



## Characterization of the corrosion behaviour of modified 3003 aluminium finstock alloys made by direct chill casting and twin roll casting routes used in car heat exchange systems using electrochemical tests

İsrafil Küçük\*

Nanoscience and Nanoengineering Division, Institute of Nanotechnology, Gebze Technical University, Gebze, Kocaeli, 41400, Turkey

### Highlights:

- Effects of Zn on corrosion resistance is investigated experimentally for 3003 TRC and DC aluminium alloys
- Control of change of surface roughness of 3003 TRC and DC aluminium alloys
- Determination of surface pit sizes of 3003 TRC and DC aluminium alloys

### Keywords:

- 3003 Aluminium alloys
- Direct chill casting
- Twin roll casting
- Zinc addition
- Electrochemical tests

### Article Info:

Research Article  
Received: 27.11.2018  
Accepted: 24.05.2020

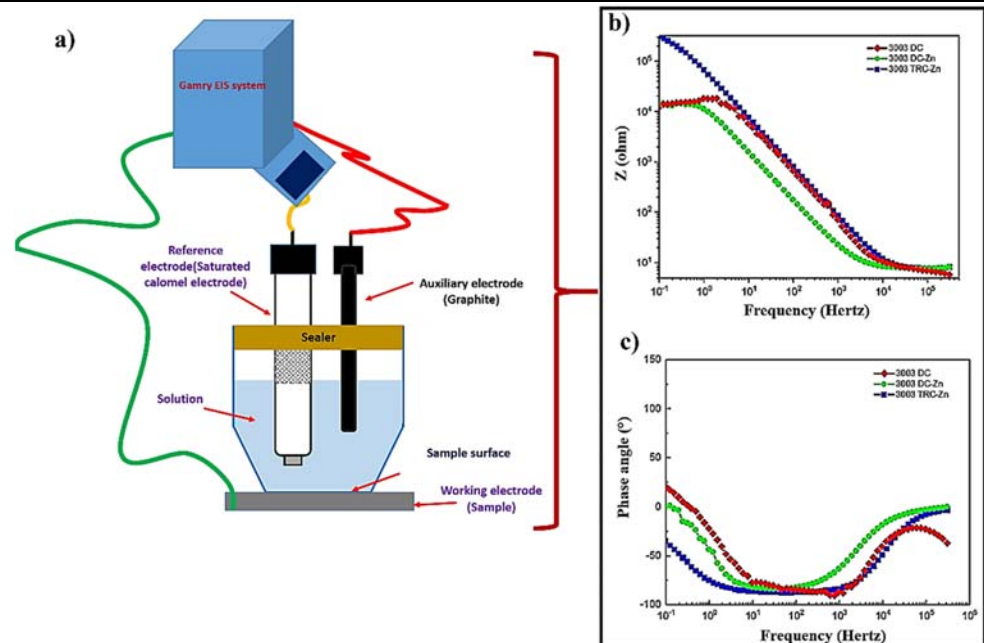
### DOI:

10.17341/gazimmfd.488024

### Correspondence:

Author: Israfil Kucuk  
e-mail: i.kucuk@gtu.edu.tr  
phone: +90 262 605 1752

### Graphical/Tabular Abstract



**Figure A.** a) Schematic view of details of the Gamry's Paintcell three electrode system experimental set-up used and b) and c) Bode plots obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after EIS measurements collected in 1 molar aqueous solution including NaCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Purpose:** In this work, corrosion behaviour of the three different 70  $\mu\text{m}$  thickness finstock foils: commercially available Al-Si-Mn contained 3003 aluminium (3003 DC), and Zinc added 3003 aluminium (3003 DC-Zn) alloys made by direct chill (DC) caster process and twin roll cast Zn added 3003 aluminium (3003 TRC-Zn) alloys was evaluated.

### Theory and Methods:

Advanced electrochemical corrosion test techniques such as open circuit potential (OCP), potentiodynamic curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in 1 Molar NaCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution environment were performed. Also, surface characterization of the samples used in this study was performed by 3D profilometer, scanning electron microscopy (SEM) added EDS tool, and chemical composition analysis methods such as optical spectroscopy and X-ray diffraction before and after electrochemical corrosion tests.

### Results:

The results of the study showed that the surface roughness and corrosion rate and impedance values of the 3003 aluminium alloy modified with Zn (3003 TRC-Zn) produced by TRC method had higher values than that of the 3003 DC and 3003 DC-Zn samples.

### Conclusion:

It was concluded that the 3003 TRC-Zn would be of use as a sacrifice metal in car heat exchanger systems, due to its desired poor corrosion resistance.



## Otomobil ısı eşanjörlerinde kullanılan doğrudan soğutmalı döküm (DC) ve ikiz merdaneli sürekli döküm (TRC) ile üretilen modifiye edilmiş folyo 3003 alüminyum alaşımlarının elektrokimyasal yöntemler ile korozyon davranışının karakterizasyonu

İsrafil Küçük\*<sup>ID</sup>

Gebze Teknik Üniversitesi, Nanoteknoloji Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- 3003 TRC ve DC alüminyum alaşımlarının korozyon direncine Zn elementinin etkisinin deneysel olarak incelenmesi
- 3003 TRC ve DC alüminyum alaşımlarının yüzey pürüzlülük özelliğindeki değişimlerin kontrolü
- 3003 TRC ve DC alüminyum alaşımlarının yüzeylerindeki çukurcuk boyutlarının tanımlanması

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 27.11.2018  
Kabul: 24.05.2020

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.488024

#### Anahtar Kelimeler:

3003 alüminyum alaşımları,  
Doğrudan soğutmalı döküm,  
ikiz merdane sürekli döküm,  
çinko ilavesi,  
elektrokimyasal testler,  
yüzey karakterizasyonu

#### ÖZET

Bu çalışmada, ticari olarak elde edilen 70 µm kalınlığa sahip üç farklı alüminyum folyonun, sırasıyla, doğrudan soğutmalı döküm (DC) ile üretilen bünyesinde Al-Si-Mn bulunduran 3003 (3003 DC) ve çinko (Zn) ilave edilmiş 3003 alüminyum alaşımı (3003 DC-Zn) ile ikiz merdane sürekli döküm (TRC) yöntemi kullanılarak Zn ile modifiye edilmiş 3003 alaşımı (3003 TRC-Zn), korozyon davranışları, 1 Molar NaCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözelti ortamında ileri seviye elektrokimyasal yöntemler (sırasıyla, açık devre potansiyeli, potansiyodinamik eğriler ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi) kullanılarak incelendi. Kullanılan alaşımların korozyon testleri öncesi ve sonrası yüzey karakterizasyonu 3B yüzey profilometresi, taramalı elektron mikroskobu ve kimyasal kompozisyon analizleri, optik spektrometre ve X-ışını kırınımı teknikleri ile değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar, Zn ilave edilerek modifiye edilen 3003 alüminyum alaşımının TRC yöntemi ile üretilmesi sonucu bu folyoların yüzey pürüzlülüğünün ve korozyon hızı değerlerinin, DC yöntemi ile üretilen benzer alaşımlara göre daha yüksek olduğunu gösterdi. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında üretilen 3003 TRC-Zn alaşımının arzu edilen seviyede aşırı yüzey pürüzlülüğüne sahip olarak elde edilerek, düşük korozyon direnci özelliklerine sahip olmasından dolayı, otomobil ısı eşanjörü sistemlerinde yer alan galvanik çift yapılarda alternatif bir aktif metal (kurban anot) olarak kullanılabilmesi önerilmektedir.

## Characterization of the corrosion behaviour of modified 3003 aluminium finstock alloys made by direct chill casting and twin roll casting routes used in car heat exchange systems using electrochemical tests

### H I G H L I G H T S

- Effects of Zn on corrosion resistance is investigated experimentally for 3003 TRC and DC aluminium alloys
- Control of change of surface roughness of 3003 TRC and DC aluminium alloys
- Determination of surface pit sizes of 3003 TRC and DC aluminium alloys

#### Article Info

Research Article  
Received: 27.11.2018  
Accepted: 24.05.2020

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.488024

#### Keywords:

3003 alüminyum alaşımları,  
Doğrudan soğutmalı döküm,  
ikiz merdane sürekli döküm,  
çinko ilavesi,  
elektrokimyasal testler,  
yüzey karakterizasyonu

#### ABSTRACT

In this work, corrosion behaviour of the three different 70 µm thickness finstock foils: commercially available Al-Si-Mn contained 3003 aluminium (3003 DC), and Zinc added 3003 aluminium (3003 DC-Zn) alloys made by direct chill (DC) caster process and twin roll cast Zn added 3003 aluminium (3003 TRC-Zn) alloys was evaluated using advanced electrochemical corrosion test techniques such as open circuit potential (OCP), potentiodynamic curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in 1 Molar NaCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution environment. Surface characterization of the samples used in this study was performed by 3D profilometer, scanning electron microscopy (SEM) added EDS tool, and chemical composition analysis methods such as optical spectroscopy and X-ray diffraction before and after electrochemical corrosion tests. The results of the study showed that the surface roughness and corrosion rate and impedance values of the 3003 aluminium alloy modified with Zn (3003 TRC-Zn) produced by TRC method had higher values than that of the 3003 DC and 3003 DC-Zn samples. It was concluded that the 3003 TRC-Zn would be of use as a sacrifice metal in car heat exchanger systems, due to its desired poor corrosion resistance.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzün önemli bir problem, küresel ısınmayı önlemek için otomotiv sektöründe kritik bir parametre olan yakıt tüketimini azaltmak gerekmektedir [1]. Bu yüzden, araç ağırlıklarının azaltılması yakıt tüketimini düşürecek bir önlem olarak görülmektedir [2]. Bu manada bir aracın önemli bir parçası olan ısı eşanjörü (radyatör) ağırlığının azaltılması da bu konudaki araştırmalara gözle görülür bir katkı sağlamaktadır [3, 4]. Alüminyum ve alaşımları hafiflik, yüksek elektrik iletkenliği, iyi dayanım ve istenilen seviyede korozyon özelliklerinden dolayı Bakır (Cu) gibi iyi iletkenlik özelliği olan ve paslanmaz çelik gibi metallerle göre ısı eşanjörü malzemesi olarak daha fazla tercih edilmektedir [4-6]. Alüminyum alaşımlarının ısı eşanjörü olarak kullanımı için levha veya folyo şeklinde olması ve kalınlığının folyo kalınlığında olması şekillendirilebilirlik ve korozif ortamda kullanılabilirliği açısından arzu edilen bir durumdur [6, 7]. Ayrıca, ısı eşanjöründe finstok malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımları (örneğin; 3003 grubu hadde alüminyum alaşımları) eşanjör içi sıvı ortamı dikkate alındığında, eşanjör içyapı finstok tutucu alaşım olan 4XXX grubu alüminyum alaşımı ile lehimleme yöntemi ile birleşik halde bulunmasından ötürü bir galvanik çift oluşturma potansiyeline sahip olup, korozyon özellikleri bakımından artan bir ilgi ile birlikte dikkat edilmesi gereken bir malzeme olarak literatürde belirtilmektedir [8-10].

Alüminyum alaşımlarının ingot veya levha ile nihai ürün folyo şeklinde üretimi için döküm, ekstrüzyon, haddeleme ve yüzey şekil işlemleri (örneğin; tornalama ve frezeleme) gibi yöntemler kullanılmaktadır [10]. Bu yöntemlerden haddeleme işlemi ile alüminyum alaşımlarının mekanik ve yüzey özelliklerine dolayısıyla korozyon özelliklerine müdahale etmek ve adı geçen özellikleri geliştirmek literatürde yaygın olarak gerçekleştirilmektedir [11]. Haddeleme, döküm işlemi sonrasında gerçekleştirilen ikincil bir işlem olup, alüminyum alaşımlarının mukavemetini artırıcı bir etki oluşturmanın yanısıra levha veya folyo olarak elde edilen nihai ürünün yüzey morfolojisini de etkileyen önemli bir üretim yöntemidir. Haddeleme, sıcak ve soğuk hadde olmak üzere literatürde iki temel prensip ile alüminyum alaşımlarının levha veya folyo şeklinde üretimi için gerçekleştirilmektedir. Sürekli döküm yöntemi olarak bilinen İkiz merdane döküm yöntemi ergime fırınından gelen alaşımlandırılmış sıvı metalin iki merdane arasında bulunan kalıba gelmesi ve katılaşması ile birlikte levha şeklini alması prensibine dayanmaktadır. Bu işlem ile, yarı ürün olarak elde edilen levhanın daha sonra gerçekleştirilecek olan soğuk haddeleme ile kalınlık inceltme işlemlerine hazır olmasında doğrudan döküm ile üretilen ürünlerin soğuk haddeleme işlemine tabi tutulmasına göre önemli maliyet, yüzey pürüzlülüğü, mekanik mukavemet, şekillenebilirlik kabiliyeti açısından avantaj sağlamaktadır [12]. Dahası, ikiz merdane sürekli döküm ile elde edilen yassı ürünlerin yüzeye yakın olan taneleri merkez kısmındaki tanelere göre daha ince yapılı olmaktadır ve intermetalik fazların, ötektik yapıların ve süreksizliklerin dağılımı doğrudan döküm ile

elde edilen yassı ürünlere göre daha dengeli dağılmaktadır [13-15]. Alüminyumun alaşım olarak elde edilmesinde alaşım elementlerinin elde edilen nihai şekilli ürünün özelliklerine (örneğin; mukavemet, aşınma, yüzey özellikleri ve korozyon direnci) etkisi literatürde bilinen bir durumdur [12, 13]. Özellikle, Mangan (Mn) elementinin ana alaşım elementi olarak alüminyum ana metalinin içindeki katılaşma reaksiyonu içindeki çözülebilirliği literatürde hâlihazırda araştırılmaya devam etmektedir [16]. Demir (Fe) ve Silisyum (Si) elementleri ise diğer alaşım elementlerinin çözülebilirliğini azaltan etkiye sahip olan alaşım elementleri olarak alüminyum alaşımlarının özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır [17]. Cu elementi de aşırı doymuş katı çözeltilerin ayrışmasını hızlandırıcı etki yaparak alüminyumda meydana gelen çökelti miktar ve boyutunu etkileyerek alaşımın özelliklerini değiştirmektedir [18]. Çinko (Zn) elementinin etkisini ise, Dündar vd. ikiz merdane sürekli döküm ile üretilen alüminyum levhalar üzerinde Zn ilaveli 3003 alüminyum alaşımlarının korozyon davranışını incelemiş ve Zn ilavesinin korozyon hızını artırdığını tespit etmiştir [19]. Ancak, literatürde Zn elementinin ilavesinin 3003 grubu alüminyum folyo alaşımlarının korozyon özelliklerinin ileri seviye elektrokimyasal yöntemler (örneğin; empedans spektroskopisi yöntemi) ile incelenmesi ve korozyon direnci özelliklerinin diğer folyo üretim teknikleri ile elde edilen benzer alaşım grubu için araştırılması ve karşılaştırılması üzerine kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır [19-24].

Bu çalışmada, ticari olarak elde edilen DC yöntemi ile üretilen Zn ilaveli veya ilavesiz ve bu çalışma ile TRC yöntemi kullanılarak elde edilen Zn katkılı araç ısı eşanjöründe finstok malzemesi (aktif metal) olarak kullanılan 3003 grubu hadde alüminyum alaşımı folyoların korozyon davranışına etkisi geleneksel elektrokimyasal yöntemler (örneğin; açık devre potansiyeli (OCP), Tafel ekstrapolasyon (TP)) ve empedans spektroskopisi (EIS)) kullanılarak incelendi. Ayrıca, gerek üretim yönteminin gerekse de Zn ilavesinin elde edilen nihai folyo malzemesinin yüzey özelliklerine etkisi ileri yüzey analiz yöntemleri (spektrometre, XRD, SEM, EDS, üç boyutlu profilometre) kullanılarak elektrokimyasal korozyon testleri öncesi ve sonrasında incelendi. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında TRC yöntemi ile üretilen Zn ile modifiye edilen 70 µm kalınlığındaki 3003 grubu alüminyum folyo alaşımının korozyon hızının arzu edildiği gibi daha yüksek seviyelerde olduğu tespit edildi.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Alüminyum Levha Hazırlama Yöntemleri (Aluminum Strip Preparation Techniques)

Bu çalışmada kullanılan ticari olarak elde edilen 3003-DC ve 3003-DC-Zn isimli 3003 alüminyum levha numunelerin kalınlıkları 70 µm olmakla birlikte, Doğrudan Soğutmalı Döküm (DC) yöntemi ile üretilmiştir. 3003-TRC-Zn isimli 3003 alüminyum levha numuneler de 70 µm kalınlığa sahip

olmakla birlikte, İkiz Merdaneli Sürekli Döküm (TRC) üretim yöntemi kullanılarak elde edildi. TRC ile üretilen numuneler, döküm işleminin ardından 8,5 mm kalınlığında elde edildikten sonra 550°C de 4 saat homojenizasyon tavlamasına tabi tutuldu ve ardından birden fazla pasoda %60 soğuk haddeleme sonrası, yaklaşık 450°C'de 4 saat normalizasyon tavlaması işlemine tabi tutuldu.

Çalışmada kullanılan numunelerin ebatları 5x5 cm olup, haddeleme yönüne paralel yönde numune alımı gerçekleştirildi. Modifiye edilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli 3003 grubu hadde alüminyum alaşımlarının elemental analizi, Oxford Instruments, Oxford, UK marka WAS Foundry-Master model optik emisyon spektrometre cihazı ile gerçekleştirildi.

## 2.2. Yüzey Karakterizasyonu (Surface Characterization)

Modifiye edilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli 3003 grubu hadde alüminyum alaşımın numunelerin korozyon ölçümleri öncesi ve sonrası üç boyutlu yüzey morfolojisi ve yüzey kimyasal analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, FEI, Pensilvanya, US marka Nova Nano SEM 430 model taramalı elektron mikroskobu 20 kV hızlandırıcı gerilimi ve enerji dağılım spektroskopisi kullanıldı. Ayrıca, üç boyutlu optik profilometre ile numunelerin yüzey pürüzlülük profilini analiz etmek için, korozyon öncesi ve sonrası durumlar için Bruker, Hamburg, Almanya marka Counter GT-I model cihaz ile gerçekleştirildi.

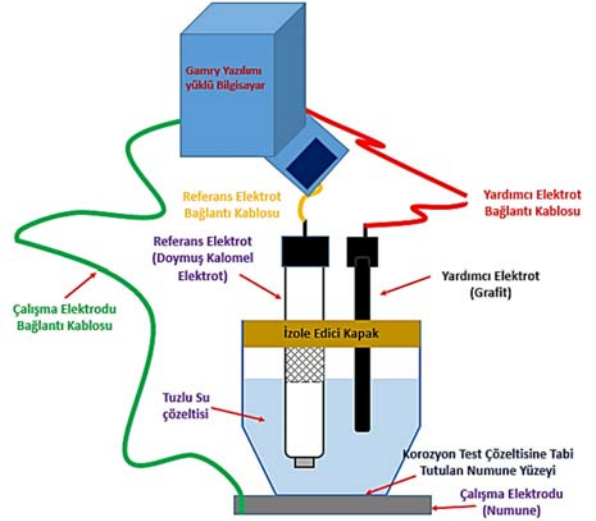
Ticari olarak alınan modifiye edilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin korozyon testleri öncesi ve sonrası X-ışını kırınım (XRD) deseni (Bruker, Hamburg, Almanya marka ve D8 advance Diffractometer Model, Cu K $\alpha$  radyasyonu;  $\lambda$ : 1,5406 Å) analizleri gerçekleştirildi. XRD incelemeleri öncesi numunelerin yüzeyleri etanol ile yıkanıp, kurutuldu.

## 2.3. Elektrokimyasal Yöntemler İle Korozyon Ölçüm Testleri (Corrosion Measurement Using Electrochemical Techniques)

Elektrokimyasal yöntemlerin kullanılması ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri ve Gamry firmasının üç elektrotlu hücre korozyon sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri gerçekleştirilmeden önce numunelerin yüzeyleri, önce aseton ile ardından da 2 propanol kullanılarak 5 dakika süre ile ultrasonik temizleyici banyoda temizlik işlemine tabi tutuldu. Temizlenen numuneler, oda sıcaklığı ortamında basınçlı hava yardımı ile hızlıca kurutuldu.

Elektrokimyasal korozyon ölçümleri otomotiv sanayiinde kullanılan ısı ejanjörü çözeltisi ortamını tanımlayan (ASTM G69-97) standardın öngördüğü şekilde gerçekleştirildi. Testler, Gamry firmasının üç elektrotlu hücre sistemi (Model: PC14/750 Potentiostat/Galvanostat/ZRA) kullanılarak ve 5,5 pH değerine sahip 1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren çözeltisi içerisinde gerçekleştirildi. Burada kullanılan çözelti ASTM G69-12 standardına göre hazırlanmış olup,

manyetik karıştırıcı kullanılarak 60 dakika süre ile H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren tuzlu su çözeltisinin doyması sağlandı. Korozyon hücresi, çözelti, çalışma elektrotu olarak alüminyum numuneler (WE), referans elektrot olarak Doymuş Kalomel Elektrot (SCE) ve korozyon hız ölçümlerinde sisteme akım vermek için kullanılan yardımcı elektrot (AE) grafit çubuk'tan oluşmaktadır (Şekil 1). Korozyon testlerine maruz bırakılan yüzey alanı 0,785 cm<sup>2</sup> olarak bütün deneylerde sabit bir değerde tutuldu.



**Şekil 1.** Gamry marka Paintcell model üç elektrotlu elektrokimyasal korozyon test düzeneği kullanılarak açık devre potansiyeli, Polarizasyon eğrileri (Tafel extrapolasyonu) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümlerinin gerçekleştirildiği deneysel düzeneğin şematik görünümü

(Schematic view of Gamry's Paintcell three electrode system experimental set-up used to measure open-circuit potential, Tafel extrapolation and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements).

Açık devre potansiyeli (OCP) ölçümleri, her bir numune için çözeltiye maruz bırakılan numune yüzeyinin SCE referans elektroda göre yüzeydeki elektron denge durumunu (Steady state) tespit etmek amacıyla yaklaşık 67 dakika süreli olarak gerçekleştirildi. Ayrıca, bu ölçümlerde numune yüzeyinin denge koşullarına gelmesinin tespiti ile birlikte, polarizasyon ölçümü ve Elektro Kimyasal Empedans Spektroskopisi deneyleri gerçekleştirildi.

Polarizasyon ölçümleri,  $I_{kor}$  ve  $E_{kor}$  değerlerinin Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile elde edilebilmesi ve korozyon hızının mili inç/Yıl (mpy) cinsinden hesaplanabilmesi amacıyla, -0,5 V ilâ 0,5 V aralığında, 0,20 mV/s tarama hızında ve 25°C oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Ölçümlerin doğru ve tekrarlanabilirliğinden emin olmak için, her bir numunenin polarizasyon ölçümleri en az 3 defa tekrarlandı.

Elektrokimyasal Empedans (EIS) ölçümleri 0,01 – 100 kHz frekans aralığında ve alternatif akım (AC) kullanılarak, modifiye edilmiş 3003 alüminyum alaşım yüzeylerinin



polarizasyon direnci değerinin tespiti ve ardından da korozyon davranışının değerlendirilmesi amacıyla yapıldı. Empedans analizleri için Gamry'nin Elchem analiz programı kullanılmış ve elde edilen Bode ve Nyquist diyagramları değerlendirildi.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Elektrokimyasal Korozyon Testleri Öncesi Yüzey Karakterizasyonu Sonuçları

(Results of Surface Characterization Before Electrochemical Corrosion Tests)

Ticari olarak temin edilen 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn olarak isimlendirilen numuneler korozyon testleri öncesinde kimyasal olarak analiz edildiğinde, her üç numunenin de 3003 grubu alüminyum hadde alaşımı kompozisyonunun elementleri olan Al, Si, Fe, Mn, Cr ve Cu'ı Tablo 1'de gösterildiği oranlarda içerdiği belirtilmektedir. İlâveten, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin içerisinde ise sırasıyla % kütle olarak 1,49 ve 1,54 oranlarında çinko (Zn) elementinin varlığı tespit edildi. Buradaki çinko varlığı ergitme fırınında alaşımlamanın gerçekleştirilmesi sırasında çinko ilavesinin yapılmasından dolayıdır.

Elektrokimyasal korozyon testleri uygulanmadan önce ticari olarak ve bu çalışma ile üretilerek elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri, korozyon testlerinin yüzeye etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirildi. üç Boyutlu yüzey profilometresi ile gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük karakterizasyon çalışmalarında soğutmalı döküm (DC) ve ikiz merdane

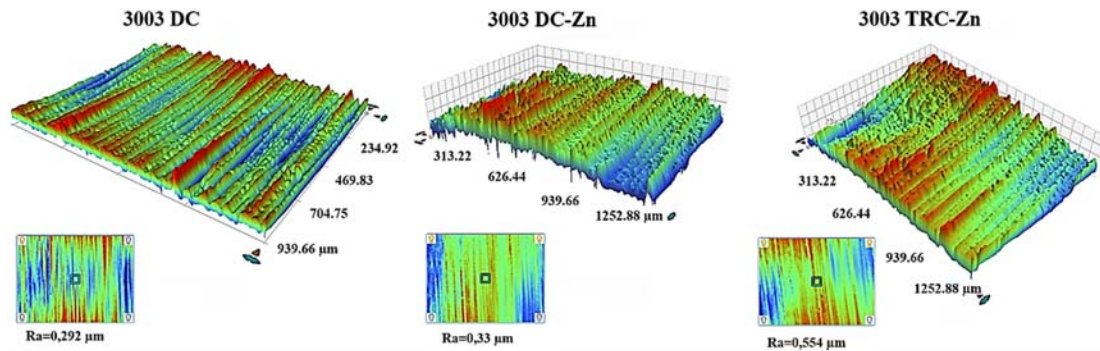
sürekli döküm (TRC) ile üretimin ve Zn elementinin ilavesi sonucunda elde edilen yüzeylerde yüzey pürüzlülüklerinin farklı olduğu tespit edilmiş olup, Şekil 2'de 3003 TRC-Zn alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğünün 0,554  $\mu\text{m}$ , 3003 DC-Zn'nun 0,33  $\mu\text{m}$  ve 3003 DC numunesinin 0,292  $\mu\text{m}$  oldukları gösterildi. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri göstermektedir ki Zn ilave edilen TRC ile üretilen alüminyum alaşımı numunelerin yüzey pürüzlülüğü değeri DC ile üretilen numunelere göre daha yüksektir. Dahası, DC ile üretilen numunelerden Zn ilave edilerek üretilen numunenin de yüzey pürüzlülüğü Zn ilavesiz olan alüminyum alaşımına göre daha yüksek olduğu da tespit edildi. Yüzey pürüzlülüklerinde gözlemlenen bu farklılığın üretim aşamasında uygulanan haddeleme işlemleri ve alaşım elementi çinko içeren 3003 alüminyum alaşımının uygulanan şekillendirme işlemlerine gösterdiği bir tepkiden kaynaklandığı düşünülebilir.

Ticari olarak elde edilen ve bu çalışma ile üretilen Zn ilavesi olan ve olmayan ve iki farklı üretim yöntemi ile üretilmiş 3003 alüminyum alaşımı folyo numunelerin üç boyutlu yüzey morfolojisi görünümü incelenmiş ve sonuçları Şekil 3'te gösterilmektedir. SEM karakterizasyonlarında numunelerin yüzeylerinde bulunan hadde izlerinin ve üretim işlem kademelerinden kaynaklanan yüzey çatlakları ve kirliliklerinin farklılıklar gösterdiği belirlendi. 3003 TRC-Zn numunelerin yüzeyinde ince hadde çizgilerinin olduğu ve yüzey pürüzlülüğünün yüzeyden dışarı doğru olan tepe bölgelerine çatlak şeklinde kanallı bir yüzey morfolojisinin olduğu belirlendi. 3003 DC-Zn numunenin ise yatay girinti-çıkıntı şeklinde bir yüzeye sahip olduğu ve haddeleme işlemi sırasında yüzeyden kopan alüminyum parçaların yüzeyde girinti ve çıkıntı bölgelerine rastgele dağılmış olduğu

**Tablo 1.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin elemental analiz sonuçları

(Elemental analysis results of 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples used in this study).

Numune	Element (% kütle)						
	Al	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Cu
3003 DC	97,76	0,441	0,39	1,28	0,008	0,0119	0,137
3003 DC-Zn	95,6	0,883	0,52	1,40	1,49	0,0702	0,0368
3003 TRC-Zn	95,5	0,885	0,53	1,45	1,54	0,0145	0,085



**Şekil 2.** Korozyon testleri öncesi modifiye edilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları ve temsili yüzey haritası

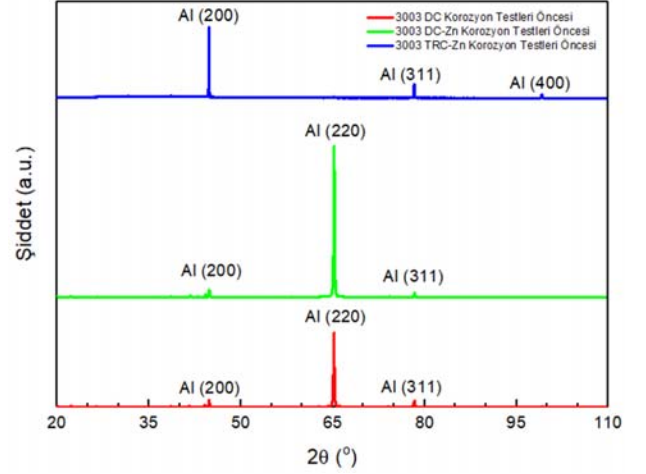
(Surface profiles and representative surface pitting view of 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples before corrosion tests).

belirlendi (Şekil 3). Dahası yüzeyde delik bölgelerin de varlığı tespit edilmiş olup, yüzeyden koparak ayrılan parçalar dolayısıyla bu boşluk bölgelerinin oluştuğu tahmin edilmektedir. 3003 DC numunelerde ise 3003 DC-Zn numunelerdekine benzer şekilde bir girinti-çıkıntı yüzey morfolojisi olduğu gözlemlenmiş olmakla birlikte yüzeyden kopan parçaların daha küçük boyutlarda olduğu tespit edildi (Şekil 3).

Tablo 2’de ticari olarak elde edilen ve bu çalışma ile üretilen 3003 grubu alüminyum alaşımlarının elektrokimyasal korozyon testleri öncesi yüzeylerinden elde edilen EDS sonuçları gösterilmektedir. 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn numunelerde 3003 grubu hadde alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementleri olan Al, Si ve Mn elementlerinin pik değerlerine rastlanmaktadır. Zn ilavesinin olduğu 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn numunelerinde ise sırasıyla kütlece yaklaşık 1,61 ve 1,69 oranlarında çinko elementinin pik değerleri tespit edildi. Elde edilen sonuçlar ile kimyasal kompozisyon analizi sonuçları arasında paralellik olduğu tespit edildi.

Şekil 4’te ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn isimli 3003 alüminyum alaşım numunelerine ait ve korozyon testleri öncesi gerçekleştirilen X-ışını kırınımı karakterizasyonu sonuçları gösterildi. X-ışını kırınımı ölçümleri sonucunda, her üç numunede de Al (200), (220) ve (311) fazlarına ait pik değerlerinin oluştuğu belirlendi. 3003 grubu alüminyum alaşımlarında bulunan diğer alaşım elementlerine ait pik değerleri, bu elementler kimyasal kompozisyonda alüminyum elementine göre çok düşük miktarlarda yer aldığı için gözlemlenemedi. Elde edilen pik değerlerinin şiddetlerinde farklılık olduğu gözlemlendi.

Şiddetlerde gözlemlenen farklılığın her üç numunenin de yüzeyinde meydana gelen  $Al_2O_3$  tabakasının kalınlığına bağlı olarak değiştiği düşünülebilir.

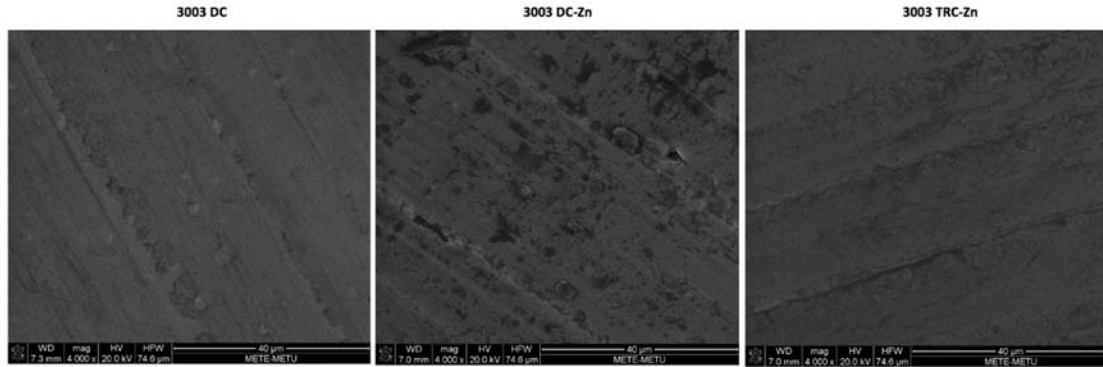


**Şekil 4.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu 3003 alüminyum alaşım numunelerinin korozyon testleri öncesi X-ışını kırınımı karakterizasyonu sonucu elde edilen faz dağılımı

(XRD patterns of the commercially available 3003 DC and modified 3003 DC-Zn, and modified 3003 TRC-Zn produced in this study aluminium alloys before corrosion tests).

### 3.2. Elektrokimyasal Korozyon Testleri Sonuçları (Electrochemical Corrosion Test Results)

Şekil 5 çinko ilaveli veya ilave edilmemiş ve doğrudan soğutmalı döküm veya ikiz merdaneli döküm tekniği ile

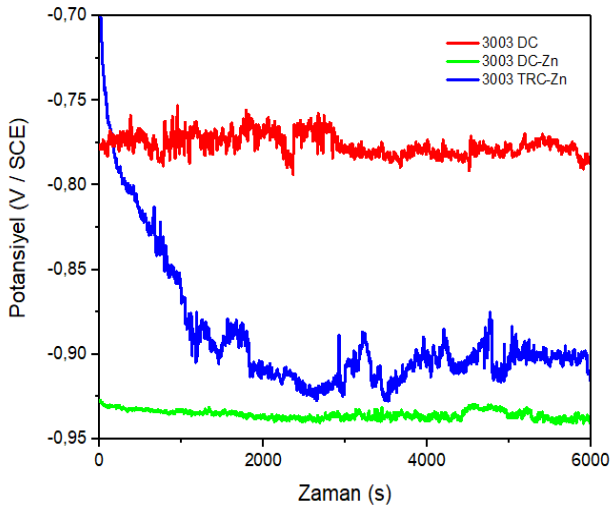


**Şekil 3.** Elektrokimyasal korozyon testleri öncesi 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin taramalı elektron mikroskobu yüzey görünümü  
(SEM surface captures of 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples before electrochemical corrosion tests)

**Tablo 2.** 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn numunelerinin korozyon testi öncesi EDS sonuçları  
(EDS results obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples before corrosion tests).

Numune	Element (% kütle)						
	Al	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Cu
3003 DC	98,31	0,31	-	1,38	-	-	-
3003 DC-Zn	96,18	0,49	-	1,72	1,61	-	-
3003 TRC-Zn	96,27	0,39	-	1,65	1,69	-	-

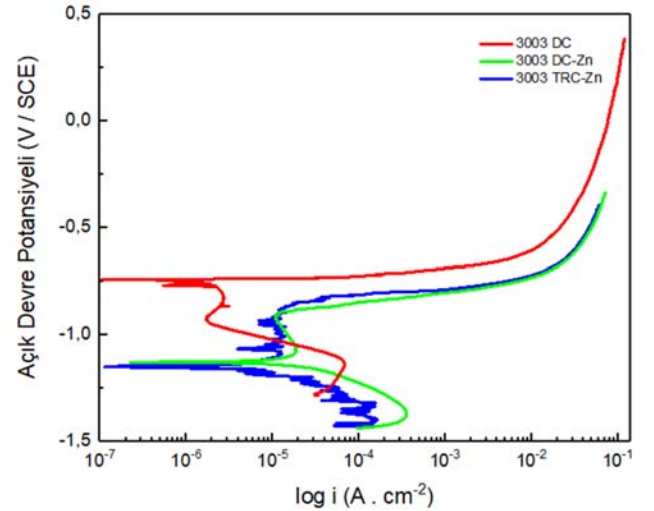
üretmiş 70 µm kalınlığa kadar inceltilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli alüminyum folyo numunelerinin açık devre potansiyeli grafiklerini göstermektedir. Numune yüzeyi 1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren tuzlu su çözeltisinde 6000 saniye (100 dakika) süreyle bekletilerek açık devre potansiyeli ölçümü gerçekleştirilmiş olup, referans SCE elektrotuna göre yüzeyde meydana gelen potansiyel değişim grafiği elde edildi (Şekil 5). Açık devre potansiyeli sonuçlarına göre, 3003 DC alüminyum numunenin yaklaşık -0,77 (V-SCE) değerinde, 3003 DC-Zn alüminyum numunenin yaklaşık -0,93 (V-SCE) ve 3003 TRC-Zn alüminyum numunenin de yaklaşık -0,90 (V-SCE) değerinde kararlı bir potansiyel değerine sahip olduğu gözlemlendi. Her üç numune de genel olarak negatif bir eğilim göstermekte olmakla birlikte, 3003 TRC-Zn numunesinin ilk 2000 saniye (yaklaşık 34 dakika) boyunca gözle görülür hızlı bir negatif eğilim gösterdiği tespit edildi. Bunun sebebi yüzeyde bulunan ince alüminyum oksit tabakadaki az miktarda meydana gelen çözünme olabilir. Her üç numunenin de yaklaşık 4000 saniye (67 dakika) sonra yüzey denge potansiyelinin dengeye geldiği ve koruyucu oksit tabakanın genel olarak yüzeyi kapladığı gözlenmektedir.



**Şekil 5.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin 100 dakika süresince 1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren sulu çözeltisinde açık devre potansiyeli ölçüm sonuçları

(Open-circuit potential measurement results recorded from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples in 1 molar aqueous solution including NaCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for a duration of 100 min).

Açık devre potansiyeli ölçümlerinin 100 dakika yapılması sonucu yüzey potansiyeli dengeye ulaşan numunelere öncelikle potansiyodinamik ölçüm 1 Molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren NaCl tuzlu su çözeltisinde yapılarak Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon hızı ölçümü gerçekleştirildi ve 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numuneler için Tafel eğrileri Şekil 6'da gösterildiği haliyle elde edildi. Sisteme dışarıdan akım uygulanmasının ardından numunelerin yüzeyinde oluşan potansiyel değişim grafiği olan Tafel eğrileri incelendiğinde, 3003 DC numunenin potansiyel değerinin yaklaşık olarak -0,74 (V-SCE) olduğu ve grafikte oluşan anodik bölgedeki hafif tepecik şeklindeki eğilimin numunenin yüzeyinde çukurcuk oluşumunun başladığını göstermektedir. Aynı şekilde, 3003 DC-Zn numunenin yaklaşık -1,1 (V-SCE) potansiyel değerinde olduğu ve çukurcuk oluşumunun başladığı potansiyel değeri olduğu ile 3003 TRC-Zn numunenin de potansiyel değerinin -1,15 (V-SCE) olduğu ve yine çukurcuk oluşum potansiyel değeri grafikte belirtildi.



**Şekil 6.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin 1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren sulu çözeltisinde elde edilen polarizasyon eğrileri sonuçları (Polarization curves obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after Tafel extrapolation measurements performed in 1 molar aqueous solution including NaCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren tuzlu su çözeltisinde potansiyodinamik testine tabi tutulan 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin elde edilen

**Tablo 3.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin 1 Molar NaCl ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren sulu çözeltisinde tespit edilen polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon davranışı sonuç değerleri

(Corrosion behaviour analysis results derived from the polarization curves obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after Tafel extrapolation measurements performed in 1 molar aqueous solution including NaCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

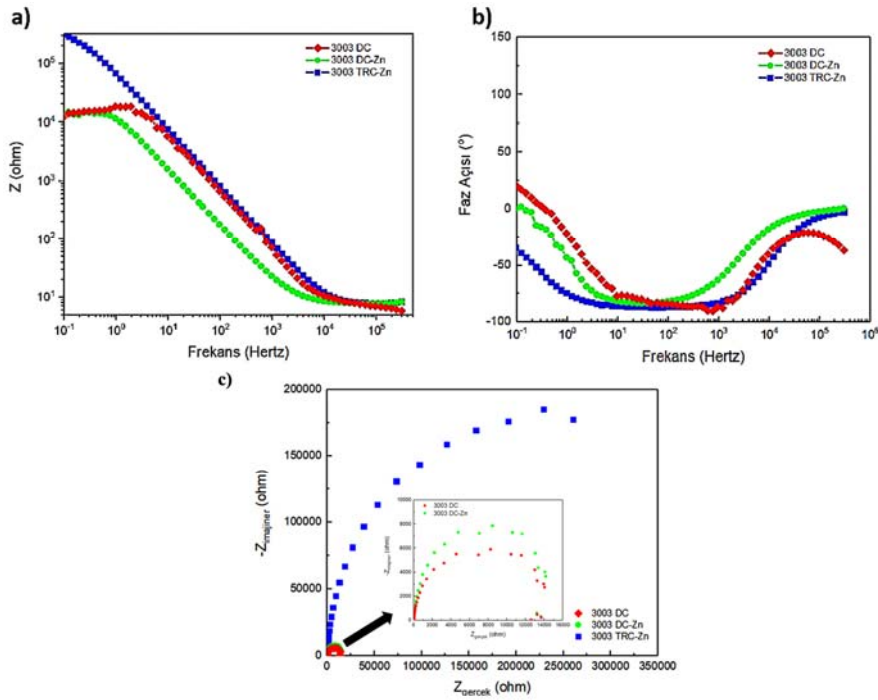
Numune Adı	E <sub>kor</sub> , (mV vs. SCE)	I <sub>kor</sub> , nA	β <sub>a</sub> , V/decade	β <sub>c</sub> , V/decade	Korozyon Hızı, mpy
3003 DC	-740	325	2,70 x 10 <sup>-3</sup>	58,50x10 <sup>-3</sup>	1660 x 10 <sup>-3</sup>
3003 DC-Zn	-1100	3820	55,70 x 10 <sup>-3</sup>	15,70 x 10 <sup>-3</sup>	1789x10 <sup>-3</sup>
3003 TRC-Zn	-1150	3850	318,4x10 <sup>-3</sup>	80,40x10 <sup>-3</sup>	1649

polarizasyon eğrilerinden elde edilen Tafel eğrilerinden hesaplanan korozyon potansiyeli, anodik ve katodik Tafel sabitleri, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır. Tablo 3'te gösterilen veriler dikkate alındığında, Zn ilavesinin 3003 grubu alüminyum alaşımın polarizasyon eğrisini daha negatif bir değere doğru indirdiği söylenebilir. Dahası, Zn ilave edilen DC üretim yöntemi ile elde edilen 3003 DC-Zn numunenin korozyon akım yoğunluk değerinin ( $I_{kor}$ : 325 nA) Zn ilavesi olmayan 3003 DC numuneye ( $I_{kor}$ : 3820 nA) göre gözle görülebilir seviyede yüksek olduğu tespit edildi (Tablo 3). Aynı şekilde, benzer artış korozyon hızı değerlerinde de gözlemlenmekte olup, 3003 DC numunenin korozyon hızı  $1660 \times 10^{-3}$  mpy (miles per year) iken; Zn ilaveli 3003 DC-Zn numunenin ise  $1789 \times 10^{-3}$  mpy olarak gözlemlendi (Tablo 3). Buradaki korozyon hızında meydana gelen artışın Zn ilavesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. İkiz merdane sürekli döküm üretim yönteminin 3003 grubu Zn ilaveli alüminyum alaşım numunelerin korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı üzerine etkisi yine Tablo 3'te gösterilmektedir. Tablo 3'teki veriler dikkate alındığında, 3003 TRC-Zn numunenin korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerlerinin sırasıyla, 3850 nA ve 1649 mpy olduğu gözlemlenmektedir. Bu değerler ile, doğrudan soğutmalı döküm (DC) ile üretilen 3003 DC-Zn numunenin korozyon akım yoğunluğu ( $I_{kor}$ : 3820 nA) ve korozyon hızı değerleri ( $1789 \times 10^{-3}$  mpy) dikkate alındığında hem akım yoğunluğu hem de korozyon hızı değerlerindeki artış tespit edilmektedir. Buradaki korozyon akım yoğunluğu ve hızındaki artışın ikiz merdaneli

sürekli döküm yöntemi ile üretilen Zn ilaveli numunenin yüzey pürüzlülüğünün 3003 DC-Zn numunenin yüzey pürüzlülüğüne göre daha fazla olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Empedans ölçümleri, 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numuneler için açık devre potansiyeli denge koşullarına eriştikten 6 dakika sonra gerçekleştirilmiş olup, 1 Molar  $H_2O_2$  içeren NaCl tuzlu su çözeltisinde elde edilen Bode ve Nyquist diyagramları Şekil 7'de gösterilmektedir. Bode diyagramları incelendiğinde, TRC ile üretilen ve Zn içeren 3003 TRC-Zn isimli numuneye ait  $Z(\omega)$  değerinin doğrudan soğutmalı döküm ile üretilen numunelere göre daha büyük, Faz açısı ( $^\circ$ ) değerinin ise küçük olduğu görülmektedir (Şekil 7a ve Şekil 7b). Aynı şekilde çinko ilave edilen doğrudan döküm ile üretilen 3003 DC-Zn numunesinin de  $Z(\omega)$  değerinin çinko içermeyen 3003 DC numunesine göre daha yüksek bir değerde olduğu; Faz açısı ( $^\circ$ ) değerinin ise daha düşük bir değerde olduğu tespit edildi (Şekil 7a ve Şekil 7b).

Şekil 7c'de 1 Molar  $H_2O_2$  içeren NaCl tuzlu su çözeltisinde elde edilen Nyquist grafikleri 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numuneler için sunulmaktadır. Bu grafiklere göre, 3003 TRC-Zn isimli numunenin Zimajiner ve Zgerçek değerlerinin 3003 DC-Zn ve 3003 DC numunelere göre daha yüksek olduğu, hatta 3003 DC-Zn numunenin değerinin de 3003 DC değerinden her iki değer için daha fazla olduğu tespit edildi (Şekil 7c). Dahası, Nyquist grafikleri incelendiğinde, birisi yüksekten orta



**Şekil 7.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu numunelerin 1 Molar NaCl ve  $H_2O_2$  içeren sulu çözeltisinde elde edilen Bode (a ve b) ve Nyquist (c) grafikleri (Bode (a and b) and Nyquist (c) plots obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after electrochemical impedance spectroscopy measurements performed in 1 molar aqueous solution including NaCl and  $H_2O_2$ ).



seviyeye kapasitatif diğeri de düşük frekanslarda indüktif olan iki zamanlı sabitler (two time constants) olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 7c). Sousa vd. [25], indüktif karakterli eğrilerin farklı sebeplerden meydana geldiğini belirtmektedir. Bu sebeplerden bazıları, arayüzeylerde yeralan oksijen varlığı, intermediate (arafaz) yapılarının açığa çıkması, çözeltide yer alan inhibitör varlığı ve çok aktif olarak meydana gelen korozyon mekanizmalarının olması olarak belirtilmekte ve indüktif karakterli eğrilerin anlamını açıklamada faydalı olabilmektedir. Bu çalışmada, Nyquist grafiğinde meydana gelen indüktif çevrimin, Zn ilavesi ve TRC üretim yöntemi kullanımı sebebiyle 3003 grubu alüminyum alaşımı üzerinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü ve oksit tabakası kaynaklı olduğu şeklinde değerlendirilmektedir. Elde edilen EIS sonuç verilerinin literatürde yeralan çeşitli çalışmalarda EIS sonuçlarında belirtilen alumina oksit tabakasının sahip olduğu kapasitatif çevrim [25-28] ve alumina tabakası arayüzeyinde yüzeye yerleşik olarak yer alan iyonların meydana getirdiği indüktif çevrimin olduğu Nyquist grafikleri ile uyumlu olduğu tespit edildi [24, 25, 29-31].

### 3.3. Elektrokimyasal Korozyon Testleri Sonrası Yüzey Karakterizasyonu Sonuçları

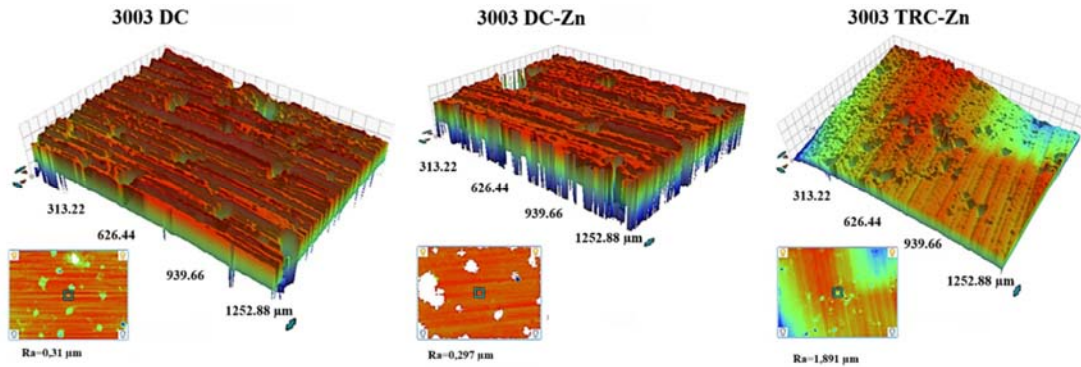
(Results of Surface Characterization After Electrochemical Corrosion Tests)

Bu çalışmada elektrokimyasal korozyon testlerinden korozyon hızı ve yüzey korozyon davranışı ile ilgili önemli seviyede bilgi elde edilmesini sağlayan Tafel ve empedans (EIS) ölçümleri gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, EIS ölçümleri hızlı ve yüzeyde meydana gelen çukurcuk oluşumlarını uzun süreli ölçümlerden sonra gözlemleyebileceğimiz bir yöntemdir. Bu sebepten dolayı, Tafel ölçümleri ile numunelerin yüzeylerinden aşırı seviyede akım geçmesini sağlayarak, numunelerin yüzeylerinde meydana gelen korozyon davranışını ve yüzey çukurcuk oluşumunu hızlı bir şekilde gözlemlemek mümkün olmuş olup, potansiyodinamik (Tafel) ölçümleri sonrası elde edilen yüzeylerin üç boyutlu yüzey pürüzlülük ölçüm ve görünüm sonuçları Şekil 8'de gösterilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri sonucuna göre, her üç numunenin de yüzey pürüzlülüklerinde gözle görülür bir artış tespit edildi. Dahası

3003 TRC-Zn numunesinin yüzey pürüzlülük değeri yaklaşık olarak dört kat artarak, 0,554  $\mu\text{m}$ 'den 1,891  $\mu\text{m}$ 'a ulaştı. Öte yandan, Şekil 8'de de açıkça görülmektedir ki çinko ilavesinin olduğu her iki numunenin yüzeyinde oluşan çukurcukların sayısı ve büyüklükleri çinko ilavesinin olmadığı numuneye göre daha fazladır. Çinko ilave edilmiş ve doğrudan soğutmalı döküm yöntemi ile üretilen 3003 DC-Zn numunesinin yüzeyinde meydana gelen çukur boyutları ise 3003 DC isimli doğrudan soğutmalı döküm yöntemi ile üretilen numuneye göre daha büyük olduğu tespit edildi. Khan vd., kurban anot (aktif metal) olarak kullanılan alüminyum alaşımına çinko elementi ilavesinin alaşımın korozyon direncini azalttığı ve korozyon hızını artırdığını tespit etti [26].

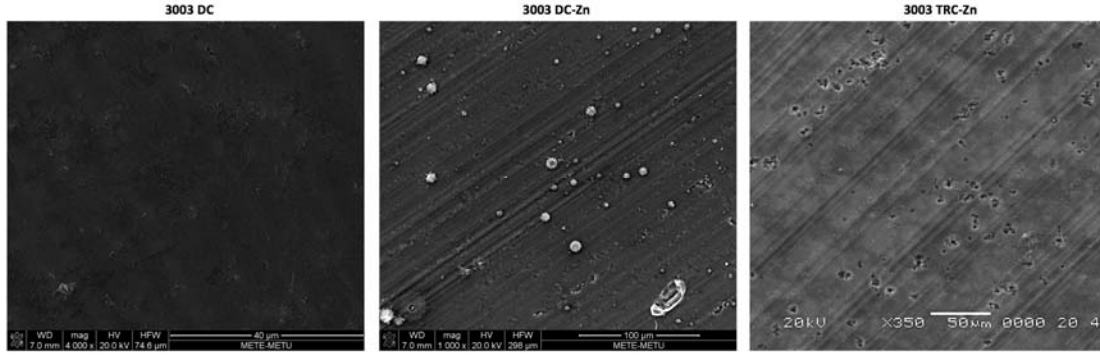
Potansiyodinamik (Tafel) elektrokimyasal korozyon testi sonucu elde edilen ve korozyona uğramış 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 9'da sunulan SEM karakterizasyonu görüntülerine göre, her bir numunede hadde izlerinin olduğu bölgeler potansiyel korozyon oluşum yerleri olarak gözlemlenmiştir. SEM karakterizasyonu sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğünde de gözlemlendiği gibi en fazla çukurcuk oluşumu 3003 TRC-Zn numunenin yüzeyinde meydana geldi (Şekil 9). 3003 DC-Zn isimli doğrudan soğutmalı döküm yöntemi ile üretilen ve çinko elementi ilave edilen numune yüzeyinde çinko elementi ilave edilmemiş 3003 DC numune yüzeyine göre daha nispeten daha büyük çukurcuk oluşumu gözlemlendi.

Elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda elde 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin yüzeylerinde meydana gelen korozyon oluşumu ürünler ve her bir numunenin yüzeyinden elde edilen EDS sonuçları % kütle cinsinden Tablo 4'te sunulmaktadır. EDS sonuçlarına göre, 3003 grubu hadde alüminyum alaşımının temel alaşım elementleri olan Al, Si, Mn elementlerine ait pik değerleri Tablo 4'te belirtildiği oranlarda tespit edildi (Tablo 4). Ayrıca, tuzlu su çözeltilisinin bileşenleri olan Na ve Cl elementleri de EDS ölçümlerinde gözlemlendi (Tablo 4). Burada tespit edilen Na ve Cl elementlerinin çukurcuk içinde kalan ve dışarıya çıkıp yüzeyde kalan elementler olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 8. Korozyon testleri Sonrası modifiye edilmiş 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları ve temsili yüzey haritası

(Surface profiles and representative surface pitting view of 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after corrosion tests).



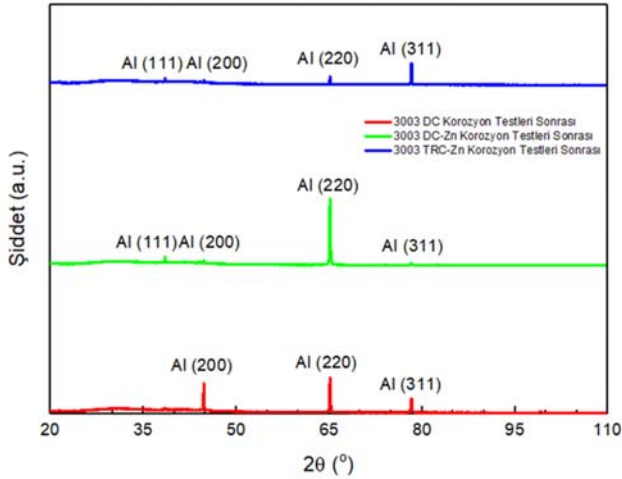
**Şekil 9.** Elektrokimyasal korozyon testleri sonrası 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin taramalı elektron mikroskobu yüzey görünümü

(SEM surface captures of 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after electrochemical corrosion tests).

**Tablo 4.** 3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn numunelerin korozyon testi sonrası EDS sonuçları  
(EDS results obtained from 3003 DC, 3003 DC-Zn and 3003 TRC-Zn samples after corrosion tests).

Numune	Element (% kütle)								
	Al	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Cu	Na	Cl
3003 DC	95,94	0,46	-	2,03	-	-	-	0,75	0,82
3003 DC-Zn	67,98	-	-	-	-	-	-	7,39	24,63
3003 TRC-Zn	94,37	0,46	-	1,48	1,77	-	-	0,45	1,48

3003 DC, 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn isimli numunelerin yüzeylerine elektrokimyasal korozyon testleri uygulandıktan sonra korozyona maruz bırakılan yüzeylerdeki elementlerin faz dağılımını gösteren X-ışını kırınım desenleri ölçüm sonuçları Şekil 10'de sunulmaktadır.



**Şekil 10.** Ticari olarak temin edilen modifiye edilmiş, 3003 DC, 3003 DC-Zn isimli ve bu çalışma ile üretilen 3003 TRC-Zn kodlu 3003 alüminyum alaşım numunelerinin korozyon testleri sonrası X-ışını kırınım karakterizasyonu sonucu elde edilen faz dağılımı

(XRD patterns of the commercially available 3003 DC and modified 3003 DC-Zn, and modified 3003 TRC-Zn produced in this study aluminium alloys after corrosion tests).

XRD sonuçlarına göre, sadece alüminyum elementine ait (111), (220) ve (311) düzlemlerine ait pikler tespit edildi.

1994

Çinko elementi ilave edilen 3003 DC-Zn ve 3003 TRC-Zn numunelerde Al (111) piki çinko ilave edilmemiş numuneden farklı olarak tespit edildi (Şekil 10). Ayrıca, Korozyon testleri sonrası XRD piklerinin şiddetinin korozyon testleri öncesine göre gözle görülür seviyede düşük olmasının sebebinin korozyon sonrası yüzeyde meydana gelen  $Al_2O_3$  oksit tabakasının kalınlığının fazla miktarda olması tahmin edilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geleneksel elektrokimyasal yöntemler olarak tanımlanan açık devre potansiyeli ölçümü (OCP), potansiyodinamik (Tafel polarizasyon) yöntemi (TP) ve ileri seviye elektrokimyasal yöntem olan elektrokimyasal empedans ölçümü (EIS) kullanılarak 1 Molar  $H_2O_2$  içeren NaCl tuzlu su çözeltisinde yapılan çalışmalar ve korozyon testleri öncesi ve sonrası gerçekleştirilen yüzey karakterizasyon incelemeleri sonucunda elde edilen bulgular ayrıntılı olarak ele alınıp, aşağıdaki maddeler halinde sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Açık devre potansiyeli ölçümleri sonucunda, TRC yöntemi ile üretilen numunenin Zn ve üretim yönteminden dolayı yüzeyindeki potansiyel dengeye ulaşması için yaklaşık 34 dakika kadar sürenin geçmesi gerektiği tespit edilmiş olup, bu durumun da numunenin yüzeyindeki korozyona karşı direnci düşük olduğunu gösterdiği belirtildi.
- Tafel polarizasyon yöntemi (TP) ve EIS yöntemleri ile elde edilen elektrokimyasal korozyon hız ölçümlerinden elde edilen veriler birbirini destekler nitelikte olduğu ve çalışılan üç farklı ticari olarak kullanılan 3003 grubu

alüminyum alaşımından ikiz merdane yöntemi (TRC) ile üretilen ve bünyesinde Zn bulunan alaşımın korozyon davranışının ve hızının en fazla olduğu gösterildi.

- üç boyutlu yüzey profilometre ve SEM analizleri, 3003 TRC-Zn numunelerinin yüzey hadde izlerinin sık ve yüzey pürüzlülüğünün diğer numunelere göre daha belirgin ve fazla olduğunu göstermekle birlikte böyle bir yüzeyin korozyona karşı direncinin düşük olduğunu gösterdi.
- Kimyasal analiz, XRD ve EDS analiz sonuçları 3003 grubu alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonlarını tespit etmiş olup, yüzeyde meydana gelen  $Al_2O_3$  ince film tabakasının korozyon testleri sonucunda daha kalın bir şekilde meydana geldiğini gösterdi.
- Bu çalışma ile otomotiv sektöründe ısı ejanjörü finstok yapı malzemesi olarak Zn içeren ve TRC yöntemi üretilen 3003 grubu alüminyum folyo alaşımların aktif metal alaşım malzemesi olarak daha fazla kullanılabilirliğinin önu açılmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma; Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje No: 172L05) tarafından desteklendi. Ayrıca, Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ile ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarları teknik imkânları da kullanıldı. Değerli katkılarından dolayı, Prof. Dr. Cevat Sarıoğlu, Araştırma görevlisi Yüksek mühendis Taha Yasin Eken ve Araştırma Görevlisi Cemre Metin Poyraz'a teşekkür ediyoruz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sanders R. E., Continuous casting for aluminum sheet: a product perspective. *JOM*, 64 (2), 291-301, 2012.
2. Wang, J., Zhou, X., Thompson, G. E., Hunter, J. A., Yuan, Y., Near-surface microstructure on twin-roll cast 8906 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46 (6), 2688-2695, 2015.
3. Imamura, T., Shingaki, Y., Hayakawa, Y., Effect of cold rolling reduction rate on secondary recrystallized texture in 3 Pct Si-Fe steel. *Metallurgical and materials transactions A*, 44 (4), 1785-1792, 2013.
4. Kaya M., Performance analysis of a heat exchanger having slotted tube fins, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 421 – 438, 2019.
5. Delijić, K., Markoli, B., Naglič, I., The influence of the chemical composition on the corrosion performances of some Al-Fe-Si, Al-Mg-Si and Al-Mg-Mn type of alloys. *Metallurgical and Materials Engineering*, 20 (4), 217-234, 2014.
6. Liu, B., Zhang, X., Zhou, X., Hashimoto, T., Wang, J., The corrosion behaviour of machined AA7150-T651 aluminum alloy. *Corrosion Science*, 126, 265-271, 2017.
7. Le, H., Sutcliffe, M., Analysis of surface roughness of cold-rolled aluminium foil. *Wear*, 244 (1-2), 71-78, 2000.
8. Birol, F., Birol, Y., Corrosion of twin belt and twin roll cast AlMg3Mn alloys. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 49 (3), 228-235, 2014.
9. Görtan M.O., Türkbaş O.S., Yılmaz K.B., Yıldırım B., Investigation of cold extrusion process by coupled thermo-mechanical finite element analysis, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 323-336, 2020.
10. Kikkawa, T., New rolling method of reversing cold rolling mill. *Proc. AISTech.*, 1780, 1771, 2012.
11. Kawahara, A., Niikura, A., Doko, T., Development of aluminum alloy fin stock for heat exchangers using twin-roll continuous casting method. *Furukawa Review*, 24, 81-87, 2003.
12. Barekar, N., Dhindaw, B., Twin-roll casting of aluminum alloys—an overview. *Materials and Manufacturing Processes*, 29 (6), 651-661, 2014.
13. Kılıç S., Kaçar İ., Öztürk F., New trend in aerospace industry: Al-Li based alloys, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 275-296, 2019.
14. Belkhaouda, M., Bazzi, L., Salghi, R., Jbara, O., Benhachmi, A., Hammouti, B., Douglad, J., Effect of the heat treatment on the behaviour of the corrosion and passivation of 3003 aluminium alloy in synthetic solution, *J. Mater. Environ. Sci.* 1 (1), 25-33, 2010.
15. Chen, X., Tian, W., Li, S., Yu, M., Liu, J., Effect of temperature on corrosion behavior of 3003 aluminum alloy in ethylene glycol–water solution. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29 (4), 1142-1150, 2016.
16. Janssen, H., Bermig, G., Saß, V., Schlüter, S., Heat Exchanger, Use of an Aluminium Alloy and of an Aluminium Strip as well as a Method for the Production of an Aluminium Strip. U.S. Patent Application No. 15/603,714.: 2017.
17. Gras, C., Meredith, M., Hunt, J., Microdefects formation during the twin-roll casting of Al–Mg–Mn aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (1), 62-72, 2005.
18. Ulus, A., İpek, S. K., Ekici, H., Öter, Z. Ç., Koç, E. Investigation of Elemental Distribution in the Sheet Sections After Aluminum Continuous Sheet Casting, Cold Rolling and Heat Treatment Processes, TMS Annual Meeting & Exhibition, Springer., 959-969, 2018.
19. Dündar, M., Günyüz, M., Işıksaçan, C., Pastırmacı, A. Effect of Zn content and process parameters on corrosion behaviour of twin-roll cast aluminum brazing alloys. *Light Metals*, 361-364, 2016.
20. İpek, S. K., Ulus, A., Ekici, H., Ağaoğlu, G. H., Orhan, G. In Continuous Casted Aluminum Flat Products Corrosion Characteristic According to Downstream Process, TMS Annual Meeting & Exhibition, Springer: 2018, pp 943-952.
21. Yang, H., Gao, Y., Qin, W., Ma, S., Wei, Y., Investigation of corrosion behavior of 3003 aluminum alloy in flue gas condensate. *Materials and Corrosion*, 68 (6), 664-673, 2017.

22. Bordo, K., Gudla, V. C., Peguet, L., Afseth, A., Ambat, R., Electrochemical profiling of multi-clad aluminium sheets used in automotive heat exchangers. *Corrosion Science*, 131, 28-37, 2018.
23. Polat, B., Timur, S., Keleş, Ö., Çinko-alüminyum alaşımından üretilmiş döküm parçalarının korozyon direncine bakır kaplama proseslerinin etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1 (3), 103-113, 2013.
24. Uslu, E., Çatar, R., Çolak, M., Si ve Cu elementleri içeren alüminyum döküm alaşımlarının korozyon özelliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması. *Sciences (NWSAENS)*, 12 (3), 133-140, 2017.
25. de Souza, S., Yoshikawa, D., Izaltino, W., Assis, S., Costa, I., Nanostructured surface pre-treatment based on self-assembled molecules for corrosion protection of Alclad 7475-T761 aluminum alloy. *Materials and Corrosion*, 62 (10), 913-919, 2011.
26. Khan, B., Rosli, M., Jahidi, H., Ishak, M. I., Zakaria, M., Jamalludin, M. R., Khor, C., Faizal, W., Rahim, W., Nawi, M. In Effect of zinc addition on the performance of aluminium alloy sacrificial anode for marine application, *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing: 020074, 2017.
27. Telegdi, J., Szabó, T., Al-Taher, F., Pfeifer, É., Kuzmann, E., Vértes, A. Coatings against corrosion and microbial adhesion. *Materials and Corrosion*, 61 (12), 1000-1007, 2010.
28. Kelechukwu, B. O., Israel, O. O., Emeka, E. O., Ihebrodike, M. M., Lebe, N. The effects of heat treatment on the electrochemical properties and corrosion of aluminium alloy AA8011 in an aqueous acid media. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 5, 17-31, 2014.
29. Brett, C., Brett, A. M. O. *Electrochemistry: principles, methods, and applications*. No. 544.6 BRE. Oxford University Press, New York, USA, 1993.
30. Lambros, K., Pebere, N., Koutsoukos, P. G. Study of the electrochemical behaviour of the 7075 aluminum alloy in the presence of sodium oxalate. *Corrosion Science*, 41 (5), 941-957, 1999.
31. Aokia, I. V., M. C, Bernard, de Torresi, S. I. C., Deslouis, C., de Melo, H. G., Joiret, S., Tribollet, B. Ac-impedance and raman spectroscopy study of the electrochemical behaviour of pure aluminium in citric acid media. *Electrochimica Acta*, 46 (12), 1871-1878, 2001.