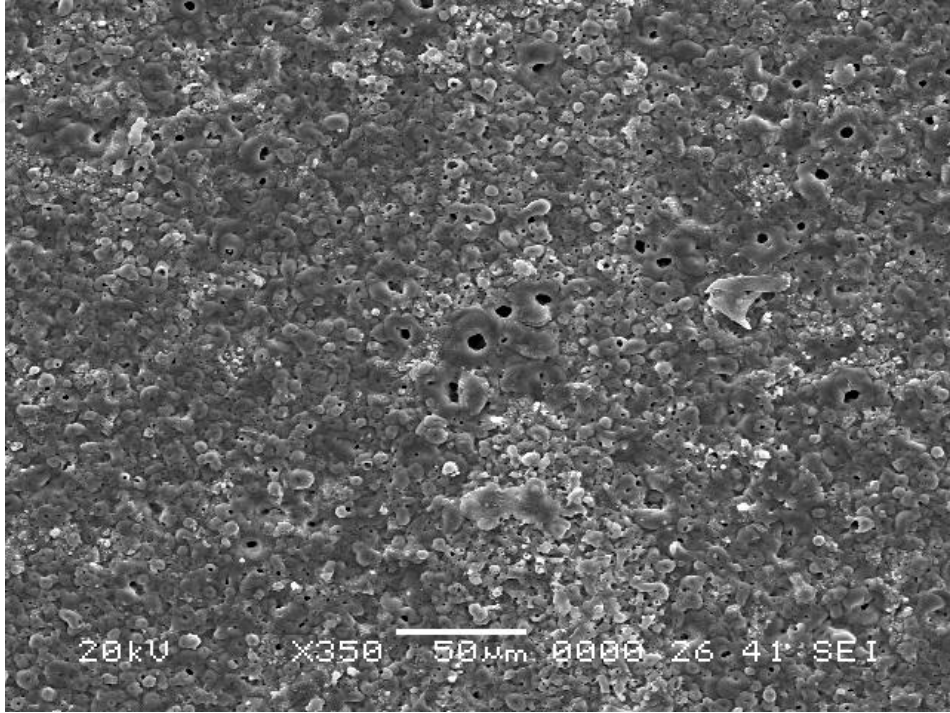
(a)



(b)



(c)

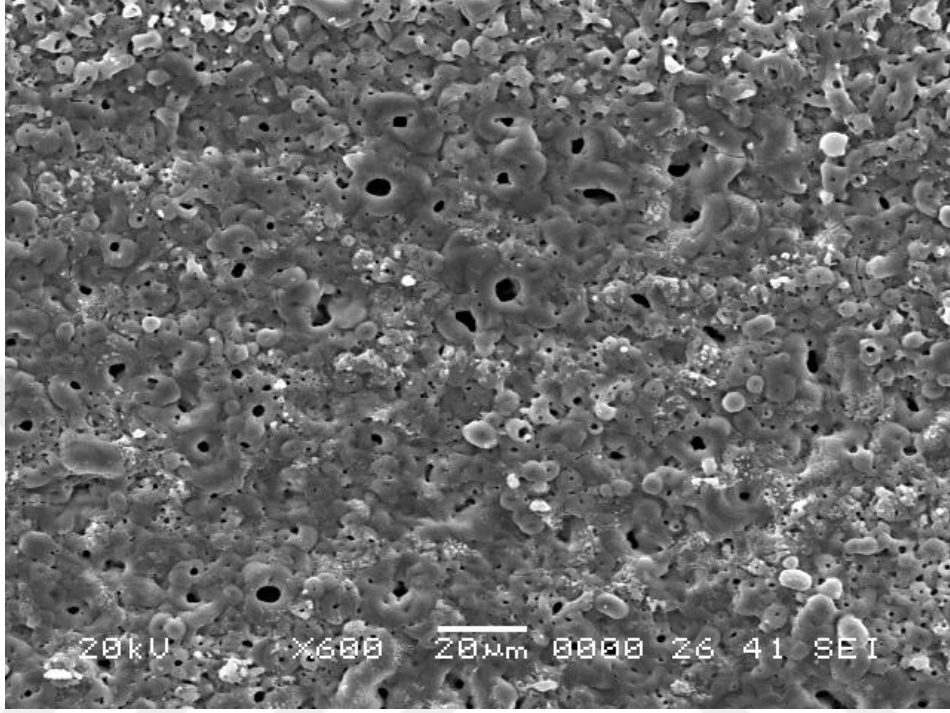


(d)

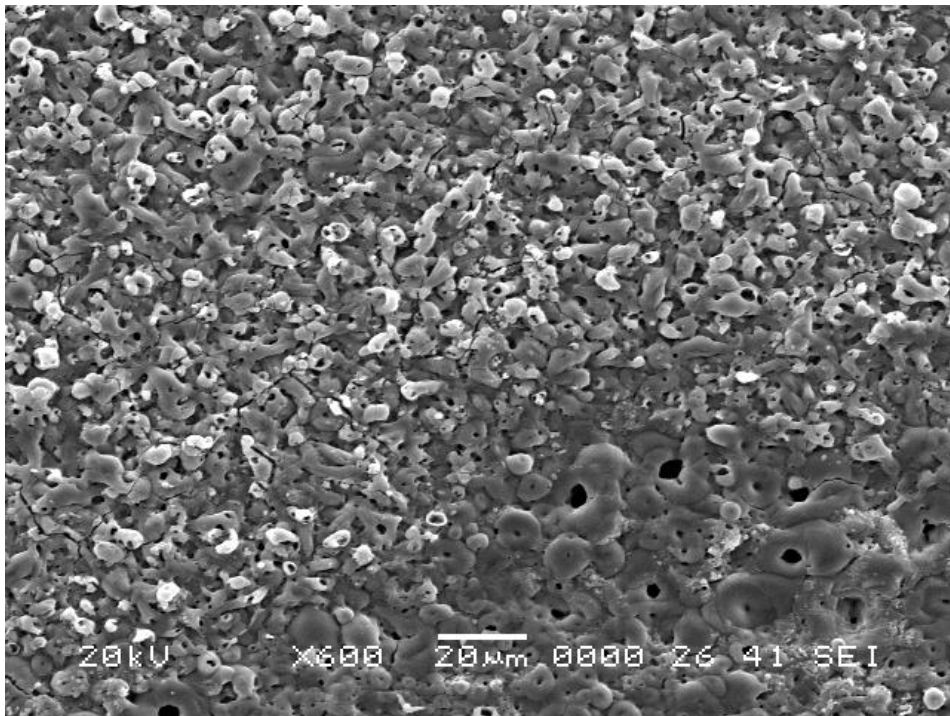
**Şekil 4.2:** (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x350).



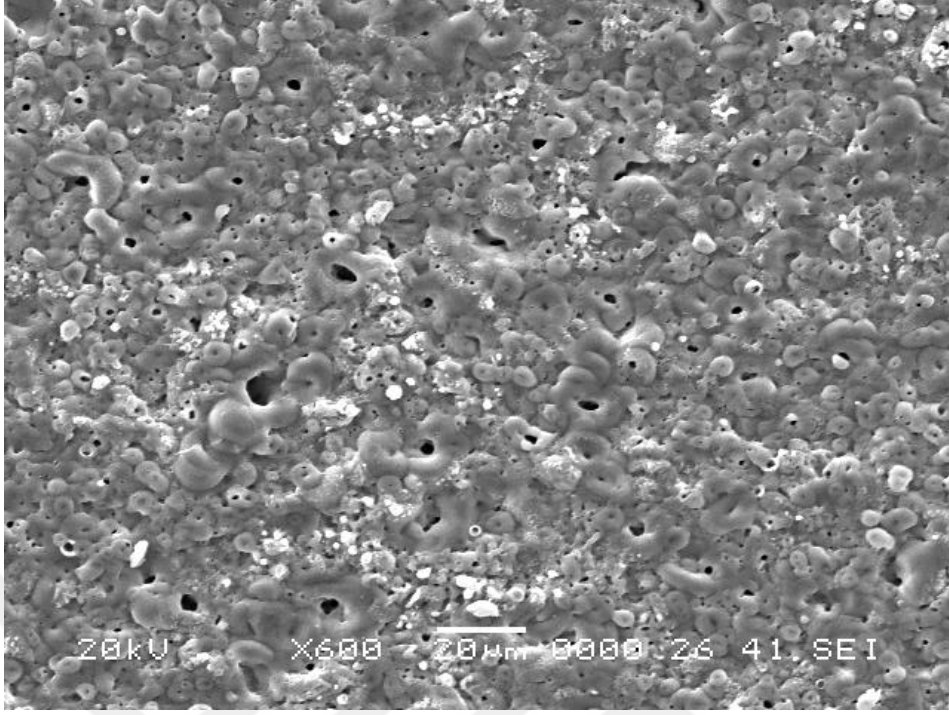
Gözle bakıldığında görülen kaplamalardaki açık-koyu renk geçişleri SEM görüntülerinde de fark edilmektedir. Bu açık-koyu renk bölgelerden alınan noktasal EDS analiz sonuçlarında elementel kompozisyonun farklılık göstermediği görülmüştür.



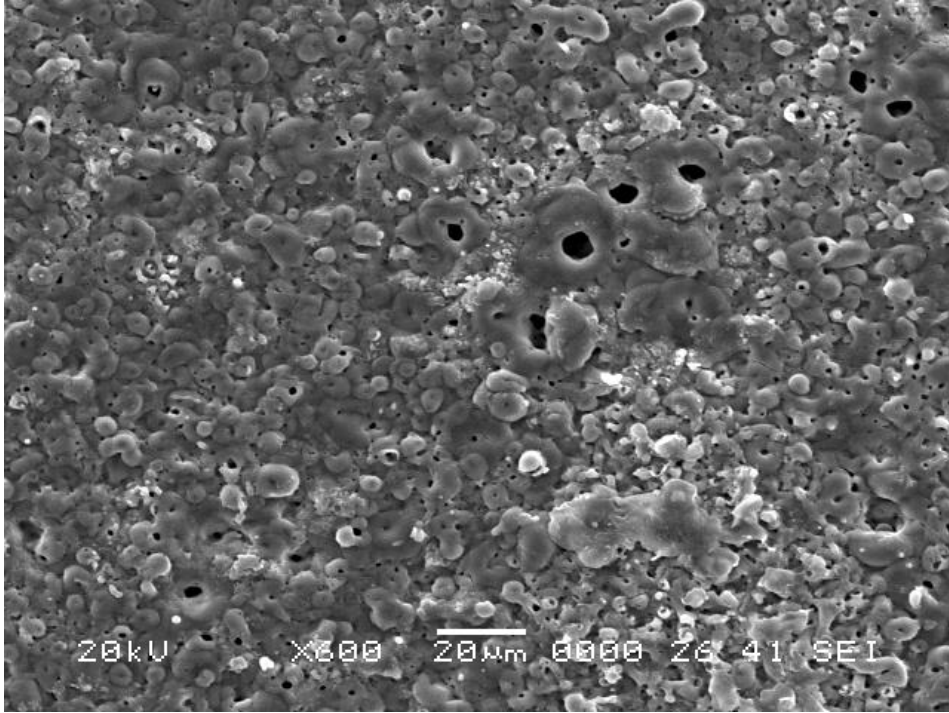
(a)



(b)



(c)

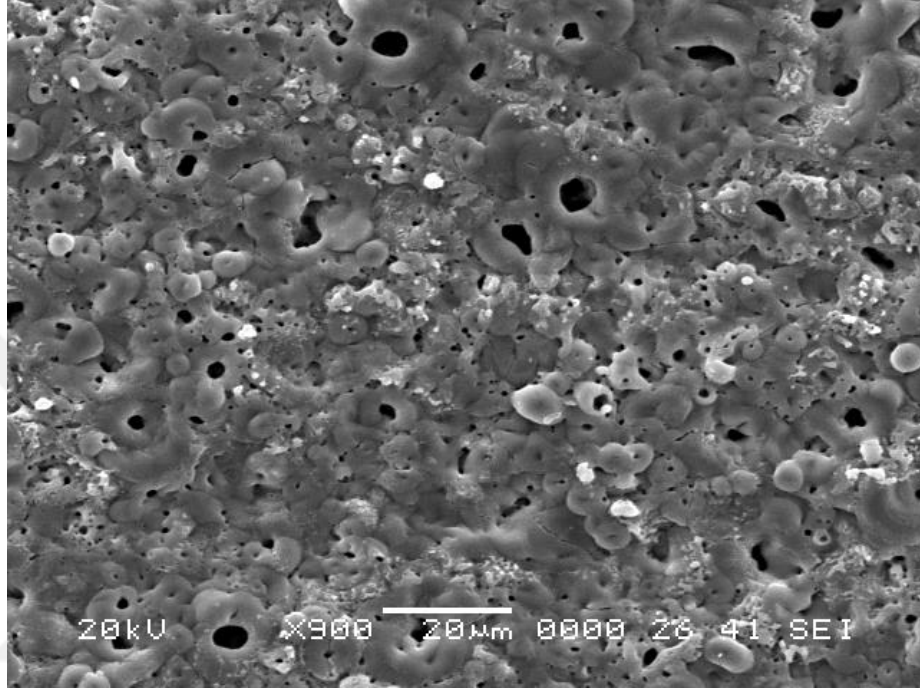


(d)

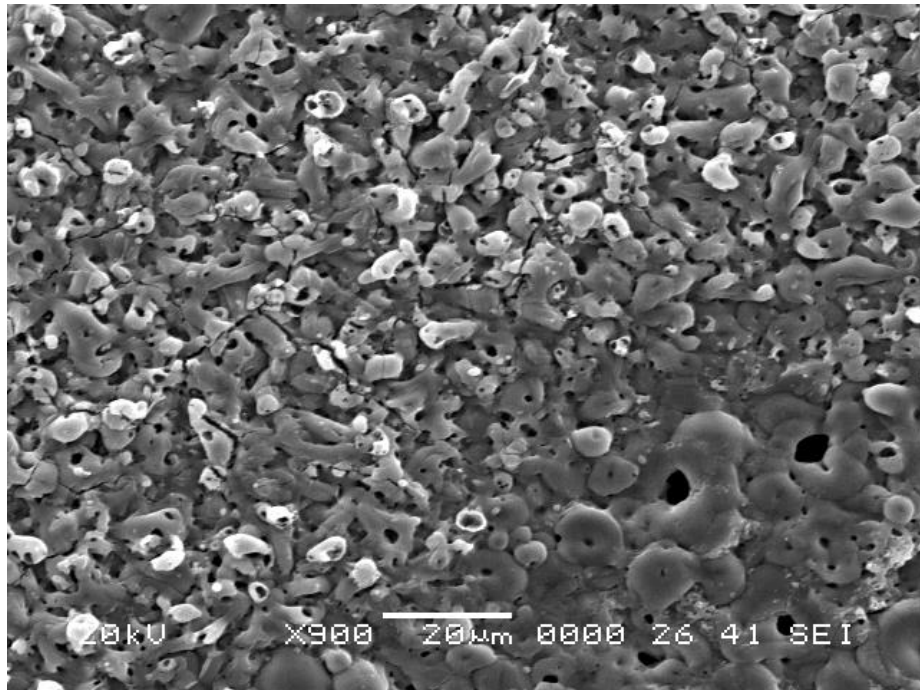
**Şekil 4.3:** (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x600).



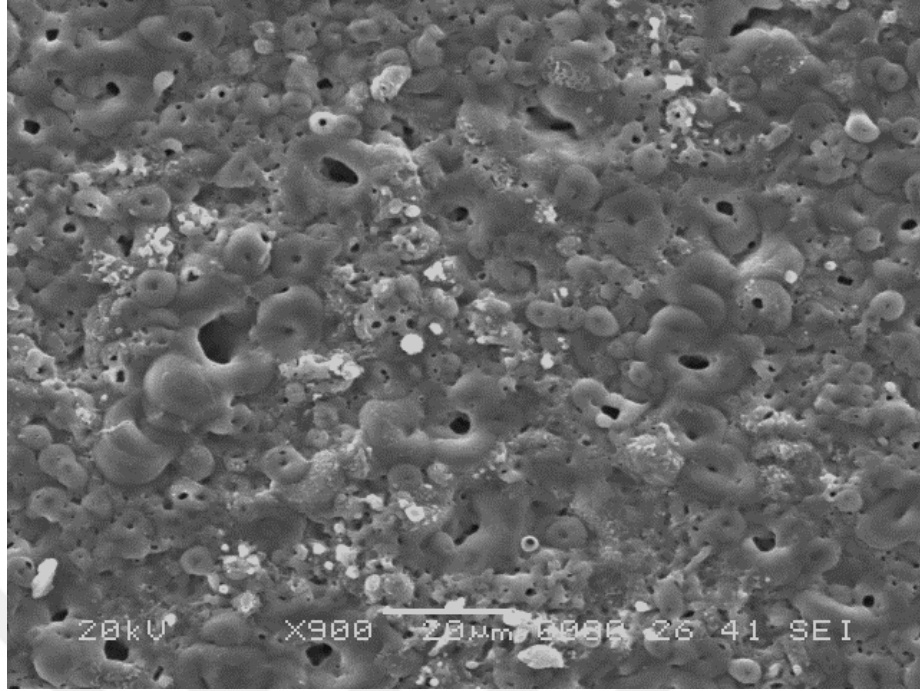
Şekil 4.4'e bakıldığında, koyu renk bölgeler daha kompakt ve pankek benzeri yapı sergilerken, açık renkli bölgelerse daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ile volkan benzeri mikroyapı sergilemektedir. Beyaz bölgelerdeki yüksek pürüzlülük ve gözeneklilik, işlem sırasında oluşan yüzey sıcaklığının ve mikro deşarjların kuvvetinin çok yüksek olduğunu göstermektedir [50].



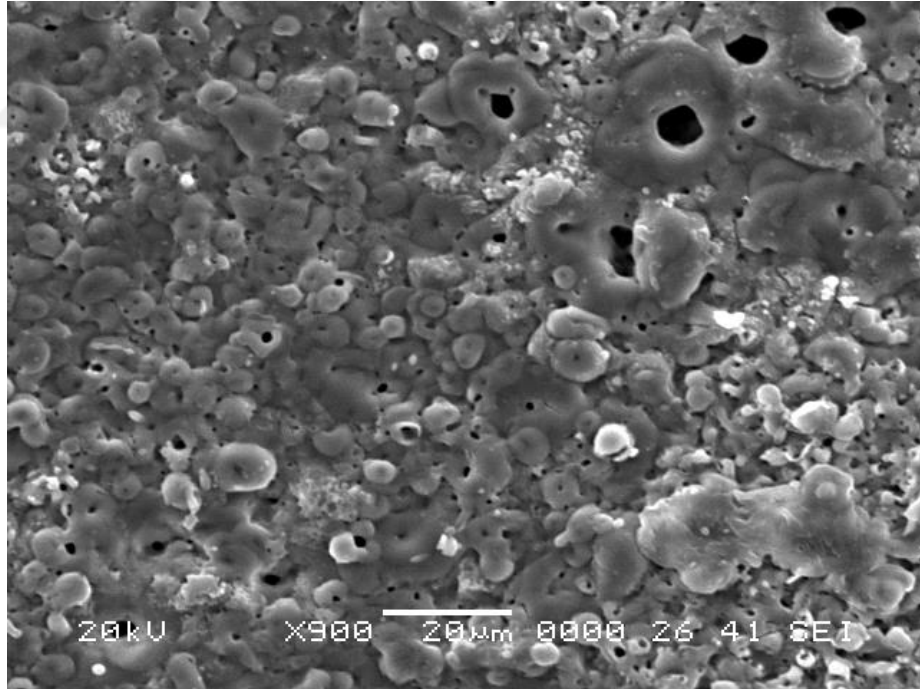
(a)



(b)



(c)

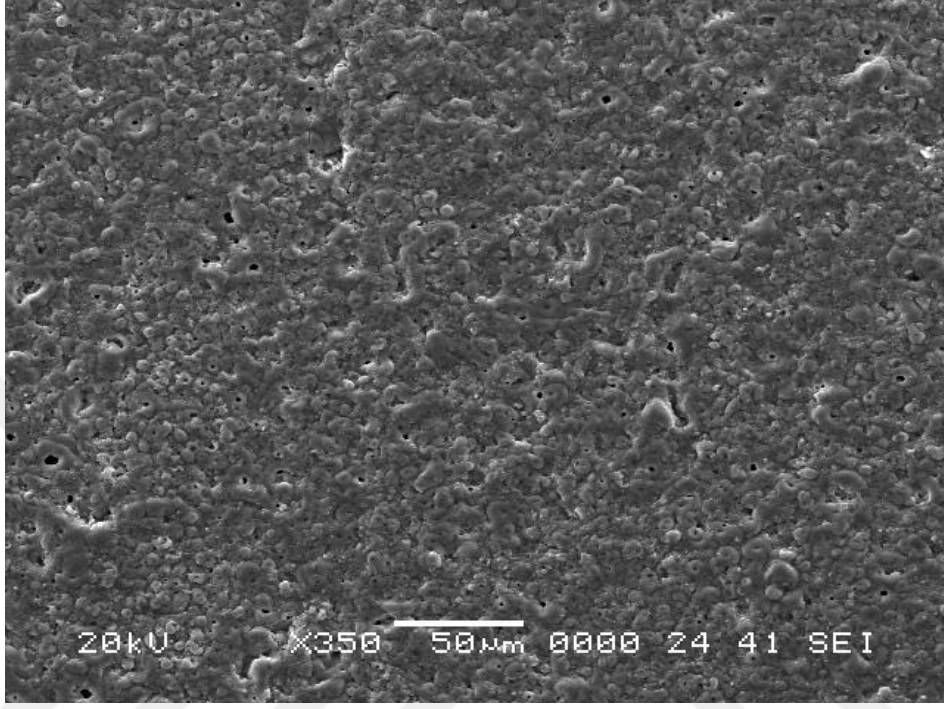


(d)

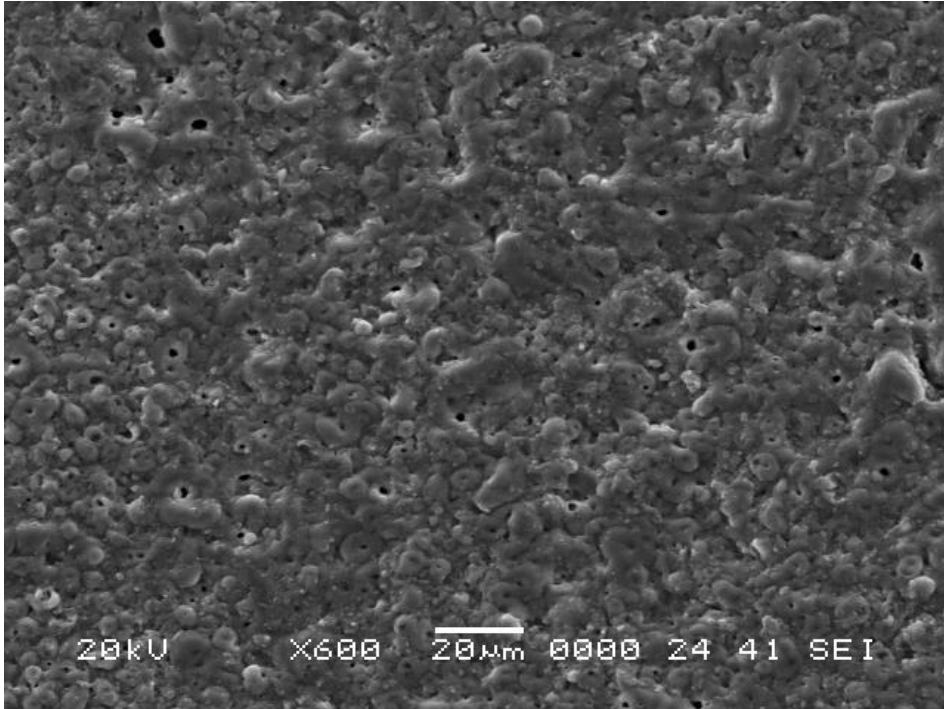
**Şekil 4.4:** (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0 kaplamaların elektron mikroskop görüntüleri (x900).

3105-H0 malzeme üzerine yapılan kaplama 2500 gridlik aşındırıcı kağıt ile zımparalandıktan sonra yüzeyde kalan kaplamamın SEM cihazında çekilen görüntüleri Şekil 4.5’de verilmiştir.

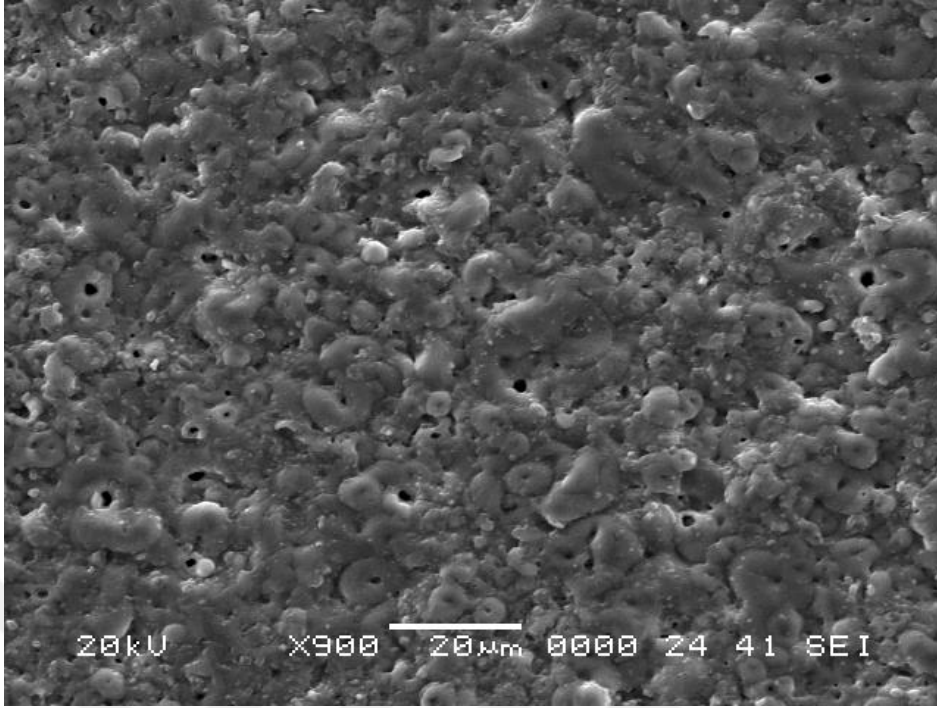
SEM fotoğraflarından da görüleceği üzere, kaplamada bölgesel olarak var olan açık renkli bölgeler zımparalama yoluyla büyük ölçüde yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Buradan açık renkli bölgenin genellikle yüksek pürüzlülüğe sahip üst tabakada yoğun olduğu söylenebilir.



(a)



(b)



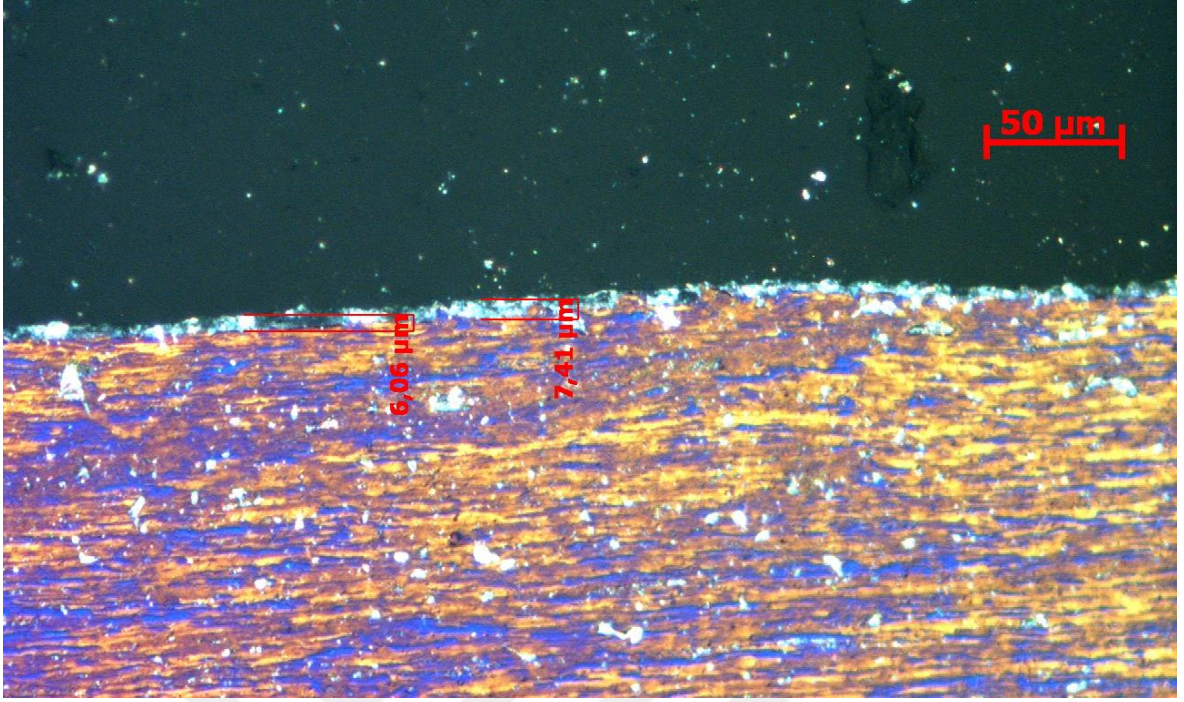
(c)

**Şekil 4.5:** Zımpara uygulanmış 3105-H0 kaplamanın SEM görüntüleri (a) x350 (b) x600 (c) x900.

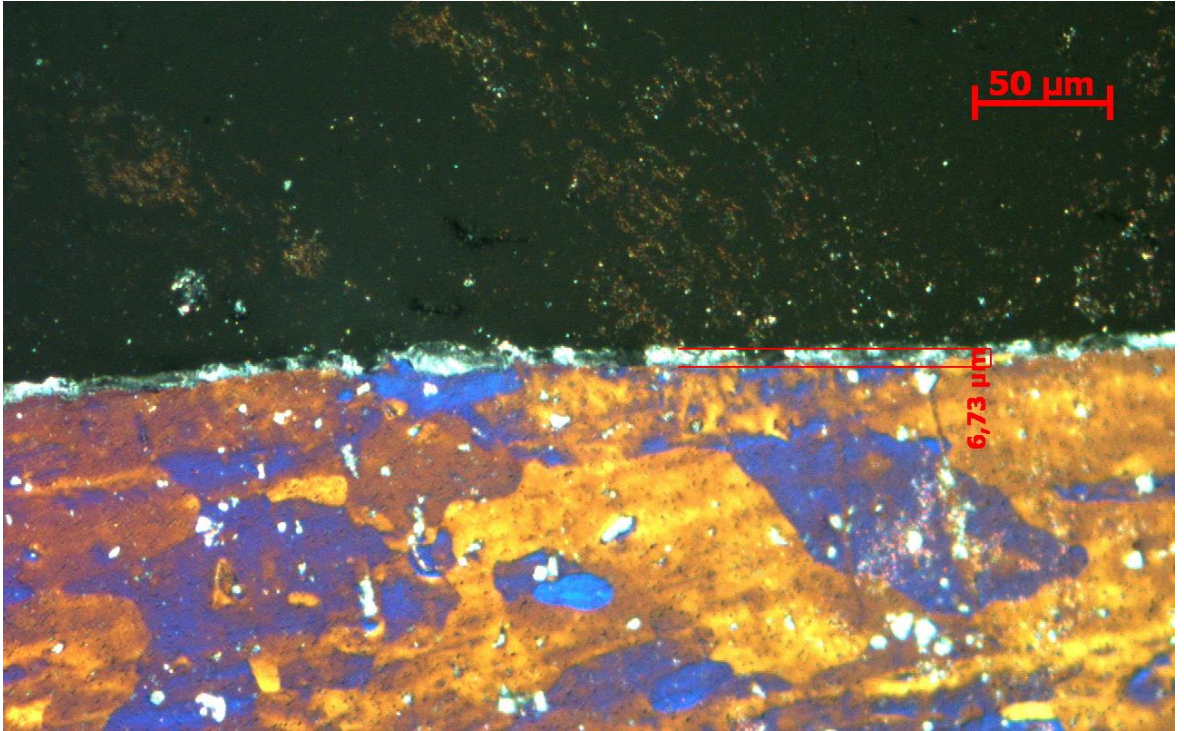
#### 4.2. KESİT İNCELEMELERİ

Şekil 4.6’da kaplamaların kesitleri üzerinden optik mikroskop görüntüleri verilen 1050 alaşım malzemeler tavlama etkisinin görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.6 (b)’de verilen tavlama işlemine tabi tutulmuş numune kısa ve küresel taneciklere sahip bir morfoloji sergilerken, Şekil 4.6 (a)’daki tavlama işlemine tabi tutulmamış numunenin ise soğuk deformasyon sonucu meydana gelen hadde yönündeki ince ve uzun tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. Buradan tavlama işlemi ile segregasyonun ortadan kalkarak daha homojen bir tane yapısı sağlandığı görülmektedir. Aşağıdaki fotoğraflarda her iki malzemedeki de yaklaşık 7  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığı ölçülmüştür.





(a)

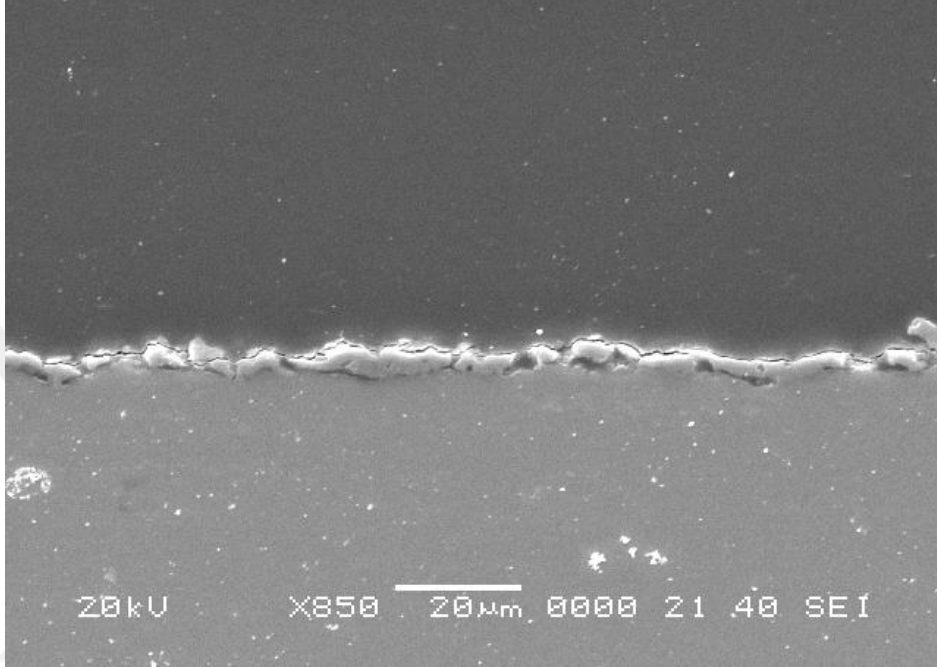


(b)

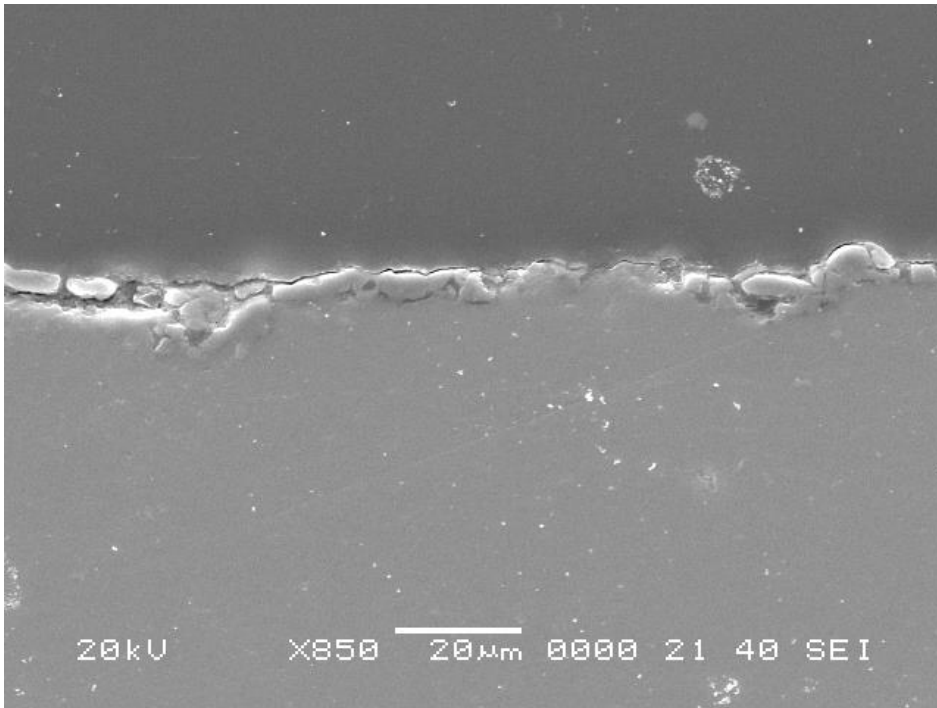
**Şekil 4.6:** (a) 1050-H19, (b) 1050-H0 numunelerin optik mikroskopta dağlanmış görüntüleri (x20).

Şekil 4.7’de, kaplanan numunelerin kesitlerinin SEM görüntüleri yer almaktadır. Kaplama kesitleri incelendiğinde, MAO prosesine tabi tutulan numunelerin tümünde yüzeyde homojen

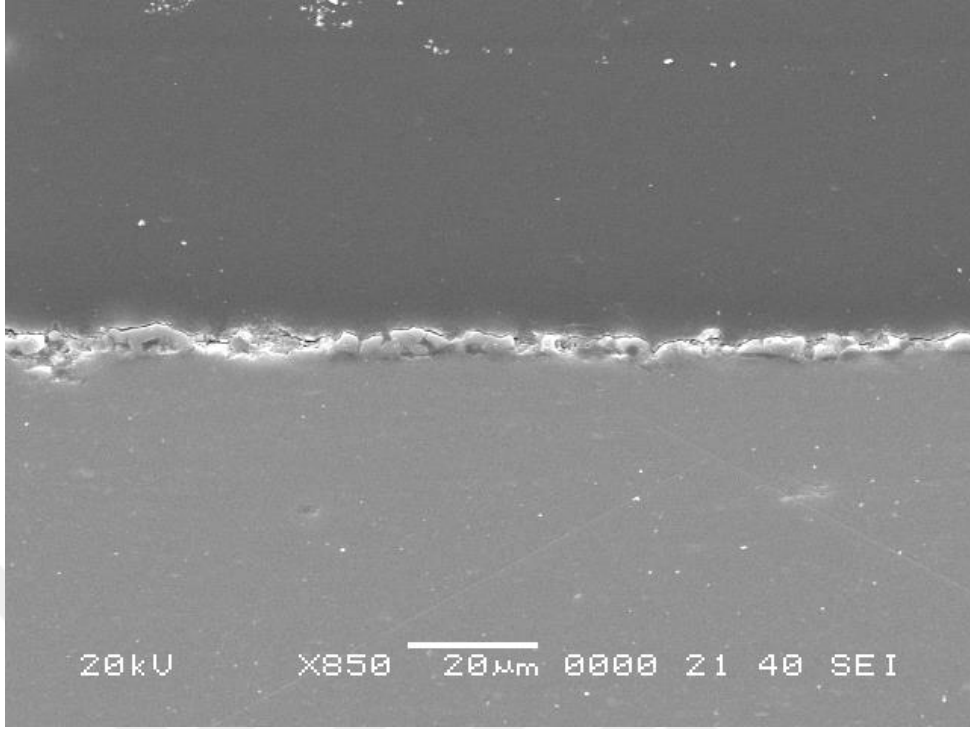
bir kaplamanın oluşmadığı, yer yer kalın, yer yer oldukça ince kaplama kalınlığına rastlanmaktadır. Ayrıca, elde edilen MAO numunelerinin kaplama-substrat arayüzlerinde süreksizlikler olduğu ve dalgalı bir yapı sergilediği görülmektedir. Buradan kaplama ve altlık malzeme arasındaki yapışmanın yeteri kadar iyi olmadığı söylenebilir.



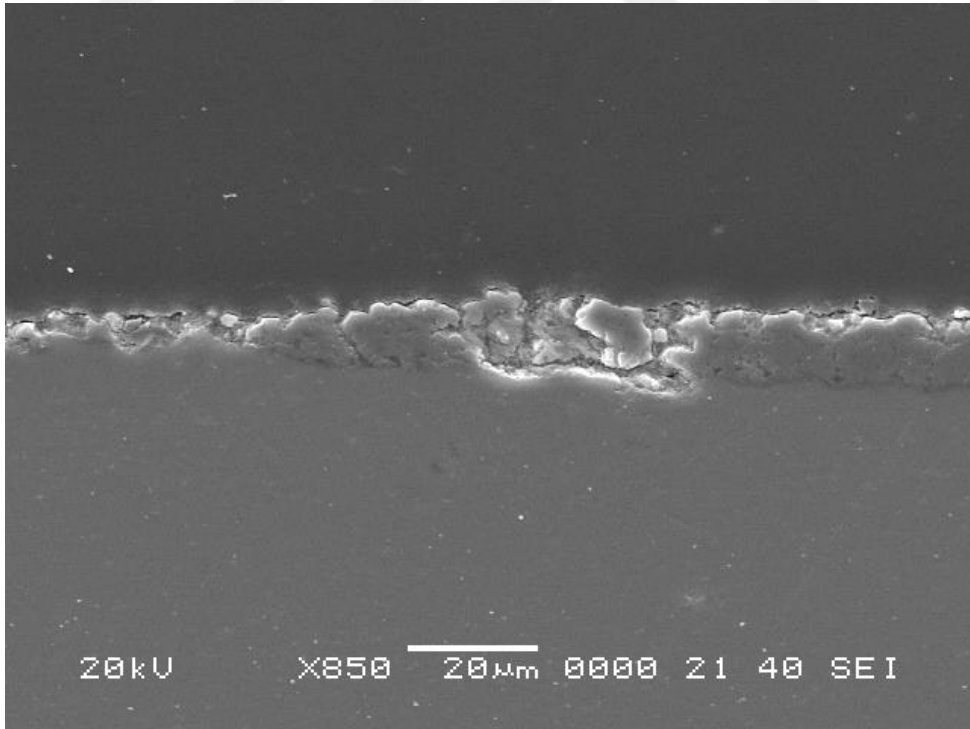
(a)



(b)



(c)



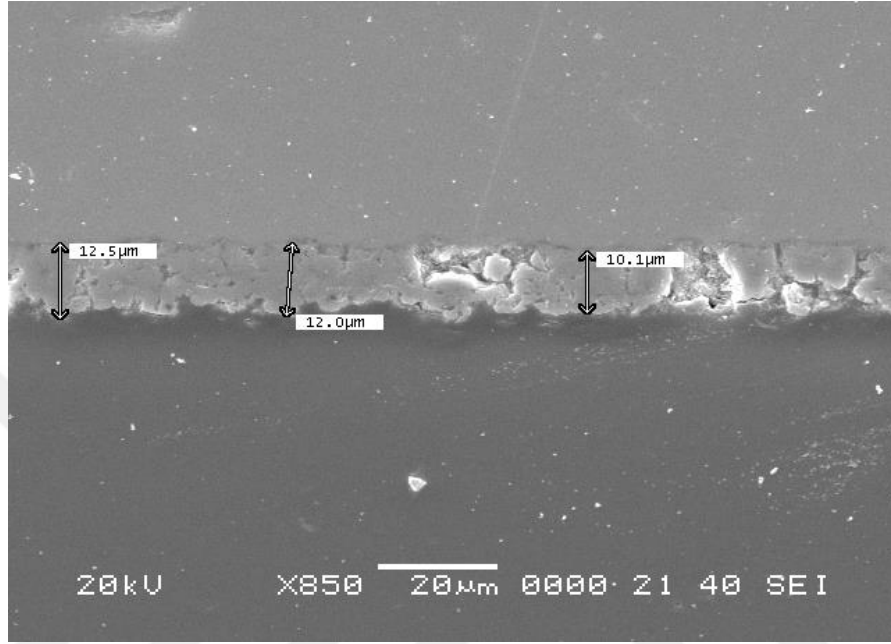
(d)

**Şekil 4.7:** Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x850); (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.

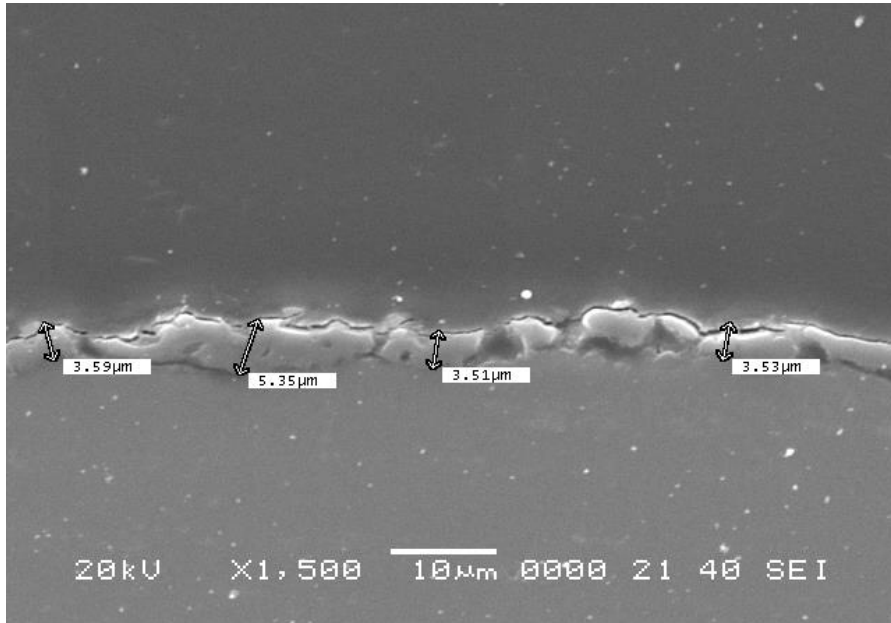


### 4.3. KAPLAMA KALINLIĞI ÖLÇÜMÜ

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen SEM fotoğraflarında numuneler üzerinde oluşan kaplamaların farklı bölgelerindeki kaplama kalınlıkları ölçülmüştür.



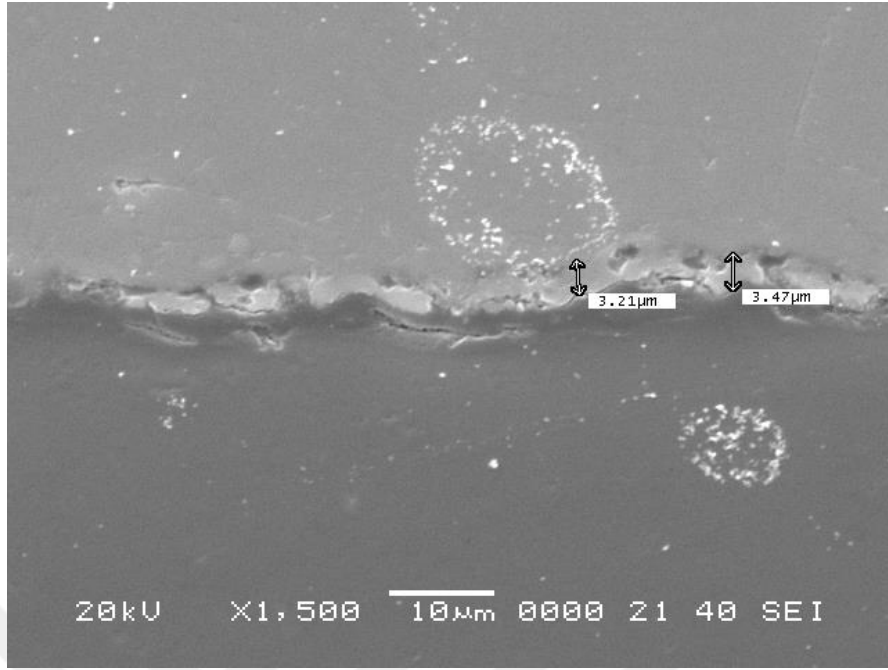
(a)



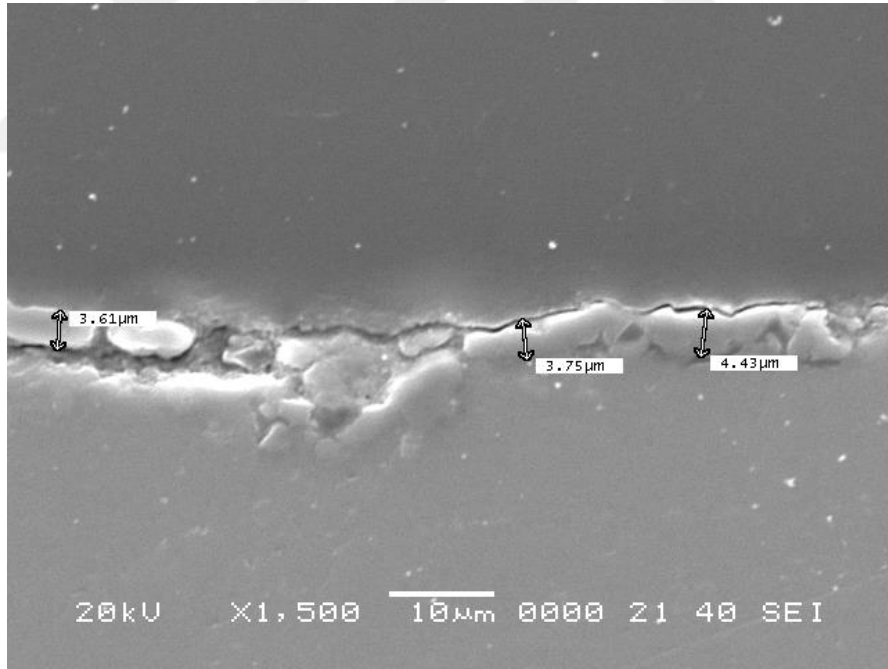
(b)

Şekil 4.8: Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 1050-H19.



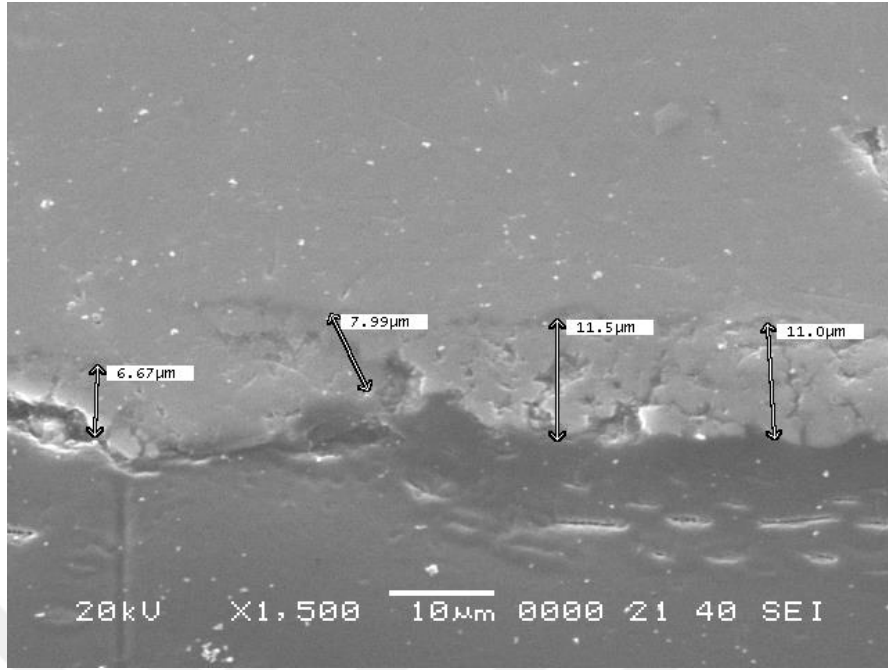


(a)

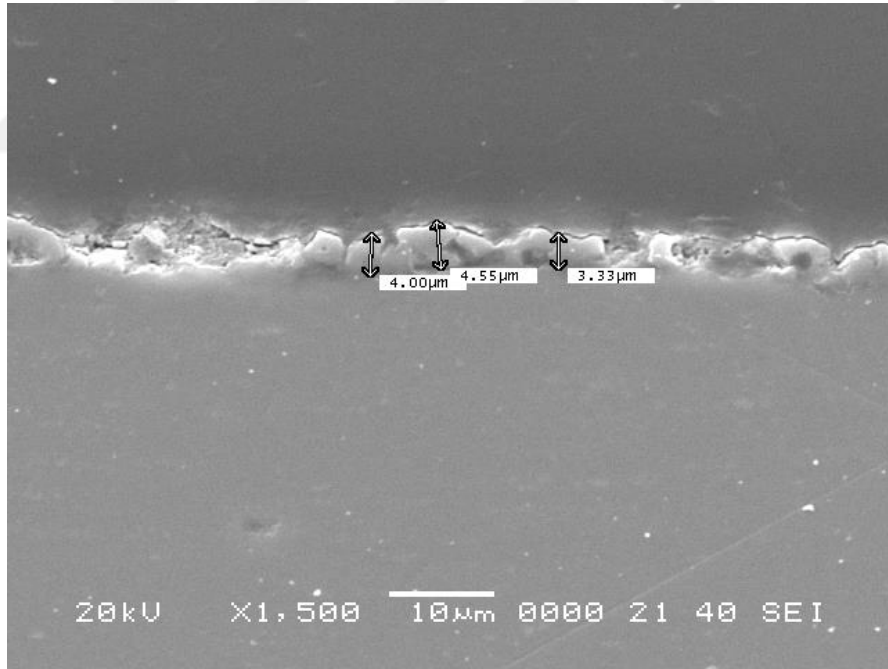


(b)

**Şekil 4.9:** Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 1050-H0.

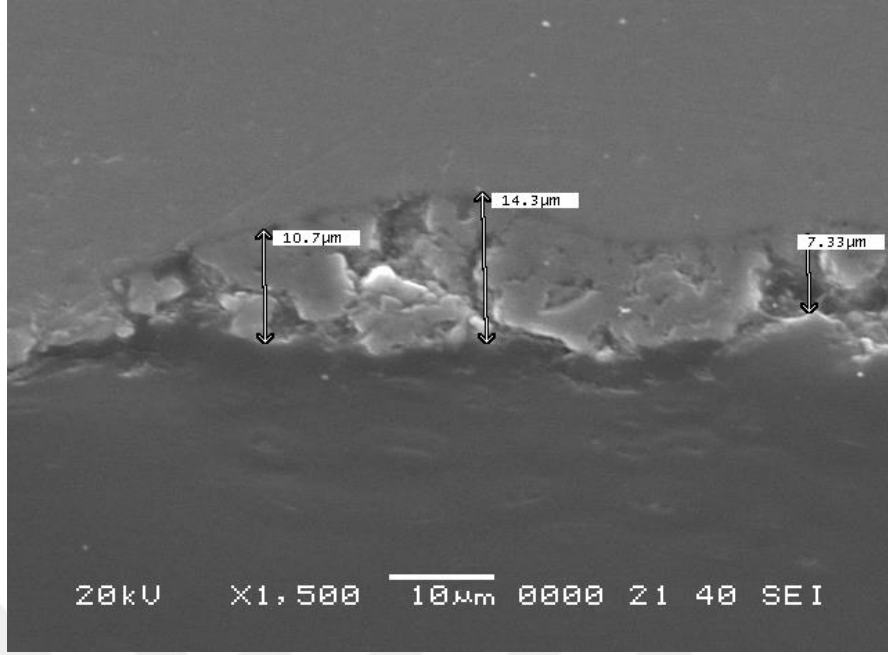


(a)

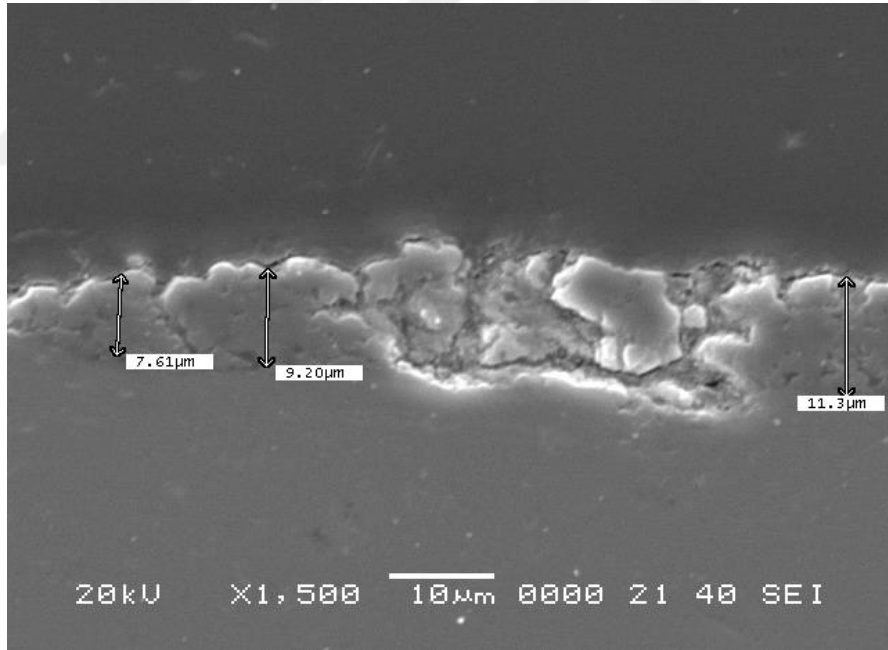


(b)

Şekil 4.10: Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 3105-H19.



(a)



(b)

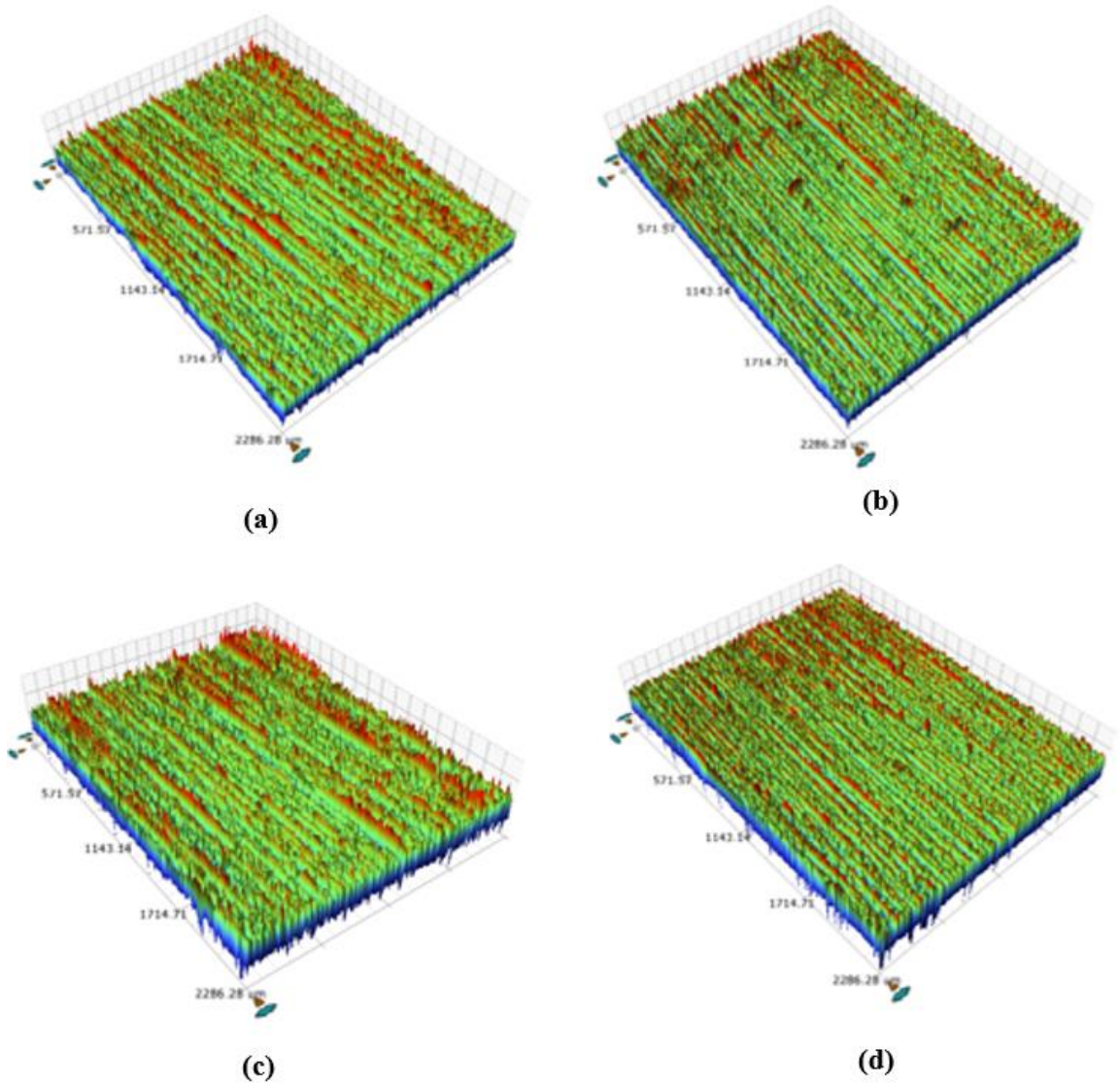
**Şekil 4.11:** Kaplamaların SEM kesit görüntüleri (x1500); (a)(b) 3105-H0.

Yapılan ölçümler sonucunda kaplamaların tüm yüzeyde homojen olmadığı ve yer yer yaklaşık 3 $\mu$ m ve 15 $\mu$ m aralığında değiştiği görülmektedir. Kaplama-altlık arayüzündeki süreksizlikler ve porozlu yapı burada da görülmektedir.

#### 4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ

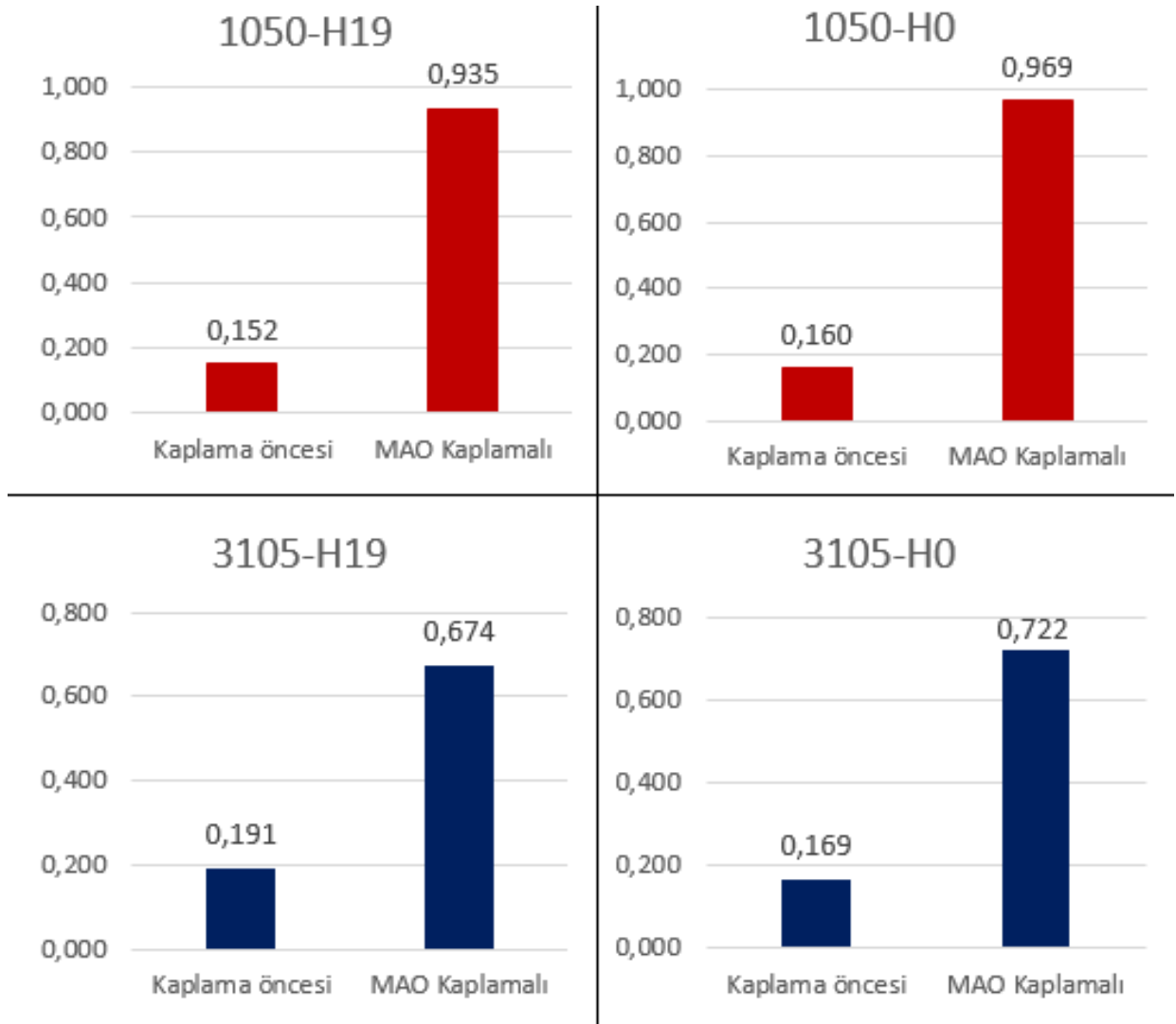
MAO prosesi sırasında yüzeyde oluşan kaplamalar genellikle pürüzlü bir yapıya sahiptir. Buradaki pürüzlülüğün oluşum sebebi, proses sırasında oluşan deşarj kanallarının oluşumu ve ardından bu kanallar etrafında yüksek ısı değişimi ile amorf bir katılaşmanın gerçekleşmesidir. Proses süresince bu kinetik olay kendini sürekli yenileyerek devam etmektedir. Böylece, altlık malzemeden kopan iyonlar açılan deşarj kanalları yolu ile elektrolit ile reaksiyona girerek pürüzlü yeni katmanları oluşturmaktadırlar.

İşlem görmemiş Al alaşım altlık numuneler, haddelendikleri merdanenin yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve optik profilometrede çekilen yüzey pürüzlülük görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



**Şekil 4.12:** Kullanılan altlık malzemelerin MAO öncesi yüzey pürüzlülük görüntüleri (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.

MAO işlemi sonrası elde edilen kaplamaların yüzey pürüzlülük (Ra) ölçümleri ise numunelerin farklı bölgelerinde yapılan 8 tarama sonucu elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kaplama öncesi ve sonrası pürüzlülük değerlerindeki değişim ve ölçüm sonuçlarına ait grafik Şekil 4.13’de verilmiştir. Mikro ark oksidasyon işlemi ile oluşturulan oksit kaplama yüzeylerinin pürüzlülüklerinin, kaplama olmayan altlık malzeme yüzeylerine göre büyük miktarda arttığı görülmektedir.

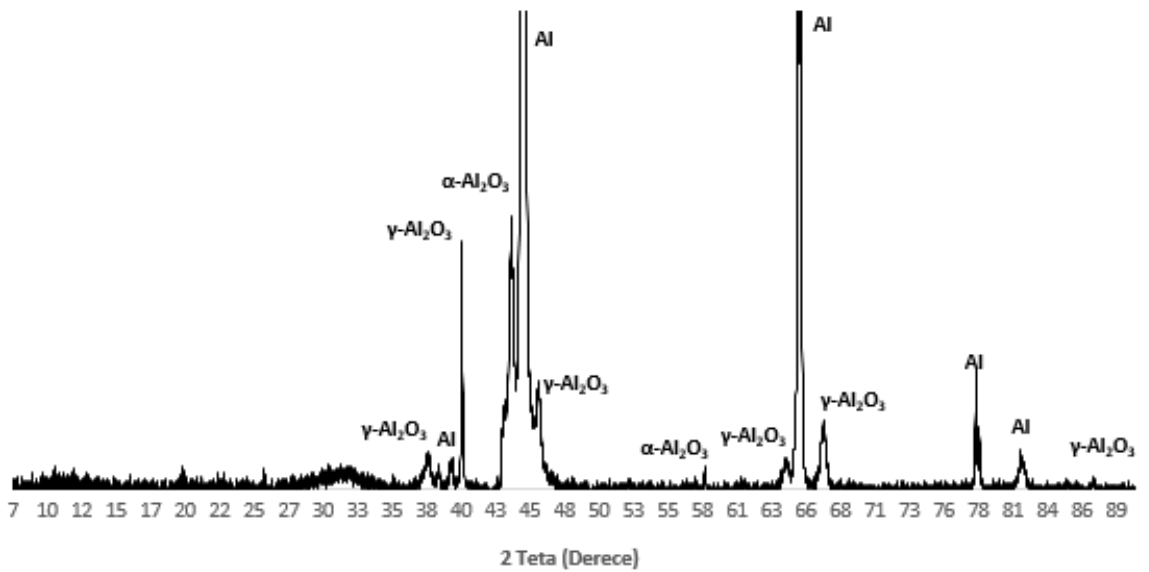
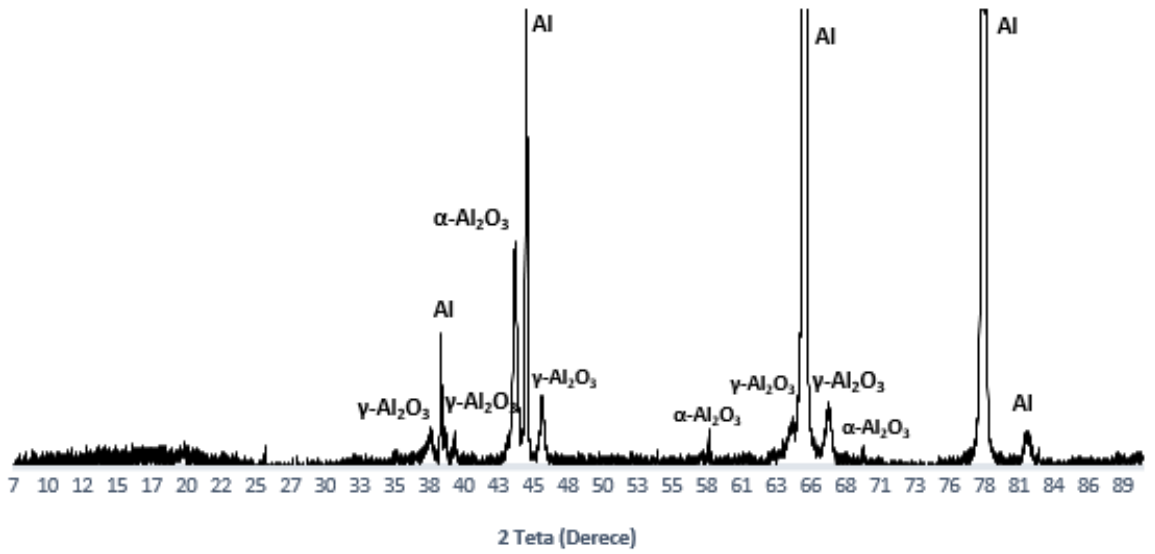


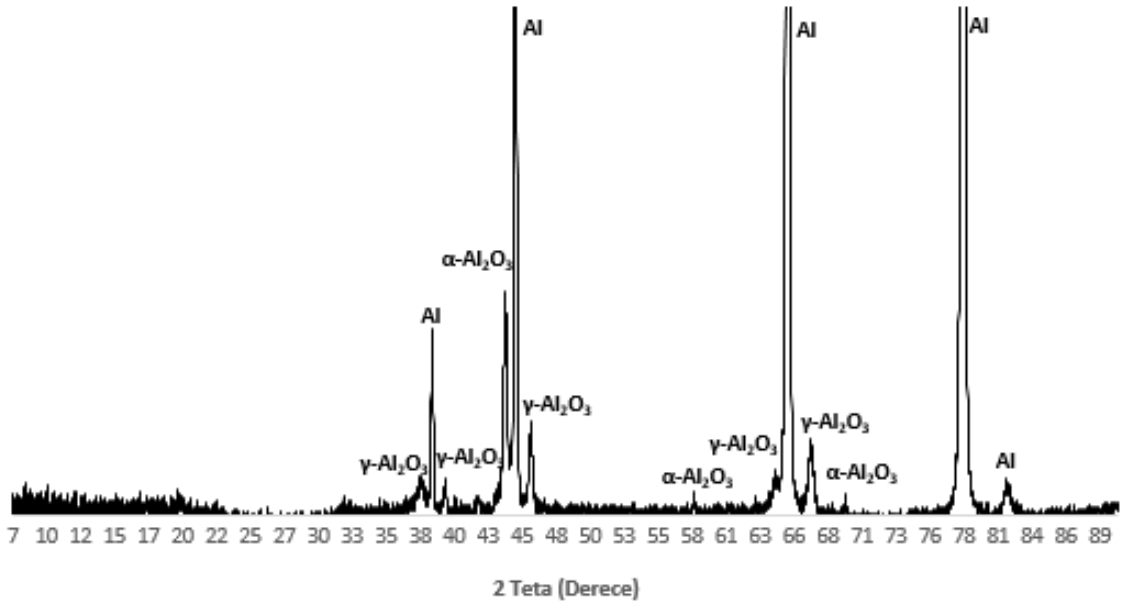
**Şekil 4.13:** MAO öncesi ve sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.

Elde edilen sonuçlara göre 1050 alaşım altlık malzemeler üzerine yapılan kaplamaların pürüzlülük değerlerinin 3105 alaşımlara göre daha fazla olduğu ve daha fazla arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tav işleminin etkisine bakılacak olursa, tavlanmış malzemeler üzerinde oluşturulan kaplamalar daha pürüzlü bir yapı sergilemiştir.

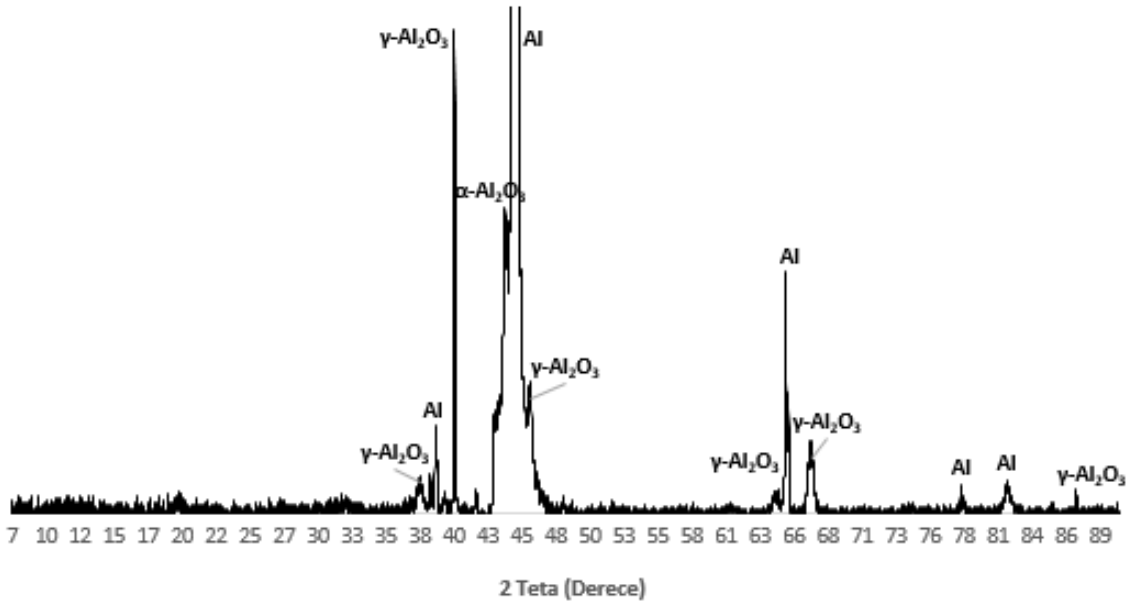
#### 4.5. XRD ANALİZLERİ

Mikro ark oksidasyon uygulanan numunelerin X-ışınları difraksiyon paterni Şekil 4.14'de verilmiştir. XRD pikleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerinin tümünde oluşan oksit film tabakasına hakim fazın  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  olduğu ve  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazının kaplamalarda nispeten daha az miktarda yer aldığı görülmüştür. Kullanılan elektrolitte var olan Na ve P elementlerinin proses sonucu herhangi bir faz oluşturmadığı ve oksit yapısına katılmadığı belirlenmiştir. Ayrıca grafiklerde altlık malzemeden gelen Al pikleri de görülmektedir.





(c)



(d)

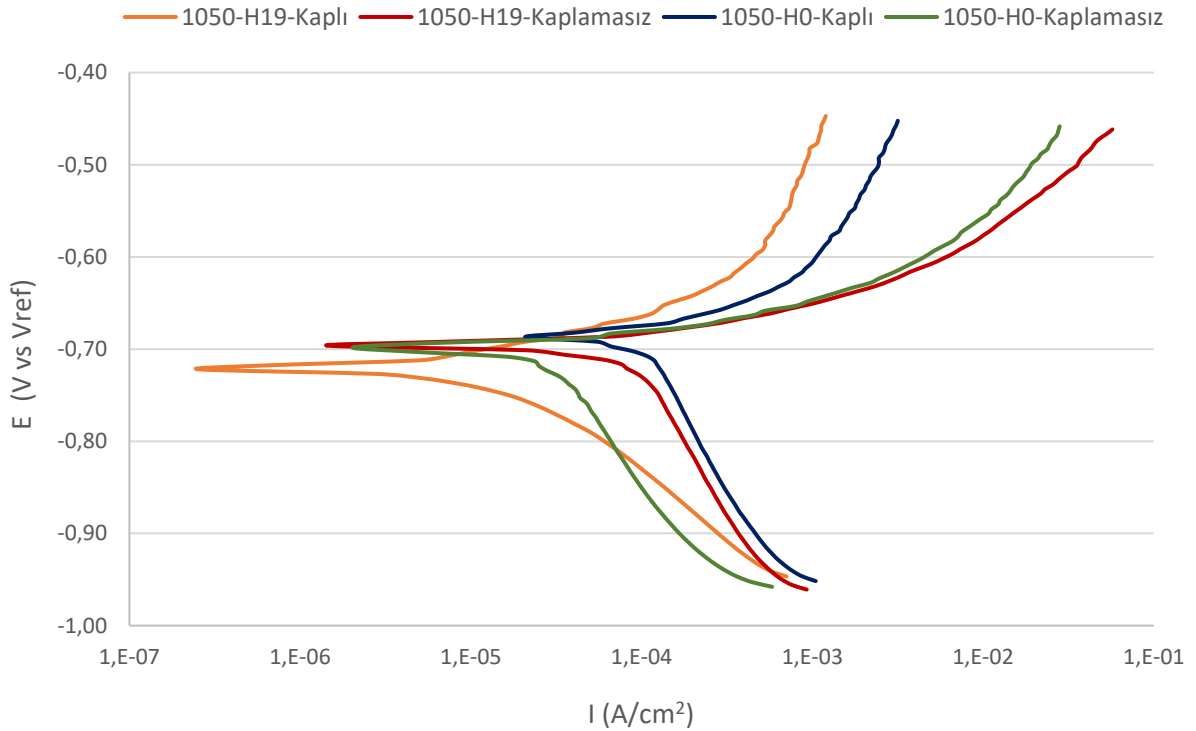
**Şekil 4.14:** Kaplanan numunelerin XRD analizleri; (a) 1050-H19, (b) 1050-H0, (c) 3105-H19, (d) 3105-H0.

Elde edilen sonuçlara göre, farklı kompozisyondaki alüminyum üzerine yapılan mikro ark oksidasyon işleminde, alaşım elementi miktarlarının kaplama yapısına çok belirgin bir etkisi olmamakla birlikte, 1050 alaşım altlık malzemeler üzerindeki kaplamalarda elde edilen  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarı nispeten daha fazladır. Ayrıca, tavlı malzemelerdeki kaplamalarda oksit tabakada

oluşan toplam  $Al_2O_3$  fazının şiddeti, tav görmeyen alaşımlara göre daha fazladır. Bununla birlikte, tavllanmış malzemelerdeki kaplamalarda  $\gamma-Al_2O_3$  oluşumu daha fazla miktardadır.

#### 4.6. KOROZYON ÖLÇÜMÜ

Kaplama öncesi ve yüzeylerinde kaplama üretilen alaşımların korozyona dayanım sonuçları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilen Tafel diyagramları ile değerlendirilmiştir. Tafel diyagramlarında korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) pozitifte daha yakın olan ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{kor}$ ) daha düşük olan eğrilere sahip numunelerin daha yüksek korozyon direnci gösterdiği söylenebilir. Diyagramda sol üst bölgeye doğru kaydıkça, malzemenin korozyon direnci artmaktadır.



**Şekil 4.15:** Kaplama öncesi ve MAO sonrası kaplama oluşturulmuş 1050 alaşımların elektrokimyasal polarizasyon eğrileri.

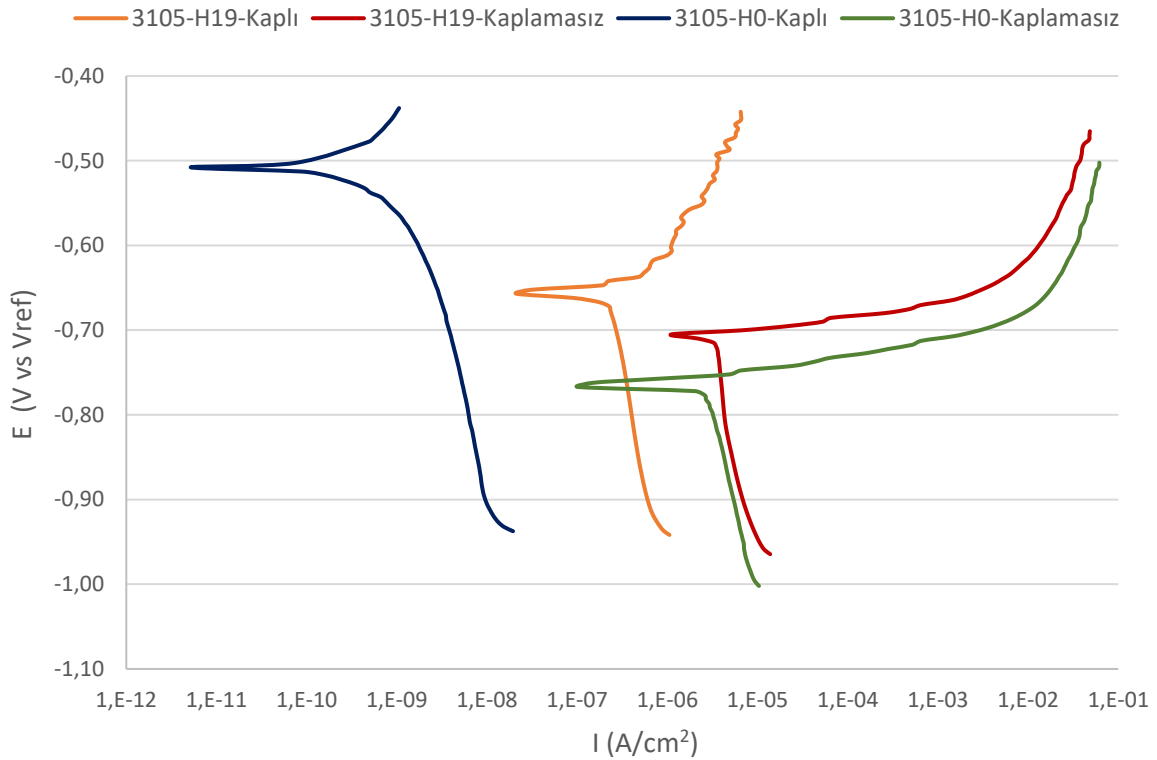
Şekil 4.15'deki diyagram ve Tablo 4.1 değerlendirildiğinde, kaplama sonrası tavlı 1050 alaışımının korozyon direnci daha yüksek beklenilmesine rağmen, kaplamasız numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Tav görmeyen 1050 alaşım malzeme üzerine yapılan kaplamanın ise, korozyonda bir miktar iyileşme sağladığı görülmektedir. Kaplama yapılmayan tavlı ve tavsız



malzemelerin aralarındaki korozyon karşılaştırmasına bakıldığında ise, sert malzemenin korozyona olan direncinin tavlınmış 1050 alaşıma göre daha iyi olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.1:** 1050 alaşımlarının Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon değerleri.

Numune Adı	$I_{kor}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{kor}$ (mV)
1050 - H19 - Kaplı	1,58.10-6	-723
1050 - H19 - Kaplamasız	9,52.10-6	-697
1050 - H0 - Kaplı	352.10-6	-685
1050 - H0 - Kaplamasız	28,30.10-6	-698



**Şekil 4.16:** Kaplama öncesi ve MAO sonrası kaplama oluşturulmuş 3105 alaşımların elektrokimyasal polarizasyon eğrileri.

Şekil 4.16'daki diyagram incelendiğinde, her iki kondisyondaki 3105 alaşım malzemenin kaplama sonrası korozyona karşı direncinin arttığı görülmektedir. Tablo 4.2'den MAO kaplama ile 3105-H19 alaşımının  $I_{kor}$  değerinin düştüğü ve  $E_{kor}$  değerinin de sifıra yaklaştığı, böylece korozyona karşı direncin arttığı görülmektedir.

**Tablo 4.2:** 3105 alaşımlarının Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon değerleri

Numune Adı	$I_{kor}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{kor}$ (mV)
3105 - H19 - Kaplı	$0,338.10^{-6}$	-655
3105 - H19 - Kaplamasız	$4,152.10^{-6}$	-707
3105 - H0 - Kaplı		
3105- H0 - Kaplamasız	$563.10^{-6}$	-765

Kaplama öncesi 1050 alaşımların korozyona dirençleri 3105 alaşıma göre nispeten daha yüksektir. Aynı zamanda, Tablo 4.2'ye bakıldığında, kaplama yapılmayan sert 3105 alaşım Al malzemenin korozyona olan direncinin tavlanmış alaşıma göre daha iyi olduğu görülmektedir. Tablo 4.1 ve 4.2'den de görüleceği üzere, kaplama sonrası 3105-H19 alaşımı, 1050-H19 alaşıma göre daha iyi korozyon değeri vermektedir.

## TARTIŞMA VE SONUÇ

- Numunelerin makro görünümleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerinde açık-koyu renk dalgalanmalar olduğu görülmektedir. SEM mikrograflarında da fark edilen bu açık-koyu renk bölgelerden alınan noktasal EDS analiz sonuçlarında elementel kompozisyonun farklılık göstermediği görülmüştür. Oluşan renk farklılığının, yüzeyde oluşan oksit filminin farklı yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir başka neden ise, MAO prosesi sırasında yüzeyde oluşan kıvılcımların altlık malzemedeki bazı bölgelerde daha yoğun oluşurken, bazı bölgelerde nispeten daha az meydana gelmesi olabilir.
- MAO işlemi sonrası elde edilen tüm kaplamaların tipik görüntüsü pürüzlü, çukurlarla birlikte yüzeye dağılmış çeşitli büyüklükteki küresel mikro gözenekler içeren bir morfolojidir. Kaplama yüzeylerinde görülen kraterler mikrodeşarjların gücünü ve MAO işlemi sırasında ergimiş oksitlerin patlamalarını ifade etmektedir [49].
- Yüzeydeki mikroporların koyu renkli bölgelerde daha az sayıda ve büyük çapta yer alırken, açık renkli bölgelerde ise daha çok miktarda ve daha küçük çapa sahip oldukları görülmektedir. Mikro gözeneklerin oluşum sebebinin, oksidasyon işleminin kıvılcım aşamasında ergiyik oksit ve gazların dışarı çekilmesine neden olan yüksek voltaj altındakideşarj kanallarının varlığı olduğu ve mikro çatlaklarınsa nispeten soğuk elektrolit ile ergimiş oksitin hızlı teması ile katılaşması sonucu oluştuğu düşünülmektedir [47, 56].
- Yapıda oluşan koyu renk bölgeler daha kompakt pankek benzeri yapı sergilerken, açık renkli bölgelerse daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ile volkan benzeri mikroyapı sergilemektedir. Beyaz bölgelerdeki yüksek pürüzlülük ve gözeneklilik, işlem sırasında oluşan yüzey sıcaklığının ve mikrodeşarjların kuvvetinin çok yüksek olduğunu göstermektedir [50]. Kaplamaların yüzey pürüzlülüklerinin kaplama kalınlığı arttıkça arttığı düşünüldüğünde, volkanik yapı gösteren beyaz bölgelerin kaplamadaki yüksek kalınlıktaki noktaları ifade ettiği söylenebilir [51].
- Kaplamaların yüzeylerinin zımparalandıktan sonraki SEM görüntüleri, kaplamada bölgesel olarak var olan açık renkli bölgelerin büyük ölçüde yüzeyden uzaklaştırıldığını göstermiştir. Bu durum, açık renk bölgelerin genel olarak kaplama yüzeyindeki poroz ve ölü olarak adlandırılan tabakada yer aldığını göstermektedir.

- Kaplamaların kesit incelemelerinde, tavlama işlemine tabi tutulmuş numune kısa ve küresel taneciklere sahip bir morfoloji sergilerken, tavlama işlemine tabi tutulmamış numunenin ise soğuk deformasyon sonucu meydana gelen hadde yönündeki ince ve uzun tane yapısına sahip olduğu görülmüştür. Buradan tavlama işlemi ile segregasyonun ortadan kalkarak daha homojen bir tane yapısı sağlandığı görülmektedir. Üretim proses parametre adımlarının oluşan kaplamanın homojenliğine ya da kalınlığına bir etkisi görülmemiştir.
- Kaplama kesitleri incelendiğinde, MAO prosesine tabi tutulan numunelerin tümünde yüzeyde homojen bir kaplamanın oluşmadığı, yer yer kalın, yer yer oldukça ince kaplama kalınlığına rastlanmaktadır. Bu fark, MAO işlemi sırasında oluşan kıvılcımların yüzeye eşit dağılım göstermemesinden kaynaklanıyor olabilir. Kaplamadaki bu kalınlık farkının, yüzey mikrograflarında görülen açık-koyu renkli bölgeleri gösteriyor olabileceği ve kaplamada oluşan oksit fazların farklılığından dolayı oluştuğu düşünülebilir [51].
- Elde edilen MAO numunelerinin kesit görüntülerinde kaplama-substrat arayüzlerinde süreksizlikler olduğu ve dalgalı bir yapı sergilediği görülmektedir. Buradan kaplama ve altlık malzeme arasındaki yapışmanın yeteri kadar iyi olmadığı söylenebilir. Bu düzensizliğin sebebi elektrolitteki  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  bileşiğinin varlığı olabilir. Elektrolite  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  eklentisinin, kaplama kalınlığını arttırmakla birlikte, kaplama ve substrat arayüzündeki homojenliği ve düzenliliği bozduğu bilinmektedir [54].
- Yapılan ölçümler sonucunda kaplamaların tüm yüzeyde homojen olmadığı ve yer yer yaklaşık  $3\mu\text{m}$  ve  $15\mu\text{m}$  aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durumun, elektrolitteki  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  varlığının elektrolitin iletkenliğini arttırarak MAO işlemi sırasında yüzeydeki bazı bölgelerde daha yoğun kıvılcımlar oluşturması ve oksit tabakasının bu bölgelerde daha hızlı büyümesi sonucu oluştuğu düşünülebilir [54].
- Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, kullanılan elektriksel parametreler homojen ve kalın bir oksit tabakası elde etmek için yeterli görünmektedir. Burada elde edilen kaplamanın homojen olmamasının bir diğer sebebi, proseste kullanılan voltaj-süre kombinasyonunun uyumsuzluğu ya da yetersizliği olabilir. Çünkü MAO prosesinde oksit kaplama oluşumu, kritik bozunum voltajı (dielectric breakdown) değeri aşıldıktan sonra meydana gelen mikro deşarj kanalları sayesinde olmaktadır.

- Mikro ark oksidasyon işlemi ile oluşturulan oksit kaplamaların tümünde yüzeylerin pürüzlülüklerinin, kaplama olmayan substrat yüzeylerine göre büyük miktarda arttığı görülmüştür. Alaşım açısından değerlendirildiğinde 1050 alaşım altlık malzemeler üzerine yapılan kaplamaların pürüzlülüklerinin, 3105 alaşımlara göre daha fazla olduğu ve MAO prosesi sonrası daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. Tav işleminin etkisine bakılacak olursa, tavlanmış malzemeler üzerinde oluşturulan kaplamalar sert malzemeler üzerinde oluşturulanlara göre daha pürüzlü bir yapı sergilemiştir.
- Mikro ark oksidasyon uygulanan numunelerin XRD pikleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerinin tümünde oluşan oksit film tabakasına hakim fazın  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğu ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının kaplamalarda nispeten daha az miktarda yer aldığı görülmüştür. Kullanılan elektrolitte var olan Na ve P elementlerinin proses sonucu herhangi bir faz oluşturmadığı ve oksit yapısına katılmadığı belirlenmiştir.
- Elde edilen diğer sonuçlara göre, tavlı malzemelerdeki kaplamalarda oksit tabakada oluşan toplam Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazının şiddeti, tav görmeyen alaşımlara göre daha fazladır. Bununla birlikte, tavlınmış malzemelerdeki kaplamalarda  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumu daha fazla miktardadır. Bu durumun sebebi, tavlı malzemelerdeki yüzey segregasyonun homojenizasyon işlemi ile azaltılması ve işlem sırasında oluşan mikro deşarjların bu yüzeylerle daha iyi etkileşmesi olabilir.
- Farklı kompozisyondaki alüminyum altlık üzerine yapılan mikro ark oksidasyon işleminde alaşım elementi miktarlarının kaplama yapısına çok belirgin bir etkisi olmamakla birlikte, 1050 alaşım altlık malzemeler üzerindeki kaplamalarda elde edilen  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı nispeten daha fazladır. Bunun sebebi 3105 alaşımlarda daha fazla miktarda bulunan alaşım elementi varlığı olabilir. Literatürdeki bilgilere göre, Mg iyonları, alümina faz geçiş sıcaklığını değiştirerek  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> den  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e geçişi baskılamaktadır. Mg'nin bu etkisinin yanında, Cu ve Zn iyonları da  $\alpha$  faz oluşumunu engelleyen diğer sebepler olabilirler [53].
- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> arasındaki fark, temel olarak mikro ark bölgesindeki ergimiş alüminanın soğuma hızındaki değişiklikten kaynaklanmaktadır. Kaplamadaki gözenekli üst tabaka bölgesinin ağırlıklı olarak daha yüksek soğuma hızında üretilen yarı kararlı  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazından ve yoğun iç bölgeninse ağırlıklı olarak düşük soğuma hızında elde edilen ve kararlı  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazından meydana geldiği düşünülmektedir.

- Jun Tian ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, oluşturdukları seramik kaplamaların makro incelemeleri yapıldığında, yüzeyde renk farklılıklarının olduğu, yapıdaki kahverengi kaba yapının  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, daha yoğun koyu renkli iç tabakanın ise  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı olduğu belirlenmiştir. Çözelti ile doğrudan temas halindeki dış yüzeyde, alüminanın daha yüksek bir soğutma oranı ile katılaşması sonucu oluşan  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı oluşurken, iç bölgede soğuma hızı daha düşük olduğundan, kaplamadaki alüminanın düşük ısı iletkenliği nedeniyle  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumunun baskın olduğu görülmüştür [51].
- Kaplamanın yüzey morfolojisinin incelendiği bölümde, yüzeyde açık ve koyu renk geçişlerinin olduğu, bunun sebebinin yüzeydeki oksit filmin farklılaşması olabileceği belirtilmişti. Ayrıca kaplama yüzeyinin zımparalanması sonucu oluşan morfolojide açık renkli bölgelerin giderildiği görülmüştü. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, açık renk bölgelere hakim fazın ağırlıklı olarak gözenekli üst tabakada bulunan ve hızlı soğuma sonucu oluşan  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğu, koyu renkli bölgelerinse  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazından oluştuğu söylenebilir.
- Kaplama yapılmayan tavlı ve tavsız malzemelerin aralarındaki korozyon karşılaştırmasına bakıldığında, sert malzemenin korozyona olan direncinin tavlınmış malzemelere göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, tavlama işlemi ile yeniden kristalleşen tanecikler ile birlikte toplam tane sınırının uzaması ve tane sınırlarının metal içerisindeki korozyona dirençsiz safsızlık bölgeleri olması olabilir.
- Kaplama sonrası tavlı 1050 alaşımının korozyon direnci daha yüksek beklenilmesine rağmen, kaplamasız numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, yüzeydeki kaplamanın bazı bölgelerde süreksizlik göstermesi, korozif ortamda bulunan agresif iyonların bu süreksiz bölgeleri hata olarak görmesi ve bu bölgelerin, kaplama kalınlığının daha fazla olduğu bölgelere göre daha anodik davranış göstermesi sonucu meydana gelmiş olabilir. Korozyonun özellikle bu süreksizlikler üzerinden malzemenin iç taraflarına doğru ilerlemesi sonucu gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Tav görmeyen sert haldeki 1050 alaşım malzeme üzerine yapılan kaplamanın ise, korozyonda bir miktar iyileşme sağladığı görülmektedir. Tafel diyagramlarından elde edilen eğriye göre, 3105 alaşım malzeme için, H0 kondisyonundaki malzeme üzerinde üretilen kaplamaların korozyona karşı direnci geliştirdiği görülmektedir.
- Kaplama öncesi 1050 alaşımının korozyona karşı direnci beklenildiği üzere 3105 alaşıma göre nispeten daha yüksektir. Bu durumun sebebi alaşım elementlerinin

korozyonu arttırması olabilir. MAO kaplama ile 3105-H19 alařımının  $I_{kor}$  deęerinin dūřtūęu ve  $E_{kor}$  deęerinin de sifıra yaklařtıęı, bōylece korozyona karřı direncin arttıęı gōrūlmektedir. 3105 alařım altlık malzeme ūzerine ūretilen oksit kaplamanın korozyon direncini arttırmada bir bariyer etkisinin olduęu sōylenebilir. 1050 alařım malzemeler iēinse bu genellemeyi yapmak doęru deęildir.



## KAYNAKLAR

- [1]. Kalkancı, H., 2008, Plazma Elektrolitik Oksidasyon Teknolojisi Uygulanan AA6082 Alaşımının Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2]. Aghion, E., Bronfin B., Eliezer D., 2001, The role of the magnesium industry in protecting the environment, *Journal of Materials Processing Technology*, 117 (3), 381-385.
- [3]. Başoğul, Y., 2014, Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanmış AA6082 Alaşımının Farklı Yağlama Şartlarında Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4]. Guangliang, Y., Xianyi, L., Yizhen, B., Haifeng, C., Zengsun, J., 2002, The effects of current density on the phase composition and microstructure properties of microarc oxidation coating, *Journal of Alloys and Compounds*, 345, 196–200.
- [5]. Tekin, K.C., Çakmak, E., Malayoğlu, U., 2008, Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemiyle hafif metallerin kaplanması, *Mühendis ve Makina*, Cilt 49 Sayı 5824, 3-9.
- [6]. Güleç, A.E., 2012, Sentetik Al-Si İkili Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Tekniği ile Kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7]. Brushan, B., Gupta B.K., 1991, *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments*, McGraw-Hill, Inc, New York, USA, ISBN: 978-0070052499.
- [8]. Davis, J.R., 1993, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and aluminum alloys*, ASM International, USA, ISBN: 978-0-87170-496-2.
- [9]. Bodsworth, C. 1994, *The extraction and refining of metals*, 1st ed., CRC Press, USA, ISBN: 978-0-849344336.
- [10] Kaufman, J. G., Rooy, E. L., 2004, *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications.*, ASM International, USA, ISBN: 978-0-87170-803-8.
- [11]. Askeland, D. R., 1998, *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Çev: Erdoğan, M., Cilt I., Nobel Kitabevi, Ankara.
- [12]. Lumley, R., 2011, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy - Production, Processing and Applications*, Woodhead Publishing, ISBN: 978-1-84569-654-2, 141–154.
- [13]. Shi-Gang, X., Li-Xin, S., 2006, Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina, *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132–136.
- [14]. Totten, G. E., MacKenzie, D.S., 2003, *Handbook of Aluminium.*, Vol.1: Physical Metallurgy and Processes, CRC Press, New York, ISBN: 9780824704940.



- [15]. Brandes, E. A., Brook, G. B.(Editor), 1998, Smithells Light Metals Handbook-Mechanical properties of light metals and alloys, 7th edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford, UK, 15-66.
- [16]. Gebze Teknik Üniversitesi, Alüminyum Araştırma Ve Uygulama Merkezi, Alüminyum alaşımları için temper göstergeleri, <http://web.gtu.edu.tr/aluminyum/2018/04/26/237/> [Ziyaret Tarihi: 8 Şubat 2019].
- [17]. Kammer, C., 1999, Continuous Casting of Aluminum, Training in Aluminum Application Technologies, TALAT- Lecture 3210, Goslar.
- [18]. Alper, M.G., 2003, Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi ile Üretilmiş 5052 – 5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19]. Chen, J., Shi Y., Wang, L., Yan, F., and Zhang, F., 2006, Preparation and properties of hydroxyapatite-containing titania coating by micro-arc oxidation, Materials Letters, 60 (20), 2538-2543.
- [20]. Fukuda, T. and Kakuhari, T., 2007, New Surface Treatment Technology for Light Metals-Keronite, Journal of the Surface Finishing Society of Japan, 58 (6), 357-360.
- [21]. Sluginov, N.P., 1880, On light phenomena observed in liquids during their electrolysis, J. Russ. Phys. Chem. Soc., 12, 193-203.
- [22]. Inamuddin, Asiri M.A., Mohammad A., 2019, Applications of Nanocomposite Materials in Orthopedics, Woodhead Publishing, USA.
- [23]. 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.
- [24]. Kalkancı, H., 2004, Mikro Ark Oksidasyon Teknolojisi ve Alüminyum Alaşım Malzemelere Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25]. Günyüz, M., 2007, Titanyum ve Alaşımlarının Mikro Ark Yöntemiyle Kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26]. Gnedenkov, S. V. and Khrisanfova, O.A., 2001, Composition and adhesion of protective coatings on aluminum, Surface and Coatings Technology, 145 (1-3), 146-151.
- [27]. Kalkancı, H., 2007, Alüminyum alaşımlarının plazma elektrolitik oksidasyon ile yüzey modifikasyonu, 3.Doktora Tez İzleme Raporu, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [28]. Curran, J.A. 2005, Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings, Phd Thesis, University of Cambridge.

- [29]. Tian, J., Luo Z., QI S., Sun X., 2002, Structure and Antiwear Behavior Of Micro-Arc Oxidized Coatings On Aluminium Alloy, *Surface and Coating Technology*, 154 (1), 1-7.
- [30]. Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. ve Dowe, S. J., 1999, Plasma electrolysis for surface engineering, *Surface and Coatings Technology*, 122 (2-3), 73-93.
- [31]. Miney, P.G., 2003, Growth and characterization of a porous aluminum oxide film formed on an electrically insulating support, *Electrochemical and Solid State Letters*, 6 (10), 42-45.
- [32]. Alcala, G., 2002, Mechanical properties of amorphous anodic alumina and tantalum films using nanoindentation, *Nanotechnology*, 13 (4), 451-455.
- [33]. Van, T.B., Brown, S.D., Wirtz, G. P., 1977, Mechanism of Anodic Spark Deposition, 78. annual meeting of the American Ceramic Society, 4 May 1976 Cincinnati USA, 56 (6) 563-568.
- [34]. Polat, A., 2009, 2017A, 6061 ve 7039 Alüminyum Alaşımlarının Mikro Ark Oksidasyon Yüzey Kaplama Yöntemi İle Sert Seramik Kaplanması, Doktora Tezi, Koceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38]. Durdu, S., 2010, Saf Magnezyumun Mikroark Oksidasyon Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [35]. Markov, G. A., Tatarchuk V. V., Mironova M. K. , 1983, Microarc Oxidation of Aluminum in the Concentrated Sulfuric-Acid, *Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Akademii Nauk Sssr, Seriya Khimicheskikh Nauk*, 3, 34-37.
- [36]. Averyanov, E.E., Opubl, B.I., 1978, Method anodizing metal, *AS 607*, 852 USSR, 25.
- [37]. Tchernenko, V.I., Snezhko, L.A., Papanova, I.I., 1991, Coatings by Anodic Spark Electrolysis, *Khimiya*, 68, 568-573.
- [38]. Sundararajan, G. and Rama, K.L., 2003, Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology, *Surface and Coatings Technology*, 167, 269-277.
- [39]. Yao-hui, L., Song, L., Si-rong, Y., Xian-rong, Z., Bai-ming, Z., 2006, Effect of magnesium in aluminium alloys on characteristics of microarc oxidation coatings, *Trans Nonferrous Met. Soc. China*, 1624-1629.
- [40]. Dong, H., 2010, *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, Woodhead Publishing, USA.
- [41]. Zhang, R.F., 2008, Effects of electric parameters on properties of anodic coatings formed on magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, *Materials Chemistry and Physics*, 107, 356-363.

- [42]. Bayati, M. R., Golestani-Fard, F., Moshfegh, A. Z. ve Molaei, R., 2011, In situ derivation of sulfur activated TiO<sub>2</sub> nano porous layers through pulse-micro arc oxidation technology, *Materials Research Bulletin*, 46, 1642-1647.
- [43]. Hussein, R. A., Nie, X. ve Northwood, D. O., 2010, Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure, *Surface and Coatings Technology*, 205, 1659-1667.
- [44]. Friedrich, H. E., Mordike, B.L., 2006, *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*, Springer, Germany.
- [45]. Wang, K., Koo, B.H., Lee, C.G., Kim, Y.J., Lee, S.H., Byon, E., 2009, Effects of electrolytes variation on formation of oxide layers of 6061 Al alloys by plasma electrolytic oxidation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 866-870.
- [46]. Venugopal, A., Panda, R., Manwatkar, S., Sreekumar, K., Krishna, L.R., Sundararajan, G., 2012, Effect of micro arc oxidation treatment on localized corrosion behaviour of AA7075 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, 700-710.
- [47]. Li, Q., Liang, J., Liu, B., Peng, Z., Wang, Q., 2014, Effects of cathodic voltages on structure and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on aluminium alloy, *Applied Surface Science*, 297, 176–181.
- [48]. Arrabal, R., Mohedano, M., Matykina, E., Pardo, A., Mingo, B., Merino, M.C., 2015, Characterization and wear behaviour of PEO coatings on 6082-T6 aluminium alloy with incorporated  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles, *Surface & Coatings Technology*, 269, 64-73.
- [49]. Hakimizad, A., Raeyssi, K., Golozar, M.A., Lu, X., Blawert, C., Zheludkevich, M.L., 2017, The effect of pulse waveforms on surface morphology, composition and corrosion behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nano-composite PEO coatings on 7075 aluminum alloy, *Surface & Coatings Technology*, 324, 208–221.
- [50]. Meshreghi, H., Yerokhin, A., 2018, Effects of treatment time on formation of PEO coatings on regular shape Aluminium foil substrates, *Libya Journal Applied For Science and Technology*, Volume 5, 68-73.
- [51]. Tian, J., Luo, Z., Qi, S., Sun, X., 2001, Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, 154, 1–7.
- [52]. Oh, Y. J., Mun, J. I., Kim, J. H., 2009, Effects of alloying elements on microstructure and protective properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings formed on aluminum alloy substrates by plasma electrolysis, *Surface and Coatings Technology*, 204, 141-148.
- [53]. Jing-Guo, M., Run, W., Kang-da, H., Qiu-rong, C., Xiang-yun, D., 2013, Effects of alloying elements on structure of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings on aluminum alloys, *Applied Mechanics and Materials*, 310, 85-89.

- [54]. Muhaffel, F., Cimenoglu, H., 2019, Development of corrosion and wear resistant micro-arc oxidation coating on a magnesium alloy, *Surface and Coatings Technology*, 357, 822-832.
- [55]. Dündar, M., Keleş, Ö., Doğan, N., Kerti, B., 2004, Crsytallographic texture development of Twin Roll cast Aluminum strip, *TMS Light Metals*, 723-727.
- [56]. Dursun, A., Çorlu, B., İnel, C., Aktuğ, S.L., Dündar, M., 2009, Effect of homogenization treatment on microstructural evolution of 1050 and 1200 TRC aluminium alloys, *The 138th TMS Annual Meeting, Light Metals*, 15-19 February 2009 San Francisco USA.
- [57]. Türk Standardı TS EN 573, 2008, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları Biçimlendirilebilen Mamüllerin Kimyasal Bileşimi ve Şekli, Bölüm 3.
- [58]. Cucurachi Y.D., 2016, İkiz Merdane Döküm Yöntemi ile Alüminyum AA5754 Alaşımı Levha Üretimi, Döküm ve Termomekanik Proses Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [59]. Sirel, Z., 2008, İkiz Merdane döküm yöntemiyle üretilen AA5xxx ve AA6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarında Segregasyonların Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, GTÜ Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [60]. Grandfield, J.F., McGlade, P.T., 1996, DC Casting of Aluminium: Process Behaviour and Technology, *Materials Forum*, 20, 29-50.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Nurgül SEYMEN
Doğum Yeri	Bursa
Doğum Tarihi	09.07.1992
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+90 534 415 14 92
E-Posta Adresi	nurgulseymen@gmail.com



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Gazi Üniversitesi
Fakülte	Teknoloji Fakültesi
Bölümü	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2014

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	İşletme İktisadi Enstitüsü
Anabilim Dalı	Genel İşletmecilik Anabilim Dalı
Programı	MBA (İşletme Yöneticiliği)
Mezuniyet Yılı	2017

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği