

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA  
BOR ve STRONSIYUM İLAVESİNİN Cr<sup>3+</sup> DÖNÜŞÜM KAPLAMASI SONRASI  
KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Berkay SAVAŞKAN**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı**

**EKİM 2022**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA  
BOR ve STRONSIYUM İLAVESİNİN Cr<sup>3+</sup> DÖNÜŞÜM KAPLAMASI SONRASI  
KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Berkay SAVAŞKAN  
(521191003)**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özgül KELEŞ**

**EKİM 2022**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 521191003 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Berkay SAVAŞKAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA BOR ve STRONSIYUM İLAVESİNİN  $Cr^{3+}$  DÖNÜŞÜM KAPLAMASI SONRASI KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Özgül KELEŞ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Gökhan ORHAN** .....  
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

**Doç. Dr. Billur Deniz KARAHAN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi: 24 Kasım 2022**  
**Savunma Tarihi: 26 Ekim 2022**





*Anne, babama ve eşime,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını, bilgi, birikim ve desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Özgül Keleş'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmamı beraber yürüttüğüm ve 3 yıldır bir parçası olduğum Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş.' den başta üretim koordinatörü Sayın Muammer Mutlu'ya,  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması ve karakterizasyon işlemlerindeki yardımlarından dolayı Sayın Onur Özcan'a ve proje ekibime teşekkür ederim. Tez sürecimde, desteklerini esirgemeyen Ar. Gör. İpek Tunç'a teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübesiyle tezimin oluşmasındaki katkılarından dolayı değerli meslektaşım yüksek malzeme mühendisi Yekta Berk Süslü 'ye çok teşekkür ederim.

Elektrokimyasal deneylerimi gerçekleştirmemde bilgisini, tecrübesini ve teçhizatlarını paylaşan Doç. Dr. Deniz Billur Karahan'a ve deneylerin gerçekleştirilmesinde desteğini esirgemeyen Mehmet Feryat Gülcan'a ve Humza' ya teşekkürü bir borç bilirim. SEM & EDS analizlerindeki desteklerinden ötürü Arçelik Ar-Ge birimine ve Burçin Bilici'ye teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca benim her zaman yanımda olan sevgili aileme, arkadaşlarıma ve bu süreçte manevi desteğini benden esirgemeyen sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2022

Berkay SAVAŞKAN  
Metalurji ve Malzeme Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                               |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                                    | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                             | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                             | xi   |
| SEMBOLLER .....                                                               | xiii |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                          | xv   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                            | xvii |
| ÖZET.....                                                                     | xxi  |
| SUMMARY .....                                                                 | xxv  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                | 1    |
| 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE KOROZYON .....                                     | 3    |
| 2.1 Alüminyum, Üretimi ve Özellikleri .....                                   | 3    |
| 2.2 Alüminyum Alaşımları.....                                                 | 6    |
| 2.2.1 Yoğrulabilir alüminyum alaşımları.....                                  | 6    |
| 2.2.2 Döküm alüminyum alaşımları .....                                        | 7    |
| 2.2.3 Al-Si alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme .....                 | 9    |
| 2.2.4 Al-Si alüminyum döküm alaşımlarında ötektik modifikasyonu.....          | 9    |
| 2.2.5 Alüminyumun alaşımlarının kullanım alanları.....                        | 10   |
| 2.2.6 Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine göre kodlandırılması .... | 11   |
| 2.3 Döküm Alüminyum Alaşımları Üretim Yöntemleri .....                        | 12   |
| 2.3.1 Alçak basınçlı döküm tekniği .....                                      | 13   |
| 2.3.2 Yüksek basınçlı döküm tekniği (high pressure die casting) .....         | 13   |
| 2.4 Korozyon ve Korozyonun Mühendislikte Yeri .....                           | 15   |
| 2.4.1 Korozyon çeşitleri.....                                                 | 16   |
| 2.5. Dönüşüm Kaplamaları (Conversion Coating) .....                           | 18   |
| 2.5.1 Cr <sup>3+</sup> dönüşüm kaplaması (trivalent chromium process) .....   | 19   |
| 2.6 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Korozyonu.....                              | 21   |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                                   | 25   |
| 3.1 Numune Dökümü .....                                                       | 25   |
| 3.1.1 Numune kalıbı .....                                                     | 25   |
| 3.1.2 Malzeme özellikleri .....                                               | 25   |
| 3.1.3 Döküm denemeleri.....                                                   | 25   |
| 3.1.4 Metalografik ve morfolojik karakterizasyon işlemleri .....              | 27   |
| 3.1.5 Elektrokimyasal karakterizasyon işlemleri.....                          | 27   |
| 3.2 Dönüşüm Kaplaması (Conversion Coating) Deneyleri.....                     | 29   |
| 3.3 Doğal Tuz Püskürtme Testi (NSS Test) Uygulaması.....                      | 30   |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....                                         | 31   |
| 4.1 Metalografik ve Morfolojik Karakterizasyon Sonuçları .....                | 31   |
| 4.1.1 AlSi9Cu3 optik mikroskop görüntüleri .....                              | 31   |
| 4.1.2 AlSi9Cu3 mikroyapı faz analizi .....                                    | 32   |
| 4.1.3 AlSi10Mg optik mikroskop görüntüleri .....                              | 33   |
| 4.1.4 AlSi10Mg mikroyapı faz analizi .....                                    | 35   |
| 4.1.5 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının tane boyutu analizi .....            | 36   |

|                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.6 AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri .....                                                     | 37        |
| 4.2 SEM ve EDS Analizi Sonuçları.....                                                                                         | 37        |
| 4.2.1 AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin SEM EDS sonuçları .....                                                                  | 37        |
| 4.2.2 AlSi10Mg alaşımı numunelerinin SEM- EDS sonuçları .....                                                                 | 40        |
| 4.3 Açık Devre Potansiyeli Ölçümleri.....                                                                                     | 42        |
| 4.3.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numuneleri.....                                                                                  | 42        |
| 4.3.2 AlSi10Mg alaşımı döküm numuneleri.....                                                                                  | 43        |
| 4.3.3 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numuneleri .....                                                                         | 44        |
| 4.3.4 AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numuneleri .....                                                                         | 44        |
| 4.4 Çevrimsel Voltametri (CV) Deneyi Sonuçları .....                                                                          | 45        |
| 4.4.1 AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin CV analiz sonuçları .....                                                                | 46        |
| 4.4.2 AlSi10Mg alaşımı numunelerinin CV analizi sonuçları .....                                                               | 50        |
| 4.5 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Deneyi Sonuçları .....                                                      | 50        |
| 4.5.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin EIS deneyi sonuçları .....                                                         | 51        |
| 4.5.2 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin EIS deneyi sonuçları...                                                    | 53        |
| 4.5.3 AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin EIS deneyi sonuçları .....                                                         | 53        |
| 4.5.4 AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin EIS deneyi sonuçları..                                                     | 54        |
| 4.6 Tafel Ekstrapolasyon Deneyleri Sonuçları .....                                                                            | 55        |
| 4.6.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonuçları.....                                                        | 56        |
| 4.6.2 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonuçları                                                     | 61        |
| 4.6.3 AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonuçları .....                                                       | 65        |
| 4.6.4 AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonuçları.....                                                        | 68        |
| 4.6.5 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm ve TCP kaplanmış numunelerin<br>Tafel deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 71        |
| 4.7 Tuz Testi (NSS) Sonuçları.....                                                                                            | 72        |
| 4.7.1 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg döküm numunelerinin tuz testi sonuçları .....                                                      | 73        |
| 4.7.2 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerin tuz testi sonuçları.                                                     | 74        |
| 4.8 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg Döküm Numunelerinin Karakterizasyon Sonuçlarının<br>Değerlendirilmesi .....                          | 75        |
| 4.9 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg TCP Kaplanmış Numunelerinin Karakterizasyon<br>Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                  | 78        |
| <b>5. GENEL SONUÇLAR .....</b>                                                                                                | <b>81</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                         | <b>85</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                                         | <b>91</b> |

## KISALTMALAR

|                   |                                                           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Al</b>         | :Alüminyum                                                |
| <b>B</b>          | : Bor                                                     |
| <b>B ilaveli</b>  | : AlB3 ön alaşım ilaveli                                  |
| <b>CV</b>         | : Çevrimsel Voltametri                                    |
| <b>EDS</b>        | : Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy                    |
| <b>EIS</b>        | : Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi                 |
| <b>Fe</b>         | : Demir                                                   |
| <b>Mg</b>         | : Magnezyum                                               |
| <b>Normal</b>     | : Ön alaşım ilavesiz numune                               |
| <b>OEM</b>        | : Orijinal Ekipman Üreticileri                            |
| <b>SEM</b>        | : Scanning Electron Microscope                            |
| <b>Sr</b>         | : Stronsiyum                                              |
| <b>Sr ilaveli</b> | : AlSr15 ön alaşım ilaveli                                |
| <b>Si</b>         | : Silisyum                                                |
| <b>TCP</b>        | : 3 Değerlikli Krom (Cr <sup>3+</sup> ) Dönüşüm Kaplaması |



## SEMBOLLER

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| $\alpha$      | : Primer Fazı                |
| $\beta$       | : İkinci Primer Faz          |
| $\beta_a$     | : Anodik Tafel Eğimi         |
| $\beta_c$     | : Katodik Tafel Eğimi        |
| $C_{dl}$      | : Çift katman kapasitansı    |
| $C_{kaplama}$ | : TCP kaplama kapasitansı    |
| $\Theta_{Cu}$ | : Elektroaktif bakır miktarı |
| $E_{oc}$      | : Açık Devre Potansiyeli     |
| $I_{corr}$    | : Korozyon Akımı             |
| $R_s$         | : Çözelti Direnci            |
| $R_p$         | : Polarizasyon Direnci       |
| $R_{kaplama}$ | : TCP kaplama direnci        |
| $R_{ct}$      | : Yük Transfer Direnci       |
| $R_z$         | : Yüzey pürüzlülük ölçüsü    |
| $v_{corr}$    | : Korozyon hızı              |
| $\chi^2$      | : Hata                       |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 : Alüminyumun özellikleri [12].                                                                                                                                        | 6  |
| Çizelge 2.2 : Yoğrulabilir alüminyum alaşımlarının kodlandırılması [4].                                                                                                            | 6  |
| Çizelge 2.3 : Döküm alüminyum alaşım serileri ve ısıtım işlem uygulanabilirliği [5].                                                                                               | 7  |
| Çizelge 2.4 : Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere özgü kodlamaları ve anlamları [4].                                                                                       | 11 |
| Çizelge 2.5 : Farklı döküm yöntemlerinin özelliklere göre kıyaslanması [23].                                                                                                       | 12 |
| Çizelge 2.6 : Yüksek basınçlı döküm yöntemi avantaj ve dezavantajları [25].                                                                                                        | 13 |
| Çizelge 2.7 : Korozyon maliyetinin bazı unsurları [29].                                                                                                                            | 16 |
| Çizelge 3.1 : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg kimyasal analiz sonuçları (ağ.%).                                                                                                               | 25 |
| Çizelge 3.2 : Numune döküm kodları ve ön alaşım ilaveleri.                                                                                                                         | 26 |
| Çizelge 3.3 : Kromat dönüşüm (TCP) kaplaması proses akışı ve banyo kompozisyonu & parametreleri.                                                                                   | 29 |
| Çizelge 4.1 : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı ön alaşım ilavesiz, B ilaveli Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin döküm ve TCP kaplama sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları. | 37 |
| Çizelge 4.2 : AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin E <sub>OCP</sub> değerleri.                                                                                                           | 43 |
| Çizelge 4.3 : AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin E <sub>OCP</sub> değerleri.                                                                                                     | 43 |
| Çizelge 4.4 : AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin E <sub>OCP</sub> değerleri.                                                                                             | 44 |
| Çizelge 4.5 : AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr ilaveli numunelerinin E <sub>OCP</sub> değerleri.                                               | 45 |
| Çizelge 4.6 : AlSi9Cu3 numunelerinin yağ alma & aşındırma uygulanmış yüzeylerinin elektroaktif bakır miktarları.                                                                   | 48 |
| Çizelge 4.7 : AlSi9Cu3 numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektro-kimyasal parametreler.                                                                               | 52 |
| Çizelge 4.8 : AlSi10Mg numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektro-kimyasal parametreler.                                                                               | 53 |
| Çizelge 4.9 : AlSi10Mg numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektro-kimyasal parametreleri.                                                                              | 54 |
| Çizelge 4.10 : AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.                                                                | 55 |
| Çizelge 4.11 : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alüminyum alaşımları için korozyon hızı hesabında kullanılan denklem 4.3'deki terimlerin değerleri.                                            | 56 |
| Çizelge 4.12 : AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.                     | 57 |
| Çizelge 4.13 : AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.       | 63 |
| Çizelge 4.14 : AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri.    | 67 |

|                                                                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Çizelge 4.15</b> : AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri. .... | <b>69</b> |
| <b>Çizelge 4.16</b> : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri. ....   | <b>72</b> |
| <b>Çizelge 4.17</b> : Tuz testi uygulanan AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı numuneleri ve numune kodları. ....                                                                                                 | <b>72</b> |
| <b>Çizelge 4.18</b> : AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin 840 saat sonrası ağırlık değişimleri. ....                                                                                         | <b>74</b> |
| <b>Çizelge 4.19</b> : AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerin 840 saat sonrası ağırlık değişimleri. ....                                                                                   | <b>75</b> |
| <b>Çizelge 4.20</b> : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerine uygulanan karakterizasyon işlemlerinin sonuçları. ....                                                                              | <b>77</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Alüminadan alüminyum üretimi ve geri dönüşüm döngüsü [5].....                                                                                                                               | 3  |
| Şekil 2.2 : Hall-Heroult Prosesinin Şematik Görüntüsü [7]. ....                                                                                                                                         | 4  |
| Şekil 2.3 : 1995-2021 dünya primer alüminyum üretimi (milyon ton) [10].....                                                                                                                             | 5  |
| Şekil 2.4 : Bölgelere göre dünya primer alüminyum üretimi (milyon ton) [10]. ....                                                                                                                       | 5  |
| Şekil 2.5 : 800 °C’ de ağırlık % silisyum miktarına göre Al-Si alaşımının akıcılığı [14].                                                                                                               | 8  |
| Şekil 2.6 : Döküm alüminyum alaşımları mikroyapı örnekleri; .....                                                                                                                                       | 8  |
| Şekil 2.7 : Al-Si alaşımlarının AlB <sub>3</sub> tane inceltme mekanizması [20].....                                                                                                                    | 9  |
| Şekil 2.8 : Üretim hızına ve döküm ağırlığına bağlı olarak, döküm proseslerinin karşılaştırılması [23]. ....                                                                                            | 12 |
| Şekil 2.9 : Alçak basınçlı döküm makinesi şeması [23].....                                                                                                                                              | 13 |
| Şekil 2.10 : Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi şeması [26]. ....                                                                                                                            | 14 |
| Şekil 2.11 : Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinin şeması [26].....                                                                                                                          | 14 |
| Şekil 2.12 : Korozyon döngüsü [28].....                                                                                                                                                                 | 15 |
| Şekil 2.13 : Oyuklanma korozyonu şematik gösterimi [34]. ....                                                                                                                                           | 16 |
| Şekil 2.14 : Oyuklanma korozyonu çeşitleri [32].....                                                                                                                                                    | 17 |
| Şekil 2.15 : Nötral ortamda gerçekleşen korozyon mekanizması [31].....                                                                                                                                  | 17 |
| Şekil 2.16 : 5xxx alüminyum alaşımlarında taneler arası korozyon [35]. ....                                                                                                                             | 18 |
| Şekil 2.17 : TCP kaplama oluşumunun şematik diyagramı, lokal bölgelerdeki pH artışı sonucunda kaplama malzemesinin birikmesi ve katodik reaksiyonların lokal bölgelerde ilerlemesi [38]. ....           | 20 |
| Şekil 2.18 : Dubleks Cr <sup>3+</sup> kaplama (TCP) yapısı [41]. ....                                                                                                                                   | 21 |
| Şekil 3.1 : Dökülmüş numune baskısı. ....                                                                                                                                                               | 27 |
| Şekil 3.2 : Elektrokimyasal deneylerin gerçekleştirildiği deney sistemi. ....                                                                                                                           | 28 |
| Şekil 3.3 : Kromat dönüşüm kaplamasının gerçekleştirildiği deney seti.....                                                                                                                              | 29 |
| Şekil 4.1 : AlSi9Cu3 numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (200x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                         | 32 |
| Şekil 4.2 : AlSi9Cu3 numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (1000x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                        | 32 |
| Şekil 4.3 : AlSi9Cu3 faz analizi sonuçları. ....                                                                                                                                                        | 33 |
| Şekil 4.4 : AlSi9Cu3 faz analizi sonucu görselleri. ....                                                                                                                                                | 33 |
| Şekil 4.5 : AlSi10Mg numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (200x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                         | 34 |
| Şekil 4.6 : AlSi10Mg numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (1000x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                        | 34 |
| Şekil 4.7 : AlSi10Mg faz analizi sonuçları. ....                                                                                                                                                        | 35 |
| Şekil 4.8 : AlSi10Mg faz analizi sonucu görselleri. ....                                                                                                                                                | 35 |
| Şekil 4.9 : AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Barker çözeltisi ile elektro dağlama sonucunda elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli. .... | 36 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 4.10:</b> AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Barker çözeltisi ile elektro dağlama sonucunda elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli. ....                                                                | <b>36</b> |
| <b>Şekil 4.11 :</b> AlSi9Cu3 numune parçalarının SEM görüntüleri (250x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                                                                                             | <b>38</b> |
| <b>Şekil 4.12 :</b> AlSi9Cu3 numune parçalarının SEM görüntüleri (2000x); a) ön alaşım ilavesiz, b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                                                                                           | <b>38</b> |
| <b>Şekil 4.13 :</b> AlSi9Cu3 numune parçalarının EDS haritalama görüntüleri (3500x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B+Sr ilaveli.....                                                                                                                    | <b>39</b> |
| <b>Şekil 4.14 :</b> AlSi10Mg numune parçalarının SEM görüntüleri (250x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                                                                                             | <b>40</b> |
| <b>Şekil 4.15 :</b> AlSi10Mg numune parçalarının SEM görüntüleri (2000x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli. ....                                                                                                                            | <b>40</b> |
| <b>Şekil 4.16 :</b> AlSi10Mg numune parçalarının EDS Haritalama görüntüleri (3500x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.....                                                                                                                  | <b>41</b> |
| <b>Şekil 4.17 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin zaman- $E_{OCP}$ grafikleri. ....                                                                                                                                                                                    | <b>42</b> |
| <b>Şekil 4.18:</b> AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin zaman- $E_{OCP}$ grafikleri. ....                                                                                                                                                                                     | <b>43</b> |
| <b>Şekil 4.19 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerin zaman- $E_{OCP}$ grafikleri.                                                                                                                                                                                   | <b>44</b> |
| <b>Şekil 4.20:</b> AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerin zaman- $E_{OCP}$ grafikleri.                                                                                                                                                                                    | <b>45</b> |
| <b>Şekil 4.21 :</b> Saf bakır CV analizi sonucu ve elde edilen piklere karşılık gelen bakırın indirgenme / yükseltgenme reaksiyonları (tarama hızı 5 mV/s). ....                                                                                                              | <b>46</b> |
| <b>Şekil 4.22:</b> Saf bakır, parlatılmış ve yağ alma & aşındırma uygulanmış yüzeyli AlSi9Cu3 alaşımı numuneleri ile gerçekleştirilen CV analizi sonuçları, a) Normal b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli numunelerin saf bakır ile kıyası (tarama hızı 5mV/s). .... | <b>47</b> |
| <b>Şekil 4.23:</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin ve saf bakırın CV analizi sonuçları; a) Saf bakır ve döküm numuneler b) Saf bakır ve yağ alma & aşındırma uygulanmış numunelerin sonuçları (tarama hızı 5 mV/s). ....                                                       | <b>48</b> |
| <b>Şekil 4.24:</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin parlatma sonrasındaki ve yağ alma & aşındırma sonrasındaki mikroyapı görüntüleri (100x, 500x). ....                                                                                                                         | <b>49</b> |
| <b>Şekil 4.25 :</b> AlSi10Mg alaşımı numunelerinin a) Yağ alma & aşındırma sonrası saf bakıra kıyasla CV analizi sonuçları b) CV sonuçlarının yakınlaştırılmış hali. ....                                                                                                     | <b>50</b> |
| <b>Şekil 4.26 :</b> Döküm numunelerinde EIS deneyi sonuçlarının modellenmesinde kullanılan eşdeğer elektrik devresinin gösterimi. ....                                                                                                                                        | <b>51</b> |
| <b>Şekil 4.27 :</b> TCP kaplı numunelerde EIS deneyi sonuçlarının modellenmesinde kullanılan eşdeğer elektrik devresinin gösterimi. ....                                                                                                                                      | <b>51</b> |
| <b>Şekil 4.28 :</b> AlSi9Cu3 numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri. ....                                                                                                                                                                            | <b>52</b> |
| <b>Şekil 4.29 :</b> AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri. ....                                                                                                                                                                | <b>53</b> |
| <b>Şekil 4.30 :</b> AlSi10Mg numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri. ....                                                                                                                                                                            | <b>54</b> |
| <b>Şekil 4.31 :</b> AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri. ....                                                                                                                                                              | <b>55</b> |
| <b>Şekil 4.32 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri. ....                                                                                                                                             | <b>56</b> |
| <b>Şekil 4.33 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin; Tafel deneyi öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri (500x). ....                                                                                                                                                         | <b>60</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 4.34 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrası kesitten mikroyapı görüntüleri (200x,500x).....                                                                                                                                      | <b>61</b> |
| <b>Şekil 4.35 :</b> AlSi9Cu3 B ilaveli numunenin Tafel deneyi sonrası a) üstten b) kesitten mikroyapı görüntüsü. ....                                                                                                                                        | <b>61</b> |
| <b>Şekil 4.36 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri. ....                                                                                                              | <b>62</b> |
| <b>Şekil 4.37 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin döküm, yağ alma & aşındırma, TCP kaplama sonrası ve Tafel deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri.. ....                                                                                                     | <b>64</b> |
| <b>Şekil 4.38 :</b> AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin ve Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x)....                                                                                                      | <b>65</b> |
| <b>Şekil 4.39 :</b> AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri. ....                                                                                                                      | <b>66</b> |
| <b>Şekil 4.40 :</b> AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri (500x).....                                                                                                                                    | <b>68</b> |
| <b>Şekil 4.41 :</b> AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x). ....                                                                                                               | <b>68</b> |
| <b>Şekil 4.42 :</b> AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri. ....                                                                                                                | <b>69</b> |
| <b>Şekil 4.43 :</b> AlSi10Mg alaşımı numunelerin döküm, yağ alma & aşındırma, TCP kaplama sonrası ve Tafel deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri.. ....                                                                                                       | <b>70</b> |
| <b>Şekil 4.44 :</b> AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x).....                                                                                                          | <b>70</b> |
| <b>Şekil 4.45 :</b> AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm ve TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyleri sonucunda elde edilen potansiyel - akım yoğunluğu grafikleri; a) normal b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli.....                              | <b>71</b> |
| <b>Şekil 4.46 :</b> AlSi9Cu3 / AlSi10Mg döküm numunelerinin tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonrası görüntüleri; 1) / 5) normal, 2) / 6) B ilaveli, 3) / 7) Sr ilaveli ve 4) / 8) B + Sr ilaveli. ....                                                | <b>73</b> |
| <b>Şekil 4.47 :</b> AlSi9Cu3 / AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonrası görüntüleri; 1-TCP / 5-TCP ön alaşım ilavesiz, 2-TCP / 6 TCP B ilaveli, 3-TCP) / 7-TCP) Sr ilaveli ve 4-TCP / 8- TCP B + Sr ilaveli. .... | <b>75</b> |



# **AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA BOR ve STRONSIYUM İLAVESİNİN Cr<sup>3+</sup> DÖNÜŞÜM KAPLAMASI SONRASI KOROZYON DİRENCİNE ETKİSİ**

## **ÖZET**

Alüminyum döküm alaşımları; sahip oldukları yüksek spesifik mukavemet, yüksek termal & elektrik iletkenlik ve iyi korozyon direnci özellikleri sayesinde başta havacılık & savunma ve otomotiv sektörü olmak üzere sıkça tercih edilen malzemelerdendir. Metallerin ve alaşımların, yüksek korozyon direncine sahip olması ve korozyona maruz kalmadan uzun süre kullanılabilir olması, endüstride orijinal ekipman üreticileri (OEM) tarafından istenilen özelliklerin başında gelmektedir. Alüminyum döküm alaşımları, başta yüksek dökülebilirlik, işlenebilirlik ve iyileştirilebilir korozyon direnci özellikleri sayesinde otomotiv sektöründe çeşitli uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan alüminyum alaşımları 3xx (Al-Si-Mg/Cu) ve 4xx (Al-Si) alaşımlarıdır. Bu alaşımların şekillendirilmesinde kullanılan yüksek basınçlı döküm teknolojisi başta gelen önemli yöntemlerden biridir. 3xx alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, kimyasal bileşimlerine göre –özellikle içerdikleri bakır (Cu) elementinin oranına bağlı olarak- değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, otomotiv sektöründe yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alüminyum döküm alaşımlarına müşteri istekleri doğrultusunda korozyon direncini artırıcı Cr<sup>3+</sup> dönüşüm kaplaması (TCP) uygulanabilmektedir; ancak bu kaplama, bakır oranı göreceli yüksek alaşımlarda düşük alaşımlara göre korozyon direnci yönünden olumsuz sonuçlar verebilmektedir.

Bu çalışmada, Cu elementinin oluşturduğu mikrogalvanik korozyonun olumsuz etkilerini azaltmak ve daha yüksek korozyon direnci elde edebilmek için göreceli yüksek bakır oranına sahip (ağ. %2,5) AlSi9Cu3 (EN AC 46000) ve göreceli düşük bakır oranına sahip (ağ. %0,1) AlSi10Mg (EN AC 43400) alüminyum döküm alaşımlarına tane inceltici özellikli bor (B) içeren AlB3 ön alaşımı ve ötektik modifiye edici stronsiyum (Sr) esaslı AlSr15 ön alaşımı ilavesi yapılmıştır. Alaşımlara yapılan bu ilaveler ile hem döküm sonrası hem de TCP kaplaması sonrası korozyon direnci özelliklerinde iyileşme amaçlanmıştır. Özellikle, aynı miktardaki bakırın mikroyapıya homojen dağılımı ile AlSi9Cu3 alaşımının TCP kaplaması sonrasında korozyon direncinde artış öngörülmüştür. AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg ön alaşım ilaveli numunelerine yağ alma & asit ile aşındırma ön işlemleri sonrasında TCP kaplaması uygulanmıştır. Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile şekillendirilen AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının optik mikroskop ile metalografik, Taramalı Eletron Mikroskobu (SEM) ile morfolojik ve EDS-Haritalama (Enerji Dispersiv X-Ray Spektroskopisi Haritalama) analizleri ile malzeme karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Malzemenin mikroyapısında yapılan değişikliklerin korozyon direnci üzerindeki etkilerinin incelenmesi için hem döküm numunelere hem de TCP kaplanmış numunelere Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve Tafel deneyleri uygulanmıştır. CV analizi; AlSi9Cu3 için döküm sonrası, her iki alaşım içinse TCP kaplama ön işlemleri sonrası uygulanmıştır. Numunelerin uzun dönem korozyon dirençleri tuz testi ile ölçülmüştür.

Metalografik ve morfolojik malzeme karakterizasyonları sonucunda AlB3 ön alaşımasının mikroyapı üzerindeki olumlu etkileri görülmüştür. AlB3 ön alaşımı kullanılan numunelerde daha ince taneler ile birlikte nispeten daha küresel ve küçük birincil  $\alpha$ -Al fazları gözlemlenmiştir. AlSr15 ön alaşımasının kullanıldığı numunelerde ise normalde iğnesel ve kaba formda bulunan Al-Si ötektik fazları Sr elementinin etkisiyle incelerek lifsi formda oluşmuştur.

AlSi9Cu3 ön alaşım ilavesiz ve ön alaşım ilaveli numunelerinin yüzey elektroaktif bakır miktarlarının hesaplanabilmesi için Çevrimsel Voltametri (CV) analizleri gerçekleştirilmiş ve bakır elementinin Cu(0)' dan Cu(I)' yükseltgenme reaksiyonu sonucu  $\sim -0.1$  V değerinde pik elde edilmiştir. Elde edilen pikin şiddeti yeterli olmadığı için yüzey elektroaktif bakır miktarı hesaplanamamıştır.

Hem döküm sonrası hem de TCP kaplaması sonrasında uygulanan EIS ve Tafel deneyleri sonuçlarına göre, AlSi9Cu3 alaşımasının (Cu: % 2,5) korozyon direncinin (korozyon akımı,  $i_{corr}$ : 2,192 / 0,291  $\mu A/cm^2$ ) AlSi10Mg alaşımasının (Cu: % 0,1) korozyon direncinden ( $i_{corr}$ : 0,715 / 0,019  $\mu A/cm^2$ ) daha düşük olduğu bulunmuştur. AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının korozyon dirençlerindeki bu farklılığın, içerdikleri bakır oranlarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. AlSi9Cu3 alaşımı B + Sr ilaveli numunenin korozyon direnci, ön alaşım ilavesiz numuneye göre EIS (Polarizasyon direnci,  $R_p$ , EIS: 4,16 k $\Omega$  / 3,64 k $\Omega$ ), Tafel ( $R_p$ , EIS: 4,53 k $\Omega$  / 3,31 k $\Omega$  &  $i_{corr}$ : 2,192  $\mu A/cm^2$  / 1,585  $\mu A/cm^2$ ) ve tuz testi (ağırlık değişimi: 0,007 g/cm $^2$  / 0,008 g/cm $^2$ ) sonucunda daha yüksek bulunmuştur. AlSi9Cu3 AlB3 + AlSr15 ilaveli numunede, tane inceltme ve ötektik modifikasyon sonucunda daha küçük ve çok sayıdaki mikrogalvanik hücrenin oluştuğu ve böylece numune korozyon direncini azalttığı düşünülmektedir. Buna ek olarak, AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin döküm yüzeye sahip numunelerin Tafel analizi sonrası mikroyapısı incelendiğinde çamursu fazlarının (sludge) oyuk oluşumunu engellediği görülmüştür. Tane inceltmenin etkisiyle AlB3 ilaveli numunelerde çamursu fazların daha küçük ve fazla olduğu; bu nedenle AlB3 ilaveli numunelerinin korozyon dirençleri diğer ön alaşım ilaveli numunelere göre daha yüksek olabileceği düşünülmüştür. AlSi10Mg alaşımı için; ön alaşım ilavesiz, AlB3 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ilaveli numunelerin korozyon dirençleri birbirine yakın değerlerde bulunmuş ve numunelerin korozyon dirençleri arasında fark görülmemiştir. AlSi10Mg alaşımı AlSr15 ilaveli numunenin korozyon direnci ise diğer üç numunenin korozyon direncinden düşük bulunmuştur. Sr elementinin ötektik fazın yüzey alanını artırdığı faz analizi sonucunda görülmüştür. Bakır oranı az AlSi10Mg alaşımasının temel korozyon mekanizması birincil  $\alpha$ -Al ve Al-Si ötektik fazı arasında gerçekleşmiştir. Bu sebeple artan ötektik faz korozyon direnci AlSi10Mg alaşımı üzerinde olumsuz etki oluşturmuştur.

AlSi9Cu3 (Cu: %2.4) numunelerine uygulanan CV deneylerinde, saf bakıra oranla ön alaşım ilavesiz, AlB3 ilaveli, AlSr15 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ilaveli numunelerinin yüzey elektroaktif bakır miktarları sırasıyla %32,1 %66,9 %39,9 %64,1 olarak bulunmuştur. AlSi9Cu3 alaşımında AlB3 ilavesi ile tane inceltme sonucunda numune mikroyapısında tane boyutu küçülmüş ve daha küçük ve küresel şekilde  $\alpha$ -Al fazları oluşturulmuştur. Mikroyapıdaki bu değişimin sonucunda tane sınırları artmış ve tane sınırlarında oluşma eğilimi gösteren bakır içeren intermetalik fazlar mikroyapı yüzeyinde homojen bir şekilde dağılmıştır. Bu nedenle, CV analizi sonucunda AlB3 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ilaveli AlSi9Cu3 numunelerinin elektroaktif bakır miktarları ön alaşım ilavesiz ve AlSr15 ilaveli numuneden daha yüksek değerlerde bulunmuştur. AlSi10Mg (Cu: %0.1) alaşımı içerdiği düşük bakır nedeniyle CV analizi sonucunda

herhangi bir pik elde edilememiş ve yüzey elektroaktif bakır miktarı hesaplanamamıştır.

TCP kaplanmış AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin EIS, Tafel deneyi sonuçları incelendiğinde, AlB3 ilaveli numunenin korozyon direncinin diğer numunelerden daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. AlSi9Cu3 alaşımı AlB3 ilaveli ve ön alaşım ilavesiz numunelerinin EIS deneyi sonucunda yük transfer dirençleri sırasıyla 295,8 k $\Omega$  ve 57,51 k $\Omega$ , Tafel deneyi sonucunda korozyon akımları sırasıyla 0,053  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> ve 0,291  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Uygulanan CV analizleri sonucunda AlB3 ilaveli AlSi9Cu3 alaşımı numunesinin yüzeyinde saf bakıra göre %66,9 oranında elektroaktif bakır bulunduğu tespit edilmiştir. Asit ile aşındırma sonrası, yüzeyde  $\alpha$ -Al çözünmesi sonucunda geriye kalan bakır elementleri üzerinde / yakınında TCP kaplama oluşumunun başladığı öngörülmektedir.

TCP kaplanmış AlSi10Mg alaşımı numunelerinin EIS, Tafel deneyleri ve tuz testi sonuçlarına göre AlSr15 ve AlB3 + AlSr15 ilaveli numunelerin korozyon dirençleri ön alaşım ilavesiz ve AlB3 ilaveli numunelerden daha yüksek bulunmuştur. AlSr15 ve AlB3+ AlSr15 ilaveli numunelerde artan ötektik faz ve tane inceltmenin etkisiyle, anodik  $\alpha$ -Al fazının, daha katodik fazlar (silisyum ve intermetalikler) ile etkileşim yüzeyi artmıştır. TCP kaplaması ön işlemlerinde bu etkileşim yüzeylerinin çözünmesi (korozyona uğraması) sonucunda numunenin yüzey pürüzlülüğü artmış ve bu alanların üzerinde daha homojen ve tutunan bir TCP kaplaması oluşmuş ve böylece korozyon direnci artmıştır.

Sonuç olarak; yapılan çalışma kapsamında AlSi9Cu3 alaşımı yüzeyindeki bakır içeren intermetaliklerin daha küçük ve homojen şekilde yüzeye dağıtmak ve daha küçük mikrogalvanik korozyon hücreleri oluşturarak TCP kaplama sonrası korozyon direncini artırmak amaçlanmıştır. AlSi9Cu3 alaşımına AlB3 ön alaşımı ilavesiyle yüzey elektroaktif bakır miktarının arttığı CV analizleri ile görülmüş ve TCP kaplama sonrasında elde edilen korozyon direncinin ön alaşım ilavesiz numuneye göre korozyon akımının yaklaşık 5,5 kat azaldığı (AlB3 ilaveli: 0,053  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> ve normal: 0,291  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>) ve yük transfer direncinin ise (295,8 k $\Omega$  & 57,51 k $\Omega$ ) yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu görülmüştür.



# **EFFECT OF BORON AND STRONTIUM ADDITION TO AlSi9Cu3 and AlSi10Mg ALUMINUM DIE CASTING ALLOYS ON CORROSION RESISTANCE AFTER Cr<sup>3+</sup> CONVERSION COATING**

## **SUMMARY**

Thanks to their high specific strength, high thermal & electrical conductivity and good corrosion resistance properties, aluminum casting alloys are frequently preferred materials; especially in the aerospace & defense and automotive industry. The fact that metals and alloys have high corrosion resistance and can be used for a long time without being exposed to corrosion, is one of the most desired features by original equipment manufacturers (OEMs) in the industries. Aluminum casting alloys are frequently used in various applications in the automotive industry, primarily due to their high castability, machinability and improvable corrosion resistance properties. The most widely used aluminum alloys in the automotive industry are Al-Si-Mg/Cu and Al-Si casting alloys. High pressure die casting technology used in producing these alloys is one of the most important methods. The corrosion resistance of Al-Si-Mg/Cu aluminum alloys can vary depending on their chemical composition, especially depending on the ratio of copper (Cu) element they contain. For this reason, Cr<sup>3+</sup> conversion coating (TCP), which increases corrosion resistance, can be applied to aluminum casting alloys produced by high pressure die casting method in the automotive industry, in line with customer requests; However, this coating may give bad results in terms of corrosion resistance in alloys with relatively high copper content compared to low alloys.

In this study, in order to reduce the negative effects of microgalvanic corrosion caused by Cu element and to obtain higher corrosion resistance, AlSi9Cu3 (EN AC 46000) with a relatively high copper content (2.5 wt.%) and AlSi10Mg (EN AC 43400) with a relatively low copper content (0.1 wt.%) aluminum casting alloys were used with grain refiner feature boron (B) containing AlB3 master alloy and eutectic modifier strontium (Sr) based AlSr15 master alloy was added.

The hypothesis was to test the corrosion behaviour of the alloys after Cr<sup>3+</sup> conversion coating by having an homogeneous distribution of the same amount of copper in the microstructures with the help of grain refining and eutectic modifications.

TCP coating was applied to AlSi9Cu3 and AlSi10Mg master alloyed samples after degreasing & acid etching (desmutting) pretreatments of TCP. Material characterization of AlSi9Cu3 and AlSi10Mg alloys produced by high-pressure die casting method was carried out by optical microscope, metallographic, Scanning Electron Microscope (SEM) for morphological and EDS-Mapping (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy Mapping) analysis. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Tafel experiments were applied to both cast samples and TCP coated samples to examine the effects of changes in the microstructure of the material on corrosion resistance. CV analysis; it was applied after casting for AlSi9Cu3, and after TCP coating pretreatment for both alloys. The long-term corrosion resistance of the samples was measured by Natural Salt Test (NSS).

As a result of metallographic and morphological material characterizations, positive effects of AlB3 master alloy addition on microstructure were observed. In the samples using AlB3 master alloy, relatively more spherical and small primary  $\alpha$ -Al phases with finer grains were observed. In the samples where AlSr15 master alloy is used, the Al-Si eutectic phases, which are normally in needle and coarse form, were thinned by the effect of Sr element and formed in fibrous form.

Cyclic Voltammetry (CV) analyzes were carried out to calculate the surface electroactive copper coverage amounts of AlSi9Cu3 without master alloy addition and master alloyed samples, and a peak of  $\sim -0.1$  V was obtained as a result of the oxidation reaction of copper element from Cu(0) to Cu(I). Since the intensity of the obtained peak was not sufficient, the amount of surface electroactive copper could not be calculated.

According to the results of EIS and Tafel tests applied both after casting and after TCP coating, it was found that the corrosion resistance of AlSi9Cu3 alloy (corrosion current,  $i_{\text{corr, casting}}$ : 2,192 /  $i_{\text{corr, TCP}}$ : 0,291  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) is lower than that of AlSi10Mg alloy ( $i_{\text{corr, casting}}$ : 0,715 /  $i_{\text{corr, TCP}}$ : 0,019  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). It has been observed that this difference in corrosion resistance of AlSi9Cu3 and AlSi10Mg alloys is due to the copper content they contain.

The corrosion resistance of the AlSi9Cu3 alloy B + Sr added sample was found to be higher as a result of EIS (Polarization resistance,  $R_{\text{p, EIS}}$ : 4,16 k $\Omega$  (B+Sr)/ 3,64 k $\Omega$  (No addition)), Tafel ( $R_{\text{p, EIS}}$ : 4,53 k $\Omega$  / 3,31 k $\Omega$  &  $i_{\text{corr}}$ : 2,192  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  / 1,585  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and salt tests (weight changing: 0,007 g/cm $^2$  / 0,008 g/cm $^2$ ) compared to the sample without master alloy addition.

It is thought that, as a result of grain refinement and eutectic modification, smaller and more numerous microgalvanic cells are formed in the AlSi9Cu3 AlB3 + AlSr15 added sample surface, thus reducing the corrosion resistance of the sample. In addition, when the microstructure of the AlSi9Cu3 alloy samples was examined after the Tafel analysis of the samples with the cast surface, it was observed that the sludge phases prevented the formation of corrosion pits. With the effect of grain refinement, sludge phases are smaller and more in AlB3 added samples; For this reason, it is thought that the corrosion resistance of AlB3 added samples may be higher than the other pre-alloyed samples. For AlSi10Mg alloy; The corrosion resistances of the samples without master alloy addition, AlB3 addition and AlB3 + AlSr15 addition were found to be close to each other and no difference was observed between the corrosion resistances of the samples. The corrosion resistance of the sample with the addition of AlSi10Mg alloy AlSr15 was found to be lower than the corrosion resistance of the other three samples. As a result of the phase analysis, it was seen that the Sr element increased the surface area of the eutectic phase. The main corrosion mechanism of AlSi10Mg alloy with low copper content was realized between primary  $\alpha$ -Al and Al-Si eutectic phase. For this reason, increased eutectic phase corrosion resistance had a negative effect on AlSi10Mg alloy.

In the CV tests applied to AlSi9Cu3 (Cu: 2.4%) samples, the surface electroactive copper coverage amounts of the samples with no master alloy addition, AlB3 addition, AlSr15 addition and AlB3 + AlSr15 additions compared to pure copper were 32.1% 66.9% 39.9% 64.1%, respectively. As a result of grain refinement with the addition of AlB3 in the AlSi9Cu3 alloy, the grain size in the sample microstructure was decreased and smaller and spherical  $\alpha$ -Al phases were formed. As a result of this change in the microstructure, the grain boundaries have increased and copper-containing

intermetallic phases, which tend to form at the grain boundaries, are homogeneously distributed on the microstructure surface. Therefore, as a result of CV analysis, electroactive copper amounts of AlSi9Cu3 samples with AlB3 addition and AlB3 + AlSr15 addition were found to be higher than the samples without master alloy addition and AlSr15 addition. Due to the low copper content of AlSi10Mg (Cu: 0.1%) alloy, no peak could be obtained as a result of CV analysis and the amount of surface electroactive copper could not be calculated.

When the EIS and Tafel test results of TCP coated AlSi9Cu3 alloy samples were examined, it was seen that the corrosion resistance of the AlB3 added sample was higher than the other samples. The charge transfer resistances of AlSi9Cu3 alloy samples with and without AlB3 additions were calculated as 295.8 k $\Omega$  and 57.51 k $\Omega$ , as a result of the EIS test and the corrosion currents were calculated as 0.053  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> and 0.291  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>, respectively, as a result of the Tafel test. As a result of the applied CV analyzes, it was determined that there is 66.9% electroactive copper on the surface of the AlSi9Cu3 alloy sample with the addition of AlB3 compared to pure copper. It is predicted that after acid etching or desmutting, TCP coating formation begins on / near the copper elements remaining as a result of  $\alpha$ -Al dissolution on the surface.

According to the EIS, Tafel tests and salt test results of TCP coated AlSi10Mg alloy samples, the corrosion resistances of AlSr15 and AlB3 + AlSr15 added samples were found to be higher than the samples without master alloy addition and AlB3 addition. The interaction surface of the anodic  $\alpha$ -Al phase with the more cathodic phases (silicon and intermetallics) increased with the effect of increasing eutectic phase and grain refinement in AlSr15 and AlB3+ AlSr15 added samples. As a result of the dissolution (corrosion) of these interaction surfaces in the TCP coating pretreatments, the surface roughness of the sample increased and a more homogeneous and adherent TCP coating was formed on these areas, thus increasing the corrosion resistance.

As a result; within the scope of the study, it was aimed to increase the corrosion resistance after TCP coating by creating smaller microgalvanic corrosion cells by dispersing the copper-containing intermetallics on the surface of AlSi9Cu3 alloy to the surface in a smaller and homogeneous way. With the addition of AlB3 master alloy to AlSi9Cu3 alloy, CV analyzes showed that the amount of surface electroactive copper increased, and the corrosion resistance obtained after TCP coating decreased by approximately 5.5 times compared to the sample without master alloy addition (AlB3 added: 0.053  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> and no addition: 0.291  $\mu$ A/ cm<sup>2</sup>) and charge transfer resistance (295.8 k $\Omega$  & 57.51 k $\Omega$ ) were found to be approximately 5 times higher.



## 1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, mühendislik çalışmalarının birçok dalında enerji en belirleyici faktörlerden biridir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe, enerji maliyetlerinin azaltılması, ağırlık azaltma çalışmaları ile mümkündür. Alüminyum alaşımları sahip olduğu yüksek spesifik mukavemet, yüksek ısı ve termal iletkenlik özellikleri ve iyi korozyon direnci sayesinde mühendisliğin birçok alanında sıkça tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının korozyon direnci kullanıldığı ortam koşullarına bağlı olarak, malzeme seçiminde belirleyici olabilmektedir. Korozyon, bir metal ya da metal alaşımının bulunduğu çevre ile arasındaki kimyasal reaksiyonun yıkıcı bir sonucu olarak tanımlanmaktadır [1]. Mühendislikte meydana gelen korozyon maliyetleri yadsınamayacak derecede önemlidir. Amerika Birleşik devletlerinde yapılan araştırmaya göre, yıllık toplam doğrudan korozyon maliyeti, ülkenin gayri safi milli hasılasının yaklaşık %3,1'inin (276 milyar dolar) oluşturmaktadır [2]. Bu nedenle, mühendislikte kullanılan metal ve alaşımlarının korozyon çalışmaları önem arz etmektedir. Alüminyum alaşımları, mühendislik uygulamalarında kullanıldığı ortama göre toz boya, kataforez kaplama ve  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması gibi çeşitli korozyondan korunma yöntemleri kullanılmaktadır.  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması özellikle, otomotiv endüstrisinde orijinal ekipman üreticilerinin (OEM) basınçlı döküm ile üretilmiş alüminyum alaşımlarından istenilen bir kaplamadır. Yüksek mukavemet, iyi dökülebilirlik ve nispeten ucuz olması nedeniyle ağırlıkça yüksek bakır oranı içeren alüminyum döküm alaşımlarından AlSi9Cu3 - EN AC 46000 bakırın sebep olduğu mikro-galvanik korozyon sebebiyle bazı durumlarda istenen korozyon gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Bu nedenle, alüminyum döküm alaşımlarının mikroyapısının değiştirilmesinin  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması sonrası korozyon özelliklerine etkisi incelenmesi gereken bir konudur.

Bu çalışmada, yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen yüksek bakır oranına sahip AlSi9Cu3 (EN AC 46000) ve düşük bakır oranına sahip AlSi10Mg (EN AC 43400) alüminyum döküm alaşımlarına döküm sırasında bor ve stronsiyum ilavesi yapılmış ve sonrasında  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması uygulanmıştır.

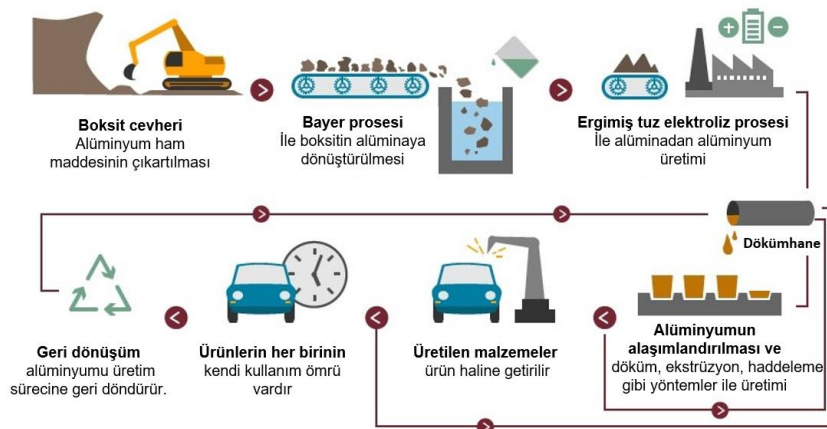


## 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE KOROZYON

### 2.1 Alüminyum, Üretimi ve Özellikleri

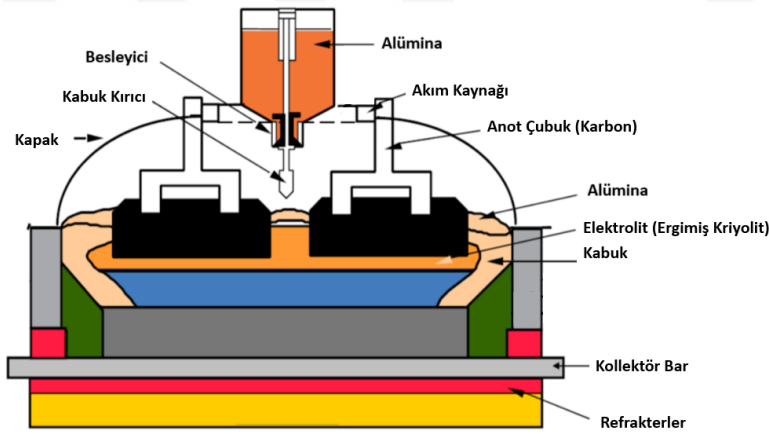
Alüminyum (%8) yer kabuğunda oksijen (% 46) ve silisyumdan (% 28) sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. 1808 yılında Sir Humptry Davy, alüminadan alüminyum elektroliz yoluyla elde etmeye çalışmış ve alüminyum-demir alaşımını elde etmiştir. Bu çalışma sonucunda alüminyumun isim babası olmuştur. 1825 yılında ise Hans Cristian Orsted tarafından ilk saf alüminyum üretilmiştir [3,4]. Yer kabuğunda bu kadar çok bulunmasına rağmen, alüminyumun ticari anlamda kullanılmaya başlanması, keşfedilmesinden yaklaşık 80 yıl sonra 19.yy sonlarını bulmuştur. Bunun en önemli sebeplerinden birisi birincil (primer) alüminyum üretiminin elektrik enerjisine ihtiyaç duymasıdır. Elektriğin keşfi ve endüstriyel olarak kullanılmaya başlanması ile birincil alüminyum üretimine başlanmıştır. Alüminyum üretim aşamaları ve geri dönüşüm döngüsü Şekil 2.1’ de verilmiştir.

Alüminyum üretimi birincil (primer) veya ikincil (sekonder) üretim ile gerçekleştirilebilir. Primer üretim yöntemi, Şekil 2.1’ de de görüleceği gibi boksit cevherinin yer kabuğundan çıkarılması ile başlar, Bayer prosesi ile alümina ( $Al_2O_3$ ) üretimi ile devam eder ve sonrasında ergimiş tuz elektrolizi (Hall-Heroult) ile saf alüminyum eldesi ve son olarak alaşımlandırma işlemleri ile tamamlanır. Bu yöntem kullanılarak üretilmek istenen 1 kg alüminyum için yaklaşık olarak 2 kg alümina ve 4 kg boksit cevherine ihtiyaç bulunmaktadır[6].



Şekil 2.1 : Alüminadan alüminyum üretimi ve geri dönüşüm döngüsü [5].

1886 yılında, Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul Heroult birbirlerinden habersiz bir şekilde, bugün Hall-Heroult prosesi olarak bilinen alüminyum üretim yöntemini keşfetmişlerdir [4]. Bu tarihten sonra, alüminyum üretim miktarlarında ciddi artışlar olmuş ve dünya alüminyum üretimi günümüzde demirden sonra ikinci konuma kadar gelmiştir. Hall-Heroult prosesinde kullanılan elektroliz hücresi Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi, karbon anot, karbon katot, kriyolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) ergimiş tuzundan oluşan elektrolit ve akım kaynağından oluşur. Elektroliz prosesi, alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $T_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2072^\circ\text{C}$ ) ve Kriyolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $T_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 1000^\circ\text{C}$ ) ötektik reaksiyonundan faydalanarak  $960^\circ\text{C}$  de sıcaklıkta gerçekleştirilebilmektedir [8].  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  içerisinde çözülmüş  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ' ün karbon ile indirgenmesi sonucunda katot üzerinde alüminyum biriktirilir ve birincil alüminyum üretimi gerçekleştirilmiş olur (Denklem-2.1) [7]. Bu yöntem ile üretilecek 1 kg alüminyum için kullanılan teknolojiye göre değişmekle birlikte 12.5 kWh-16.5 kWh enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [9]. İkincil alüminyum üretim yönteminde ise, kullanım ömrünü tamamlamış alüminyum ürünlerinin tekrar ergitilmesi, yani geri dönüşüm ile alüminyum üretimi yapılır.

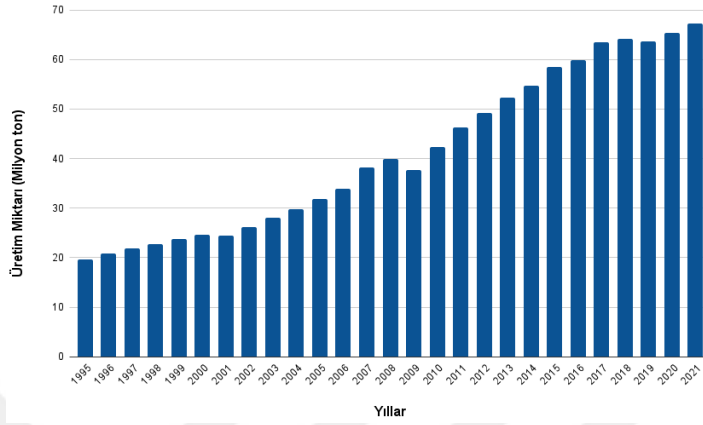


**Şekil 2.2 : Hall-Heroult Prosesinin Şematik Görüntüsü [7].**

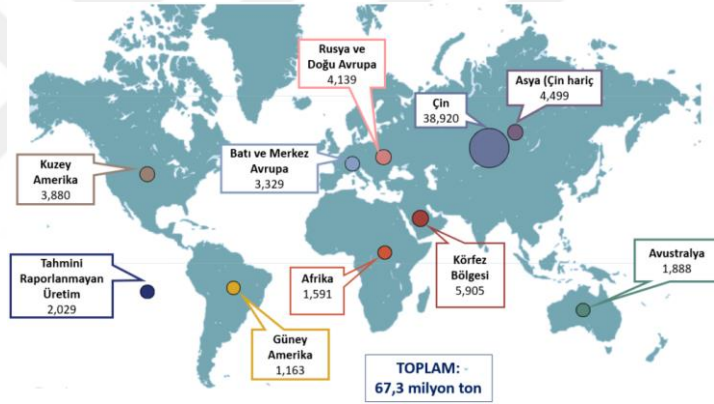


Dünya primer alüminyum üretimi, 1973 yılında 12 milyon ton primer alüminyum üretimi gerçekleştirilirken, 1995 yılında 19,6 milyon seviyelerine yükselmiştir. Özellikle 1995 yılını takip eden senelerde başta Çin olmak üzere dünya alüminyum üretiminde artış ivmelenmiştir (Şekil 2.3). Covit 19 pandemisi etkisinde getirilen kısıtlamalara rağmen 2020 ve 2021 yıllarında bir önceki yıllara göre üretim miktarında

artış görülmektedir. 2021 yılında dünya primer alüminyum üretimi tüm zamanların en fazla üretimi olan 67,3 milyon ton seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 2.4’ te 2021 yılı dünya primer alüminyum üretiminin bölgelere göre dağılımı verilmiştir. Çin, dünya primer alüminyumunun yaklaşık %57,8’ sini üretmektedir.



Şekil 2.3 : 1995-2021 dünya primer alüminyum üretimi (milyon ton) [10].



Şekil 2.4 : Bölgelere göre dünya primer alüminyum üretimi (milyon ton) [10].

Alüminyum üretiminde enerji maliyetleri önemli bir konudur. Birincil ve ikincil üretim yöntemlerinde enerji maliyeti farkı oldukça fazladır. Boksit madenciliğinden ergimiş tuz elektrolizine kadar geçen sürede 1 ton alüminyum üretmek için gereken enerji yaklaşık 194,000 MJ dür. Ancak, geri dönüşüm yoluyla üretilen ikincil alüminyumun 1 tonu için gereken enerji miktarı ise 10,500 MJ dür. Bu değerler kıyaslandığında, ikincil üretim için gereken enerji, birincil üretim için gereken enerji miktarının sadece %5’i kadardır [11]. Bu nedenle, ikincil üretimin artırılması ve teşvik edilmesi hem enerji maliyetleri hem de çevre açısından önem arz etmektedir.

Alüminyum, yüksek spesifik mukavemet, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği, yüksek korozyon direnci gibi özellikleri ile birçok sektörde kullanılmaktadır. Çizelge-2.1’ de alüminyumun özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Alüminyumun özellikleri [12].**

| Özellik               | Değer                   |
|-----------------------|-------------------------|
| Atom Numarası         | 13                      |
| Atomik Kütlesi        | 26,98 g/mol             |
| Kristal Yapı          | Yüzey Merkezli Kübik    |
| Yoğunluk              | 2,70 g/cm <sup>3</sup>  |
| Sıvı Haldeki Yoğunluk | 2,375 g/cm <sup>3</sup> |
| Ergime Noktası        | 660 °C                  |
| Kaynama Noktası       | 2519 °C                 |
| Isıl İletkenlik       | 237 W/(m.K)             |

## 2.2 Alüminyum Alaşımları

### 2.2.1 Yoğrulabilir alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları yoğrulabilir ve döküm olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. Çeşitli döküm yöntemleri ile yarı mamul (biyet, kütük, çubuk) haline getirilen üretilen yoğrulabilir alüminyum alaşımları haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme, dövme (forging) gibi çeşitli plastik şekil verme yöntemleri ile üretilebilen alaşımlardır. Yoğrulabilir alüminyum alaşımları 1xxx' den 9xxx' e kadar 9 farklı seride sınıflandırılır. Çizelge 2.2' de yoğrulabilir alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementi ve ısıtım işlem uygulanabilirlik özelliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : Yoğrulabilir alüminyum alaşımlarının kodlandırılması [4].**

| Alaşım Serisi | Temel Alaşım Elementi                           | Isıtım İşlem         |
|---------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| 1xxx          | Saf alüminyum, temel alaşım elementi yoktur     | Uygulanamaz          |
| 2xxx          | Bakır                                           | Uygulanabilir        |
| 3xxx          | Manganez                                        | Uygulanamaz          |
| 4xxx          | Silisyum                                        | Kısmen Uygulanabilir |
| 5xxx          | Magnezyum                                       | Uygulanamaz          |
| 6xxx          | Magnezyum ve silisyum                           | Uygulanabilir        |
| 7xxx          | Çinko                                           | Uygulanabilir        |
| 8xxx          | Diğer alaşım elementleri (demir, kalay, lityum) | Kısmen Uygulanabilir |
| 9xxx          | Kullanılmaya başlandı*                          | -                    |

\*Yeni yüksek Si içeren alaşımlar geliştirilmeye başlandı ve bunlara üreticilerin bazılarının Alüminyum Birliği'nden bağımsız olarak 9xxx serisi kodlamalar yaptığı bilinmektedir.

## 2.2.2 Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları, dökülebilirliği yüksek, kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm, hassas döküm ve basınçlı döküm (alçak ve yüksek basınçlı) gibi döküm yöntemleri ile dökülebilen alaşımlardır. Çizelge 2.3’ de döküm alüminyum alaşım serileri temel alaşım elementleri ve ısıtma işlem uygulanabilirlik özellikleri ile verilmiştir. Alaşım serilerindeki noktadan sonraki x yerine 0, 1, 2 gibi sayılar gelebilmektedir. 0 sayısı alaşımın son döküm halini aldığını, 1 sayısı alaşımın külçe (ingot) olarak dökülmüş olduğunu ve külçeden sonra döküm parçasının üretileceğini ve 2 sayısı ise dar bir kimyasal bileşim aralığında alaşımın üretildiğini göstermektedir [5].

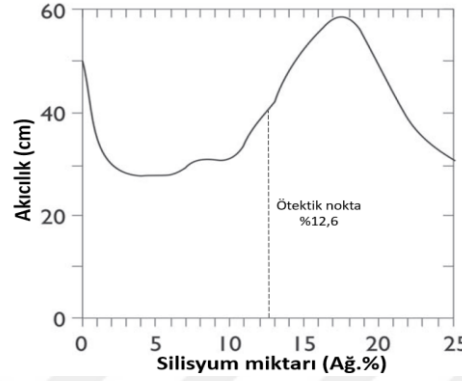
Dökülebilirlik, bir metalin hatasız olarak dökülebilme ve nihai dökümün istenen özellikleri ile yeniden üretilebilme yeteneği olarak tanımlanır [13]. Dökülebilirliği etkileyen en önemli faktörlerden biri ise akışkanlıktır. Akışkanlık ise, ergimiş metalin katılaşmadan önce akacağı maksimum mesafe olarak tanımlanır [14]. Alüminyumun akıcılığı, safsızlık arttıkça azalmaktadır. Alüminyumun saflığının azalmasıyla, akıcılığının azaldığını bilinmektedir. %98,6 saflıktaki alüminyumun akışkanlığı, yüzde %99,8 saf alüminyumun sadece yüzde 70’i kadardır [15].

**Çizelge 2.3 :** Döküm alüminyum alaşım serileri ve ısıtma işlem uygulanabilirliği [5].

| <b>Alaşım Serisi</b> | <b>Ana Alaşım Elementi</b>              | <b>Isıtma işlemi</b> |
|----------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| <b>1xx.x</b>         | Genelde saf alüminyum, %99 maksimum     | Uygulanamaz          |
| <b>2xx.x</b>         | Bakır                                   | Uygulanabilir        |
| <b>3xx.x</b>         | Silisyum, bakır ve/veya magnezyum       | Uygulanabilir        |
| <b>4xx.x</b>         | Silisyum                                | Uygulanabilir        |
| <b>5xx.x</b>         | Magnezyum                               | Uygulanamaz          |
| <b>6xx.x</b>         | Kullanılmamış                           | -                    |
| <b>7xx.x</b>         | Çinko                                   | Uygulanabilir        |
| <b>8xx.x</b>         | Kalay                                   | Uygulanabilir        |
| <b>9xx.x</b>         | Diğer alaşım elementleri (demir, kalay) | Uygulanamaz          |

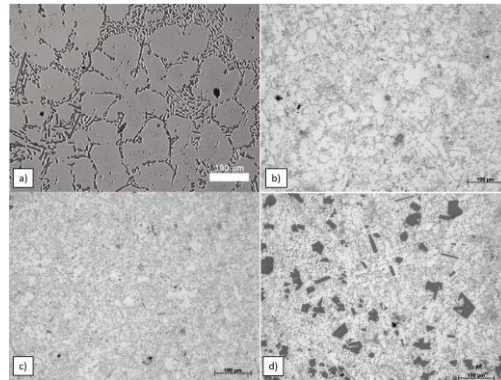
Ticari olarak en çok kullanılan alaşımlar silisyum, bakır ve magnezyum alaşımlarını içerebilen 3xx.x ve 4xx.x alaşımlarıdır [14,18]. Bu iki seri de ortak temel alaşım elementi olan silisyumun diğer temel alaşım elementlerinden farklı olarak akıcılık üzerine olumlu etkisi bulunmaktadır. Silisyumun füzyon gizli ısısı, doğada bulunan elementler arasında en yükseklerden biridir ve alüminyumun gizli ısısından 5 katı kadardır. Bu nedenle silisyum, Al-Si alaşım sisteminin akıcılığı artırmaktadır [13]. 800

°C’ de silisyum miktarına göre Al-Si alaşımlarının akıcılığı Şekil 2.5’ de verilmiştir. Şekil 2.5’ deki grafik incelendiğinde, %5-7 Si içeren aralıkta alaşımların akıcılık seviyesi minimumdur. %5-7 Si ile %18 Si aralığında silisyum miktarı arttıkça alaşım akıcılığı artmaktadır. %12,6 Si ötektik noktaya gelindiğinde ise neredeyse saf alüminyum akıcılığına yakın bir akıcılık değerine ulaştığı görülmektedir. Ticari yüksek basınçlı döküm alaşımlarının birçoğu ötektik ve ötektik altı (%8-12 Si) Al-Si döküm alaşımlarıdır ve akıcılığı nispeten yüksek denebilecek bölgede yer almaktadırlar.



**Şekil 2.5 :** 800 °C’ de ağırlık % silisyum miktarına göre Al-Si alaşımlarının akıcılığı [14].

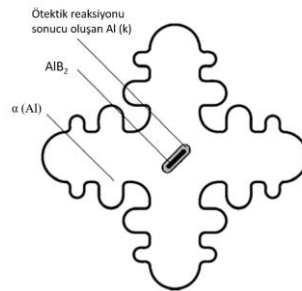
%7-17 Si aralığında farklı silisyum oranlarına sahip döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapı örnekleri Şekil 2.6’ da verilmiştir. Şekil 2.6’ da (a) %7 Si içeren alaşım, (b) %9 Si içeren alaşım, (c) %12 Si içeren alaşım ve (d) %17 Si içeren alaşım mikroyapısına örnek olarak verilmiştir. Alaşım içerisindeki silisyum miktarının artmasıyla  $\alpha$ -Al fazının azaldığı ve ötektik fazın arttığı görülmektedir. Ötektik üstü AlSi17Cu4Mg alaşımında ise,  $\alpha$ -Al ve ötektik fazın yanında primer Si partiküllerinin olduğu görülmektedir (Şekil 2.6 (d)).



**Şekil 2.6 :** Döküm alüminyum alaşımlarının mikroyapı örnekleri; (a) Kokil kalıba dökülmüş A356.0 - AlSi7Mg0.3 alaşımı [17], Yüksek basınçlı döküm yöntemi (HPDC) ile dökülmüş (b) A380.0 – AlSi9Cu3-AlSi9Cu3(Fe) alaşımı, (c) EN AC 47100 - AlSi12Cu1(Fe) alaşımı, (d) B390.0 - AlSi17Cu4Mg alaşımı.

### 2.2.3 Al-Si alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme

Mukavemet artırıcı yöntemlerden bir tanesi olan tane inceltme, alüminyum alaşımlarının mukavemetini artırmak için dökümhanelerde kullanılan bir yöntemdir. Tane inceltme prosesinde, Ti ve B en çok kullanılan elementlerdir [18]. Çoğunlukla, Alüminyum döküm alaşımlarına tane inceltici uygulaması döküm öncesinde  $AlB_3$ ,  $AlTi_5B$  gibi ön alaşım ilaveleriyle gerçekleştirilmektedir. %2'den fazla Si içeren Al-Si döküm alaşımlarına Ti içeren tane incelticilerin ilavesiyle Ti ve Si içeren intermetalik bileşikler oluşmaktadır. Bu intermetaliklerden özellikle  $Ti_5Si_3$  bileşiğinin Al matrisi ile nispeten zayıf kristalografik eşleşme sergilemesi, alaşımda Ti zehirlenmesine sebep olabilmektedir [19]. Bu nedenle, alüminyum döküm alaşımlarına  $AlB_3$  ön alaşım ilavesi ile tane inceltme yapmak daha uygun görülmektedir. Yuan, L ve arkadaşları [20],  $AlB_3$ 'ün Al-Si döküm alaşımlarındaki tane inceltme mekanizması ile ilgili bir mekanizma öne sürmüşlerdir. Bu mekanizmada, katılaşma başladığında, ilk önce  $659.7\text{ }^{\circ}C$ 'de Al-B ötektik reaksiyonu sonucu çözünmemiş  $AlB_2$  partikülü üzerinde bir katı alüminyum tabakasının oluştuğunu, daha sonra eriyik likidüse soğutulduğunda soğutma işlemi sırasında bir katı alüminyum tabakasının oluşmaktadır (Şekil 2.7). Bu tabakanın oluşumundan sonra katılaşacak  $\alpha$ -Al fazları doğrudan önceden oluşturulmuş katı Al üzerinde çekirdeklenecek ve bunun sonucunda tane inceltme işlemi gerçekleşmiş olur.



Şekil 2.7 : Al-Si alaşımlarının  $AlB_3$  tane inceltme mekanizması [20].

### 2.2.4 Al-Si alüminyum döküm alaşımlarında ötektik modifikasyonu

Alüminyum döküm alaşımlarında ötektik modifikasyonu sayesinde, alaşım mukavemetinde artış sağlanırken, uzama değerlerinde ciddi azalmalar görülmemektedir. Al-Si döküm alaşımlarında, Al-Si ötektik reaksiyonunun sağlamış olduğu ötektik faz, primer alüminyum ve silisyum partiküllerinden oluşmaktadır. Ötektik faz içerisindeki uzun ve kaba Si partikülleri, ötektik modifikasyon sonucunda

daha ince ve küçük Si partiküllerine dönüşür ve bu sayede mukavemet artışı sağlanmış olur. Ötektik modifikasyonu için Al-Si döküm alaşımlarına Na, Sr gibi elementlerin ilavesi yapılmaktadır [21]. Si partiküllerinin ikizlenme mekanizması, Ötektik modifikasyonu sağlamaktadır [22].

### 2.2.5 Alüminyumun alaşımlarının kullanım alanları

Alüminyum demirden sonra en çok üretilen ikinci metaldir ve sahip olduğu özgün özellikler sayesinde birçok endüstri dalında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları yoğrulabilir ve döküm olmak üzere ikiye ayrılır. Hem yoğrulabilir hem de döküm alaşımları gıda, otomotiv, uçak ve havacılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

Yoğrulabilir alaşımların kullanım alanları aşağıdaki gibidir [4] .

- 1xxx serisi alaşımları, özellikle gıda sektöründe yemek kapları, içecek kutuları iç yüzeylerinde, folyo, aspiratör esnek boruları, çeşitli mutfak gereçlerinde, elektrik-elektronik ve diğer sektörlerde levha, filmaşın kablo, tel şekillerinde üretilerek kullanılırlar.
- 2xxx bakır içeriği ve ısıtılabilir özellikleri ile mukavemet gerektiren havacılıkta uçak gövdelerinde, uçak pistonlarında otomotiv sektöründe tır, kamyon traktör gibi yük taşıyan araç gövdelerinde kullanılmaktadır.
- 3xxx serisi alaşımları aydınlatma reflektörleri, depo tankı gibi uygulamalarda, kek kalıbı ve tencere gibi mutfak eşyalarında, içecek kutularının yapımında kullanılmaktadır.
- 4xxx serisi alaşımları dövme uçak pistonları, kaynak teli, mukavemet istenen elektrik tellerinde araç radyatörlerinde giydirme folyosu olarak kullanılmaktadır.
- 5xxx Otomobil kaportaları/gövdeleri, otobüs ve tren gövdeleri, depo tankları, basınçlı kaplar, içecek kutusu kapağı ve balistik uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 6xxx Otomobil kaportaları, kapı iç ve dış panelleri, tren gövdeleri, denizcilik uygulamalarında direk, küpeşte, korkuluk, merdiven yapımında ve uçak gövde uygulamalarında kullanılmaktadır.
- 7xxx serisi alaşımları özellikle havacılık ve uçak uygulamalarında, uçak kanat kirişi ve iskeletlerinde ve balistik uygulamalarda kullanılmaktadır.

- 8xxx levha ve plaka ürün olarak uçak uygulamalarında kullanılmaktadır.

Döküm alüminyum alaşımlarının kullanım alanları ise aşağıdaki gibidir [4].

- 1xx.x serisi döküm alüminyum alaşımları, elektrik motorlarının yapımında,
- 2xx.x serisi alaşımları ulaşım sanayinde uçak gövdesi, dişli kutusu, uçak jantı yapımında ve elektrik iletim hatlarında bağlantı elemanı olarak,
- 3xx.x serisi alaşımları otomotiv sanayinde silindir kafaları, krank milleri, benzin pompası gövdesi olarak, uçak pompa parçaları, elektrikli süpürgeler, abrasif direnç istenen uygulamalarda,
- 4xx.x serisi alaşımları mimari panel ve kemer uygulamaları, aydınlatma lamba gövdeleri, medikal ve dişçi ekipmanlarında,
- 5xx.x serisi alaşımları pişirme kapları, kimyasal ve atık boru bağlantılarında, uçak, tren ve denizcilik uygulamalarında,
- 7xx.x serisi alaşımları anodize edilebilir parlatılabilir ürünlerin tasarımında,
- 8xx.x serisi alaşımları mil yatağı, rulman uygulamalarında kullanılmaktadır.

#### 2.2.6 Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine göre kodlandırılması

Alüminyum alaşımlarının akma ve çekme mukavemetleri gibi mekanik özellikleri, ısıtılma işlem ve deformasyon sertleşmesi gibi yöntemler ile artırılabilir. Isıtılma işlem uygulaması sonucunda malzemede oluşan çökelti sertleşmesi mekanizması sonucunda hem yoğrulabilir hem de döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilebilir ve mukavemetleri artırılabilir. Deformasyon sertleşmesi sonucunda ise sadece yoğrulabilir alüminyum alaşımlarının mukavemetleri artırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine özgü kodlamaları ve anlamları Çizelge 2.4’ de verilmiştir.

**Çizelge 2.4 :** Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklere özgü kodlamaları ve anlamları [4].

| Temper Kodu | Anlamları                          | Yoğrulabilir Alaşımlar | Döküm Alaşımlar |
|-------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|
| F           | Üretildiği gibi (as-fabricated)    | Uygulanabilir          | Uygulanabilir   |
| O           | Tavlanmış                          | Uygulanabilir          | Uygulanabilir   |
| H           | Deformasyon sertleşmesi uygulanmış | Uygulanabilir          | Uygulanamaz     |
| W           | Çözeltiliye alınmış                | Uygulanabilir          | Uygulanamaz     |
| T           | Isıl işlem uygulanmış              | Uygulanabilir          | Uygulanabilir   |

## 2.3 Döküm Alüminyum Alaşımları Üretim Yöntemleri

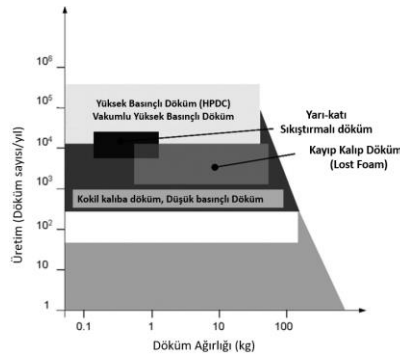
Döküm alüminyum alaşımlarının üretim yöntemleri kalıp tipine göre kalıcı ve geçici kalıplara döküm olarak ikiye ayrılmaktadır. Geçici kalıp ile yapılan döküm yöntemlerine kum kalıba döküm ve hassas döküm örnek verilebilir. Kalıcı kalıp döküm yöntemlerine ise, kokil kalıba döküm, alçak basınçlı döküm ve yüksek basınçlı döküm örnek olarak gösterilebilir [16]. Çizelge 2.5’ de farklı döküm yöntemlerinin özelliklere göre kıyaslanması verilmiştir. Döküm parçasının üretim hızı ve kalitesi üretilen döküm prosesi seçiminde önemli faktörler arasındadır. Çevrim süresi ve yüzey kalitesi göz önüne alındığında, alçak basınçlı ve yüksek basınçlı döküm yöntemleri öne çıkmaktadır.

Şekil 2.8’ de üretim hızına ve döküm ağırlığına bağlı olarak döküm proseslerinin karşılaştırılması grafiği verilmiştir. Yüksek basınçlı döküm tekniğinin 0.1-25 kg döküm ağırlığına sahip parçaların üretiminde üretim hızının diğer tüm döküm yöntemlerinden daha hızlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yüksek basınçlı döküm yöntemi özellikle otomotiv sanayinde sıkça tercih edilen döküm yöntemlerindendir.

**Çizelge 2.5 :** Farklı döküm yöntemlerinin özelliklere göre kıyaslanması [23].

| Özellik                              | Kum Kalıba Döküm | Hassas Döküm | Kokil Kalıba döküm | Alçak Basınçlı Döküm | Yüksek Basınçlı Döküm |
|--------------------------------------|------------------|--------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| Çevrim Süresi                        | 2                | 1            | 3                  | 3                    | 4                     |
| Yatırım maliyeti                     | 4                | 2            | 3                  | 2                    | 1                     |
| Prototip süresi, tasarım değişikliği | 4                | 2            | 1                  | 1                    | 1                     |
| Proses verimliliği                   | 1                | 1            | 2                  | 4                    | 3                     |
| Otomasyon Seviyesi                   | 2-3              | 1            | 3                  | 4                    | 4                     |
| Döküm sonrası ısıtıl işlem           | 4                | 4            | 4                  | 4                    | 1                     |
| Döküm kaynaklanabilirliği            | 2-3              | 3            | 3                  | 3                    | 1                     |
| Yüzey Kalitesi                       | 1                | 2            | 3                  | 4                    | 4                     |

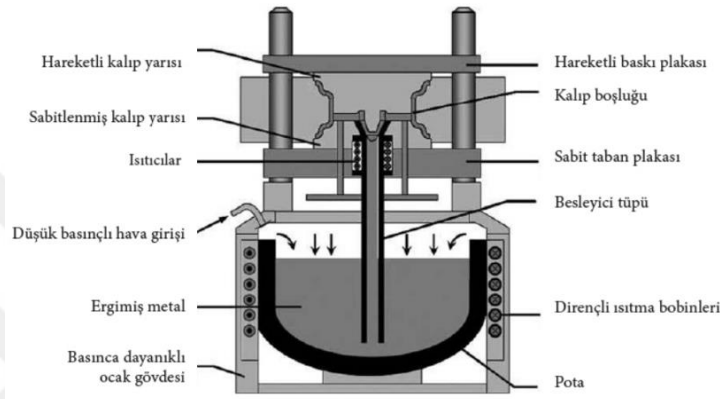
\*4: Mükemmel, 3: İyi, 2: Orta, 1: Kötü



**Şekil 2.8 :** Üretim hızına ve döküm ağırlığına bağlı olarak döküm proseslerinin karşılaştırılması [23].

### 2.3.1 Alçak basınçlı döküm tekniği

Alçak basınçlı döküm tekniği ile parça üretimi, ergimiş metalin kalıcı bir kalıp içerisine enjekte edilmesi ve 0,5 MPa (5 bar) gibi düşük bir basınçta katılaşmanın sağlanmasıyla gerçekleştirilir. [23, 24]. Şekil 2.9’ da alçak basınçlı döküm makinesi görseli verilmiştir. Ergimiş metal bir pota içerisinde kalıbın alt kısmında bulunur. Pota içerisine uygulanan düşük basınçlı kuru hava girişi ile besleyici tüp içerisindeki ergimiş metal, döküm parçasının kalıp boşluğuna enjekte edilir ve ergimiş metalin katılaşmasıyla döküm tamamlanmış olur.



Şekil 2.9 : Alçak basınçlı döküm makinesi şeması [23].

### 2.3.2 Yüksek basınçlı döküm tekniği (high pressure die casting)

Yüksek basınçlı döküm yöntemi, ergimiş metalin kalıcı metal kalıba döküldüğü ve yüksek basınç altında katılaştırıldığı işlem olarak tanımlanmaktadır [24]. Yüksek basınçlı döküm yönteminin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.6’ da verilmiştir.

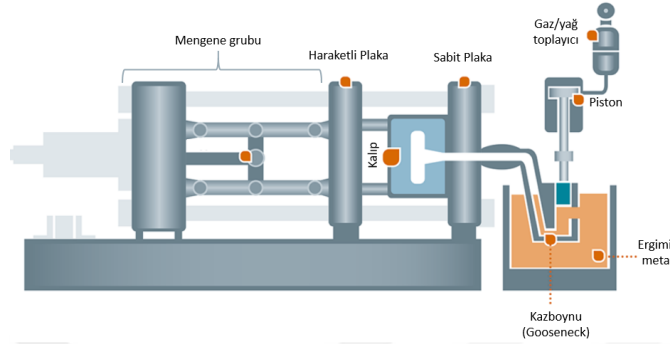
Çizelge 2.6 : Yüksek basınçlı döküm yöntemi avantaj ve dezavantajları [25].

| Avantajlar                           | Dezavantajlar                                  |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| Net şekle yakın yüksek hızda üretim  | 0,1 – 25 kg aralığında parçalar için uygun     |
| Değişken kesitli parça üretme imkanı | Döküm presi ve kalıbı yüksek yatırım maliyeti  |
| Talaşlı imalat gereksinim azlığı     | Ergime sıcaklığı düşük alaşımlar için uygun    |
| Yüksek boyutsal hassasiyet           | Parça geometrisine bağlı kalıp tasarım güçlüğü |
| İnce taneli mikroyapı                | Porozite ve çekinti hataları yaygın            |

Yüksek basınçlı döküm yönteminde, ergimiş metalin kalıba transfer şekline göre sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır.

### 2.3.2.1 Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi

Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yönteminde, ergimiş metal bir pota içerisinde ve kazboynu adı verilen bir bağlantı ile döküm parçasının kalıbına bağlıdır. Şekil 2.10’ da sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir.

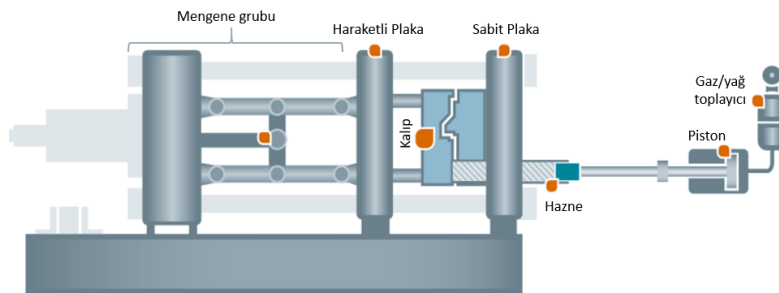


**Şekil 2.10 :** Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesi şeması [26].

Bu yöntemde, dikey olarak konumlanmış piston ergimiş metali kazboynu ile kalıba enjekte eder ve uygulanan basınç ile katılaşma sağlanır. Kazboynunun kalıba yakın bölgelerinde ısı kayıplarından dolayı ergimiş metalin sıcaklıklarında düşüşler gözlemlenebilir. Bu nedenle, sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi daha çok düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde kullanılmaktadır.

### 2.3.2.2 Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi

Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm yönteminde ise sıcak kamaralı döküm yönteminden farklı olarak ergimiş metal, pres makinesinden ayrı bir ocakta tutulan ergimiş metal bir kepçe yardımıyla pres haznesine dökülür ve döküm gerçekleştirilir. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinin şematik görüntüsü Şekil 2.11’ de verilmiştir.



**Şekil 2.11 :** Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinin şeması [26].

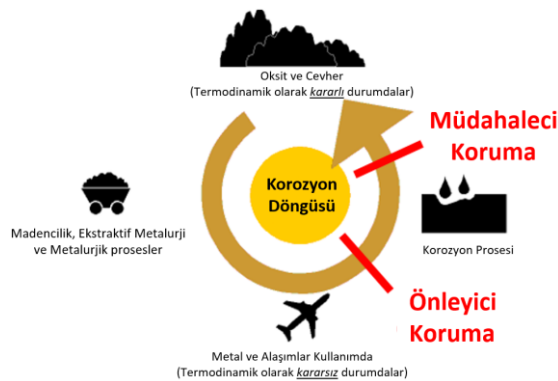
Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm prosesinde aşağıdaki makine/ ekipmanlar kullanılır.

- Ergitme/tutma ocakları
- Yüksek basınçlı döküm presi
- Kalıp
- Yardımcı ekipmanlar (Kalıp Şartlandırıcıları (Termolegülatör), spreyleme sistemi, vakum cihazı).

## 2.4 Korozyon ve Korozyonun Mühendislikte Yeri

İngilizce ‘corrode’ latin kökenli bir kelimedir (cor-redere) ve bir şeyi kemirmek ve parçalamak anlamlarına gelir [27]. Malzeme bilimindeki korozyon tanımı ise; bir metal ya da metal alaşımının bulunduğu çevre ile arasındaki kimyasal reaksiyonun yıkıcı bir sonucu olarak tanımlanmaktadır [1]. Hem kimyasal reaksiyona hem de bu reaksiyon sonucunda oluşan ürüne korozyon denilmektedir.

Şekil 2.12’ de korozyon döngüsünde gösterildiği gibi, metal üretiminde kullanılan cevherler termodinamik olarak kararlıdır ve dışarıdan verilen enerji sonucunda metal üretilmektedir, ancak üretilen metal kararsızdır. Korozyonun gerçekleşmesi için gerekli şartlar oluşmuş ise, metal korozyon reaksiyonu sonucunda tekrar kararlı haline (oksitlenmiş metal) dönüşme eğilimindedir. Bu nedenle, korozyona ekstraktif metalurjisinin tersi de denmektedir [27]. Üretilen metalin endüstriyel uygulamalarda kullanılması için korozyona uğramaması gerekmektedir. Bu nedenle, çeşitli önleyici koruma yöntemleri ve eğer korozyon oluşmaya başlamış ise müdahaleci koruma uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2.12 : Korozyon döngüsü [28].

Korozyon doğrudan ve dolaylı yollar ile mühendisliğin birçok alanında maliyet oluşturmaktadır. Korozyon maliyetinin bazı unsurları Çizelge 2.7’ de verilmiştir.

**Çizelge 2.7 : Korozyon maliyetinin bazı unsurları [29].**

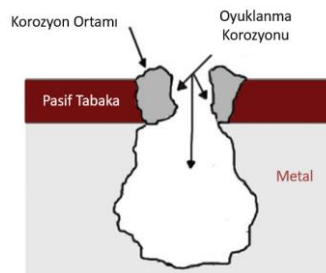
| Sermaye maliyetleri                 | Kontrol maliyetleri | Tasarım maliyetleri | İlişkili maliyetler        |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Ekipman ve binaların değiştirilmesi | Bakım ve onarım     | Malzemelerin yapımı | Ürün kaybı                 |
| Aşırı kapasite                      | Korozyon kontrolü   | Korozyon payı       | Teknik Destek, Sigorta     |
| Yedek ekipman                       | -                   | Özel prosesler      | Parça ve ekipman envanteri |

ABD Federal Karayolu İdaresinin (FHWA) 2002 yılında yayınladığı rapora göre, ABD'deki toplam yıllık tahmini doğrudan korozyon maliyetinin 276 milyar dolar yani ülkenin gayri Safi Yurtiçi Hasılasının (GSYİH) yaklaşık %3,1'ini oluşturmaktadır. Bu korozyon maliyetine sektörel olarak bakıldığında, korozyon maliyetlerinde ulaşım sektörünün %21,5’luk bir paya sahip olduğu görülmektedir. Ulaşım sektörünün korozyon maliyetlerinin de % 79’unu motorlu taşıtlar oluşturmaktadır [30]. Bu veriler incelendiğinde, motorlu taşıtların veya otomotiv sektörünün korozyon maliyetlerine negatif katkısı azımsanmayacak düzeydedir. Bu nedenle, otomotiv sektöründe korozyon ve korozyondan korunma alanlarında çalışmalar devam etmelidir.

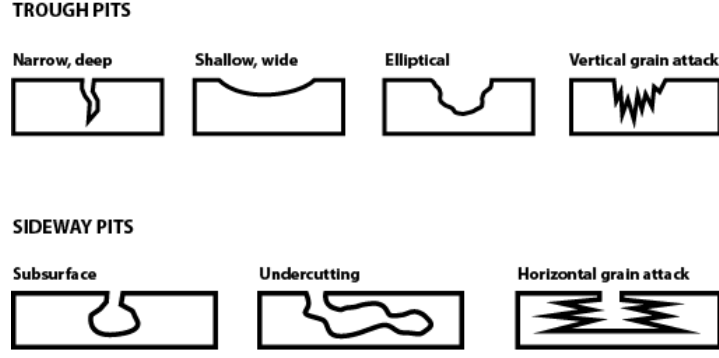
## 2.4.1 Korozyon çeşitleri

### 2.4.1.1 Oyuklanma (pitting) korozyonu

Mühendislik uygulamalarına en çok zarar veren ve en sık karşılaşılan korozyon tiplerinden biri oyuklanma korozyonudur [32]. Oyuklanma korozyonu,  $Cl^-$  gibi agresif iyonların tarafından pasif metal oksit filminin kaldırılması ve bu zarar görmüş pasif tabakadan metale doğru korozyonun ilerlemesidir [33]. Şekil 2.13’ de oyuklanma korozyonunun şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 2.13 : Oyuklanma korozyonu şematik gösterimi [34].**

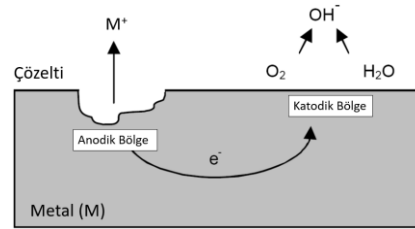


Şekil 2.14 : Oyuklanma korozyonu çeşitleri [32].

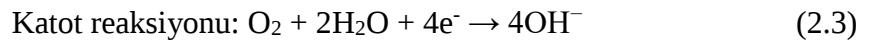
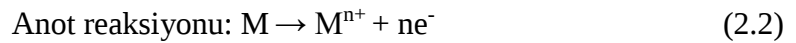
Oyuklanma korozyonunda oyuk tipleri çeşitli şekillerde olabilmektedir. Şekil 2.14’ de oyuk tipleri verilmiştir. Oyuklanma korozyonunun oluşması için aşağıdaki şartlara sahip olması gerekir.

- Anot
- Katot
- Elektrolit
- Elektriksel Bağlantı (elektronlar)
- Potansiyel Fark

Şekil 2.115’ de nötral ortamda gerçekleşen korozyonun şematik gösterimi verilmiştir. Yukarıda belirtilen gerekli şartlar oluştuğunda, anot ve katot reaksiyonları gerçekleşerek korozyon gerçekleşmiş olur.



Şekil 2.15 : Nötral ortamda gerçekleşen korozyon mekanizması [31].



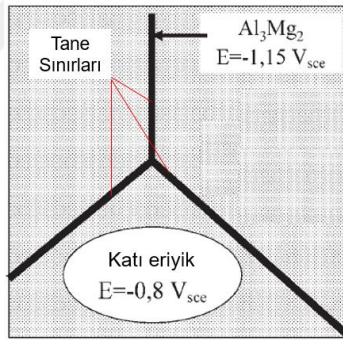
#### 2.4.1.2 Galvanik korozyon

Galvanik korozyon, iki farklı metalin uygun bir korozif elektrolit içerisinde bir araya gelmelerinde bir metalin selektif olarak korozyona uğraması ve diğer metalin korozyondan korunması olarak tanımlanır [1]. İki farklı metalden elektrot potansiyeli

daha negatif değerkte olan metal, diğerk metale göre anodik karakter gösterir ve korozyona uğrar. Galvanik korozyon, aynı alaşım içerisindeki farklı bölgelerdeki fazların arasında da gerçekleşebilir. Bu korozyon çeşidine mikro-galvanik korozyon da denilmektedir.

#### 2.4.1.3 Taneler arası korozyon

Taneler arası korozyon, tane sınırlarında alaşım elementlerinin mikrosegregasyonlardan kaynaklanmaktadır. Tane sınırlarında oluşan bu yapılar, tane içine göre farklı elektrot potansiyellerine sahiptirler ve bir elektrolit varlığında galvanik hücre olarak korozyon gerçekleşir [35]. Şekil 2.16' de, 5xxx serisi alüminyum alaşımının taneler arası korozyon şematiki verilmiştir. Al katı eriyik elektrot potansiyeli ( $E = -0,8 \text{ V}_{\text{SCE}}$ ) tane sınırlarında oluşan  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  intermetalik fazlarının elektrot potansiyelinden ( $E = -1,15 \text{ V}_{\text{SCE}}$ ) daha pozitif değerktedir, yani Al katı eriyik fazı  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  fazına göre daha katodik karakter gösterir. Bu nedenle, oluşan galvanik hücrede, tane sınırlarındaki  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  fazları anot reaksiyonu sonucu çözünür ve korozyon gerçekleşir [35].



Şekil 2.16 : 5xxx alüminyum alaşımlarında taneler arası korozyon [35].

#### 2.5. Dönüşüm Kaplamaları (Conversion Coating)

Dönüşüm kaplama prosesi, bir metalin yüzey oksidini kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda, pasivasyon özelliği metal oksitinden daha iyi olan bir kaplamaya dönüştüren bir işlem olarak tanımlanmaktadır [36]. Dönüşüm kaplamaları çinko, alüminyum kromat dönüşüm kaplaması (Chromate Conversion Coating) korozyona karşı en etkili dönüşüm kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Ancak bu kaplama yönteminin kullanımı içerdiği toksik  $\text{Cr}^{6+}$  bileşiklerinden dolayı 2000'li yılların başlarında birçok uluslararası kuruluş tarafından yasaklanmıştır [38,39]. Kromat dönüşüm kaplamasının yasaklanmasıyla beraber toksik olmayan alternatif

dönüşüm kaplamalar geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Aşağıdaki sistemleri içeren Cr(VI) olmayan bazı dönüşüm kaplamaları: molibdatlar (Mo), permanganatlar (Mn), vanadatlar (V) ve tungstat (W) dönüşüm kaplamaları ile üç değerlikli Cr (III) kromat dönüşüm (Trivalent Chromium Process, TCP) kaplamalarıdır [38].

### 2.5.1 Cr<sup>3+</sup> dönüşüm kaplaması (trivalent chromium process)

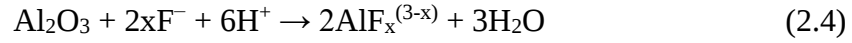
Üç değerlikli krom (Cr<sup>3+</sup>) dönüşüm kaplamaları çelik, alüminyum gibi birçok metal ve metal alaşımlarının korozyon direncini artırmakta kullanılmaktadır. Bu yöntemde, metal yüzeyi metalik malzemenin oksit tabakasını kaldırarak ve malzemenin metal oksitinden daha pasif bir yüzey olarak bir kimyasal veya elektrokimyasal işlem yoluyla substrata düşük çözünürlüklü bir yalıtkan bariyer sağlar. Bu kaplama yöntemi, ön işlemler, kromat dönüşüm kaplaması ve son işlem olarak temelde 3 aşamadan oluşur. Ön işlemler aşaması, alkalın yüzey aktif temizleyiciler ile yağ alma ve nitrik asit, sülfürik asit gibi asit içerikli bir deoksidasyon işleminden oluşur. Cr<sup>3+</sup> dönüşüm (TCP) kaplama prosesinde ise Hekzafloro zirkonat (H<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub> veya K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub>), üç değerlikli krom oksitler (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya Cr(OH)<sub>3</sub>), krom sülfat (Cr<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), sodyum florür (NaF) ve floroborat (BF<sub>4</sub><sup>-</sup>) tuzları içerebilen bir kromat banyosu kullanılarak metal yüzeyine kaplama işlemi gerçekleştirilir [37]. Oluşturulan kromat kaplamasının dehidrasyonu için son işlem olarak ise kurutma işlemi uygulanır [41].

#### 2.5.1.1 Kaplama mekanizması

TCP oluşumunda, kaplama yapılacak metalin yüzey oksidi kaldırılarak (ön işlemler) yerine kaplanan metal oksitten daha pasif bir oksit tabakası oluşturulur ve bu tabakanın dehidrasyonu ile kaplama oluşturulmuş olur.

Guardiola, X.V. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [39], AA 2024-T3 alaşımına Socomore markalı ‘Socosurf TCS’ ticari isimli kromat çözeltisi ile yaptıkları kromat kaplama işlemiyle, kromat kaplamasının çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasını araştırmışlardır. Kromat kaplama işlemini 0-600s aralığında daldırma süreleriyle uygulamış ve açık devre potansiyeli (OCP) uygulamasıyla her bir daldırma süresi için potansiyel değerleri elde etmişlerdir. Bu verilerin literatür ile kıyaslanması sonucunda, kromat dönüşüm kaplaması oluşum mekanizmasını açıklamışlardır. Öncelikle kromat çözeltisine daldırılan numune yüzeyindeki alüminyum oksit tabakası F<sup>-</sup> iyonlarının

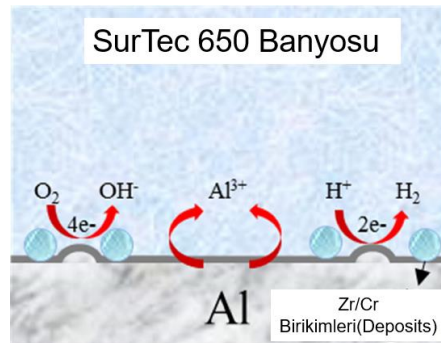
saldırısıyla inceltilir (denklem 2.4) ve elektronların tünelleme yapmasını sağlayarak alüminyum atomlarının yükseltgenmesine ortam sağlanır (denklem 2.5). İlgili denklemler (2.4), (2.5) ve (2.6) aşağıda verilmiştir.



Yukarıdaki verilen denklem 2.5’ de  $\text{OH}^-$  iyonlarının oluşması sonucunda yüzeye yakın bölgelerde pH artışı gözlenir. Bu pH artışıyla birlikte zirkonyum oksit ve krom hidroksit yapıları oluşmaya başlar ve kaplama çekirdeklenmesi gerçekleşmiş olur. Bu aşamada oluşan film tabakası flora alüminatları içermektedir.



Daha sonra, oluşan flora alüminat tabakasının üzerine zirkonyum oksit ve krom hidroksit oluşmaya devam eder ve TCP kaplaması oluşmuş olur (denklem-2.7 ve 2.8). Şekil 2.17’ de üç değerlikli kromat dönüşüm kaplamasının oluşumunun şematik görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 2.17 :** TCP kaplama oluşumunun şematik diyagramı, lokal bölgelerdeki pH artışı sonucunda kaplama malzemesinin birikmesi ve katodik reaksiyonların lokal bölgelerde ilerlemesi [38].

### 2.5.1.2 Kaplama yapısı

$\text{Cr}^{3+}$  Kromat kaplama yapısı, zirkonyum oksit/hidrat, krom oksit veya krom hidroksit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ) içeren bir dış katman ve bu katmanın altında alüminyum oksit

veya K ve F bakımından zengin floroalüminat ( $K_xAlF_{3+x}$ ) içeren bir metal kaplama ara yüzeyinden oluşmaktadır [37,38] Şekil 2.18’ de dubleks kaplama yapısı gösterilmektedir. Kaplama kalınlığı ise pH, süre, sıcaklık gibi etkenlere bağlı olarak 40-100 nm aralığında olabilmektedir [38–43].



Şekil 2.18 : Dubleks Cr<sup>3+</sup> kaplama (TCP) yapısı [41].

## 2.6 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Korozyonu

Cecchel, S., Cornacchia, G., ve Gelfi, M., farklı bakır oranlarına sahip alüminyum döküm alaşımları ile yaptıkları çalışmada [44], tuz testinin geleneksel değerlendirmeden farklı olarak kantitatif bir değerlendirme ile AlSi9Cu3 - EN AC 46000 (Cu: ağı.% 2 - 4), AlSi9 - EN AC 44400 (Cu: ağı.% 0.08), ve AlSiMnMg - EN AC 43500 (Cu: ağı.% 0.03) alaşımlarının korozyon hızlarının kıyaslamasını yapmışlardır. AlSi9Cu3, AlSi9 ve AlSiMnMg numunelerini, Ağı.%3,5 NaCl çözeltisine 30 dakika daldırma sonrasında gerçekleştirdikleri korozyon testlerinde, bu alaşımların korozyon akımlarını sırasıyla  $\sim 5.38 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ,  $\sim 1.36 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  ve  $\sim 1.23 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  olarak bulmuşlardır. AlSi9Cu3 korozyon akımının diğer iki alaşıma göre yaklaşık 4 kat daha fazla olduğu ve en düşük korozyon direncine sahip olduğu görülmektedir. Farklı saatlerde uygulanan tuz testi sonuçlarına göre de AlSi9Cu3 numunelerinin diğer iki alaşım numunelerinden daha fazla korozyona uğradığı sonucuna varmışlardır. Bunun sebebinin ise, AlSi9Cu3 alaşımındaki Al-Cu intermetaliklerin den kaynaklı olabileceğini söylemişlerdir.

Literatürde Al-Si alaşımlarının Sr gibi ötektik modifiye edici ilavesinin, B, Ti gibi tane inceltici ilavelerinin alaşımın korozyon direncine etkisi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Öztürk, İ. ve arkadaşları [45] yaptıkları çalışmada, hem kum kalıba döküm hem de kokil kalıba döküm yöntemi ile dökülmüş A356 (AlSi7Mg0.3) alüminyum döküm alaşımı numunelerine farklı Sr miktarları ilave ederek korozyon dirençlerini kıyaslamışlardır. Ötektik bölgede, korozyonun Si parçacıklarının

çevresinde oluştuğunu, Si parçacıklarının şekillerinin oluşan koruyucu oksit tabakasının oluşumuna etki ettiği ve böylece korozyonunun şiddetini belirlediğini belirtmişler. Hem kum hem de yüksek basınçlı döküm A356 alaşımı için, Sr ilavesi yapılmamış alaşım, Sr modifiyeli alaşıma kıyasla en düşük korozyon önleyici davranışa sahip olduğunu ve A356 alaşımlarının korozyon direncinin, Sr ilavesi ile geliştirilebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Duygun, İ.K. ve arkadaşları [47] A360 ( AlSi10Mg(Fe) ) alaşımı ile yaptıkları çalışmada, A360 alaşımına 200 ppm Sr ilavesinin korozyon direnci üzerine etkisini %3,5 NaCl çözeltisinde 1 saat ve 24 saat bekletilmesi sonucunda Tafel ekstrapolasyon ölçümleri ile kıyaslamışlardır. 1 saat %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen numunelerin korozyon akım yoğunluğunun Sr ilavesiyle arttığını ve bu artışın sebebini Sr ilavesi sonucunda oluşan ötektik yapıdaki daha küçük boyuttaki Si partiküllerin oluşturduğu Al-Si tane sınırlarının artışından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Sr modifiye edici ilaveli A360 alaşımının %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilme süresinin 1 saatten 24 saate çıkarılmasıyla, numunenin korozyon akım yoğunluğunda azalma ve korozyon potansiyelinin negatif yöne doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum numune yüzeyinde oluşan pasif oksit hidroksit film ile açıklanmıştır. Sr ilavesi yapılmayan A360 alaşımında ise, bekletilme süresi 1 saatten 24 saate çıkarılmasıyla korozyon akım yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir.

Osorio, R.W. ve arkadaşları [48] yaptıkları çalışmada, Al- %9 Si alaşımına Na içeren bir ötektik modifiye edici ilavesinin korozyon direncine etkisini incelemişler ve yapılan elektrokimyasal testler (Tafel, EIS) sonucunda, ötektik modifiye edici ilavesi yapılan numunenin korozyon direncinin, ilave yapılmayan numuneye göre daha düşük olduğunu öne sürmüşlerdir. Bunun sebebini ise modifiye edilmiş ötektik yapıda oluşan küçük ve dallanmış Si partiküllerinin Al-Si tane sınırlarını artırması ve artan tane sınırları nedeniyle, ötektik modifiye edilmiş numunelerin korozyona uğrama eğiliminin daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır.

Ralston, K.D. ve Birbilis [66] , N. yaptıkları derleme çalışmasında NaCl çözeltisinde test edilen tane inceltme uygulanmış çeşitli alüminyum alaşımlarının tane inceltme sonucunda alaşım korozyon direncinin azaldığını ileri sürmüşlerdir.

Öztürk, İ. ve arkadaşlarının döküm öncesinde tane inceltici ilavesi yapılan çalışmada, A356 alaşımının Sr, B ve Ti ilavesinin korozyon direnci üzerindeki etkisi yapılan Tafel ekstrapolasyon, EIS testleri ile incelenmiştir. Sr, B ve Ti ilavesi yapılan numunelerin korozyon direncinin ilave yapılmayan numunelere göre daha fazla olduğu sonucuna varılmışlardır [46].

Literatürde, tane inceltmenin alüminyum alaşımlarının korozyon direnci üzerindeki etkileri ile ilgili çelişki mevcuttur. Tane inceltmenin alaşımın korozyon direnci üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkisinin olduğunu ileri süren çalışmalar bulunmaktadır. Alaşım içeriği, tane inceltme yöntemi ve test ortamı bu sonuçları etkilemektedir.

Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 alaşımlarının bakır oranlarının sırasıyla ağırlık % 2,5 ve ağırlık % 0,1 olduğu görülmektedir. Özellikle, ağırlıkça yüksek bakır içeren AlSi9Cu3 alaşımında bakır ve oluşturduğu intermetalik bileşiklerin, etrafındaki diğer alaşım fazlarından daha katodik elektrokimyasal özelliğe sahip olması sebebiyle mikro-galvanik korozyon/taneler arası korozyona sebep olduğu bilinmektedir [44]. Alüminyum döküm alaşımlarının tane inceltici ve ötektik modifiye edici ilavesi ilgili çeşitli çalışmalar yukarıda verilmiştir. Ancak,  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması sonrası, alüminyum döküm alaşımlarının korozyon direnci ile ilgili literatürde çalışma sayısı sınırlıdır.

Bu çalışmada, yüksek ve düşük bakır oranına sahip alüminyum döküm alaşımlarının tane inceltici ve ötektik modifikasyonu sonrasında uygulanan  $Cr^{3+}$  dönüşüm kaplamalarının korozyon direnci incelenmiştir.



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Numune Dökümü

##### 3.1.1 Numune kalıbı

Deneysel çalışmalarda kullanılacak numunelerin dökümünde 200 g ağırlığında, 150 mm x 100 mm x 5 mm boyutlarına sahip parçanın dökümünü yapacak kalıcı bir metal enjeksiyon kalıbı kullanılmıştır.

##### 3.1.2 Malzeme özellikleri

Döküm denemelerinde, ağırlıkça yüksek bakır oranına sahip (~ %2,5) AlSi9Cu3 alaşımı ile ağırlıkça düşük bakır oranına sahip (~ %0,1) AlSi10Mg alüminyum döküm alaşımı kullanılmıştır. Çizelge 3.1’ de bu iki alaşımın standart ve numune dökümleri sırasında ölçülen kimyasal kompozisyonları verilmiştir.

**Çizelge 3.1 : AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg kimyasal analiz sonuçları (ağ.%).**

| Alaşım      |         | Si   | Cu   | Mg        | Fe   | Zn   | Ni   | Mn   | Ti   | Sr <sup>1</sup> |
|-------------|---------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|-----------------|
| AlSi9Cu3    | EN 1706 | 8-11 | 2-4  | 0,05-0,55 | 1,3  | 1,20 | 0,55 | 0,55 | 0,20 | -               |
| EN AC 46000 | Ölçülen | 9,20 | 2,29 | 0,207     | 0,90 | 1,18 | 0,1  | 0,18 | 0,04 | 0,0172          |
| AlSi10Mg    | EN 1706 | 9-11 | 0,1  | 0,2-0,5   | 1,0  | 0,15 | 0,15 | 0,55 | 0,25 | -               |
| EN AC 43400 | Ölçülen | 9,78 | 0,09 | 0,262     | 0,79 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,07 | 0,0167          |

<sup>1</sup>AlSr15 ilavesi yapılan numunelere yapılan spektral analiz sonucunda bulunan Stronsiyum miktarıdır.

Numune üretiminde bu iki alaşıma ilave olarak tane inceltici AlB3 ve modifiye edici AlSr15 ön alaşımları kullanılmıştır.

##### 3.1.3 Döküm denemeleri

Döküm denemeleri, AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımları, numune kalıbı ve 300 ton mengene kitleme tonajına sahip MetalPres marka döküm presi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Külçe olarak temin edilen AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımları doğalgazlı ana ergitme ocaklarında ergitildikten sonra 2 dk gaz alma işlemi yapılmış ve granül temizleme flaksı kullanılarak rafine edilmiştir. Ergitilen hammaddeler

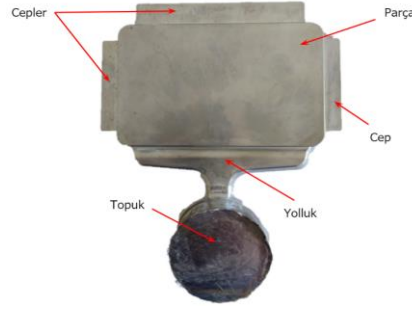
elektrikli makine başı ergitme ocaklarına transfer edildikten sonra döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Döküm parametreleri, ham madde ocak sıcaklığı 715 °C, 1.faz hızı % 50, 2.faz hızı 2 tur, 3.faz basıncı 280 bar, kademe 18,5 cm ve mengene süresi 7 sn. şeklindedir.

Her iki alaşım içinde ön alaşım ilavesiz, AlB3 ilaveli, AlSr15 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ilaveli olmak üzere 4 farklı numune dökümü gerçekleştirilmiştir. Buradan itibaren ön alaşım ilavesiz, AlB3 ilaveli, AlSr15 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ön alaşım ilaveli numunelere sırasıyla normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli olarak bahsedilecektir. Tablo-3.3’ de numune döküm kodları ve numunelerin ön alaşımı ilave durumları verilmiştir.

**Çizelge 3.2 : Numune döküm kodları ve ön alaşım ilaveleri.**

| Numune Kodu | Ham madde | Ön alaşım İlave Durumu | Numune Kodlaması |
|-------------|-----------|------------------------|------------------|
| 1           | AlSi9Cu3  | -                      | Normal           |
| 2           | AlSi9Cu3  | AlB3                   | B                |
| 3           | AlSi9Cu3  | AlSr15                 | Sr               |
| 4           | AlSi9Cu3  | AlB3 + AlSr15          | B + Sr           |
| 5           | AlSi10Mg  | -                      | Normal           |
| 6           | AlSi10Mg  | AlB3                   | B                |
| 7           | AlSi10Mg  | AlSr15                 | Sr               |
| 8           | AlSi10Mg  | AlB3 + AlSr15          | B + Sr           |

AlB3 ön alaşım ilavesi her baskı öncesinde kepçeye ilave edilmiştir. AlSr15 ön alaşım ilavesi ise ana ergitme sırasında yapılmıştır. Ön alaşım ilavesi sonrası istenilen ağırlıkça B ve Sr miktarları %0,02’ dir. Alaşımların içerisindeki Sr miktarı yaklaşık %~0,017 olarak ölçülmüştür. Şekil-3.3’de görseli verilen dökülen numune yolluk ve cepleriyle beraber 550 g ağırlığındadır. B ön alaşım ilave miktarı 550 g ağırlık referans alınarak belirlenmiş ve bu miktar üzerinden AlB3 ilavesi gerçekleştirilmiştir. Sr ilave miktarı ise transfer edilen ergimiş alaşım ağırlığına (250 kg) göre hesaplanarak 360 g AlSr15 olarak ilave edilmiştir.



**Şekil 3.1 : Dökülmüş numune baskısı.**

### 3.1.4 Metalografik ve morfolojik karakterizasyon işlemleri

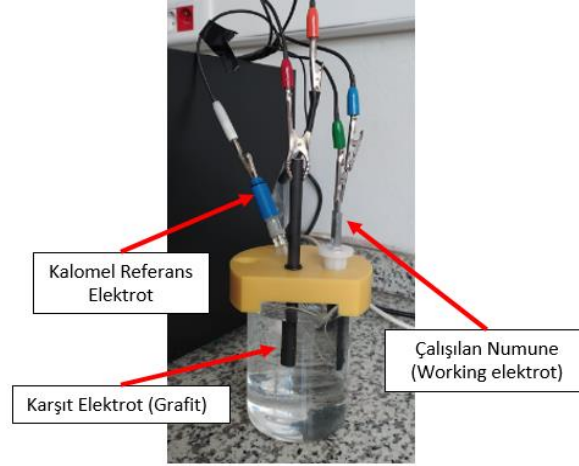
Metalografik ve morfolojik karakterizasyon işlemleri kapsamında optik mikroskop ile mikroyapı görüntüleme, SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Dökülmüş parçaların belirlenen bölgelerinden alınmış numuneler sırasıyla 180, 600, 1000 ve 2500'lük zımparalama işlemlerinden geçmiştir ve sonrasında 1 µm koloidal silika ile parlatılmıştır. Tane boyutu analizi için numunelere Barker dağılayıcısı (5 mL %48 HBF<sub>4</sub> + 200 mL H<sub>2</sub>O) kullanılarak 20 V gerilimde 1 dakika süresince elektrolitik dağlama uygulanmıştır. ZEISS AxioLab optik mikroskobu, mikroyapı görüntülerinin alınmasında kullanılmıştır.

Döküm ve TCP kaplı numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo marka 'Surftest SJ-301' model yüzey pürüzlülük cihazı ile  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm} \times 5$  (0.8 mm uzunluğunda 5 adet ölçüm) parametrelerinde her numuneden 5'er adet ölçüm yapılmıştır. Minimum ve maksimum değerler çıkarılarak kalan 3 ölçümün ortalaması alınmıştır.

### 3.1.5 Elektrokimyasal karakterizasyon işlemleri

Tafel ekstrapolasyon, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), ve çevrimsel Voltammetry (CV) deneyleri elektrokimyasal karakterizasyon işlemleri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal test numuneleri 150mm x 100mm x 5 mm dökülmüş plakalardan kesilmiş, zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra 1 cm<sup>2</sup> açık kalacak şekilde kapatılmıştır. Tüm elektrokimyasal deneyler, test edilecek numune, grafit karşıt elektrot ve doymuş kalomel referans elektrotunu içeren üçlü elektrot sisteminde, oda sıcaklığında Gamry Interface 1000E potansiyostat

kullanılarak yapılmıştır. Deney sisteminin görseli Şekil 3.2’ de verilmiştir. Verilen tüm potansiyeller, kalomel referans elektroda göre belirtilmiştir.



**Şekil 3.2 :** Elektrokimyasal deneylerin gerçekleştirildiği deney sistemi.

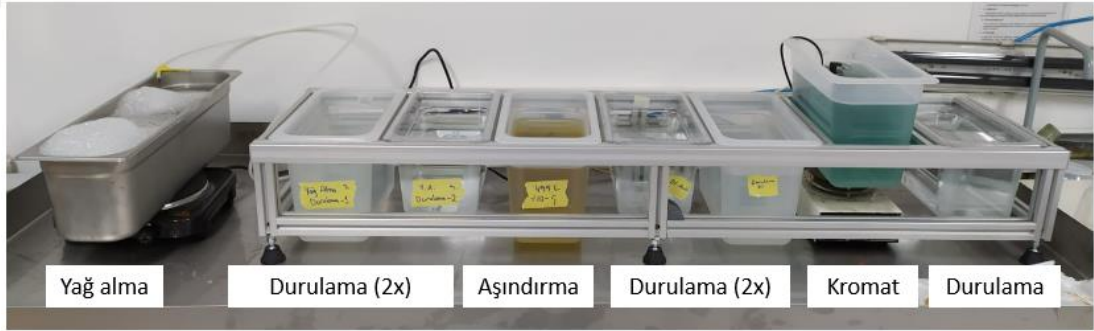
Tafel ve EIS deneyleri %3,5 NaCl çözeltisinde, CV deneyleri ise sodyum tetraborat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ve 7,07 g/l borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) den oluşan doymuş borat çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Tafel ekstrapolasyon deneyi açık devre potansiyeline ( $E_{\text{OCP}}$ ) göre  $\pm 0,250$  mV aralığında 0,5 mV/s hızla taranmış ve veriler elde edilmiştir. Tafel deneyi sonrasında hesaplamalar için gerekli elektrokimyasal parametreler ilgili referanslarda [1,65] tarif edildiği gibi, elde edilen veriler ile çizdirilen grafikte, korozyon potansiyeli ( $E_{\text{corr}}$ ), anodik ve katodik kolların geçiş noktasına paralel bir çizgi çizilerek bulunmuştur. Tafel eğrisinin anodik ve katodik kollarına teğetler çizilmiş ve bu iki teğetin  $E_{\text{corr}}$ ’ dan çizilen paralel çizgi ile kesişim noktasının akım değeri korozyon akımı ( $i_{\text{corr}}$ ) olarak bulunmuştur. Bu iki teğetin eğimi,  $\beta_a$  ve  $\beta_c$ ’yi vermektedir. Anodik ve katodik Tafel eğimi  $E_{\text{corr}}$  ile  $E_{\text{corr}} \pm 50\text{mV}$  aralığındaki değerlerin teğetleri çizilerek bulunmuştur.

EIS deneyleri, 1 Hz -  $10^5$  Hz frekans aralığında 10 mV potansiyel genlikte gerçekleştirilmiş, ve elde edilen veriler belirlenen eş değer elektrik devresine göre ‘Gamry Echem Analyst’ programı kullanılarak analiz (fit) edilmiştir. CV deneyleri referans çalışmalarda belirtildiği gibi [44-47], öncelikle  $-0.70 V_{\text{SCE}}$  ‘den  $0.3 V_{\text{SCE}}$  ‘ ye ve ardından tekrar  $-1,2 V_{\text{SCE}}$  ‘ye 5 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiş ve üç çevrim alınmıştır. Numuneler, ilk çevrimden 5 dakika önce, ikinci çevrimden 10 dakika önce ve üçüncü çevrimden 20 dakika  $-0.70 V_{\text{SCE}}$  ‘ de tutulmuştur. İlk iki çevrim, alüminyum

oksidasyonuna karşılık gelen sinyalin azaltılması için değerlendirilmemiş ve sadece üçüncü çevrim kullanılmıştır.

### 3.2 Dönüşüm Kaplaması (Conversion Coating) Deneyleri

Numunelere uygulanan kromat dönüşüm kaplaması proses akışı, banyo kompozisyonu ve banyo parametreleri Çizelge 3.3’ de belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Kromat dönüşüm kaplamasında Surtec 650 ChromitAl kromat dönüşüm kaplaması kimyasalı kullanılmıştır. pH ölçümlerinde, WTW marka pH 3110 SET 2 model pH metre cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.3’ de kromat dönüşüm kaplamasının gerçekleştirildiği deney seti verilmiştir.



Şekil 3.3 : Kromat dönüşüm kaplamasının gerçekleştirildiği deney seti.

Çizelge 3.3 : Kromat dönüşüm (TCP) kaplaması proses akışı ve banyo kompozisyonu & parametreleri.

| Proses No | Proses             | Banyo Kompozisyonu       | Banyo Parametreleri |       |
|-----------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------|
| 1         | Yağ Alma           | Surtec 133<br>ağ.% 4.    | Sıcaklık            | 70 °C |
|           |                    |                          | pH                  | 9.3   |
| 2         | Durulama           | Saf su                   | Daldırma zamanı     | 3dk   |
| 3         | Asit ile Aşındırma | Surtec 495 L<br>hac.% 10 | Daldırma zamanı     | 1 dk  |
|           |                    |                          | Sıcaklık            | 23 °C |
| 4         | Durulama           | Saf su                   | Daldırma zamanı     | 1 dk  |
| 5         | Dönüşüm Kaplaması  | Surtec 650<br>ChromitAl  | Sıcaklık            | 35 °C |
|           |                    |                          | pH                  | 3.9   |
| 6         | Durulama           | Saf su                   | Daldırma zamanı     | 5 dk  |
|           |                    |                          | Daldırma zamanı     | 1 dk  |

### 3.3 Doğal Tuz Püskürtme Testi (NSS Test) Uygulaması

Uzun dönem korozyon özelliklerinin kıyaslanması için AlSi9Cu3 numunelerine TS EN ISO 9227: 2016 ‘Yapay atmosferlerde korozyon deneyleri - Tuz püskürtme deneyleri (tuz testi)’ standardına uygun 840 saat süreyle tuz testi (NSS testi) uygulanmıştır. Tuz testi ISO 9227 standardına uygun şekilde,  $35 \pm 2$  °C sıcaklıkta, 50 mg/L  $\pm$  5 mg/l (%5  $\pm$  %1) NaCl atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

AlSi9Cu3 alaşımı döküm ve TCP kaplı 4 farklı ön alaşım ilaveli toplam 8 adet numune test edilmiştir. AlSi10Mg alaşımı için de benzer şekilde 2 farklı yüzeyden 4 farklı ön alaşım ilavesi ile 8 farklı numune test edilmiştir. Test edilen numunelerin yüzey alanları 75 cm<sup>2</sup>’dir.

Numunelerin 840 saat sonunda ağırlık değişimlerinin hesaplanabilmesi için her bir numune 1 mg’lık hassasiyette terazi kullanılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri test başlamadan ve test sonunda saf su ile yıkama sonrasında iki kez ölçülmüştür.

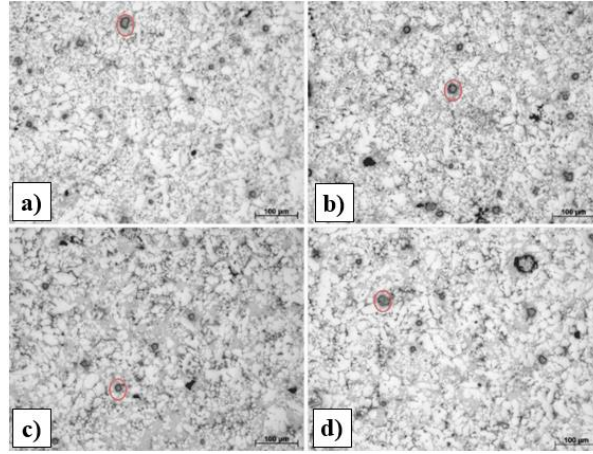
## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Metalografik ve Morfolojik Karakterizasyon Sonuçları

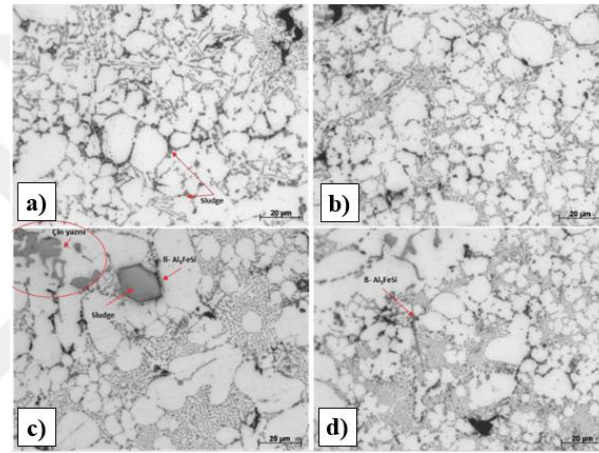
#### 4.1.1 AlSi9Cu3 optik mikroskop görüntüleri

AlSi9Cu3 mikroyapıları incelendiğinde, tüm numuneler için mikroyapının  $\alpha$ -Al, Al-Si ötektik fazı ve intermetalik fazlarından oluştuğu görülmektedir. Numunelerde gözlemlenen intermetalik fazlar ve ön alaşım ilavelerinin etkinliği aşağıda verilmiştir. AlSi9Cu3 alaşımında bakır içeren  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$  intermetalikleri bulunmaktadır [53, 54]. Demir içeren fazlar, farklı morfolojilere sahip intermetalikler olarak çökelebilir. Bunlardan en yaygın olanı çokyüzlü kristaller, Çin yazısı (Chinese script) ve iki boyutlu mikroyapıda iğne gibi görünen ince fazlardır. İki boyutlu ince yapıdaki fazlar  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  fazlarıdır. Demir, mangan ve krom  $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr})_3\text{Si}_2$  fazını oluştururlar ve bu faza ‘çamursu faz’ (Sludge) adı verilir. Çamursu fazlar,  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  fazına göre daha yuvarlak şekilli çok kenarlı fazlardır [55, 56].

AlSi9Cu3 ile dökülen normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin mikroyapıları incelendiğinde, yukarıda bahsedilen intermetaliklerin gözlemlendiği söylenebilir. Şekil-4.1’ de kırmızı ile işaretlenmiş gri çok kenarlı çokgene benzeyen fazlar çamursu fazlarıdır. Şekil-4.2’ deki mikroyapı görüntülerinde de Çin yazısı, çamursu faz ve  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  fazları görülmektedir. Bakır içeren intermetaliklerin belirlenmesi SEM analizi sonrasında yapılacaktır. Bor ilavesinin yapıldığı B ve B + Sr ilaveli numunelerin mikroyapı görüntülerinde, özellikle numunenin kenarlarında  $\alpha$ -Al faz bölgelerinin daha küçük alanlarda ve sayısının çok olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.1 b), d)’ de Şekil 4.1 a), c)’ ye göre nispeten daha küçük  $\alpha$ -Al faz bölgelerinin bulunduğu görülmektedir. Sr ilavesi ile ötektik Si kaba sivri uçlu yapıdan ince lifli morfolojiye dönüşür ve ötektik faz modifiye edilmiş olur [48]. Şekil 4.1 c), d)’ de ötektik fazın yapısı incelendiğinde, ötektik fazın lifsi yapıya dönüştüğü gözlemlenmiş ve modifikasyon işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Bu mikroyapı görüntülerinin literatür ile kıyaslandığında [56, 57] ötektik fazın benzer mikroyapı görüntülerine sahiptir ve Sr ilavesi ile ötektik modifikasyonu sağlanmıştır.



**Şekil 4.1 :** AlSi9Cu3 numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (200x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.

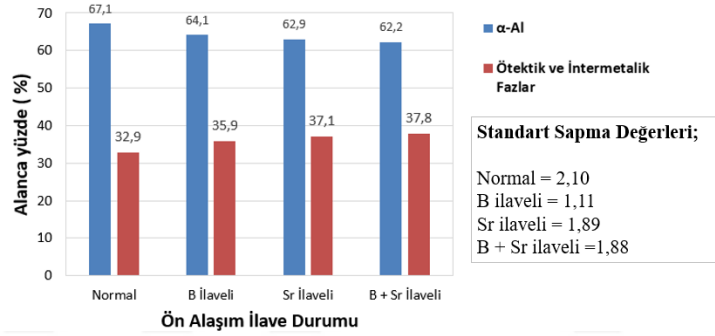


**Şekil 4.2 :** AlSi9Cu3 numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (1000x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.

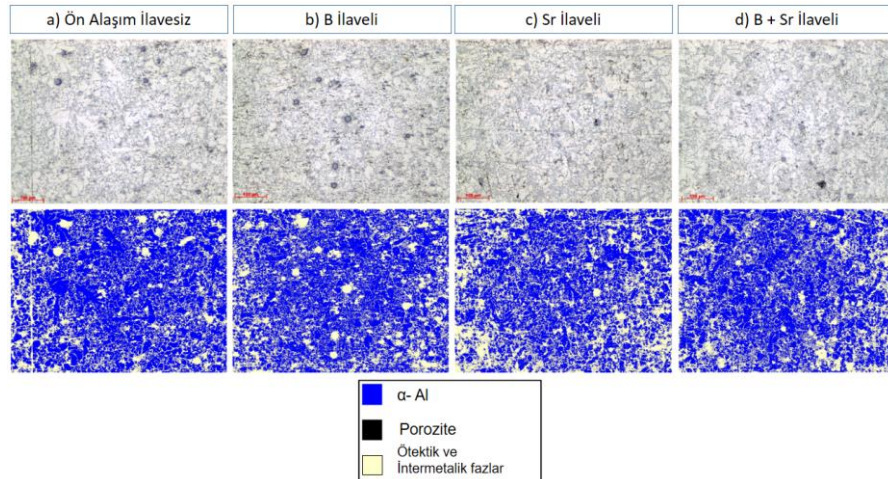
#### 4.1.2 AlSi9Cu3 mikroyapı faz analizi

AlSi9Cu3 ile dökülen numunelerin 0,5 mm derinlikte zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen mikroyapı görüntülerine faz analizi yapılmıştır. Şekil 4.3 ve 4.4’ deki sonuçlar incelendiğinde, ön alaşım ilavesiz numunesinin  $\alpha$ -Al faz bölgeleri B ilaveli numuneden ortalama %3, Sr ilaveli numuneden ortalama %4, ve B + Sr ilaveli numuneden ortalama % 4 daha fazladır. Bor ilaveli numunelerde tane inceltme sonucunda, tane sayısının artması sonucunda tane sınırları artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda (500 - 525 °C) katılaşması gerçekleşen bakır içeren  $Al_2Cu$  intermetalik fazı tane sınırlarında oluşma eğilimi göstermektedir. Buna ilave olarak, intermetalik fazlar ötektik fazların oluşum reaksiyonları ile beraber katılaşma eğilimi gösterirler [54]. Bu nedenle B ve Sr ilaveli numunelerde ( $\alpha$ -Al: %64,1  $\pm$  1,3 ve %62,2  $\pm$  2,0) intermetalik ve ötektik fazların  $\alpha$ -Al faz bölgesine oranı

ön alaşım ilavesiz numunesinden ( $\alpha$ -Al:  $67,1 \pm 2,6$ ) daha fazladır. Benzer şekilde stronsiyum ilaveli Sr ve B + Sr ilaveli numunelerde ( $62,9 \pm 2,4$  ve  $62,2 \pm 2,0$ ) ön alaşım ilavesiz numunesine ( $67,1$ ) göre alanca daha az  $\alpha$ -Al faz bölgesine sahiptir. Bunun sebebi ise, ötektik fazının modifikasyonu sonucu, ötektik fazdaki Si kaba sivri uçlu yapıdan ince lifli yapıya geçmesidir [57]. Bu nedenle, ötektik fazlar iki boyutlu alınan mikroyapı görüntülerinde daha fazla alana sahiptir. Ötektik fazların fazlalığı, intermetalik fazların, ön alaşım ilavesiz numunesine göre fazla olmasına neden olmuştur. Bu sebeple, Sr ilavesi yapılan Sr ve B + Sr ilaveli numuneler ön alaşım ilavesiz numuneden  $\alpha$ -Al fazı olarak daha az ve ötektik/intermetalik faz bölgeleri olarak daha fazladır. Yapılan faz analizi sonucuna göre de, B ve Sr ön alaşım ilavelerinin başarılı bir şekilde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.3 : AlSi9Cu3 faz analizi sonuçları.

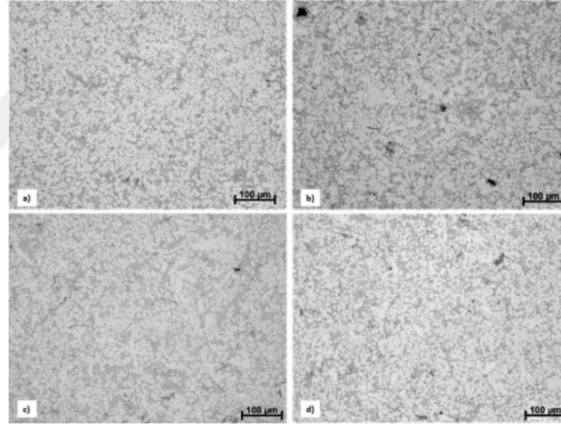


Şekil 4.4 : AlSi9Cu3 faz analizi sonucu görselleri.

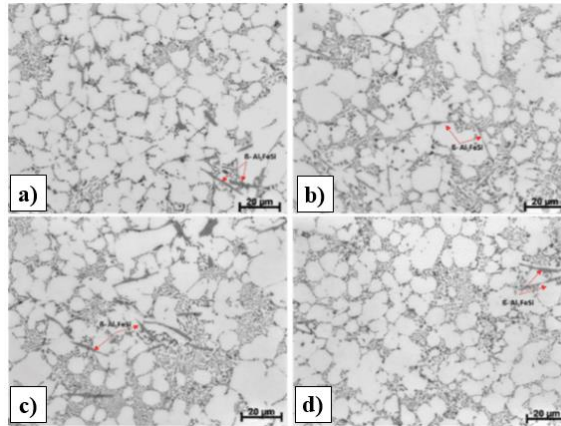
#### 4.1.3 AlSi10Mg optik mikroskop görüntüleri

AlSi10Mg alaşımı ile dökülen numunelerin ön alaşım ilavesiz, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr ilaveli mikroyapıları incelendiğinde, mikroyapının  $\alpha$ -Al, ötektik fazlar ve

intermetaliklerden oluştuğu görülmektedir. Literatürde [58,59] varolan yapılar incelendiğinde, AlSi10Mg alaşımı numunelerin mikroyapı görüntüleri ve içerdiği fazlar benzerlik göstermektedir.  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi,  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si intermetalik fazları AlSi10Mg alaşım mikroyapısında oluşmaktadır [58]. Şekil-4.5’ de tüm numunelerde a), b), c), d),  $\beta$ - Al<sub>5</sub>FeSi fazının bulunduğu görülmektedir.  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> fazı alaşımdaki Mn oranı (%0,05) sebebiyle mikroyapıda gözlemlenmemiştir. SEM analizleri sonucunda bu fazın ve bakır içeren intermetalik fazların tayini yapılacaktır. Şekil 4.6 b), d)’ ye B ilaveli ve B + Sr ilaveli numune mikroyapılarında,  $\alpha$ -Al bölgelerinin ön alaşım ilavesiz (normal) numuneye kıyasla daha küçük ve küresel şekilde olduğu ve ötektik faz bölgelerinin ise alanca daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.6’ c), d)’ de, Sr ilavesi sonucu lifsi ötektik fazları oluşmuş ve ötektik modifikasyonun gerçekleştiği görülmektedir. Literatürdeki Sr ilavesi sonucu elde edilen mikroyapılar [56-58] ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir.



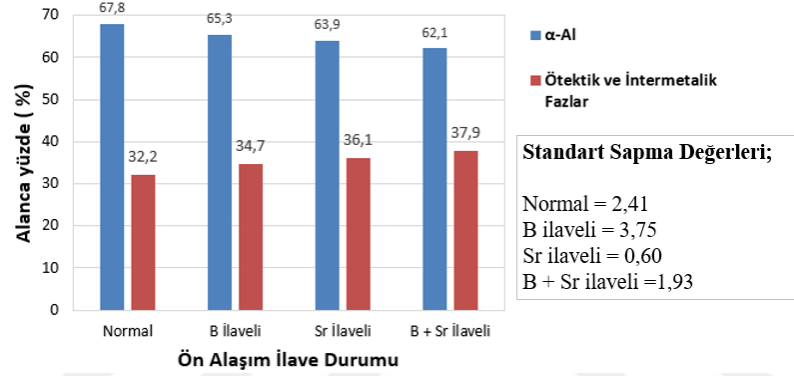
**Şekil 4.5 :** AlSi10Mg numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (200x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.



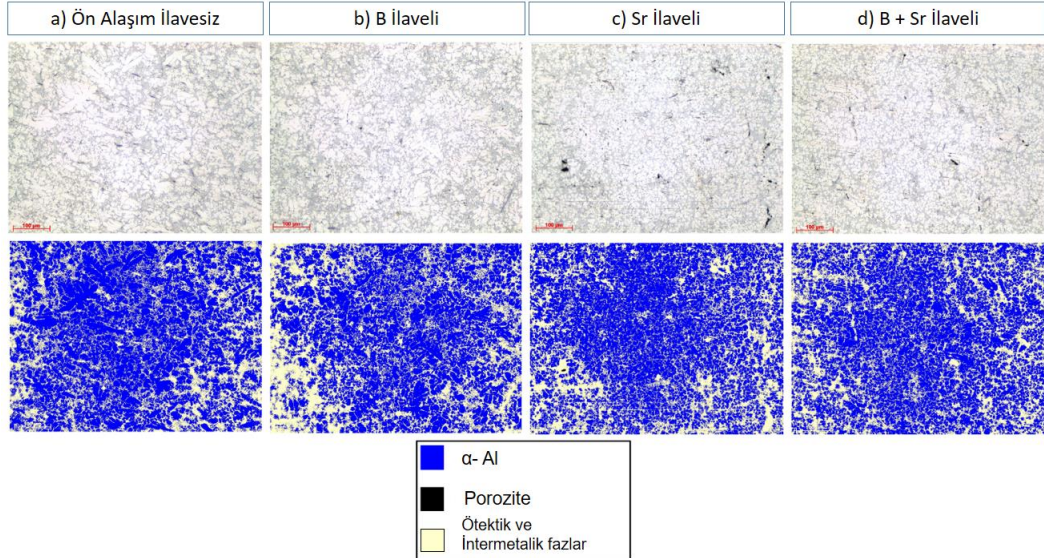
**Şekil 4.6 :** AlSi10Mg numune parçalarının mikroyapı görüntüleri (1000x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.

#### 4.1.4 AlSi10Mg mikroyapı faz analizi

Şekil 4.7 ve 4.8’ deki faz analizi sonuçları incelendiğinde ön alaşım ilavesi yapılmayan numunenin  $\alpha$ -Al faz bölgelerinin alanca yüzdesi  $67,8 \pm 2,8$ , B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunenin alanca  $\alpha$ -Al faz oranları sırasıyla  $65,3 \pm 3,3$  ,  $63,9 \pm 0,6$ ,  $62,1 \pm 2,0$  şeklindedir. B ve Sr ilaveleri sonrasında numunelerin ötektik ve intermetalik fazların  $\alpha$ -Al fazına oranı ilave yapılmayan numuneye göre fazla olduğu görülmektedir. AlSi9Cu3 faz analiz çalışma sonuçları ile benzer sonuçlar görülmüş ve B ve Sr ilavelerinin etkinliği saptanmıştır.



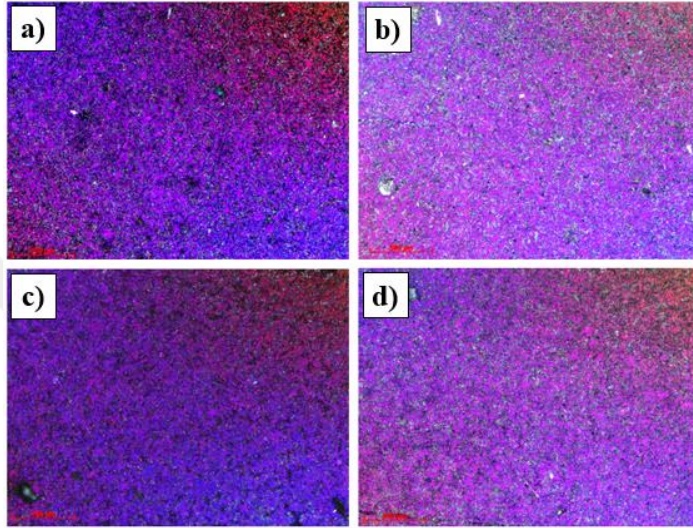
Şekil 4.7 : AlSi10Mg faz analizi sonuçları.



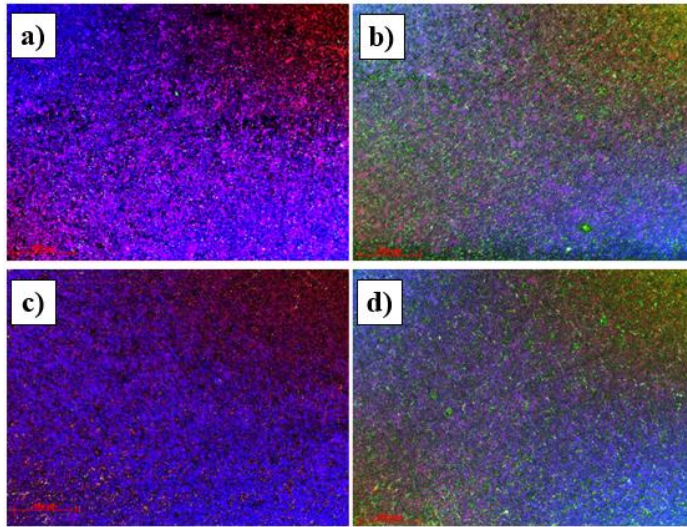
Şekil 4.8 : AlSi10Mg faz analizi sonucu görselleri.

#### 4.1.5 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının tane boyutu analizi

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarına Barker çözeltisi kullanılarak elektrolitik dağlama yapılmış ve polarize ışık altında mikroyapı görüntüleri alınmıştır. şekil 4.9' da AlSi9Cu3 alaşımı numuneleri şekil 4.10' da ise AlSi10Mg alaşımı numunelerinin mikroyapıları verilmiştir. Her iki alaşım içinde B ilaveli numunelerinin tane boyutunun ön alaşım ilavesiz ve Sr ilaveli numunelerden küçük olduğu görölmektedir.



**şekil 4.9 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Barker çözeltisi ile elektro dağlama sonucunda elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli.



**şekil 4.10:** AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Barker çözeltisi ile elektro dağlama sonucunda elde edilen mikroyapı görüntüleri; a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli.

#### 4.1.6 AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri

Çizelge 4.1’ de AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı ön alaşım ilavesiz ve ön alaşım ilaveli numunelerinin elektrokimyasal test numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları verilmiştir. AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunesinin Rz yüzey pürüzlülük değeri 0,45  $\mu\text{m}$ ’ dir. AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin TCP kaplama ön işlemleri asit ile aşındırma aşamasında yüzeyde meydana gelen çözünmelerden dolayı yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin, AlSi9Cu3 döküm yüzeyine göre yüzey pürüzlülüğü artışı TCP kaplanmış normal ve B ilaveli numunelere göre daha fazladır. AlSi9Cu3 Döküm yüzeye göre yüzey pürüzlülük farkları Sr ilaveli için:  $\sim 1 \mu\text{m}$ , B + Sr ilaveli için:  $\sim 0,8 \mu\text{m}$ , normal için  $\sim 0,65 \mu\text{m}$ , B ilaveli için  $\sim 0,75 \mu\text{m}$ ’ dir. AlSi9Cu3 alaşımı Sr ve B+Sr ön alaşım ilaveli numunelerin TCP kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinin ön alaşım ilavesiz ve B ilaveli numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinden fazla olmasının sebebi özellikle ötektik modifikasyonu sonucu anot katot yüzeyinin artmasıdır.

AlSi10Mg alaşımı numunelerinde ise döküm ve TCP kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinde büyük değişimler görülmemekle birlikte Sr ilavesinin kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğünü artırdığı ( TCP kaplanmış B + Sr ilaveli numune için:  $\sim 0,20 \mu\text{m}$ ’ fark) görülmektedir.

**Çizelge 4.1 :** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı ön alaşım ilavesiz, B ilaveli Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin döküm ve TCP kaplama sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları.

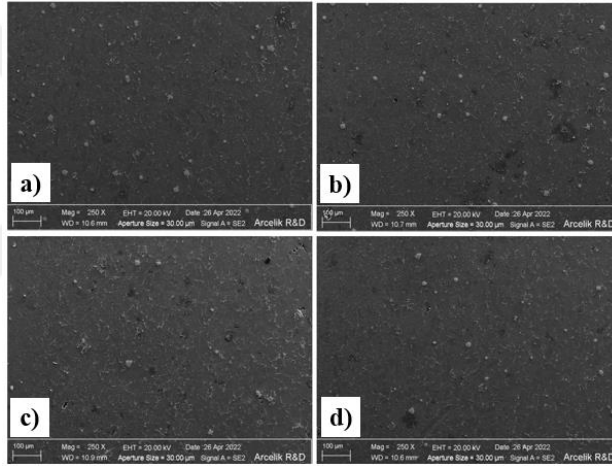
| Alaşım   | Döküm Numuneleri | TCP Kaplanmış Numuneler |                 |                 |                 |
|----------|------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          |                  | Normal                  | B İlaveli       | Sr İlaveli      | B + Sr ilaveli  |
| AlSi9Cu3 | $0,45 \pm 0,03$  | $1,11 \pm 0,02$         | $1,18 \pm 0,09$ | $1,46 \pm 0,07$ | $1,27 \pm 0,02$ |
| AlSi10Mg | $0,68 \pm 0,06$  | $0,63 \pm 0,07$         | $0,75 \pm 0,02$ | $0,75 \pm 0,04$ | $0,87 \pm 0,01$ |

#### 4.2 SEM ve EDS Analizi Sonuçları

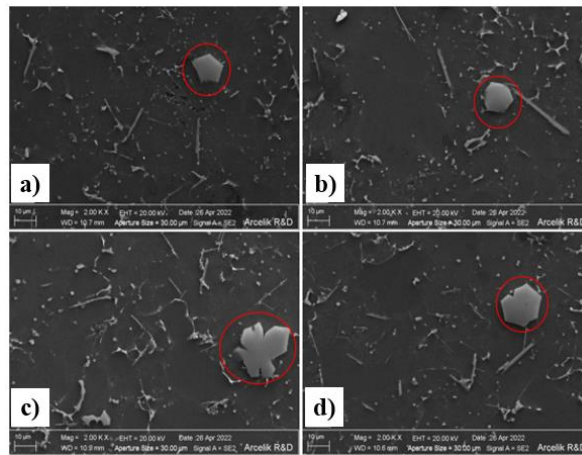
##### 4.2.1 AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin SEM EDS sonuçları

Şekil 4.11 ve 4.12’ de AlSi9Cu3 numunelerinin SEM görüntüleri, Şekil 4.13’ de ise EDS haritalama sonuçları verilmiştir. SEM görüntüleri ve EDS haritalama sonuçları incelendiğinde, optik mikroskop ile elde edilen görüntülere benzer şekilde, mikroyapının  $\alpha$ -Al, Al-Si ötektik ve intermetalik fazlardan oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.13 a)’ deki elementel EDS haritalama analizi sonuçlarında, mikroyapıda 1 numara ile gösterilen bölgede Si, Fe, Mn elementlerinin yoğunlaştığı görülmektedir. 1

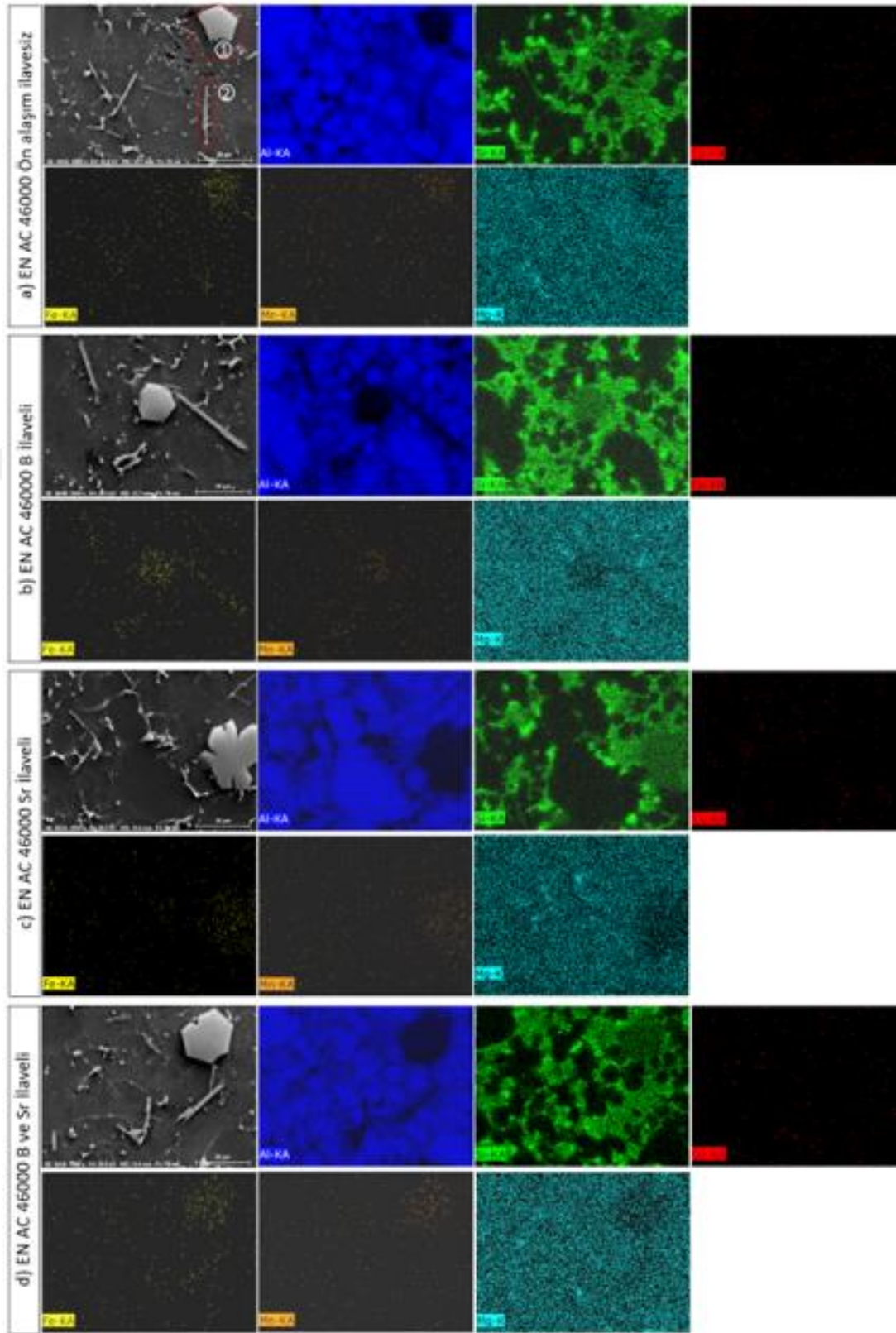
numara ile gösterilen bölgelerde çaurumsu fazlara ait Al, Fe, Mn, Si elementlerin bulunduğu görülmektedir [55,56]. EDS haritalama sonucunda 2 numaralı intermetalik fazda ise EDS haritalama sonucunda Al, Fe, Si elementlerinin yoğunlaştığı görülmektedir. 2 numaralı intermetalik fazın hem SEM görüntüleri hem de EDS haritalama sonuçlarına göre,  $\beta$ -  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  fazı olduğu söylenebilir.  $\text{AlSi9Cu3}$  alaşımı numunelerinin optik mikroskop ile elde edilen görüntülerdeki morfolojik olarak saptanmıştır. Ayrıca bu iki faz, elementel EDS haritalama ile de içerdiği elemanlar belirlenerek çamursu faz ve  $\beta$ -  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  intermetalik fazı olduğu görülmüştür. Korozyon davranışında rolü kritik olan Cu elementinin tüm numunelerde beklenildiği gibi Al-Si ötektik faz bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Cu elementinin dağılımı, Al-Si ötektik fazının dağılımına göre değişmekle birlikte, 4 numunede de birbirine yakın miktarlardadır (Şekil 4.13).



**Şekil 4.11 :**  $\text{AlSi9Cu3}$  numune parçalarının SEM görüntüleri (250x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.



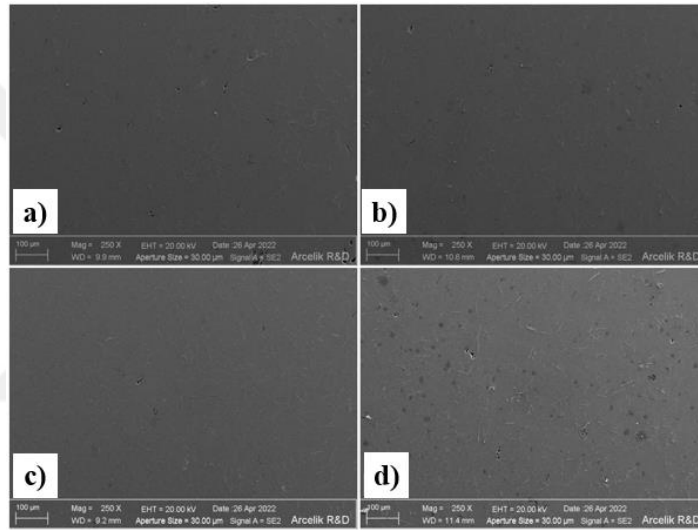
**Şekil 4.12 :**  $\text{AlSi9Cu3}$  numune parçalarının SEM görüntüleri (2000x); a) ön alaşım ilavesiz, b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.



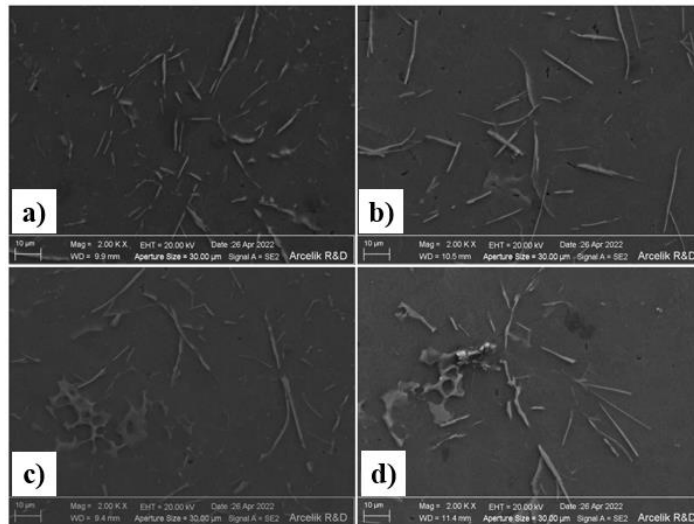
Şekil 4.13 : AlSi9Cu3 numune parçalarının EDS haritalama görüntüleri (3500x); a) ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B+Sr ilaveli.

#### 4.2.2 AlSi10Mg alaşımı numunelerinin SEM- EDS sonuçları

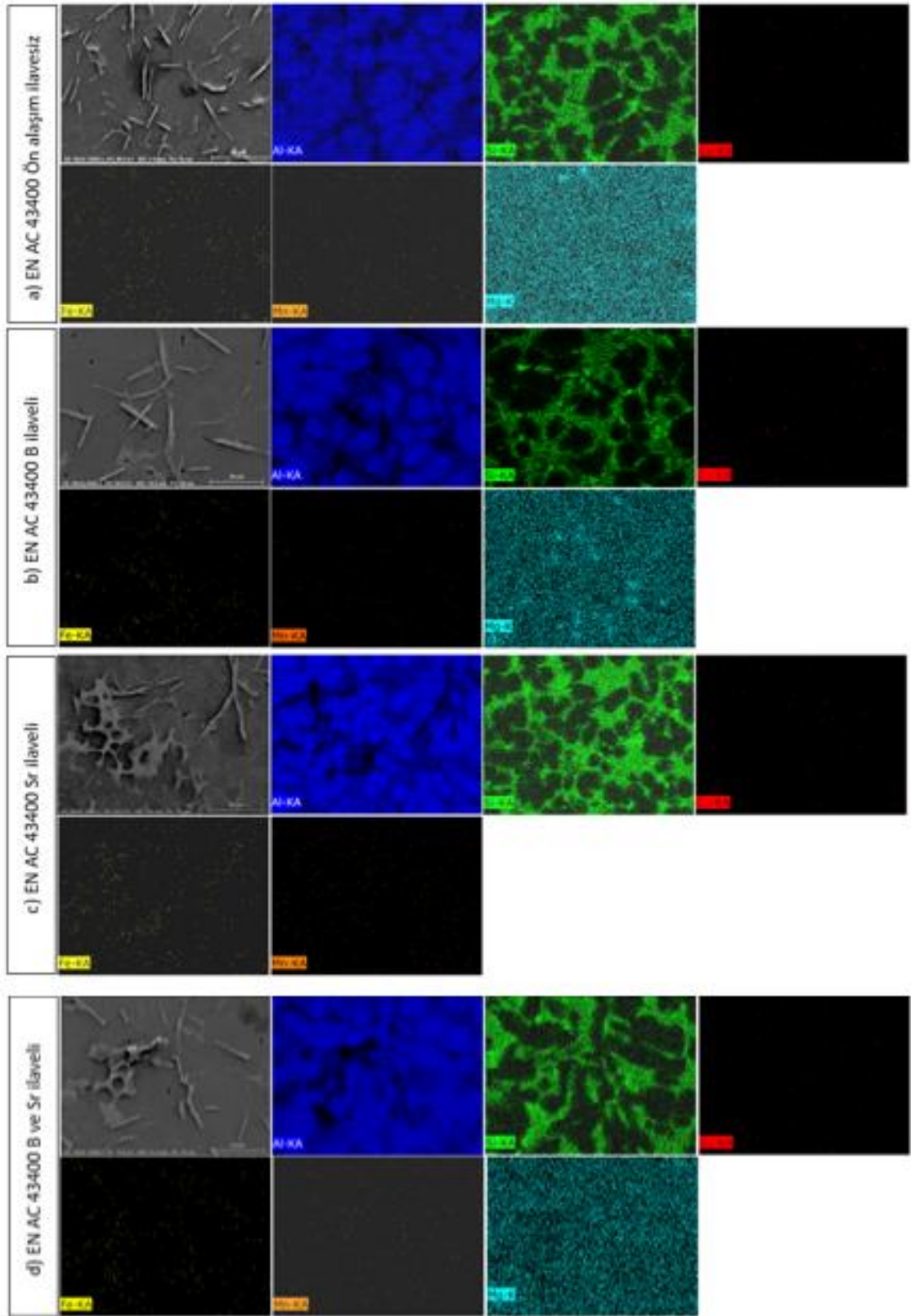
şekil 4.14’ de AlSi10Mg alaşımı numunelerinin SEM görüntüleri, şekil 4.16’ de ise bu numunelerin elementel EDS haritalama görüntüleri verilmiştir. SEM ve EDS haritalama görüntüleri incelendiğinde, AlSi10Mg numunelerinin  $\alpha$ -Al, Al-Si ötektik ve intermetalik fazlardan oluştuğu görölmektedir. şekil 4.16’ da yer alan AlSi10Mg numunelerine ait mikroyapılarda ince uzun iğnemi morfolojilerin, Al, Fe ve Si elementlerinden oluştuğu tespit edilmiştir. Hem morfoloji hem de elementel EDS sonuçları bu fazların  $\beta$ - Al<sub>5</sub>FeSi fazını işaret etmektedir. Alaşımın ötetiküştü %10 Si iğeriği nedeniyle, AlSi9Cu3 alaşımına göre daha fazla Al-Si ötektik fazına sahip olduğu, EDS haritalama sonuçlarından görölmektedir (şekil 4.15 ve şekil 4-16).



**şekil 4.14 :** AlSi10Mg numune parçalarının SEM görüntüleri (250x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.



**şekil 4.15 :** AlSi10Mg numune parçalarının SEM görüntüleri (2000x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.



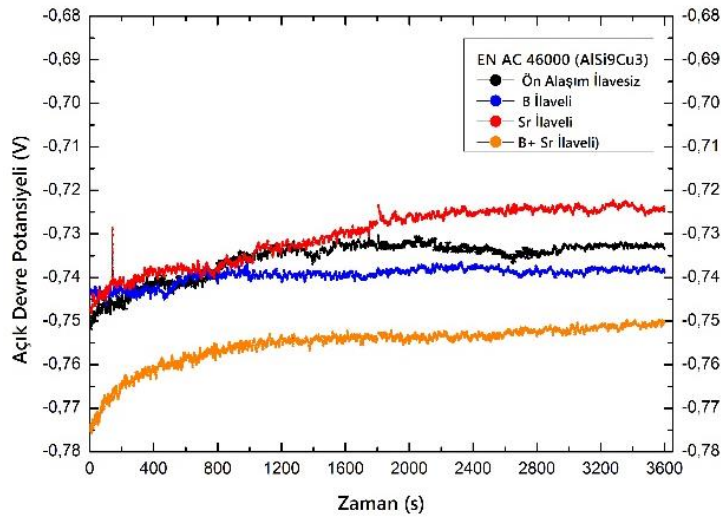
**Şekil 4.16 :** AlSi10Mg numune parçalarının EDS Haritalama görüntüleri (3500x), a) Ön alaşım ilavesiz b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli.

### 4.3 Açık Devre Potansiyeli Ölçümleri

Numunelerin açık devre potansiyeli ( $E_{OCP}$ ) ölçümleri, elektrokimyasal deneylerin (Tafel ve EIS) gerçekleştirilmesinden önce 1 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numuneleri

Şekil 4.17’ de AlSi9Cu3 döküm sonrası parlatılmış yüzeylere sahip numunelerin zamana göre açık devre potansiyeli ölçümlerinin grafiği verilmiştir. AlSi9Cu3 alaşımı numunelerin  $E_{OCP}$  değişimleri incelendiğinde, numunelerin çözelti ile teması sonrası 1.dk’ da daha düşük potansiyellerde, 60 dk sonunda ise ilk duruma göre (1 dk) daha yüksek potansiyellere sahip olduğu görülmektedir. Normal, B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin  $E_{OCP}$  ölçümleri 1 s - 1000 s boyunca artış göstermiş ve 1000 s ile 3600 s arasında alınan ölçümler ise birbirine yakın değerler göstermiştir. Sr ilaveli numune ise 1-1800 s arasında  $E_{OCP}$  değeri artış göstermiş ve 1800 s -3600 s aralığında yapılan ölçümler ise birbirine oldukça yakındır. Hanza ve arkadaşları [63], yaptıkları çalışmada, AlSi9Cu3 ve AlSi8Cu3 alaşımı numunelerinin 1-1500 s aralığında  $E_{OCP}$  değerlerinde artış gözlemlenmiş ve bu süreden sonra  $E_{OCP}$  değerleri birbirine oldukça yakın ölçülmüştür. Bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.17 : AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin zaman- $E_{OCP}$  grafikleri.

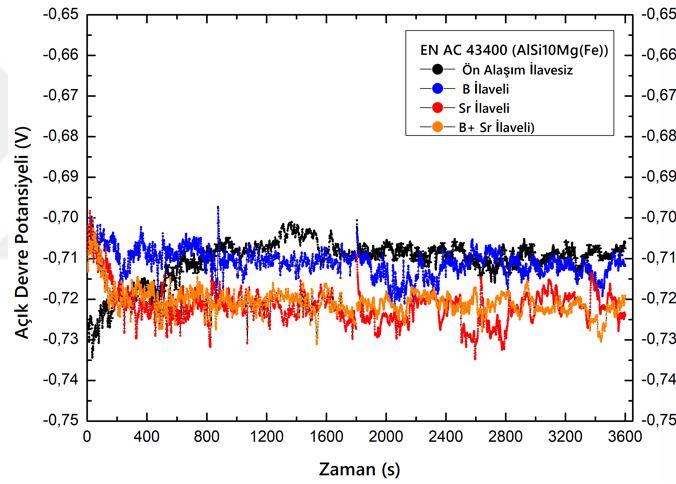
Çizelge 4.2’ de AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin  $E_{OCP}$  değerlerinin 60s – 3600s zaman aralığındaki değişimleri verilmiştir. Numunelerin 3600 s sonucunda  $E_{OCP}$  değerleri; ön alaşım ilavesi yapılmayan numunenin  $-0,730 \pm 0,05$  V, B ilaveli numunenin  $-0,737 \pm 0,05$  V, Sr ilaveli numunenin  $-0,725 \pm 0,05$  V ve B + Sr ilaveli numunenin ise  $-0,750 \pm 0,05$  V dir.

**Çizelge 4.2 :** AlSi9Cu3 alaşıımı numunelerinin  $E_{OCP}$  değerleri.

| Numune         | $E_{OCP}$ , 60 s<br>(V) | $E_{OCP}$ , 3600 s<br>(V) |
|----------------|-------------------------|---------------------------|
| Normal         | -0,750                  | $-0,730 \pm 0,05$         |
| B İlaveli      | -0,745                  | $-0,736 \pm 0,05$         |
| Sr İlaveli     | -0,750                  | $-0,725 \pm 0,05$         |
| B + Sr İlaveli | -0,775                  | $-0,750 \pm 0,05$         |

#### 4.3.2 AlSi10Mg alaşıımı döküm numuneleri

Şekil 4.18’ de AlSi10Mg alaşıımı dökülmüş ve parlatılmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr İlaveli numunelerinin zaman-açık devre potansiyeli ( $E_{OCP}$ ) grafikleri verilmiştir. B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin 300 s – 3600 s arasındaki ölçümlerin  $\pm 0,01$  V aralığında değişiklik gösterdiği ve ön alaşım ilavesiz (normal) numunesi ise 600 s - 3600 s aralığında  $\pm 0,01$  V açık devre potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.18:** AlSi10Mg alaşıımı döküm numunelerinin zaman- $E_{OCP}$  grafikleri.

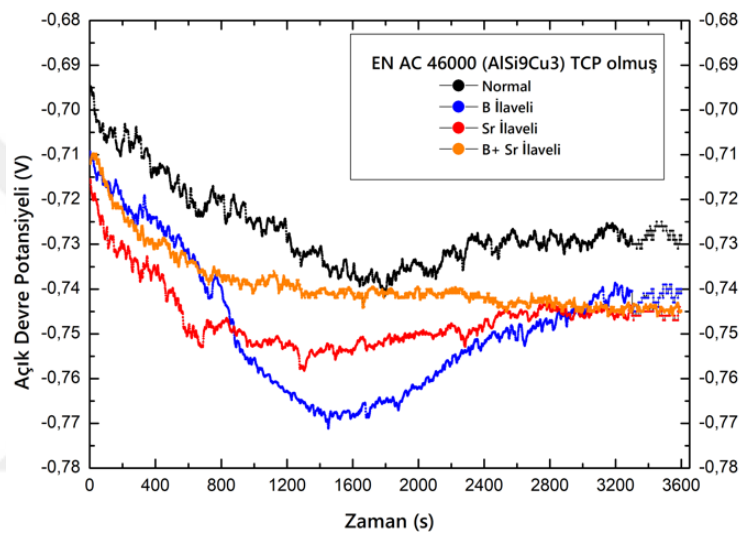
Çizelge 4.3’ de AlSi10Mg alaşıımı dökülmüş ve parlatılmış yüzeye sahip numunelerinin 60 s ve 3600s sonunda  $E_{OCP}$  değerleri verilmiştir. Hem açık devre potansiyeli değerlerine hem de, 1 s – 3600 s potansiyel değişimleri ön alaşım ilavesinin (B, Sr ve B + Sr) ön alaşım ilavesiz numuneye göre farklı olmadığını göstermiştir.

**Çizelge 4.3 :** AlSi10Mg alaşıımı döküm numunelerinin  $E_{OCP}$  değerleri.

| Numune         | $E_{OCP}$ , 60 s<br>(V) | $E_{OCP}$ , 3600 s<br>(V) |
|----------------|-------------------------|---------------------------|
| Normal         | -0,728                  | $-0,710 \pm 0,01$         |
| B İlaveli      | -0,703                  | $-0,710 \pm 0,01$         |
| Sr İlaveli     | -0,705                  | $-0,720 \pm 0,01$         |
| B + Sr İlaveli | -0,707                  | $-0,720 \pm 0,01$         |

#### 4.3.3 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numuneleri

AlSi9Cu3 TCP kaplaması olmuş numunelerin açık devre potansiyeli ölçümleri Şekil 4.19’ da verilmiştir. Numunelerin açık devre potansiyeli değışimleri, AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin hepsinde benzerdir. 1 s - 1800 s aralığında, numunelerin açık devre potansiyelleri azalmıştır. 1800 s – 3600 s aralığında ise, numunelerin açık devre potansiyellerinin artış gösterme eğiliminde olduğu görülmüştür. Çizelge 4.4’ de 60 s ve 3600 s sonunda açık devre potansiyeli ölçümleri ve bu iki değerin farkları verilmiştir. AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin 3600 s sonunda açık devre potansiyeli değışimi ortalama  $\sim 0,03$  V’ dur.



Şekil 4.19 : AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin zaman- $E_{OCP}$  grafikleri.

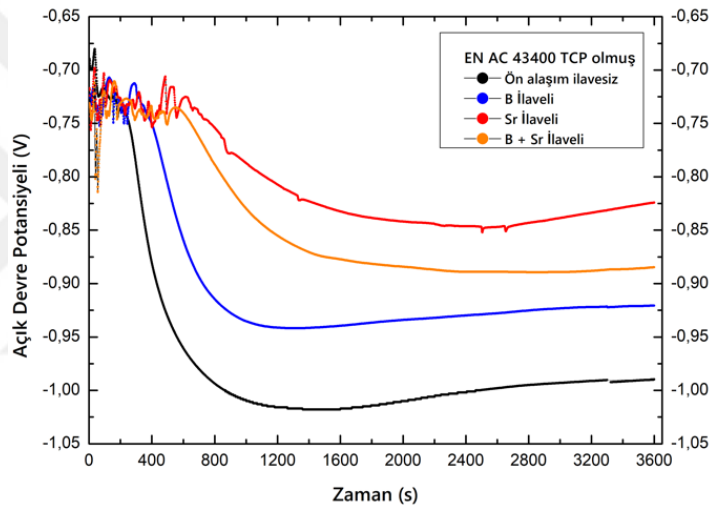
Çizelge 4.4 : AlSi9Cu alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin  $E_{OCP}$  değeri.

| Numune         | $E_{OCP}$ , 60 s<br>(V) | $E_{OCP}$ , 3600 s<br>(V) | Fark<br>(V)  |
|----------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| Normal         | -0,699                  | $-0,728 \pm 0,01$         | $\sim 0,029$ |
| B ilaveli      | -0,712                  | $-0,745 \pm 0,01$         | $\sim 0,033$ |
| Sr ilaveli     | -0,719                  | $-0,745 \pm 0,01$         | $\sim 0,026$ |
| B + Sr ilaveli | -0,711                  | $-0,743 \pm 0,01$         | $\sim 0,032$ |

#### 4.3.4 AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numuneleri

AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerin açık devre potansiyelleri zaman grafikleri Şekil 4.20’ de verilmiştir. AlSi10Mg TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr ilaveli numunelerin açık devre potansiyeli değışimleri incelendiğinde, 60 s -1400 s aralığında açık devre potansiyellerinin ( $-0,698$  V’ dan  $-1,0$  V’ a,  $-0,77$  V’ dan  $-0,941$  V’ a,  $-0,729$  V’ dan  $-0,823$  V’ a ve  $-0,755$  V’ dan  $-0,870$  V’ a) azaldığı görülmüştür. AlSi10Mg TCP kaplı numunelerin açık devre potansiyellerinin 1400 s - 3600 s

aralığında stabil hale geldiği ve  $E_{OC} \pm 0,01$  V açık devre potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Çizelge 4.5’ de 60 s ve 3600 s sonunda açık devre potansiyeli ölçümleri ve bu iki değerin farkları verilmiştir. AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin 3600 s sonunda açık devre potansiyeli değişimi ortalama  $\sim 0,12$  V ile  $\sim 0,29$  V aralığındadır. AlSi10Mg alaşımının TCP kaplanmış numunelerinde 3600 s sonunda elde edilen  $E_{OC}$  değerleri (-0,996 V, -0,926 V, -0,839 V, -0,888 V) olup AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin  $E_{OC}$  değerlerinden (-0,728 V, -0,745 V, -0,745 V, -0,743 V) daha düşük değerlerdedir. Daha düşük  $E_{OC}$  değerlerine sahip olan numunelerin korozyon oluşturma eğilimleri de daha düşük olarak yorumlanmaktadır. Bu nedenle, AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerin AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin korozyon dirençlerinin daha yüksek değerlerde olması beklenmektedir.



**Şekil 4.20:** AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin zaman- $E_{OCP}$  grafikleri.

**Çizelge 4.5 :** AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr ilaveli numunelerinin  $E_{OCP}$  değerleri.

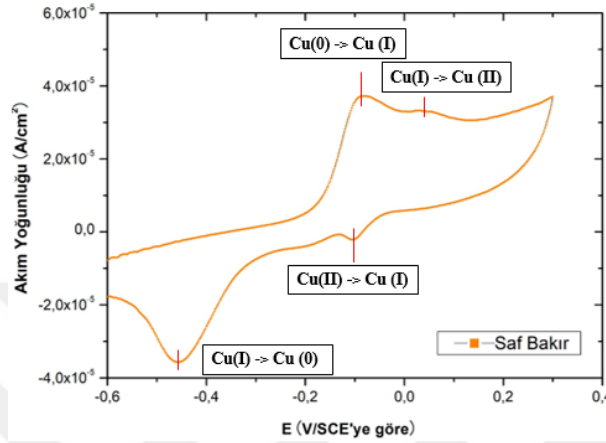
| Numune         | $E_{OCP}$ , 60 s<br>(V) | $E_{OCP}$ , 3600 s<br>(V) | Fark<br>(V)  |
|----------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| Normal         | -0,698                  | $-0,996 \pm 0,01$         | $\sim 0,290$ |
| B ilaveli      | -0,727                  | $-0,926 \pm 0,01$         | $\sim 0,190$ |
| Sr ilaveli     | -0,729                  | $-0,839 \pm 0,01$         | $\sim 0,120$ |
| B + Sr ilaveli | -0,755                  | $-0,888 \pm 0,01$         | $\sim 0,130$ |

#### 4.4 Çevrimsel Voltametri (CV) Deneyi Sonuçları

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının yüzeyindeki elektroaktif bakır miktarını hesaplamak için numunelere CV analizi uygulanmıştır. Elektroaktif bakır miktarını hesaplamak için ilgili çalışmalarda [49-52] belirtildiği gibi aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\Theta_{Cu} (\%) = \frac{\text{Çalışılan numunenin Cu(0)→C(I) pikinin altında kalan alan}}{\text{Saf bakırın Cu(0)→C(I) pikinin altında kalan alan}} \times 100 \quad (4.1)$$

Şekil 4.21’ de saf bakırın CV analizi sonucunda elde edilen grafik verilmiştir. Referans çalışmalardaki sonuçlara benzer şekilde [49-52], Cu(0)’ dan Cu(I)’ e ve Cu (I)’ dan Cu(II)’ ye yükseltgenme reaksiyonları sonucunda oluşan pikler yaklaşık olarak sırasıyla -0,1 V ve 0,1 V potansiyellerinde oluşmuştur.



**Şekil 4.21 :** Saf bakır CV analizi sonucu ve elde edilen piklere karşılık gelen bakırın indirgenme / yükseltgenme reaksiyonları (tarama hızı 5 mV/s).

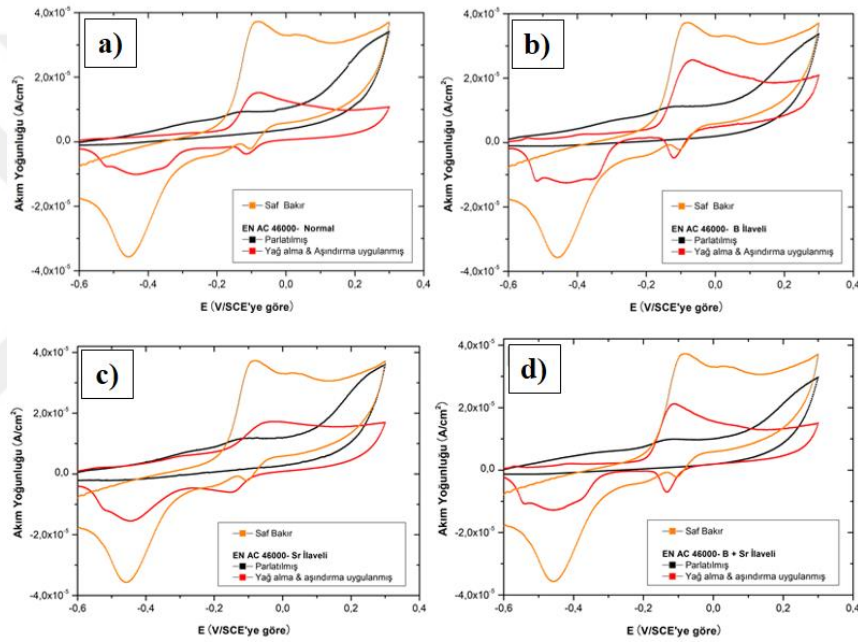
#### 4.4.1 AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin CV analiz sonuçları

AlSi9Cu3 alaşımının her bir ön alaşım ilavesinin (normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli) numune yüzeyinin parlatma sonrası ve parlatma sonrasında yağ alma & aşındırma işlemleri uygulanması sonrasında ayrı ayrı CV işlemleri uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.22’ de verilmiştir. 4 farklı ön alaşım ilavesinin parlatma ve yağ alma & aşındırma uygulanması kendi içinde değişimi ayrı ayrı grafiklerde saf bakırın CV analizi sonucuna kıyaslanarak verilmiştir.

Şekil 4.22 a)’ de, AlSi9Cu3 ön alaşımı ilavesi yapılmayan (normal) parlatılmış numunesinin saf bakırda gözlemlendiği gibi belirgin bir pik göstermediği ancak potansiyel değeri -0.1 V’ e geldiğinde akım yoğunluğunda artış görülmüştür. Parlatma sonrasında uygulanan yağ alma & aşındırma işlemleri sonrasında gerçekleştirilen CV analizinin sonucunda Şekil 4.21’ de verilen saf bakırın CV analizi sonucuna benzer şekildedir. Cu(0) → C(I) dönüşümünün piki ~ -0.1 V’ da, Cu(I) → C(0) dönüşümünün piki dönüş eğrisinde yine ~ -0.1 V’ da ve ~ -0.45 V’ da Cu(II) → C(I) dönüşümünün pikleri elde edilmiştir. Şekil 4.22 b), c), d)’ deki diğer AlSi9Cu3 B, Sr ve B + Sr ilaveli numunelerinin CV analizi sonuçları incelendiğinde, AlSi9Cu3 normal numunesinin

CV analizi sonucunda elde edilen sonuçlara benzer şekilde ilgili bakır indirgenme/yükseltgenme piklerin elde edildiği görülmüştür.

Qi,J. ve arkadaşları [40] & Little, A.D. ve arkadaşlarının [49] A2024 alaşımı ile yaptıkları çalışmalarda parlatılmış numunelerin -0,1 V' da net ve belirgin bir pik elde edilmemiştir. Ancak uygulanan ön işlemler sonrasında (yağ alma & aşındırma) gerçekleştirilen CV analizinde -0.1 V' da net ve şiddeti daha fazla bir pik elde etmişlerdir. Bu çalışmaların sonuçları ile AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin elde edilen verileri kıyaslandığında tutarlılık görülmüş ve uygulanan yağ alma & aşındırma işlemlerinin yüzeydeki elektroaktif bakır miktarını artırdığı görülmüştür.

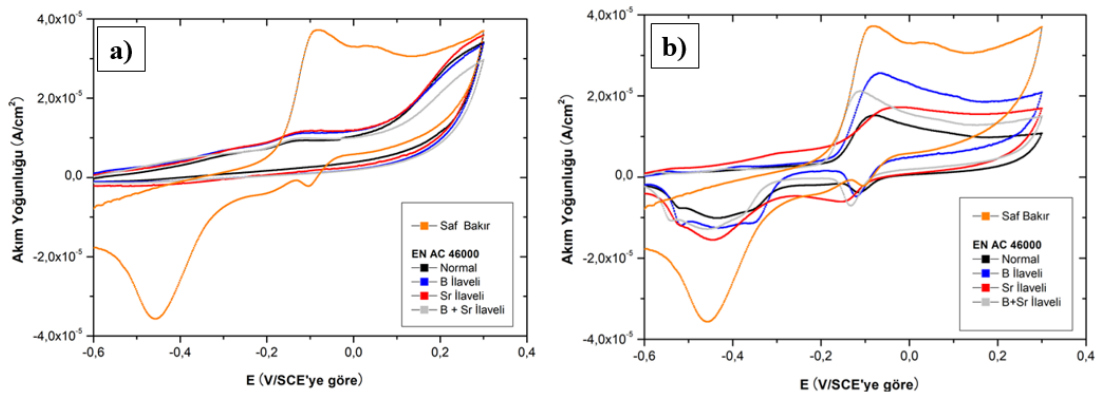


**Şekil 4.22:** Saf bakır, parlatılmış ve yağ alma& aşındırma uygulanmış yüzeyli AlSi9Cu3 alaşımı numuneleri ile gerçekleştirilen CV analizi sonuçları, a) Normal b) B ilaveli c) Sr ilaveli d) B + Sr ilaveli numunelerin saf bakır ile kıyası (tarama hızı 5mV/s).

Şekil 4.23' de AlSi9Cu3 alaşımı normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin döküm (parlatılmış) ve yağ alma & aşındırma uygulanmış numunelerin grafikleri verilmiştir. Cu(0) -> C(I) yükseltgenme reaksiyonuna karşılık gelen -0,1 V' deki pik parlatılmış numunelerde birbirine yakın (normal: 0,09  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , B ilaveli: 0,11  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , Sr ilaveli: 0,12  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , ve B +Sr ilaveli: 0,10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) değerlerdedir.

Şekil 4.23 (b)' de ise, yağ alma & aşındırma işlemi sonrasında ön alaşım ilavesi çeşidine bağlı olarak numuneler arasında farklar görülmektedir. B ilaveli numunenin,

Cu(0) - > C(I) pikinin -0,1 V' da  $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  şiddeti ile en yüksek değerde olduğu görülmektedir. B + Sr ilaveli numunenin aynı potansiyeldeki piki  $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , Sr ilaveli numunenin  $0,16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve ön alaşım ilavesiz numunenin ise  $0,15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.



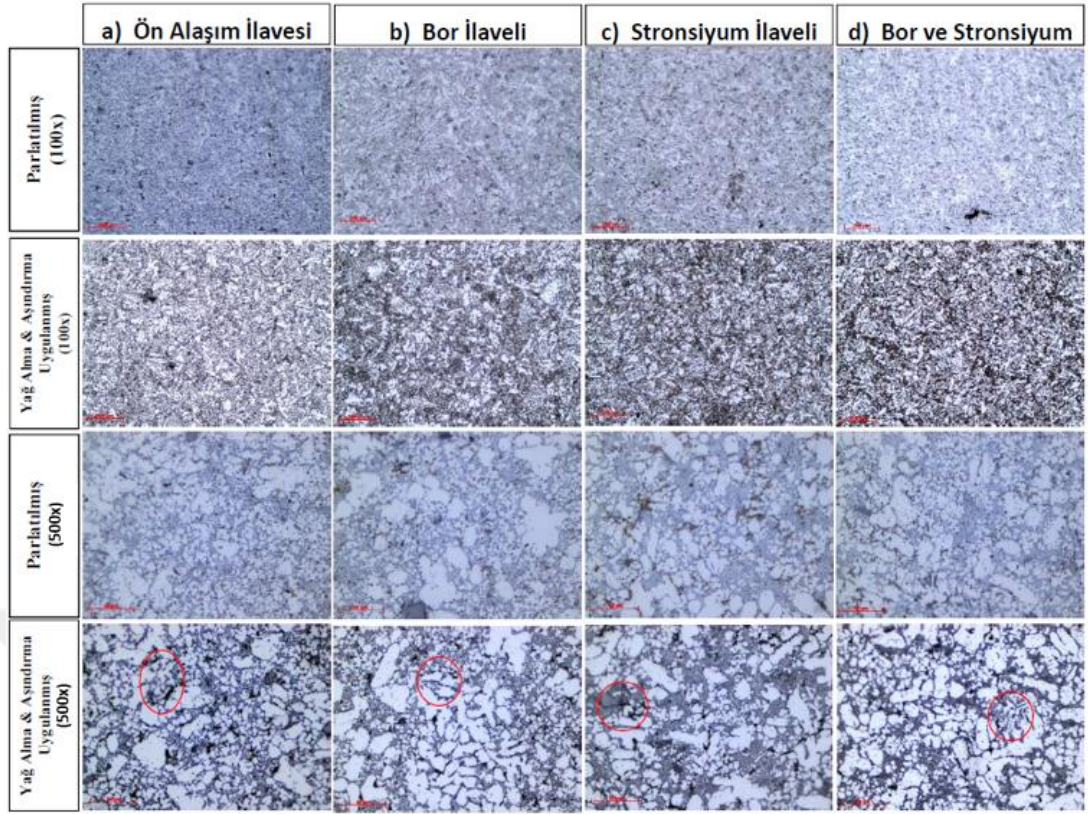
**Şekil 4.23:** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin ve saf bakırın CV analizi sonuçları; a) Saf bakır ve döküm numuneler b) Saf bakır ve yağ alma & aşındırma uygulanmış numunelerin sonuçları (tarama hızı 5 mV/s).

AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin yağ alma & aşındırma uygulaması sonrası yüzeydeki elektroaktif bakır miktarları denklem 4.1' e göre hesaplanmış ve Çizelge 4.6' de verilmiştir. Çizelge 4.6' daki veriler incelendiğinde B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunenin elektroaktif bakır miktarının diğer iki numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.6 :** AlSi9Cu3 numunelerinin yağ alma & aşındırma uygulanmış yüzeylerinin elektroaktif bakır miktarları.

| Numune         | $\Theta_{\text{Cu}}$ , Yağ Alma & Aşındırma Uygulanmış (%) |
|----------------|------------------------------------------------------------|
| Normal         | 32,1                                                       |
| B İlaveli      | 66,9                                                       |
| Sr İlaveli     | 39,9                                                       |
| B + Sr İlaveli | 64,1                                                       |

Şekil 4.24' de AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin parlatma sonrasında ve yağ alma & aşındırma sonrasında alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Parlatma sonrasındaki mikroyapı görüntülerinde, B ve Sr ilavesinin etkisini görülmektedir. Yağ alma & aşındırma işlemleri sonrasında ise tane sınırları olduğunu düşünülen  $\alpha$ -Al / ötektik fazları geçişlerinde ve Şekil 4.24' de kırmızı ile gösterilen bölgelerdeki gibi intermetalik bileşiklerin çevresinde aşındırma prosesi sırasında oluşan çözünmeler sonucunda siyah bölgeler görülmektedir.



**Şekil 4.24:** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin parlatma sonrasındaki ve yağ alma & aşındırma sonrasındaki mikroyapı görüntüleri (100x, 500x).

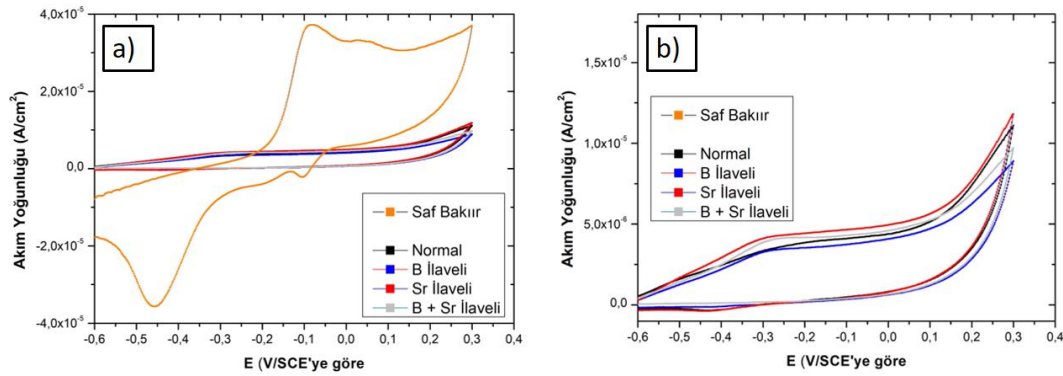
Yapılan faz analizleri sonucunda ön alaşım ilavesiz numunenin ötektik ve intermetalik fazların tüm alana oranının B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numuneden daha az olduğu görülmüştür. Toplam fazlar içerisinde ötektik ve intermetalik faz oranı ön alaşım ilavesiz’ den B +Sr ilavelilere göre sırasıyla % 32,9 / % 35,9 / % 37,3 / % 37,8 şeklindedir. Özellikle B + Sr ilaveli numunenin ötektik ve intermetalik fazlarının en fazla olduğu görülmektedir. B ilavesi sonrasında ile tane inceltme etkisi Barker çözeltisi ile dağlama sonrası mikroyapı görüntülerinde görülmüştür.

Brodarac ve arkadaşları [54] AlSi9Cu3 alaşımı ile yaptıkları çalışmada bakır ilavesinin mikroyapı üzerindeki etkisi incelemişler ve  $\alpha$ -Al fazının 609 °C sıcaklıkta oluşmaya başladığı, ötektik fazın 555-574 °C oluşmaya başladığı ve 507-525 °C sıcaklıkta bakır içeren  $AlCu_2$ ,  $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$  gibi intermetaliklerin oluşmaya başladığını ileri sürmüşlerdir. Buna ek olarak bakır içeren intermetaliklerin tane sınırlarında oluşma eğilimi gösterdiğine değinmişlerdir. Yapılan faz analizine ve Barker çözeltisi uygulaması sonrası mikroyapılarında B ilavesinin yapılan numunelerde tane boyutunun küçüldüğü ve intermetalik oluşumunun arttırdığını söyleyebiliriz.

Yapılan CV analizi sonucunda ise, yağ alma & aşındırma işlemleri sonrasında AlSi9Cu3 alaşımı B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin yüzey elektroaktif miktarının ön alaşım ilavesiz ve Sr ilaveli numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise tane inceltme işlemi sonrasında artan tane sınırlarının ve bu tane sınırlarında oluşan bakır içeren intermetalik bileşiklerinin aşındırma işlemi sonrasında etrafındaki  $\alpha$ -Al fazlarını çözmüş ve yüzeydeki bakır miktarı artmıştır. Bu nedenle, AlSi9Cu3 yağ alma & aşındırma uygulanmış numunelerinin CV analizleri sonucunda -0,1 V’ de belirgin bir pik elde edilmiştir.

#### 4.4.2 AlSi10Mg alaşımı numunelerinin CV analizi sonuçları

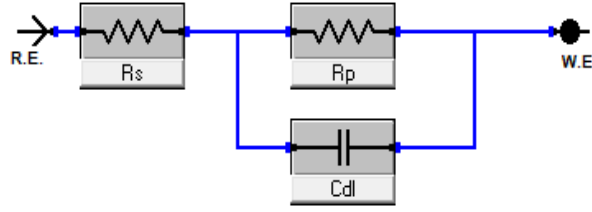
Düşük miktarda bakır içeren (Cu: %0,1) AlSi10Mg alaşımının yağ alma& aşındırma sonrasında yapılan CV analizi sonuçları Şekil 4.25’ de verilmiştir. Beklenildiği gibi düşük bakır miktarı nedeniyle AlSi10Mg alaşımı numunelerinde -0.1 V & 0.1 V değerlerinde beklenen pikler elde edilememiştir.



**Şekil 4.25 :** AlSi10Mg alaşımı numunelerinin a) Yağ alma & aşındırma sonrası saf bakıra kıyasla CV analizi sonuçları b) CV sonuçlarının yakınlaştırılmış hali.

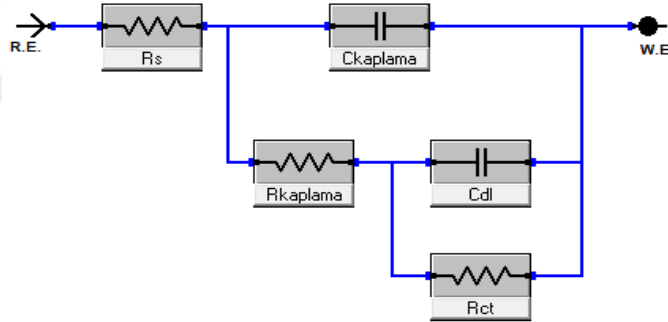
#### 4.5 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Deneyi Sonuçları

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının ön alaşım ilavesiz (normal), B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli olmak üzere 4’er farklı numuneye EIS deneyleri yapılmıştır. EIS deneyleri hem döküm, hem de TCP kaplanmış numunelere uygulanmıştır. Şekil 4.26’ da döküm sonrası parlatılmış numunelerin modellemesinde kullanılan elektrik devresi verilmiştir. Bu model, çözelti direnci ( $R_s$ ), polarizasyon direnci ( $R_p$ ) ve kapasitans görevi gören yüzeydeki çift katmanı ifade eden  $C_{dl}$ ’ den oluşmaktadır. Numune elektrot yüzeyi homojen olmayan bir davranış gösterdiği için saf kapasitans yerine ( $C_{dl}$ ) sabit faz elementi kullanılmıştır. Modellemede kullanılan sabit faz elementleri  $C_{dl}$  kapasitansı için  $Y_o$ ,  $n_1$  ve  $C_{dl}$  kapasitansından oluşmaktadır.



**Şekil 4.26 :** Döküm numunelerinde EIS deneyi sonuçlarının modellenmesinde kullanılan eşdeğer elektrik devresinin gösterimi.

Şekil 4.27’ de kromat dönüşüm kaplaması (TCP) olmuş numunelerin EIS modellemesinde kullanılan elektrik devresi verilmiştir. Bu modelde, çözelti direnci ( $R_s$ ), kaplama direnci ( $R_{\text{kaplama}}$ ), yük transfer direnci ( $R_{\text{ct}}$ ), kapasitans görevi gören yüzeydeki çift katmanı ifade eden  $C_{\text{dl}}$  ve kaplamanın kapasitansını ifade eden  $C_{\text{kaplama}}$ ’ dan oluşmaktadır. Numune elektrot yüzeyi homojen olmayan bir davranış gösterdiği için saf kapasitans yerine ( $C_{\text{dl}}$  ve  $C_{\text{kaplama}}$ ) sabit faz elementi kullanılmıştır. Modellemede kullanılan sabit faz elementleri  $C_{\text{kaplama}}$  kapasitansı için  $Y_o, \text{kaplama}$  &  $n1$  ve  $C_{\text{dl}}$  kapasitansı için  $Y_o, \text{ct}$  &  $n2$ ’ den oluşmaktadır.



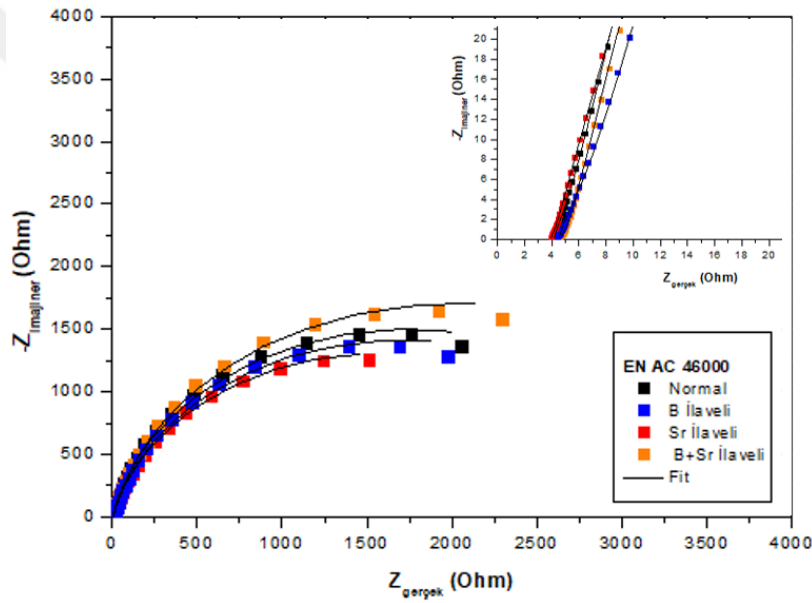
**Şekil 4.27 :** TCP kaplı numunelerde EIS deneyi sonuçlarının modellenmesinde kullanılan eşdeğer elektrik devresinin gösterimi.

EIS deneyleri sonucunda elde edilen veriler, referans çalışmalarda [45,46,50,51] kullanılan modellere benzer şekilde ve Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’ de verilen eşdeğer elektrik devresi modelleri kullanılarak Gamry Echem Analyst programında fit edilmiştir.

#### 4.5.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin EIS deneyi sonuçları

Şekil 4.28’ de AlSi9Cu3 alaşımı ön alaşım ilavesiz (normal) B, Sr ve B + Sr ilaveli numunelerinin EIS deneyi sonucunda elde edilen Nyquist grafikleri ve Çizelge 4.7’ de ise bu grafiklerin Şekil 4.26’ deki eşdeğer elektrik devresine göre modelleme sonucu elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Şekil 4.28’ de tüm AlSi9Cu3

alaşımı numunelerinin model ile iyi uyduğu (fit) görülmektedir. Rct direnci çözelti ile oksit tabakası arasındaki elektron (şarj) transferinin zorluğu olarak tanımlanabilir. Elektron transferi ne kadar zor ise korozyonun oluşma olasılığı o kadar düşüktür. Bu nedenle, yüksek Rct direnci, yüksek korozyon direncini ifade etmektedir [45,47,48]. Numunelerin  $R_p$  değerleri kıyaslandığında, en yüksek  $R_p$  değerinin B + Sr ilaveli numunede (4,16 k $\Omega$ ), en düşük  $R_p$  değerinin ise Sr ilaveli numunede (3,22 k $\Omega$ ) olduğu görülmektedir. B ilaveli ve normal numunelerin  $R_p$  değerleri birbirine yakın değerlerdedir (3,64 k $\Omega$  & 3,65 k $\Omega$ ). AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin döküm sonrası EIS deneyleri sonucunda, B + Sr ilaveli numunenin en düşük korozyon oluşma eğiliminde olduğu, Sr ilaveli numunenin ise en düşük korozyon direncine sahip olduğu görülmektedir.



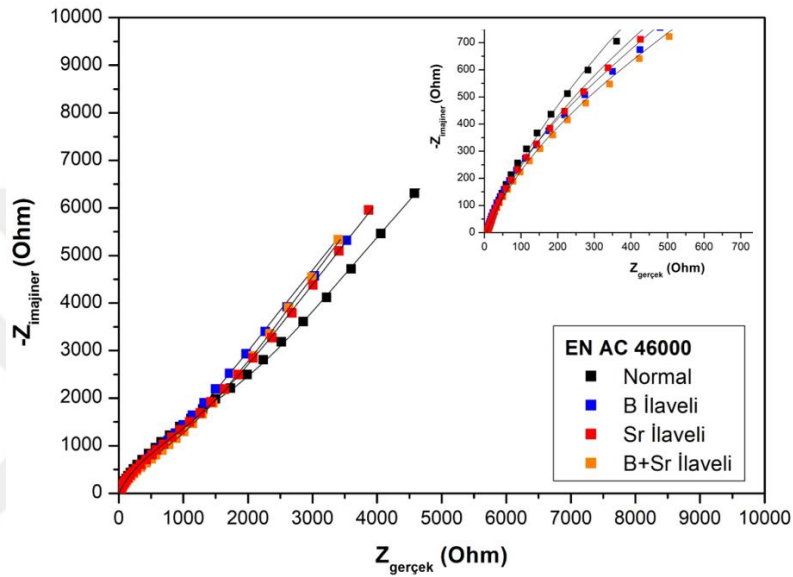
**Şekil 4.28 :** AlSi9Cu3 numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri.

**Çizelge 4.7 :** AlSi9Cu3 numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreler.

| Numune         | $R_s$ ,<br>$\Omega$ | $R_p$ ,<br>k $\Omega$ | $Y_o p$ ,<br>$10^{-6} S s^n$ | n1    | $\chi^2$<br>$10^{-4}$ |
|----------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|-------|-----------------------|
| Normal         | 4,241               | 3,64                  | 49,06                        | 0,886 | 7,7                   |
| B İlaveli      | 4,580               | 3,65                  | 56,71                        | 0,860 | 6,3                   |
| Sr İlaveli     | 3,912               | 3,22                  | 70,62                        | 0,872 | 2,1                   |
| B + Sr İlaveli | 4,163               | 4,16                  | 46,69                        | 0,882 | 7,9                   |

#### 4.5.2 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin EIS deneyi sonuçları

$Cr^{3+}$  dönüşüm kaplaması (TCP) olmuş AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin EIS analizi sonuçları Şekil 4.29 ve Çizelge 4.8’ de verilmiştir. Şekil 4.29’ da numunelerin birbirine yakın davranışlar gösterdiği görülmektedir. B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin  $R_{ct}$  değerleri (295,8 k $\Omega$  ve 287,0 k $\Omega$ ) diğer iki numuneye göre daha yüksektir. Dolayısıyla B ilaveli numunelerin korozyon dirençleri ön alaşım ilavesiz ve Sr ilaveli numunelere göre daha yüksektir.



Şekil 4.29 : AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri.

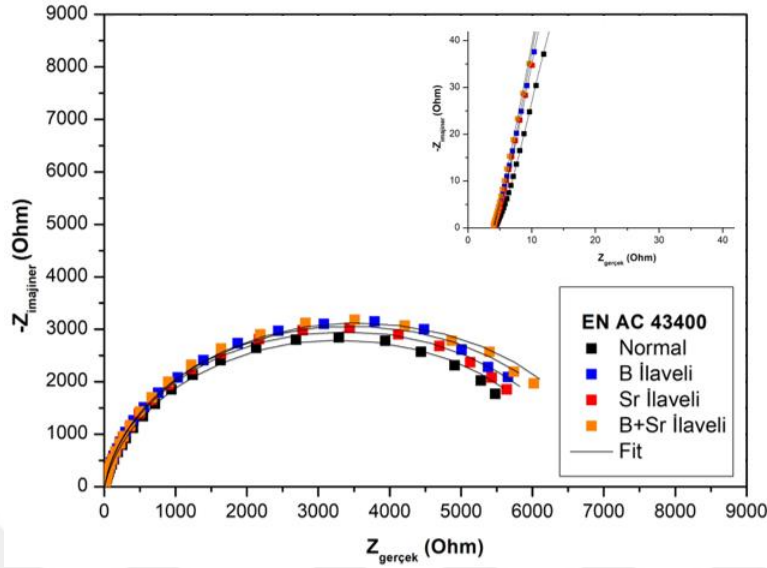
Çizelge 4.8 : AlSi10Mg numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreler.

| Numune         | $R_s$ ,<br>$\Omega$ | $R_{kaplama}$ ,<br>$\Omega$ | $Y_{o\ kaplama}$ ,<br>$10^{-6} S s^n$ | $n1$  | $R_{ct}$ ,<br>k $\Omega$ | $Y_{o_{ct}}$ ,<br>$10^{-6} S s^n$ | $n2$  | $\chi^2$ ,<br>$10^{-4}$ |
|----------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------|--------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------|
| Normal         | 6,046               | 4561                        | 11,15                                 | 0,815 | 57,51                    | 23,55                             | 0,778 | 0,33                    |
| B ilaveli      | 5,999               | 1599                        | 10,14                                 | 0,864 | 295,8                    | 37,38                             | 0,657 | 0,25                    |
| Sr İlaveli     | 5,880               | 2911                        | 11,72                                 | 0,818 | 116,5                    | 27,68                             | 0,715 | 0,35                    |
| B + Sr İlaveli | 5,892               | 1885                        | 11,69                                 | 0,820 | 287,0                    | 34,62                             | 0,685 | 0,12                    |

#### 4.5.3 AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin EIS deneyi sonuçları

Şekil 4.30’ da verilen AlSi10Mg alaşımı numunelerinin EIS deneyleri sonucunda elde edilen Nyquist grafikleri ve Çizelge 4.9’ de Şekil 4.27’ de verilen modele göre simülasyonu sonucunda elde edilen elektrokimyasal veriler verilmiştir. Hem Nyquist grafikleri hem de,  $R_p$  değerleri kıyaslandığında AlSi10Mg alaşımı numunelerinin birbirine yakın veriler göstermekle beraber en yüksek  $R_p$  değeri B + Sr ilaveli

numunede (7,2 k $\Omega$ ) ve en düşük  $R_{ct}$  değeri ise ön alaşım ilavesiz numunede (6,73 k $\Omega$ ) görülmektedir.



**Şekil 4.30 :** AlSi10Mg numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri.

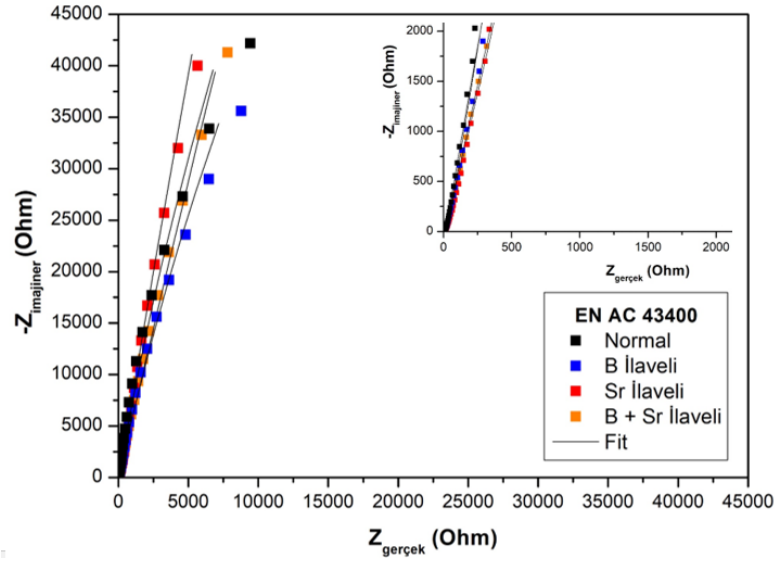
**Çizelge 4.9 :** AlSi10Mg numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.

| Numune         | $R_s$ ,<br>$\Omega$ | $R_p$ ,<br>k $\Omega$ | $Y_o p$ ,<br>$10^{-6} S s^n$ | n1    | $\chi^2$<br>$10^{-4}$ |
|----------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|-------|-----------------------|
| Normal         | 4,617               | 6,73                  | 11,26                        | 0,884 | 1,5                   |
| B İlaveli      | 4,185               | 7,08                  | 11,12                        | 0,910 | 8,5                   |
| Sr İlaveli     | 4,229               | 6,86                  | 10,10                        | 0,906 | 7,3                   |
| B + Sr İlaveli | 4,019               | 7,20                  | 9,68                         | 0,910 | 5,2                   |

#### 4.5.4 AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin EIS deneyi sonuçları

TCP kaplanmış AlSi10Mg numunelerinin EIS deneyleri sonucunda elde edilen Nyquist grafikleri Şekil 4.31’ de verilmiştir.

Çizelge 4.10’ da ise, Şekil 4.27’ de verilen modele göre yapılan simülasyon sonucunda elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir.  $R_{kaplama}$  değeri numune yüzeyindeki boşluk, çatlak gibi kaplama hataları ile ilişkili bir dirençtir [40,50,61]. Numunelerin hem  $R_{ct}$ , hem de  $R_{kaplama}$  değerleri kıyaslandığında korozyon direnci en yüksek numunenin Sr ilaveli numune (6,748 M $\Omega$  & 67,29  $\Omega$ ) olduğu görülmektedir. Korozyon direnci en düşük numuneler ise  $R_{ct}$  ve  $R_{kaplama}$  değerleri düşük olan ön alaşım ilavesiz ( 0,785 M $\Omega$  & 21,28  $\Omega$ ) ve B ilaveli ( 0,750 M $\Omega$  & 20,55  $\Omega$ ) numuneleridir.



**Şekil 4.31 :** AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin EIS analizi sonucu elde edilen Nyquist grafikleri.

**Çizelge 4.10 :** AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin modelleme sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.

| Numune         | $R_s$ ,<br>$\Omega$ | $R_{\text{kaplama}}$<br>$\Omega$ | $Y_o$<br>kaplama,<br>$10^{-6} \text{ S s}^n$ | $n1$  | $R_{ct}$ ,<br>$M\Omega$ | $Y_{o_{ct}}$ ,<br>$10^{-6} \text{ S s}^n$ | $n2$  | $\chi^2$<br>$10^{-4}$ |
|----------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------------------------|-------|-----------------------|
| Normal         | 6,349               | 21,28                            | 1,81                                         | 0,924 | 0,785                   | 2,71                                      | 0,920 | 0,19                  |
| B ilaveli      | 6,626               | 20,55                            | 2,01                                         | 0,910 | 0,750                   | 3,42                                      | 0,891 | 0,12                  |
| Sr ilaveli     | 7,130               | 67,29                            | 1,84                                         | 0,928 | 6,748                   | 2,59                                      | 0,920 | 0,13                  |
| B + Sr ilaveli | 6,164               | 30,78                            | 7,83                                         | 0,900 | 6,615                   | 2,95                                      | 0,889 | 0,13                  |

#### 4.6 Tafel Ekstrapolasyon Deneyleri Sonuçları

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının ön alaşım ilavesiz, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli olmak üzere 4'er farklı numuneye ile Tafel ekstrapolasyon deneyleri yapılmıştır. Tafel deneyleri hem döküm numunelerine, hem de TCP kaplanmış numunelere uygulanmıştır.

Polarizasyon direnci ( $R_p$ ), referans çalışmalarda [1, 45, 46] da belirtildiği gibi denklem 4.2' deki eşitliğe göre hesaplanmıştır.  $R_p$ , polarizasyon direnci,  $i_{\text{corr}}$  korozyon akımı,  $\beta_a$ , anodik Tafel eğimi ve  $\beta_c$  ise katodik Tafel eğimidir. Denklem 4.2 için gerekli elektrokimyasal parametreler Bölüm 3.1.5' de tarif edildiği gibi Tafel eğrisinden hesaplanmıştır.

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)} \quad (4.2)$$

Bu çalışmada korozyon özelliklerini kıyaslamakta kullanılan bir başka özellik olan korozyon hızı (Corrosion rate), Denklem 4.3' de verilen formül [44] ile hesaplanmıştır.

Bu formülde  $v_{\text{corr}}$  korozyon hızını,  $\varepsilon$  eşdeğer ağırlık,  $\Lambda$  dönüşüm terimi ve  $\rho$  ise malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada, tüm numunelerin korozyon hızlarının hesaplanmasında Çizelge 4.11’deki değerler kullanılmıştır.

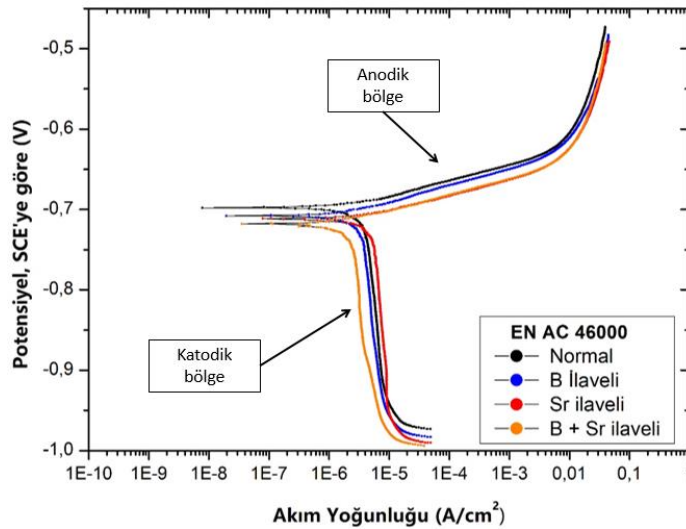
$$v_{\text{corr}} = \frac{i_{\text{corr}} \varepsilon \Lambda}{\rho} \quad (4.3)$$

**Çizelge 4.11 :** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alüminyum alaşımları için korozyon hızı hesabında kullanılan denklem 4.3’deki terimlerin değerleri.

| Denklem Terimi                          | AlSi9Cu3                                                                                 | AlSi10Mg                 |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Korozyon Akımı<br>( $i_{\text{corr}}$ ) | Tafel grafiğinden hesaplanmıştır.<br>( $\text{A/cm}^2 = \text{C/cm}^2 \cdot \text{sn}$ ) |                          |
| Eşdeğer Ağırlık<br>( $\varepsilon$ )    | 9 ( g / eşdeğer)                                                                         |                          |
| Dönüşüm terimi<br>( $\Lambda$ )         | 3267,96 (eşdeğer. sn. mm)/(C. cm. yıl)                                                   |                          |
| Yoğunluk<br>( $\rho$ )                  | 2,76 ( $\text{g/cm}^3$ )                                                                 | 2,68 ( $\text{g/cm}^3$ ) |

#### 4.6.1 AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonuçları

Şekil 4.32’de AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyleri sonrasında elde edilen veriler ile oluşturulan grafikleri verilmiştir. AlSi9Cu3 döküm sonrası Tafel sonuçlarında korozyon potansiyellerinin birbirine yakın ve -0,700 V ile -0,720 V aralığında değiştiği görülmektedir.



**Şekil 4.32 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri.

Çizelge 4.12’de ise AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen grafiklerden Bölüm 3.1.5’de tarif edildiği üzere hesaplanan elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Bu numunelerin korozyon akımları

kıyaslandığında, B + Sr ilaveli ( $i_{\text{corr}}$ : 1,585  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) numunenin en yüksek korozyon akımına sahip olduğu görülmektedir. B ilaveli ( $i_{\text{corr}}$ : 2,095  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ve normal ( $i_{\text{corr}}$ : 2,192  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) numunelerin birbirine yakın korozyon akımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek korozyon akımı ise, Sr ilaveli (2,862  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) numunede olduğu görülmektedir.

Polarizasyon direnci ( $R_p$ ), harici bir potansiyelin uygulanması sırasında numunenin oksidasyona karşı direnci olarak tanımlanır. Numunelerin polarizasyon dirençleri kıyaslandığında, yüksek polarizasyon direncine sahip olan numunenin, kıyaslandığı numuneye göre düşük korozyon direncine sahip olması beklenir. Korozyon akımı en düşük B + Sr ilaveli numunenin ( $i_{\text{corr}}$ : 1,585  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), polarizasyon direnci 4,53  $\text{k}\Omega$ 'dur. Korozyon akımı en yüksek Sr ilaveli ( $i_{\text{corr}}$ : 2,862  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), numunenin polarizasyon direnci ise 2,32  $\text{k}\Omega$ 'dur. Normal ve B ilaveli numunelerin polarizasyon dirençleri sırasıyla 3,31  $\text{k}\Omega$  ve 3,66  $\text{k}\Omega$ 'dur. AlSi9Cu3 alaşımı normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin EIS analizi ile hesaplanan  $R_p$  değerleri ise sırasıyla, 3,64  $\text{k}\Omega$ , 3,65  $\text{k}\Omega$ , 3,22  $\text{k}\Omega$  ve 4,16  $\text{k}\Omega$ 'dur. EIS deneyi verileri ile hesaplanan  $R_p$  değerleri ile Tafel deneyi sonrasında hesaplanan  $R_p$  değerleri birbirine oldukça yakın ve büyük ölçüde tutarlıdır. Numunelerin  $R_p$  korozyon özelliği iki farklı elektrokimyasal yöntem ile doğrulanmıştır.

Numunelerin korozyon hızları kıyaslandığında korozyon akımı en düşük, polarizasyon direnci en yüksek olan numunenin korozyon hızının (16,9  $\mu\text{m}/\text{yıl}$ ) da en düşük olduğu görülmektedir. Korozyon direnci en düşük Sr ilaveli numunenin korozyon hızı ise 0,031  $\text{mm}/\text{yıl}$ ' değerindedir. Normal ve B ilaveli numunelerin korozyon hızları birbirine yakın olup sırasıyla, 23,4  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  ve 22,3  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  değerlerindedir.

**Çizelge 4.12 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.

| Numune         | $E_{\text{corr}}$<br>(V) | $i_{\text{corr}}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | $\beta_a$<br>(mV/dec.) | $\beta_c$<br>(mV/dec.) | $R_p$<br>( $\text{k}\Omega$ ) | $v_{\text{corr}}$<br>( $\mu\text{m}/\text{yıl}$ ) |
|----------------|--------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Normal         | -0,698                   | 2,192                                              | 19,94                  | 102,7                  | 3,31                          | 23,4                                              |
| B İlaveli      | -0,708                   | 2,095                                              | 21,07                  | 121,3                  | 3,66                          | 22,3                                              |
| Sr İlaveli     | -0,711                   | 2,862                                              | 18,18                  | 94,93                  | 2,32                          | 30,5                                              |
| B + Sr İlaveli | -0,718                   | 1,585                                              | 18,65                  | 143,0                  | 4,53                          | 16,9                                              |

Cechel ve arkadaşlarının [62] yüksek basınçlı döküm ile üretilen AlSi9Cu3 alaşımı ile yaptığı çalışmada, Tafel deneyi sonrasında alaşımın korozyon potansiyelini -0,701 V, korozyon akımını 3,39  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve korozyon hızını 0,059  $\text{mm}/\text{yıl}$  olarak bulmuşlardır.

Bu çalışmada AlSi9Cu3 döküm numunelerinden elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akımı değerleri ile kıyaslandığında, elde ettiğimiz değerlerin literatür ile tutarlı şekilde olup, elde edilen korozyon akımı değerlerinin referans çalışmaya göre daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Böylece, yapılan ön alaşım ilavesinin korozyon direncini artırıcı yönde etkisi olduğu söylenebilir.

Bir diğer çalışmada ise A356 (AlSi7) alaşımının Sr, B ve B + Ti ilavesinin korozyon direncine etkisi incelenmiştir. AlSi7 alaşımı ile yapılan bir diğer çalışmada ise yapılan Tafel deneyleri sonucunda korozyon akımlarını ön alaşım ilavesiz için  $5,82 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , Sr ilaveli için  $2,59 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , B ilaveli için  $1,80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve B + Ti ilaveli için  $0,62 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  olarak bulmuşlardır. Alaşıma yapılan Sr, B, Ti ilavelerinin korozyon direncini artırmalarını ikincil dendrit kol aralığı arttıkça, efektif oksit alanı arttığını, bunun da korozyon direncini artırdığını ileri sürmüşlerdir [46]. Başka bir çalışmada AlSi9 alaşımının ötektik modifiye edici Na ilavesi sonucu korozyon direncindeki değişim incelenmiş ve modifiye edilmemiş alaşımın korozyon akımını  $0,98 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , ötektik modifiye edilmiş numunenin korozyon akımını ise  $3,43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  olarak bulmuşlardır. Korozyon direncindeki bu azalma eğilimi, Al bakımından zengin  $\alpha\text{-Al}$  fazı ile modifiye edilmiş durumda Si parçacıkları arasındaki sınırlardaki artışla ilişkili görmüşler ve bu tane sınırlarının korozyon eylemine daha duyarlı olduğunu ileri sürmüşlerdir [48].

Önceki çalışmalarda B, Ti gibi tane inceltici ilavesinin korozyon direncini artırdığı ve bunun sebebinin ise tane sınırının artmasıyla efektif oksit alanının artması ve bunun sonucunda korozyon direncini artırdığını ileri sürmüşlerdir. Ötektik modifiyesi ilavesinde ise farklı sonuçlar mevcuttur. A356 (AlSi7) alaşımı ile yapılan çalışmada [46] korozyon direnci Sr ilavesiyle artarken, AlSi9 alaşımı ile yapılan bir diğer çalışmada ötektik modifiye edici Na ilavesiyle alaşımın korozyon direnci azalmıştır.

Bu çalışmada ise AlSi9Cu3 (AlSi9Cu3) alaşımının B + Sr ( $1,585 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ve B ilavesiyle ( $2,095 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ön alaşım ilavesiz duruma göre korozyon direnci artarken, Sr ilaveli numunenin ( $2,862 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) korozyon direnci ön alaşımsız alaşıma göre azalmıştır.

Bakır içeren intermetaliklerin mikroyapıya daha fazla yayılması sonucunda daha fazla sayıda mikro-galvanik hücre oluşmuştur. B ilaveli numunelerde tane inceltmenin etkisiyle bakır içeren intermetaliklerin sayısı artmıştır. Bu artış, Barker çözeltisi

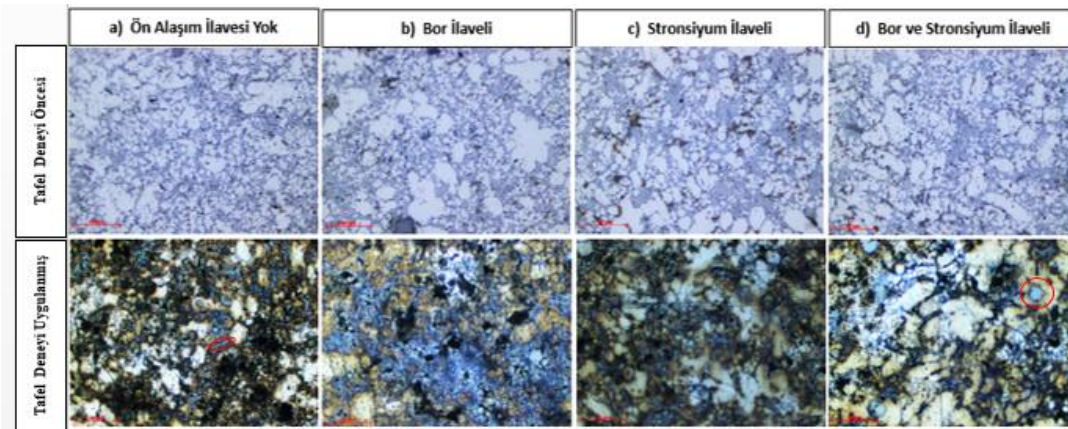
kullanımı sonucundaki gözlemlenen daha ince taneli mikroyapılarda, faz analizleri sonucunda ötektik fazın artışıyla ve SEM-EDS analizleri sonucunda Cu elementinin ötektik faz içerisinde ve Al-Si ötektik /  $\alpha$ -Al fazı geçişlerinde yoğunlaşmasıyla görülmüştür. Sonuç olarak, B ilavesi ile mikroyapıda anodik-katodik bölge çiftlerinin sayıları artmaktadır. Bu bölgelerin korozyona uğraması sonucunda oluşan oksit tabakasının sağlamış olduğu korozyon direnci, numunenin korozyon direncini artırmaktadır.

Şekil 4.33' de AlSi9Cu3 alaşımı ön alaşım ilavesiz a), B ilaveli b), Sr ilaveli c), B + Sr ilaveli d) numunelerinin Tafel deneyi öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri ve Şekil 4.34'de Tafel deneyi sonrası kesitten mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.33' deki AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında alınan mikroyapılarında, farklı renkleri içeren korozyon morfoloji görülmektedir. Hanza ve arkadaşlarının farklı Al-Si alaşımlarıyla yaptıkları çalışmada [63], Tafel deneyi sonrasında yaptıkları optik mikroyapı analizlerinde alaşımların korozyon sonrasında oluşturdukları morfolojilerin farklı renklerde olduklarını gözlemişlerdir. Bu farklı renklerin, farklı alaşım bileşimlerinin ve homojen olmamalarının bir sonucu olarak yoğun elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yerleri gösterdiğini ileri sürmüşlerdir. Tafel deneyi sonrası elde ettikleri mikroyapılarda, bu çalışmada Tafel sonrası elde edilen mikroyapılara benzer şekilde renkli bir yapıya sahiptir. Numunelerin yüzeylerinin büyük çoğunluğunu sarı tonlarında görülen bölgeler oluşturmakta ve bu bölgelerin %3.5 NaCl çözeltisiyle etkileşime girdiğinde korozyon reaksiyonları sonucunda çözünmesi sonucunda oluşan ve henüz oyuk oluşturmamış bölgeler olduğunu düşünülebilir. Siyah renkte görülen bölgeler ise korozyon reaksiyonları sonucunda oluşan pitleri göstermektedir. Beyaz, gri renkteki açık renkler ise korozyona uğramamış bölgeleri temsil etmektedir.

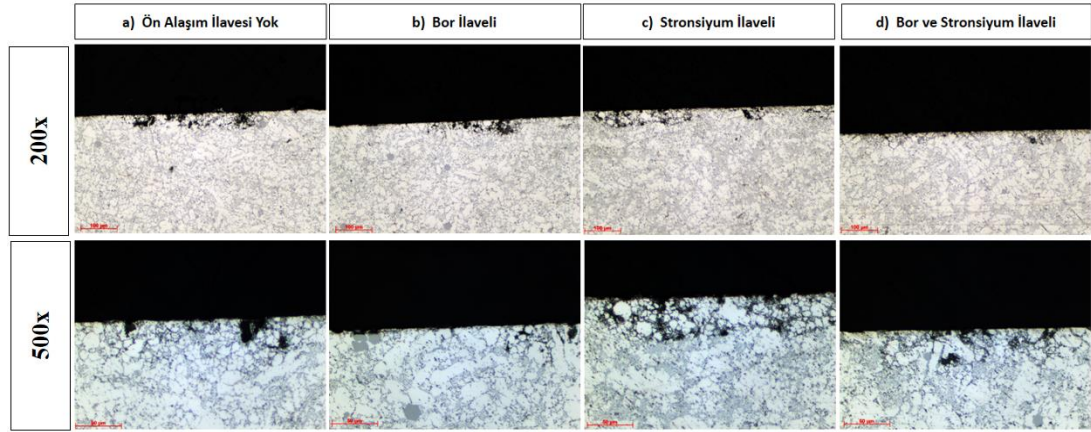
AlSi9Cu3 numunelerinin Tafel deneyi sonrasındaki mikroyapıları tüm numunelerde korozyon mekanizmasının benzer olduğu görülmektedir (Şekil 4.33). Beklenildiği gibi, alaşımın korozyon reaksiyonlarının (oyuklanmaların) oluşma eğiliminin çamursu faz, iğnesel formdaki  $\beta$ -AlFeSi, görsel olarak saptayamadığımız ancak CV analizleri ve SEM analizleri sonucunda oluşma ihtimali yüksek Cu içeren intermetaliklerin ve  $\alpha$ -Al ile  $\alpha$ -Al-Si ötektik ayrımlarında olduğu görülmektedir. Şekil 4.33' de kırmızı ile işaretli  $\beta$ -AlFeSi ve çamursu fazlarının çevresini korozyona uğrattığı görülmektedir.  $\alpha$ -Al fazı bölgelerinde ise çevresinin korozyona uğradığını gözlenmiştir.

Şekil 4.33 a), c)'de ön alaşım ilavesiz ve Sr ilaveli numunelerin Tafel deneyi sonuçları verilmiştir. En yüksek korozyon akımına sahip iki numunenin yüzey morfolojisinde oyukların yoğun olduğu görülmektedir. B + Sr ve B ilaveli numunelerin korozyon sonrası morfolojisinde ise, beyaz renkte görülen korozyona uğramamış bölgelerin diğer iki alaşıma göre daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.33 b), d)).

Tafel deneyleri sonrası korozyon morfolojisinin kesitten görüntüleri Şekil 4.34' de verilmiştir. AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin kesit mikroyapılarında oyuk ilerleyişlerinin  $\alpha$ -Al fazı ile ötektik fazlar arasında ve intermetaliklerin (çamursu faz,  $\beta$ -AlFeSi ve çamursu fazlar) etrafında gerçekleştiği görülmektedir. 200x büyütmedeki mikroyapılardan oyuk derinliği ölçümleri yapıldığında ise, oyuk derinlikleri ön alaşım ilavesiz numunenin ortalama 30  $\mu\text{m}$ , B ilaveli numunenin 25  $\mu\text{m}$ , Sr ilaveli numunenin 35  $\mu\text{m}$  ve B + Sr ilaveli numunenin 15  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. En düşük korozyon akımına sahip B + Sr ilaveli numunenin ( $2,38 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ ) ve en yüksek korozyon akımına sahip Sr ilaveli numunenin ( $4,34 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ ) sırasıyla 15  $\mu\text{m}$  ve 35  $\mu\text{m}$  şeklindedir. Korozyon akımları ile oyuk derinliklerini kıyaslandığında tutarlılık görülmektedir. Bir diğer dikkat çekici durum ise çamursu fazlarının korozyonun ilerleyişine etkisi ile ilgilidir. Şekil 4.34 b), d)' ye B ilaveli numunelerin kesitten mikroyapıları incelendiğinde çamursu fazlarının oyuk ilerleyişini durdurduğu görülmüştür. B ilaveli numunelerde yapılan faz analizleri sonucunda intermetalik fazların ön alaşım ilavesiz numuneye göre fazla olduğu görülmüştür. Görsel olarak mikroyapıda ise, çamursu fazlarının sayısının fazla olduğu görülmektedir.

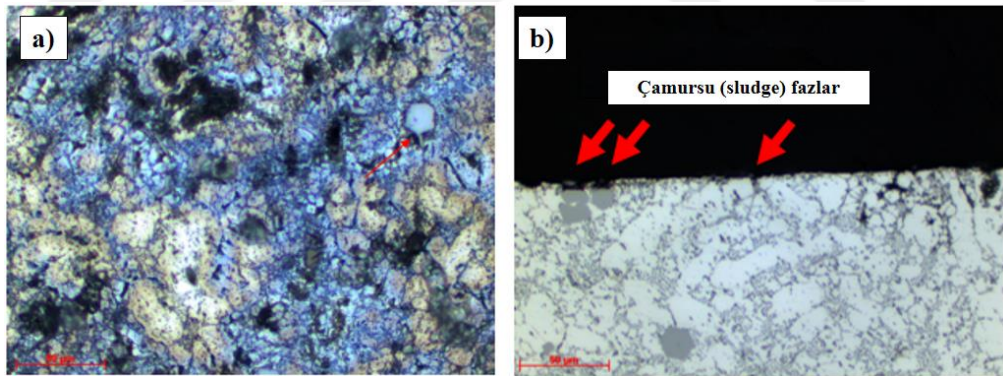


**Şekil 4.33 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin; Tafel deneyi öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri (500x).



**Şekil 4.34 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrası kesitten mikroyapı görüntüleri (200x,500x).

Şekil 4.35’ de B ilaveli numunenin üstten ve kesitten görünümü verilmiştir. Çamursu fazların yakınında oyuk ilerleyişinin kısıtlandığı görülmektedir (Şekil 4.35 a)). Çamursu fazlarının sayısının artması, oyuk ilerleyişini durdurmakta ve korozyon direncini artırıcı bir katkı sağlamaktadır. Bu davranışın B ilaveli numunelerin korozyon direncinin diğer iki numuneye göre çok olmasının önemli bir nedeni olarak görülmektedir.



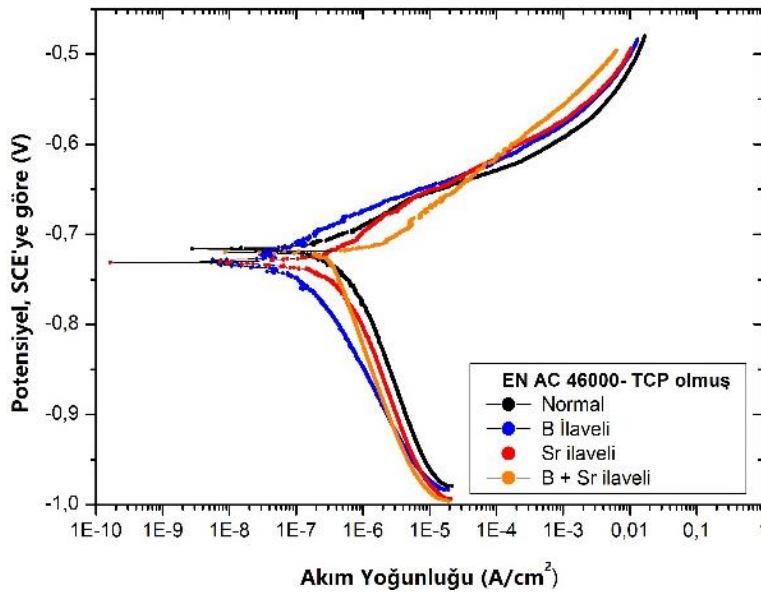
**Şekil 4.35 :** AlSi9Cu3 B ilaveli numunenin Tafel deneyi sonrası a) üstten b) kesitten mikroyapı görüntüsü.

#### 4.6.2 AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonuçları

Şekil 4.36’ da AlSi9Cu3 alaşımı TCP uygulanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.13’ de ise AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplama uygulanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen grafiklerden Bölüm 3.1.5’ de tarif edildiği üzere hesaplanan elektrokimyasal parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.13’ de, B ilaveli numunenin korozyon akımının ( $0,053 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) en düşük değerde olduğu görülmektedir. En düşük korozyon akımının ise ön alaşım ilavesiz ( $0,291 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) numunede olduğu görülmektedir. B+Sr ilaveli ve Sr ilaveli numunelerin korozyon akımları sırasıyla  $0,265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $0,280 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  şeklindedir. B ilavesinin TCP kaplanmış numunelerin korozyon direncine olumlu etkisinin, Sr ilavesinden fazla olduğu görülmektedir. AlSi9Cu3 TCP kaplı numunelerin polarizasyon dirençleri kıyaslandığında ise, en yüksek polarizasyon direncinin en düşük korozyon akımına sahip B ilaveli numunede ( $199,6 \text{ k}\Omega$ ) olduğu görülmektedir. Diğer AlSi9Cu3 TCP kaplı normal, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin polarizasyon dirençleri sırasıyla  $45,6 \text{ k}\Omega$ ,  $57,9 \text{ k}\Omega$  ve  $28,0 \text{ k}\Omega$  değerlerindedir. AlSi10Mg alaşımı normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin EIS analizi ile hesaplanan  $R_p$  değerleri ise sırasıyla,  $3,64 \text{ k}\Omega$ ,  $3,65 \text{ k}\Omega$ ,  $3,22 \text{ k}\Omega$  ve  $4,16 \text{ k}\Omega$ ’dur.

Numunelerin korozyon hızları kıyaslandığında ise B ilaveli TCP kaplı numunenin  $0,56 \mu\text{m}/\text{yıl}$  ile en düşük korozyon hızına sahip olduğu görülmektedir. Normal, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin korozyon hızları birbirine yakın olmakla birlikte sırasıyla,  $3,10 \mu\text{m}/\text{yıl}$ ,  $2,98 \mu\text{m}/\text{yıl}$  ve  $2,82 \mu\text{m}/\text{yıl}$ ’dır. Tafel deneyi sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametrelerin sonuçları AlSi9Cu3 B ilaveli ve TCP kaplı numunenin en yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.36 :** AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri.

**Çizelge 4.13 :** AlSi9Cu3 alaşıımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.

| Numune         | E <sub>corr</sub><br>(V) | i <sub>corr</sub><br>( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ) | $\beta_a$<br>(mV/dec.) | $\beta_c$<br>(mV/dec.) | R <sub>p</sub><br>(k $\Omega$ ) | v <sub>corr</sub><br>( $\mu$ m /yıl) |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Normal         | -0,716                   | 0,291                                            | 43,9                   | 100,4                  | 45,6                            | 3,10                                 |
| B İlaveli      | -0,731                   | 0,053                                            | 41,58                  | 58,7                   | 199,6                           | 0,56                                 |
| Sr İlaveli     | -0,731                   | 0,280                                            | 54,02                  | 120,5                  | 57,9                            | 2,98                                 |
| B + Sr İlaveli | -0,720                   | 0,265                                            | 20,15                  | 112,6                  | 28,0                            | 2,82                                 |

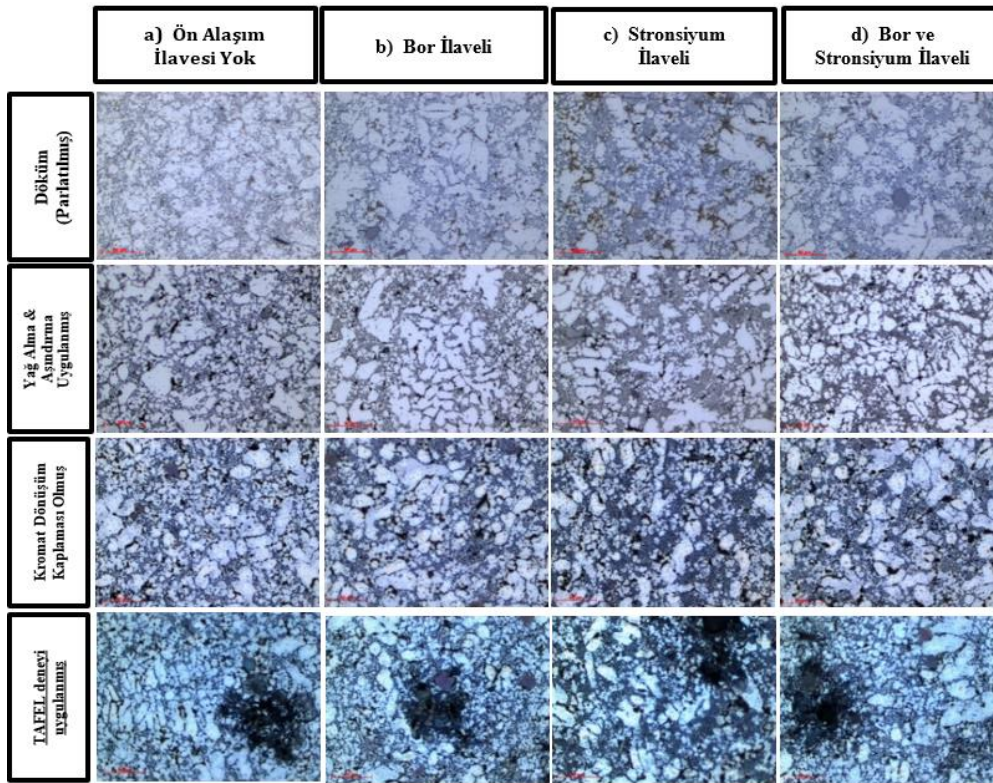
Bu çalışmadaki hipotezlerimizden biri B ve Sr ilavesi ile bakır dağılımının artırılması ve bu dağılımın artışıyla TCP uygulaması sonrasında korozyon direncinde artış sağlamaktır. Qi, J ve arkadaşları [51] A2024 (Cu:%4) yaptıkları çalışma iki farklı ön işlemin (Yağ alma & aşındırma) TCP kaplaması sonrası korozyon direncini incelemişlerdir. Yüzeysel elektroaktif bakır miktarının fazla olduğu ön işlemin TCP kaplama uygulaması sonrasında korozyon direncini daha yüksek bulmuşlardır. Bunun sebebi ön işlemler sonrasında yüzeyde kalan bakırların TCP kaplama oluşumunda etkili olduğu ve kaplama çekirdeklenmesinin bu bölgelerde gerçekleştiği şeklinde açıklanmıştır.

Bu çalışmada, yapılan faz analizi, Barker sonrası tane boyutu analizi, SEM-EDS analizleri AlSi9Cu3 alaşıımı numunelerinin B ve Sr ilavesiyle ötektik ve intermetalik fazların yapıda arttığını görülmüştü. Buna ek olarak, ön alaşım ilavesiz, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin yağ alma & aşındırma sonrası yani TCP kaplama öncesi yapılan CV analizi sonucunda yüzeydeki elektroaktif bakır miktarları saf bakıra göre kıyaslanmış ve sırasıyla %32, %66, %34 ve %64 şeklinde bulunmuştur. B ilaveli numunelerin yüzeysel elektroaktif bakır miktarının diğer iki numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yine benzer şekilde Tafel analizleri sonucunda da bu iki numunenin korozyon akımları diğer iki alaşımanın korozyon akımlarından daha düşük değerlerdedir. Böylelikle, AlSi9Cu3 alaşıımının B ilavesiyle yüzeysel elektroaktif bakır miktarı artırılmış, bu artış TCP kaplama çekirdeklenmesinde etkili olmuş ve numunelerin korozyon dirençlerinde artış elde edilmiştir.

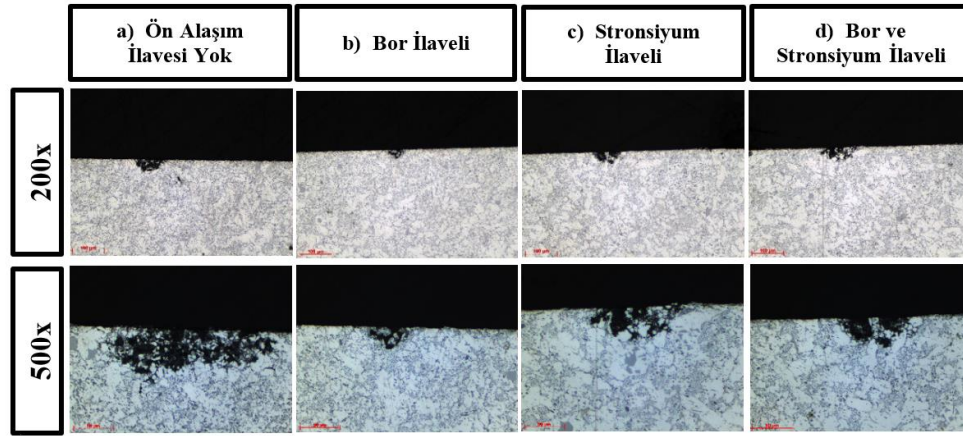
Şekil 4.37' de AlSi9Cu3 alaşıımı numunelerinin döküm, yağ alma & aşındırma, kromat dönüşüm kaplaması (TCP) ve Tafel deneyleri sonrasında elde edilen mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Döküm sonrası mikroyapılardaki intermetalik miktarındaki artış, ötektik yapıdaki değişim B ve Sr ilavesi etkisini net olarak göstermektedir. Yağ alma & aşındırma işlemleri sonrasında, mikroyapıda asit ile etkileşim sonrası özellikle

$\alpha$ -Al ile diğer fazların (ötektik faz, intermetalik fazlar) geçiş bölgelerinde çözünmeler sonucu siyah bölgeler görülmektedir. TCP kaplama sonrasında ise mikroyapı çoğunlukla yağ alma & aşındırma sonrası mikroyapıyı korumakla beraber kaplamanın etkisiyle bazı renk değişimleri görülmektedir.

Tafel deneyi sonrası mikroyapılarda ise, intermetalikler etrafında (özellikle çamursu faz) ve ötektik fazda oluşan korozyon dikkat çekicidir. TCP kaplı AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin mikroyapılarında, Şekil 4.33'deki döküm sonrası Tafel uygulanmış numunelerin mikroyapılarında sarı ağırlıklı renkli yapı görülmemektedir. Bunun sebebi ise TCP kaplamanın daha pasif karakterde olması ve alaşımların korozyon dirençlerinin artmış olmasıdır. Şekil 4.38 (200x büyütme)'deki TCP kaplı AlSi9Cu3 numunelerinin kesitten mikroyapılarında, beklenildiği gibi yüzeyin büyük bir kısmında değil kaplamanın kalınlığının az veya kusurlu olduğu düşünülen bölgelerde korozyon oluşumu gözlemlenmiştir. Gerçekleşen korozyon sonucu oluşan oyuklar birbirine yakın derinliklerde olup yaklaşık 30  $\mu$ m derinliğe sahiptirler. AlSi9Cu3 alaşımlı TCP kaplanmış numunelerin mikroyapılarında döküm numunelere göre daha pasif karakterde olan kaplamanın Tafel deneyi sonrasındaki mikroyapıdaki olumlu etkisi görülmektedir.



**Şekil 4.37 :** AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin döküm, yağ alma & aşındırma, TCP kaplama sonrası ve Tafel deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri (500x).



**Şekil 4.38 :** AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin ve Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x).

#### 4.6.3 AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonuçları

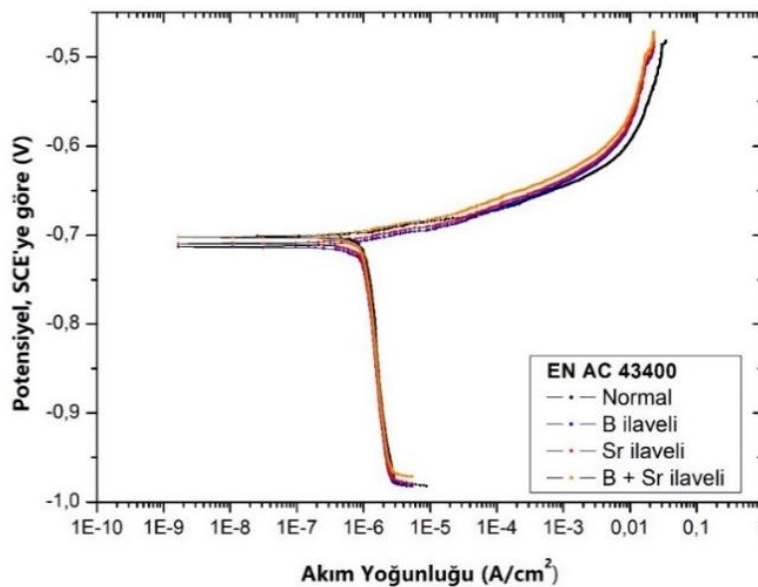
AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri Şekil 4.39’ da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, özellikle anodik ve katodik davranışların benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.14’ de ise AlSi10Mg numunelerinin Tafel deneyi verileriyle hesaplanan elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Çizelge 4.14’ deki AlSi10Mg alaşımı dökülmüş numunelerinin korozyon akım değerleri incelendiğinde sadece Sr ilaveli numunenin  $0,913 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  korozyon akımı diğer 3 alaşımından daha yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Diğer üç alaşım ise (ön alaşım ilavesiz, B ilaveli ve B + Sr ilaveli) birbirine oldukça yakın ve sırasıyla  $0,715 \mu\text{A}/\text{cm}^2$   $0,732 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve  $0,685 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  korozyon akımı değerleri ölçülmüştür. AlSi10Mg alaşımının kimyasal kompozisyonuna çok yakın EN AC 44000 (AlSi10Mg(Fe)) alaşımı yapılan çalışmada [58], Tafel deneyi sonrasında alaşımın korozyon potansiyelini  $-0,710 \text{ V}$  ve korozyon akımını  $1,07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  bulmuşlardır. Bu çalışmadaki numunelerin korozyon akımlarının bu değere yakın değerlerde olduğu ve sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. AlSi10Mg döküm numunelerinin polarizasyon dirençlerinde, korozyon akımı en yüksek yani korozyon direnci en düşük Sr ilaveli numunenin polarizasyon direncinin  $4,57 \text{ k}\Omega$  ile en düşük değerde olduğu görülmüştür. Normal, B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin polarizasyon dirençleri sırasıyla  $6,99 \text{ k}\Omega$ ,  $9,39 \text{ k}\Omega$  ve  $6,50 \text{ k}\Omega$  değerlerindedir. AlSi10Mg alaşımı normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli döküm numunelerin  $R_p$  değerleri sırasıyla,  $6,73 \text{ k}\Omega$ ,  $7,08 \text{ k}\Omega$ ,  $6,86 \text{ k}\Omega$  ve  $7,20 \text{ k}\Omega$ ’ dur. AlSi10Mg alaşımı normal, B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin EIS analizde elde edilen  $R_p$  değerlerine ve korozyon akımları incelendiğinde,  $R_p$  değerlerinin birbirine

yakın gelmesi gerekirken B ilaveli numunenin polarizasyon direnci normal ve B + Sr ilaveli numunelerden yaklaşık 2 k $\Omega$  fazla hesaplanmıştır. Bu farklı durumun nedeni B ilaveli numunenin  $\beta$ c katodik eğiminin (157 mV/dec.) diğer numunelerin  $\beta$ c katodik eğiminden daha fazla olması ve korozyon potansiyelinin daha negatif değerde (-0,713 V) olmasından kaynaklıdır.

AlSi10Mg döküm numunelerinin hesaplanan korozyon hızları kıyaslandığında, Sr ilaveli numunenin (10,02  $\mu$ m/yıl) en yüksek korozyon hızına sahip olduğu görülmüştür. Normal, B ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin korozyon hızları ise birbirine yakın değerlerde olup sırasıyla 7,85  $\mu$ m/yıl, 8,03  $\mu$ m/yıl ve 7,52  $\mu$ m/yıl değerlerinde olduğu görülmüştür.

Ötektik modifikasyonunun korozyon direncine etkisi ve AlSi9 alaşımının ile yapılan bir çalışmada [48] Na ilavesi ile bir başka çalışmada [60] ise AlSi7 (A 356) alaşımının Sr ilavesi ile araştırılmıştır. Bu iki çalışmada da ötektik modifikasyonunun korozyon direncini azalttığı ve bunun sebebinin ötektik modifikasyon sonucunda artan ötektik faz içerisindeki  $\alpha$ -Al- Si sınırlarının galvanik eşlerin sayısını ve dolayısıyla korozyon direncini azalttığını öne sürmüşlerdir. A356 alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada ise Sr ilavesinin korozyon direncini artırdığı bulunmuştur [45]. Bu çalışmada ise, Sr ilavesinin korozyon direncini azalttığı görülmüştür. AlSi10Mg döküm numunelerinin Tafel deneyi sonuçları incelendiğinde, B ve Sr ön alaşım ilavesinin alaşımın korozyon direncine olumlu etkisinin olmadığı görülmektedir.



**Şekil 4.39 :** AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri.

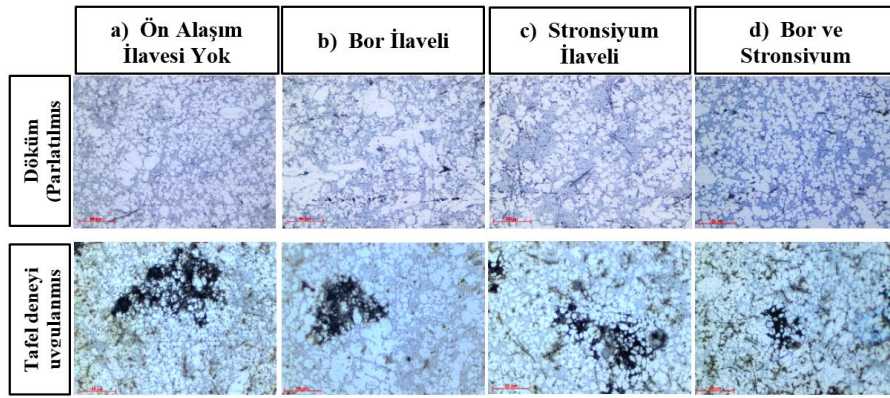
**Çizelge 4.14 :** AlSi10Mg alaşımlı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri.

| Numune         | E <sub>corr</sub><br>(V) | İ <sub>corr</sub><br>( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ) | $\beta_a$<br>(mV/dec.) | $\beta_c$<br>(mV/dec.) | R <sub>p</sub><br>(k $\Omega$ ) | v <sub>corr</sub><br>( $\mu$ m/yıl) |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Normal         | -0,704                   | 0,715                                            | 12,91                  | 104,3                  | 6,99                            | 7,85                                |
| B İlaveli      | -0,713                   | 0,732                                            | 17,58                  | 157,0                  | 9,39                            | 8,03                                |
| Sr İlaveli     | -0,709                   | 0,913                                            | 12,92                  | 37,23                  | 4,57                            | 10,02                               |
| B + Sr İlaveli | -0,705                   | 0,685                                            | 13,88                  | 39,00                  | 6,50                            | 7,52                                |

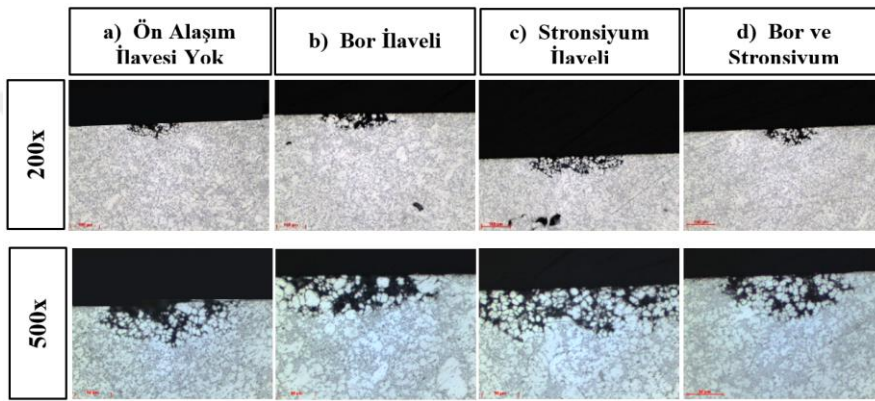
Şekil 4.40' da mikroyapı AlSi10Mg alaşımlı numunelerinin Tafel deneyi öncesi ve sonrasında alınan görüntüleri verilmiştir.

Şekil 4.41' de ise kesitten alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. AlSi10Mg alaşımlı numunelerinin Şekil 4.41' de kesitten mikroyapısı incelendiğinde özellikle  $\alpha$ -Al-Si içeren ötektik fazın korozyona uğradığı ve  $\alpha$ -Al bölgelerinin korozyona uğramadan kaldığı görülmektedir.

Şekil 4.41 c)'de yeralan Sr ilaveli numunenin oyuk oluşumları daha geniş ve derindir. Bunun yanı sıra diğer üç numunenin oyuk oluşumları birbirine benzer şekildedir. Şekil 4.40' deki numunelerin Tafel deneyi sonrasındaki korozyon morfolojisi incelendiğinde yüzeyin belli bölgelerinde oyuk oluşumları ve özellikle  $\beta$ -AlFeSi intermetaliklerinin çevresinde renk değişimleri görülmektedir. Bu renk değişimleri Bölüm 4.3.3.1.' de bahsedildiği gibi elektrokimyasal reaksiyonları yani korozyonu temsil etmektedir. B + Sr ilaveli numunenin Tafel deneyi sonrası mikroyapısında, yüzeyde renkli bölgelerin küçük ve yüzeye dağılmış halde olduğu görülmektedir. B + Sr ilaveli numunenin korozyon akımına değerlendirildiğinde B ilaveli ve ön alaşım ilavesiz numunenin korozyon akımlarına yakın olmakla birlikte 0,685  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> değeriyle ön alaşım ilavesiz, B ilaveli ve Sr ilaveli numunelerin korozyon akımlarından daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Numune yüzeyinde artan intermetalikler katot olarak davranır ve anot olarak davranan  $\alpha$ -Al ile mikrogalvanik hücreleri oluştururlar. İntermetaliklerin artmasıyla artan mikrogalvanik hücre sayısı, oyuk oluşumunu geciktirebilir. Bu nedenle B + Sr ilaveli numunenin korozyon direnci Sr ilaveli numunenin korozyon direncinden daha yüksektir.



**Şekil 4.40 :** AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri (500x).

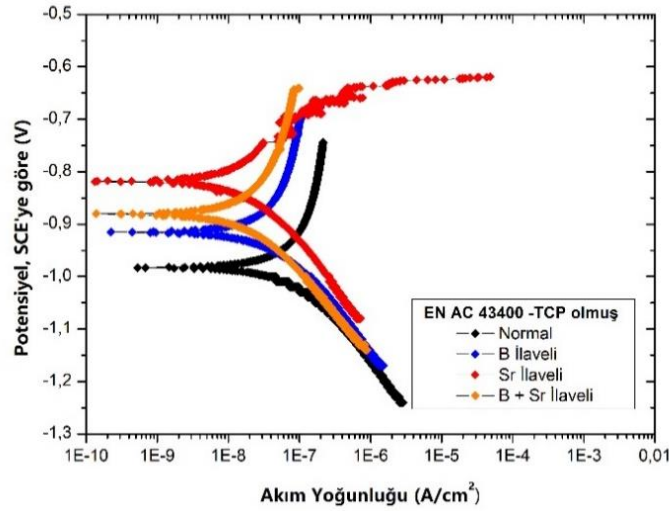


**Şekil 4.41 :** AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerinin Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x).

#### 4.6.4 AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonuçları

Şekil 4.42’ de TCP olmuş AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafiği verilmiştir. Çizelge 4.15’ de ise numunelerin korozyon potansiyelleri ve korozyon akımları verilmiştir. Tafel deneyleri sonucunda daha negatif potansiyellerde daha düşük korozyon akımı elde edildiği görülmektedir. Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin korozyon akımlarının ( $0,005 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $0,007 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) B ilaveli ve ön alaşım ilavesiz numunelerden ( $0,011 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $0,019 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) daha düşük olduğu görülmektedir. AlSi10Mg TCP kaplı numunelerin Çizelge 4.15’ deki polarizasyon dirençleri kıyaslandığında, korozyon akımı düşük olan numunelerin polarizasyon dirençlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Sr ve B + Sr ilaveli numunelerin polarizasyon dirençleri sırasıyla  $2619,2\text{k}\Omega$  ve  $2427,6\text{k}\Omega$  değerlerindedir. Korozyon akımı daha yüksek olan normal ve B ilaveli numunelerin polarizasyon dirençleri ise sırasıyla  $649,3\text{k}\Omega$  ve  $1350,6\text{k}\Omega$  değerlerindedir. AlSi10Mg

TCP kaplı normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin korozyon hızları sırasıyla, 0,21  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  0,12  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  0,05  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  ve 0,08  $\mu\text{m}/\text{yıl}$  seviyesindedir.



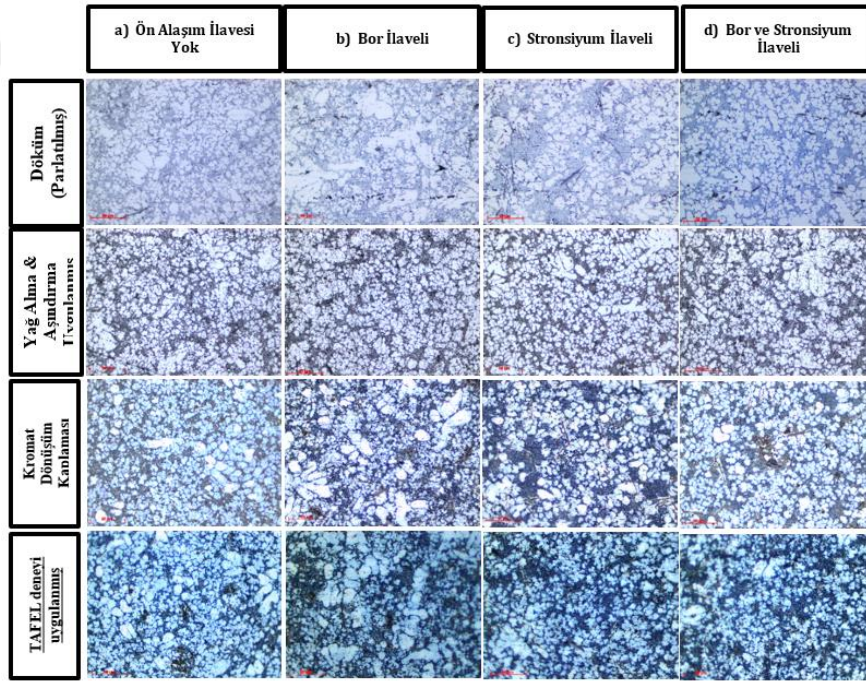
**Şekil 4.42 :** AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyi sonrasında elde edilen potansiyel-akım yoğunluğu grafikleri.

**Çizelge 4.15 :** AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri.

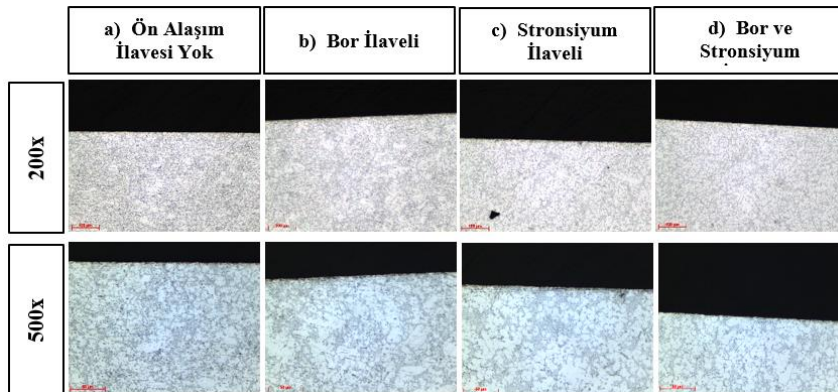
| Numune         | $E_{corr}$<br>(V) | $i_{corr}$<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | $\beta_a$<br>(mV/dec.) | $\beta_c$<br>(mV/dec.) | $R_p$<br>( $k\Omega$ ) | $v_{corr}$<br>( $\mu\text{m}/\text{yıl}$ ) |
|----------------|-------------------|---------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Normal         | -0,983            | 0,019                                       | 63,53                  | 51,28                  | 649,3                  | 0,21                                       |
| B İlaveli      | -0,915            | 0,011                                       | 80,09                  | 59,6                   | 1350,6                 | 0,12                                       |
| Sr İlaveli     | -0,817            | 0,005                                       | 57,88                  | 50,99                  | 2619,2                 | 0,05                                       |
| B + Sr İlaveli | -0,881            | 0,007                                       | 86,24                  | 78,3                   | 2427,6                 | 0,08                                       |

Şekil 4.44' de AlSi10Mg numunelerinin; döküm, yağ alma & aşındırma, kromat dönüşüm kaplaması (TCP) ve Tafel uygulanmış TCP kaplı numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Döküm sonrası mikroyapılarında B ve Sr ilavesinin etkisi görülmektedir. Yağ alma & aşındırma sonrası mikroyapıda, çok büyük bir değişiklik görülmemekle birlikte, çözünmenin gerçekleştiği faz ayrımlarının gerçekleştiği bölgeler siyah olarak gözükmemektedir. Bakır oranı AlSi9Cu3 (Cu: %2,5) alaşımına göre çok düşük (Cu: %0,1) olduğu için aşındırma sonrasında yüzeyde daha az çözünme gerçekleşmiştir. TCP olmuş numunelerin mikroyapılarında ise, kaplama oluşumu nedeniyle mikroyapıda mavi benzeri bir renk görülmekte,  $\beta$ -AlFeSi fazlarının farklı renkte görülmemektedir. Bunun nedeni ise bu ve diğer intermetalik fazlar üzerinde kaplama kalınlığının farklı olmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir. Şekil 4.45' da Tafel deneyi sonrasında numunelerin kesitten mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Tafel deneyi sonrasında hem morfolojik olarak hem de kesitten mikroyapılarda, tüm

numunelerde herhangi bir oyuk oluşumu görülmemektedir. Tafel deneyi sırasında kromat dönüşüm kaplamasının korunduğu ve korozyon oluşumunu engellediği söylenebilir. AlSi10Mg alaşımında bakır miktarının az olması sebebiyle mikrogalvanik korozyon oluşturabilecek unsurlar Al-Si ötektik fazı ve  $\beta$ -AlFeSi fazlarıdır. Sr ilaveli numunede, ötektik fazın arttığı faz analizi sonucunda belirtilmiştir. Sr içeren AlSi10Mg alaşımı numunelerinin içermeyen numunelere göre yüksek olmasının nedeni artan ötektik fazdaki Si plakaların daha küçük ve sık şekilde sıralanması sonucunda anot-katot yüzey alanı artmasına bağlanabilir. TCP prosesinin ön işlemlerinden aşındırma prosesinde ise daha küçük alanlar çözünmeye uğradığı için TCP kaplama prosesinde homojen bir kaplama oluşturmuşlardır.

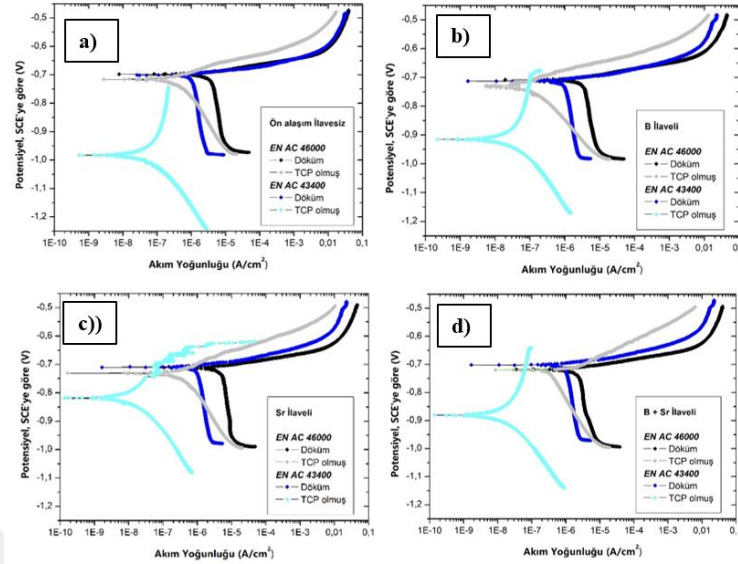


**Şekil 4.43 :** AlSi10Mg alaşımı numunelerin döküm, yağ alma & aşındırma, TCP kaplama sonrası ve Tafel deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri (500x).



**Şekil 4.44 :** AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyi sonrasında kesitten elde edilen mikroyapı görüntüleri (200x, 500x).

#### 4.6.5 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm ve TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması



**şekil 4.45 :** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm ve TCP kaplanmış numunelerin Tafel deneyleri sonucunda elde edilen potansiyel - akım yoğunluğu grafikleri; a) normal, b) B ilaveli, c) Sr ilaveli, d) B + Sr ilaveli

şekil 4.46' da AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg0 alaşımlarının döküm sonrası ve TCP olmuş numunelerinin potansiyel - akım yoğunluğu grafikleri verilmiştir. Tafel grafiklerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akımı değerleri ise Çizelge 4.16' da verilmiştir.

Hem AlSi9Cu3 hem de AlSi10Mg alaşımlarının döküm ve TCP olmuş numunelerinin kendi içerisinde değerlendirdiğimizde, iki alaşım için de TCP kaplama sonrası grafiğin döküm grafiğine göre anodik ve katodik kollarının eğimlerinin değiştiği ve anodik ve katodik kolların birbirinden uzaklaştığı görülmektedir. Özellikle TCP prosesinde numune yüzeyinde oluşturulan yeni pasif filmin etkisiyle katodik eğimde ciddi artışlar görülmektedir. Qi, J ve arkadaşları A2024 alaşımı ile yaptıkları çalışmada [44], TCP kaplama öncesi ve sonrasında yaptıkları Tafel deneyi sonucunda alaşımın TCP sonrası korozyon potansiyelinde değişim görmemişler ve katodik eğimin artarak TCP ncesi duruma göre anodik ve katodik eğrilerin birbirinden uzaklaşarak korozyon akımının azaldığını bulmuşlardır. A2024 alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada, benzer şekilde TCP kaplama sonrası, korozyon potansiyellerinde değişim gözlemlenmemiş ve Tafel deneyi sonrası elde edilen grafikte katodik kolda eğimin artmasıyla anodik katodik eğriler birbirinden uzaklaşmış ve TCP kaplama sonrası döküme göre korozyon akımının yaklaşık 10 kat azaldığı bulunmuştur [42].

Bu çalışmada AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg ön alaşım ilavesiz numunelerinin döküm ve TCP sonrası Tafel deneyi sonuçları incelendiğinde, referans çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. AlSi9Cu3 ön alaşım ilavesiz numunesi TCP sonrası korozyon akımı döküm yapısına göre yaklaşık 8 kat azalmıştır. AlSi10Mg alaşımı ise TCP sonrası korozyon akımını döküm yapısına göre ise 40 kat azalmıştır. Aynı şekilde AlSi9Cu3 alaşımı B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin TCP sonrası korozyon akımları döküm sonrasına göre sırasıyla 40,10 ve 6 kat azalmıştır. AlSi10Mg alaşımı B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numuneleri ise TCP sonrası döküme göre korozyon akımları sırasıyla 65, 180 ve 100 kat azalmıştır.

**Çizelge 4.16 :** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı numunelerinin Tafel deneyi sonrasında elde edilen verilerin fit edilmesi sonrasında elde edilen korozyon potansiyel ve korozyon akım değerleri.

| Numune                 | Ön Alaşım<br>İlavesiz(normal) |                              | B İlaveli           |                              | Sr İlaveli          |                              | B + Sr İlaveli      |                              |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
|                        | $E_{corr}$ ,<br>(V)           | $i_{corr}$ ,<br>$\mu A/cm^2$ | $E_{corr}$ ,<br>(V) | $i_{corr}$ ,<br>$\mu A/cm^2$ | $E_{corr}$ ,<br>(V) | $i_{corr}$ ,<br>$\mu A/cm^2$ | $E_{corr}$ ,<br>(V) | $i_{corr}$ ,<br>$\mu A/cm^2$ |
| AlSi9Cu3-<br>Döküm     | -0,698                        | 2,192                        | -0,708              | 2,095                        | -0,711              | 2,862                        | -0,718              | 1,585                        |
| AlSi9Cu3-<br>TCP olmuş | -0,716                        | 0,291                        | -0,731              | 0,053                        | -0,731              | 0,280                        | -0,720              | 0,265                        |
| AlSi10Mg-<br>Döküm     | -0,704                        | 0,715                        | -0,713              | 0,730                        | -0,709              | 0,913                        | -0,705              | 0,685                        |
| AlSi10Mg-<br>TCP olmuş | -0,983                        | 0,019                        | -0,915              | 0,011                        | -0,817              | 0,005                        | -0,881              | 0,007                        |

#### 4.7 Tuz Testi (NSS) Sonuçları

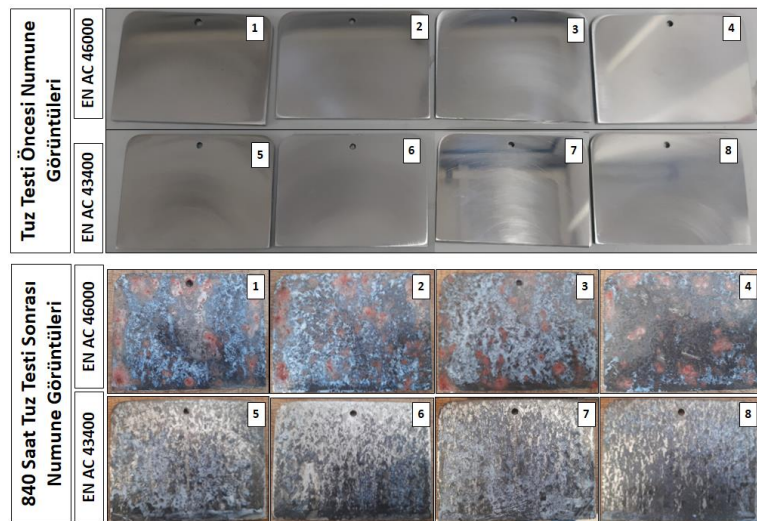
AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı ön alaşım ilavesiz, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli ön alaşım katkıları ile döküm ve TCP kaplanmış yüzeylere olmak üzere toplamda 16 numuneye ISO TS EN 9227 standardına göre 840 saat tuz testi uygulanmıştır. Çizelge 4.17’ de tuz testi uygulanan numuneler ve numune kodları verilmiştir.

**Çizelge 4.17 :** Tuz testi uygulanan AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı numuneleri ve numune kodları.

| Alaşım/ Yüzey              | Ön Alaşım İlave Durumu / Numune Kodları |           |            |                |
|----------------------------|-----------------------------------------|-----------|------------|----------------|
|                            | Normal                                  | B İlaveli | Sr İlaveli | B + Sr ilaveli |
| AlSi9Cu-<br>Döküm          | 1                                       | 2         | 3          | 4              |
| AlSi9Cu TCP-<br>kaplanmış  | 5                                       | 6         | 7          | 8              |
| AlSi10Mg-<br>Döküm         | 1-TCP                                   | 2-TCP     | 3-TCP      | 4-TCP          |
| AlSi10Mg TCP-<br>kaplanmış | 5-TCP                                   | 6-TCP     | 7-TCP      | 8-TCP          |

#### 4.7.1 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg döküm numunelerinin tuz testi sonuçları

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli döküm numunelerinin tuz testi sonucundaki elde edilen görseller Şekil 4.46’ da verilmiştir. AlSi9Cu3 numunelerinde, numune yüzeyinde korozyon ürünü kalıntılarının bulunduğu görülmektedir. AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin 840 saat tuz testi sonucundaki görsellerinde temelde üç renk görülmektedir. Bu renkler, alüminyumun korozyonu sonucunda oluşan beyaz bölgeler, bakır ağırlıklı bölgelerin korozyonu sonucunda oluşan kırmızı-turuncu bölgeler ve alüminyumca zengin gri bölgelerdir. Şekil 4.46’ daki 2 numaralı AlSi9Cu3 B ilaveli numunede, bakır içerdiği öngörülen turuncu bölgelerin 1 numara ile gösterilen normal numuneye göre daha küçük ve numune yüzeyine dağıldığı görülmektedir. Benzer durum B + Sr ilaveli numune yüzeyinde de görülmektedir. AlSi9Cu3 alaşımı numunelerine yapılan SEM EDS analizleri, faz analizleri ve Barker dağlama sonrası mikroyapı incelemeleri sonrasında B ilaveli numunelerin tane inceltme sonucunda bakır içeren intermetaliklerin mikroyapıya daha küçük miktarlarda dağılmış olabileceğini öngörmüş idi. Yapılan CV analizleri sonucunda da, yüzey elektroaktif bakır miktarının artırıldığı ve bu öngörünün doğru olduğu yapılan ölçümler ile desteklendiği belirtilmiş idi. 840 saat tuz testi sonucunda da bu davranışın desteklendiği görülmektedir. AlSi10Mg alaşımı numunelerinin 840 saat tuz testi sonuçları incelendiğinde ise, tüm numunelerin (Şekil 4.46 (5), (6), (7) ve (8) numaralı numuneler) görsellerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.46 :** AlSi9Cu3 / AlSi10Mg döküm numunelerinin tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonrası görüntüleri; 1) / 5) normal, 2) / 6) B İlaveli, 3) / 7) Sr İlaveli ve 4) / 8) B + Sr ilaveli.

Çizelge 4.18’ de AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 döküm numunelerinin 840 saat tuz testi öncesi ve sonrası yapılan ağırlık değişimleri sonucunda elde edilen ağırlık değişimi değerleri mg/cm<sup>2</sup> cinsinden verilmiştir. AlSi9Cu3 döküm normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin ağırlık değişimleri sırasıyla 0,008 g/cm<sup>2</sup>, 0,011 g/cm<sup>2</sup>, 0,010 g/cm<sup>2</sup> ve 0,007 g/cm<sup>2</sup>’dir. B + Sr ilaveli numunenin ağırlık değişiminin en düşük değerde (0,007 g/cm<sup>2</sup>) olduğu görülmektedir. B ilavesinin Şekil 4.47’ de 2 ve 4 numaralı görsellerde bakırın mikroyapıya yayıldığı görülmektedir. Bu nedenle AlSi9Cu3 döküm B + Sr ilaveli numunenin ağırlık değişiminin en düşük çıkmıştır. AlSi10Mg alaşımı numunelerinin tuz testi sonucunda elde edilen ağırlık değişimler incelendiğinde birbirine yakın denebilecek değerlerde olduğu görülmektedir.

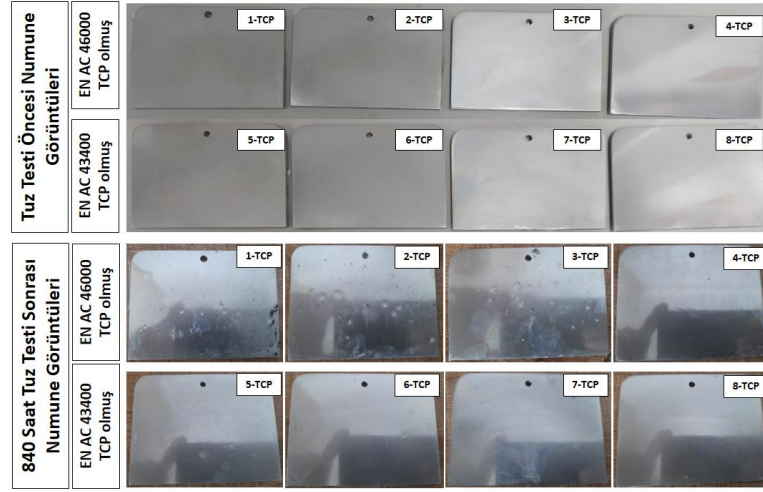
**Çizelge 4.18 :** AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin 840 saat sonrası ağırlık değişimleri.

| Alaşım         | 840 saat NSS testi sonrası ağırlık değişimi (g/cm <sup>2</sup> ) |           |            |                |
|----------------|------------------------------------------------------------------|-----------|------------|----------------|
|                | Normal                                                           | B İlaveli | Sr İlaveli | B + Sr ilaveli |
| AlSi9Cu3 Döküm | 0,008                                                            | 0,011     | 0,010      | 0,007          |
| AlSi10Mg Döküm | 0,007                                                            | 0,003     | 0,009      | 0,007          |

#### 4.7.2 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerin tuz testi sonuçları

AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli TCP kaplanmış numunelerinin tuz testi sonucundaki elde edilen görseller Şekil 4.47’ de verilmiştir. Tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonucundaki numune görsellerinde, gözle görülen bir korozyon oluşumu görülmemektedir.

Çizelge 4.19’ de tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonrası ağırlık ölçümleri ile hesaplanan ağırlık değişimleri verilmiştir. Ağırlık değişimleri sonuçlarına değerlendirildiğinde, AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin ağırlık değişimlerinin birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu ve sırasıyla, 0,004 g/cm<sup>2</sup>, 0,004 g/cm<sup>2</sup>, 0,006 g/cm<sup>2</sup>, 0,006 g/cm<sup>2</sup> olarak hesaplandığı görülmüştür. Düşük bakır oranına sahip AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelerinin ağırlık değişimi değerlerinde ise, beklenildiği gibi AlSi9Cu3 TCP kaplı numunelerine göre daha düşük değerler görülmektedir. AlSi10Mg TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerinin ağırlık değişimleri 0,003 g/cm<sup>2</sup>, 0,003 g/cm<sup>2</sup>, 0,002 g/cm<sup>2</sup> ve 0,002 g/cm<sup>2</sup>’ dir.



**Şekil 4.47 :** AlSi9Cu3 / AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin tuz testi öncesi ve 840 saat tuz testi sonrası görüntüleri; 1-TCP / 5-TCP ön alaşım ilavesiz, 2-TCP / 6-TCP B İlaveli, 3-TCP / 7-TCP) Sr İlaveli ve 4-TCP / 8- TCP B + Sr ilaveli.

**Çizelge 4.19 :** AlSi10Mg ve AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış numunelerin 840 saat sonrası ağırlık değişimleri.

| Alaşım   | 840 saat NSS testi sonrası ağırlık değişimi (g/cm <sup>2</sup> ) |           |            |                |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|------------|----------------|
|          | Normal                                                           | B İlaveli | Sr İlaveli | B + Sr ilaveli |
| AlSi9Cu3 | 0,004                                                            | 0,004     | 0,006      | 0,006          |
| AlSi10Mg | 0,003                                                            | 0,003     | 0,002      | 0,002          |

#### 4.8 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg Döküm Numunelerinin Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımlarının ön alaşım ilavesiz (normal), B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli 4 farklı numunesinin döküm ve TCP kaplanmış olmak üzere 2 farklı yüzeyin korozyon özellikleri incelenmiştir. Çizelge 4.20’ de AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı numunelere (normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli) uygulanan metalografik, elektrokimyasal karakterizasyon yöntemleri ile numunelere uygulanan tuz testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.20’deki mikroyapı faz analizi sonuçlarına her iki alaşım için de, yapılan mikroyapı analizlerinde tane inceltici B ilavesi ve ötektik modifiye edici Sr ilavesi ile ön alaşım ilavesi yapılmayan (normal) numuneye göre ötektik ve intermetalik fazların toplamını artırdığı görülmektedir. Yapılan CV analizi sonucunda B ilaveli numunelerin numune yüzeyinde elektroaktif bakır miktarını artırdığı tespit edilmiştir. Döküm yüzeye sahip numunelerin açık devre potansiyellerinin 60 dk boyunca değişiminin korozyon direnci üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. EIS deneyleri modellemesi sonucunda elde edilen çift katmanlı (double layer) yapının sabit

faz elementini oluşturan sabitlerden n2 değerinin hem AlSi9Cu3 hem de AlSi10Mg alaşımlarının tüm ön alaşım ilaveli numunelerinde birbirine yakın olduğu ve ortalama 0,88-0,89 değerlerindedir. Bu değerlerin birbirine yakın çıkması deneylerin gerçekleştiği %3,5 NaCl çözeltisinde numune yüzeyinde oluşan çift katmanlı yapının ön alaşım ilavesinden bağımsız birbirine yakın özellikler gösterdiği ve homojene yakın davranışta olduğu görülmüştür. Yapılan EIS deneyi sonucunda elde edilen yük transfer direnci ve Tafel ekstrapolasyon deneyi sonuçlarında elde edilen korozyon akımı, polarizasyon direnci ve korozyon hızlarının numune bazında büyük ölçüde tutarlı olduğu Çizelge 4.20’ de görülmektedir. Numunelere uygulanan tuz testleri sonucunda elde edilen ağırlık değişimi değerlerinin elektrokimyasal yöntemler ile ölçülen korozyon özelliklerine yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

AlSi9Cu3 alaşımı döküm yüzeyine sahip numuneler arasında B + Sr ilaveli numunenin en yüksek korozyon direncine sahip olduğu Çizelge 4.20’ de görülmektedir. Tane inceltici B ilavesiyle ve ötektik modifiyelisi Sr ilavesi ile yüzey elektroaktif bakır miktarı artırılmış ve yüzey anot katot yüzey alanı artırılmıştır. Aynı miktardaki bakır daha küçük miktarlarda daha fazla bölgeye yayılarak daha küçük alanlarda korozyon oluşumları sayesinde korozyon direnci artırılmıştır. Ayrıca, faz analizleriyle B ilavesinin çamursu fazların miktarını artırdığı görülmüş ve bu fazların oyuk ilerleyişini engellediğine dair mikroyapı görüntüleri Tafel deneyi sonrası tespit edilmiştir.

AlSi10Mg döküm numuneleri incelendiğinde ise, B+Sr ilaveli ve B ilaveli numunenin en yüksek korozyon dirençlerine sahip olduğu görülmektedir. AlSi10Mg alaşımı numuneleri içerdiği düşük bakır oranı nedeniyle ön alaşım ilavesi sonucunda korozyon dirençleri daha düşük oranda etkilenmiştir. AlSi10Mg döküm numunelerinin Çizelge 4.20’ deki EIS analizi ve Tafel sonrasındaki  $R_p$  değerleri değerlendirildiğinde, her iki deney ile elde edilen değerlerin büyük ölçüde birbirine yakın ve tutarlı olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, AlSi9Cu3 numunelerinde en düşük ve en yüksek korozyon akımı arasında  $1,3 \mu A/cm^2$  fark varken, bu fark AlSi10Mg alaşımı numunelerinde ise, yaklaşık  $0,2 \mu A/cm^2$ ’ dir. AlSi10Mg alaşımının bakır içeriğinin düşük olmasından kaynaklı ön alaşım ilavesi ile mikroyapının değiştirilmesine rağmen korozyon özellikleri bakımından fazla değişmemesine neden olmuştur. AlSi10Mg alaşımının Çizelge 4.19’ daki korozyon hızları ( $7,8 \mu m/yıl$   $8 \mu m/yıl$   $10 \mu m/yıl$   $7,5 \mu m/yıl$ ) kıyaslandığında da benzer durum görülebilir.

**Çizelge 4.20 :** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı döküm numunelerine uygulanan karakterizasyon işlemlerinin sonuçları.

| Alaşım<br>(Döküm<br>Yüzey)     | Mikroyapı Faz<br>Analizi Sonuçları               | CV<br>Analizi<br>Sonuçları                              | Elektrokimyasal Empedans<br>Spektroskopisi (EIS) Sonuçları |                                                 |                             | Tafel Ekstrapolasyon Deneyi Sonuçları |                                               |                                                 |                                                 | Tuz Testi<br>Sonuçları                      |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                | Ötektik +<br>İntermetalik<br>(hesaplanan)<br>(%) | $\theta_{Cu}$ ,<br>Elektroaktif<br>bakır<br>miktarı (%) | $E_{OC}$<br>Değişimi-1<br>saat<br>sonunda (V)              | Polarizasyon<br>Direnci, $R_p$<br>(k $\Omega$ ) | Çift<br>katman<br>n1 değeri | Korozyon<br>Potansiyeli<br>(V)        | Korozyon<br>Akımı, $I_{corr}$<br>$\mu A/cm^2$ | Polarizasyon<br>Direnci, $R_p$<br>(k $\Omega$ ) | Korozyon<br>Hızı, $v_{corr}$<br>( $\mu m/yıl$ ) | Ağırlık<br>Değişimi<br>(g/cm <sup>2</sup> ) |
| AlSi9Cu3-<br>Normal            | 32,9 ± 2,6                                       | 32,1                                                    | 0,020                                                      | 3,64                                            | 0,886                       | -0,698                                | 2,192                                         | 3,31                                            | 23,4                                            | 0,008                                       |
| AlSi9Cu3-<br>B İlaveli         | 35,9 ± 1,3                                       | 66,9                                                    | 0,007                                                      | 3,65                                            | 0,860                       | -0,708                                | 2,095                                         | 3,66                                            | 22,3                                            | 0,011                                       |
| AlSi9Cu3<br>Sr İlaveli         | 37,1 ± 2,4                                       | 39,9                                                    | 0,025                                                      | 3,22                                            | 0,872                       | -0,711                                | 2,862                                         | 2,32                                            | 30,5                                            | 0,010                                       |
| AlSi9Cu3-<br>B + Sr<br>İlaveli | 37,8 ± 2,0                                       | 64,1                                                    | 0,025                                                      | 4,16                                            | 0,882                       | -0,718                                | 1,585                                         | 4,53                                            | 16,9                                            | 0,007                                       |
| AlSi10Mg-<br>Normal            | 32,2 ± 2,8                                       | -                                                       | 0,018                                                      | 6,73                                            | 0,884                       | -0,704                                | 0,715                                         | 6,99                                            | 7,8                                             | 0,007                                       |
| AlSi10Mg-<br>B İlaveli         | 34,7 ± 3,3                                       | -                                                       | 0,007                                                      | 7,08                                            | 0,910                       | -0,713                                | 0,730                                         | 9,39                                            | 8,0                                             | 0,003                                       |
| AlSi10Mg-<br>Sr İlaveli        | 36,1 ± 0,6                                       | -                                                       | 0,015                                                      | 6,86                                            | 0,906                       | -0,709                                | 0,913                                         | 4,57                                            | 10,0                                            | 0,009                                       |
| AlSi10Mg-<br>B + Sr<br>İlaveli | 37,9 ± 2,0                                       | -                                                       | 0,013                                                      | 7,20                                            | 0,910                       | -0,705                                | 0,685                                         | 6,50                                            | 7,5                                             | 0,007                                       |

#### 4.9 AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg TCP Kaplanmış Numunelerinin Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 4.21’ de AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelere (normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli) uygulanan metalografik, elektrokimyasal karakterizasyon yöntemleri ile numunelere uygulanan tuz testi sonuçları verilmiştir.

AlSi9Cu3 alaşımı TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümü sonuçları Çizelge 4.21’ de verilmiştir. Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ( $1,46 \pm 0,07 \mu\text{m}$  ve  $1,27 \pm 0,07 \mu\text{m}$ ) normal ve B ilaveli numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinden ( $1,11 \pm 0,07 \mu\text{m}$  ve  $1,18 \pm 0,07 \mu\text{m}$ ) yüksektir. TCP kaplama kalınlığının yaklaşık 40-100 nm aralığında olabileceği bilindiğinden [42–47], numune yüzey pürüzlülüğü numune yüzey pürüzlülük değeri asit ile aşındırma sonrasında oluşmaktadır. Bu nedenle, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli numunenin yüzey pürüzlülük farkı, TCP kaplama ön işlemlerinden asit ile aşındırma adımıyla numune yüzeyinin çözünmesi sonucunda ortaya çıkmıştır.

Sr ve B + Sr ilaveli numunelerin yapılan faz analizi ve alınan mikroyapı görüntüleri sonucunda ötektik ve intermetalik fazlarının normal ve B ilaveli numuneye göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Artan ötektik faz anot-katot etkileşim yüzeyini artırmış ve asit ile aşındırma aşamasında daha fazla yüzeyin çözünmesine ve yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olmuştur. AlSi9Cu3 TCP kaplanmış normal, B ilaveli, Sr ilaveli, B + Sr ilaveli numunelerin EIS, Tafel analizi ve tuz testi sonuçlarına göre, AlSi9Cu3 Sr ve B + Sr ilaveli TCP kaplanmış numunelerinin diğer iki ön alaşım ilaveli numunelerden korozyon direncinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedenlerinden biri asit ile aşındırma aşamasında artan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle TCP kaplamanın homojen kaplanmasına olumsuz etki ettiği ve böylece korozyon direnci daha düşük bir kaplamanın oluştuğu analiz sonuçlarında görülmektedir. AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerden korozyon direnci en yüksek numune B ilaveli (korozyon akımı:  $0,053 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve ağırlık değişimi:  $0,004 \text{ g}/\text{cm}^2$ ) numunedir. B ilaveli TCP kaplanmış numunenin en yüksek korozyon direncini göstermesinde, B ilavesiyle yüzeysel elektroaktif bakır miktarı artırılması, bu artışın TCP kaplama çekirdeklenmesinde etkili olduğu ve numunelerin korozyon direncinde artış elde

edildiği söylenebilir. Bir başka neden ise Tafel deneyi sonrasında elde edilen mikroyapı görüntülerinde tespit edilen Al, Fe, Mn içeren çamursu fazların oyuklanma ilerlemesini engellemesidir. AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri, AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinden yaklaşık 0,5  $\mu\text{m}$  daha azdır. Bu durum, asit ile aşındırma esnasında içerdiği bakır elementi nedeniyle daha korozyon özellik gösteren AlSi9Cu3 alaşımının AlSi10Mg alaşımı numunelerinden daha fazla çözünme gerçekleştirmesidir. AlSi9Cu3 alaşımı numuneleri ile benzer şekilde Sr ilavesi yapılan Sr ve B+Sr ilaveli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ( $0,75 \pm 0,04 \mu\text{m}$  ve  $0,87 \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) ön alaşım ilavesi olmayan numuneden ( $0,63 \pm 0,07 \mu\text{m}$  daha yüksektir. Çizelge 4.21’ de verilen korozyon potansiyelleri incelendiğinde, AlSi9Cu3 numunelerinin  $-0,720 \pm 0,1$  V aralığında, AlSi10Mg alaşımı numunelerinin ise  $-0,850 \pm 0,50$  V aralığında olduğu görülmektedir. AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelerin AlSi9Cu3 TCP kaplanmış numunelerin korozyon potansiyellerinden ortalama 0,230 V daha negatif değerdedir. Buna ek olarak bu iki alaşım numunelerinin EIS analizi sonucunda kaplama homojenliğini temsil edebilecek  $n_2$  değerlerinin kıyasınada, AlSi9Cu3 alaşımı numunelerinin  $n_2$  değerlerinin ( $0,750 \pm 0,50$ ) AlSi10Mg alaşımı numunelerinin  $n_2$  değerlerinden ( $0,910 \pm 0,10$ ) daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir.  $n_2$  değeri 1’ e ne kadar yakınsa kaplama o kadar homojen anlamına gelmektedir. Bu nedenle, AlSi10Mg alaşımı numunelerinin TCP kaplaması daha homojendir sonucuna varılabilir. TCP kaplama sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri, korozyon potansiyelleri ve EIS deneyi sonucunda hesaplanan  $n_2$  değerleri sonuçları değerlendirildiğinde, AlSi10Mg alaşımının numunelerinin TCP kaplamasının daha homojen bir kaplama oluşturduğu söylenebilir. Çizelge 4.21’ de ki AlSi10Mg TCP kaplanmış numunelere uygulanan EIS deneyi sonucundaki  $R_{ct}$  değerlerine, Tafel deneyi sonuçları ve 840 saat tuz testi sonrası ağırlık değişimi değerleri incelendiğinde Sr ve B + Sr ön alaşımlı numunelerin diğer iki numuneden daha iyi korozyon direncine sahip olduğu görülmektedir. Sr ilaveli numunelerde artan ötektik ve intermetalik fazların nedeniyle anot-katot yüzey alanı artmıştır. Artan anot-katot etkileşimi TCP ön işlemlerden asit ile aşındırma sonucunda numune yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bu yüzey pürüzlülük artışı TCP kaplamanın numune yüzeyinde daha iyi tutunmasına neden olmuştur.

**Çizelge 4.20:** AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg alaşımı TCP kaplanmış numunelere uygulanan karakterizasyon işlemlerinin sonuçları.

| Alaşım<br>(TCP<br>Kaplanmış<br>Yüzey) | Mikroyapı<br>Faz Analizi<br>Sonuçları            | Yüzey<br>Pürüzlülük<br>Ölçümü               | CV Analizi<br>Sonuçları                                     | Elektrokimyasal<br>Empedans<br>Spektroskopisi (EIS) |                             | Tafel Ekstrapolasyon Deneyi Sonuçları |                                                           |                                              |                                                         | Tuz Testi<br>Sonuçları              |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                       | Ötektik +<br>İntermetalik<br>(hesaplanan)<br>(%) | Yüzey<br>Pürüzlülük<br>Rz ( $\mu\text{m}$ ) | $\theta\text{Cu}$ ,<br>Elektroaktif<br>bakır miktarı<br>(%) | Yük Transfer<br>Direnci, Rct<br>(k $\Omega$ )       | Çift<br>katman n2<br>değeri | Korozyon<br>Potansiyeli<br>(V)        | Korozyon<br>Akımı, İcorr<br>( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Polarizasyon<br>Direnci, Rp<br>(k $\Omega$ ) | Korozyon<br>Hızı, vcorr<br>( $\mu\text{m}/\text{yıl}$ ) | Ağırlık<br>Değişimi<br>(g/cm $^2$ ) |
| AlSi9Cu3<br>Normal                    | 32,9 $\pm$ 2,6                                   | 1,11 $\pm$ 0,02                             | 32,1                                                        | 57,51                                               | 0,778                       | -0,716                                | 0,291                                                     | 45,6                                         | 3,10                                                    | 0,004                               |
| AlSi9Cu3<br>B İlaveli                 | 35,9 $\pm$ 1,3                                   | 1,18 $\pm$ 0,09                             | 66,9                                                        | 295,8                                               | 0,657                       | -0,731                                | 0,053                                                     | 199,6                                        | 0,56                                                    | 0,004                               |
| AlSi9Cu3 Sr<br>İlaveli                | 37,1 $\pm$ 2,4                                   | 1,46 $\pm$ 0,07                             | 39,9                                                        | 116,5                                               | 0,715                       | -0,731                                | 0,280                                                     | 57,9                                         | 2,98                                                    | 0,006                               |
| AlSi9Cu3<br>B + Sr İlaveli            | 37,8 $\pm$ 2,0                                   | 1,27 $\pm$ 0,02                             | 64,1                                                        | 287,0                                               | 0,684                       | -0,720                                | 0,265                                                     | 28,0                                         | 2,82                                                    | 0,006                               |
| AlSi10Mg<br>Normal                    | 32,2 $\pm$ 2,8                                   | 0,63 $\pm$ 0,07                             | -                                                           | 785,0                                               | 0,920                       | -0,983                                | 0,019                                                     | 649,3                                        | 0,21                                                    | 0,003                               |
| AlSi10Mg B<br>İlaveli                 | 34,7 $\pm$ 3,3                                   | 0,75 $\pm$ 0,02                             | -                                                           | 750,0                                               | 0,891                       | -0,915                                | 0,011                                                     | 1350,6                                       | 0,12                                                    | 0,003                               |
| AlSi10Mg Sr<br>İlaveli                | 36,1 $\pm$ 0,6                                   | 0,75 $\pm$ 0,04                             | -                                                           | 6748,0                                              | 0,920                       | -0,817                                | 0,005                                                     | 2619,2                                       | 0,05                                                    | 0,002                               |
| AlSi10Mg B +<br>Sr İlaveli            | 37,9 $\pm$ 2,0                                   | 0,87 $\pm$ 0,01                             | -                                                           | 6615,0                                              | 0,889                       | -0,881                                | 0,007                                                     | 2377,0                                       | 0,08                                                    | 0,002                               |

## 5. GENEL SONUÇLAR

- AlSi9Cu3 (EN AC 46000) ve AlSi10Mg (EN AC 43400) alüminyum döküm alaşımlarına döküm öncesinde tane inceltici AlB3 ve ötektik modifiye edici AlSr15 ön alaşım ilaveleri yapılmıştır. AlB3 ön alaşımının mikroyapı üzerindeki olumlu etkileri tane inceltme ve  $\alpha$ -Al fazlarının ön alaşım ilavesiz (normal)' e göre daha küçük ve küresel şekilde olduğu görülmüştür. AlSr15 ön alaşımının ise ötektik faz üzerindeki olumlu inceltme etkisi beklenildiği gibi mikroyapı üzerinde gözlemlenmiş, iğnesel ötektik fazları lifsi yapıya sahip ötektik fazlarına dönüşmüştür.
- AlSi9Cu3 ve AlSi10Mg döküm numunelerine uygulanan EIS deneylerinin ve Tafel deneyi sonucunda hesaplanan polarizasyon direnci değerleri birbirleri ile büyük ölçüde örtüşmüştür. Korozyon direnci en yüksek bulunan AlSi9Cu3 alaşımı B + Sr ilaveli numunesinin polarizasyon direnci EIS deneyi sonucunda 4,16 k $\Omega$  bulunmuş, Tafel deneyi sonucunda 4,53 k $\Omega$  olarak hesaplanmıştır. AlSi10Mg alaşımı ön alaşım ilaveli numunelerin (normal, B ilaveli, Sr ilaveli ve B + Sr ilaveli) polarizasyon direnci değerleri birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.
- Yağ alma & aşındırma işlemleri (TCP kaplama ön işlemleri) sonrasında AlSi9Cu3 (Cu: %2.4) numunelerine yapılan CV deneylerinde, saf bakıra oranla ön alaşım ilavesiz, AlB3 ilaveli, AlSr15 ilaveli ve AlB3 + AlSr15 ilaveli numunelerin yüzey elektroaktif bakır miktarı sırasıyla %32,1 %66,9 %39,9 %64,1 olarak bulunmuştur. Bakır oranı nispeten düşük AlSi10Mg (Cu: %0.1) alaşımı içerdiği düşük bakır nedeniyle CV analizi sonucunda herhangi bir pik elde edilememiş, yüzey elektroaktif bakır miktarı ölçülememiştir.
- AlSi10Mg alaşımı AlSr15 ilaveli TCP kaplanmış numune, EIS deneylerinde yük transfer direnci 6748 k $\Omega$ , Tafel deneyinde 0,005  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>, polarizasyon direnci 2619,2

kΩ ve tuz testinde ağırlık değişimi 0,002 g/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuş ve bu numunenin korozyon direnci diğer ön alaşım ilaveli numunelerden daha yüksek bulunmuştur.

- TCP kaplı Sr içeren AlSi10Mg alaşımı numunelerinde, ötektik fazın fazla olmasıyla anot-katot yüzey alanları artmış ve TCP kaplama ön işleminde daha küçük ve sık alanların çözünmesi (korozyona uğraması) sonucunda numune yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Bu nedenle, numune yüzeyinde daha homojen ve tutunmuş bir TCP kaplama oluşmuş ve numune yüksek korozyon direnci artırılmıştır.
- EIS, Tafel deney sonuçlarına ve 840 saat tuz testi sonucuna göre AlSi9Cu3 alaşımının TCP kaplanmış numunelerinden AlB3 ilaveli numunenin en yüksek korozyon direncini gösterdiği tespit edilmiştir. AlB3 ilavesiyle yüzeydeki elektroaktif bakır miktarı artırılmasının TCP kaplama çekirdeklenmesinde etkili olduğu ve numunelerin korozyon direncinde artış elde edildiği görülmüştür.
- AlSi9Cu3 döküm yüzeye sahip numunelerinin 840 saat tuz testi sonucunda yüzeyde oluşan korozyon ürünleri incelendiğinde, AlB3 ilavesi yapılan numunelerin yüzeyinde diğer numune yüzeylerine göre daha küçük alanlarda ve sayıca daha fazla bakır içeren korozyon ürünlerinin oluşturduğu turuncu bölgelerin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum AlB3 ilavesi ile tane inceltmenin sonucunda aynı miktardaki bakırın numune yüzeyine homojen bir şekilde dağıtıldığını göstermiştir.
- AlSi9Cu3 alaşımı döküm numunelerinin Tafel analizi sonrası mikroyapısı incelendiğinde çamursu fazlarının oyuk (pit) oluşumunu engellediği görülmüştür. Tane inceltmenin etkisiyle AlB3 ilaveli numunelerde çamursu fazlarının daha küçük ve fazla olduğu ve bu nedenle AlB3 ilaveli numunelerinin korozyon dirençleri diğer ön alaşım ilaveli numunelere göre daha yüksek olabileceği sonucuna varılmıştır.

- Düşük bakır içeren AlSi10Mg alaşımı döküm ve TCP kaplanmış numunelerinin korozyon dirençleri içerdikleri düşük bakır oranı nedeniyle EIS, Tafel deneyleri ve 840 saat tuz testi sonucunda AlSi9Cu3 alaşımından daha yüksek bulunmuştur.
- Yapılan çalışma kapsamında AlSi9Cu3 alaşımı yüzeyindeki bakır içeren intermetalikleri daha küçük ve homojen şekilde yüzeye dağıtmak ve daha küçük mikrogalvanik korozyon hücreleri oluşturmak, TCP kaplama sonrası korozyon direncini arttırmak amaçlanmıştır. AlSi9Cu3 alaşımına AlB3 ön alaşımı ilavesiyle yüzey elektroaktif bakır miktarının artışı CV analizleri ile görülmüştür. AlSi9Cu3 AlB3 ilaveli numunenin TCP kaplama sonrasında elde edilen korozyon direncinin ön alaşım ilavesiz numuneye göre yük transfer direncinin (295,8 k $\Omega$  & 57,51 k $\Omega$ ) yaklaşık 5 kat daha fazla arttığı ve korozyon akımının yaklaşık 5,5 kat azaldığı (AlB3 ilaveli: 0,053  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> ve normal: 0,291  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>) görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- [1] Jones, D. A. (1992). *Principles and prevention of corrosion*. New York: Macmillan Publishers.
- [2] Url-1 <<http://impact.nace.org/documents/ccsupp.pdf>>, erişim tarihi 07.02.2022.
- [3] Url-2 <<https://www.worldatlas.com/articles/the-most-abundant-elements-in-the-earth-scrust.html>>, erişim tarihi 20.01.2022.
- [4] Keleş, Ö. (2021). *Alüminyumun Serüveni*. İstanbul: İTÜ Vakfı Yayınları.
- [5] Url-3, <<https://www.ojo7.xyz/ProductDetail.aspx?iid=45672817&pr=30.88>>, erişim tarihi 20.01.2021.
- [6] Url-4, <<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/aluminyum.pdf>>, erişim tarihi 20.01.2022.
- [7] Nobakhtghalati, S. (2014) *Wear of carbon cathode lining in aluminium electrolysis cell: The effect of rotation speed in laboratory test cell*. (Yüksek lisans Tezi). <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/249639>>, adresinden alınmıştır.
- [8] Xiao, Y. & Tang, K. (2009). Solubility of al in molten chloride-fluoride melts, 8. *Uluslararası Ergimiş Flaks, Tuz ve Cüruflar Konferansı*, Santiago, Şili: 18-21 Ocak.
- [9] Car, E. (2010). Birincil Alüminyum Üretim Teknolojilerine Genel Bir Bakış, *Metalürji Dergisi*, 156 (46), 37–48.
- [10] Url-5, <<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>>, erişim tarihi 21.01.2022.
- [11] Car, E. (2012). İkincil Alüminyum Üretimine Genel Bir Bakış, *Metalürji Dergisi*, 160(47), 42–50.
- [12] Url-6, <<https://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum>>, erişim tarihi 21.01.2022.
- [13] Sabatino, M.D. & Arnberg, L. (2013). A review on the fluidity of Al based alloys, *Metallurgical Science and Tecnology* (Vol. 22, pp.9-15).
- [14] Timelli, G. & Bonollo, F. (2007). Fluidity of aluminium die castings alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 20 (6), 304-311.
- [15] Mollard, F.R., Flemings, M.C. & Niyama, E.F. (1987). Aluminum Fluidity in Casting. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 39, 34.

- [16] **Url-7**, <<https://muhendishane.org/wp-content/uploads/2018/09/ffe79-el-kitabi-04.pdf>>, erişim tarihi 20.01.2022.
- [17] **Yildirim, M., Özyürek, D. & Tunçay, T.** (2017). The effects of molding materials on microstructure and wear behavior of A356 alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 36 (5), 515-521.
- [18] **Rathi, S., Sharma, A. & Di Sabatino, M.** (2019). Grain Refinement of Al-Si Alloys. *Scientific and Industrial Aspects*, 1(1), 7-15.
- [19] **Qiu, D., Taylor, J.A., Zhang, M.X. & Kelly, P.M.** (2007). A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys. *Acta Materialia*, 55 (4), 1447-1456.
- [20] **Yuan, L., Chao, D. & Xiang, L.Y.** (2011). Grain refining mechanism of Al<sub>3</sub>B master alloy on hypoeutectic AlSi alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China - Trans Nonferrous Metal Soc*, 2, 1435-1440.
- [21] **Dahle, A., Nogita, K., Zindel, J., McDonald, S. & Hogan, L.** (2001). Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 32, 949-960.
- [22] **Mazahery, A. & Ostad S. M.** (2014). Modification mechanism and microstructural characteristics of eutectic Si in casting Al-Si alloys: a review on experimental and numerical studies. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 66, 726-738.
- [23] **Butler, W.A., Timelli, G., E. Battaglia, E. & Bonollo, F.** (2016). Die Casting (Permanent Mold), *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* 1, 2147-2152).
- [24] **TSE** (2020) *Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları- Dökümler-Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler (TS EN 1706)*. <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073101043107076084114056108110075083> adresinden alınmıştır.
- [25] **Süslü, B.** (2019). *Yoğrulabilir (6063) Alaşımın Yenilikçi Kısmi – Kati Yüksek Basıncılı Döküm Teknolojisi ile Üretimi* (Yüksek lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Url-8**, <<https://www.bsccdiecasting.co.uk/high-pressure-die-casting/>>, erişim tarihi 27.01.2022.
- [27] **Url-9**, <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/corroding>>, erişim tarihi 29.01.2022.
- [28] **Url-10**, <<https://micorr.org/scientific-bases/>>, erişim tarihi 29.01.2022.
- [29] **Revie, R. W., Uhlig, H. H., & Uhlig, H. H.** (2000). *Uhlig's corrosion handbook*. New York: Wiley.
- [30] **Url-11**, <<http://impact.nace.org/documents/ccsupp.pdf>>, erişim tarihi 07.02.2022.

- [31] **Url-12**, <<https://www.tribonet.org/news/sandia-researchers-identified-nanoscale-mechanisms-of-steel-corrosion/>>, erişim tarihi 13.03.2022.
- [32] **Url-13**, <<https://www.gibsonstainless.com/types-of-corrosion.html>>, erişim tarihi 17.04.2022.
- [33] **Revie, R.W. & Uhlig, H.H.** (2008) *Corrosion And Corrosion Control: An Introduction To Corrosion Science And Engineering*. A John Wiley & Sons, Inc.
- [34] **Url-14**, <<https://www.extreme-bolt.com/technical-terms-of-corrosion-simplified.html>>, erişim zamanı 17.04.2022.
- [35] **Url-15**, <[https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=intergranular\\_corrosion](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=intergranular_corrosion)>, erişim zamanı 17.04.2022.
- [36] **Reboul, M.C. & Baroux, B.** (2011). Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys. *Materials and Corrosion*, 62, 215-233.
- [37] **Hesamedini, S. & Bund, A.** (2019). Trivalent chromium conversion coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16, 623–641.
- [38] **Qi, J., Hashimoto, T., Walton, J.R., Zhou, X., Skeldon, P. & Thompson, G.E.** (2015). Trivalent chromium conversion coating formation on aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 280, 317-329.
- [39] **Guardiola, X.V., Fori, B., Bonino, J.P., Duluard, S. & Blanc, C.** (2019). Nucleation and growth mechanisms of trivalent chromium conversion coatings on 2024-T3 aluminium alloy. *Corrosion Science*, 155, 109-120.
- [40] **Qi, J., Němcová, A., Walton, J.R., Zhou, X., Skeldon, P. & Thompson, G.E.** (2016). Influence of pre- and post-treatments on formation of a trivalent chromium conversion coating on AA2024 alloy. *Thin Solid Films*, 616, 270-278.
- [41] **Ely, M. Ve ark.** (2017). Role of Post-Treatment in Improved Corrosion Behavior of Trivalent Chromium Protection (TCP) Coating Deposited on Aluminum Alloy 2024-T3. *Journal of The Electrochemical Society*, 164 (6), C276-C284.
- [42] **Li, L., Swain, G.P., Howell, A., David Woodbury, D. & Swain, G.M.** (2011). The Formation, Structure, Electrochemical Properties and Stability of Trivalent Chrome Process (TCP) Coatings on AA2024. *Journal of the Electrochemical Society*, 158 (9), C274-C283.
- [43] **Guo, Y. & Frankel, G.S.** (2012). Characterization of trivalent chromium process coating on AA2024-T3, *Surface and Coatings Technology*, 206 (19–20), 3895-3902.
- [44] **Cecchel, S., Cornacchia, G. & Gelfi, M.** (2019). A study of a non-conventional evaluation of results from salt spray test of aluminum high pressure die casting alloys for automotive components. *Materials and Corrosion*, 70, 70-78.

- [45] Öztürk, İ., Ağaoğlu, G.H., Erzi, E., Dışınar, D. & Orhan, G. (2018). Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 763, 384-391.
- [46] Öztürk, İ., Hapçı Ağaoğlu, G., Erzi, E. & Ark. (2018) Corrosion Behavior of B and Ti Grain-Refined Sr-Modified A356. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 5197–5204.
- [47] Duygun, İ.K., İ., Ağaoğlu, G.H., Dışınar, D. & Orhan, G. (2018) Corrosion Behaviour of Sr Modified A360 Alloys. *IMMC 2018: 19th International Metallurgy & Materials Congress*, 19, (s.1216-1219). 25-27 Ekim, 2018, İstanbul, Türkiye
- [48] Osório, W.R., Cheung, N., Spinelli, J.E. & Ark. (2007). The effects of a eutectic modifier on microstructure and surface corrosion behavior of Al-Si hypoeutectic alloys. *Journal Solid State Electrochemistry*, 11, 1421–1427.
- [49] Little, D. A., Jakab, M. A. & Scully, J. R. (2006). Effect of Surface Pretreatment on the Underpaint Corrosion of AA2024-T3 at Various Temperatures. *Corrosion*, 62(4), 300-315.
- [50] Saillard, R., Viguié, R.B., Odemer, G., Pugliara, A., Fori, B. & Blanc, C. (2018). Influence of the microstructure on the corrosion behaviour of 2024 aluminium alloy coated with a trivalent chromium conversion layer. *Corrosion Science*, 142, 119-132.
- [51] Qi, J., Němcová, A., Walton, J.R., Zhou, X., Skeldon, P. & Thompson, G.E. (2016). Influence of pre- and post-treatments on formation of a trivalent chromium conversion coating on AA2024 alloy. *Thin Solid Films*, 616, 270-278.
- [52] Jakab, M.A., Little, D. A., & Scully, J.R. (2005). Experimental and Modeling Studies of the Oxygen Reduction Reaction on AA2024-T3. *Journal of The Electrochemical Society*, 152, B311-B320.
- [53] Fabrizi, A., Ferraro, S. & Timelli, G. (2013). The influence of Sr, Mg and Cu addition on the microstructural properties of a secondary AlSi9Cu3(Fe) die casting alloy. *Materials Characterization*, 85, 13–25.
- [54] Brodarac, Z., Dolić, N., & Unkić, F. (2014). Influence of copper content on microstructure development of AlSi9Cu3 alloy. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 50(1), 53-60.
- [55] Zedana, Y., Samuela, F.H., Samuela, A.M. & Doty, H.W. (2010). Effects of Fe intermetallics on the machinability of heat-treated Al-(7–11)% Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2), 45-55.
- [56] Ferraro, S (2013) *Influence of Trace Elements On Secondary Die-Cast Aluminium Alloys*. (Doktora tezi). Padova Üniversitesi, Endüstriyel Sistemlerin Teknik ve Yönetimi Bölümü, Padova.

- [57] **Lu, L. & Dahle, A.K.** (2006). Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al–Si foundry alloys. *Materials Science and Engineering*, (435-436), 288-296.
- [58] **Arici, A., Zhang, Z., Breton, F. & Chen, X.,G.** (2018). Effect of Zr and V Additions on Microstructure and Mechanical Properties of the AlSi10Mg Cast Alloy. *International Conference on Aluminum Alloys*: Montreal, Kanada: 4-8 Eylül.
- [59] **Nikolic, F. & Stajduhar, I. & Canadija, M.** (2021). Casting microstructure inspection using computer vision: dendrite spacing in aluminum alloys. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, 11(5), 756-768.
- [60] **Fracchia, E., Gobber, F. & Rosso, M.** (2021). Effect of alloying elements on the Sr modification of Al-Si Cast Alloys. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, 11(2), 342-360.
- [61] **Yu, H., Chen, B., Shi, X., Wu, H. & Li, B.** (2009). EIS investigation of the deposition of trivalent chromium coatings on Al 6063 alloy. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39, 303-309.
- [62] **Cecchel, S. & Cornacchia, G. & Gelfi, M.** (2017). Corrosion behavior of primary and secondary AlSi high pressure die casting alloys. *Materials and Corrosion*, 68 (9), 961– 969.
- [63] **Hanza, S., Vrsalović, L., Štic, L. & Liveric, L.** (2021). Corrosion investigations of Al-Si casting alloys in 0.6 M NaCl solution. *Engineering review*, 4(3), 1-9.
- [64] **Lee, S., Cheng, Y., Chen, W., Lee, C. & Tan, A.** (2012). Effects of strontium and heat treatment on the wear-corrosion property of Al–7Si–0.3Mg alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 135, 503–509.
- [65] **Tunc, I., Karahan, B.D. & Keles, O.** (2020). A Study on the corrosion behavior of 7072/3004/7072 clad aluminum alloy in different media. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 29, 4506–4514.
- [66] **Ralston, K.D. & Birbilis, N.** (2010) Effect of Grain Size on Corrosion: A Review. *Corrosion Science*, 66 (7), 1-10.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad : Berkay Savaşkan**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Haziran 2019- Eylül 2022 yılları arasında Mita Kalıp ve Döküm Sanayii A.Ş. firmasında 1 yıl proje mühendisi, yaklaşık 2 yıl boyunca da dökümhane üretim mühendisliği pozisyonlarında çalıştı.
- Ekim 2022- halen Kale Havacılık firmasında özel prosesler mühendisi olarak görev yapmaktadır.

### YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Savaşkan, B., Mutlu, M. & Keleş, O.** 2022. Effect of B and Sr Addition to Trivalent Chromium Process (TCP) Coated Al-Si Cast Alloys on Corrosion Resistance. 21<sup>th</sup> *International Metallurgy and Materials Congress*, 6-8 Ekim, 2022 İstanbul, Türkiye.
- **Savaşkan, B., Mutlu, M., Haspolat, S. & Keleş, O.** 2022. Effect of B and Sr Addition to Trivalent Chromium Process (TCP) Coated Al-Si Cast Alloys on Corrosion Resistance. 10<sup>th</sup> *International Aluminium Symposium*, 3-4 Mart, 2022 İstanbul, Türkiye.