T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

OTOMOTİV SANAYİSİNDE KULLANILAN Al-Si ALAŞIMLARINDA DÖKÜM KALİTESİNİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Eda ERGÜN SONGÜL

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Şubat, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Eda ERGÜN SONGÜL tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan **"OTOMOTİV SANAYİSİNDE KULLANILAN Al-Si ALAŞIMLARINDA DÖKÜM KALİTESİNİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **23/02/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlven MUTLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mehmet BİLGİN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Ahmet TURAN Yeditepe Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Melek CUMBUL ALTAY İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Abim Eray’a ve oğlum Ali Kerem’e ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

OTOMOTİV SANAYİSİNDE KULLANILAN Al-Si ALAŞIMLARINDA DÖKÜM KALİTESİNİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Bu tez çalışması, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Saygıdeğer bölüm başkanım ve tez danışmanım İlven MUTLU'ya gösterdiği katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İTÜ lisans ve yüksek lisans eğitimlerim esnasında akademik dünyadaki onurlu duruşunu örnek aldığım, bilgisi ile her zaman yolumu aydınlatan ve öğrencisine özveri göstermenin ne demek olduğunu öğrendiğim saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. İsmail DUMAN'a saygılarımı sunarım.

Yaşamımın her alanında verdikleri destek ile her zaman minnettar olacağım babam Kemal ERGÜN'e ve annem Nazile ERGÜN'e teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Çocukluğumdan itibaren gelişimimde büyük katkı sağlayan, bu günlere gelişimi görmeye ömrü vefa etmese de sevgisini her zaman kalbimde hissettiğim ağabeyim Eray ERGÜN'e sevgilerimi sunarım.

Geniş bir aile olmanın ne kadar güzel bir duygu olduğunu her zaman verdikleri maddi ve manevi destek ile hissettiren abim Koray ERGÜN'e ve ablam Ebru ERGÜN BAŞARAN'a sonsuz sevgilerimi sunarım.

Akademik kariyerimde yaşadığım zorluklarda verdiği destekle yanımda olan, sevincimi ve üzüntümü paylaştığım, sevgisini her zaman hissettiren eşim Mehmet Cihan SONGÜL'e sonsuz sevgilerimi sunarım.

Yaşamımın önemli bir dönemecinde tanıdığım, sergilediği manevi desteğe hayran olduğum ve daima ailemin bir parçasını olmasını istediğim manevi annem Sibel GÖRELİ'ye sevgilerimi sunarım.

Elde ettiğim başarı bursu ile bana doktora eğitimim boyunca ekonomik destek sağlayan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkür ve şükranlarımı iletirim.

Şubat 2024 **Eda ERGÜN SONGÜL**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xvi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xviii**
ÖZET ..... **xix**
ABSTRACT ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. ALÜMİNYUM 4
2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI 10
2.3. ALÜMİNYUM-SİLİSYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI 14
2.3.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi 19
2.4. A360 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI 24
2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME 28
2.5.1. Titanyum İlavesi İle Tane İnceltme 32
2.5.2. Bor İlavesi İle Tane İnceltme 33
2.5.3. Stronsiyum İlavesi İle Tane İnceltme 34
2.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON ŞEKİLLERİ 35
2.6.1. Üniform Korozyon (Homojen Dağılımlı – Eşit Dağılımlı) 37
2.6.2. Oyuklanma (Çukurcuk) Korozyonu 38
2.6.3. Çatlak (Aralık) Korozyonu 40
2.6.4. Taneler Arası Korozyon 41
2.6.5. Pul Pul Dökülme Korozyonu 42
2.6.6. Galvanik Korozyon 43

2.7. KOROZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 44
2.7.1. Tafel Ekstrapolasyon 48
2.7.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi 55
3. YÖNTEM 65
3.1. HAMMADDE 65
3.2. DÖKÜM İŞLEMİ 65
3.3. NUMUNE HAZIRLAMA 69
3.4. UYGULANAN TESTLER 71
3.4.1. Sertlik Testi 71
3.4.2. Çekme Testi 72
3.4.3. Darbe Testi 73
3.4.4. Korozyon Testleri 75
4. BULGULAR 77
4.1. A360 ALAŞIMI 77
4.2. STRONSİYUM İLAVESİ 87
4.3. BOR İLAVESİ 97
4.4. VANADYUM İLAVESİ 126
5. TARTIŞMA 151
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 153
KAYNAKLAR 158
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 168
ETİK KURUL İZİN YAZISI 169
KURUM İZNİ YAZILARI 170
ÖZGEÇMİŞ 171

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Al-Si denge diyagramı [64]. 15

Şekil 2.2 : Ticari alüminyum-silisyum döküm alaşımları a) hipoötektik alaşım mikroyapısı (ağırlıkça %1,65-12,6 Si) 150x büyütme, b) ötektik alaşım mikroyapısı (%12,6 Si) 400x büyütme, c) hiperötektik alaşım mikroyapısı (ağırlıkça >%12,6 Si) 150x büyütme [65]. 16

Şekil 2.3: Alaşımdaki Si içeriğinin bir fonksiyonu olarak Al-Si alaşımının mekanik özellikleri [45]. 17

Şekil 2.4: r yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenme ile bağlantılı serbest enerji değişimi [71]. 29

Şekil 2.5: Düz bir kalıp duvarında küresel başlığın heterojen çekirdeklenmesi [71]. 30

Şekil 2.6 : Alüminyumun pourbaix diyagramı [76]. 36

Şekil 2.7: Akımın anodik ve katodik bileşenlerini gösteren korozyon süreci [80]. 46

Şekil 2. 8: Karma Potansiyel Sistemde Potansiyel ve Akım Arasındaki Butler-Volmer İlişkisinin Grafiksel Gösterimi [81]. 50

Şekil 2.9: Klasik tafel analizi [80]. 51

Şekil 2.10: EIS deneyleri için potansiyostat uçları [83]. 56

Şekil 2.11: Doğrusal sistemde sinüzoidal akım tepkisi [82] 58

Şekil 2.12: Lissajous şeklinin kökeni [82]. 60

Şekil 2.13: Empedans vektörlü Nyquist grafiği [82] 61

Şekil 2.14: Bir zaman sabitine sahip basit eşdeğer devre [82] 61

Şekil 2.15: Bir zaman sabitine sahip Bode grafiği [82]. 62

Şekil 2.16: Seri bağlı empedanslar [82] 63

Şekil 2.17: Paralel bağlı empedanslar [82] 64

Şekil 3.1: Daihan Wisetherm ergitme fırını 66

Şekil 3.2: Mars-Isomelt modeli (A3 kodlu) SiC pota 66

Şekil 3.3: Optimum S131 GH marka şerit testere makinası 69
Şekil 3.4: Daimo 100E hassas kesme cihazı 70
Şekil 3.5: Metaserv 2000 zımpara ve parlatma cihazı 71
Şekil 3.6: Olympus gx41 mikroskop 71
Şekil 3.7: Zwick / Roell markalı ZHU 187,5 LKV model sertlik cihazı 72
Şekil 3.8: Çentik açılmış Charpy testi numunesi 74
Şekil 3.9: Korozyon testlerinde kullanılan deney düzeneği 76
Şekil 3.10: Maskelenmiş numunenin test hücresindeki görünümü 76
Şekil 4.1: Kokil kalıba döküm (a) Numune 1 (50x büyütme), (b) Numune 1 (100x) 77
Şekil 4.2: Kum kalıba döküm Numune 8 (50x büyütme) 78
Şekil 4.3: Numune 1 ve Numune 8'in Brinell sertlik değerlerleri 78
Şekil 4.4: Numune 1 ve Numune 8'in akma dayanım değerleri. 79
Şekil 4.5: Numune 1 ve Numune 8'in çekme dayanım değerleri 79
Şekil 4.6: Numune 1 ve Numune 8'in % uzama değerleri. 80
Şekil 4.7: Numune 1 ve Numune 8'in darbe enerjisi değerleri. 80
Şekil 4.8: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 83
Şekil 4.9: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımın açık devre potansiyeli (OCP) 83
Şekil 4.10: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 84
Şekil 4.11: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 84
Şekil 4.12: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının Nyquist diyagramı 85
Şekil 4.13: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımının Nyquist diyagramı 85
Şekil 4.14: Basitleştirilmiş REAP elektrik devre modeli 86
Şekil 4.15: Kokil kalıba döküm (a) Numune 2 (50x büyütme), (b) Numune 2 (100x büyütme) 89
Şekil 4.16: Kum kalıba döküm Numune 9 (100x büyütme) 89
Şekil 4.17: Numune 2 ve Numune 9'un Brinell sertlik değerlerleri 90

Şekil 4.18: Numune 2 ve Numune 9'un akma dayanım değerleri.....91

Şekil 4.19: Numune 2 ve Numune 9'un çekme dayanım değerleri.....91

Şekil 4.20: Numune 2 ve Numune 9'un % uzama değerleri. 91

Şekil 4.21: Numune 2 ve Numune 9'un darbe enerjisi değerleri. 92

Şekil 4.22: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının açık devre potansiyeli 93

Şekil 4.23: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)93

Şekil 4.24: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi.....94

Şekil 4.25: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 94

Şekil 4.26: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının Nyquist diyagramı.....95

Şekil 4.27: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının Nyquist diyagramı.....95

Şekil 4.28: Kokil kalıba döküm (a) Numune 3, (b) Numune 4, (c) Numune 5, (d) Numune 6, (e) Numune 7 98

Şekil 4.29: Kum kalıba döküm (a) Numune 10, (b) Numune 11, (c) Numune 12, (d) Numune 13, (e) Numune 14 99

Şekil 4.30: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin Brinell sertlik değerleri 100

Şekil 4.31: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün Brinell sertlik değerleri 100

Şekil 4.32: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin akma dayanım değerleri 101

Şekil 4.33: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün akma dayanım değerleri 101

Şekil 4.34: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin çekme dayanım değerleri 102

Şekil 4.35: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün çekme dayanım değerleri 103

Şekil 4.36: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin %uzama değerleri 103

Şekil 4.37: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün %uzama değerleri 104

Şekil 4.38: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin darbe enerji değerleri 105

Şekil 4.39: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün darbe enerji değerleri 105

Şekil 4.40: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 107

Şekil 4.41: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 107

Şekil 4.42: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 108

Şekil 4.43: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 108

Şekil 4.44: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 109

Şekil 4.45: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 109

Şekil 4.46: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 110

Şekil 4.47: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 110

Şekil 4.48: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 111

Şekil 4.49: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 111

Şekil 4.50: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının Nyquist diyagramı 114

Şekil 4.51: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının Nyquist diyagramı 114

Şekil 4.52: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının Nyquist diyagramı 115

Şekil 4.53: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının Nyquist diyagramı 115

Şekil 4.54: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının Nyquist diyagramı 116

Şekil 4.55: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 119

Şekil 4.56: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 119

Şekil 4.57: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 120

Şekil 4.58: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 120

Şekil 4.59: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 121

Şekil 4.60: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 121

Şekil 4.61: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 122

Şekil 4.62: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 122

Şekil 4.63: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 123

Şekil 4.64: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 123

Şekil 4.65: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının Nyquist diyagramı 124

Şekil 4.66: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının Nyquist diyagramı 124

Şekil 4.67: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının Nyquist diyagramı 125

Şekil 4.68: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının Nyquist diyagramı 125

Şekil 4.69: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının Nyquist diyagramı 126

Şekil 4.70: Kokil kalıba döküm (a) Numune 15, (b) Numune 16, (c) Numune 17, (d) Numune 18. 127

Şekil 4.71: Kum kalıba döküm (a) Numune 19, (b) Numune 20, (c) Numune 21, (d) Numune 22. 128

Şekil 4.72: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in ait Brinell sertlik değerleri 129

Şekil 4.73: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin Brinell sertlik değerleri 129

Şekil 4.74: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in akma dayanım değerleri 130

Şekil 4.75: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin akma dayanım değerleri 130

Şekil 4.76: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in çekme dayanım değerleri 131

Şekil 4.77: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin çekme dayanım değerleri 132

Şekil 4.78: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in %uzama değerleri 132

Şekil 4.79: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin %uzama değerleri 132

Şekil 4.80: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in darbe enerjisi değerleri 134

Şekil 4.81: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin darbe enerjisi değerleri 134

Şekil 4.82: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 137

Şekil 4.83: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 137

Şekil 4.84: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 138

Şekil 4.85: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 138

Şekil 4.86: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 139

Şekil 4.87: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 139

Şekil 4.88: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 140

Şekil 4.89: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 140

Şekil 4.90: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının Nyquist diyagramı 141

Şekil 4.91: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının Nyquist diyagramı 141

Şekil 4.92: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının Nyquist diyagramı 142

Şekil 4.93: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının Nyquist diyagramı 142

Şekil 4.94: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 145

Şekil 4.95: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 145

Şekil 4.96: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 146

Şekil 4.97: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP) 146

Şekil 4.98: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 147

Şekil 4.99: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 147

Şekil 4.100: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 148

Şekil 4.101: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi 148

Şekil 4.102: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının Nyquist diyagramı 149

Şekil 4.103: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının Nyquist diyagramı 149

Şekil 4.104: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının Nyquist diyagramı 150

Şekil 4.105: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının Nyquist diyagramı 150

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Alüminyumun tipik özellikleri [45]. 7

Tablo 2.2 : A360 alüminyum döküm alaşımının mekanik özellikleri [45]. 24

Tablo 2.3: A360 alüminyum döküm alaşımının fiziksel özellikleri [45]. 25

Tablo 2.4: A360 alüminyum döküm alaşımının bileşimi 27

Tablo 3.1: Çalışmalarda kullanılan A360'ın kimyasal bileşimi (% ağırlık). 65

Tablo 3.2: Kokil kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre modifiyesiz A360 alaşımı, Sr ve B ilaveli alaşımların numune kodları 67

Tablo 3.3: Kum kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre modifiyesiz A360 alaşımı, Sr ve B ilaveli alaşımların numune kodları 67

Tablo 3.4: Kokil kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre Sr ve V ilaveli alaşımların numune kodları 68

Tablo 3.5: Kum kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre Sr ve V ilaveli alaşımların numune kodları 69

Tablo 4.1: Numune 1 ve Numune 8'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 81

Tablo 4.2: Numune 1 ve Numune 8'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 87

Tablo 4.3: Numune 2 ve Numune 9'a ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 96

Tablo 4.4: Numune 2 ve Numune 9'a ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 97

Tablo 4.5: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 112

Tablo 4.6: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 112

Tablo 4.7: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 116

Tablo 4.8: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 117

Tablo 4.9: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 135

Tablo 4.10: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 135

Tablo 4.11: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler. 143

Tablo 4.12: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler. 144

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
Al	: Alüminyum
Sr	: Stronsiyum
α-Al	: alfa-Alüminyum
V	: Vanadyum
B	: Bor
Ti	: Titanyum

ÖZET

DOKTORA TEZİ

OTOMOTİV SANAYİSİNDE KULLANILAN Al-Si ALAŞIMLARINDA DÖKÜM KALİTESİNİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Eda ERGÜN SONGÜL

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. İlven MUTLU

Alüminyum döküm alaşımlarının kullanımı, esas olarak düşük yoğunlukları, iyi dökülebilirlikleri, yüksek özgül dayanımları ve korozyona karşı dayanımları nedeniyle son yıllarda artmaktadır. Bununla birlikte, döküm özelliklerini iyileştirmek ve mümkün olan en düşük kusur içeriğine sahip parçalar elde etmek için, dökümhanelerin daha yüksek bir alaşım elementi içeriğine ihtiyacı vardır; böylece alüminyum dökümlerin korozyon direncinin daha da iyi hale getirilmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak, bu iyileştirmelerin başarılı şekilde ortaya konması için alüminyum dökümlerin korozyon direncinin ve korunmasının daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Daha hafif, azaltılmış kalınlık ve daha yüksek mukavemet talebi, otomotiv endüstrisinde odak noktası haline gelmiştir. Bu gereksinimleri karşılamak için çözelti güçlendirmenin etkisinden yararlanarak alaşım elementlerinin eklenmesi araştırılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada otomotiv sanayisinde yaygın kullanım alanına sahip olan A360 alaşımının mekanik ve korozyon özellikleri üzerine stronsiyum, bor ve vanadyum ilavelerinin etkileri incelenmiştir. A360 döküm alaşımlarının mekanik özellikleri ve korozyon direnci ile ilişkisi vurgulanmıştır.

Şubat 2024 , 171 sayfa.

Anahtar kelimeler: A360, korozyon, stronsiyum, vanadyum, bor

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

THE EFFECT OF CASTING QUALITY ON CORROSION PROPERTIES OF Al-Si ALLOYS USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Eda ERGÜN SONGÜL

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Programme of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU

The use of aluminium casting alloys has been increasing in recent years mainly due to their low density, good castability, high specific strength and corrosion resistance. However, to improve casting properties and obtain parts with the lowest possible defect content, foundries need a higher alloying element content, thus further improving the corrosion resistance of aluminium castings. Consequently, a better understanding of the corrosion resistance and protection of aluminium castings is required for these improvements to be successfully demonstrated. The demand for lighter weight reduced thickness and higher strength has become a focus in the automotive industry. In order to meet these requirements, the addition of alloying elements has begun to be investigated by taking advantage of the effect of solution strengthening. In this study, the effects of strontium, boron and vanadium additions on the mechanical and corrosion properties of A360 alloy, which is widely used in the automotive industry, were investigated. The mechanical properties and corrosion resistance of A360 casting alloys are emphasized.

February 2024, 171 pages.

Keywords: A360, corrosion, strontium, vanadium, boron]

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, geniş bir uygulama yelpazesinde en çok yönlü mühendislik malzemeleri olarak kabul edilir. Alüminyum, hayatımızın pek çok alanında önemli bir bileşendir. Eşsiz özellik kombinasyonu onu neredeyse sonsuz sayıda uygulama için ideal ve modern yaşamın önemli bir parçası haline getirmektedir.

Saf alüminyum, büyük yapılar için ağır hizmet malzemesi olarak kullanılamayacak kadar yumuşak olmasına rağmen, çok çeşitli ortamlarda neredeyse anında metal yüzey üzerinde yüksek düzeyde koruyucu bir bariyer oksit filmi oluşumu sebebiyle mükemmel korozyon direncine sahiptir. Hafiflikleri, sağlamlıkları, sertliklerinin yanı sıra korozyon direnci, elektrik iletkenliği, yüksek süneklik ve toksik olmayan özellikleri nedeniyle, bu alaşımların özel mühendislik amaçları için uygulanmasına olan ilgi, geniş bir endüstri yelpazesinde hızla artmaktadır [1-15].

Hafiflik, güç ve işlenebilirliğin bir arada olduğu alüminyum, seri üretimin yapıldığı otomotiv sanayisi, uçak sanayisi ve savunma sanayisi için ideal malzemedir. Son yıllarda küresel ısınma gibi çevre sorunlarının ön plana çıkması sebebiyle toplam gövde ağırlığını azaltmak, böylece yakıt ekonomisini ve çalışma performansını iyileştirmek için otomotiv sanayisinde alüminyum alaşımlarının kullanımı artış göstermektedir [16]. Bir ton daha ağır malzemenin yerine kullanılan her bir ton alüminyum, aracın kullanım ömrü boyunca 20 ton karbondioksit tasarrufu sağlayacaktır [17].

Alüminyum döküm alaşımlarının kullanımı, esas olarak düşük yoğunlukları, iyi dökülebilirlikleri, yüksek özgül dayanımları ve korozyona karşı dayanımları nedeniyle son yıllarda artmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları ile alüminyum dövme alaşımları karşılaştırıldığında, alüminyum döküm alaşımlarının daha kısa işleme döngüleri ve montaj maliyetleri nedeniyle bileşenlerin seri üretimi gibi net ekonomik avantajlara sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, döküm özelliklerini iyileştirmek ve mümkün olan en düşük kusur içeriğine sahip parçalar elde etmek için, dökümhanelerin daha yüksek bir alaşım elementi içeriğine ihtiyacı vardır; böylece alüminyum dökümlerin korozyon direncinin daha da iyi hale getirilmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak, bu iyileştirmelerin başarılı şekilde ortaya

konması için alüminyum dökümlerin korozyon direncinin ve korunmasının daha iyi anlaşılması gerekmektedir [18].

Daha hafif, azaltılmış kalınlık ve daha yüksek mukavemet talebi, otomotiv endüstrisinde odak noktası haline gelmiştir. Bu gereksinimleri karşılamak için çözelti güçlendirmenin etkisinden yararlanarak alaşım elementlerinin eklenmesi araştırılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada otomotiv sanayisinde yaygın kullanım alanına sahip olan A360 alaşımının mekanik ve korozyon özellikleri üzerine stronsiyum, bor ve vanadyum ilavelerinin etkileri incelenmiştir. A360 döküm alaşımlarının mekanik özellikleri ve korozyon direnci ile ilişkisi vurgulanmıştır.

Son yıllarda alüminyum döküm alaşımları tane inceltme uygulamalarında stronsiyum, titanyum, bor ve vanadyum kullanılmıştır [19-21]. Alüminyumun tane boyutu hem mekanik özellikler hem de üretim açısından büyük önem taşımaktadır. Akma dayanımı, süneklik, sertlik ve iletkenlik gibi özelliklerin tümü daha küçük bir tane boyutundan yararlanır[19]. Tane inceltme, iki temel olgu olan çekirdeklenme ve büyüme kontrolüne dayanır. Alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılan ilavelerin ardından yapılan mikroyapı incelemelerinde dendrit ve kaba yapının daha ince taneli bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir [21]. Mikroyapıda meydana gelen bu boyut değişimi neticesinde alüminyum alaşımının mekanik özelliklerinin, sızdırmazlık dirençlerinin ve döküm kalitesinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır [22-25].

Genel olarak alüminyum döküm alaşımları otomotiv sanayisinde gittikçe artan kullanım alanlarına ulaşırken, A360 alaşımı ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, A360 alaşımına artan ilgi ile birlikte döküm kalitesinin artması, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, kullanım ömrünün uzun olması ve korozyon dayanımının arttırılması hedeflenmiştir.

A360 döküm alaşımı mikroyapı incelemelerinde düzensiz α-Al dendritleri ve iğnemsi silisyum yapıları olduğu görülmüştür. A360 döküm alaşımına stronsiyum ilavesi ile ötektik silisyumun çok ince lifli morfolojiye dönüştüğü ve dendritlerin daha küresel görünümde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada artan V ilavesiyle tane boyutunun %20 azaldığını bildirmiştir [26]. Son on yılda yapılan çalışmalara göre, vanadyum ilavesi tane inceltici özelliğinin yanı sıra özellikle alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta gerilme özellikleri üzerindeki olumlu etkisi açısından kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [26-33].

Bor ilavesinin α-Al için oldukça verimli bir çekirdekleştirici yüzey olduğu anlaşılmıştır [34]. Al-B ana alaşımlarının, alüminyum döküm alaşımları için Al-5Ti-1B rafine ediciden daha iyi tane inceltme verimliliğine sahip olduğu rapor edilmiştir [35-39]. Al-Si döküm alaşımlarına B ilaveleri ile çok etkili bir şekilde tane inceltmenin gerçekleştiği yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur [40,41].

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. ALÜMİNYUM

Alüminyum, yer kabuğunun kütlesinin yaklaşık %8'ini oluşturan üçüncü en bol elementtir ve bu nedenle en bol bulunan yapısal metaldir. Bununla birlikte, doğada yalnızca diğer malzemelerle (özellikle silikatlar ve oksitler olarak) çok kararlı kombinasyonlarda bulunur ve varlığını ilk olarak alüminyum olarak adlandıran Sir Humphrey Davy tarafından 1808 yılına kadar kanıtlanmamıştır. Alüminyumu cevherinden çözmek için uzun yıllar süren özenli araştırmalar yapılırken, ticari bir üretim süreci ortaya koymak için daha da uzun yıllar gerekti. 1821'de Bertheir, Fransa'nın güneyindeki küçük bir köyün dışında, ya üç su içeren gibsit ($Al(OH)_3$) olarak ya da tek su moleküllü böhmit (γ-AlO(OH)) ve diaspor (α-AlO(OH)) olarak, %40-60 alümina içeren kil benzeri bir malzeme keşfetti. Bu cevhere boksit adını verdi. Boksit terimi, alüminyumlu kayalardan oluşan, sulu oksitler açısından zengin bir cevher veya mineral karışımı anlamına gelir. Dört yıl sonra 1825'te Danimarkalı bilim adamı Oersted, susuz alüminyum klorürü potasyum amalgam ile indirgeyerek saf alüminyumun ilk örneklerini üretti [42]. 1827 ile 1845 yılları arasında Wöhler, amalgamın yerine potasyum koyarak ve son alüminyum ürününün su giderme aşaması için daha iyi bir yöntem bularak bu süreci geliştirdi. Wöhler ayrıca alüminyumun yoğunluğunu saptayarak metalin hafiflik ve işlenebilirlik özelliklerini gösterdi [43].

Ticari miktarlarda alüminyum üretebilen ilk süreç 1854'te Henri Sainte-Claire Deville tarafından geliştirildi. Henri Sainte-Claire Deville, alüminyum klorür yerine sodyum alüminyum klorür kullanarak pahalı potasyumu çok daha uygun fiyatlı sodyumla değiştirerek Wöhler yöntemini geliştirdi. Dinamonun icadı daha ucuz bir elektrik kaynağı sağladı ve kısa bir süre sonra 1885'te Cowle kardeşler demir ve bakır içeren ilk alüminyum alaşımlarını ürettiler [44]. Elektrik enerjisi üretmek için sanayi ölçekli dinamoların geliştirilmesinin ardından [43], 1886'da birbirinden bağımsız olarak çalışan iki bilim adamı, Hall ve Héroult, bugün kullanılan tek yöntem haline gelecek olan alüminyum oksidin doğrudan elektrolitik ayrışması için yeni bir süreç geliştirdiler ve patentini aldılar [45]. Hall-Héroult işlemi, Hall-Héroult işleminde kullanılan boksitten alüminyum oksit üreten Bayer işleminin geliştirilmesiyle geliştirildi [46]. Hall-Héroult işlemi geliştirildiğinde, alüminyum endüstrisi

doğdu ve alüminyumu cevherinden çıkarma işlemi uzun yıllara dayanabildi ve onu yeniden yazma veya ekleme girişimleri bugün tüm ticari alüminyum üretiminin temeli olmaya devam ediyor.

Alüminyumun günlük yaşamda oynadığı rol o kadar fazladır ki, metalin 1900'lerin başlarında hala nispeten nadir olduğunu fark etmek zordur. Şu anda yalnızca Batı Dünyasında yaklaşık 19 milyon ton birincil alüminyum kullanılmaktadır. Geniş bir alaşım yelpazesinin geliştirilmesi yoluyla, çok çeşitli mukavemet ve süneklik elde edilebilir ve bu, günümüzde birçok mevcut uygulamaya öncülük etmiştir [44]. Bunlar, ambalaj endüstrisinde çok ince folyo malzeme kullanımından, içecek kapları için sünek malzemeler ve elektriksel amaçlar için yüksek iletken alaşımlardan, inşaat endüstrisi için nispeten düşük mukavemetli alaşımlara ve otomotiv, uçak ve zırhlı araçlar için yüksek mukavemetli malzemelere kadar uzanır [44]. Alüminyum yüzde 100 geri dönüştürülebilir ve kalitesinde minimum düşüş vardır [45]. Birincil üretime ek olarak, geri dönüştürülebilir hurdalardan 7 milyon tondan fazla alüminyum üretilmektedir. Alüminyumun yeniden eritilmesi, başlangıçta birincil metali üretmek için gereken enerjinin yalnızca yaklaşık yüzde 5'ini gerektirir [45]. Bu nedenle, hurdadan (ikincil alüminyum) üretilen alüminyum oranı hızla artmaktadır. Yüksek hurda değerine ek olarak, alüminyum ve alaşımlarının yaygın kullanımına katkıda bulunan diğer özellikler, alüminyumu çok yönlü bir malzeme yapan korozyon ürününün toksik olmayan ve renksiz doğasıdır.

2.1.2 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum alaşımlarının özellikleri, katılaşma, ısıl işlem ve işlenmiş alaşımlar için deformasyon işlemi sırasında geliştirilen kimyasal bileşim ve mikroyapısal özelliklerin karmaşık etkileşimine bağlıdır [47]. Alüminyum, onu çok yönlü, oldukça kullanışlı ve çekici bir yapı malzemesi yapan benzersiz ve rakipsiz bir özellik kombinasyonuna sahiptir. Alüminyumun özellikleri büyük ölçüde metalin saflığına bağlıdır. Bu, ticari saflıkta sıradan alüminyumdan süper saflıkta alüminyuma kadar değişebilir. Alüminyum uygulamasının dayandığı üç ana özellik, yaklaşık 2.7 g/cm^3 gibi düşük yoğunluğu, uygun alaşımlama ve ısıl işlemlerle elde edilen yüksek mekanik mukavemeti ve saf metalin nispeten yüksek korozyon direncidir [44]. Bununla birlikte, alüminyumu en çok kullanılan metallerden biri yapan başka özellikler de vardır. Bu özellikler, fiziksel özellikler ve kimyasal özellikler olmak üzere iki geniş kategoriye ayrılabilir.

Alüminyum (Al), atom numarası 13 ve atom ağırlığı 26.9815 g/mol olan gümüşi beyaz bir metaldir. Erime noktasına kadar tüm sıcaklık aralığında yüz merkezli kübik kristal yapıya (Şekil 2.1) sahiptir. Alüminyumun yapısındaki iki atom arasındaki en yakın mesafe, oda sıcaklığında 2.863Å'dir ve alüminyum 200 mJ/m^2'lik bir istifleme hatası enerjisine sahiptir [47]. Alaşımlama ile muazzam bir mukavemete ulaşabilen hafif bir metaldir. Alüminyum ısıyı ve elektriği iletir, ışığı ve ışıma enerjisini yansıtır ve korozyona karşı dayanıklıdır. Ayrıca manyetik değildir, toksik değildir ve bilinen tüm metal işleme süreçleriyle oluşturulabilir. Alüminyumun özelliklerini uyarlamak için alaşımlama, soğuk işlem ve ısıl işlem yapılabilir. Saf alüminyumun çekme dayanımı 90 MPa civarındadır ancak bu, bazı ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar için 700 MPa'nın üzerine çıkarılabilir. Doğru alaşımın ve tasarımın ekstrüzyonları, yapısal çelik kadar güçlüdür. Şu anda, 7000 serisinin alaşımları 700 ila 800 MPa mertebesindeki mukavemet seviyelerine ulaşmak için yaşlandırılabilir [48].

Alüminyum için Young modülü çeliğin üçte biri kadar, E = 70 GPa'dır. Bu nedenle alüminyum, statik ve dinamik yükleme koşulları altında şeklini ve boyutunu geri kazanma yeteneği ile elastik davranır. Termal ve elektriksel iletkenlikleri bakıra göre çok iyidir. İşlenmesi kolay olan alüminyum, mühendislere ve mimarlara optimum tasarım esnekliği sunar. Folyo, levhalar, geometrik şekiller, çubuklar ve teller dahil olmak üzere çok çeşitli biçimlerde üretilebilir ve karmaşık içi boş ekstrüzyonlar için popüler bir seçimdir. Yüksek işlenebilirlik ve plastisite aynı zamanda onu kesme, delme, zımbalama, çekiçleme ve bükme için ideal hale getirir. Bazı önemli fiziksel özelliklerin bir özeti Tablo 2.1'de gösterilmektedir; ancak bu özellikler alüminyumun saflığından etkilenir [45].

Kimyasal özellikleri ile ilgili olarak alüminyum, 13 proton ve 14 nötron ile periyodik tablonun üçüncü grubuna girerek 27 kütle numarasına sahiptir. Alüminyum $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^1$ elektron yörünge konfigürasyonuna sahiptir. Dış yörüngedeki üç elektron alüminyum atomuna +3 değerini verir. Bu nedenle, alüminyum genellikle bileşiklerde Al^{+3} olarak bulunur. Üç değerlikli oluşumu büyük miktarda enerji içerir ve genellikle sp^2 melezlemesi yoluyla kovalent bağlar oluşturur [45].

Tablo 2.1 : Alüminyumun tipik özellikleri [45].

Özellik	Değer
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı (g/mol)	26.9815
Değerlik	3
Kristal Kafes	Yüz merkezli kübik
Yoğunluk (g/cm^3)	2,6898
Erime Noktası (°C)	660.2
Kaynama Noktası (°C)	2480
Ortalama Özgül Isı (0-100°C) (cal/g.°C)	0,219
Termal İletkenlik (0-100°C) (cal/cms. °C)	0,57
Doğrusal Genleşme Katsayısı (0-100°C) (x10^{-6}/°C)	23,5
Elektrik Özdirenci (20°C'de) (μΩcm)	2,69
Elastik modül (GPa)	70
Poisson Oranı	0.34

Alüminyum, oda sıcaklığında suya maruz kaldığında kolaylıkla bir oksit/hidroksit filmi oluşturabilen reaktif bir metaldir [49]. Nötr pH'ta oluşan film çözünmez ve alüminyum alt katmanının tepkimeye girmesini sınırlayan yeterli bir kalınlığa kadar büyür. Ancak oluşan filmin kararlılığı çözeltinin pH'ına bağlıdır. Alüminyumun, nötüre yakın pH koşullarında, korozyonu sınırlayan pasifleştirici bir bariyer filmi oluşturması beklenir; ancak pH, nötüre yakın koşullardan uzaklaştıkça korozyon hızı artar. Pasifleştirici filmin büyümesi, elektrokimyasal reaksiyonlarla sağlanır. Korozyondaki artışın arkasındaki sebep hidroksit oluşumudur [49]:

$$Al + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ + 3e^- \quad (2.1)$$

nötr pH'ta pasif filmde bir çatlak oluştuğunda, pasif filmdeki bir çatlağın yerini reaksiyona göre metal çözünmesi aldığında:

$$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^- \quad (2.2)$$

düşük pH'ta veya filmin oluşumu ve çözünmesinde:

$$Al + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3 + 3e^- \quad (2.3)$$

$$Al(OH)_3 + OH^- \rightarrow Al(OH)_4^- \quad (2.4)$$

Alüminyum, tepkinirlik serisinde yüksek olmasına rağmen, havada yüzeyinde oluşan ince alüminyum oksit tabakası (Al_2O_3) nedeniyle korozyona karşı dayanıklıdır. Oksit tabakası, alttaki metali korur ve onu herhangi bir başka reaksiyona karşı etkisiz hale getirir. Ancak alüminyum, güçlü oksitleyici özelliklere sahip asitler dışında birçok mineral asitte korozyona dayanıklı değildir [54]. Bu tür asitlerin etkisi konsantrasyonlarına bağlıdır. Alüminyum çoğu seyreltik asit tarafından yavaşça saldırıya uğrar ve konsantre hidroklorik asitte hızla çözünerek hidrojen üretir:

$$2Al(s) + 6HCl(s) \rightarrow AlCl_3(s) + 3H_2(g) \quad (2.5)$$

Alüminyum seyreltik nitrik içinde kolayca çözünürken, metali daha fazla oksidasyondan koruyan alüminyum oksit tabakası oluşumu nedeniyle konsantre nitrik asitte pasif hale gelir. Tipik pasivasyon konsantrasyonları ağırlıkça %18 ila %22 aralığındadır.

$$Al + HNO_3 \rightarrow \text{Pasivasyon} \quad (2.6)$$

Seyreltik sülfürik asitte (%1'den %20'ye kadar), yüksek saflıkta alüminyum da dahil olmak üzere tüm alüminyum dereceleri, oda sıcaklığında bile korozyona karşı düşük dirence sahiptir [47].

$$2Al + 3H_2SO_4\ [\text{seyreltik}] \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2 \quad (2.7)$$

$$2Al + 6H_2SO_4\ [\text{derişik}] \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O + 3SO_2 \quad (2.8)$$

Alkaliler genellikle alüminyuma karşı reaktiftir. Alüminyum, renksiz alüminatlar vermek üzere güçlü alkali çözeltilerde çözünür. Yüksek saflıkta alüminyum bile sodyum ve potasyum

hidroksit gibi alkaliler tarafından şiddetli bir şekilde saldırıya uğrayarak hidrojen ve alüminat iyonu verir.

$$2Al(s) + 2NaOH(s) + 6H_2O \rightarrow 2Na[Al(OH)_4](s) + 3H_2(g) \quad (2.9)$$

$$2Al + 2KOH + 2H_2O \rightarrow 2KAlO_2 + 3H_2 \quad (2.10)$$

Bir alüminyum tuz çözeltisine az miktarda alkali eklenmesi, alüminyum hidroksiti çökeltir. Daha fazla alkali ilave edildiğinde, hidroksit çözünerek alüminat iyonunu oluşturur.

Alüminyum ayrıca pahalı bir indirgeyici ajandır. Yüksek derecede reaktif metallerin oksitlerini azaltmak için kullanılır. Ancak bu metallerin tepkinirlik serisinde alüminyumun altında olması gerekir.

$$Cr_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Cr \quad (2.11)$$

$$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe \quad (2.12)$$

Alüminyum, derişik hidrojen peroksite karşı çok yüksek bir dirence sahiptir. Asetaldehit, formaldehit ve tetraklorür gliserin dahil olmak üzere birçok organik bileşiğe karşı iyi direnç ile karakterize edilir ve ayrıca petrol ürünlerine karşı iyi bir dirence sahiptir.

Yapısal morfolojiler, alüminyum alaşımlarının korozyon davranışında önemli bir rol oynar. Alüminyum dökümlerin katılaşması [50] sırasında çok çeşitli çalışma koşulları ve çeşitli büyüme biçimleri nedeniyle birkaç farklı yapısal morfoloji gelişebilir. Şekillendirilmiş dökümlerin yapısal bütünlüğünün, katılaşma sırasındaki termal davranışlarıyla yakından ilişkili olduğu iyi bilinmektedir [50-52]. Yapısal morfolojilerin metal/kalıp sisteminin dayattığı çalışma koşullarına bağlı olduğunu gözlemledi. Bir dökümün tane yapısı, katılaşma sırasında birçok şekil alabilir ve genellikle hem makro yapı hem de mikro yapı ile karakterize edilir [50]. Mikro yapı, hücre/dendrit ve ötektik morfolojiler olarak sınıflandırılabilirken, makro yapı genellikle üç ayrı bölgeden oluşur. Bunlar sırasıyla soğuk, sütunlu ve eş eksenli bölgelerdir. Alüminyum alaşımlarının tane yapıları ve mekanik özellikleri arasındaki iyi bilinen korelasyon nedeniyle, her birinin kökeni yoğun deneysel ve teorik araştırma konusu olmuştur [53,54]. Kaba eş eksenli taneler, ince eş eksenli tanelere kıyasla korozyon direncini artırma eğilimindedir. Korozyon direncinde gözlenen düşüşün sırasıyla kaba eş eksenli > kaba sütunlu > ince eş eksenli > ince sütunlu yapılar olduğu bulunmuştur. Bu, plastik deformasyon ve kusurlardan kaynaklanan tane sınırları enerji seviyesine bağlanabilir [45].

Alüminyum alaşımları için tane boyutunun etkisi, tane sınırlarına ayrılan çözünenin rolüne (korozyon performansı açısından) bağlıdır. Tane boyutu, alüminyum alaşımlarının birçok özelliğini etkiler [55]. Özellikle tane boyutu arttıkça, korozyon direnci artarken mukavemet özellikleri azalır [56]. Hall-Petch; akma dayanımının tane çapının karekökünün tersi ile orantılı bir ilişkisi olduğunu gösteren iyi bilinen bir denklemdir [57,58]. Bununla birlikte, döküm alaşımları için, tane boyutunun küçülmesiyle alaşım mukavemetinin arttığı her zaman doğru değildir. Bir dizi çalışma, mikro yapının ve özellikle dendrit aralığının mekanik özellikler üzerindeki etkisine odaklanmıştır [51,59,60]. Bu çalışmalar, döküm alaşımlarının özelliklerini kontrol etmek için, alaşımların katılaşması sırasında birincil ve ikincil dendrit boşluklarının mekanizmasını ve karakterizasyonunu anlamak gerektiğini göstermiştir.

2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum alaşımlar genellikle imalat sürecine göre sınıflandırılır; dökme alaşımlar ve döküm alaşımları olarak iki sınıfa ayrılır. Bu iki sınıf ayrıca kimyasal bileşime ve son olarak tav tanımına göre alaşım ailelerine ayrılabilir. Tav gösterimleri, alaşımın durumunu, yani alaşımın maruz kaldığı soğuk iş miktarını veya ısıl işlem durumunu belirlemek için kullanılır. İkincisi, ısıl işleme tabi tutulabilen ve ısıl işlem uygulanmayan alaşımlara ve mekanik işleme ile üretilen çeşitli biçimlere bölünmüştür. Yaşlandırmayla sertleştirilmiş alaşımlar, genellikle sertleştirilmiş alaşımlardan daha fazla korozyona dirençlidir ve korozyon korumasına daha uygundur [45].

Dövme alaşımlar için, işlenmiş bileşim ailelerinin bir listesini oluşturmak için dört basamaklı bir sistem kullanılır. Bu dört basamaklı sistemde, ilk basamak ana alaşım elementlerini tanımlarken, kalan üç basamak aşağıda gösterildiği gibi belirli alaşım türlerini tanımlamak için seri numaraları olarak kullanılır:

AA1xxx serisi alaşımlar: Kontrollü, alaşımsız %99 saflıkta alüminyum veya daha yüksek. Bu seri, korozyona karşı mükemmel direnç ve yüksek termal ve elektrik iletkenliği, ancak zayıf mekanik özellikler ile karakterize edilir. Dört hanenin son ikisi minimum alüminyum yüzdesini gösterir. Örneğin AA1070, %99,70 alüminyum saflığını gösterir. İkinci basamak safsızlık limitlerindeki veya alaşım elementlerindeki değişiklikleri gösterir. İkinci basamak sıfır olduğunda, bu, doğal safsızlık sınırlarına sahip alaşımsız alüminyumu gösterir. 1-9 tamsayıları, bir veya daha fazla bireysel safsızlığın veya alaşım elementinin özel kontrolünü gösterir.

Yüksek korozyon direncine sahip olması gereken boru hatlarında ve tanklarda ya da yüksek elektrik iletkenliği gereken elektrik iletim uygulamalarında kullanılması tercih edilmektedir [45].

AA2xxx serisi alaşımlar: Bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, ancak diğer elementler, özellikle magnezyum belirtilebilir. Bu seri yüksek mukavemete sahiptir ve ısıl işlem görebilir, ancak düşük korozyon direncine sahiptir ve taneler arası saldırıya maruz kalır ve inhibe edilmesi zordur. Yüksek mukavemetli alaşımların arasında olduğu için havacılık sektöründe ve uzay uygulamalarında tercih edilirler [45].

AA3xxx serisi alaşımlar: Ana alaşım elementinin manganez olduğu alaşımlar. Bu seriler genellikle ısıl işlem görmez. Alaşımlar, nispeten iyi korozyon direnci ve orta derecede mukavemet ile karakterize edilir ve alaşımlar belirli ortamlarda korunabilir. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygundur, günümüzde otomotiv ve enerji sektöründe kullanım alanı bulmaktadırlar.

AA4xxx serisi alaşımlar: Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Alüminyuma eklenen silisyum, elde edilen alaşımların kırılgan hale gelmesine neden olmadan erime noktasını önemli ölçüde düşürür ve eridiğinde akışkanlığını artırır. Sonuç olarak, bu alaşım serisi ağırlıklı olarak dolgu malzemesi olarak kullanılır. AA4xxx serisi alaşımlar hem ısıl işlem uygulanabilen hem de ısıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan AA4xxx serileri arasındaki temel fark, ısıl işlem görmeyen alaşımların, ısıl işlem görmeye izin verebilecek başka hiçbir element eklenmeden ana alaşım elementi olarak silisyumlu alüminyum içermesidir. Isıl işlem uygulanabilen 4xxx serisi alaşımlar, malzemeye ısıl işleme yanıt verme ve gücünü ısıl işlem yoluyla artırma fırsatı sağlayan silisyum ve ayrıca kontrollü magnezyum ve/veya bakır ilaveleri içerir. AA4xxx alaşım serisi iyi bir korozyon direncine sahiptir ve inhibe edilebilir [45].

AA5xxx serisi alaşımlar: Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Bunlar ısıl işlem görmez. Magnezyum, alüminyumda yüksek bir çözünürlüğe sahiptir. Alaşımdaki magnezyum içeriği %3,5'ten fazla olduğunda, fazla magnezyum Mg_5Al_8 olarak çökelir. Krom da yaygın bir katkı maddesidir ve ince bir $Cr_2Mg_3Al_{18}$ dağıntısı olarak görünür. Bu alaşımlar, iyi korozyon direnci ve orta derecede mukavemet ile karakterize edilir. Bununla birlikte, belirli yükleme koşulları altında, gerilmeli korozyon çatlamasına maruz kalırlar. Kolay kaynaklanma

özelliği sayesinde basınçlı kaplarda, gemi inşasında ve inşaat sektöründe yaygın kullanıma sahiptirler [61].

AA6xxx serisi alaşımlar: Magnezyum ve silisyumun ana alaşım elementleri olduğu alaşımlar. Sertleştirme çökeltisi olarak Mg_2Si ile çökeltmeyle sertleştirilirler. Magnezyum ve silisyumun düşük alaşım konsantrasyonu varsa, Mg_2Si'nin tamamı çözelti ısıl işlemi sırasında çözülebilir ve çökeltme sertleştirme reaksiyonunda kullanılabilir. Alaşımlar, ısıl işlem görmüş ve yaşlandırılmış durumda iyi süneklik ile orta derecede güç sunar. Bu alaşımlar iyi korozyon direncine sahiptir ve etkili bir şekilde korunabilir [45].

AA7xxx serisi alaşımlar: Çinkonun ana alaşım elementi olduğu, ancak bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi diğer alaşım elementlerinin belirtilebildiği alaşımlar. Üçüncü alaşım elementi olarak bakır yüzdesine bağlı olarak iki alt aileye ayrılabilirler. Al-Zn-Mg-Cu alaşımları ısıl işlem sonrası en yüksek mukavemetli alaşımlardır ancak korozyona dayanıklı değildirler. Al-Zn-Mg alaşımları korozyona dayanıklıdır. Ötektik erimeye neden olan çözelti ısıl işlem sıcaklığı gibi katı önlemler olmaksızın kolayca ısıl işleme tabi tutulurlar [45].

AA8xxx serisi alaşımlar: Kalay ve bazı lityum bileşimlerini içerebilen çeşitli bileşimleri karakterize eden alaşımlar. Lityum, alüminyumdan önemli ölçüde daha düşük bir yoğunluğa sahiptir ve çözünürlüğü de nispeten yüksek olduğu için, yoğunlukta önemli bir azalma (tipik olarak diğer alüminyum alaşımlarından yaklaşık %10 daha az) sağlamak için yeterli miktarlarda alüminyum ile alaşımlandırılabilir. Bu serinin özellikleri ana alaşım elementine bağlıdır [45].

Döküm alaşım tanımlama sistemi de dört haneye sahiptir ve ilk hane ana alaşım bileşenlerini belirtir. İlk basamak alaşım grubunu gösterirken, ikinci ve üçüncü basamaklar belirli alüminyum alaşımını veya alüminyum 1xx.1 serisi için saflığı belirtir. Bununla birlikte, bunların döküm veya külçe şeklindeki alaşımları tanımlamak için kullanılan gösterimler olduğunu açıklığa kavuşturmak için üçüncü ve dördüncü basamaklar arasında bir ondalık nokta kullanılır. Dördüncü basamak üretim biçimini belirtir: xxx.0 dökümleri ve xxx.1 çoğunlukla, alaşım elementleri için sınırları döküm biçimindeki alaşımla aynı veya çok benzer olan külçeleri belirtir. xxx.2'nin dördüncü basamağı, külçenin bileşim limitlerine sahip olduğunu belirtmek için kullanılır; bu tipik olarak, külçeden üretilen bitmiş döküm ürünlerde belirli özellikleri elde etmek için belirli safsızlıklar üzerinde daha sıkı sınırların kullanımını temsil eder. Döküm bileşimleri için alaşım aileleri aşağıdakileri içerir [45]:

1xx.x: Kontrollü alaşımsız (saf) bileşimler.

2xx.x: Bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Diğer alaşım elementleri belirtilebilir. Bu seri, çok daha düşük bakır içerikleri içeren diğer serilerin alaşımlarına göre korozyona karşı daha az dirençlidir. Bu tip alaşımlar ilk ısıl işlem uygulanabilen, yüksek dayanımlı alüminyum esaslı malzemelerdir ve yapısal uygulamalarda, özellikle uçak ve havacılık uygulamalarında yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyon üzerindeki elektrokimyasal etkiler, bu alaşımlarda iki faktör nedeniyle diğer alüminyum alaşımlarından daha güçlü olabilir; katı çözeltideki bakır miktarındaki değişiklikler ve bazı koşullar altında katı çözelti konsantrasyonunda homojen olmayanların varlığı ile elektrot potansiyelinde önemli değişiklik. Korozyona karşı genel direnç, artan bakır içeriği ile azalır. Bu, öncelikle bu katı çözelti veya ikinci faz çözüm potansiyel ilişkilerine atfedilmez. Korozyon sonucu alaşım yüzeyinde biriken çok küçük bakır parçacıklarının veya filmlerin oluşumuyla oluşturulan galvanik hücrelere atfedilir [45].

3xx.x: Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım katkıları belirtilmiştir. 3xx.x serisi, üretilen tüm şekillendirilmiş dökümlerin yaklaşık %90'ını oluşturur. Silisyum, 3xx.x serisinin döküm alaşımlarında ikinci faz bileşen parçacıkları olarak bulunur. Silisyumun bu alaşımların korozyon direnci üzerindeki etkisi, silisyum parçacıkları oldukça polarize olduğu için minimum düzeyde olsa da, 3xx.x döküm alaşımlarının korozyon direnci, bazı bileşimlerde %5'e kadar çıkabilen bakır içeriğinden güçlü bir şekilde etkilenir. Bazı temel alaşımların modifikasyonları, korozyon direncine ve mekanik özelliklere fayda sağlayan safsızlıklar üzerinde daha kısıtlayıcı sınırlara sahiptir [45]. Bu alaşımlar, yüksek mukavemetleri ve korozyona karşı dirençleri sayesinde otomotiv ve yapı endüstrilerinde geniş kullanım alanına sahiptir.

4xx.x: Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Silisyum, 3xx.x döküm alaşımında olduğu gibi 4xx.x serisinin döküm alaşımlarında da ikinci faz bileşen parçacığı olarak bulunur.

5xx.x: Ana alaşım elementinin magnezyum olduğu alaşımlar. 5xx.x serisinin döküm alaşımları korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Bu alaşımlar çok çeşitli yapı ürünlerinde, kimyasal işleme ve gıda işleme ekipmanlarında, ayrıca deniz suyuna maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır [45]. Magnezyum, katı solüsyonda kalan veya alaşım matrisi boyunca üniform olarak dağılmış Al_8Mg_5 partikülü olarak kısmen çökelen miktarlarda mevcut olduğunda, bu alaşım korozyona ticari olarak saf alüminyum kadar dirençlidir.

6xx.x: Kullanılmayan seriler.

7xx.x: Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar. Bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım elementleri belirtilebilir. 7xx.x döküm alaşımları, çinko içerikleri nedeniyle, AA1xxx işlenmiş alüminyum ve diğer alüminyum alaşımları için anodiktir [45]. Gerilme korozyon çatlağına en duyarlı alüminyum alaşımları arasındadırlar. Alüminyum-çinko-magnezyum-bakır tipi hem işlenmiş hem de döküm alaşımlarında bulunan bakır, genel korozyona karşı direnci azaltır; bununla birlikte, bu alaşım bileşimleri, gerilme korozyon çatlağına direnç açısından faydalıdır çünkü bakır ilaveleri, bu alaşımların daha yüksek sıcaklıklarda çökelmesini mümkün kılar.

8xx.x: Ana alaşım elementinin kalay olduğu alaşımlar.

9xx.x: Diğer elementlerin alaşım elementi olduğu alaşımlar.

2.3. ALÜMİNYUM-SİLİSYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI

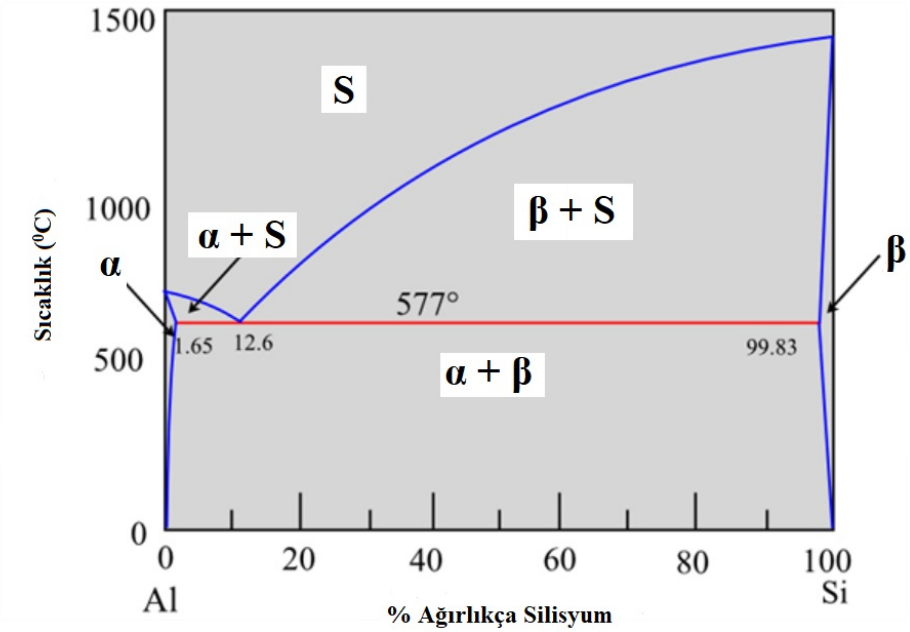
Alüminyum dökümler, 19. yüzyılın sonlarından bu yana alüminyum endüstrisinin büyümesinde ayrılmaz bir rol oynamıştır. Bunlar ulaşım, askeriye, havacılık ve genel mühendislik gibi birçok sektörde en baskın malzemelerden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Alüminyumun ulaşım sektöründe kullanımı 1950 yılında %6 iken 2000 yılında %23'e çıkmıştır. 1995 yılında 85.000 ton olan alüminyum döküm tüketimi 2002 yılında 570.000 tona yükselmiştir [62]. Pazardaki talebe ek olarak, araştırma ve geliştirme çabaları, alüminyum alaşımlarının tüketimindeki artışta önemli bir rol oynamıştır.

Alüminyum-silisyum alaşımlarının kullanımı, son yıllarda alüminyum döküm üretimi içerisinde geniş bir yer aldı. Silisyum hammadde olarak çok ucuzdur ve alüminyum döküm alaşımlarında kullanılan en popüler elementtir. Silisyum, alüminyumdan 4,5 kat daha yüksek olan yüksek bir gizli ısıya sahiptir, bu da iyi dökülebilirlik ve kaynaklanabilirlik sağlar. Silisyum ayrıca, döküm bileşenin toplam ağırlığını azaltmada bir avantaj olan düşük bir yoğunluğa (2,34 g/cm^3) sahiptir. Silisyum, alüminyumda çok düşük bir çözünürlüğe sahiptir; bu nedenle sert olan ve dolayısıyla aşınma direncini artıran neredeyse saf silisyum olarak çökelir. Bakır içermeyen Al-Si alaşımları, iyi korozyon direncine sahip düşük ila orta mukavemetli dökümler için kullanılır; bakır içeren alaşımlar, korozyon direncinin kritik olmadığı orta ila yüksek mukavemetli dökümler için kullanılır. Mükemmel dökülebilirlikleri nedeniyle, zayıf beslenen bölümlerde elde edilen minimum mekanik özelliklerin daha yüksek

mukavemetli ancak daha düşük dökülebilir alaşımlardan yapılan dökümlerden daha yüksek olduğu karmaşık şekillerde bile güvenilir dökümler üretmek mümkündür[63].

Ticari alüminyum döküm alaşımlarında, alüminyum-silisyum alaşımları, özellikle yüksek mukavemet / ağırlık oranı, iyi işlenebilirlik, mükemmel dökülebilirlik, iyi termal iletkenlik, düşük ısıl genleşme ve korozyon direnci gibi çok çekici özelliklerinden dolayı belki de en yaygın olanıdır. Mükemmel dökülebilirliği sayesinde kalıpların hızlı şekilde dolması sağlanmaktadır, böylece döküm hataları arasında olan sıcak yırtılma ya da çatlama gerçekleşmez. Havacılık ve uzay sektörlerinin yanı sıra ortam sıcaklığında ve oldukça yüksek sıcaklıkta (200 ºC'ye kadar) çalışan otomotiv bileşenleri üretmek için düşük maliyetli imalat, hafiflik, mükemmel dökülebilirlik, geri dönüştürülebilirlik ve yüksek özgül mukavemet ile ön plana çıkan alüminyum-silisyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum-silisyum alaşımları, silisyum içeriğine bağlı olarak sınıflandırılan hipoötektik (ötektikaltı), ötektik ve hiperötektik (ötektiküstü) tip olmak üzere üç farklı formda popülerdir. %12-13 silisyum içeren alüminyum-silisyum alaşımları ötektik alaşımlar olarak adlandırılır ve %12'den az silisyum içerenler hipoötektik olarak adlandırılır ve %13'ten fazla silisyum içerenler genellikle hiperötektik Al-Si alaşımları olarak bilinir [64,65].



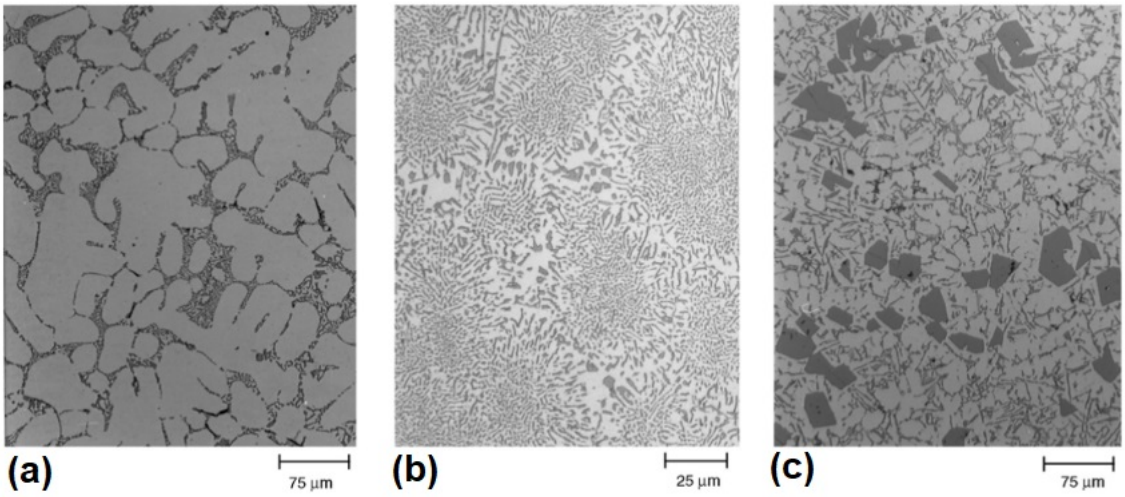
Şekil 2.1: Al-Si denge diyagramı [64].

Alüminyum-silisyum alaşımı; birbiri içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahip, iki katı eriyik faz olan yüzey merkezli kübik yapıdaki alüminyumdan ve elmas kübik (özel yüzey merkezli kübik) yapıdaki silisyumdan oluşan ikili bir ötektik sistemidir [65]. Şekil 2.1'de Al-Si alaşımının güncel olarak kullanılan denge diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.1'deki denge diyagramında gerçekleşen ikili ötektik reaksiyon 2.12 denkleminde verilmiştir.

$$S \rightarrow \alpha + \beta \tag{2.13}$$

Ötektik reaksiyon denkleminde S sembolü sıvı fazı, α sembolü birincil alüminyum katı eriyiği ve β sembolü birincil silisyum katı eriyiği olarak ifade edilmektedir. Alüminyum-silisyum denge diyagramı incelendiğinde ötektik reaksiyonun 577±1 ^{0}C'de ağırlıkça %12,6 silisyum içeriğinde gerçekleştiği görülmektedir.

Al-Si denge diyagramı sıvı metalin katılaşma sürecini gösterir; hipoötektik alaşımlarda önce α-alüminyum katılaşır, hiperötektik alaşımlarda ise önce birincil silisyum parçacıkları katılaşmaktadır. Her iki tür alaşımda da alüminyum-silisyum ötektiğini en son katılaşan kısımdır. Al-Si alaşımlarında silisyum oranının birincil fazı belirlediği denge diyagramından anlaşılmaktadır [64,65].

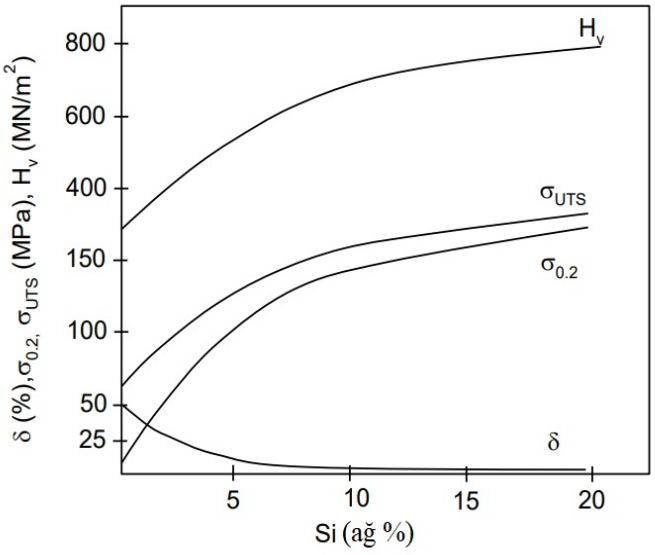


Şekil 2.2 : Ticari alüminyum-silisyum döküm alaşımları a) hipoötektik alaşım mikroyapısı (%1,65-12,6 Si) 150x büyütme, b) ötektik alaşım mikroyapısı (%12,6 Si) 400x büyütme, c) hiperötektik alaşım mikroyapısı (>%12,6 Si) 150x büyütme [65].

Şekil 2.2'de ticari olarak tercih edilen hipoötektik, ötektik ve hiperötektik alüminyum-silisyum alaşımlarına ait mikroyapı örnekleri verilmiştir. Şekil 2.2(a)'daki hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde açık renkte görünen, dendritik

şekle sahip yapılar birincil alüminyum fazı olan α-Al fazı ve bu dendrit kolları arasındaki koyu renkli iğnemsi yapılar Al-Si'nin ötektik fazı olarak isimlendirilir. Şekil 2.2(b)'deki ötektik alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde ötektik fazın yer aldığı görülmüştür. Şekil 2.2(c)'deki hiperötektik alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısına bakıldığında koyu renkli, büyük ve kaba çökeltiler şeklinde olan yapılar birincil silisyum fazı olan β ve diğer bulunan kısmın ötektik fazı olduğu tespit edilmiştir [64,65].

Silisyum; dar donma aralığı ve düşük viskozite nedeniyle mükemmel akışkanlığa sahiptir. Küçülen alüminyumun aksine, Si katılaşma sırasında genişler. Bu, Al-Si alaşımlarının daha düşük bir büzülme oranına ve Si'nin artmasıyla birlikte büzülmenin lineer bir şekilde azalmasına katkıda bulunur. Si ilavesi ağırlıkça %25 olduğunda toplam çekme sıfıra ulaşır. Si, alüminyumdan daha düşük bir elektrolitik potansiyele sahip olsa da, Al-Si alaşımları hala saf alüminyum gibi iyi bir korozyon direncine sahiptir çünkü Si, korozif ortamların çoğuna karşı inerttir. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarında silisyum içeriği arttırılarak düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek sertlik ve aşınma direnci elde edilebilir. Silisyum, akma mukavemetinde önemli bir artışa katkıda bulunur, ancak süneklikte önemli bir azalma sağlar. Şekil 2.3'te alaşımdaki Si içeriğinin bir fonksiyonu olarak Al-Si alaşımının mekanik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Alaşımdaki Si içeriğinin bir fonksiyonu olarak Al-Si alaşımının mekanik özellikleri [45].

Alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapıları, kimyasal bileşim oranlarına ve döküm esnasında kullanılan yöntemlere göre farklılık gösterebilir. Yapılan bir çalışmada yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanıldığında soğumanın hızlı şekilde olması ile ince yapıda silisyumun oluştuğu, tane boyutunun küçüldüğü ve dendrit kol mesafelerinin kısaldığı görülmüştür. Alüminyum-silisyum alaşımlarında mekanik özellikler, alaşımın bileşiminden etkilenmesinin yanı sıra dendrit kolları arasında yer bulan silisyumlu fazın dağılım oranından ve sahip olduğu şekil ve büyüklükten etkilenmektedir. Tane boyutu küçük silisyum fazı içeren alaşımlar yüksek mukavemet gösterir. Özellikle büyük yapıya sahip silisyum parçacıkları mikroyapıda yer alıyorsa gerilimin yoğunlaşmasına sebebiyet verir ve alaşımın çekme dayanımında bir düşüş söz konusu olur. Hiperötektik alaşımların mikroyapıları incelendiğinde görülen birincil dendritler yüksek çekme mukavemeti sağlamaktadır. Hipoötektik alaşımları, hiperötektik alaşımlar ile kıyaslandığında görece daha düşük çekme mukavemetine sahip olmasının nedeni yapısında birincil dendritik yapı yerine büyük birincil silisyum fazının yer almasıdır. Sert yapıdaki silisyum fazı iğnemsi bir görünümde ise sertlik ve çekme mukavemetinde bir artış görülürken darbe ve yorulma mukavemetlerinde düşüş görülür. Alaşımın katılaşma hızının değişmesi ya da silisyumun katılaşmasına etki eden elementlerin eklenmesi ile yapılan modifikasyon işlemi sonucunda silisyum faz dağılım oranı, boyutu ve morfolojisi değiştirilebilinir. Bunların yanı sıra, silisyum fazı alaşımın aşınma direncinde artış sağlar.

Mikroyapı ve mekanik özelliklerin güçlü bir korelasyona sahip olduğu iyi bilinmektedir. Mikroyapı, faz ve tane yapısını içerir. Faz yapısı; faz tipini, göreceli faz miktarını ve bunların dağılımını içerir. Tane yapısı; tanelerin boyutunu, şeklini ve dağılımını içerir. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri temel olarak birincil ve ötektik Al-Si fazlarının morfolojisine ve dağılımına bağlıdır. Al-Si alaşımları, ince ve iyi dağıtılmış birincil fazlarla karıştırıldığında daha iyi performans sağlayabilir [66]. Al-Si alaşımlarında α-Al, silisyum ve ötektik karışımı ana fazlar iken diğer fazların varlığı eklenen alaşım elementlerin cinsine ve miktarına bağlıdır. Al-Si döküm alaşımlarına yaygın olarak eklenen iki önemli alaşım elementi, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta (190ºC'ye kadar) alaşımın mukavemetini artıran ve onları ısıl işleme duyarlı hale getiren Cu ve Mg'dir. Bu alaşımlar; motor soğutma fanları, karterler, yüksek hızlı dönen parçalar, yapısal havacılık bileşenleri, hava kompresör pistonları, yakıt pompaları, kompresör kasaları, triger dişlileri, külbütör kolları, makine parçaları vb. gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Cu ve Mg ilave edilmiş alüminyum-silisyum alaşımları 200

ºC'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıklarında θ(Al_2Cu), β(Mg_2Si) ve S(Al_2CuMg) gibi ana alaşım güçlendirme fazları kararsız hale gelir, hızla kabalaşma ve daha sonra çözünme eğilimi gösterirler. Bu sebeple yüksek sıcaklık uygulamaları için istenmeyen mikroyapıya sahip alaşımlar ortaya çıkmış olur. Ağırlıkça % 0.45'i geçmeyen magnezyum içerikli alüminyum-silisyum alaşımları oda sıcaklığında incelendiğinde Mg_2Si fazının bulunması döküm malzemelerinde çekme dayanımına etki ettiği görülmüştür. [67].

Alüminyum-silisyum alaşımlarında döküm yönteminde yapılan değişiklikler ile katılaşma hızı değişikliği söz konusu olmaktadır, bu sebeple tercih edilen silisyum miktarları farklılık göstermektedir. Yavaş katılaşmanın olduğu kum kalıba yapılan dökümlerde ve hassas dökümlerde % 5-7 oranında silisyum kullanımı, kokil kalıba yapılan dökümlerde % 7-9 oranında silisyum kullanımı ve yüksek hızlı soğumanın olduğu basınçlı döküm yönteminde ise % 6-12 oranında silisyum kullanımı yaygındır [68].

2.3.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Silisyum (Si): Silisyumun alüminyum alaşımlarındaki göze çarpan etkisi, döküm özelliklerinin iyileştirilmesidir. Silisyum ilaveleri akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Tüm alüminyum döküm işlemlerinde en belirgin şekilde kullanılan bileşimler, silisyumun önemli bir rol oynadığı bileşimlerdir. Ticari alaşımlar ötektik altı ve ötektik üstü aralıkları yaklaşık %30 Si'ye kadar kapsar. Artan silisyum içeriği, ince duvarları doldurmak ve daha karmaşık tasarım ve ayrıntıları yeniden üretmek için akışkanlığı artırır. Alüminyum-silisyum alaşımları tipik olarak katılaşma çatlamasına karşı daha dirençlidir ve mükemmel dökülebilirlik ve besleme özellikleri gösterir. Katılaşma aralığındaki sıvı yüzdesi, başlangıç bileşimi ve dengesiz soğutma derecesi tarafından belirlenir. Basınçlı kalıp ve kalıcı kalıba döküm gibi daha yüksek katılaşma oranlı prosesler ve daha hızlı katılaşmanın gerçekleştiği daha ince kesitler için, büzülme gözenekliliği, sıvıdan kısmen katılaşmış yapılara kütle beslemesinin artık gerçekleşmediği sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenir. Kütle beslemenin durduğu sıcaklıkta katılaşan hacim fraksiyonu arttıkça, çekme gözenekliliğini en aza indirmek için besleme iyileşir. Bu nedenle, alüminyum-silisyum alaşımlarının en arzu edilen silisyum içeriği, karakteristik proses katılaşma hızına karşılık gelir. Kum kalıba yapılan dökümlerde ve hassas dökümlerde % 5-7 Si, kokil kalıba yapılan dökümlerde % 7-9 Si ve basınçlı döküm yönteminde ise % 6-12 Si kullanımı önerilmektedir. Bu önerilerin temelleri, soğutma hızı ile akışkanlık arasındaki ilişki ve ötektik yüzdesinin katılaşma ilerledikçe besleme üzerindeki etkisidir. Silisyum, ısıyla işlenebilir alaşımlarda Mg_2Si oluşturmak için magnezyum ile birleşir.

Karmaşık çözünmez fazlar oluşturmak için demir ve diğer elementlerle birleşir. Silisyum, ayrıca özgül ağırlığı ve termal genleşme katsayısını azaltır.

Bakır (Cu): Bakır, döküm ve ısıl işlem görmüş koşullarda mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde artırır. %4 ila %5,5 Cu içeren alaşımlar en güçlü şekilde ısıl işleme yanıt verir ve nispeten gelişmiş döküm özellikleri gösterir. Bakır genellikle genel korozyona karşı direnci azaltır ve belirli bileşimlerde ve malzeme koşullarında stres-korozyon duyarlılığını artırır. Tersine, alüminyum-çinko alaşımlarındaki düşük bakır konsantrasyonları, stres korozyonunu engeller. Bakır, sıcak yırtılma direncini azaltır ve dendritik büzülme potansiyelini artırır.

Demir (Fe): Demir, sıcak yırtılma direncini artırır ve basınçlı dökümde kalıp yapışması veya lehimleme eğilimini azaltır. Demir içeriğindeki artışlara önemli ölçüde azalan süneklik eşlik eder. Demir, en yaygınları $FeAl_3$, $FeMnAl_6$ ve αAlFeSi olan bir dizi intermetalik fazlar oluşturmak için reaksiyona girer. Bu esas olarak çözünmeyen fazlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda mukavemetteki gelişmelerden ve aynı zamanda mikro yapının kırılganlığından da sorumludur. Artan demir içeriği ile çözünmeyen fazların fraksiyonu arttığından, besleme özellikleri gibi döküm hususları olumsuz etkilenir. Demir; manganez, krom ve diğer elementlerle çamur fazlarının oluşumuna katılır.

Magnezyum (Mg): Magnezyum, ısıl işlem görmüş alüminyum-silisyum alaşımlarında mukavemet ve sertlik gelişiminin temelidir ve aynı amaçla bakır, nikel ve diğer elementleri içeren daha karmaşık alüminyum- silisyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılır. Sertleşme fazı Mg_2Si, yaklaşık %0.70 Mg'ye karşılık gelen kullanışlı bir çözünürlük limiti gösterir, bunun ötesinde ya daha fazla güçlendirme olmaz ya da matris yumuşaması gerçekleşir. Yaygın yüksek mukavemetli alüminyum-silisyum bileşimleri, %0,40 ila %0,070 aralığında magnezyum belirtir.

İkili alüminyum-magnezyum alaşımları, parlak bir yüzey kalitesi, kimyasal kaplamaya mükemmel yanıt, korozyon direnci ve çekici mukavemet ve süneklik kombinasyonları gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın bileşimler %4 ila %10 Mg aralığındadır ve %7'den fazla Mg içeren bileşimler ısıyla işlenebilir. Kararsızlık ve daha yüksek magnezyum konsantrasyonlarında oda sıcaklığında uzun süreli yaşlanma, ısıl işlemle önlenebilir.

Mangan (Mn): Normalde döküm bileşimlerinde bir safsızlık olarak kabul edilen mangan, çoğu yerçekimi döküm bileşiminde düşük seviyelere kadar kontrol edilir. Mangan, ikincil dökümhane bileşimlerinin daha yüksek mangan seviyeleri içerebileceği işleyerek sertleştirilmiş dövme alaşımlarda önemli bir elementtir. İşleme sertleşmesi olmadığında mangan, dökme alüminyum alaşımlarında önemli bir fayda sağlamaz. Bununla birlikte, %0,5'ten fazla Mn içeren alaşımlarda yüksek hacimli $MnAl_6$ fraksiyonunun iç sağlamlığı faydalı bir şekilde etkileyebileceğine dair bazı kanıtlar mevcuttur. Mangan ayrıca kimyasal bitirme ve anotlamada tepkiyi değiştirmek için kullanılabilir. Demir ve manganez izomorf olarak kabul edilebilir ve alaşım kimyası, en az zararlı çözünmeyen Al-Fe-Mn fazlarını destekleyen stokiyometrileri yansıtabilir.

Çinko (Zn): Çinko, alüminyum dökümde tek başına önemli bir fayda sağlamaz. Bununla birlikte, bakır ve/veya magnezyum ilavesiyle birlikte çinko, ısıyla işlenebilir. Bu tür bileşimlerin bir kısmı yaygın olarak kullanılmaktadır. Çinko, akma mukavemetini etkileyebilen bilen bir elementtir. Ayrıca ikincil yerçekimi ve basınçlı döküm bileşimlerinde yaygın olarak bulunur. Bu alaşımlarda %3'e kadar Zn toleransı, düşük kaliteli ve işlenmiş hurda alaşım kullanımına izin verir.

Stronsiyum (Sr): Stronsiyum, alüminyum-silisyum ötektik fazının morfolojisini ve mikroyapısını modifiye etmek için kullanılmaktadır. Ötektik silisyum mikroyapısı genel olarak kaba taneli bir görünüme sahiptir, stronsiyum ilavesi ile mikroyapı ince lifli ve lamelli bir görünüme dönüşmektedir. Etkili modifikasyon, çok düşük ekleme seviyelerinde elde edilebilir, ancak genellikle %0,008 ila %0,04'lük bir geri kazanılmış stronsiyum aralığı kullanılır. Daha düşük konsantrasyonlar, daha yüksek katılaşma hızlarında etkilidir. Daha yüksek ilave seviyeleri, döküm gözenekliliği ile ilişkilidir. Gaz giderme verimliliği ayrıca daha yüksek stronsiyum seviyelerinde olumsuz etkilenebilir.

Berilyum (Be): Milyonda birkaç parça berilyum ilavesi, oksidasyon kayıplarını ve magnezyum içeren bileşimlerdeki ilgili inklüzyonları azaltmada etkili olabilir. Daha yüksek konsantrasyonlarda (>%0,04), berilyum demir içeren intermetaliklerin biçimini ve bileşimini etkileyerek mukavemeti ve sünekliği önemli ölçüde artırır. Çözünmeyen fazın morfolojisini yazı veya plakadan nodüler forma değiştirmenin yanı sıra berilyum, Al-Fe-Si kompleksinden magnezyumu reddederek bileşimini değiştirir ve böylece sertleştirme amaçları için tam kullanımına izin verir. Bununla birlikte berilyum içeren bileşikler, eritme, erimiş metal işleme,

cüruf işleme, cüruf bertarafı ve kaynaklamada özel önlemler gerektiren bilinen kanserojen maddelerdir.

Bizmut (Bi): Bizmut ilaveleri, dökme alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğini %0,1'den daha yüksek konsantrasyonlarda iyileştirir.

Kalsiyum (Ca): Kalsiyum, zayıf bir alüminyum-silisyum ötektik değiştiricidir. Hidrojen çözünürlüğünü arttırır ve genellikle iz konsantrasyon seviyelerinde döküm gözenekliliğinden sorumludur. Yaklaşık %0,005'ten fazla kalsiyum da alüminyum magnezyum alaşımlarında sünekliği olumsuz etkiler.

Antimon (Sb): %0.10'a eşit veya daha yüksek konsantrasyon seviyelerinde antimon, alüminyum-silisyum ötektiğini rafine eder. Etki esas olarak modifikasyondur, ancak ince lifli bir formdan ziyade belirgin şekilde katmanlı bir ötektik ortaya çıkar. Antimonun ötektik yapıyı değiştirmedeki etkinliği, fosforun bulunmamasına ve yeterince hızlı bir katılaşma hızına bağlıdır. Antimon ayrıca, dökülebilirlik ve metalurjik yapı üzerinde olumsuz etkileri olan kaba intermetalikler oluşturmak için sodyum veya stronsiyum ile reaksiyona girer. Antimon, özellikle stibine gazı (SbH_3) oluşumu ve diğer antimon bileşiklerine insan maruziyetinin etkileri ile ilişkili, potansiyel toksisite ve hijyen etkileri olan bir ağır metal olarak sınıflandırılır.

Bor (B): Bor, AlB_2 ve TiB_2 gibi boritleri oluşturmak için diğer metallerle birleşir. Titanyum borür, tane inceltme için $TiAl_3$ gibi aktif tane inceltme fazları ile etkileşime giren kararlı çekirdeklenme bölgeleri oluşturur. Metalik borürler, işleme operasyonlarında takım ömrünü azaltır ve mekanik özellikler ve süneklik üzerinde zararlı etkileri olan kaba veya aglomera inklüzyonlar oluşturur. Borürler ayrıca fırınlarda ve oluklarda sıvı çözeltiden intermetaliklerin çökelmesine, çamurlaşmaya da katkıda bulunur. Elektrik uygulamalarında saflığı ve iletkenliği artırmak için titanyum, zirkonyum ve vanadyum gibi alüminyum içeren peritektik elementlerin bor işlemi uygulanmaktadır. Rotor alaşımları, iyileştirilmiş elektrik performansı için bu elementlerin çökelmesini sağlamak üzere titanyum ve vanadyum içeriklerini aşacak şekilde boru belirtebilir.

Kadmiyum (Cd): %0,1'i aşan konsantrasyonlarda kadmiyum işlenebilirliği artırır. Kadmiyumun 1413 ºF'de (767 ºC) buharlaştığını kabul eden önlemler önemlidir.

Krom (Cr): Krom ilaveleri, çimlenme ve tane büyümesinin meydana geldiği bilinen oda sıcaklığında yaşlanma ve termal olarak kararsız bileşimlere genellikle düşük konsantrasyonlarda yapılır. Krom tipik olarak son derece sınırlı katı hal çözünürlüğü sergileyen ve bu nedenle tane büyümesi eğilimlerini bastırmada faydalı olan $CrAl_7$ bileşiğini oluşturur. Basınçlı dökümde demir, manganez ve krom içeren çamura bazen rastlanır.

Kurşun (Pb): Kurşun, işlenebilirliği iyileştirmek için %0,1'den daha yüksek konsantrasyonlarda kullanılır.

Cıva (Hg): Cıva içeren bileşimler, özellikle deniz ortamlarında katodik koruma sistemleri için kurban anotlar olarak geliştirilmiştir. Deniz suyunda pasifleşmeyen bu optimal elektronegatif alaşımların kullanımı çevresel nedenlerle ciddi şekilde kısıtlanmıştır.

Nikel (Ni): Yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak bakırla birlikte kullanılır. Ayrıca ısıl genleşme katsayısını düşürür ve korozyon direncini arttırır.

Gümüş (Ag): %0,5 ila %1,0 konsantrasyonlarda yalnızca sınırlı bir alüminyum-bakır yüksek mukavemetli alaşım aralığında kullanılır. Gümüş, çökelme sertleşmesine ve stres-korozyon direncine katkıda bulunur.

Sodyum (Na): Sodyum, alüminyum-silisyum ötektiğini hem sıcaklık olarak hem de mikroyapı olarak değiştirir. Ötektik sıcaklığını yaklaşık 10-12^{0}C düşürmesiyle hızlı soğuma gerçekleşir, bunun sonucunda ince taneli mikroyapı oluşumu gerçekleşir. Fosfor yokluğunda, %0.01'lik geri kazanılmış konsantrasyonlar etkilidir. Sodyum, birincil silisyum fazının arıtılmasında ötektiği ve fosforun modifiye edilmesindeki etkinliğini azaltmak için fosfor ile etkileşime girer. Alüminyum-magnezyum alaşımlarında %0,005'in altındaki sodyum kırılgandır. Sodyum, yüksek buhar basıncı nedeniyle erimiş alüminyumda hızla kaybolur, böylece değiştirici etkiler geçicidir. Değişiklik seviyelerini korumak için periyodik eklemeler gereklidir. Sodyum yüzey gerilimini artırır ve ekleme yöntemleri yoluyla hidrojen içeriğini artırabilir. Aşırı modifikasyon, dökümde hatalı çalıştırma eğilimlerini artırır. Diğer bazı modifiye edicilerin aksine sodyum, tüm katılaşma koşullarında etkili alüminyum-silisyum ötektik modifikasyonu sağlar.

Kalay (Sn): Kalay, sürtünme önleme özelliklerini iyileştirmede etkilidir ve bu nedenle rulman uygulamalarında yararlıdır. Döküm alaşımları %25'e kadar Sn içerebilir. Kalay ilaveleri de işlenebilirliği artırır.

Titanyum (Ti): Titanyum, genellikle daha az miktarda bor ile kombinasyon halinde, alüminyum döküm alaşımlarının tane yapısını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Çalışabilir faz, alüminyumunkiyle yakından eşleşen kafes aralığına sahip $TiAl_3$'tür. Etkili tane inceltme için TiB_2'nin stokiyometrisinden daha fazla titanyum gereklidir. Titanyum genellikle sıcak-kısa bileşimlerde çatlama eğilimlerini azaltmak için tane inceltme için gerekli olandan daha yüksek konsantrasyonlarda kullanılır.

Fosfor (P): AlP_3 olarak fosfor, hiperötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında birincil silisyum faz oluşumunu çekirdekler ve rafine eder. Fosfor, milyonda bir konsantrasyonda hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında ötektik yapıyı kabalaştırır ve yaygın ötektik düzenleyiciler olan sodyum ve stronsiyumun etkinliğini azaltır [69].

2.4. A360 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Ana alaşım elementleri olarak silisyum ve magnezyum içeren alüminyum alaşımları, iyi mekanik özelliklere ve korozyon performansına sahip bir hafif metalik malzeme sınıfı oluşturmuştur. Bu alaşımlar, otomotiv, havacılık ve özellikle denizcilik endüstrisinde geniş bir uygulama yelpazesi ile tüm şekilli döküm bileşenlerin en geniş ailesini sağlar [70].

A360 alüminyum alaşımı, mükemmel basınç sızdırmazlığı ve akışkanlığı olan bir alaşımdır. A360 alüminyum alaşımının içeriğinde yüksek silisyum bulunmaktadır, bu sayede yüksek sıcaklıklarda bile yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet elde edilir. Alaşımda bulunan silisyum ile ayrıca akışkanlıkta artış olurken ve ergime sıcaklığında düşüş meydana gelir.

Tablo 2.2 : A360 alüminyum döküm alaşımının mekanik özellikleri [45].

Uzama (%)	3.5
Çekme Dayanımı (MPa)	317
Akma Dayanımı (MPa)	170
Yorulma Dayanımı (MPa)	138
Sertlik (Brinell)	75
Poisson Oranı	0.33
Elastisite Modülü (GPa)	71

A360 alüminyum döküm alaşımının mekanik özellikleri Tablo 2.2'de ve fiziksel özellikleri Tablo 2.3'te görülmektedir. Silisyuma ilave olarak alaşımın içeriğinde bulunan magnezyum ve bakır ile birlikte mekanik özelliklerde iyileşme gerçekleşir.

Otomobil yağ karterleri, otomobil denetleyici kutular, motor kutuları, 5G iletişim kutuları, LED lamba muhafazası vb. üretmek için kullanılabilir. Özellikle düşük sıcaklıklarda çok sünektir; bu nedenle yumuşak ve dövülebilir. Büküldükten, esnedikten veya sıkıştırıldıktan sonra şeklini kolayca geri kazanabilir, dolayısıyla daha yüksek esneklik sağlar.

Tablo 2.3: A360 alüminyum döküm alaşımının fiziksel özellikleri [45].

Yoğunluk (g/cm^3)	2.63
Erime Noktası (^0C)(+/- 50)	577
Termal İletkenlik (W/m.K)	113
Termal Genleşme Katsayısı (µm/m.^0C) 20-100 ^0C aralığında	21
Termal Genleşme Katsayısı (µm/m.^0C) 20-300 ^0C aralığında	23
Elektriksel İletkenlik (%IACS)	29
Döküm Sıcaklığı (^0C)	635-705
Katılaşma Sıcaklığı (^0C)	555
Sıvılaşma Sıcaklığı (^0C)	596

Tablo 2.4'te A360 alüminyum döküm alaşımının kimyasal bileşimi görülmektedir. Bu bileşim içeriğinde bulunan elementlerin alaşım içerisindeki sağladığı özellikler aşağıda belirtilmiştir:

- Alüminyum: mükemmel basınç sızdırmazlığı ve akışkanlık sağlar.
- Bakır: mekanik mukavemet ve yüksek iletkenliğin bir kombinasyonunu verir.
- Magnezyum: katı bileşimdeki mukavemeti ve gerinim sertleştirme yeteneğini geliştirir.
- Demir: termit reaksiyonunu ve deoksidasyon yoluyla pastan korunmayı destekler.
- Kalay: çeşitli dekoratif ve fonksiyonel kullanımlar için alüminyum yüzeyi parlatır.
- Nikel: yayılan enerjiye, görünür ışığa ve elektromanyetik dalgalara karşı oldukça yansıtıcı bir yüzey sağlar.
- Çinko: alüminyumu korozyondan korumak için katodik korumaya yardımcı olur.
- Manganez: Alüminyumun yüksek sıcaklıklarda yüksek basınçlara dayanacak şekilde sertleşmesine yardımcı olur.
- Silisyum: yüksek sıcaklıklarda korozyon direncine ve yüksek mukavemete yardımcı olur
- Diğer metaller: alaşımın çökelmesine ve sertleşmesine yardımcı olur.
- RoHS uyumlu: alüminyum alaşımı toksik değildir, bu nedenle yiyecek ve içecek kaplarında kullanılmaya uygundur.

Yaygın kullanımlardan bazıları şunlardır:

- yüksek mukavemete değer verilen uçaklarda ve uçak yapısal bileşenlerinde
- otomotiv bileşenlerinde; motor blokları, dişli blokları, dişli kutuları, yakıt pompaları, emme manifoldları, silindir kafaları ve debriyaj muhafazalarında
- tekne gövdelerinde ve deniz ortamlarına maruz kalan ürünlerde; dıştan takma motor pervaneleri, motor parçaları ve muhafazalarında

- mimari uygulamalarda
- kaynak çubuğu ve lehim saclarında
- gaz sayaçları ve düzenleyicilerde.
- çim biçme makinesi parçalarında

Tablo 2.4: A360 alüminyum döküm alaşımının bileşimi

%	A360
Alüminyum	Kalan Kısım
Silisyum	9-10
Bakır	0.6
Magnezyum	0.4-0.6
Demir	1.3
Kalay	0.15
Nikel	0.5
Çinko	0.5
Mangan	0.35
Diğer metaller	0.25

2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Alüminyum döküm alaşımları söz konusu olduğunda, eriyiğin beslenme kabiliyetini iyileştirmek, mekanik özellikleri iyileştirmek ve otomotiv uygulamalarında uygun basınç sızdırmazlığının yanı sıra kabul edilebilir bir yüzey görünümü sağlamak için tane boyutunun kontrolü önemli olmuştur. Tane boyutuna ek olarak, ötektik silisyum morfolojisi ve birincil alüminyum (α-Al) fazının dendrit kol aralığı, yüksek kaliteli alüminyum döküm üretiminde önemli bir rol oynar[71].

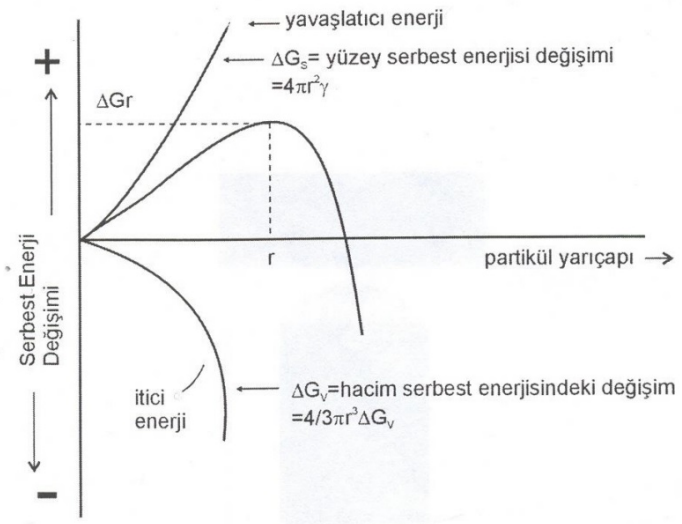
Alüminyum alaşımlarında tane inceltme ticari olarak bu yüzyılın ilk yarısından beri kullanılmaktadır ve alüminyum alaşımlarından üretilen kaliteli ürünlerin kontrolünde ana özellik olmuştur. Sıcak çatlamaya karşı direncin artması, mekanik özelliklerin iyileşmesine yol açan mikro yapısal özelliklerin homojenliği ve makro gözenekliliğin azalması, alüminyum döküm üreticilerinin tane inceltme teknolojisini benimsemelerinin ana nedenleriydi.

Al-Si döküm alaşımlarındaki tane inceltme, katılaşma sırasında yığın besleme özelliklerini iyileştirerek, çekme gözenekliliğinin azalmasına ve daha küçük ve iyileştirilmiş gözenek dağılımının teşvik edilmesine neden olur. Ayrıca, ince bir tane boyutu, eriyik içinde çözünmüş gazın evriminden oluşan gözeneklere ek olarak, ikincil iç metalik fazların daha muntazam bir dağılımını oluşturur. Döküm bütünlüğünde ortaya çıkan artışa, hem mekanik özelliklerde hem de basınç sızdırmazlığında iyileştirmeler eşlik eder. Döküm sıcaklığı, soğutma hızı, silisyum morfolojisi ve ısıl işlemler gibi diğer üretim parametreleri değiştirildiğinde, alüminyum dökümlerde tane inceltme etkilerinin daha da geliştirilebileceğini bilinmektedir [71].

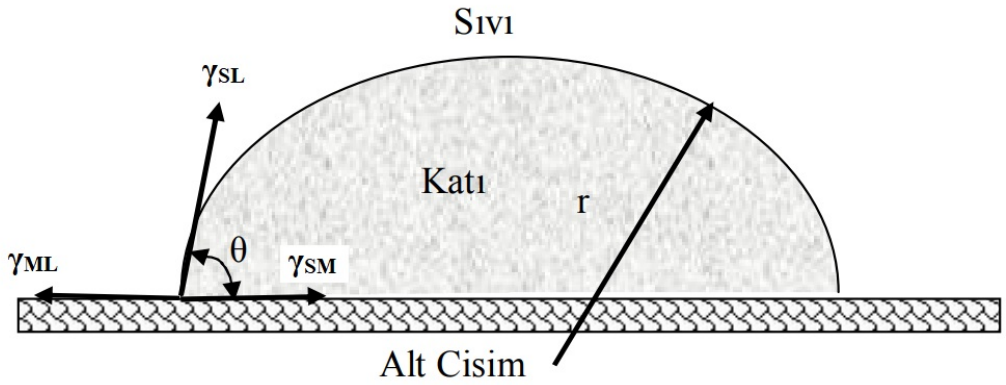
Al-Si döküm alaşımlarının katılaşma süreci, birincil alüminyumun (α-Al) çekirdeklenmesi ve büyümesi ile başlar, ardından alaşım elementlerini (Si, Cu, Mg, vb.) içeren çeşitli fazların çökelmesi ile devam eder. Bir dökümün tane boyutunun belirlendiği yer çekirdeklenme ve büyümenin olduğu bu ilk aşamadadır. Çok temiz bir sıvının katılaşması, önemli bir çekirdeklenme sorunu oluşturur. Sıvının sıcaklığı düştükçe, atomların kümelenmesi, termal çalkantıdaki azalma nedeniyle kristalli bölgeler üretir. Yarıçapı r olan küresel bir yığın için yeni fazı oluşturacak net enerji; yığının hacmi ($4nr^3/3$) ve birim hacim başına düşen serbest enerjisi (ΔG_v) ile orantılı olarak azalır. Aynı zamanda, birim yüzey alanı başına arayüzey enerjisi (γ_{SL}) nedeniyle ekstra enerji içeren yeni yüzey alanı gereklidir. Şekil 2.4'te r yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenme ile bağlantılı serbest enerji değişimi gösterilmektedir.

Belirli bir aşırı soğuma için, ΔT, maksimum aşırı serbest enerji ile ilişkili kritik bir yarıçap, r* vardır. Eğer r < r* ise sistem embriyoyu çözerek serbest enerjisini düşürürken, r > r* olduğunda sistemin serbest enerjisi katı büyürse azalır ve homojen çekirdeklenme problemini aşar [71].

Bir eriyik içindeki yabancı çekirdekler, daha etkili çekirdekler için sıvının kademeli olarak daha küçük alt soğumalarında (ΔT) çekirdeklenmeyi kolaylaştıran bir dizi heterojen çekirdeklenme sıcaklığına yol açabilir. Çok elverişli çekirdeklerin mevcudiyetinde, sıvının katılaşması pratik olarak sıfır aşırı soğuma ile başlayabilir. Katı bir embriyo düz bir yüzeyle, yani kalıp duvarı ile temas halinde olduğunda ve γ_{SL}'nin izotropik olduğu varsayıldığında, ıslanma açısı Θ olan, yarıçapı r olan küresel bir kapak denge şekli olarak oluşturulur ve toplam arayüzey enerjisini azaltır. Şekil 2.5'te düz bir kalıp duvarında küresel başlığın heterojen çekirdeklenmesi gösterilmektedir [71].



Şekil 2.4: r yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenme ile bağlantılı serbest enerji değişimi [71].



Şekil 2.5: Düz bir kalıp duvarında küresel başlığın heterojen çekirdeklenmesi [71].

Bir dökümün tane boyutunun, katılaşma işlemi sırasında hareket edebilen eriyik içindeki yabancı çekirdeklerin sayısı ile ters orantılı olduğu deneyimlenmiştir. Daha sonra, eğer her bir tane bir yabancı parçacık tarafından çekirdeklendirilirse, daha fazla sayıda çekirdek daha fazla tanenin oluşmasına izin verecek ve bu da daha küçük bir tane boyutuna yol açacaktır. Tüm yabancı parçacıklar, katı oluşumu için iyi çekirdekler değildir. Sıvı alüminyum döküm alaşımlarında, oksitler ve spinellerden kalıbın duvarına kadar değişen farklı parçacıklar bulunur. Belirli bir alt soğutmada, ΔT, herhangi bir parçacık bir çekirdek olarak etkili olabilir veya olmayabilir ve alüminyuma en iyi kristalografik benzerliğe sahip parçacıklar (daha düşük yüzey enerjisini destekler), sıvının dengedeki donma noktasına (T_m) yakın sıcaklıklarda etkili çekirdekler haline gelecektir.

Bir dökümün hızlı dondurulmasında, ısı çıkarma oranı, üretilen katılaşmanın gizli ısısını çok aşabilir, bu da birçok heterojen çekirdeğin aktif hale gelmesine izin veren ve ince bir tane boyutuyla sonuçlanan önemli bir aşırı soğuma üretir. Bu prosedür, diğer tüm tekniklerden daha ince tane boyutları sağlamasına rağmen, gerekli aşırı soğumaları oluşturmak için büyük bir dökümden büyük miktarda gizli ısı çıkarılması gerektiğinden, genellikle pratik değildir.

Tane incelmesine neden olan diğer teknikler, yeni tanelerin tohumlarını oluşturmak için büyüyen dendritlerin zarar gördüğü kristal parçalanmasını içerir. Ultrasonik titreşimin katılaşan alaşımlara uygulanması, uçucu kalıp kaplamalarının kullanılması veya eriyiğin mekanik olarak sıkıştırılması, dendrit parçalama tekniklerinin örnekleridir.

Tane inceltmenin çeşitli mekanizmaları arasında, kimyasal tane inceltmenin en etkili olduğu kanıtlanmıştır. Çok düşük ara yüzey enerjisine sahip bir yüzey, ya bir çekirdek

eklenerek ya da bir tür faz reaksiyonuyla eriyik içinde çekirdek üretilerek eriyiğe yerleştirilir. Yüzeyler üzerinde heterojen çekirdeklenme meydana gelir ve yapısal faktörler tarafından büyüme kısıtlaması ile birleştiğinde tane incelmesine yol açar. Titanyum ve bor, alüminyum alaşımlarının tane inceltmesinde ana elementler olarak kullanılmıştır ve tane incelticiler olarak kullanılmalarından bu yana, bu elementlerin dövme ve döküm alüminyum alaşımlarında tane boyutunu küçültmeyi teşvik ettiği mekanizma hakkında önemli ölçüde gelişmeler olmuştur.

Kimyasal tane incelticiler, eriyiğe tuz flakslar veya ana alaşımlar olarak eklenir. Tuz flakları, aktif bileşenler olarak, titanyum ve bor açığa çıkaran erimiş alüminyum ile reaksiyona giren K_2TiF_6 ve KBF_4 tuzlarını içerir. Eriyikte alüminitler ($TiAl_3$) ve boritler (TiB_2) oluşur, kristallerin oluşumu için heterojen çekirdek olarak davranış gösterirler. İyi arıtma güçlerine rağmen, tuzlar eriyikte gaz üretmeye ve korozif gazlar üretmeye eğilimlidir. Tuzlar ayrıca stronsiyum gibi elementlerle reaksiyona girebilir ve ötektik silisyum yapısının modifikasyonunu azaltabilir.

Tuzların kontrollü koşullar altında alüminyum ile reaksiyona sokulmasıyla üretilen ana alaşımlar daha etkilidir. Ana alaşımlar genellikle titanyum (ağırlıkça %2 ila 10 mertebesinde), boron (ağırlıkça %5'e kadar) veya alüminyumda her iki elementin bir kombinasyonunu içeren külçeler veya ekstrüde çubuklar olarak üretilir. Ti/B oranı Al-3%Ti-3%B olan master alaşımlar, Al-Si döküm alaşımlarının tane inceltmesinde en etkili olduğu bulunmuştur.

Etkili olmasına rağmen, daha uzun temas süreleri (çekirdek partiküllerinin eriyikte kalma süresi) inceltici partiküllerin çözünmesine veya çökelmesine ve inceltme etkisinin bir miktar kaybına neden olduğundan, kimyasal tane inceltme dikkatle izlenmelidir. Genel olarak, eriyik halden bir numune alınır ve katılaştırılır ve sıvı alüminyumun incelme derecesini değerlendirmek için numune üzerinde ya mikroskobik ya da kimyasal bir analiz yapılır. İnce bir tane boyutu elde edilirse veya numunenin kimyasal bileşimindeki titanyum veya bor içeriği arttırılırsa, erimiş alüminyum bir kalıba dökülmeye hazırdır. Değilse, uygun iyileştirme yapılmalıdır.

Bu teknikler için numune hazırlama zaman alıcıdır ve sonuçlar her zaman eriyiğin gerçek arıtma durumunu yansıtmaz. Aşınmış alüminyum alaşımlarında tane boyutu ölçümü için numuneler elde etmek üzere özel testler tasarlanmıştır ve bu testler arasında iyi bir korelasyon bulunmasına rağmen, çoğu zaman gerçek dökümün gerçek katılaşma durumu iyi simüle edilmemiştir. Alüminyum döküm alaşımlarında tane boyutunu ortaya çıkarmak için numune

hazırlama, karmaşık anotlama teknikleri gerektirir ve genellikle arıtmanın değerlendirilmesi, daha az doğru olan karşılaştırmalı görsel teknikle yapılır.

Spektrokimyasal analizin de kendi dezavantajları vardır. Bir karşılaştırma tekniği olarak düşünüldüğünde, eğriden bir konsantrasyon değeri çıkarmak için numunedeki element yoğunluk oranlarını bir kalibrasyon eğrisinin yoğunluk oranlarıyla karşılaştırır. Sonuçlar yalnızca kalibrasyon eğrisinin kendisi kadar iyidir. Numunenin erimesinden kaynaklanan safsızlıklar ve numunenin değişen soğutma hızları metalin matrisini etkileyebileceğinden, numune hazırlama ayrıca analizin kalitesinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, tane inceltici eriyik ile uzun bir temas süresine sahipse titanyum veya borun varlığı eriyikte etkili yüzeylerin varlığını garanti etmez.

Alüminyum döküm alaşımlarının tane boyutu ölçümü için bir alternatif, termal analiz tekniğidir. Bu teknik, bir numune katılaştıkça sıcaklık değişikliklerini izler ve ortaya çıkan çizim, sıcaklığa karşı zamana ilişkin bir eğridir. Termal analiz tekniği, katılaşma sırasında eriyiğin çekirdeklenme potansiyelini, ancak yalnızca belirli bir soğuma hızı için tahmin eder ve karakteristik soğuma eğrisi parametreleri, eriyiğin gerçek çekirdeklenme durumu ile ilişkilendirilmelidir. Termal analiz tekniğinin avantajı, online kontrol aracı olarak kullanılabilmesidir. Sonuçların eriyiğin çekirdeklenme potansiyelini yansıttığından emin olarak daha hızlı sonuçlar elde edilebilir.

2.5.1. Titanyum İlavesi İle Tane İnceltme

Birkaç yazar tarafından sunulan çeşitli teoriler arasında, Crossley ve Mondolfo tarafından önerilen Peritektik Teori, titanyum ilavesiyle alüminyum alaşımlarının tane inceltmesinin açıklanmasında temel mekanizma olarak alınmıştır. Al-Ti faz diyagramı, ağırlıkça %1,2 titanyum ve 665°C'de bir peritektik reaksiyon sergiler ve peritektik yatay sınırı %0,15 Ti'de bulunur. Crossley ve Mondolfo'ya göre, alüminyumun tane incelmesi bu reaksiyonla ilişkilidir.

Titanyum, yeterli miktarda (>0,15%) mevcut olduğunda, sıvı metaldeki birincil alüminyum (α-Al) ile peritektik olarak reaksiyona giren $TiA1_3$'ün birincil kristallerini oluşturur. Kompozisyonlar genellikle hipoperitektik aralıktadır ve dönüşüm 2.14'te verilmiş olan denkleme göre gerçekleşir.

$$Sıvı_1 + TiAl_3 \rightarrow \alpha\text{-}Al + Sıvı_1 \quad (2.14)$$

α-Al parçacıkları kalan sıvı metalde oluşan birincil kristallerin adetleriyle ilişkili şekilde tane inceltme derecesi için çekirdek görevi görür. Al-Ti master alaşımları, bir alüminyum matris içinde $TiAl_3$ parçacıkları içerir ve tane inceltilmesi yapılacak erimiş metale eklendiğinde, matris çözülür. $TiAl_3$'ün dağıtılması; eriyik içindeki parçacıklar ve böylece çekirdeklenme için heterojen alanlar oluşturur. Ticari alüminyum alaşımlarında ağırlıkça Ti<%0,15 konsantrasyonlarında bile tane incelmesi elde edilir, ancak bu etki, $TiAl_3$ parçacıklarının çözünmesi nedeniyle zamanla kaybolur.

2.5.2. Bor İlavesi İle Tane İnceltme

İlk deneylerde, santrifüjlenmiş numunelerin X-ışını kırınım sonuçlarına dayalı olarak, AlB_2'nin saf alüminyumu çekirdeklendirdiğine inanılıyordu. Ayrıca, Sigworth ve arkadaşları geleneksel Al-Ti ve Al-Ti-B ilavelerine göre tek başına borun (Al-%4 B master alaşımı olarak) ilavesiyle elde edilen üstün tane inceltme özelliğini rapor etmiştir (Şekil 2.5).

Saf alüminyumun tane inceltmesinde borun tek başına etkisinin hemen hemen sıfır olduğu öne sürülmüştür, ancak Al-Si alaşımları için ağırlıkça %0,02 B'deki ötektik reaksiyondan dolayı bu etki çok önemlidir (Reaksiyon 2.3). Bu sıcaklıkta bir ötektik reaksiyon meydana gelirse, Reaksiyon 2.2'nin kendisi için bir miktar aşırı soğutma gerekli olacağından, saf alüminyumun (660^0C) donma sıcaklığının üzerinde α-Al çekirdeği oluşmaz. AI-Si alaşımları için ötektik reaksiyon, sıvılaşma sıcaklığının çok üzerinde gerçekleşir ve çekirdeklenme için katı heterojen bölgelerin varlığını garanti eder.

Tandel ve arkadaşları bir B-Si master alaşımı ile Al-Si alaşımlarına borun dahil edilmesi için alternatif bir yöntem sunar. Bu tip alaşımın silisyum içinde bor çözünmesi içerdiğini ve eriyik halindeyken borun bir bileşik olarak değil, bir çözünen olarak homojen bir şekilde dağıldığını ve parçacıkların çökmesi, yüzmesi veya topaklaşması nedeniyle oluşan sorunlardan kaçındığını iddia etmektedirler. Çalışmaları ayrıca, Al-Si alaşımlarında bor ile alüminyumun çekirdeklenmesi için ötektik teoriyi de desteklemektedir.

Bor içeren ana alaşımlar, Al-Si alaşımlarında iyi inceltme sağlar ve AlB_{12}'den ziyade AlB_2'nin varlığı, titanyum içeren ana alaşımlara benzer veya onlardan daha üstün bir tane inceltme derecesi sağlar.

Alüminyumun tane inceltme işlemi ilk olarak 1930'ların başında eriyiğe titanyum ilaveleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Dökülebilirlikteki gelişme önemliydi ve bu hızla

yerleşmiş bir uygulama haline geldi. Bunun sonucunda dökümün yapısında meydana gelen değişiklik dikkat çekicidir. Bu, dökümden bir parça kesilerek ve kesilen yüzey, ayna gibi pürüzsüz bir yüzey elde edilene kadar kademeli olarak daha ince zımpara kağıtları ile parlatılarak görülebilir. Tane inceltme, öncelikle ikinci faz malzemelerinin dağılımı değiştiği için dökümlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Döküm alaşımlarında tane inceltme, gözenek miktarını ve gözeneklerin boyutunu azaltma eğilimindedir. Bu, mekanik özellikleri, özellikle yorulma mukavemetini geliştirir. Ek olarak besleme özelliklerinde de iyileşme gözlemlenir. Bu nedenlerden dolayı çoğu alüminyum dökümlerde tane inceltme işlemi uygulanmaktadır [71].

A356 alaşımına Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B ve Al-4%B olmak üzere tane inceltme ile ilgili üç farklı master alaşım eklenerek yapılan çalışmada, borun bir tane inceltici olarak titanyumdan daha güçlü olduğunu açıkça ortaya konulmuştur [72]. Bu sonuç, yukarıda açıklanan hakim bakış açısına tamamen aykırıydı. Herkes titanyumun tahıl inceltme için gerekli olduğuna inanıyordu, ancak Çin'deki araştırma titanyumun yalnızca zayıf bir tane inceltici olduğunu gösterdi. Ayrıca borun titanyumdan çok daha iyi olduğunu öne sürdü [71]. Bu sonuçlar ışığında borun tane inceltme özelliğini daha ayrıntı şekilde incelemek isteyen araştırmacılar kendi çalışmalarına başladılar [72]. Laboratuvar testleri, AlB_2 parçacıkları içeren alüminyum-bor ana alaşımlarının mükemmel tane inceltme sağladığını doğruladı. Daha sonra bu çalışmaları ile ilgili olarak patent alınarak, dökümhane denemelerinde de Al-B master alaşımlarının iyi tane incelticiler olduğunu doğruladılar [73]. Bununla birlikte, eklenen bor, bekletme fırınlarında bir 'çamur' üretmek için çözünmüş titanyum ile reaksiyona girdi. Ayrıca, bor ilaveleri stronsiyum ile modifiye edilmiş bazı ısılarda modifikasyon kaybına neden olduğundan, bor stronsiyum ile görünüşte reaksiyona girmiştir. Yapılan başka bir araştırma Sr ve B arasındaki etkileşimi doğrulamaktadır [74].

2.5.3. Stronsiyum İlavesi İle Tane İnceltme

Stronsiyum, alüminyum-silisyum ötektiğini değiştirir. Etkili modifikasyon, çok düşük ekleme seviyelerinde elde edilebilir, ancak genellikle %0,008 ila %0,04'lük bir geri kazanılmış stronsiyum aralığı kullanılır. Daha düşük konsantrasyonlar, daha yüksek katılaşma hızlarında etkilidir. Daha yüksek ilave seviyeleri, döküm gözenekliliği ile ilişkilidir. Gaz giderme verimliliği ayrıca daha yüksek stronsiyum seviyelerinde olumsuz etkilenebilir [75].

Yapılan bazı çalışmalar, stronsiyumun ötektik silisyumu, dendrit tutarlılık noktasını ve mikroyapı incelmesini modifiye etme etkilerini içerir. Stronsiyum ilaveleri, dökümhane uygulamalarında yaygındır ve sonuç olarak, bazı döküm yapılarında stronsiyum bazlı inklüzyonlar bulunur. Bununla birlikte, SrO ve $Sr(OH)_2$ inklüzyonları, ilerleyen α-Al dendritik katı-sıvı arayüzü tarafından yutulan karmaşık bileşikler oluşturmak üzere eriyikte azalır. Bu nedenle, Sr bazlı bileşiklerin katılaşan eriyik içindeki gözeneklerin çekirdekleşmesine katkıda bulunmadığı öne sürülmüştür. Bununla birlikte, eriyiklere eklendiğinde Sr'nin gözenekliliği arttırdığını gösteren artan sayıda yayın vardır. Sr bazlı bileşikler yutulmazlar ve aktif olarak gözenek çekirdeklenmesine katkıda bulunurlar [75].

2.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON ŞEKİLLERİ

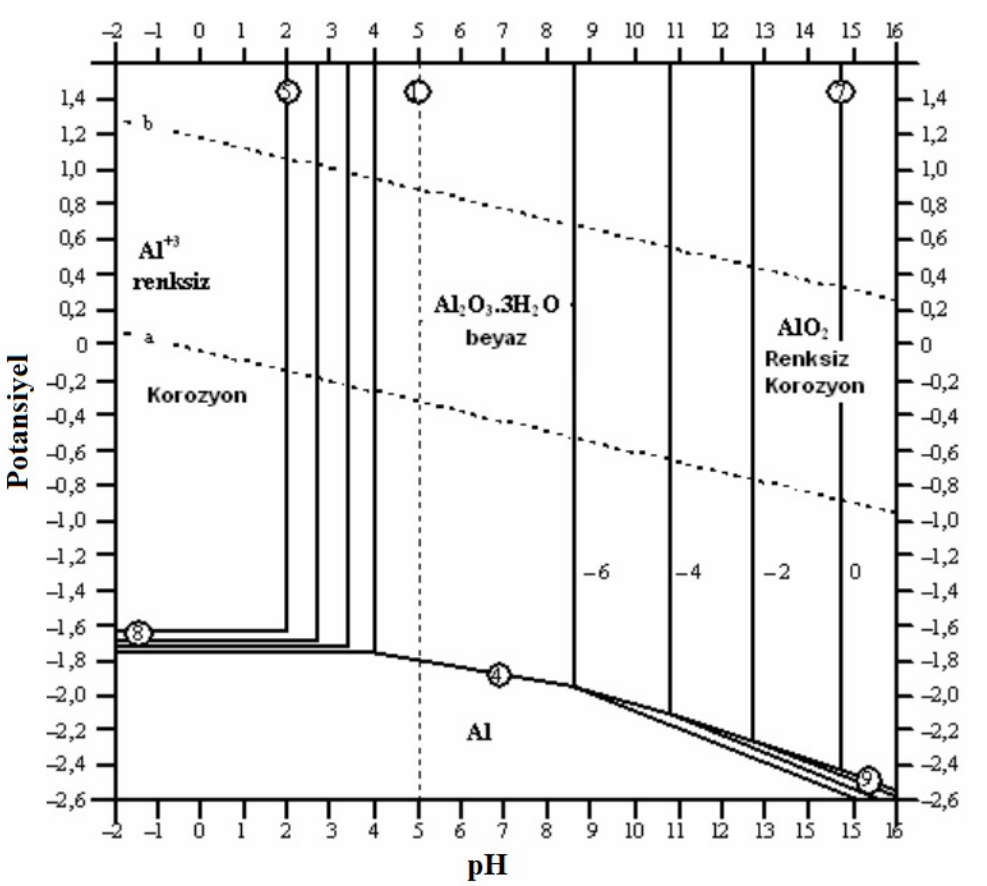
Alüminyum alaşımları birkaç farklı yolla korozyona uğrayabilir. Alüminyum korozyonunun yolunu veya formlarını tanımak, her sorun için uygun çareyi belirlemede önemli bir adımdır. Bir metal sulu bir ortama yerleştirildiğinde üç şekilde davranabilir: paslanır, bağışıklık gösterir veya pasifleşir. Ortamın asitlik veya alkalilik seviyesi, alüminyum alaşımlarının korozyon davranışını önemli ölçüde etkiler [76].

Alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, aşağıdakileri içeren çeşitli faktörlerle ilgilidir:

- Metal bileşimi
- Kullanıldığı ortamın türü
- Sıcaklık ve nem dahil hizmet koşulları
- Ürünlerin birleştirilmesinde kullanılabilecek yöntem
- Yapının amaçlanan hizmet ömrü ve bakım programı.

Pourbaix diyagramları, korozyon olaylarının incelenmesinde değerli bilgiler sağlayabilir. Alüminyum alaşımları üzerindeki koruyucu oksit filmlerin termodinamik kararlılığı için koşullar, Pourbaix diyagramı ile ifade edilir (Şekil 2.6). Bu diyagram, potansiyel ve pH'ın bir fonksiyonu olarak alüminyum türlerinin termodinamik kararlılığını göstermektedir. pH (x ekseni), düşük pH'ta asidikten yüksek pH'ta alkaline kadar değişir. Su stabilitesi bölgesi,

(a) ve (b) etiketli kesikli çizgilerle sınırlandırılmıştır. Çizgi (a), altında suyun artık kararlı olmadığı ve hidrojen (H_2) ve OH^-'ye (alkalizasyon) ayrıştığı hidrojen çizgisidir; ve çizgi (b), üzerinde suyun kararsız olduğu ve oksijen (O_2) ve H^+'ya (asitleşme) ayrıştığı oksijen çizgisidir [76].



Şekil 2.6 : Alüminyumun pourbaix diyagramı [76].

Alüminyum asidik ortamlarda Al^{+3} iyonları olarak, alkali ortamlarda ise AlO_2^- iyonları olarak çözünür.

$$Al_2O_2 + H_2O \rightarrow 2AlO_2^- + 2H^+ \quad (2.15)$$

Nötr çözeltilerde (pH aralığı yaklaşık 4-8.5), hidroksit çözünmez ve bu da alüminyum yüzeyi pasif hale getirir. Bununla birlikte, bu aralığın sınırları sıcaklığa, alüminyum yüzeyinde bulunan oksit filmin spesifik formuna ve alüminyum ile çözünür kompleksler veya çözünmeyen tuzlar oluşturabilen maddelerin varlığına göre biraz değişir[76].

Alüminyum alaşımlarının korozyonunu yöneten elektrokimyasal denklemler 2.16 – 2.18'dir. Anodik çözünme için reaksiyon, denklem (2.16)'da gösterilmiştir. Bununla birlikte, eğer oksijen mevcutsa, katodik reaksiyon, denklem (2.17)'de gösterildiği gibi oksijenin hidroksil anyonlarına indirgenmesini içerir. Katottaki oksijen indirgemesi, alüminyum matriste demir veya bakır çökeltileri gibi safsızlıklar üzerinde meydana geldiğinde oldukça hızlı bir reaksiyondur, dolayısıyla bu nedenle, tek fazlı alüminyum alaşımları genellikle ikinci faz intermetalik parçacıklar içeren alüminyum alaşımlarından daha fazla korozyon direncine sahiptir. Denklem 2.18'de oksijen yokluğunda, sudaki ikinci olası katodik reaksiyon hidrojen oluşumu gösterilmiştir[76].

$$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-} \quad \text{(anodik reaksiyon)} \tag{2.16}$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \quad \text{(katodik reaksiyon)} \tag{2.17}$$

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2 \quad \text{(katodik reaksiyon)} \tag{2.18}$$

Genel olarak, bir metalin korozyonu beş koşul karşılandığında ilerler. Aktif bir korozyon bölgesi, bir anot, katodik, anot ve katot arasındaki sürekli elektrik teması, sürekli elektrolit ve O_2, H_2O veya H_2 gibi bir katodik reaktandan oluşur [76].

Alüminyum alaşımları binalarda, ticari araçlarda, gemi yapımı, dış mekan kurulumları ve otoyol ekipmanlarındaki uzun yıllara dayanan deneyim, kentsel, deniz ve diğer zorlu ortamlara maruz kaldıklarında üstün korozyon direncini göstermiştir [45].

2.6.1. Üniform Korozyon (Homojen Dağılımlı – Eşit Dağılımlı)

Üniform korozyon; tüm yüzey alanı veya toplam alanın büyük bir kısmı üzerinde eşit olarak ilerleyen üniform incelme sergileyen bir korozyon işlemidir. Alüminyumun üniform korozyonu, oldukça asidik veya alkali ortamlar gibi özel durumlar dışında nadirdir. Bununla birlikte, yüzey oksit filmi, fosforik asit veya sodyum hidroksit gibi çevrede çözünürse, alüminyum sabit bir oranda üniform olarak çözünür. Alüminyum alaşımları söz konusu olduğunda, kimyasal bileşimdeki, faz farklarındaki, soğuk iş miktarındaki vb. küçük farklılıklar nedeniyle bir alüminyum alaşım parçasının yüzeyinde elektrik potansiyelinde farklılıklar oluşabilir. Bu farklılıklar, her biri bir anot ve katot içeren küçük korozyon hücreleri oluşturur. Korozyon, metal tükenene veya yüzeyde oluşan korozif film elektrolite bir bariyer oluşturana kadar devam eder. Yapılar üzerindeki koruyucu kaplama sistemlerinin bozulması genellikle bu korozyon biçimine yol açar. Genel korozyon, genellikle tekdüze bir kimyasal bileşime ve mikro

yapıya sahip metal yüzeylerde meydana gelir. Çözünme en çok saf alüminyumda üniformdur ve bir sonraki en üniform seyreltik alaşımlar ve ısıl işlem görmeyen alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen alaşımlar, özellikle kalın kesitler aşındırıldığında, değişken çözünme hızları, alaşım elementlerinin katı çözelti konsantrasyonunda ve kurucu parçacıkların dağılımında kalınlık değişimlerine neden olduğundan, genellikle bir miktar yüzey pürüzlülüğü gösterir [45].

2.6.2. Oyuklanma (Pitting) Korozyonu

Koruyucu filmli çoğu metalde oyuklaşma meydana gelebilir, ancak bu özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının karakteristiğidir. Malzemede boşlukların, yani "deliklerin" üretildiği lokalize bir korozyon şeklidir. Çukurlaşma korozyonu, birincil olarak, aşındırıcı bir ortamla temas halinde olan metal yüzeyler üzerindeki bitişik alanlar arasındaki tane yapısındaki değişikliklerden kaynaklanır. Alüminyum alaşımları için, oyuklaşma korozyonunun intermetalik bileşiklerde başladığı bulunmuştur [45]. Bu nedenle, alaşımların bileşimine ve çevreye bağlı olarak, oyuk korozyonu tercihen farklı metaller arası parçacık tiplerinde başlayabilir ve farklı elektrokimyasal davranışlarla sonuçlanabilir. Çukurlaşma ilk olarak, yüzeyi lekeleyen, toza benzer beyaz veya gri toz halinde bir birikinti olarak fark edilir. Yüzeydeki birikinti kaldırıldığında, yüzeyde çukurlar görülebilir. Bu çukurlar, nispeten sığ girintiler veya küçük çaplı daha derin oyuklar olarak görünebilir. Bireysel çukurun morfolojisi, saldırının doğası ve yoğunluğu tarafından kontrol edilir. Alüminyum ve alaşımları için genellikle iki tip çukur morfolojisi gözlenir; kristalografik ve yarı küresel çukurlar. Örneğin, hidroklorik asitte, kristalografik oryantasyondaki tercihli saldırı nedeniyle kübik çukurlar oluşur; nemin mevcut olduğu yerde, saldırı {111} yönünde yoğunlaşır ve oktahedral çukurlar oluşur. Neredeyse nötr klorür içeren ortamlarda, çukurların ağızları dairesel olma eğilimindedir ve enine kesitler kabaca yarım küre şeklindedir. Agresif bir anyonun varlığı, oyuklaşma korozyonunun meydana gelmesi için gerekli bir koşuldur. Birçok çalışma, alüminyum ve alaşımları için bu tür agresif anyonların şunları içerdiğini göstermiştir; Cl^- , Br^- , I^- , ClO_4 - , IO_3 $^-$, NO_3 $^-$, SO_4 $^{-2}$ [45].

Çukur başlatma süreci birkaç adıma ayrılabilir: indüksiyon periyodu, çukur başlatma ve yayılma süreçleri. Her adım bastırılabilir ve bu nedenle çukur geri dönüşümü meydana gelebilir. Çukurlaşma, koşullar son derece elverişsiz ise, kısa bir süre içinde birkaç milimetreye nüfuz edebilir. Dört farklı ve ardışık aşama açısından tanımlanabilir [45]:

- Pasif film üzerinde, pasif filmin sınırında ve çözeltide meydana gelen işlemler.
- Bir filmde görünür mikroskobik değişiklikler olmadığında, pasif film içinde meydana gelen işlemler.
- Kritik oyuklaşma potansiyelinin altında başlayıp kısa bir süre için büyüyen ve ardından yeniden pasifleşen yarı kararlı çukurların oluşumu (bu, oyuklaşmada bir ara adımdır)
- Belirli bir potansiyelin üzerinde kararlı çukur büyümesi, kritik çukurlaşma potansiyeli olarak adlandırılır.

Cl^- gibi agresif anyonlara maruz kaldığında alüminyumun hızlı anodik çözünmesi, klor iyonunun alüminyum ve alaşımları üzerinde oluşan pasif oksit filmlerin doğasını etkileme kabiliyetinden kaynaklanıyor gibi görünmektedir. Genellikle pasif filmin (oksitteki zayıf bir noktadan) yerel olarak parçalanmasıyla başlar ve başladıktan sonra çukur içindeki reaksiyonlar pH'ı düşürür ve klorür konsantrasyonunu arttırır ve bu şekilde reaksiyonu sürdürür. Çukur anottur, nüfuz etme noktasını çevreleyen etkilenmemiş alan (koruyucu oksitteki kusur), elektroliti aşındırıcı çözelti olan (agresif bir anyon (örn. Cl^-) içeren) bir hücrenin katodudur. Koruyucu filmlerle kaplı alüminyum üzerinde, katodik reaksiyonlar için mevcut yüzey alanı, genellikle koruyucu filmdeki kusurlarda başlatılan anodik reaksiyon için mevcut olana kıyasla çok büyüktür. Sonuç olarak, katodik yüzeyin birim alanı başına akım düşük kalır ve metal yüzeyin geniş alanları agresif çözeltideki (örn. oksitleyici madde) katodik reaksiyon hızlandırıcılara maruz kalabilir ve böylece anodik reaksiyonu uyarabilir. Anodik akım yoğunluğu yüksektir ve korozyon ürünleri reaksiyonu bastırmadığı sürece yüzeyde bir çöküntü oluşturmak için yeterli metal kısa sürede uzaklaştırılır. Çoğu durumda oksijen, koruyucu oksit filmler oluşturmak için korozyon tarafından üretilen alüminyum iyonlarıyla birleşir. Bununla birlikte, mevcut oksijen yetersizse veya oluşan korozyon ürünü koruyucu değilse, çukur büyür ve kısa sürede oksijenin kolayca yenilenemediği ve dolayısıyla kısa sürede tükendiği bir boşluk oluşur. Ayrıca korozyon akımı, mevcut herhangi bir klorür iyonunun anoda göç etmesine neden olur. Bu iyonlar, halen mevcut olabilecek herhangi bir filmin koruyucu özelliklerini yok etme eğilimindedir ve ayrıca çukurdaki çözeltiyi asitleştirir. Çukurdaki büyük katodik ve küçük anodik alanlar, oksijen tükenmesi, klorür birikimi ve çözeltinin asiditesinin kombinasyonu, yoğun şekilde lokalize bir saldırı biçimi üretir. Korozyon hızına ilişkin genel sonuç, baskın olanın anodik geciktirme mi yoksa katodik uyarım mı olduğuna bağlıdır [77].

2.6.3. Aralık (Crevise) Korozyonu

Çatlak korozyonu, korozif saldırının lokalize bir şeklidir. Genellikle oksijen konsantrasyonu hücre etkilerinden dolayı, aşınma yüzeyleri arasında (örneğin dişli veya flanşlı bağlantılarda) meydana gelen özel bir çukurlaşma şekli olarak düşünülebilir. Bu korozyon şekli genellikle mikro-çevre düzeyinde durgun bir çözelti ile ilişkilendirilir. Bu tür durgun mikro ortamlar, contalar, rondelalar, yalıtım malzemeleri, bağlantı elemanları kafaları, yüzey birikintileri, dağılmış kaplamalar, dişler, bindirmeli bağlantılar ve kelepçeler altında oluşan yarıklarda (korumalı alanlar) meydana gelme eğilimindedir. Çatlak (veya birikinti saldırısı) oluşturabilen birikintilere örnek olarak kum, kir, korozyon ürünleri ve diğer katılar verilebilir. Tortu bir kalkan görevi görür ve durgun bir durum yaratır [45]. Çatlak korozyonu, yarık içindeki yerel kimyasal değişikliklerle başlar:

- Çatlakta inhibitörün tükenmesi
- Çatlaktaki oksijenin tükenmesi
- Çatlakta asit koşullarına geçiş
- Çatlakta agresif iyon türlerinin (örn. klorür) birikmesi

Genellikle, çatlak korozyonunun oksijen konsantrasyonu hücre etkilerinden kaynaklandığı düşünülür. Aynı zamanda yarıkta asitlik değişiklikleri, yarıkta iyonların birikmesi veya bir inhibitörün tükenmesi nedeniyle de ortaya çıkar. Bu, oksijen konsantrasyon hücresinin bulunmadığı havası alınmış klorür çözeltilerinde paslanmaz çelik gibi malzemelerde neden aralık korozyonunun gözlemlendiğini açıklar. Bu durumda, "tıkalı hücre" olarak adlandırılan korozyon süreçleri (asitliğin artması ve çatlakta iyonların birikmesi ile), oyuk korozyon sürecine benzer şekilde işlevseldir.

Çatlak korozyonu, suyun konveksiyonunun engellendiği ve ortamdan farklı olan belirli aralık kimyasının gelişmesine izin verildiği dar metalden metale veya metal olmayandan metale olan boşluklarda meydana gelir. Dökme elektrolitte klorürler gibi agresif iyonlar bulunmalıdır. Çatlağın dibindeki oksijen tüketilir ve oksijeni tükenmiş bölgeye bitişik bir anodik alan gelişir. Çatlak korozyonu, başlangıç aşamasından sonra pH'ın kademeli olarak düşmesi ve aralık içindeki klorür konsantresi iyonunun artmasıyla çukur korozyonuna benzer bir şekilde gelişir. Çok kararlı alüminyum oksit nedeniyle, agresif iyonların yokluğunda çatlak korozyonu

normalde alüminyum üzerinde ciddi bir sorun değildir. Bununla birlikte, bir yarıkta kılcal kuvvetler ve aşındırıcı veya higroskopik türlerle birikintiler nedeniyle nem birikmesi olasılığı vardır. Bu şekilde, çatlakta sonunda oksit tabakasını parçalayabilen sürekli bir aşındırıcı ortam olacaktır [45].

Çatlak korozyonu, alüminyumun depolanması sırasında da meydana gelebilir, örneğin, bitişik yüzeyler arasında sıkışan suyun neden olduğu bir yüzey aşınmasının sonucu olarak koyu lekeler oluşturan su lekesi. En çok sac ürünlerde görülür ve su lekeli alüminyumun mekanik bütünlüğü nadiren bozulduğu için estetik bir problemdir. Diğer bir sorun da, aşırı durumlarda yapıyı deforme edebilen dar yarıklarda korozyon ürünlerinin birikmesidir.

2.6.4. Taneler Arası Korozyon

Taneler arası korozyon, bazı alaşımların tane sınırları boyunca veya tane sınırlarının hemen bitişiğinde lokalize bir saldırı olurken, tanelerin büyük kısmı belirli koşullar altında saldırıya uğramaz. Isıl işlem sırasında, alüminyum alaşımları, alaşım elementlerini çözen bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Metal soğudukça alaşım elementleri birleşerek diğer bileşikleri oluşturur. Soğutma hızı yavaşsa, ağırlıklı olarak tane sınırlarında oluşurlar. Oluşan bileşikler, tane sınırlarına bitişik metalden elektrokimyasal olarak farklılık gösterir. Bu değiştirilmiş bileşikler, bileşimlerine bağlı olarak bitişik alanlara anodik veya katodik olabilir. Bir elektrolitin varlığı, yalnızca korozyonun gerçekleşmesi için olan döngüyü tamamlar ve böylece anodik alana bir saldırı ile sonuçlanır. Bu saldırı nispeten hızlı olabilir ve görünür bir kanıt olmadan var olabilir. Bu tane sınırları boyunca oluşan korozyon ürünleri, korozyon ilerledikçe taneler arasında basınç uygular; yüzeyin hemen altındaki tane sınırlarında bulunan genişleyen korozyon ürünlerinin kuvveti ile metalin yüzey tanelerinin kaldırılmasıyla kendini gösterir. Taneler arası saldırının bu ileri aşaması, pul pul dökülme korozyonu olarak adlandırılır. Bu tür ciddi korozyon durumlarını derhal düzeltmek için tanıma ve gerekli düzeltici eylem hayati önem taşır. Bu tür bir saldırı, korozyon ürünlerinin hacmi yüzeyde birikmeden ve hasar belirgin hale gelmeden önce yapısal elemanları ciddi şekilde zayıflatabilir. Alüminyum alaşımları, ısıl işleme bağlı olarak taneler arası korozyona duyarlı olabilir [45].

Alüminyum alaşımlarının taneler arası korozyona duyarlılığını anlamak için araştırmacılar [4], AA2xxx alaşımının 1 M NaCl çözeltisindeki korozyon davranışını incelediler. Alaşım matrisinde karşılaşılan Al_2CuMg sertleşme çökeltilerinin, dispersoit içermeyen bir bölge ile çevrelendiğini bulmuşlardır. Dolayısıyla, galvanik çiftler; dispersoid

içermeyen bölge/alaşım matrisinin geri kalanı ve dispersoid içermeyen bölge/S fazı partikülleri, partikülleri çevreleyen matrisin çözünmesine neden olur. Al_2Cu ve Al_2CuMg gibi tane sınırları civarında intermetalik çökeltilerin oluşumu, bu bölgelerin Cu içeriğinin azalmasına neden olur [45]. Böylece, tane sınırları tane kütlesinden daha anodik hale gelir. Bu nedenle, belirli ısıl işlemlere tabi tutulan bakır içeren alüminyum alaşımları (AA2xxx serisi), taneler arası korozyona duyarlıdır.

Yapılan başka bir çalışmada [77], taneler arası korozyonun, alüminyum alaşımları üzerinde kristalografik veya yapı-ayrışma olmak üzere iki biçimde ilerleyebileceğini gösterdi. İlki, düşük alaşımlı veya saf alüminyumun karakteristiğidir ve yeniden kristalleştirme işlemiyle kontrol edilir [77]. Büyüyen yeniden kristalleşmiş tanelerin yüksek açılı sınırları, kısmen pıhtılaşan, böylece sınırların termodinamik kararsızlığına neden olan çok sayıda boşluk biriktirir ve elektrot potansiyelleri, aktif korozyon potansiyeline yaklaşır [77]. İkincisi, orta veya yüksek alaşımlı alüminyumun karakteristiğidir ve aşırı doymuş katı çözeltilerin ayrışmasının özellikleri tarafından kontrol edilir [77].

Alüminyum alaşımlarında, taneler arası saldırı genellikle, ikinci faz, intermetalik çökeltilerin yoğunlaştığı tane sınırları boyunca yerel hücrelerin oluşmasından kaynaklanır [45]; bunlar, tanenin kütlesine göre ya anodik ya da katodiktir. Taneler arası korozyona duyarlılık esas olarak alaşım bileşimine ve ısıl işleme bağlıdır. AA1xxx ve AA3xxx serisi alüminyum alaşımları, tane sınırı çökeltileri oluşmadığından veya çevredeki metale benzer bir çözelti potansiyeline sahip olduklarından, genellikle taneler arası saldırıya duyarlı değildirler. Bu korozyon şekli çok tehlikeli olabilir, çünkü saldırı malzeme boyunca fark edilmeden ilerleyebilir ve metalin mekanik özelliklerini bozabilir ve görünür herhangi bir dış korozyon belirtisi olmadan kırılmaya neden olabilir.

2.6.5. Pul Pul Dökülme Korozyonu

Pul pul dökülme korozyonu, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları ile ilişkili şiddetli taneler arası korozyonun başka bir şeklidir. Genel olarak, pul pul dökülme korozyonu, üç faktörün bir kombinasyonu olduğunda meydana gelir: oldukça yönlü bir mikro yapı, tercihli bir anodik yol ve belirli bir aşındırıcı ortam türü. Pul pul dökülme korozyonu, yuvarlanma yönünde yüzeye paralel katmanlar halinde ilerler, katmanlar, korozyon ürünlerinden gelen basınç nedeniyle pul pul dökülür. Yüzeyin hemen altındaki tane sınırlarında bulunan genişleyen korozyon ürünlerinin kuvveti vasıtasıyla metalin yüzey tanelerinin “yukarı kalkması” ile

kendini gösterir. Korozyon ürünleri, metali malzemenin gövdesinden uzaklaştırmaya zorlar ve yeniden kristalleşmemiş alaşımlarda katmanlı veya yaprak benzeri bir görünüme yol açar. Pul pul dökülme korozyonu, taneler arası korozyonun gözle görülür bir kanıtıdır ve tane kalınlıklarının genellikle haddelenmiş formlardan daha az olduğu ekstrüde kesitlerde daha sık görülür. Uzatılmış, düzleştirilmiş tanelerden oluşan bir mikro yapıya sahip, ekstrüde edilmiş veya başka bir şekilde yoğun şekilde işlenmiş alaşımlar bu hasara özellikle eğilimlidir. Bu korozyon şekli, tane yapısının belirgin bir yönlülüğü ile ilişkilidir. Uçak malzemelerinde, pul pul dökülme korozyonu en yaygın olarak ısıyla işlenebilir Al-Zn Mg-Cu, Al-Cu-Mg ve Al-Mg alaşımlarında görülür. Al-Mg-Si alaşımlarında ve bazı soğuk işlenmiş AA5xxx alaşımlarında pul pul dökülme korozyonu da gözlenmiştir. Pul pul dökülmeye karşı maksimum direncin genellikle gerilimli korozyon çatlamasına karşı maksimum dirençten önce elde edildiği ısıl işlem konusunda özen gösterilmelidir [45].

Taneler arası korozyona duyarlı alaşımlar, aşırı derecede soğuk işlendiğinde pul pul dökülme korozyonuna da maruz kalabilir. Saldırı genellikle taneler arası korozyon kadar ciddi değildir çünkü gözlemlenmesi daha kolaydır. Bununla birlikte, montaj sırasında soğuk işlemeye tabi tutulan ve daha sonra tane sınırında çökelmeye yol açabilecek hizmet koşullarına maruz kalan bağlantı elemanları ve perçinlerde olduğu gibi, yerel etkiler dramatik olabilir. Aşırı durumlarda, bağlantı elemanının soğuk işlenmiş kafası tamamen ayrılabilir.

2.6.6. Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, ortak bir elektrolit varlığında elektriksel olarak birbirine bağlanan iki farklı metal, alaşım veya kaplama arasında gerçekleşir. Galvanik etki, metal bileşimindeki farklılıklar nedeniyle ve aynı metal için tane sınırları bölgesindeki değişen bileşimin bir sonucu olarak da ortaya çıkabilir. Her metal bir elektrolit içine yerleştirildiğinde diğer metallerden farklı bir potansiyele sahiptir, bu nedenle bir elektrokimyasal korozyon hücresi oluşturur [45]. Alüminyum alaşım yüzeyinin veya çevresinin hemen hemen her türlü homojenliğindeki eksiklik, potansiyelde bir farka neden olarak bir galvanik korozyon saldırısını başlatabilir. Alaşım yüzeyleri arasındaki bu potansiyel farkın büyüklüğü, metalin hangi alanlarının katot ve hangi alanların anot olduğunu ve anotta korozyonun meydana gelme hızını belirleyecektir. Benzer olmayan metaller arasındaki temas, iki metalin potansiyellerindeki farklılıktan dolayı galvanik akımın akmasına da neden olabilir.

Galvanik korozyonun oluşabilmesi için aşağıdaki üç koşulun mevcut olması gerekir:

- Elektrokimyasal olarak farklı iki metal mevcut olmalıdır.
- İki metal arasında elektriksel olarak iletken bir yol olmalıdır.
- Metal iyonlarının daha anodik metalden daha katodik metale geçmesi için elverişli bir yol olmalıdır.

Daha katodik bir metalle birleştiğinde alüminyumun korozyon derecesi, galvanik hücrede polarize olma derecesine bağlıdır. Daha negatif (aktif) potansiyele sahip metal veya alaşım, hızlandırılmış korozyona maruz kalma eğilimindedir, yani malzeme anodik çözünme ile tüketilir, daha pozitif (asil) potansiyele sahip metal veya alaşım ise pratikte etkilenmez.

Metalleri veya alaşımları sulu bir ortamdan veya atmosferden korumak için, bu tür metallerin veya alaşımların yüzeyine çeşitli kaplamalar uygulanmıştır. İnce bir nem filmi olabilen bir elektrolitin varlığında, kaplama ile alt tabaka arasındaki galvanik etki, çoğu kaplama tarafından sunulan korumanın belirlenmesinde önemli bir faktördür. Alüminyumun halojenür olmayan tuzların çözeltilerinde daha katodik metaller tarafından galvanik korozyonu genellikle halojenür çözeltilerinden daha azdır, çünkü alüminyumun çukurlaşma potansiyeline polarize olma olasılığı daha düşüktür. Herhangi bir ortamda, galvanik korozyon katodik reaktanın uzaklaştırılmasıyla indirgenir [45].

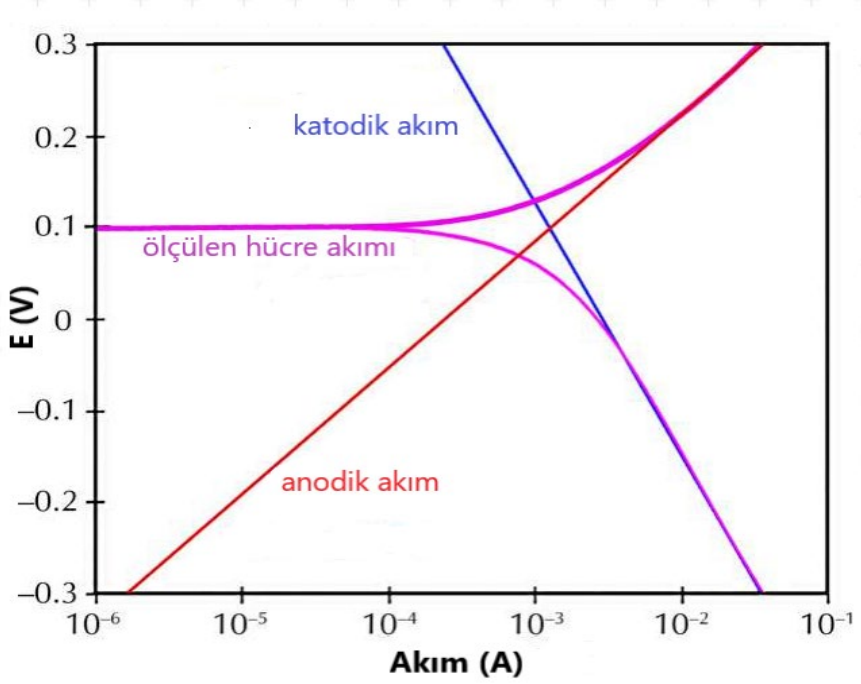
2.7. KOROZYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Korozyon ölçümü, malzeme seçimi amacıyla esastır. Bir metalin çevresi ile uyumluluğu, güvenilir performansı için birincil gerekliliktir. Belirli bir ortam, belirli bir uygulama için malzemelerin değerlendirilmesi ve seçimi için veya uygun oldukları ortamları belirlemek için yeni veya eski bir metal veya alaşımların değerlendirilmesi için korozyon oranı ölçümü gerekli olabilir. Genellikle aşındırıcı ortam, daha az agresif hale getirmek için işlenir ve belirli bir malzemenin işlenmemiş ortamlardaki korozyon hızı ölçümleri, işlemin etkinliğini yansıtır. Ayrıca, korozyon mekanizmalarının incelenmesinde korozyon hızı ölçümü de önemlidir[78].

Korozyon, metal parçanın kütlesini (veya ağırlığını) kaybetmesi ve incelmesi sonucu metalin çözünmesini içerir. Korozyon hızı ifadeleri bu nedenle ağırlık kaybına dayalıdır.

Ağırlık kaybına dayalı en yaygın kullanılan ağırlık ifadesi (birim zamanda ve birim yüzey alanında oluşan ağırlık kaybı) mdd = mg/dm^2.gün şeklindedir [78]. Korozyon hızı ölçüm yöntemlerinden biri olan ağırlık kaybı yöntemi, uzun ölçüm sürelerine ihtiyaç duyulması ve bu süredeki ortalama hızı vermesi nedeni ile dezavantaja sahiptir[79].

Korozyon normalde karşıt elektrokimyasal reaksiyonlar arasındaki denge tarafından belirlenen bir hızda meydana gelir. Bir reaksiyon, bir metalin oksitlendiği ve elektronların metale salındığı anodik reaksiyondur. Diğeri ise bir çözelti türünün (çoğunlukla O_2 veya H^+) indirgenerek metalden elektronların uzaklaştırıldığı katodik reaksiyondur. Bu iki reaksiyon dengede olduğunda, her reaksiyondan elektron akışı dengelenir ve net elektron akışı (elektrik akımı) oluşmaz. İki reaksiyon, bir metal üzerinde veya elektriksel olarak bağlı iki farklı metal (veya metal bölgesi) üzerinde gerçekleşebilir. Şekil 2.7 'de bu süreç gösterilmektedir. Dikey eksen elektriksel potansiyeli, yatay eksen ise mutlak akımın logaritmasını gösterir. Anodik ve katodik reaksiyonlar için teorik akım düz çizgilerle temsil edilir. Eğri çizgi toplam akımdır: anodik ve katodik akımların toplamı. Bu, metalin potansiyelini potansiyostatınızla süpürdüğünüzde ölçtüğünüz akımdır. Eğrideki keskin nokta aslında reaksiyon anodikten katodik veya tersi yönde değiştikçe akımın polariteyi tersine çevirdiği noktadır. Keskin nokta, logaritmik bir eksen boyunca çizimden kaynaklanır. Korozyon deneyi sırasında kaydedilmesi gereken akım değerlerinin geniş aralığı nedeniyle logaritmik eksenin kullanılması gereklidir. Pasiflik olgusu nedeniyle, bir korozyon deneyi sırasında akım genellikle altı kat büyüklükte değişir [80].



Şekil 2.7: Akımın anodik ve katodik bileşenlerini gösteren korozyon süreci [80].

Metalin potansiyeli anodik ve katodik reaksiyonların dengede tutulmasını sağlayan araçtır. Her yarım reaksiyondan gelen akımın metalin elektrokimyasal potansiyeline bağlı olduğuna dikkat edin. Anodik reaksiyonun metale çok fazla elektron saldığını varsayalım. Aşırı elektronlar metalin potansiyelini daha negatife kaydırır, bu da anodik reaksiyonu yavaşlatır ve katodik reaksiyonu hızlandırır. Bu, sistemin başlangıçtaki tedirginliğini ortadan kaldırır [80].

Metale elektriksel bağlantı olmadığında metalin varsaydığı denge potansiyeline açık devre potansiyeli (E_{oc}) denir. Açık devre potansiyelinde toplam anodik akım ile toplam katodik akım birbirine eşit durumdadır. Açık devre potansiyeli, elektrolite daldırıldığında metal çalışma elektrodu ile referans elektrodu arasındaki potansiyel fark olarak da tanımlanmaktadır. E_{oc}, değeri potansiyostat tarafından değil, elektrokimyasal sistemin iki veya daha fazla yarı reaksiyonunun potansiyelleri tarafından belirlenen bir karma potansiyeldir. E_{oc}, işlem sırasında korozyonun meydana geldiği yerdir. E_{oc}, neredeyse tüm elektrokimyasal korozyon deneyleri için başlangıç noktasıdır. Aşınan sistemin "kararlı duruma" ulaştığını ve deneyin başlayabileceğini belirtmek için kararlı bir E_{oc} alınır. Bu kararlı duruma gelme durumu, dakikalar veya günler gerektirebilir. E_{oc} stabilize olmadıysa deneye başlanmaz. E_{oc}'ye göre pozitif uygulanan voltaj, oksidasyon (korozyon) reaksiyonunu hızlandıracaktır. E_{oc}'ye göre negatif uygulanan bir voltaj, indirgeme reaksiyonunu hızlandıracaktır [81].

Çoğu elektrokimyasal korozyon deneyinde ilk adım E_{oc} ölçümüdür. E_{oc}'deki anodik veya katodik akımın değerine korozyon akımı I_{corr} denir. Eğer I_{corr}'u ölçebilseydik, bunu metalin korozyon hızını hesaplamak için kullanabilirdik. Ne yazık ki I_{corr} doğrudan ölçülemez. Ancak elektrokimyasal teknikler kullanılarak tahmin edilebilir. Herhangi bir gerçek sistemde I_{corr} ve korozyon hızı, metal türü, çözeltinin bileşimi, sıcaklık, çözeltinin hareketi, metal geçmişi ve diğerleri dahil olmak üzere birçok sistem parametresinin bir fonksiyonudur [80].

Korozyon sürecinin yukarıdaki açıklaması metal yüzeyin durumu hakkında hiçbir şey söylemez. Pratikte birçok metal korozyona uğradıkça yüzeylerinde bir oksit tabakası oluşturur. Oksit tabakası daha fazla korozyonu önlerse metalin pasifleştiği söylenir. Bazı durumlarda pasif filmin yerel alanları bozularak küçük bir alanda önemli metal korozyonunun oluşmasına neden olur. Bu olguya çukurlaşma korozyonu veya basitçe çukurlaşma denir [80].

Korozyon elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla meydana geldiğinden, elektrokimyasal teknikler korozyon süreçlerinin incelenmesi için idealdir. Elektrokimyasal çalışmalarda, korozyona uğrayan bir sistemdeki metali modellemek için birkaç santimetrekarelik yüzey alanına sahip bir metal numunesi kullanılır. Metal numunesi, incelenen sistemdeki metal ortamına özgü bir çözeltiye daldırılır. Ek elektrotlar çözeltiye daldırılır ve tüm elektrotlar potansiyostat adı verilen bir cihaza bağlanır. Potansiyostat, metal numunesinin potansiyelini kontrollü bir şekilde değiştirmenize ve uygulanan potansiyelin bir fonksiyonu olarak akan akımı ölçmenize olanak tanır [80].

Günümüzde korozyon hızı ölçüm yöntemleri arasında polarizasyon eğrileri oluşturulması temeline dayanan galvanostatik ve potansiyostatik olmak üzere iki yöntem yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hem kontrollü potansiyel (potansiyostatik) hem de kontrollü akım (galvanostatik) polarizasyonu faydalıdır. Polarizasyon potansiyostatik olarak yapıldığında akım ölçülür, galvanostatik olarak yapıldığında ise potansiyel ölçülür. Galvanostatik yöntemlerden çok daha yaygın olan kontrollü potansiyel yöntemlerine odaklanacaktır. Zamana karşı açık devre potansiyeli, elektrokimyasal gürültü, galvanik korozyon ve diğer birkaç durum dışında, denge korozyon sürecini bozmak için potansiyostatik mod kullanılır. Çözeltideki bir metal numunesinin potansiyeli E_{oc}'den uzaklaştırıldığında buna numunenin polarizasyonu denir. Metal numunesinin tepkisi (yani ortaya çıkan akım) polarize edilirken ölçülür. Yanıt, numunenin korozyon davranışına ilişkin bir model geliştirmek için kullanılır [80].

Elektrokimyasal çalışmalarda, korozyona uğrayan bir sistemdeki metali modellemek için yüzey alanı birkaç santimetrekare olan bir metal numunesi kullanılır. Metal numunesi, incelenmekte olan sistemdeki metal ortamına özgü bir çözeltiye daldırılır. Ek elektrotlar çözeltiye daldırılır ve tüm elektrotlar potansiyostat adı verilen bir cihaza bağlanır. Bir potansiyostat, metal numunenin potansiyelini kontrollü bir şekilde değiştirmenize ve uygulanan potansiyelin bir fonksiyonu olarak akan akımı ölçmenize olanak tanır [80].

Bazı durumlarda potansiyeli değiştirdiğimizde önce metali pasifleştiririz, ardından çukurlaşma korozyonunun oluşmasına neden oluruz. Bir potansiyostatın akıllıca kullanılmasıyla, akımın potansiyele veya zamana göre ölçüldüğü bir deney, Ecorr'daki Icorr'u, pasifleşmenin meydana gelme eğilimini veya çukurlaşmanın meydana geldiği potansiyel aralığını belirlememize olanak sağlayabilir. Elektrokimya ile çalışılabilen korozyon olaylarının çeşitliliği, çok düşük korozyon hızlarının ölçülebilmesi ve bu ölçümlerin gerçekleştirilme hızı nedeniyle, elektrokimyasal korozyon ölçüm sistemi modern korozyon laboratuvarında standart bir öğe haline gelmiştir [81].

2.7.1. Tafel Ekstrapolasyon

Elektrokimyasal yasaların arasında bulunan Tafel yasası 1905'te Tafel, Nareman, Schmitz ve Emmert tarafından yayımlanmıştır [86]. Kullanım kolaylığı sebebiyle günümüzde sanayide sıklıkla kullanılan elektrokimyasal yasalardan biridir [86]. Kullanım kolaylığının yanı sıra diğer avantajları arasında ölçülemeyecek kadar düşük korozyon hızlarını ölçülebilir kılması, herhangi bir zamandaki korozyon hızını tespit edebilmesi ve tüm bu testlerin çok kısa sürede tamamlanması bulunmaktadır [87]. Klasik Tafel analizi, bir logaritmik akıma karşı potansiyel grafiğin doğrusal bölümlerinin kesişim noktalarına geri döndürülmesiyle gerçekleştirilir. Tafel ekstrapolasyonu, bir elektrokimyasal hücredeki korozyon akımını (I_{corr}) veya korozyon potansiyelini (E_{corr}) ve dolayısıyla korozyon hızını tahmin etmek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Yani bir metalin korozyon hızı elektrokimyasal hücre kullanılarak ölçülebilir. Elektrokimyasal hücre, çalışma elektrotu (metal), yardımcı elektrot ve bir potansiyostata bağlı referans elektrottan oluşur. Tafel grafiği, ölçülen potansiyel ile logaritmik akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi temsil eder. Ekstrapolasyon, parametreleri belirlemek için bir Tafel grafiğinde bilinen bir doğrusal değerler dizisinin genişletilmesini içerir. Ortaya çıkan bu lineer bölgeye Tafel bölgesi adı verilmektedir. Bu lineer bölgenin eğimi Tafel eğimi olarak tanımlanmaktadır. Tafel ekstrapolasyonları manuel olarak veya özel bilgisayar yazılımıyla gerçekleştirilebilir. Harici akımın uygulanmasından önce numunenin potansiyeli aynı kalır ve

bu, ilgili ortamdaki metalin korozyon potansiyeli (E_{corr}) olacaktır. Bu potansiyelde anodik ve katodik reaksiyonlar genellikle minimumdur. Çalışma elektrodunun potansiyeli önceden belirlenmiş bir oranda negatif yönde değiştirilir ve buna karşılık gelen akım değişikliği ölçülür. Benzer ölçümler anodik yönde de gerçekleştirilir. Dolayısıyla eğri, anodik ve katodik akımları temsil eden iki farklı logaritmik çizim çizgisinden oluşur. Ekstrapolasyon, anodik ve katodik grafiklerin doğrusal kısımlarının kesişimlerine kadar uzatılmasıyla gerçekleştirilir. Anodik veya katodik akımın kesişme noktasındaki değeri I_{corr}'dur. I_{corr} değeri, korozyon hızını hesaplamak için matematiksel denklemde kullanılabilir. Ne yazık ki, birçok gerçek dünya korozyon sistemi, doğru ekstrapolasyona izin vermek için yeterli bir doğrusal bölge sağlamaz. Gamry Instruments'ın Korozyon Teknikleri yazılımı gibi çoğu modern korozyon testi yazılımı, Butler-Volmer denklemine daha karmaşık bir sayısal uyum sağlar [80].

Önceki bölümde I_{corr}'un doğrudan ölçülemeyeceğini belirtilmiştir. Çoğu durumda bu değer akım-voltaj verilerinden tahmin edilmektedir. Yaklaşık yarım voltluk bir aralıkta logaritmik akıma karşı potansiyel eğrisi ölçülebilir. Gerilim taraması E_{oc}'ye odaklanmıştır. Daha sonra ölçülen verilerin korozyon sürecinin teorik bir modeline sığdırılması gerekmektedir. Korozyon süreci için kullandığımız model, hem anodik hem de katodik süreçlerin hızlarının, metal yüzeyindeki elektron transfer reaksiyonunun kinetiği tarafından kontrol edildiğini varsaymaktadır. Bu genellikle korozyon reaksiyonları için geçerlidir. Kinetik kontrol altındaki bir elektrokimyasal reaksiyon, Tafel denklemi olan Denklem 2.19'a uyar [80].

$$I = I_0 \, e^{(2.303\,(E-E_0)/\beta)} \tag{2.19}$$

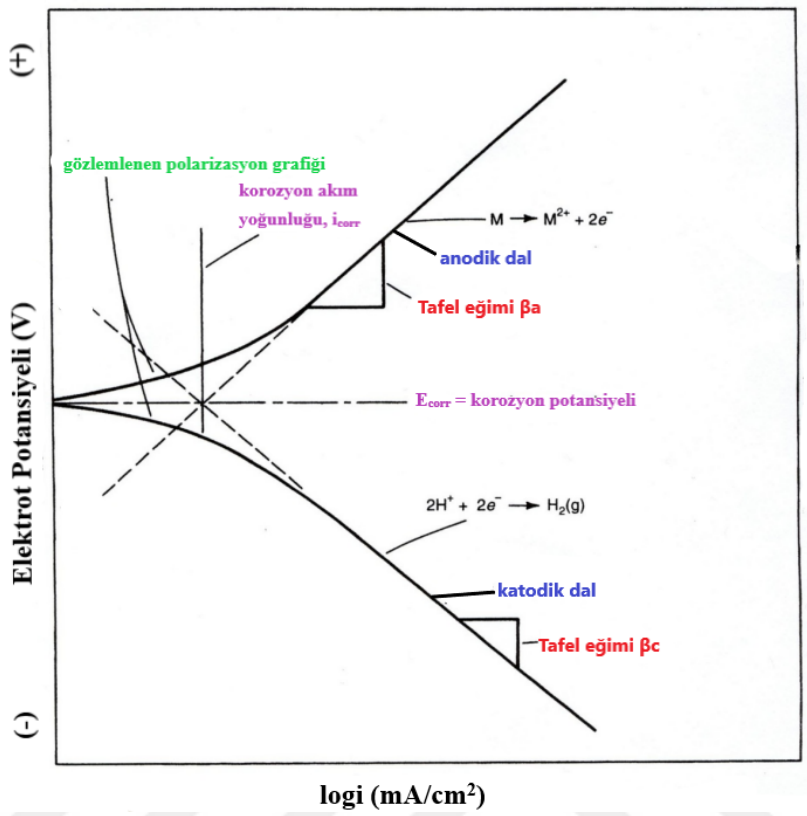
I = reaksiyondan kaynaklanan akım

I_0 = değişim akımı adı verilen reaksiyona bağlı bir sabittir

E = elektrot potansiyeli

E_0 = denge potansiyeli (belirli bir reaksiyon için sabit)

β = reaksiyonun Tafel sabiti (belirli bir reaksiyon için volt/on yıl birimiyle sabittir)



Şekil 2. 8: Karma Potansiyel Sistemde Potansiyel ve Akım Arasındaki Butler-Volmer İlişkisinin Grafiksel Gösterimi [81].

Tafel denklemi izole edilmiş bir reaksiyonun davranışını tanımlar. Korozyon sisteminde iki karşıt reaksiyon vardır: anodik ve katodik. Bir korozyon sistemindeki anodik ve katodik reaksiyonlara ilişkin Tafel denklemleri, Butler-Volmer denklemini (Denklem 2.20) oluşturmak için birleştirilebilir.

$$I = Ia + Ic = I_{corr} [e^{2.303(E-Ecorr) / \beta a} - e^{-2.303(E-Ecorr) / \beta c}] \quad (2.20)$$

I = hücreden amper cinsinden ölçülen akım

I_{corr} = amper cinsinden korozyon akımı

E = elektrot potansiyeli

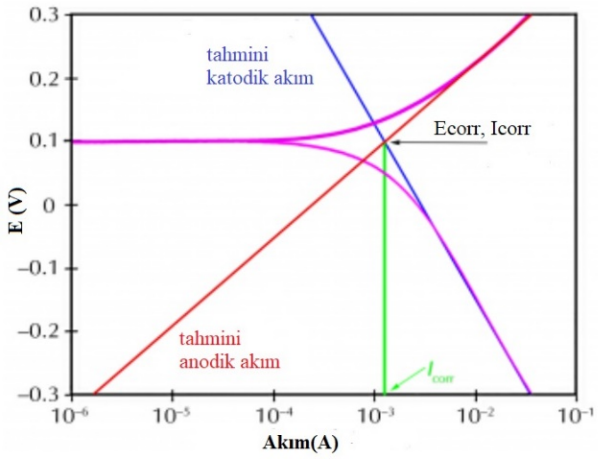
E_{corr} = volt cinsinden korozyon potansiyeli

βa = volt/on yıl cinsinden anodik β Tafel sabiti

βc = volt/on yıl cinsinden katodik β Tafel sabiti

E_{corr}' da her üstel terim bire eşittir. Dolayısıyla hücre akımı beklediğiniz gibi sıfırdır. E_{corr} yakınında, her iki üstel terim de genel akıma katkıda bulunur. Son olarak potansiyel, potansiyostat tarafından E_{corr}' dan uzağa itildiğinden üstel bir terim baskın olur ve diğer terim göz ardı edilebilir. Bu meydana geldiğinde, logaritmik akımın potansiyele karşı grafiği düz bir çizgi haline gelir.

Log I'e karşı E grafiğine Tafel grafiği denir. Şekil 2.9'deki Tafel grafiği doğrudan Butler-Volmer denkleminden oluşturulmuştur. Hücre akım eğrisinin doğrusal bölümlerine dikkat edin.



Şekil 2.9: Klasik tafel analizi [80].

Gamry Instruments'ın Korozyon Teknikleri uygulamasında birçok korozyon sistemi kinetik olarak kontrol edilir ve bu nedenle Denklem 2.20'ye uyar. E_{corr}' un her iki tarafında doğrusal olan logaritmik akıma karşı potansiyel eğrisi, incelenen sistem için kinetik kontrolün göstergesidir. Ancak aşağıdaki gibi komplikasyonlar olabilir:

- Bir reaksiyonun hızının, reaktanların metal yüzeye ulaşma hızıyla kontrol edildiği konsantrasyon polarizasyonu. Çoğunlukla katodik reaksiyonlar, oksijen veya hidrojen iyonunun difüzyonunun kinetik olarak kontrol edilen hızı sürdürmek için yeterince hızlı olmadığı durumlarda, daha yüksek akımlarda konsantrasyon polarizasyonu gösterir.
- Pasivasyona yol açabilecek veya açmayabilecek oksit oluşumu. Bu işlem test edilen numunenin yüzeyini değiştirebilir. Orijinal yüzey ve değiştirilmiş yüzey Denklem 2.20'deki sabitler için farklı değerlere sahip olabilir.

- Bir alaşımın bir bileşeninin tercihli çözünmesi gibi yüzeyi değiştiren diğer etkiler de sorunlara neden olabilir.
- Birden fazla katodik veya anodik reaksiyonun aynı anda meydana geldiği karma kontrol prosesi, modeli karmaşıklaştırabilir. Karışık kontrolün bir örneği, oksijen ve hidrojen iyonunun eşzamanlı indirgenmesidir.
- Son olarak, hücre çözümünüzün direncinden akan hücre akımının bir sonucu olarak meydana gelen potansiyel düşüş, kinetik modelde hatalara neden olur. Bu son etki, eğer çok şiddetli değilse, potansiyostattaki IR telafisi yoluyla düzeltilebilir.

Çoğu durumda yukarıda sıralananlar gibi komplikasyonlar Tafel grafiğinde doğrusal olmamalara neden olur. İyi tanımlanmış bir doğrusal bölge olmadan Tafel grafiğinden elde edilen sonuçları dikkatli kullanın.

Klasik Tafel analizi, logaritmik akıma karşı potansiyel grafiğinin doğrusal bölümlerinin kesişimlerine kadar ekstrapolasyonuyla gerçekleştirilir. Şekil 2.9, analizi gösteren ek açıklamalarla birlikte yeniden basılan Şekil 2.7'dir. Kesişme noktasındaki anodik veya katodik akımın değeri Icorr'dur. Ne yazık ki, birçok gerçek dünya korozyon sistemi, doğru ekstrapolasyona izin verecek yeterli bir doğrusal bölge sağlamamaktadır. Gamry Instruments'ın Korozyon Teknikleri yazılımı gibi çoğu modern korozyon testi yazılımı, Butler-Volmer denklemine daha karmaşık bir sayısal uyum gerçekleştirir. Ölçülen veriler E_{corr}, I_{corr}, βa ve βc değerleri ayarlanarak Denklem 2.18'e uyarlanır. Eğri uydurma yönteminin avantajı, eğrinin tamamen gelişmiş bir doğrusal kısmını gerektirmemesidir.

Denklem 2.20, E_{oc}'ye çok yakın olma potansiyelinin kısıtlanmasıyla daha da basitleştirilebilir. E_{oc}'ye yakın bir yerde akım-gerilim eğrisi düz bir çizgiye yaklaşır. Bu çizginin eğimi direnç birimine (Ω) sahiptir. Bu nedenle eğime polarizasyon direnci R_p denir. Bir R_p değeri, korozyon akımının bir tahminini elde etmek için β katsayılarının bir tahmini ile birleştirilebilir.

Denklem 2.20'deki üstel terimleri bir üslü seri açılımının ilk iki terimine ($e^x=1+x+x^2/2\ldots$) yaklaştırıp basitleştirirsek, Stern-Geary denkleminin bir formunu elde ederiz:

$$I_{corr} = \frac{1}{Rp} \frac{\beta a\, \beta c}{2.303\,(\beta a + \beta c)} \tag{2.21}$$

Polarizasyon direnci (Rp) değeri, Tafel grafiğinin eğiminden aşağıdaki denklemde (Denklem 2.22) verildiği şekilde elde edilebilir.

$$Rp = \frac{\Delta E}{\Delta I} \tag{2.22}$$

Bir polarizasyon direnci deneyinde, hücre voltajı Eoc'ye çok yakın (genellikle ±10 mV) küçük bir potansiyel aralığı boyunca kaydırılırken, bir akım-voltaj eğrisi kaydedersiniz. Eğrinin sayısal uyumu, polarizasyon direnci Rp için bir değer verir. Polarizasyon direnci verileri β katsayılarına ilişkin değerler hakkında herhangi bir bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle denklem 2.21'i kullanmak için β değerlerini sağlamak gerekmektedir. Bunlar bir Tafel grafiğinden elde edilebilir veya test ettiğiniz sistemdeki deneyiminize göre tahmin edilebilir.

Korozyon verilerinin bir modele yerleştirilmesiyle elde edilen sayısal sonuç genellikle korozyon akımıdır. Milimetre/yıl gibi daha kullanışlı nüfuz etme hızı birimlerindeki korozyon oranlarıyla ilgilenilmektedir. Korozyon hızı oluşturmak için korozyon akımının nasıl kullanılacağı aşağıdaki şekilde açıklanmıştır. Metal(Me) türünü içeren bir elektrolitik çözünme reaksiyonu olduğunu varsayalım:

$$Me \rightarrow Me^{n+} + n^{e-} \tag{2.23}$$

Faraday Yasası aracılığıyla akım akışını kütle ile ilişkilendirebiliriz.

$$Q = n\ F\ M \tag{2.24}$$

Q = Me reaksiyonundan kaynaklanan coulomb cinsinden yüktür

n = Me’ nin molekülü veya atomu başına aktarılan elektron sayısıdır

F = Faraday sabiti = 96485 coulomb/mol

M = reaksiyona giren Me’nin mol sayısıdır

Denklem 2.24'ün daha kullanışlı bir biçimi eşdeğer ağırlık kavramını gerektirir. Eşdeğer ağırlık (EW), bir Faraday yüküyle reaksiyona girecek Me türünün kütlesidir. Bir atomik tür için:

EW = AW/n (burada AW, türün atom ağırlığıdır) (2.25)

M = W/AW olduğunu hatırlayarak ve denklem 2.24'te yerine koyarsak şunu elde ederiz:

$$W = \frac{(EW)\,Q}{F} \tag{2.26}$$

W = reaksiyona giren Me'nin kütlesidir

Korozyonun metal bir yüzey boyunca eşit şekilde meydana geldiği durumlarda, korozyon hızı yıllık mesafe birimi cinsinden hesaplanabilir. Düzgün çözünmeye maruz kalan karmaşık bir alaşım için eşdeğer ağırlık, alaşım bileşenlerinin eşdeğer ağırlıklarının ağırlıklı ortalamasıdır. Ağırlık faktörü olarak kütle oranı değil mol oranı kullanılır. Çözünme tekdüze değilse, EW'yi hesaplamak için korozyon ürünlerini ölçmeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Ağırlık kaybından korozyon hızına (CR) dönüşüm basittir. Bu hesaplama yapılırken yoğunluğu (d) ve örnek alanı (A) bilmemiz gerekiyor. Yük Q = I.t ile verilir; burada t saniye cinsinden zamandır ve I bir akımdır. Faraday sabitinin değerini yerine koyabiliriz. Denklem 2.26 uyarlandığında aşağıdaki denklem 2.27 elde edilmektedir:

$$CR = \frac{Icorr\ K\ EW}{d\ A} \tag{2.27}$$

CR = korozyon hızı, birimler K seçimiyle verilmektedir (bkz. aşağıdaki Tablo 1-1)

Icorr = Amper cinsinden korozyon akımı

K = Korozyon hızının birimlerini tanımlayan bir sabit

EW = Gram/eşdeğer cinsinden eşdeğer ağırlık

d = Yoğunluk (g/cm^3)

A = cm^2 cinsinden örnek alan

Tablo 2.5: Korozyon hızı sabitleri [80]

Korozyon hızı birimleri	K	Birimler
mm / yıl (mmpy)	3272	mm (A-cm-yıl)
mili inç / yıl (mpy)	1,288 x105	mili inç (A-cm-yıl)

Tablo 2.5, seçtiğiniz birimlerdeki korozyon hızları için denklem 2.27'de kullanılan K değerini göstermektedir.

Daha fazla bilgi için ASTM Standardı G 102, korozyon oranlarının hesaplanmasına ilişkin standart uygulama ve elektrokimyasal ölçümlerden ilgili bilgilere bakılmalıdır. Standart, ASTM, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19013-1187 (ABD) adresinden temin edilebilir.

2.7.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

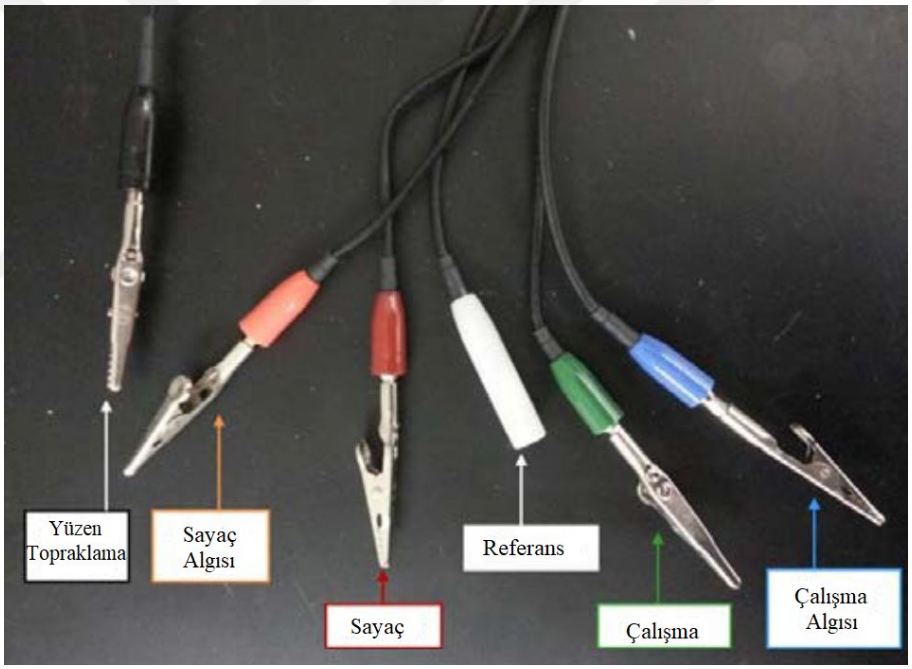
Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri korozyon araştırmalarında hayati bir rol oynar. EIS, bir metal ile bir elektrolit arasındaki arayüzü karakterize etmek için kullanılır. EIS, korozyona uğrayan sistemlerdeki elekrokimyasal reaksiyonların mekanizmalarının açıklanmasında ve pasivasyon katmanlarının veya koruyucu filmlerin önemli özelliklerinin ortaya çıkarılmasında yararlı olan, bilgilendirici ve tahribatsız bir yöntemdir. Bunun yanı sıra kaplamaların değerlendirilmesinde, elektrokimyasal sistemlerde taşınım olaylarının aydınlatılmasında ve korozyon mekanizmalarının ve oranlarının belirlenmesinde elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri oldukça faydalıdır [80-87].

Elektrokimyasal empedans spektroskopi yöntemi ile kaplamalar, piller, yakıt hücreleri, fotovoltaikler, sensörler ve biyokimya gibi geniş kapsamlı uygulamalara sahiptir. Bunlara ek olarak, elektrokimyasal empedans spektroskopi yöntemi ile metal hidrür elektrotların bozulma davranışı incelenebilmektedir. Sistemin temel bir anlayışıyla, potansiyostatın istenen bilgileri toplayıp toplayamayacağı ve toplanan verilerin doğruluk gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığı bilinebilir. Bu yöntemde kullanılan uyarı potansiyeli çok küçüktür (5-10 mV arasında). Dolayısıyla bu kadar küçük potansiyel ile malzeme yüzeyi bozulmaz ve malzeme kararlı yapısını korumaya devam eder. Böylece farklı frekanslarda yüzeyde gerçekleşen elektrokimyasal değişimleri karakterize etmek mümkün olur [78]. Empedans analizinin ana sütunları (i) elektrokimyasal arayüzün fiziksel modellenmesi ve (ii) elektrot/elektrolit sınırının özelliklerini belirleyen ilgili fiziko-kimyasal parametreleri çıkarmak için deneysel spektrumların modellere sonradan uyarlanmasıdır. [84,85].

EIS en yaygın olarak 3 elektrot modunda çalıştırılır. Bu konfigürasyonda bir çalışma elektrotu (malzeme numuneniz), karşı elektrot (genellikle grafit ve platin kullanılır) ve bağımsız bir referans elektrot vardır(Doymuş Kalomel Elektrotlar (SCE) ve Gümüş/Gümüş Klorür (Ag/AgCl) en çok kullanılanlardır). Çözelti hacmine ve elektrot geometrilerine bağlı olarak bir Gamry Paracell veya Eurocell de kullanılabilir. Sayaç ve referans elektrotları, hücreyi

kapatan kauçuk tıpa tarafından yerinde tutulur. Elektrotlar monte edildikten sonra hücre elektrolit solüsyonunuzla doldurulabilir. Deney düzeneği için bir sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kullanılacaktır. Tüm hücre kurulumu, düşük akım ölçümlerini zorlaştırabilecek gürültüyü ortadan kaldırmak için bir Faraday kafesine, bu durumda bir Gamry VistaShield'a kullanılabilir. Tüm elektrokimyasal deneylerde tüm elektrodlar elektrolite maruz kalmalıdır [80].

EIS deneyleri için potansiyostat uçlarından 4'ü her zaman kullanılacaktır ve beşincisi şiddetle tavsiye edilir. Çalışma kablosu (yeşil, akım taşıyor), Çalışma Algısı (mavi, voltaj algılama), Referans (beyaz, voltaj algılama) ve Sayaç (kırmızı, akım taşıyor) her zaman takılı olacaktır. VistaShield gibi bir Faraday kafesi kullanılıyorsa, Yüzen Topraklama kablosu (siyah) kafese bağlanacaktır. Kabloların düzeni Şekil 2.10'da görülebilir [80].



Şekil 2.10: EIS deneyleri için potansiyostat uçları [83].

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), elektrokimyasal bir hücrede küçük bir genlik kullanarak taramak için alternatif akım (AC) sinyali kullanan, ardından hücreden geçen akımın ölçülmesine ve bir hücrenin empedans özelliklerini tespit etmeye yarayan güçlü bir tekniktir. AC sinyali, elektrokimyasal hücre için test altında bir empedans spektrumu oluşturmak üzere geniş bir frekans aralığında taranır. Hücre voltajı ve hücre akımı daha sonra kilitleme amplifikatörü veya frekans tepkisi analizörü gibi bir sinyal işleme cihazı tarafından karmaşık bir empedansa dönüştürülür. Karmaşık empedans-frekans grafiği, diğer

elektrokimyasal tekniklerle elde edilmesi zor olan bilgileri üretebilir. EIS, elektrokimyasal hücrede yer alan kapasitif, endüktif ve difüzyon süreçlerinin çalışmasına izin vermesi bakımından doğru akım (DC) tekniklerinden farklıdır. EIS'nin arkasındaki teori, DC tekniklerinden daha karmaşıktır, bu nedenle, başlamadan önce temel prensipler hakkında temel bir anlayışa sahip olunması önerilir [80,84,85].

EIS yöntemini daha iyi anlayabilmek için Ohm yasasının temelini incelemek gerekmektedir. Elektriksel direnç, bir devre elemanının elektrik akımı akışına direnme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Ohm yasasında (Denklem 2.28) direnç (R); voltaj (E) ve akım (I) arasındaki oran cinsinden ifade edilmektedir.

$$R = \frac{E}{I} \tag{2.28}$$

Bu iyi bilinen bir ilişki olsa da kullanımı yalnızca tek bir devre elemanıyla, yani ideal dirençle sınırlıdır. İdeal bir direncin birkaç basitleştirici özelliği vardır:

- Tüm akım ve gerilim seviyelerinde Ohm Yasasını takip eder.
- Direnç değeri frekanstan bağımsızdır.
- Bir dirençten geçen AC akım ve voltaj sinyalleri birbiriyle aynı fazdadır.

Ancak gerçek dünya çok daha karmaşık davranışlar sergileyen devre elemanlarını içermektedir. Bu elemanlar bizi basit direnç kavramını terk etmeye zorluyor ve onun yerine daha genel bir devre parametresi olan empedans kullanıyoruz. Empedans, bir devrenin elektrik akımı akışına direnme yeteneğinin yanı sıra endüktif veya kapasitif reaktansları da içerir. Bu nedenle, empedans genellikle AC (alternatif akım) devrelerinde daha kullanışlıdır çünkü AC devrelerinde sadece dirençten oluşan basit bir direnç yoktur; endüktörler ve kondansatörler gibi bileşenler de bulunur. Bu nedenle empedans, AC devre analizinde daha kapsamlı ve anlamlı bir ölçüm olarak kabul edilir. Denklem 2.28'de empedans (Z); potansiyel (E) ve akım (I) arasındaki oran cinsinden ifade edilmektedir [80-83].

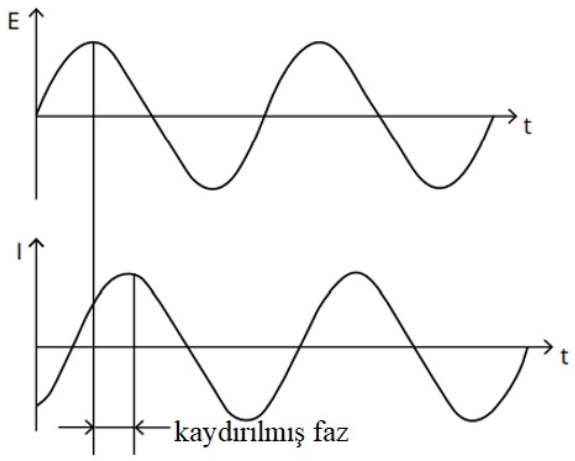
$$Z = \frac{E}{I} \tag{2.29}$$

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), bir elektrokimyasal hücreye sinüzoidal bir potansiyel uygulayarak ve hücreden geçen AC akımını ölçerek empedansın ölçülmesini sağlar. Ortaya çıkan akım sinyali sinüzoidal fonksiyonların toplamı şeklinde çözümlenebilir.

Bu teknik, farklı frekanslarda potansiyel uygulanarak elde edilen akım ve faz verilerinin analiz edilmesini içerir. Elde edilen veriler, sistemdeki elektrokimyasal reaksiyonların kinetikleri, madde taşınma süreçleri ve elektrod yüzeyindeki değişiklikler hakkında bilgi sağlayabilir. EIS, malzemelerin korunması, pil karakterizasyonu, kaplamaların performansı gibi birçok alanda kullanılır.

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi, genellikle küçük bir uyarma sinyali kullanarak gerçekleştirilir ve hücrenin tepkisinin doğrusal bir bölgede kalmasını sağlamak için bu uyarma sinyali düşük seviyelerde tutulur. Bu şekilde, hücrenin yanıtı sinüzoidal bir formda olur ve aynı frekansta ancak fazı kaydırılmış olarak ölçülür, Şekil 2.11'de bu açıklanan kısım görsel olarak anlatılmıştır [80-83].

Doğrusallık önemlidir çünkü elektrokimyasal empedans spektroskopisi, elektrokimyasal sistemlerin karakterizasyonu için genellikle doğrusal yaklaşımların kullanılmasını gerektirir. Doğrusal bölgelerde elde edilen veriler, hücrenin impedansının frekansa bağlı değişimi üzerinde daha kolay yorum yapmayı sağlar ve sistemdeki elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği, yüzey özellikleri veya madde taşınma süreçleri gibi bilgileri elde etmek için analiz edilebilir[78].



Şekil 2.11: Doğrusal sistemde sinüzoidal akım tepkisi [82]

Zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilen uyarılma sinyali aşağıdaki denklem 2.30 şeklindedir:

$$E_t = E_0 \sin(\omega t) \qquad (2.30)$$

E_t = t zamanındaki potansiyel

E_0 = sinyalin genliği

ω = radyal frekans

Radyal frekans ω (radyan/saniye cinsinden ifade edilir) ve frekans f (hertz cinsinden ifade edilir) arasındaki ilişki denklem 2.31 ile ifade edilir.

$$\omega = 2 \Pi f \quad (2.31)$$

Doğrusal bir sistemde, yanıt sinyali I_t, faz (Φ) olarak kaydırılır ve I_0'dan farklı bir genliğe sahiptir.

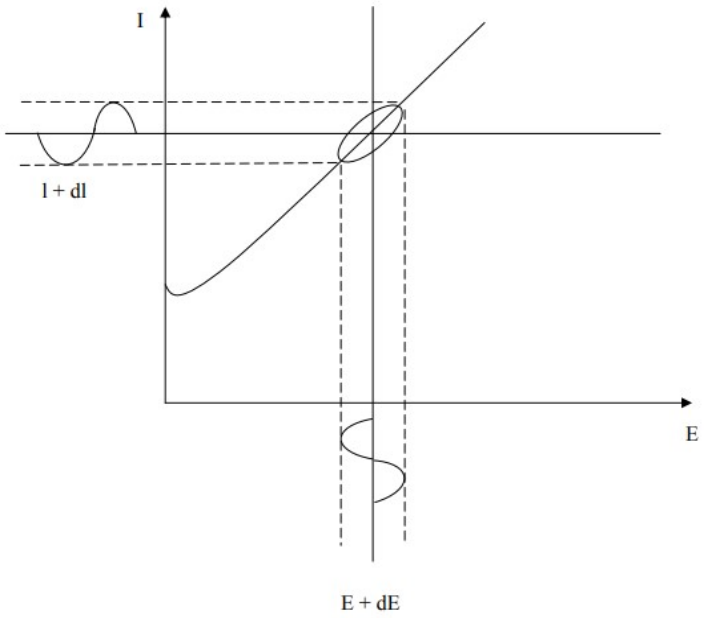
$$I_t = I_0 \sin (\omega t + \Phi) \quad (2.32)$$

Ohm yasasına benzer bir ifade, sistemin empedansını şu şekilde hesaplamamızı sağlar:

$$Z = E_t / I_t = E_0 \sin(\omega t) / I_0 \sin(\omega t + \Phi) = Z_0 \sin(\omega t) / \sin(\omega t + \Phi) \quad (2.33)$$

Dolayısıyla empedans Z_o büyüklüğü ve faz kayması Φ cinsinden ifade edilir.

Uygulanan sinüzoidal sinyal E(t)'yi bir grafiğin X eksenine ve sinüzoidal yanıt sinyali I(t)'yi Y eksenine çizersek, sonuç bir oval olur (bkz. Şekil 2.12). Bu oval “Lissajous Figürü” olarak tanımlanır. Lissajous Şekillerinin osiloskop ekranlarında analizi, modern EIS enstrümantasyonunun mevcut olmasından önce empedans ölçümünde kabul edilen yöntemdi.



Şekil 2.12: Lissajous şeklinin kökeni [82]

Euler ilişkisi ile empedansı karmaşık bir fonksiyon olarak ifade etmek mümkündür.

$$\exp(j\Phi) = \cos\Phi + j\sin\Phi \tag{2.34}$$

Potansiyel şu şekilde tanımlanır:

$$E_t = E_0 \exp(j\omega t) \tag{2.35}$$

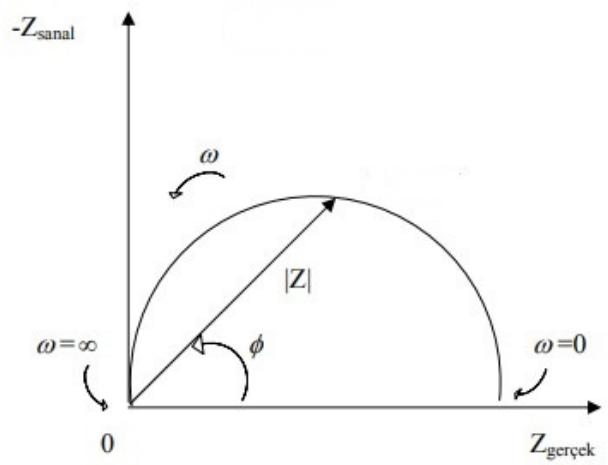
ve mevcut yanıt şu şekilde tanımlanır:

$$I_t = I_0 \exp(j\omega t - \Phi) \tag{2.36}$$

Empedans daha sonra karmaşık bir sayı olarak temsil edilir,

$$Z(\omega) = E / I = Z_0 \exp(j\,\Phi) = Z_0 (\cos\Phi + j\sin\Phi) \tag{2.37}$$

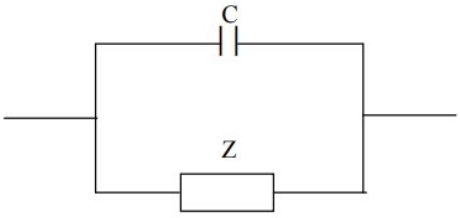
Z(ω) ifadesi bir gerçek ve bir sanal kısımdan oluşur. Bir grafiğin gerçek kısmı X eksenine ve sanal kısmı Y eksenine çizilirse, bir "Nyquist Grafiği" elde ederiz (bkz. Şekil 2.13). Bu çizimde Y ekseninin negatif olduğuna ve Nyquist grafiğindeki her noktanın bir frekanstaki empedans olduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 2.13, düşük frekanslı verilerin grafiğin sağ tarafında, yüksek frekanslı verilerin ise solda olduğunu gösterecek şekilde açıklanmıştır.



Şekil 2.13: Empedans vektörlü Nyquist grafiği [82]

Nyquist grafiğinde empedans |Z| uzunluğu bir vektör (ok) olarak temsil edilebilir. Bu vektör ile X ekseni arasındaki açı, genellikle "faz açısı" olarak adlandırılır, Φ (=arg Z)'dır. Nyquist grafiğinin büyük bir eksikliği mevcuttur. Grafikteki herhangi bir veri noktasına baktığınızda, o noktayı kaydetmek için hangi frekansın kullanıldığını söylemek mümkün değildir [82].

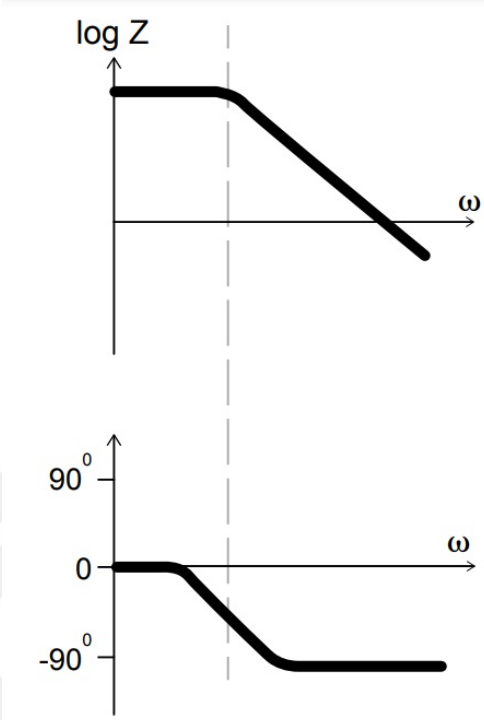
Elektrokimyasal empedans spektroskopisinde, bir elektrotun değişen frekanstaki alternatif potansiyel sinyallerine tepkisi, elektrot/elektrolit arayüzünün devre modelleri temelinde yorumlanır[88]. Şekil 2.13'deki Nyquist grafiğinden elde edilen sonuçlara göre Şekil 2.14'deki elektrik devresi modeli ortaya çıkmıştır. Yarım daire, tek bir "zaman sabitinin" karakteristiğidir. Elektrokimyasal empedans grafikleri genellikle birkaç yarım daire içerir. Çoğunlukla yarım dairenin yalnızca bir kısmı görülür.



Şekil 2.14: Bir zaman sabitine sahip basit eşdeğer devre [82]

Bir diğer popüler sunum yöntemi ise Bode Grafiği'dir. Empedans, X ekseni üzerinde log frekansı ve Y ekseni üzerinde hem empedansın mutlak değerleri ($|Z|=Z_0$) hem de faz

kayması ile çizilir. Şekil 2.14'deki elektrik devresinin Bode Grafiği, Şekil 2.15'de gösterilmektedir. Nyquist Grafiğinden farklı olarak Bode Grafiği, frekans bilgisini gösterir. Hem Nyquist hem de Bode grafikleri R_Ω ve R_p'nin benzer sonuçlarını vermelidir [80 ve hande)



Şekil 2.15: Bir zaman sabitine sahip Bode grafiği [82]

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi verileri genellikle eşdeğer bir elektrik devresi modeline uydurularak analiz edilir. Modeldeki devre elemanlarının çoğu dirençler, kapasitörler ve indüktörler gibi ortak elektrik elemanlarıdır. Yararlı olması için modeldeki öğelerin sistemin fiziksel elektrokimyasında bir temele sahip olması gerekir. Bu sebeple birçok model, hücrenin çözelti direncini modelleyen bir direnç içerir.

Bu nedenle standart devre bileşenlerinin empedansına ilişkin bazı bilgiler oldukça faydalıdır. Tablo 2.6'da ortak devre elemanları, bunların akım-gerilim ilişkisi denklemi ve empedansları verilmiştir.

Tablo 2.6: Ortak devre elemanları [82]

Devre Elemanları	Akım-Gerilim İlişkisi	Empedans
Direnç	E= IR	Z = R

İndüktör	E = L di/dt	Z = j ω L
Kapasitör	I = C dE/dt	Z = 1/j ω C

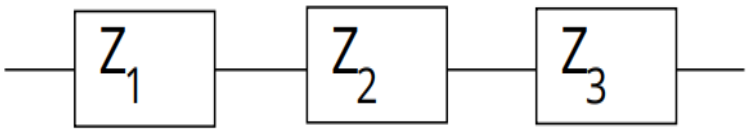
Bir direncin empedansının frekanstan bağımsız olduğuna ve sanal bir bileşene sahip olmadığına dikkat edin. Yalnızca gerçek bir empedans bileşeniyle, bir dirençten geçen akım, direnç üzerindeki voltajla aynı fazda kalır. Bir indüktörün empedansı frekans arttıkça artar. İndüktörlerin yalnızca hayali bir empedans bileşeni vardır. Sonuç olarak, bir indüktörden geçen akım, gerilime göre -90 derece faz kaymasına uğrar.

Bir kapasitörün empedans-frekans davranışı, bir indüktörünkinin tersidir. Frekans arttıkça kapasitörün empedansı azalır. Kapasitörler ayrıca yalnızca hayali bir empedans bileşenine sahiptir. Kapasitörden geçen akım, gerilime göre 90 derece faz kaydırılır.

Elektrokimyasal hücreler incelendiğinde sadece bir eşdeğer devre elemanı kullanılarak modellenmenin az sayıda olduğu görülür. Bunun yerine, EIS modelleri genellikle bir ağdaki bir dizi devre elemanından oluşur. Elemanların hem seri hem de paralel bağlanması meydana gelir ve bu durumda devre elemanlarının empedansını açıklayan basit formüller vardır.

Seri bağlı doğrusal empedans elemanları için eşdeğer empedans aşağıda verilmiş olan denklem 2.38'e göre hesaplanmaktadır.

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + Z_3 \tag{2.38}$$

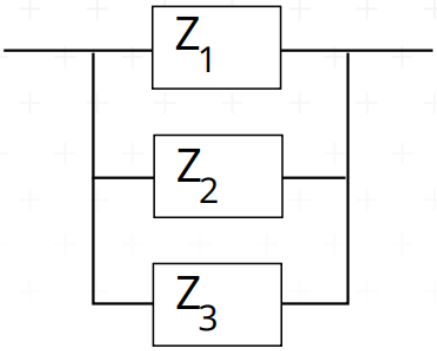


Şekil 2.16: Seri bağlı empedanslar [82]

Şekil 2.16'da seri bağlı empedansların, Şekil 2.17'de ise paralel bağlı empedansların modellenmesi görülmektedir.

Paralel bağlı doğrusal empedans elemanları için eşdeğer empedans denklem 2.39'da verilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$1/ Z_{eq} = 1/Z_1 + 1/ Z_2 + 1/Z_3 \quad (2.39)$$



Şekil 2.17: Paralel bağlı empedanslar [82]

3. YÖNTEM

3.1. HAMMADDE

Bu çalışmada, Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilen A360 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Eti Alüminyum A.Ş.'nin Eti-normlarına göre Etial 171 (A360) olarak isimlendirdiği bu malzemeyi Türk Standartları Enstitüsü (TSE) AlSi10Mg, Alman Standartları Enstitüsü (DIN) G-AlSi10Mg ve Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) A-360 olarak isimlendirmektedir. A360 alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşim sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Çalışmalarda kullanılan A360'ın kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
9,466	0,404	0,074	0,43	0,438	0,025	Kalan

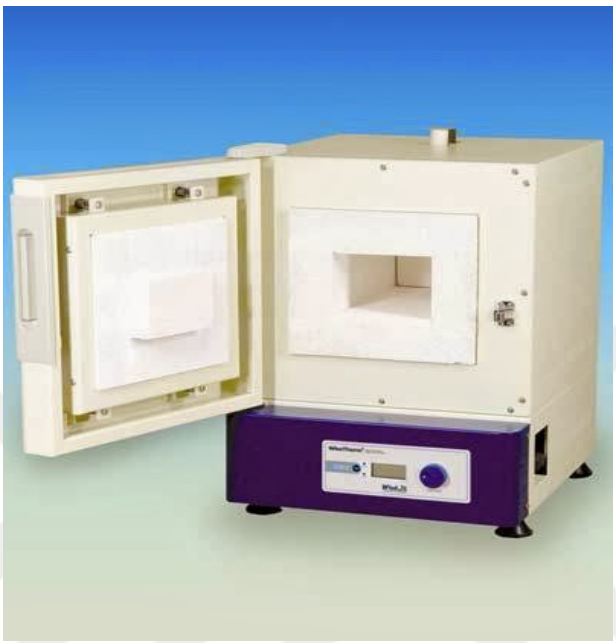
Master alaşımları olarak Al-10Sr, Al-3B ve Al-10V tercih edilmiştir. Bu master alaşımları % ağırlıkça farklı oranlarda eklenerek A360 alaşımının kimyasal bileşimde değişimler meydana getirmiştir. Her bir master alaşımı eklentisiyle A360 kimyasal bileşimdeki Sr, B ve V oranlarında % ağırlık olarak artışlar meydana gelmiştir.

3.2. DÖKÜM İŞLEMİ

A360 alaşımı eritme işlemi, 3.6 kW kapasitesindeki maksimum 1200^0C'ye ulaşabilen Daihan Wisetherm ısıl işlem fırınında yapılmıştır. Laboratuvar tipi bu fırının sıcaklık stabilizasyonu seramik fiber plaka astarlarıyla sağlanmaktadır. Şekil 3.1'de Daihan Wisetherm ergitme fırını gösterilmiştir.

Alman Mars-Tiegel marka, Mars-Isomelt modeli olan (A3 kodlu) SiC potalara şarj edilerek ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. A3 kodlu SiC potaların yüksekliği 130 mm, taban

çapı 70 mm, ağız çapı ise 110 mm boyutundadır. Hızlı ısıtma sayesinde enerji tasarrufu, düzgün ısı iletimi ve düşük cüruf oluşumu gibi avantajlar sebebiyle Mars-Isomelt modeli SiC pota tercih edilmiştir. Şekil 3.2'de alaşım ergitme işleminde kullanılan Mars-Isomelt modeli (A3 kodlu) SiC pota gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Daihan Wisetherm ergitme fırını



Şekil 3.2: Mars-Isomelt modeli (A3 kodlu) SiC pota

A360 alaşımına, ısıl işlem fırınına şarj edildikten 1 saat sonra % ağırlıkça belirlenen oranlarda stronsiyum, bor ve vanadyum ilaveleri yapılmıştır. Gerekli ilaveler yapıldıktan sonra 30 dakika daha fırında bekleyen yeni alaşım toplamda 90 dakika ergitme işlemine maruz bırakılmıştır. Alaşım, ergitme işleminin ardından kum ve kokil kalıplara gravite döküm yöntemi ilkelerine uygun şekilde dökülmüştür. Kum ve kokil kalıplara yapılan döküm işlemlerinin ardından kalıplar atmosfere açık şekilde soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi

tamamlandıktan sonra korozyon testlerinde ve mekanik testlerde kullanılmak üzere uygun boyutlara getirilmek için kesme işlemi uygulanmıştır.

Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan numunelere kod verilerek çalışmalar yürütülmüştür. Numunelere verilen kod numaraları ilave edilen master alaşımların miktarına ve dökümün yapıldığı kalıpların cinsine göre değişmektedir.

Tablo 3.2: Kokil kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre modifiyesiz A360 alaşımı, Sr ve B ilaveli alaşımların numune kodları

Master Alaşım	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6	Numune 7
Sr	-	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
B	-	-	0,03	0,06	0,13	0,16	0,18
V	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 3.2'de verilmiş olan bütün alaşımlar kokil kalıba dökülen numunelerden oluşturulmuştur. Tablo 3.2'de kokil kalıba dökümü yapılmış modifiye edilmemiş A360 alaşımı 'Numune 1' olarak isimlendirilmiştir. Tablo 3.2'de A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ile modifiye edilmiş alaşım 'Numune 2' olarak isimlendirilmiştir. Bunların yanı sıra Tablo 3.2'de farklı oranlarda Al-3B ilave edilen ve kokil kalıba dökümü yapılmış alaşımların isimlendirmeleri mevcuttur.

Tablo 3.3: Kum kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre modifiyesiz A360 alaşımı, Sr ve B ilaveli alaşımların numune kodları

Master Alaşım	Numune 8	Numune 9	Numune 10	Numune 11	Numune 12	Numune 13	Numune 14
Sr	-	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
B	-	-	0,03	0,06	0,13	0,16	0,18
V	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 3.3'te verilmiş olan bütün alaşımlar kum kalıba dökülen numunelerden oluşturulmuştur. Tablo 3.3'te kum kalıba dökümü yapılmış modifiye edilmemiş A360 alaşımı 'Numune 8' olarak isimlendirilmiştir. Tablo 3.3'te A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ile modifiye edilmiş alaşım 'Numune 9' olarak isimlendirilmiştir. Bunların yanı sıra Tablo 3.3'te farklı oranlarda Al-3B ilave edilen ve kum kalıba dökümü yapılmış alaşımların isimlendirmeleri mevcuttur.

Tablo 3.4: Kokil kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre Sr ve V ilaveli alaşımların numune kodları

Master Alaşım	Numune 15	Numune 16	Numune 17	Numune 18
Sr	0,02	0,02	0,02	0,02
V	0,01	0,02	0,04	0,08
B	-	-	-	-

Tablo 3.4'te verilmiş olan bütün alaşımlar kokil kalıba dökülen numunelerden oluşturulmuştur. Tablo 3.4'te A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,01 V ile modifiye edilmiş alaşım 'Numune 15' olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca, Tablo 3.4'te A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,02 V ilave edilen ve kokil kalıba dökümü yapılmış alaşım 'Numune 16' olarak isimlendirilmiştir. 'Numune 17' olarak isimlendirilen alaşım ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,04 V ilavesiyle kokil kalıba yapılan döküm sonucu ortaya çıkmış olan numunedir. A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,08 V ilave edilerek kokil kalıba dökümü yapılmış olan alaşım 'Numune 18' olarak kodlanmıştır.

Tablo 3.5'te verilmiş olan bütün alaşımlar kum kalıba dökülen numunelerden oluşturulmuştur. Tablo 3.5'te A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,01 V ile modifiye edilmiş alaşım 'Numune 19' olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca, Tablo 3.5'te A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,02 V ilave edilen ve kum kalıba dökümü yapılmış alaşım 'Numune 20' olarak isimlendirilmiştir. 'Numune 21' olarak isimlendirilen alaşım ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,04 V ilavesiyle kum kalıba yapılan döküm sonucu

ortaya çıkmış olan numunedir. A360 alaşımına ağırlıkça % 0,02 Sr ve ağırlıkça % 0,08 V ilave edilerek kum kalıba dökümü yapılmış olan alaşım ‘Numune 22’ olarak kodlanmıştır.

Tablo 3.5: Kum kalıba dökümü yapılmış olan % ağırlık miktarına göre Sr ve V ilaveli alaşımların numune kodları

Master Alaşım	Numune 19	Numune 20	Numune 21	Numune 22
Sr	0,02	0,02	0,02	0,02
V	0,01	0,02	0,04	0,08
B	-	-	-	-

3.3. NUMUNE HAZIRLAMA

A360 alüminyum alaşımı kum ve kokil kalıplara dökülmesinin ardından soğuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Soğuyan kalıplardan çıkarılan numunelerin yolluk ve besleyicileri kesilerek numuneler hazır hale getirilmiştir. Yolluk ve besleyicilerin kesimi esnasında Şekil 3.3’te gösterilen Optimum S131 GH marka şerit testere makinasında kesme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.3: Optimum S131 GH marka şerit testere makinası

Metalografik inceleme ve korozyon testleri için hazırlanacak numunelerin kesme işlemi ısı birikimlerini en aza indirmek ve yüzey özelliklerini bozmamak için soğutucu sıvı kullanımı

ile Şekil 3.4'te gösterilmiş olan Daimo 100E hassas kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Soğutucu sıvı kullanımı ile numuneden kopan parçaların kesme bölgesinden hızlıca uzaklaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 3.4: Daimo 100E hassas kesme cihazı

Yapılan döküm işlemleri sonrasında mikroyapı özelliklerini tespit edebilmek amacıyla metalografik inceleme için hassas kesme cihazı ile uygun boyutlara getirilen numunelerin boyutları elle tutulamayacak seviyede olması nedeniyle oda sıcaklığında soğuk kalıba alınmıştır. Herhangi bir basınç uygulanmadan yapılan soğuk kalıplama esnasında reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Numune kalıbın içine konularak üzerine reçine ve sertleştirici dökülmüştür. 2 saat beklenildikten sonra reçine donmuştur ve metalografik inceleme için hazırlanmak üzere numune kalıptan çıkarılmıştır.

Metalografik inceleme yapılması için kesilen numunelerin yüzeyleri çizik olduğu için görüntü almak mümkün değildir. İçyapı özelliklerinin düzgün bir şekilde görüntülenmesi için yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi gerekir. Numunelerin yüzeylerindeki çiziklerin uzaklaştırılması için Şekil 3.5'te gösterilen Metaserv 2000 zımparalama ve parlatma cihazında kademeli şekilde zımpara ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Numuneler sırasıyla kalın zımparadan ince zımparaya doğru olmak üzere 200, 400, 600,800,1000 ve 1200 mesh zımpara kâğıtlarıyla zımparalanmıştır. Numunelerin zımparalanması işlemi akan su altında ve her bir zımpara kağıdı değişimde numuneler 90^0 döndürülerek yapılmıştır. Zımparanın akan su altında yapılması ile ısınmanın önüne geçilmiştir ve buna ek olarak yüzeyden ayrılan parçalar tekrar çizik oluşturmamıştır.



Şekil 3.5: Metaserv 2000 zımpara ve parlatma cihazı

Numune yüzeylerinin parlak hale gelmesi için kadife kumaşın üzerine Buehler marka 0.05 µ boyutunda Al_2O_3 aşındırıcı kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Numuneler, parlatma işlemi esnasında diskin döndüğü yönün tam tersi yönünde döndürülerek parlak hale getirilmiştir.

Numunelerin metalografik incelemesi için Şekil 3.6'da gösterilmiş olan Olympus gx41 markalı metal mikroskopu ve Clemex isimli yazılım kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Olympus gx41 mikroskop

3.4. UYGULANAN TESTLER

3.4.1. Sertlik Testi

Sertlik, bir malzemenin yüzeyindeki deformasyona direnme yeteneğidir. Sertlik testi, daha sert bir malzemeyi bastırarak/batırarak bir malzemenin yüzeyindeki kalıcı deformasyona karşı direncini ölçer. Sertliğin ölçülmesinin, malzemelerin karşılaştırılmasında ve imalat ve sertleştirme süreçlerinde kalite kontrolün sağlanmasında çok sayıda faydası vardır.

Sertlik bir malzemenin temel fiziksel özelliği değil, ölçülen bir özelliğidir. Ancak amaçlanan uygulamaya bağlı olarak bir malzemenin gücü ve dayanıklılığı hakkında bazı değerli bilgiler sağlayabilir. Kullanılan batıcı uç malzemesi, geometrisi ve yöntem parametrelerine göre farklı farklı sertlik testi metotları geliştirilmiştir. Bu metotların çoğu tüm malzeme gruplarını kapsamayıp sadece belirli malzeme türleri için geçerlidir. Metalik malzemelerde en çok kullanılan yöntemler Brinell, Vickers, Rockwell B ve Rockwell C metotlarıdır.

Diğer testlere göre uygulamasının daha basit ve hızlı olması, donanımlarının nispeten küçük ve ucuz olması gibi avantajlarının yanında kısmen tahribatsız bir test sayılması da yöntemin üstünlüklerindendir. Çoğu malzeme grubu için sertlik değerleri ile akma dayanımı ve çekme dayanımı arasında yüksek dereceden bir ilişki kurulabilir.

Deney numuneleri, kesilmesinin ardından sertlik ölçümlerinin doğru sonuçlar vermesi için yüzeyi zımpara ile pürüzlerinden arındırılmıştır. Yüzeyi pürüzsüz olan numunelerin ön ve arka yüzeyleri olmak üzere her iki yüzeye de sertlik testi uygulanarak Brinell sertlik değerleri ölçülmüştür. Testlerde kullanılan ZHU 187,5 LKV model numaralı Zwick / Roell marka sertlik cihazı Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7: Zwick / Roell markalı ZHU 187,5 LKV model sertlik cihazı

3.4.2. Çekme Testi

Çekme testi, çekme test makinesi kullanılarak gerçekleştirilen tahribatlı bir test yöntemidir. Çekme mukavemeti test cihazı, bir numuneyi bir çift kavramada tutarak ve ardından numune kırılıncaya kadar artan bir çekme yükü uygulayarak çalışır. Numunenin orijinal kesiti ve uzama oranı (uzunluktaki değişim oranı) biliniyorsa, çekme mukavemeti hesaplanabilir. Çekme testi, elektromekanik veya hidrolik üniversal test makinesi kullanılarak

yapılabilir. Makine, test parçasını tutmak için numune tutucularından, yüklemeyi hareket ettirmek ve uygulamak için bir çapraz kafadan ve test parametrelerini kaydetmek için bir veri toplama sisteminden oluşur

Çekme test makinesi, bir malzemenin mekanik özelliklerini ölçen bir cihazdır. Test sırasında çekme mukavemeti makinesi, numunenin malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılabilecek uzama oranını, uzunluktaki değişikliği ve uygulanan yükü kaydedecektir. Çekme test makineleri, bir malzemenin akma dayanımı, nihai çekme dayanımı, süneklik ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılır. Çekme test makinalarının kullanım alanları arasında şunlar sıralanabilir: mühendislik uygulamaları için malzeme seçimi, malzeme kalite güvencesi, yeni malzeme veya proseslerin özelliklerinin karşılaştırılması, yük altında malzeme davranışını tanımlamak.

Çekme testi, mekanik özelliklerin incelemesinde özellikle metal ve metal alaşımları için sıklıkla uygulanan testlerden birisidir. Modifiye edilmemiş A360 alaşımının ve ilave alaşımlar ile yeni kimyasal bileşime sahip olan numunelerin tek eksenli çekme işlemi altında mukavemet özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Silindir numune şeklinde dökümü yapılmış olan çekme çubuklarına ASTM E8 standartına uygun şekilde test uygulanmıştır. Metaller için uygulanan ASTM E8 standartında ölçüm uzunluğunun yuvarlak numunelerin çapının 4 katı olması gerekmektedir. Ölçü uzunluğu 50 mm olan numunelere Zwick marka üniversal çekme cihazı kullanılarak 1mm/dakika hız ile oda sıcaklığında kopma işlemi gerçekleşene kadar çekme işlemi uygulanmıştır.

3.4.3. Darbe Testi

Darbe testleri, bir malzemenin ani bir şok veya darbe yüküne maruz kaldığında deformasyona direnme yeteneğini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Bu testler normalde ASTM International tarafından yayınlanan test yöntemlerine ve standartlara göre yapılır. Birkaç farklı darbe testi türü vardır, ancak hepsi hazırlanmış bir test örneğine ağırlıkla vurulmasını gerektirir. ASTM E23, ASTM A370 ve ASTM D256 gibi farklı malzeme testi standartları, her darbe testi türü ve farklı malzeme grupları (örneğin metaller ve plastikler) için kesin test prosedürünü ve test örneği gereksinimlerini yönetir. Yaygın olarak kullanılan dört darbe testi türü şunları içerir: Charpy, Izod, ağırlık düşürme ve dinamik yırtılma testleri. Malzemeler üzerinde darbe testi yapmanın faydaları şunlardır: mühendislerin ve üreticilerin bir malzemenin dayanıklılığını belirlemesine olanak sağlamak, kalite kontrol standartları oluşturmak,

tasarımları optimize etmek ve belirli uygulamalar için uygun malzemeleri seçmek. Darbe testleri malzeme davranışını karakterize etmede ve malzeme seçimini gerçekleştirmede çok yararlı olsa da darbe testleri döngüsel yükleri, sıcaklık veya nem gibi dış faktörleri ve parçaların her yönde yüke maruz kaldığı gerçek dünya uygulamalarını hesaba katmaz. Yine de test, malzemeler aynı standartla test edildiği sürece malzemeler arasındaki darbe mukavemetlerinin kolayca karşılaştırılmasını sağlar. Genel olarak darbe testi, bilim ve endüstride hayati bir rol oynar ve mühendislerin ve araştırmacıların malzeme seçimi, tasarım ve güvenlik konusunda bilinçli kararlar almasına olanak tanır. Bu, mühendislerin ve tasarımcıların ürün tasarımlarını belirli uygulamalar için optimize etmelerine olanak tanır. Ayrıca üreticilerin ürünleri için kalite kontrol standartları oluşturmalarına yardımcı olur ve bilim adamlarının ve araştırmacıların bir malzemenin dayanıklılığını karakterize etmelerine olanak tanır. Açıklanan öğelerin her biri, son kullanıcı için daha güvenli ürün ve yapıların oluşturulmasını kolaylaştırır.

Test numunesinin hazırlanması, doğru darbe testi sonuçları elde etmenin önemli bir anahtarıdır. Her darbe testi türü için test numunesi, numunede bir çentiğin kesilmesini gerektirir. Ancak çentiğin türü, yapılacak darbe testinin türüne bağlıdır. Her darbe testi numunesinde V şeklinde bir çentik bulunur. Test numunelerinde çentikler kesilir çünkü darbenin uyguladığı kuvvet yeterince güçlüyse numuneleri kırılmaya zorlar. Charpy testlerinde test numunesi tarafından emilen enerji sarkacın potansiyel ve kinetik enerjisi ile ilişkilendirilebildiği için bir parçanın darbe dayanımı belirlenebilmektedir. Charpy darbe testi en yaygın olarak metaller ve termoplastikler gibi sünek malzemeler için kullanılır.



Şekil 3.8: Çentik açılmış Charpy testi numunesi

Deneylerde bilgisayar destekli JBW-300 markalı darbe test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında Charpy testi uygulanmıştır. Numune boyutu 55 x 10 x 10 mm olacak şekilde ASTM E23 standardına uygun boyutlarda hazırlanmıştır ve numunenin ortasına V şeklinde 45^0 açılı 2 mm derinliğe sahip bir çentik açılmıştır. Numunelere açılan çentiklerin görünümü Şekil 3.8'de verilmiştir. Her iki ucundan da yatay olarak basitçe desteklenecek ve çekiç çentikli

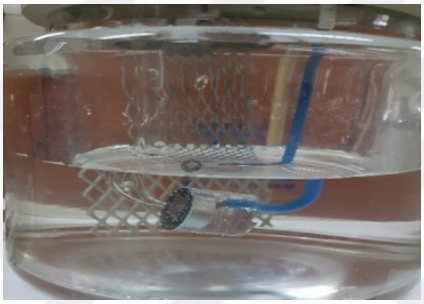
yüzeyin karşısındaki yüzeye çarpacak şekilde yönlendirilmiştir. Sarkacın başlangıç yüksekliği ile sarkacın test numunesine çarptıktan sonra devam eden hareketi sırasında ulaştığı yükseklik arasındaki fark, darbe anında malzemenin emdiği enerjiyi hesaplamak için kullanılır. Bunun nedeni, sarkacın serbest bırakılmasından önceki tüm potansiyel enerjinin, numuneye çarptığında kinetik enerjiye dönüşmesidir.

3.4.4. Korozyon Testleri

Korozyon testleri için Gamry Instrument Reference 600 model numaralı cihaz kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon(Tafel) ve elektrokimyasal empedans spektoskopisi (EIS) analizleri kullanılarak korozyon testleri yapılmıştır. Cihazda kullanılan yazılımlar DC Corrosion 105 ve EIS 300'dür. Korozyon testleri %3,5'luk NaCl çözeltisi hazırlanarak çift cidarlı elektroliz hücresi içerisinde yapılmıştır. Çalışma elektrodu olarak A360 ve alaşımları kullanılırken, referans elektrodu olarak Ag/AgCl ve karşıd elektrot olarak da Titanyum Mesh elektrodu kullanılmıştır. Korozyon testleri için kullanılacak numuneler önce reçine ile kalıba alınmıştır daha sonra yüzeyler zımparalanarak pürüzlerinden arındırılmıştır. Zımparalanan numuneler yüzey alanı 1 cm^2 ölçüde olacak şekilde maskelenmiştir. Şekil 3.9'da korozyon testlerinde kullanılan Gamry Instrument Referans 600 model numaralı cihaz ve korozyon hücre seti görülmektedir. Şekil 3.10'da maskelenmiş haldeki numunenin elektrokimyasal hücre setindeki görünümü verilmiştir.



Şekil 3.9: Korozyon testlerinde kullanılan deney düzeneği



Şekil 3.10: Maskelenmiş numunenin test hücresindeki görünümü

3.4.4.1. Potansiyodinamik Polarizasyon (Tafel Ekstrapolasyon)

Potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide beklemiştir. Açık devre potansiyeli dengeye ulaştıktan sonra denge potansiyelinden -0,2 volt aşağısı başlama potansiyel değeri ve denge potansiyelinden +0,5 volt yukarısı bitiş potansiyel değeri olacak şekilde 1 mV/s tarama hızıyla için ölçüm yapılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon bir diğer adı Tafel ekstrapolasyon yöntemi olan bu yöntemde ölçümler ile ortaya çıkan polarizasyon eğrilerinden korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri hesaplanmıştır.

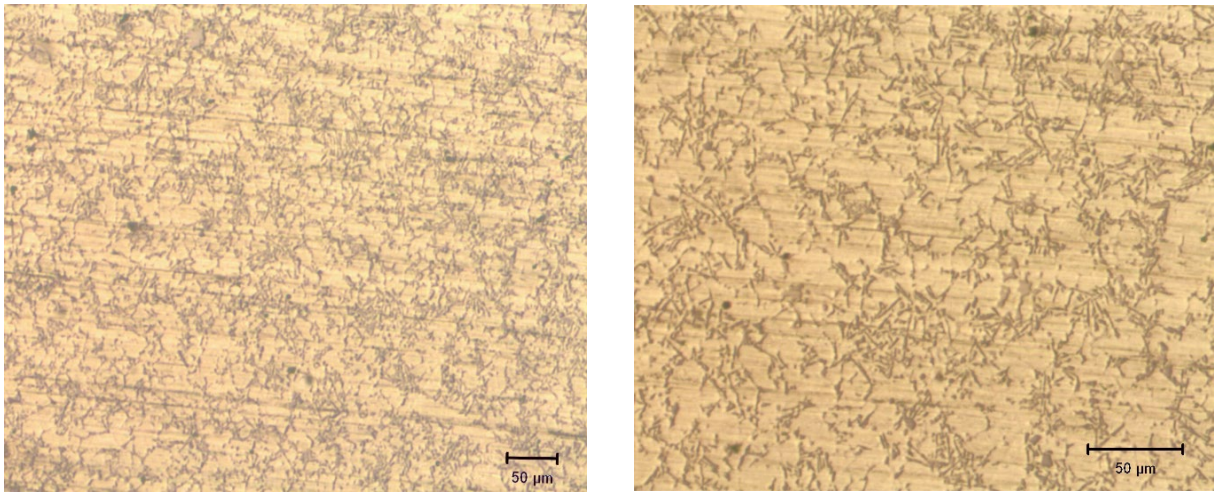
3.4.4.2. Elektrokimyasal Empedans Spektroskobisi (EIS)

Elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide beklemiştir. Deneyin çalışma aralıkları; DC voltaj değeri 0 V, AC voltaj değeri 5 mV, başlangıç frekansı 10^5 Hz ve bitiş frekansı 10^{-1} Hz olarak belirlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. A360 ALAŞIMI

Şekil 4.1(a) ve Şekil 4.1(b)'de kokil kalıba dökülmüş olan modifiyesiz A360 alaşımının farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.1(a)'da modifiyesiz A360 alaşımı mikroyapı görüntüsünde görüldüğü gibi açık renkli kısım birincil alüminyum fazını (α-Al) , koyu renkli kısım ötektik fazı temsil etmektedir. Dendritik şekle sahip birincil alüminyum fazının düzensiz yapıda olduğu ve bu dendrit kolları arasındaki koyu renkli iğnemsi görünümü ile kaba silisyum parçaları Şekil 4.1(b)'de görülmektedir. Mikroyapıda görülen çubuk şeklindeki silisyumların ötektik olarak katılaşan ötektik silisyum parçaları olduğu söylenebilir[86-88]. Optik mikroskop görüntülerinde dendrit boyutlarının oldukça büyük olduğu görülmektedir. Üzerinde bloklu fazlar ise katılaşma süresine bağlı olarak kabalaşan ötektik silisyum parçacıkları veya katılaşma sırasında oluşan birincil silisyum parçacıkları olarak açıklanabilir. Normalde ötektik altı alüminyum-silisyum alaşımlarında birincil silisyum parçacıklarının oluşması beklenmez ancak katılaşma koşullarına bağlı olarak ötektik altı Al-Si alaşımlarında birincil silisyum parçacıklarının oluşabileceği rapor edilmiştir [86-89].

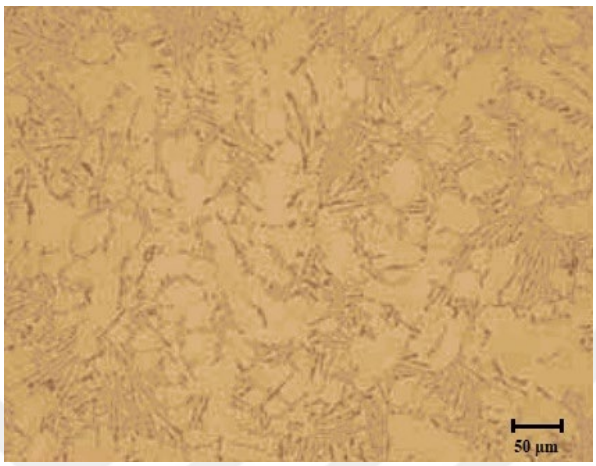


(a) (b)

Şekil 4.1: Kokil kalıba döküm (a) Numune 1 (50x büyütme), (b) Numune 1 (100x büyütme)

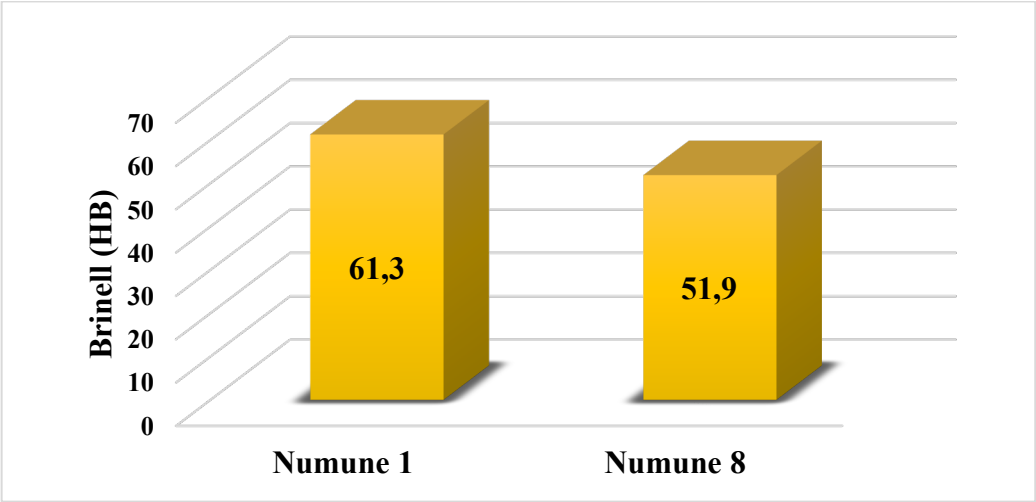
Şekil 4.2'de kum kalıba yapılan dökümde yavaş soğuma hızının Si büyümesine katkıda bulunmasından dolayı kokil kalıba döküme (Şekil 4.1) göre dendritik yapının daha belirgin bir hale geldiği gözlenmiştir. Kokil kalıba yapılan dökümlerde katılaşma esnasındaki soğuma hızı

kum kalıplardan daha hızlı olduğu için mikroyapı incelemesinde daha ince taneli yapılar ortaya çıkar [90-94]. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1'in Şekil 4.1(a)'da ortaya çıkan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ve Şekil 4.2 ile kıyaslandığında daha ince taneli yapıların oluştuğu anlaşılmıştır.



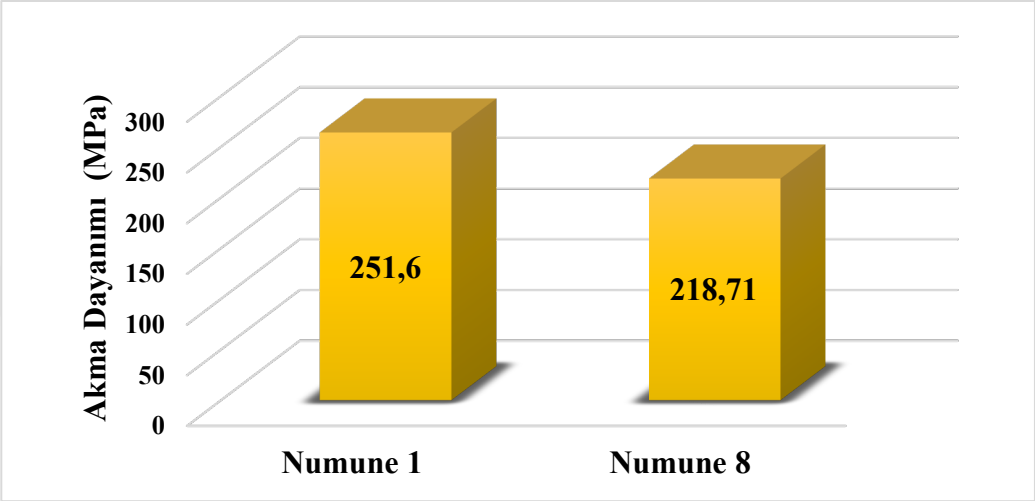
Şekil 4.2: Kum kalıba döküm Numune 8 (50x büyütme)

Deney numunelerinin kesilmesinin ardından yüzeyi zımpara pürüzsüz hale getirildikten sonra ön yüzey ve arka yüzeylerine sertlik testi uygulanmıştır. Bu değerler ön ve arka yüzeyden 5'er tane olmak üzere toplamda 10 ölçümün ortalamasının alınmasıyla ortaya çıkmıştır. Şekil 4.3'te gösterilmiş olan sertlik testi sonuçlarına göre Numune 1'in sertlik değerini 61,3 HB olarak, numune 8'in sertlik değeri 51,9 HB olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ölçülen sertlik değerleri yapılan benzer çalışmalarla uyumlu olduğu anlaşılmıştır [86,91].



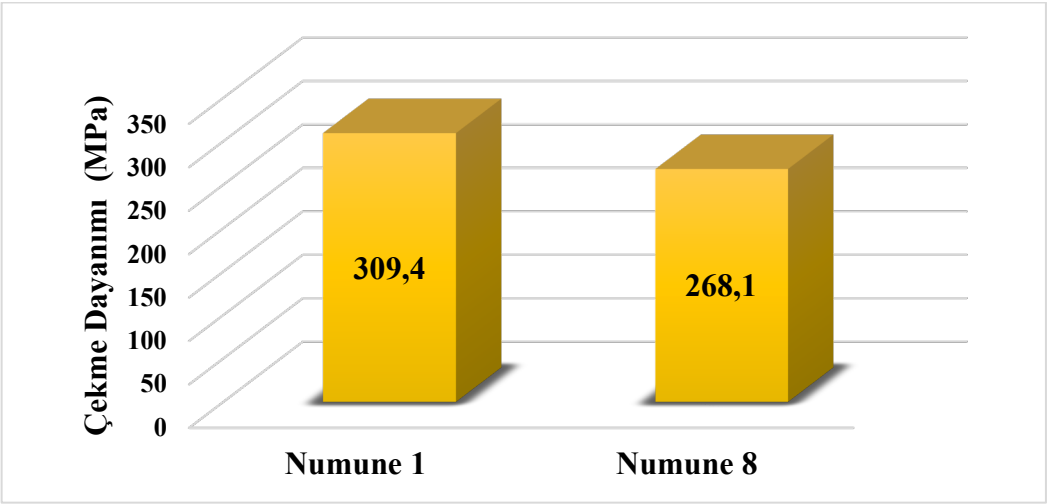
Şekil 4.3: Numune 1 ve Numune 8'in Brinell sertlik değerlerleri

Mekanik özelliklerin incelenmesinde tercih edilen çekme testi, tek eksenli çekme şeklinde uygulanmıştır. Silindir numune şeklinde dökümü yapılmış olan çekme çubukları ASTM E8 standartına uygun olarak hazırlanmıştır. Çapı 12,5 mm, ölçü uzunluğu 50 mm olan çekme numunelerine Zwick marka üniversal çekme cihazı kullanılarak 1mm/dakika hız ile oda sıcaklığında kopma işlemi gerçekleşene kadar çekme işlemi uygulanmıştır.



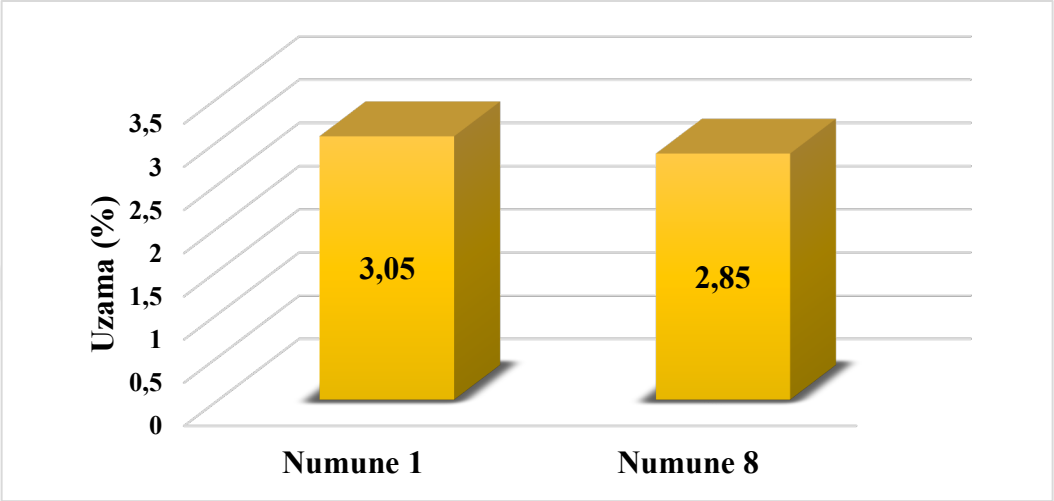
Şekil 4.4: Numune 1 ve Numune 8'in akma dayanım değerleri.

Numune 1 ve Numune 8'in akma dayanım değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in akma dayanımının kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'e göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. A360 alaşımı standartları incelendiğinde, testleri yapılmış olan numunelerin akma dayanımı sonuçlarının standart değerlerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [91-93].



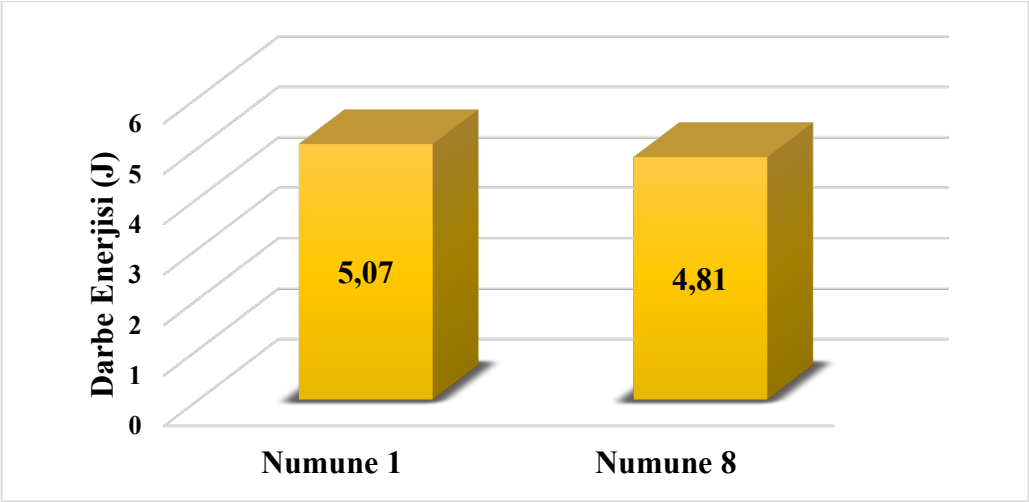
Şekil 4.5: Numune 1 ve Numune 8'in çekme dayanım değerleri.

Numune 1 ve Numune 8'in çekme dayanım (UTS) değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in çekme dayanımı 309,4 MPa olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'in çekme dayanımı 268,1 MPa olarak ölçülmüştür. A360 alaşımı standartları incelendiğinde, testleri yapılmış olan numunelerin akma dayanımı sonuçlarının standart değerlerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [91-93].



Şekil 4.6: Numune 1 ve Numune 8'in % uzama değerleri.

Şekil 4.6'da Numune 1 ve Numune 8'in % uzama değerlerinin sırasıyla 3,05 ve 2,85 olduğu görülmüştür. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 8'in % uzama değerleri karşılaştırıldığında kum kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,56 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7: Numune 1 ve Numune 8'in darbe enerjisi değerleri.

Numune 1 ve Numune 8'in darbe enerji değerleri Şekil 4.7'te verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in darbe enerjisi 5,07 J olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'in darbe enerji değeri 4,81 J olarak ölçülmüştür. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 8'in darbe enerji değerleri kıyaslandığı zaman kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %5,13 oranında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. A360 alaşımının yüksek basınçlı kokil kalıba dökümü şeklinde yapılan bir çalışmada darbe enerjisinin 5,4 J olduğu görülmüştür [95]. Alüminyum-silisyum alaşımlarında döküm yönteminde değişiklik ile katılaşma hızında değişiklik meydana gelir ve mukavemet özelliklerinde farklılıklar ortaya çıkar. Yüksek basınçlı dökümde kalıp dolumu hızlı şekilde gerçekleşir, bunun yanı sıra katılaşma da hızlı şekilde gerçekleşir. Gravite yöntemiyle kokil kalıba ve kum kalıba dökümü gerçekleştirilen Numune 1 ve Numune 8'in darbe enerjilerinin literatürdeki yüksek basınçlı döküm ile kokil kalıba yapılan döküm çalışması ile kıyaslandığında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

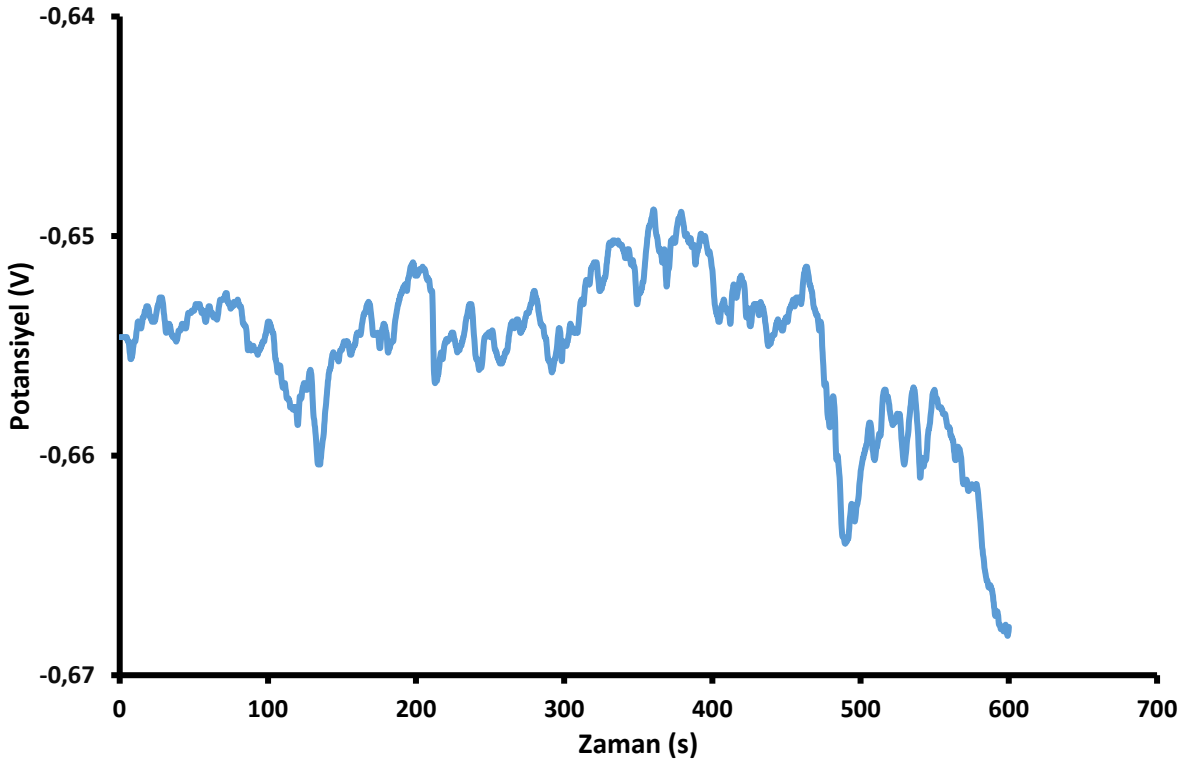
Potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide beklemiştir. Bu sürenin belirlenmesi için deneme deneyleri ile sürenin optimizasyonu sağlanmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da Numune 1 ve Numune 8'in OCP grafiği verilmiştir.

Açık devre potansiyelinin sabit bir değere gelmesinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testi başlamıştır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de Numune 1 ve Numune 8'in potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiş olan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden korozyon akım (Icorr) ve korozyon potansiyeli (Ecorr) değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra denklem 2.27'den korozyon hızı (CR) değerleri hesaplanmıştır.

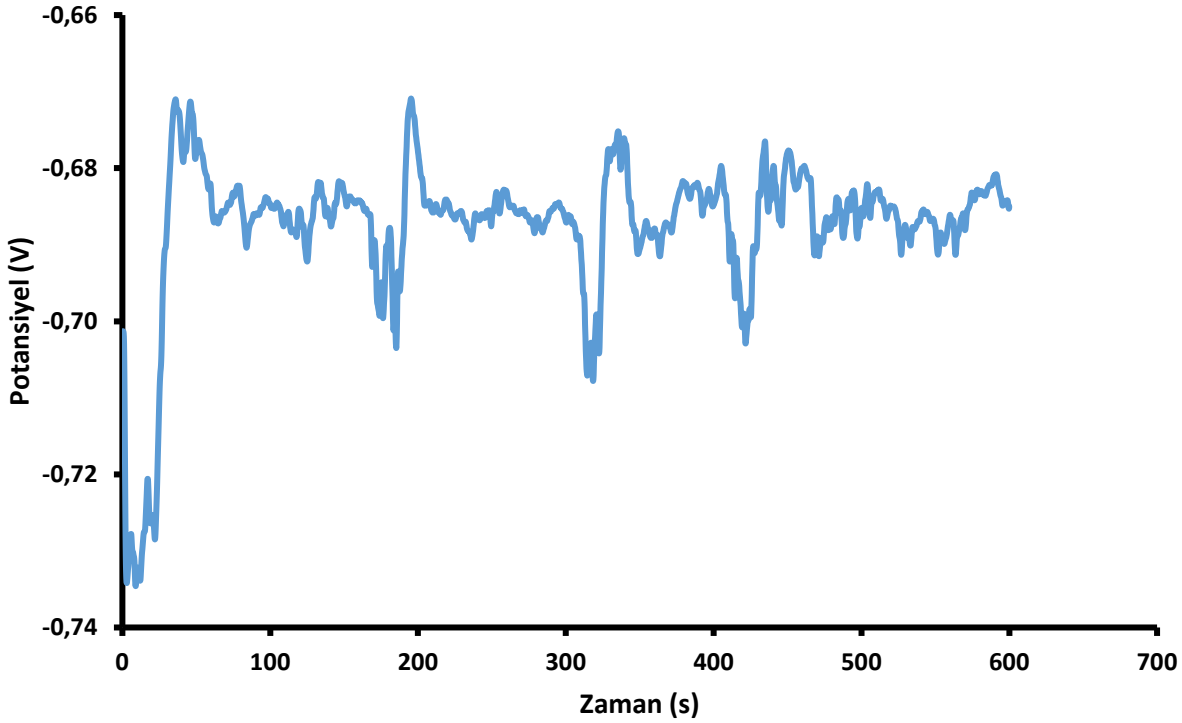
Tablo 4.1: Numune 1 ve Numune 8'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	Icorr (µA)	CR (mm/yıl)
Numune 1	-638	0,328	$140{,}9e^{-3}$
Numune 8	-670	1,08	$462{,}2e^{-3}$

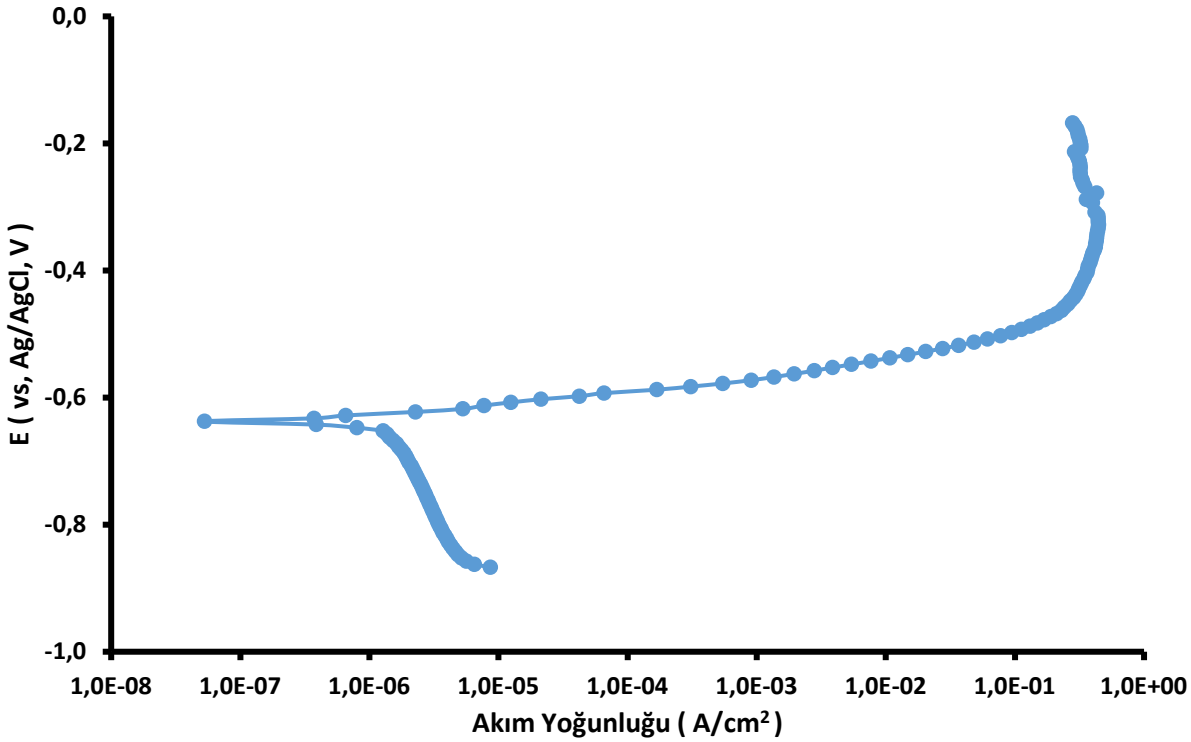
Tablo 4.1'de Numune 1 ve Numune 8'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametre değerleri verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in korozyon akım değeri 0,328µA, korozyon potansiyel değeri -638 mV ve korozyon hızı değerinin 140,9e^{-3} mm/yıl olduğu görülmektedir. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'in korozyon akım değeri 1,08 µA, korozyon potansiyel değeri -670 mV ve korozyon hızı değerinin 462,2e^{-3} mm/yıl olduğu görülmektedir. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1'in korozyon akım değerinin ve Numune 8'e kıyasla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Korozyon hızları bakımından karşılaştırıldığında da Numune 1'in korozyon hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Bütün parametreler incelendiğinde kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1'in korozyon dayanımının kum kalıba dökümü yapılan Numune 8'e kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



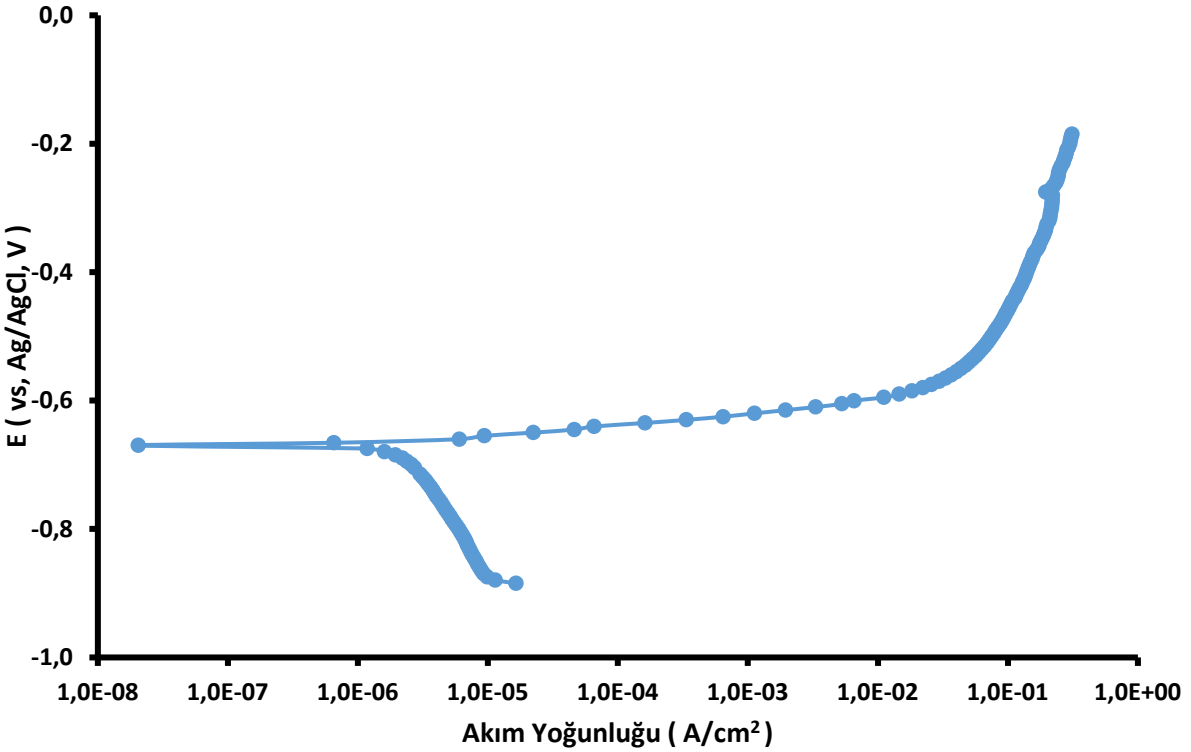
Şekil 4.8: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



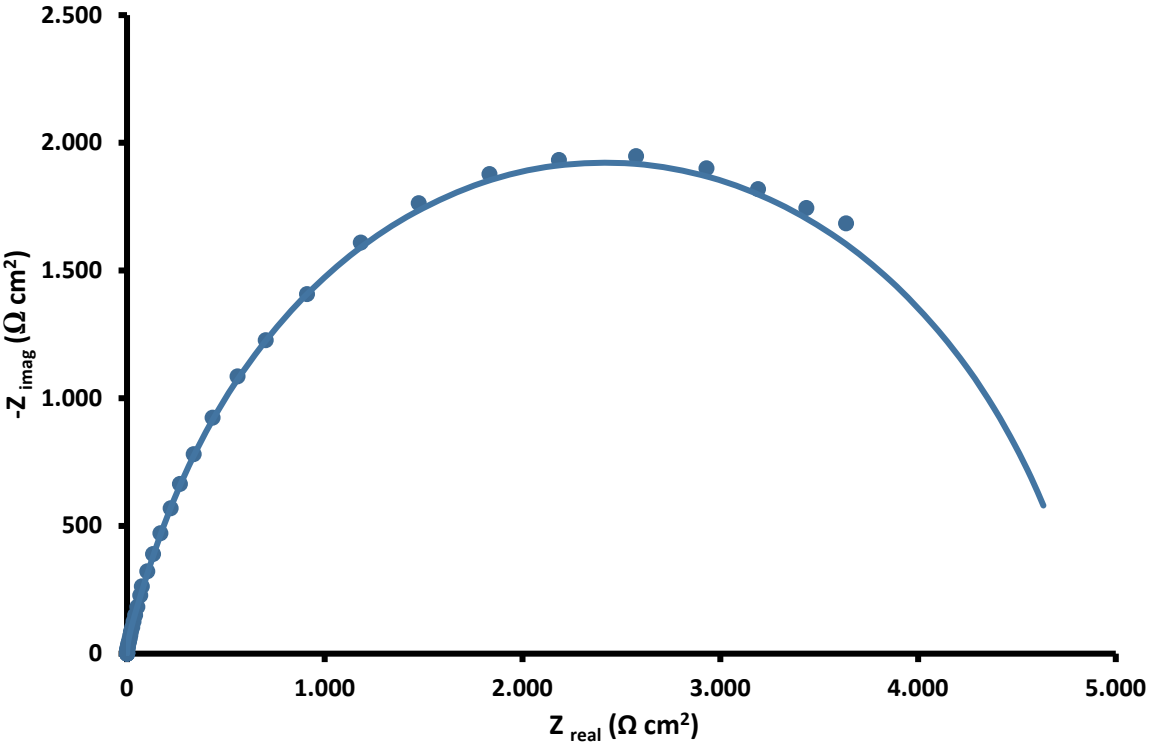
Şekil 4.9: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımın açık devre potansiyeli (OCP)



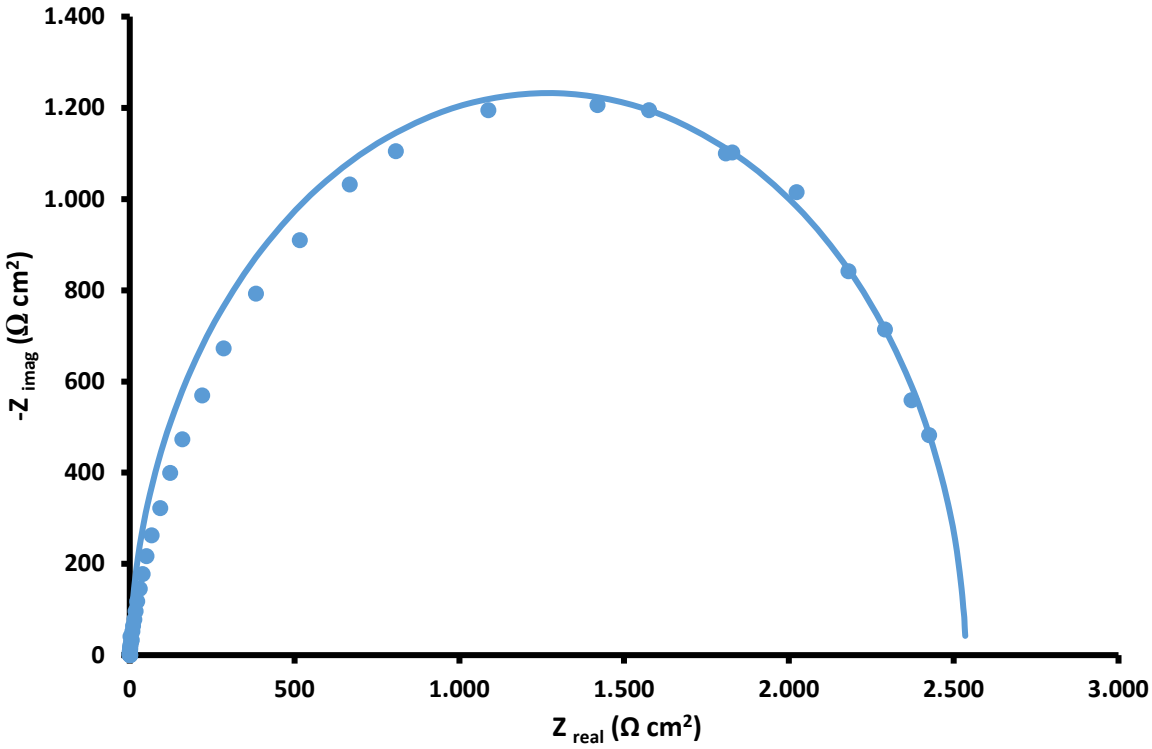
Şekil 4.10: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.11: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



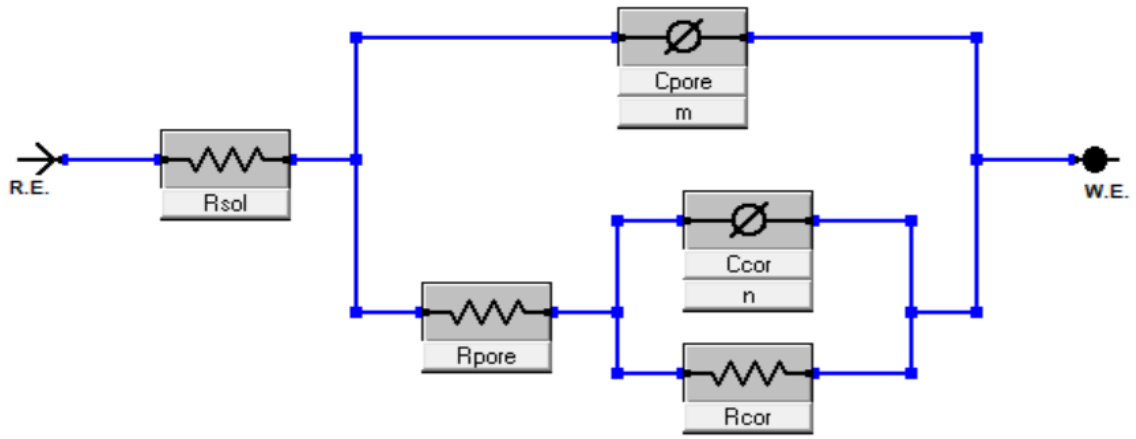
Şekil 4.12: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.13: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 8 alaşımının Nyquist diyagramı

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilen Numune 1 ve Numune 8'e ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır. Şekillerinin aynı olmasını korozyon sisteminin aynı mekanizma ile gerçekleştiğinin bir göstergesi iken çaplarda ortaya çıkan farklılığın korozyon direncinde değişiklik olduğunun bir göstergesi olduğu anlaşılmaktadır.

Elektrokimyasal empedans ölçümleri neticesinde elde edilen Nyquist diyagramları Şekil 4.14'te görseli verilmiş olan basitleştirilmiş REAP elektrik devre modeline göre modelleme işlemine tabi tutulmuştur. Rsol, basitleştirilmiş REAP elektrik devre modeli oluşturulurken çalışma elektrodu ve referans elektrot arasındaki çözelti direncini açıklamaktadır. Çözelti direnci (Rsol), elektrik devre modelinde bulunan diğer dirençlere seri şekilde bağlıdır. Rpore, elektrik devre modelinde gözenek direncini tanımlayan devre elemanı olarak yer almaktadır. Cpore, gözenek kapasitansını temsil etmektedir. Rcor ve Ccor devre elemanları, metal yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyonlarla ilgilidir.



Şekil 4.14: Basitleştirilmiş REAP elektrik devre modeli

Tablo 4.2'de elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 1 ve Numune 8'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2: Numune 1 ve Numune 8'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Rcor (Ω)	Ccor ($S*s^n$)	n	Rpore (Ω)	Cpore ($S*s^m$)	m
Numune 1	4512	$32,68e^{-6}$	0,768	357,1	$13,24e^{-6}$	1
Numune 8	4415	$2,801e^{-6}$	0,893	253,2	$10,35e^{-6}$	0,982

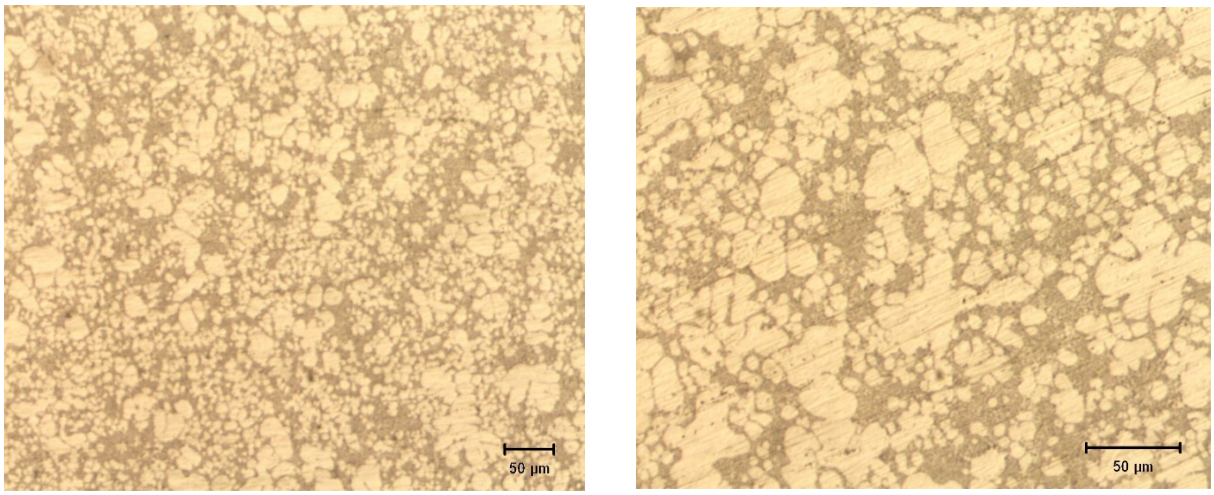
4.2. STRONSİYUM İLAVESİ

A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça 0,02% oranında Sr içerecek şekilde modifiye edici eklenmesi ile kokil ve kum kalıba dökümleri yapılan alaşımlara sırasıyla Numune 2 ve Numune 9 olarak isim verilmiştir. Şekil 4.15(a) ve Şekil 4.15(b)'de kokil kalıba dökülmüş olan Sr modifiyeli A360 alaşımının (Numune 2) farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.15'deki Numune 2 alaşımı mikroyapı görüntüleri incelendiğinde Şekil 4.1'de olduğu gibi açık renkli kısım birincil alüminyum fazını (α-Al), koyu renkli kısım ötektik fazı temsil etmektedir. Şekil 4.15(b)'de Numune 2 alaşımı mikroyapı görüntüsünde görüldüğü gibi ötektik fazı temsil eden koyu renkli kısımda bir artış söz konudur. Numune 1 alaşımının mikroyapısı ile Numune 2 alaşımı karşılaştırıldığında, Numune 1 alaşımında birincil alüminyum miktarı daha yüksek oranda bulunmaktadır. Numune 1 alaşımında kaba ve iğnemsi görünümü ile yer alan ötektik silisyum parçalarının, Numune 2'de Sr modifiye edicinin alaşıma eklenmesi ile birlikte çok ince lifli morfolojiye dönüştüğü görülmüştür. Modifiye edici Sr'nin ötektik silisyum parçalarının daha ince bir katılaşma sergilemesine etki ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.16'da kum kalıba dökülmüş olan Sr modifiyeli A360 alaşımının (Numune 9) mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.16'da kum kalıba yapılan dökümde yavaş soğuma hızının Si büyümesine katkıda bulunmasından dolayı kokil kalıba döküme (Şekil 4.15) göre dendritik yapının daha belirgin bir hale geldiği gözlenmiştir.

Sr modifiye edicinin eklenti miktarı ile ilgili yapılan çalışmalarda farklı görüşler mevcuttur. Yapılan çalışmalarda 200 ppm ile 300 ppm arası eklenti miktarı alaşımın modifikasyon için kullanılması gereken en ideal miktar olarak ortaya çıkmaktadır [86,95-100].

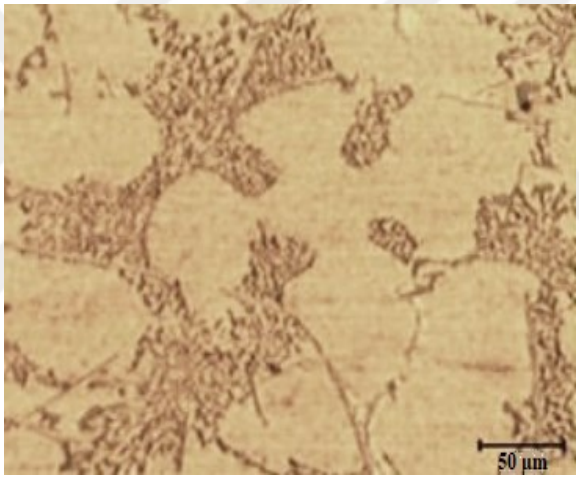
Closset ve Gruzleski [97], stronsiyum elementinin, Al-Si alaşımlarında modifikatör olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Stronsiyum elementi de ötektik silisyumu modifiye ederek silisyumun morfolojisini değiştirmektedir. Eser miktarda Sr katkısıyla silisyumun morfolojisi kaba-pulsu yapıdan, ince iğnemsi bir yapıya dönüşmekte ve süneklik/darbe mukavemeti gibi birçok mekanik özelliklerde iyileşme görülmektedir [98-100]. Bu özelliklerin değişimi Si morfolojisinin değişimiyle direkt olarak ilişkilidir. Si morfolojisinin değişimine ek olarak, alüminyum içerisindeki oksitli yapının da değişimi Sr katkısıyla mümkündür. Dolayısıyla stronsiyum elementi hem Si morfolojisini hem de malzeme içerisindeki oksitli yapının morfolojisini direkt olarak alaşımın fiziksel özelliklerini değiştiren çok etkili bir modifikatördür.

Zhang ve diğerleri [98] AC-42000 alaşımında (Si % 6.5-7.5) yapılan modifikasyon için 300- 400 ppm'lik Sr katkısının yeterli olabileceğini göstermiştir. 300 ppm üzerindeki katkıların modifikasyon açısından bir değişiklik yapmadığını ve Si morfolojisini değiştiren diğer etmenlerin ısıl işlem tipi, soğuma hızı, tane inceltici kullanımı ya da dökümün türü gibi konular olduğunu raporlamıştır. Zhang ve diğerlerinin [99] çalışmasına göre 10 dakikalık bir tutma süresiyle 400 ppm stronsiyumun eklenmesi kayda değer bir Si morfolojisi değişimine sebebiyet vermektedir. Tüm bunlara ilaveten Sr miktarıyla ikizlenmenin de artması Si morfolojisini etkileyen ana unsurdur.



(a) (b)

Şekil 4.15: Kokil kalıba döküm (a) Numune 2 (50x büyütme), (b) Numune 2 (100x büyütme)

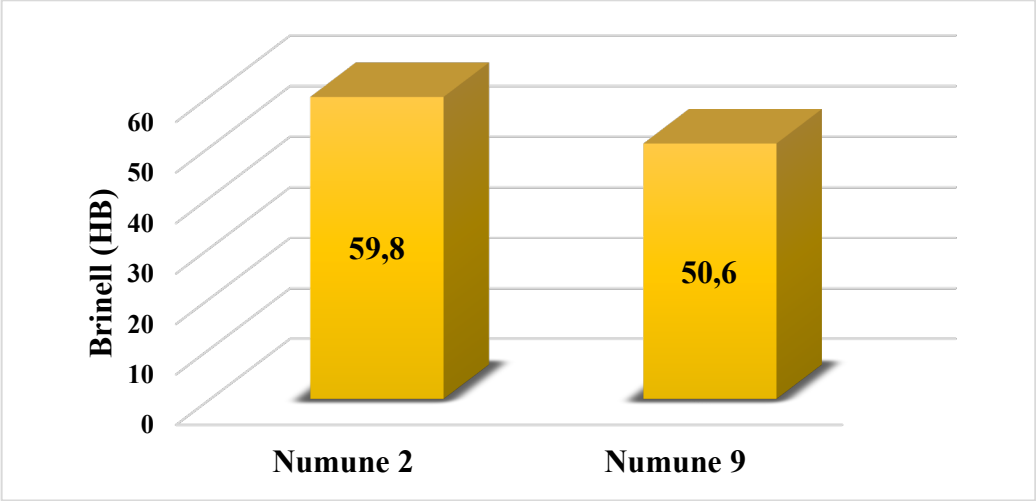


Şekil 4.16: Kum kalıba döküm Numune 9 (100x büyütme)

Deney numunelerinin kesilmesinin ardından yüzeyi zımpara pürüzsüz hale getirildikten sonra ön yüzey ve arka yüzeylerine sertlik testi uygulanmıştır. Bu değerler ön ve arka yüzeyden 5'er tane olmak üzere toplamda 10 ölçümün ortalamasının alınmasıyla ortaya çıkmıştır. Numune 2'in sertlik değerini 59,8 HB olarak, Numune 9'un sertlik değeri 50,6 HB olarak ölçüm değerleri Şekil 4.17'de gösterilmektedir. A360 alaşımının ilave yapılmadan önceki sertlik değerinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Sr modifiyeli A360 alaşımının kokil kalıba yapılmış olan dökümünün (Numune 2) sertlik değerinde 2,45% oranında, kum kalıba yapılmış olan dökümün (Numune 9) sertlik değerinde 2,5% oranında düşüş görülmüştür. Modifiye edici Sr'nin ilavesi ile ötektik silisyum parçacıkları daha ince ve homojen bir dağılım sergilemektedir. Bu nedenle Sr modifiye edici ilavesi ile sertlik değerinde kısmi bir azalma

meydana gelmiştir. Bu çalışmada ölçülen sertlik değerleri yapılan benzer çalışmalarla uyumlu olduğu anlaşılmıştır [86,90].

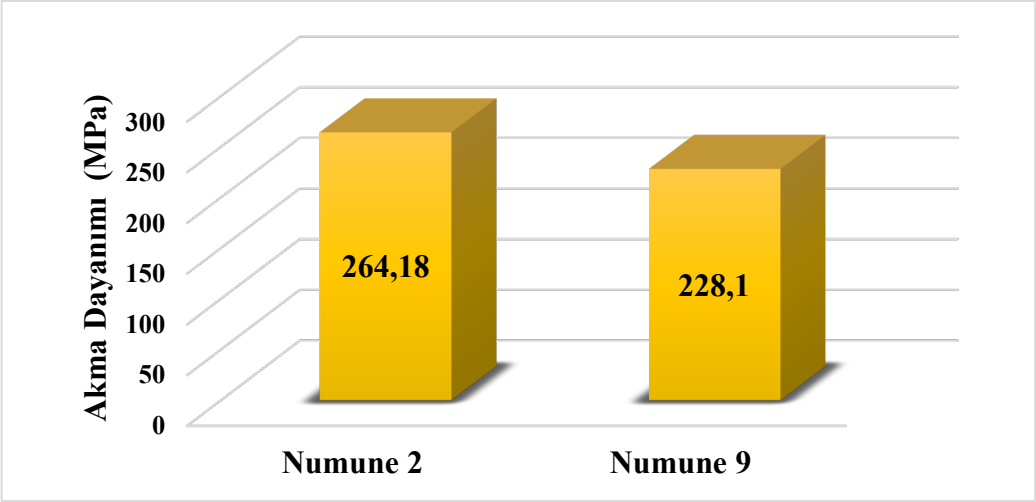
Kocaman ve ark. [86] yaptığı çalışmada, 100 ve 200 ppm Al10Sr ilaveli numunelerinin sertlik değerlerinin ilavesiz A360 alaşımının sertlik değerine göre bir miktar azaldığı, Al10Sr değiştirici miktarının artmasıyla ise değişmediği görülmektedir. Benzer bir çalışmada Fan ve ark. [91] ağırlıkça %10-13 Si içeren alüminyum alaşımına farklı oranlarda eklenen Al10Sr değiştirici miktarının artmasıyla alaşımın sertliğinin azaldığını bildirmişlerdir. Al-Si alaşımları ile ilgili yapılan başka bir çalışmada ağırlıkça 0,1% stronsiyumun Al-9Si alaşımının sertliğinde meydana getirdiği azalmanın modifiye edici stronsiyum ilavesinin ötektik noktanın daha yüksek silisyum miktarlarına kayması sebebiyle yapıdaki hacimsel oranların değişiminden kaynaklandığı belirtilmiştir[89].



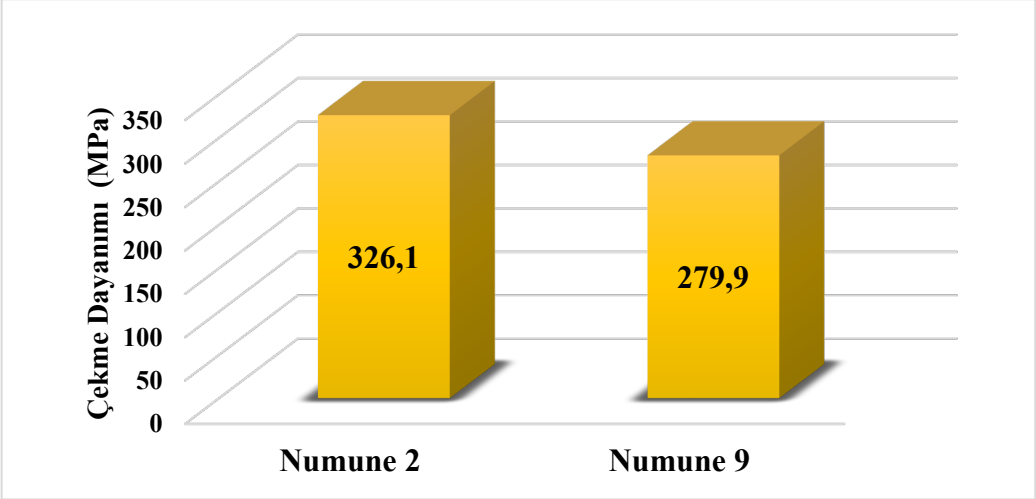
Şekil 4.17: Numune 2 ve Numune 9'un Brinell sertlik değerlerleri

Numune 2 ve Numune 9'un akma dayanım değerleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'in akma dayanımının kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'a göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

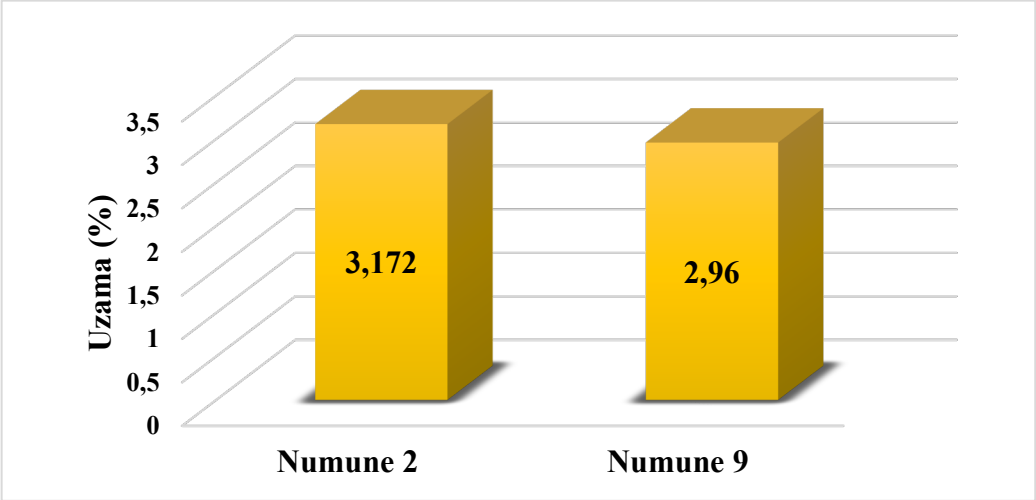
Numune 2 ve Numune 9'un çekme dayanım (UTS) değerleri Şekil 4.19'da verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'in çekme dayanımı 326,1 MPa olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'in çekme dayanımı 279,9 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.18: Numune 2 ve Numune 9'un akma dayanım değerleri.

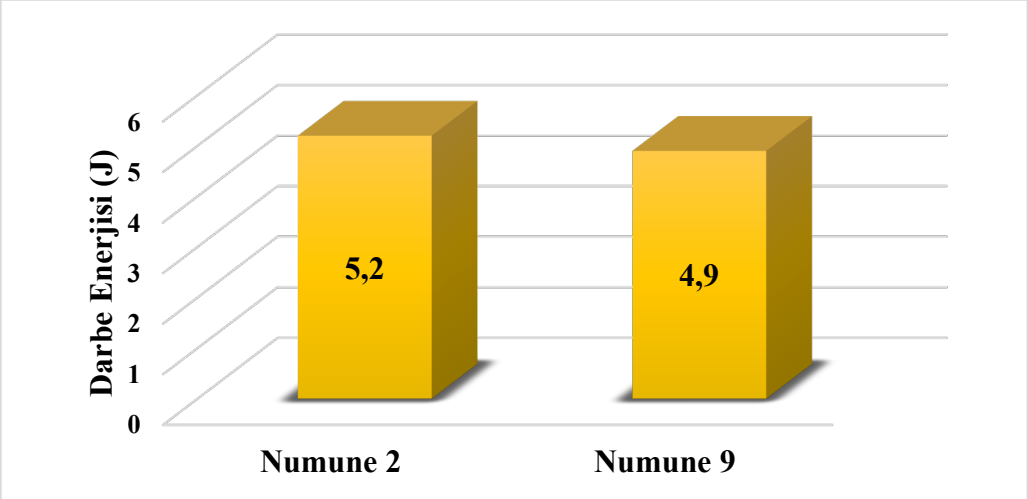


Şekil 4.19: Numune 2 ve Numune 9'un çekme dayanım değerleri.



Şekil 4.20: Numune 2 ve Numune 9'un % uzama değerleri.

Şekil 4.20'de Numune 2 ve Numune 9'un % uzama değerlerinin sırasıyla 3,172 ve 2,96 olduğu görülmüştür. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 9'in % uzama değerleri karşılaştırıldığında kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,7 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

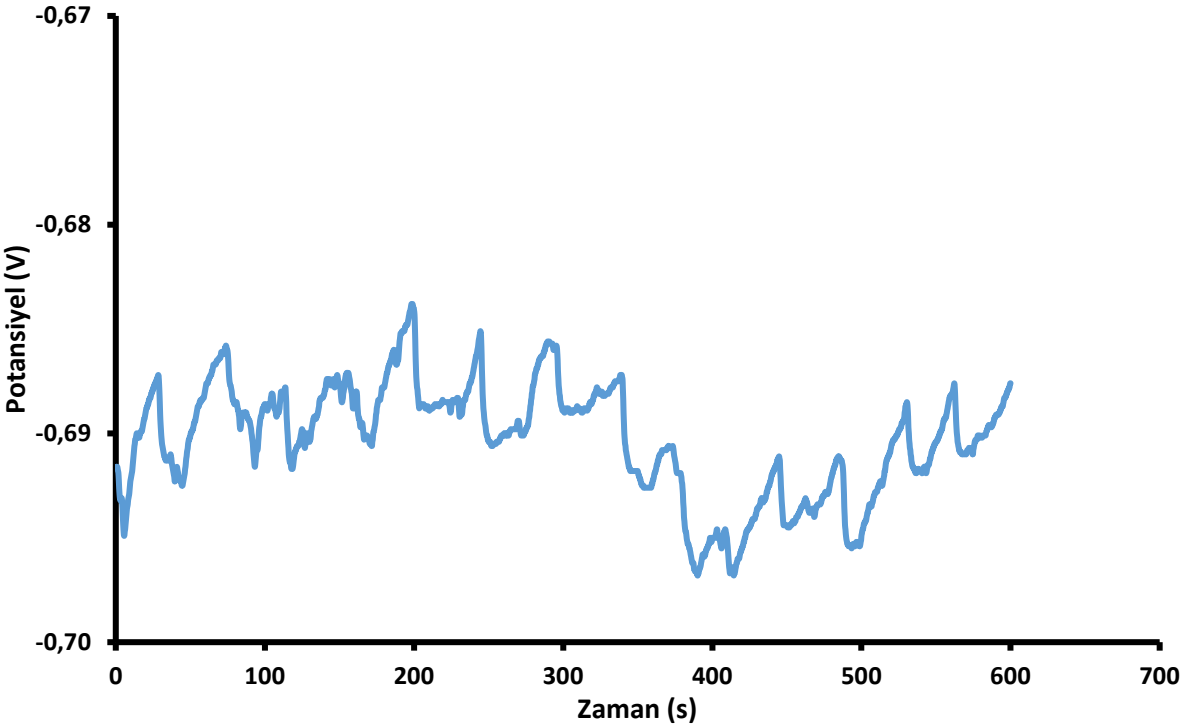


Şekil 4.21: Numune 2 ve Numune 9'un darbe enerjisi değerleri.

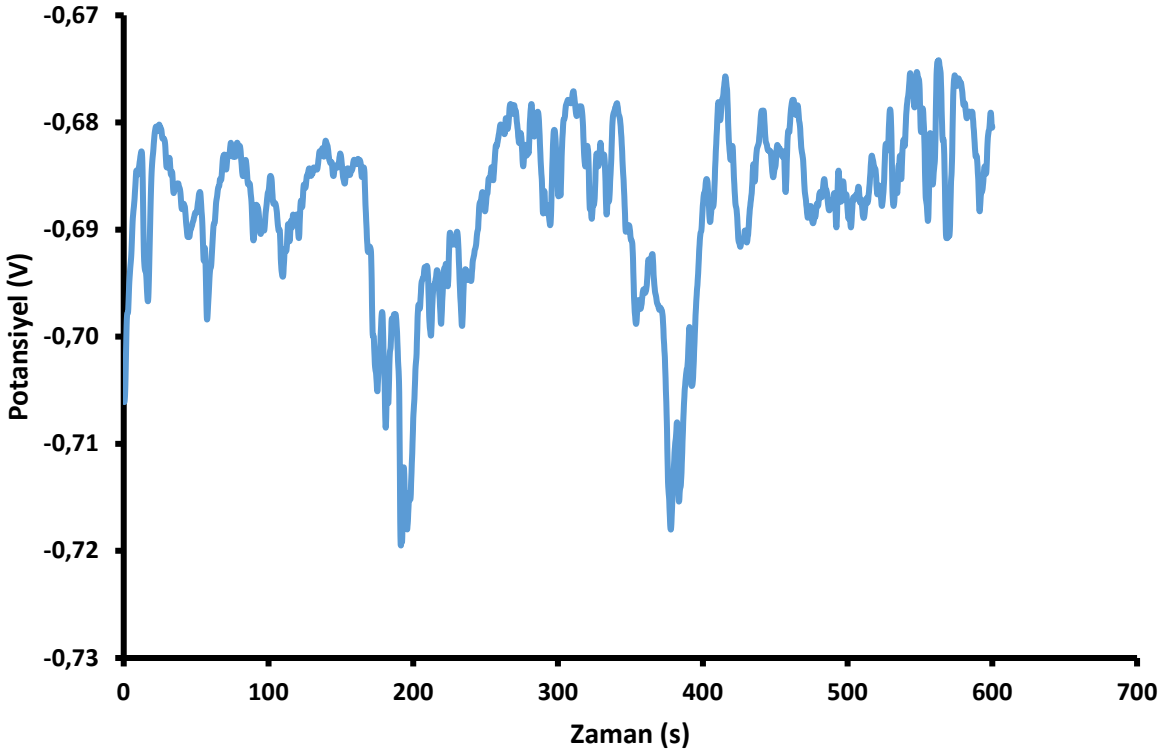
Numune 2 ve Numune 9'un darbe enerji değerleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'in darbe enerjisi 5,2 J olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'un darbe enerji değeri 5,41 J olarak ölçülmüştür. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 9'un darbe enerji değerleri kıyaslandığı zaman kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,12 oranında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır.

Potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide beklemiştir. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te Numune 2 ve Numune 9'un OCP grafiği verilmiştir.

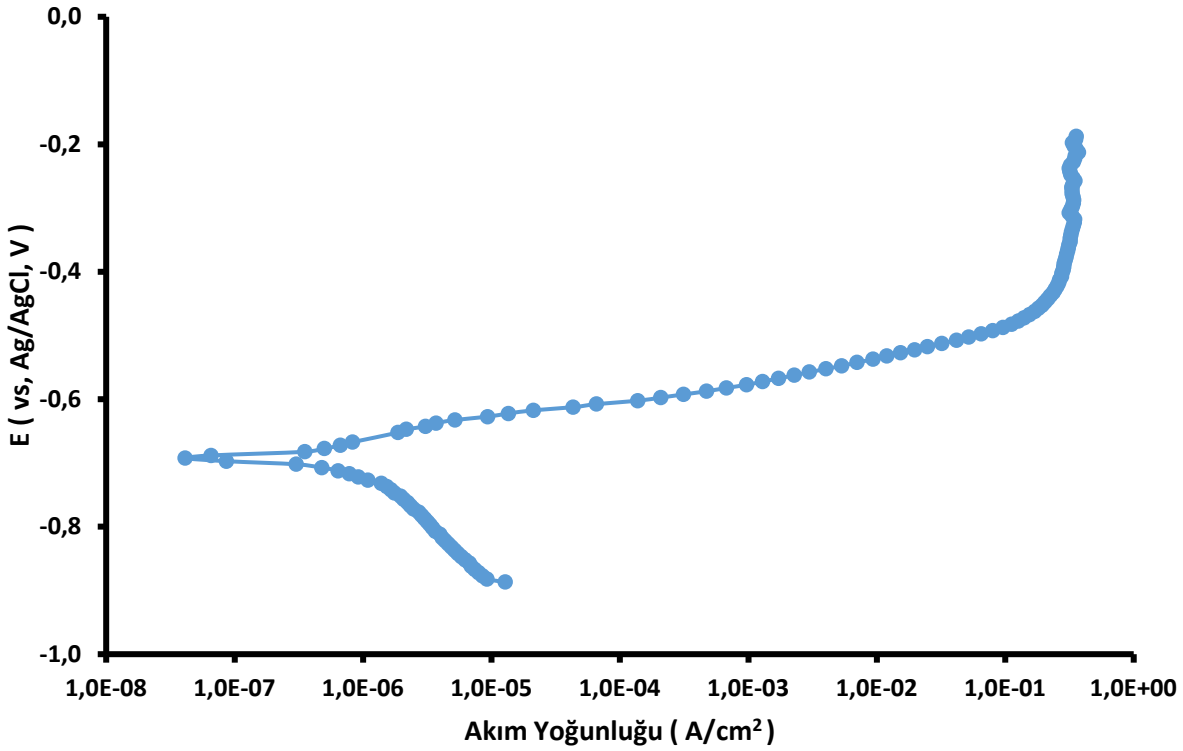
Açık devre potansiyelinin sabit bir değere gelmesinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testi başlamıştır. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te Numune 2 ve Numune 9'un potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiş olan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden korozyon akım (Icorr) ve korozyon potansiyeli (Ecorr) değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra denklem 2.27'den korozyon hızı (CR) değerleri hesaplanmıştır.



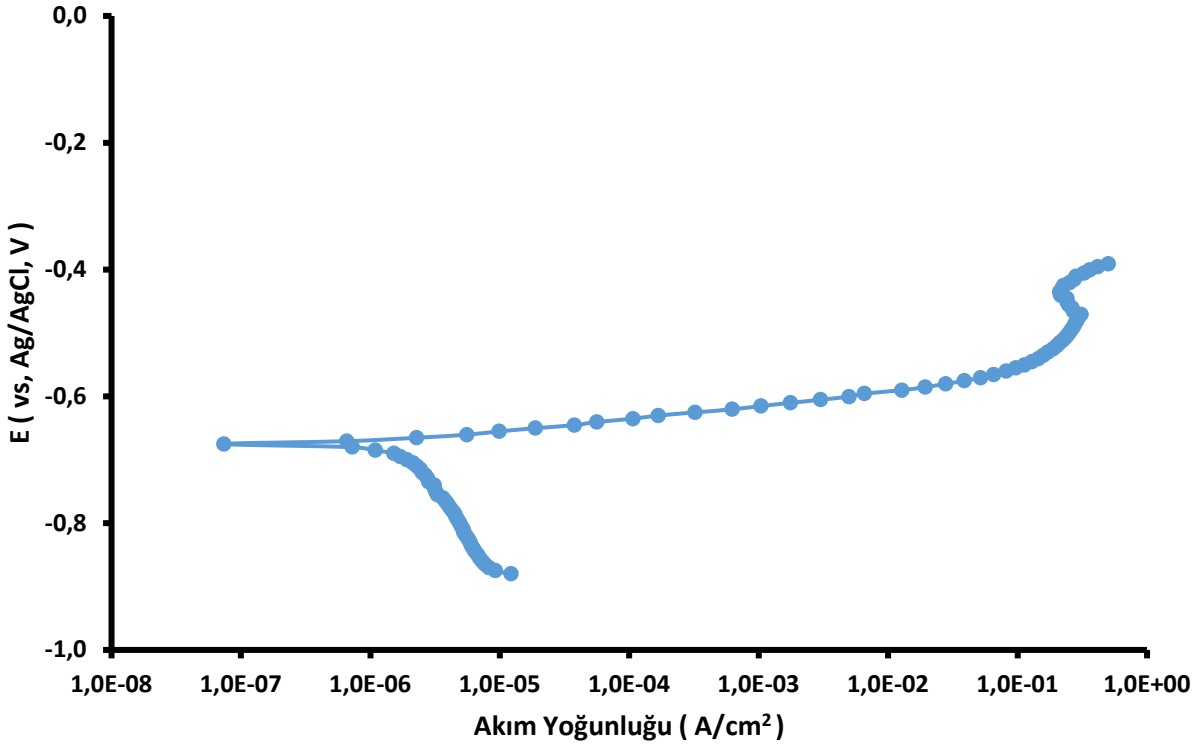
Şekil 4.22: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



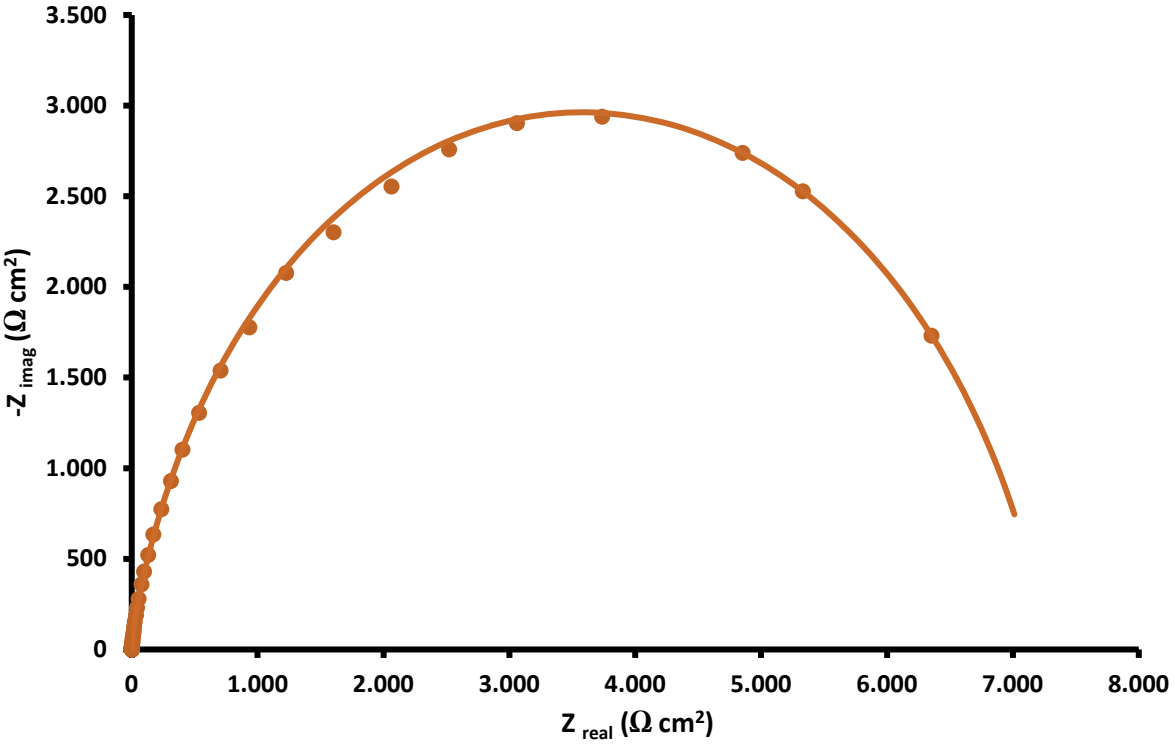
Şekil 4.23: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



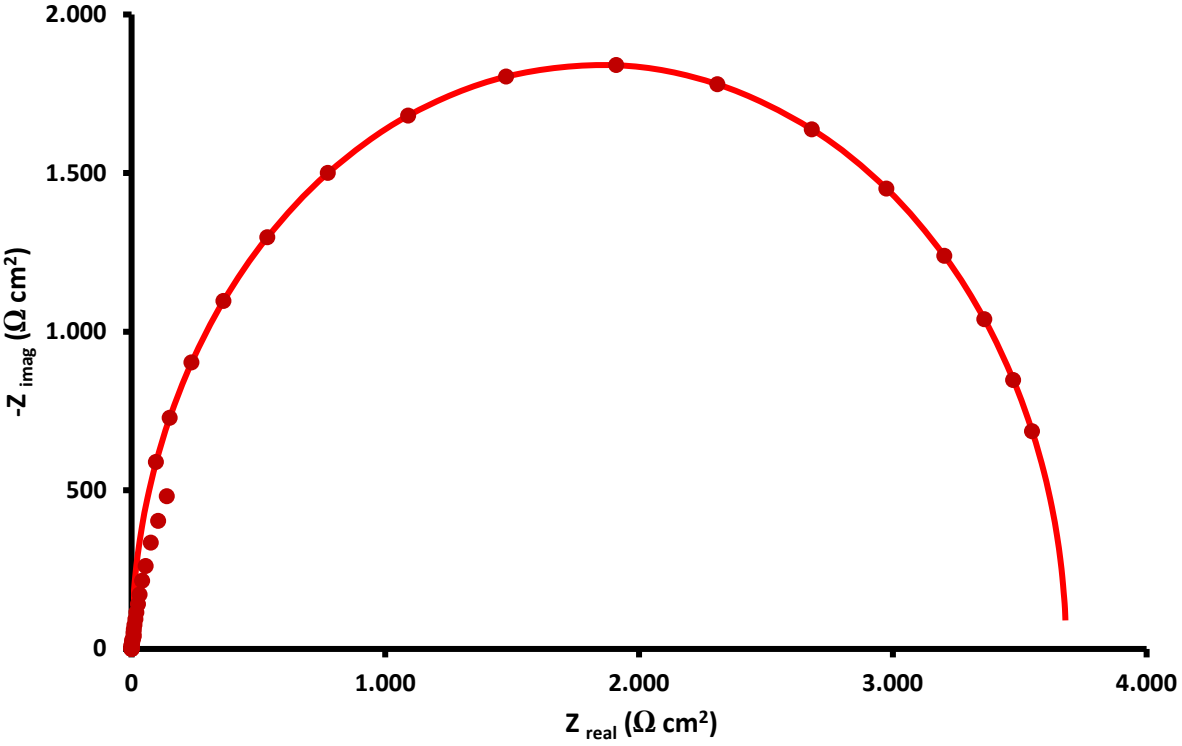
Şekil 4.24: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.25: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.26: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.27: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 9 alaşımının Nyquist diyagramı

Tablo 4.3: Numune 2 ve Numune 9'a ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	Icorr (µA)	CR (mm/yıl)
Numune 2	-676	0,284	$123e^{-3}$
Numune 9	-693	1,02	$437,1e^{-3}$

Tablo 4.3'de Numune 2 ve Numune 9'a ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametre değerleri verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'nin korozyon akım değeri 0,284µA, korozyon potansiyel değeri -676 mV ve korozyon hızı değerinin $123e^{-3}$ mm/yıl olduğu görülmektedir. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'un korozyon akım değeri 1,02 µA, korozyon potansiyel değeri -693 mV ve korozyon hızı değerinin $437,1e^{-3}$ mm/yıl olduğu görülmektedir. Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2'in korozyon akım değerinin ve Numune 9'a kıyasla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Korozyon hızları bakımından karşılaştırıldığında da Numune 2'in korozyon hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Bütün parametreler incelendiğinde kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2'nin korozyon dayanımının kum kalıba dökümü yapılan Numune 9'a kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilen Numune 2 ve Numune 9'a ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.4'te elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 2 ve Numune 9'a ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.4: ***Numune 2 ve Numune 9'a ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.***

	Rcor (Ω)	Ccor ($S*s^n$)	n	Rpore (Ω)	Cpore ($S*s^m$)	m
Numune 2	6519	$17,39e^{-6}$	0,743	773,6	$9,534e^{-6}$	1
Numune 9	4498	$29,61e^{-6}$	0,923	342,8	$12,45e^{-6}$	1

Numune 2'ye ait Rcor değeri 6519 Ω ve Rpore değeri 773,6 Ω olarak ölçülmüştür. Numune 9'a ait Rcor değeri 4498 Ω ve Rpore değeri 342,8 Ω olarak ölçülmüştür. Numune 2'ye ait Ccor değeri $17,39e^{-6}$ $S*s^{0,743}$ ve Cpore değeri $9,534e^{-6}$ $S*s^{1}$ olarak ölçülmüştür. Numune 9'a ait Ccor değeri $29,61e^{-6}$ $S*s^{0,923}$ ve Cpore değeri $12,45e^{-6}$ $S*s^{1}$ olarak ölçülmüştür. Numune 2 ile Numune 9'a ait Rcor değerleri karşılaştırıldığında Numune 2'nin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Numune 2 ile Numune 9'a ait Ccor değerleri karşılaştırıldığında Numune 2'nin daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Korozyon dayanımı açısından verilerin tamamı kıyaslandığında Numune 2'nin korozyon dayanımının Numune 9'a kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

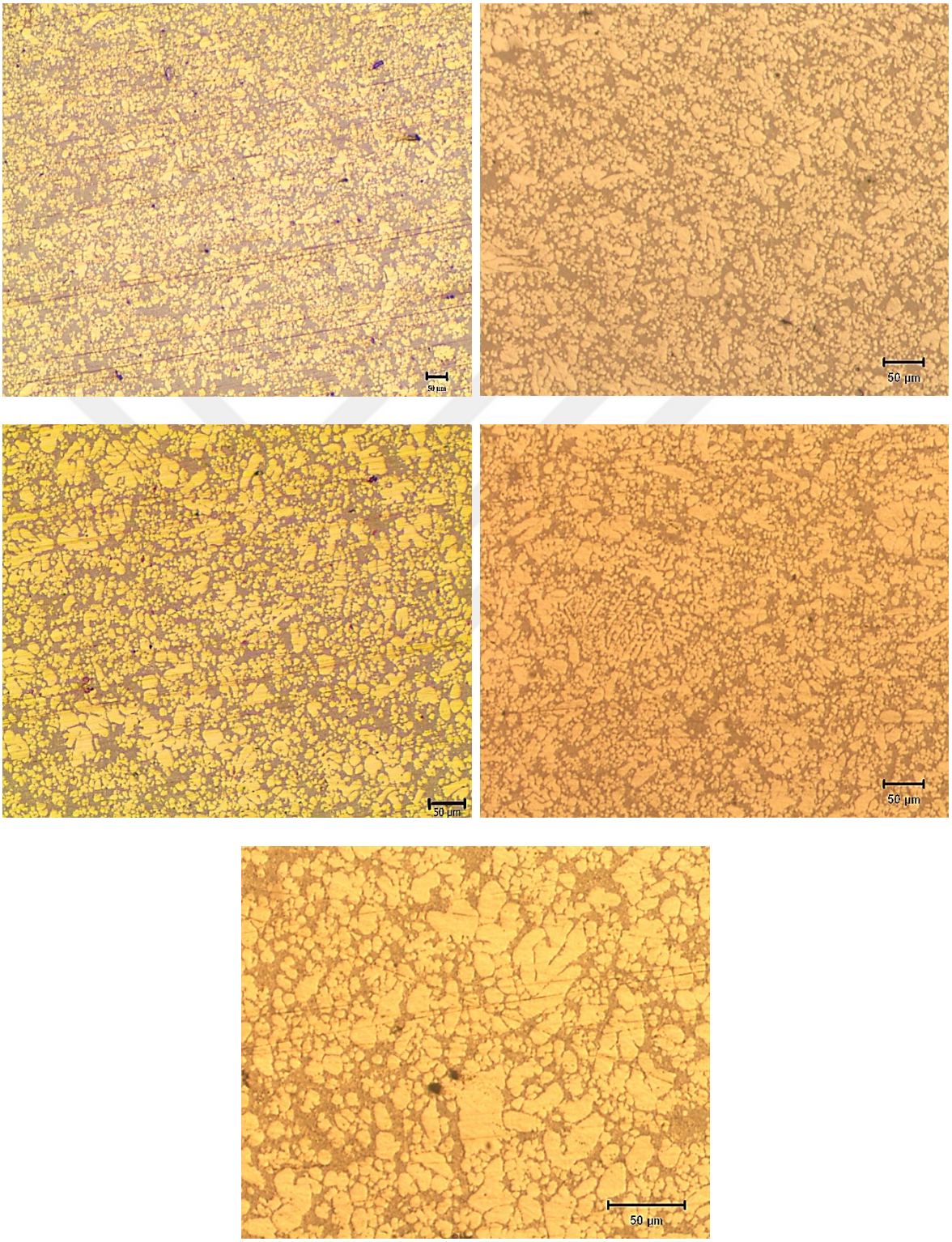
4.3. BOR İLAVESİ

A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça %0,03, %0,06, %0,13, %0,16 ve %0,18 oranında B içerecek şekilde Al-3B master alaşımı ilaveleri ile kokil kalıba dökümleri yapılan alaşımlara sırasıyla Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7 olarak isim verilmiştir.

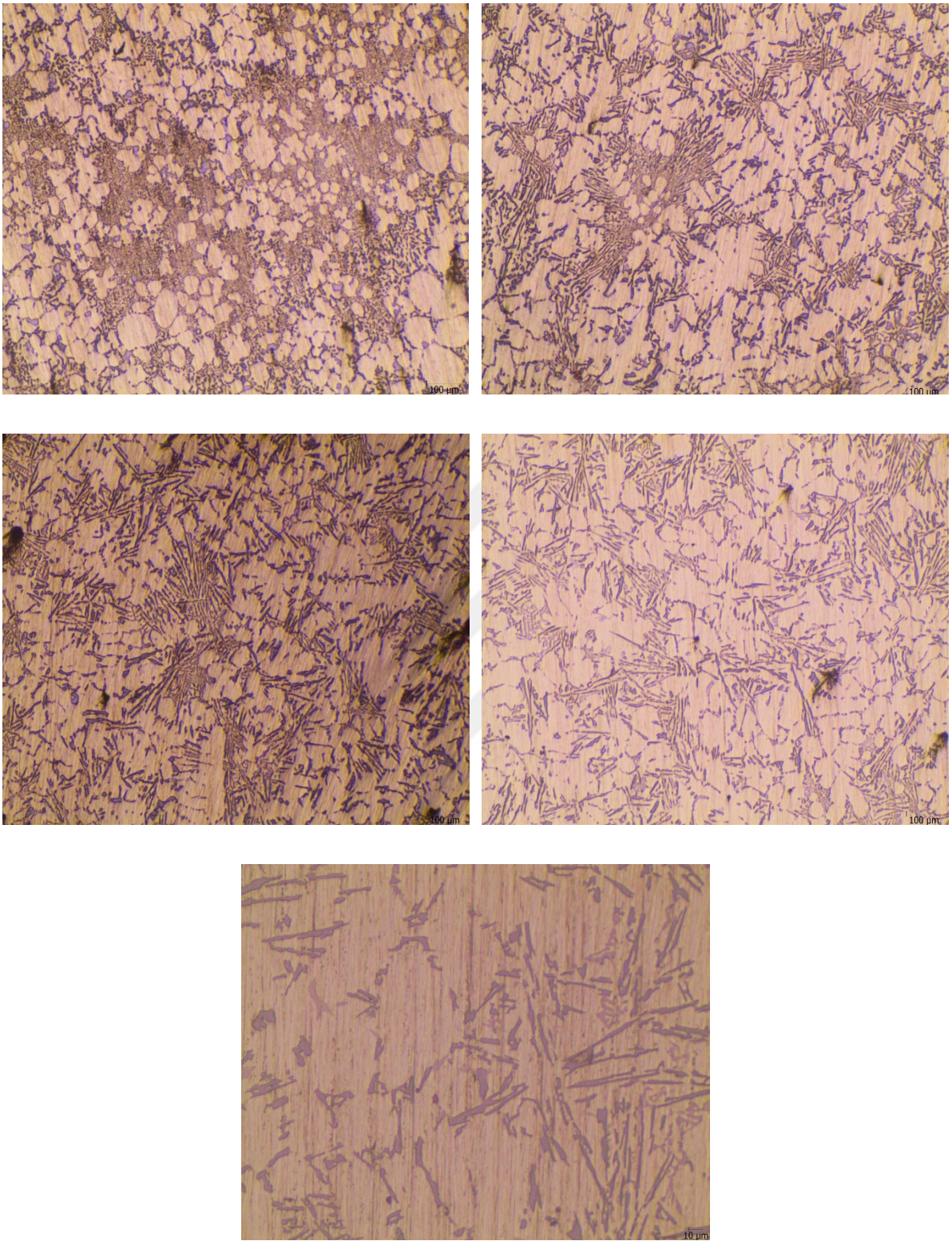
A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça %0,03, %0,06, %0,13, %0,16 ve %0,18 oranında B içerecek şekilde Al-3B master alaşımı ilaveleri ile kum kalıba dökümleri yapılan alaşımlara sırasıyla Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14 olarak isim verilmiştir.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da bor ilaveli numunelere ait mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde %0,03 bor ilave edildiğinde ötektik faz oranı en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Artan bor ilave oranı ile birlikte ötektik faz oranı

düşüş göstermiştir, bunun iri ötektik silisyum parçacıklarının incelmesinde tane inceltici ilavesinin etkili olduğu görülmektedir.

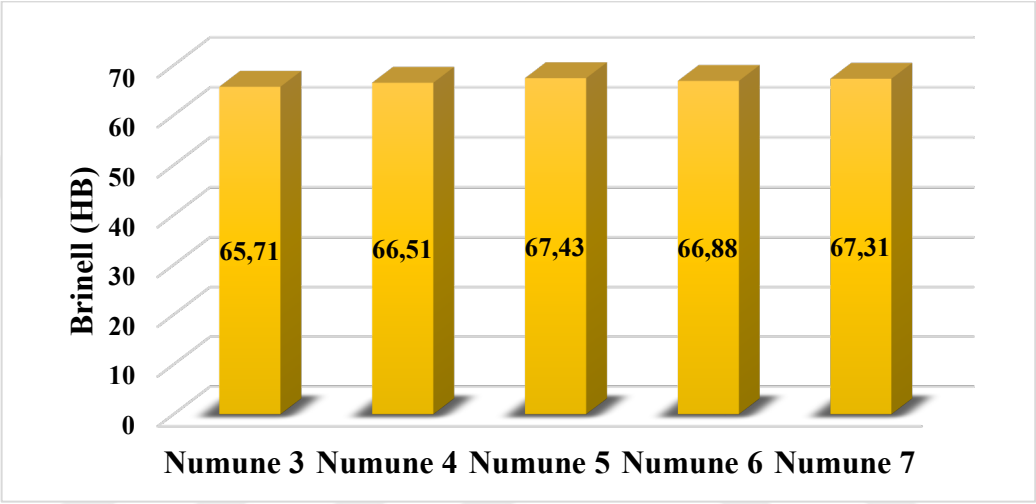


Şekil 4.28: Kokil kalıba döküm (a) Numune 3, (b) Numune 4, (c) Numune 5, (d) Numune 6, (e) Numune 7

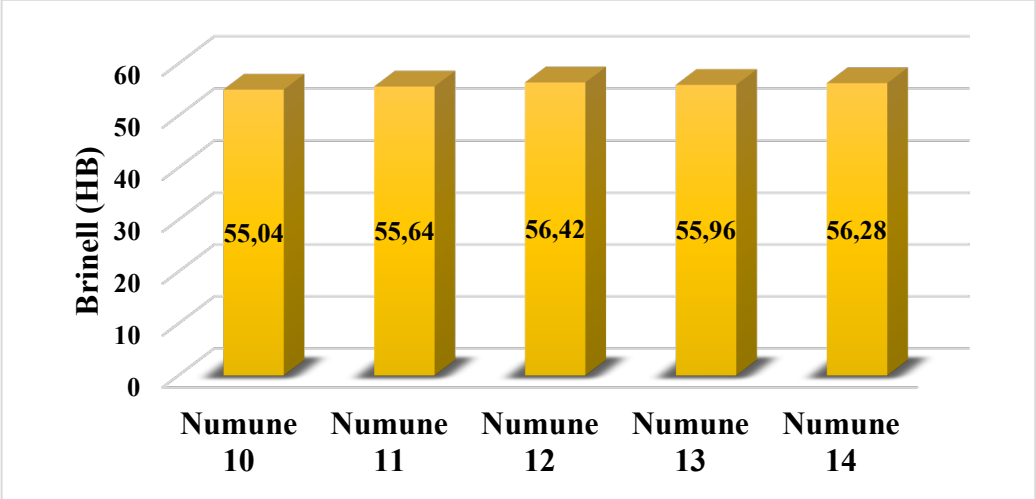


Şekil 4.29: Kum kalıba döküm (a) Numune 10, (b) Numune 11, (c) Numune 12, (d) Numune 13, (e) Numune 14

Şekil 4.30'da Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait Brinell sertlik değerleri gösterilmiştir. Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 67,43 HB ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %7,2, %8,5, %10, %9,1 ve %9,8 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



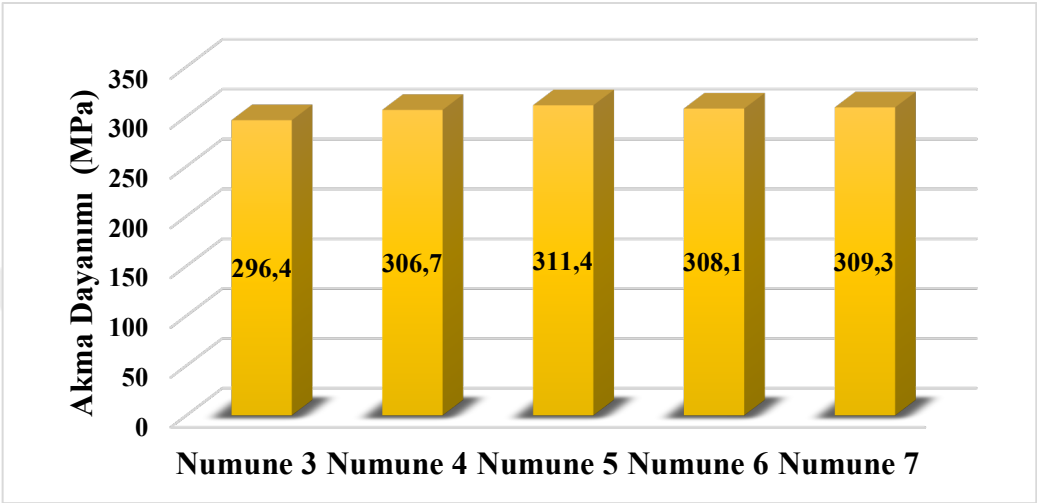
Şekil 4.30: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin Brinell sertlik değerleri



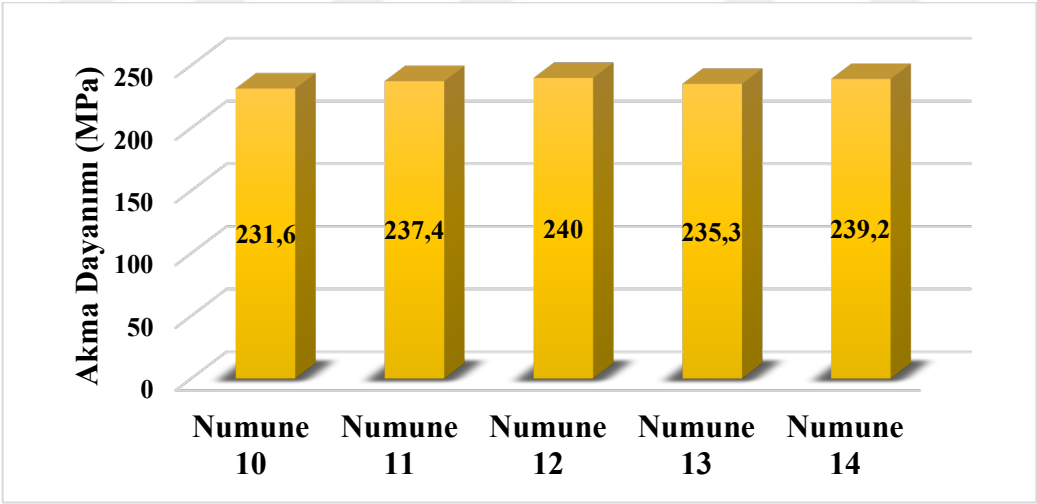
Şekil 4.31: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün Brinell sertlik değerleri

Şekil 4.31'da Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait Brinell sertlik değerleri gösterilmiştir. Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden

en yüksek sertlik değerine sahip olanın 56,42 HB ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %6,05, %7,21, %8,7, %7,83 ve %8,43 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.32: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin akma dayanım değerleri

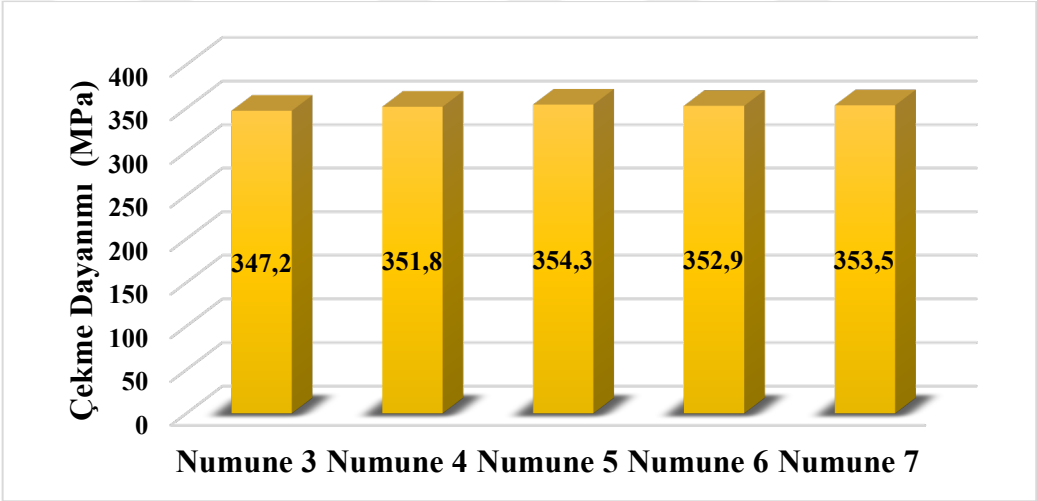


Şekil 4.33: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün akma dayanım değerleri

Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin akma dayanım değerleri Şekil 4.32'de verilmiştir. Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 311,4 MPa ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin akma dayanım değerlerini

arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %17,81, %21,9, %23,77, %22,46 ve %22,93 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.33'te Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait akma dayanım değerleri gösterilmiştir. Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 240 MPa ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %5,89, %8,55, %9,73, %7,59 ve %9,37 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

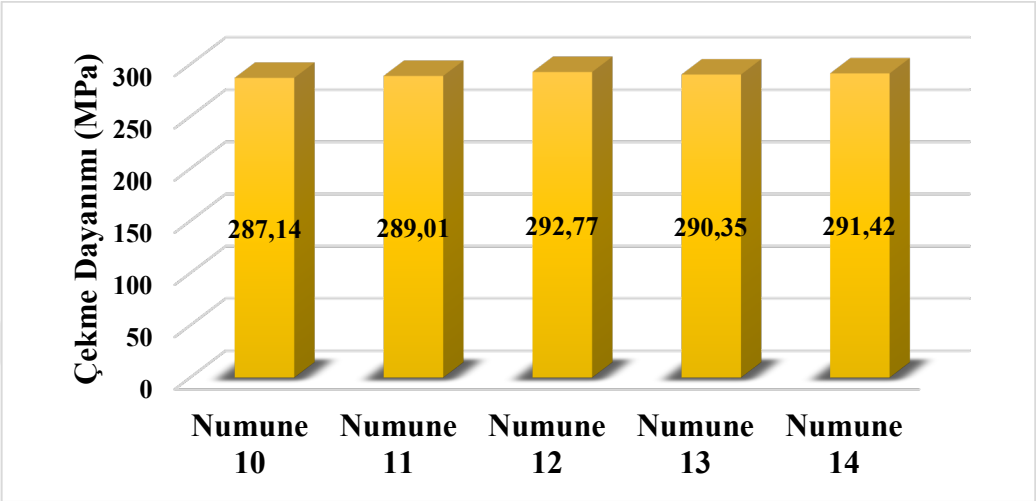


Şekil 4.34: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin çekme dayanım değerleri

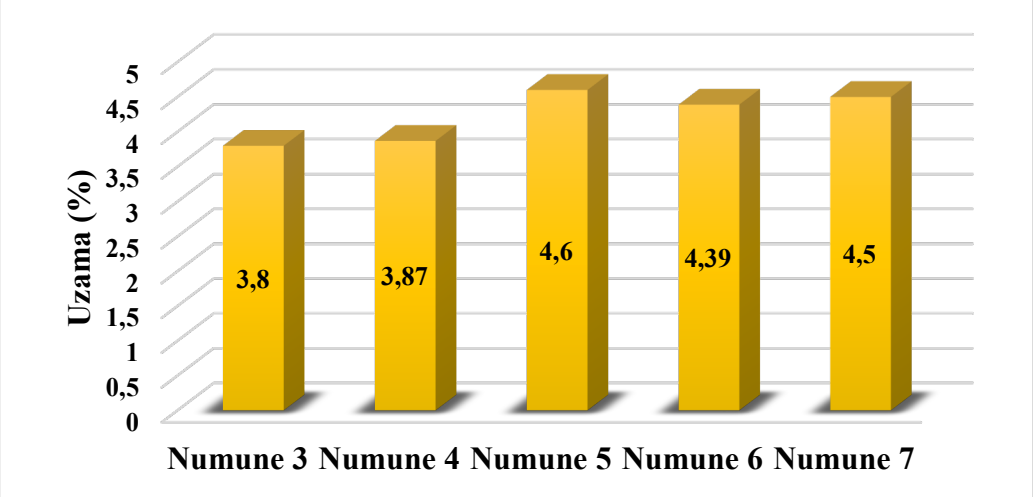
Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin çekme dayanım (UTS) değerleri Şekil 4.34'te verilmiştir. Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 354,3 MPa ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %12,21, %13,7, %14,51, %14,05 ve %14,25 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.35'te Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait çekme dayanım değerleri gösterilmiştir. Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 292,77 MPa ile Numune 12 olduğu tespit

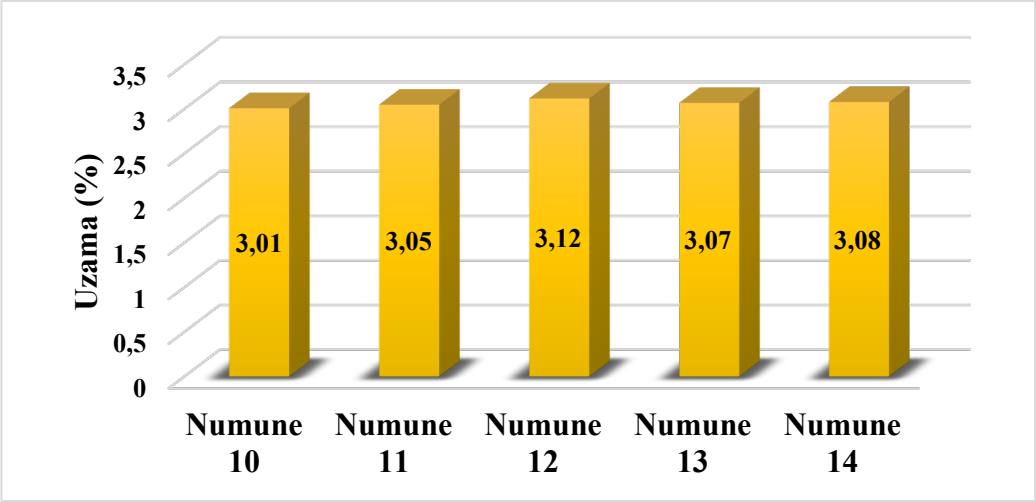
edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %7,1, %7,8, %9,2, %8,3 ve %8,7 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.35: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün çekme dayanım değerleri



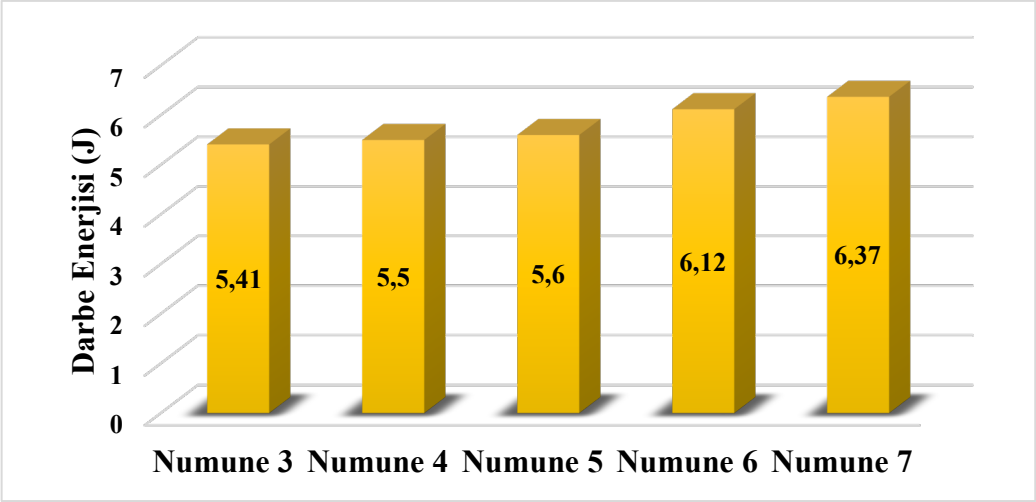
Şekil 4.36: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin %uzama değerleri



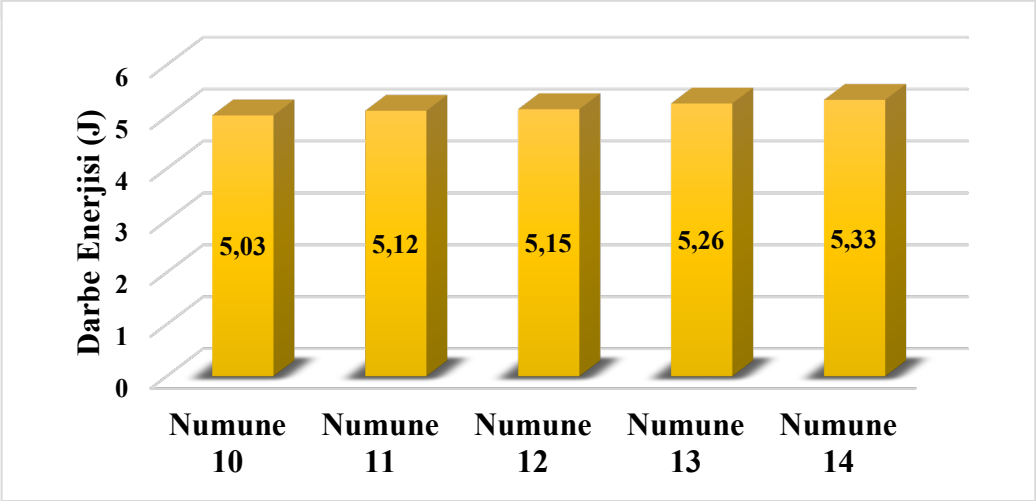
Şekil 4.37: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün %uzama değerleri

Şekil 4.36'da Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin %uzama değerleri verilmiştir. Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %4,6 ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin %uzama değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.

Şekil 4.37'de Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün %uzama değerleri verilmiştir. Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %3,12 ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'ye göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin %uzama değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.



Şekil 4.38: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin darbe enerji değerleri



Şekil 4.39: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün darbe enerji değerleri

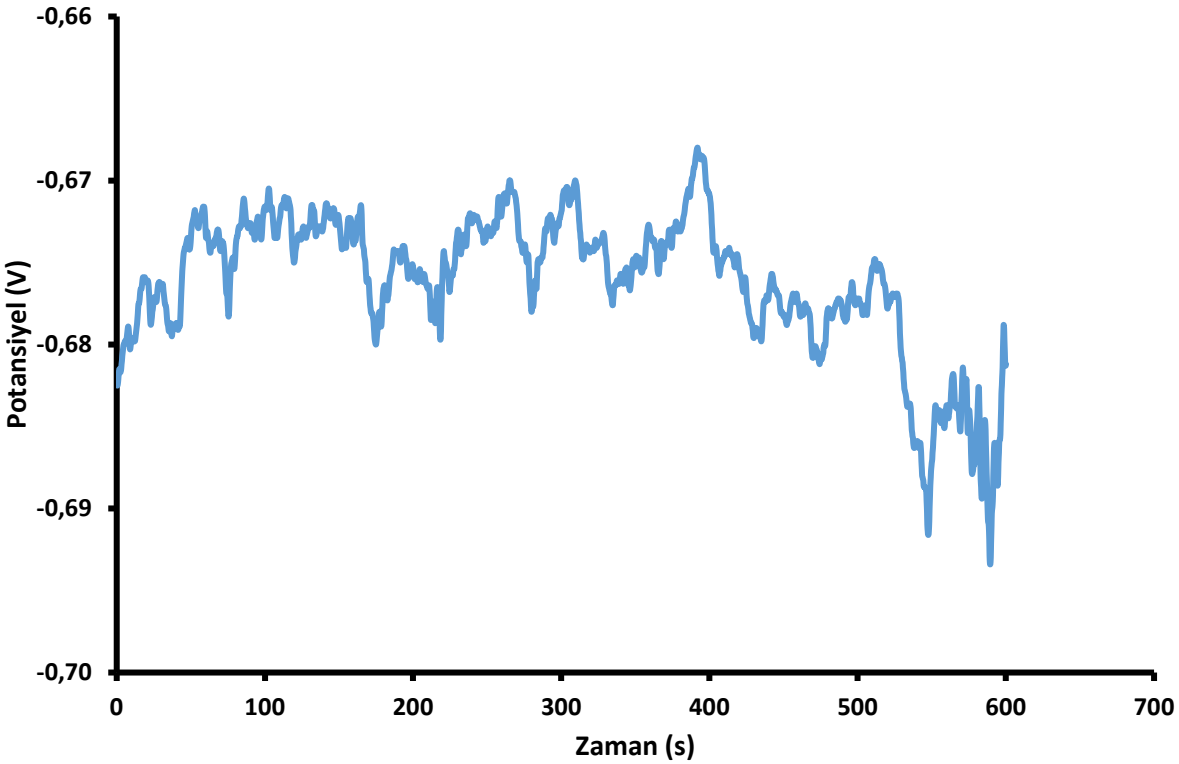
Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin darbe enerji değerleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 6,37 J ile Numune 7 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin darbe enerji değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, bunun yanı sıra bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmuştur. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %6,8, %8,51, %10,44, %20,68 ve %25,57 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün darbe enerji değerleri Şekil 4.39'da verilmiştir. Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 5,33 J ile Numune 14 olduğu tespit edilmiştir.

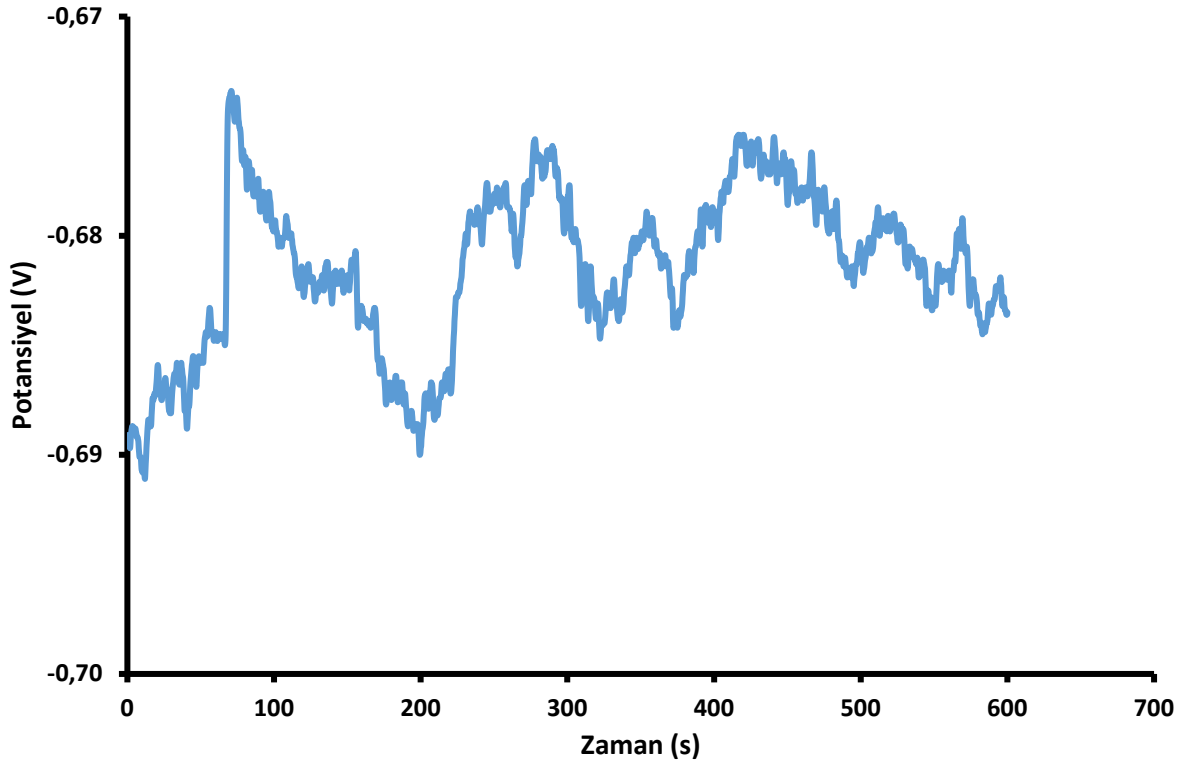
Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin darbe enerji değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, bunun yanı sıra bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmuştur. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %4,6, %6,5, %7,1, %9,3 ve %11 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide bekletilmiştir. Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'te sırasıyla Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'nin açık devre potansiyeli grafikleri verilmiştir.

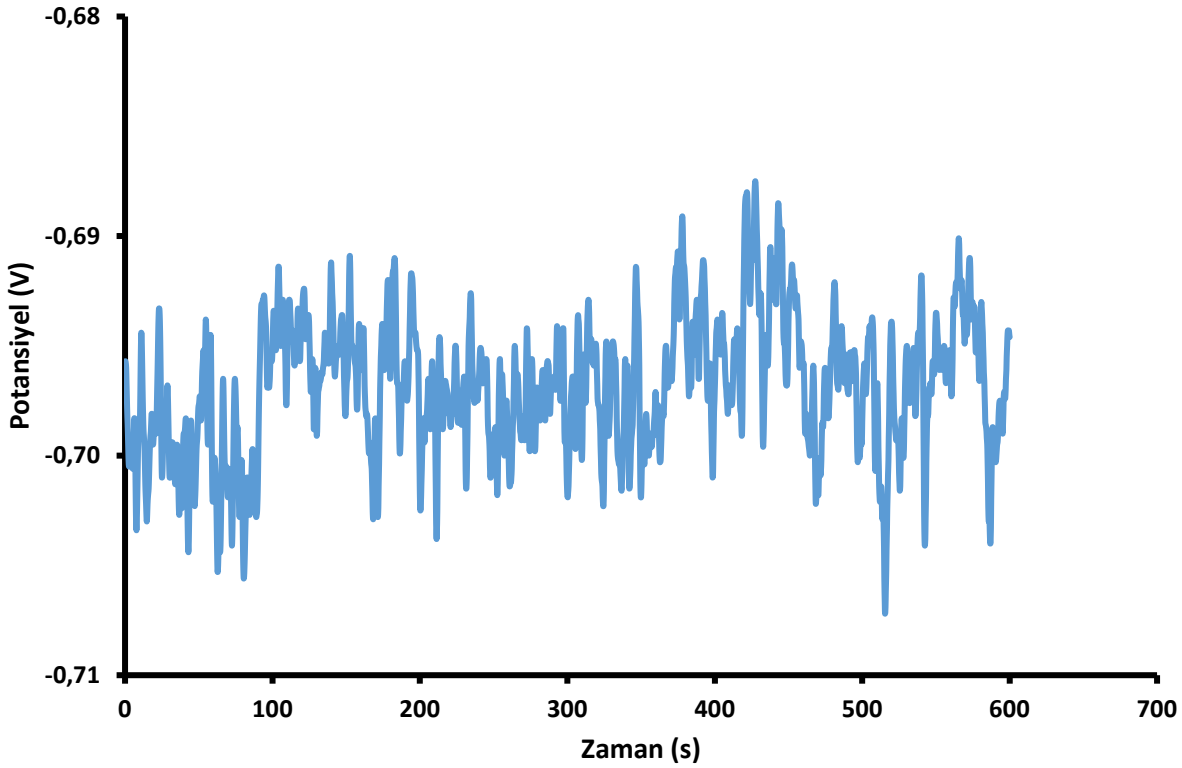
Açık devre potansiyelinin sabit bir değere gelmesinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testi başlamıştır. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile Şekil 4.45, Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da gösterilmiş olan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden korozyon akım (Icorr) ve korozyon potansiyeli (Ecorr) değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra denklem 2.27'den korozyon hızı (CR) değerleri hesaplanmıştır.



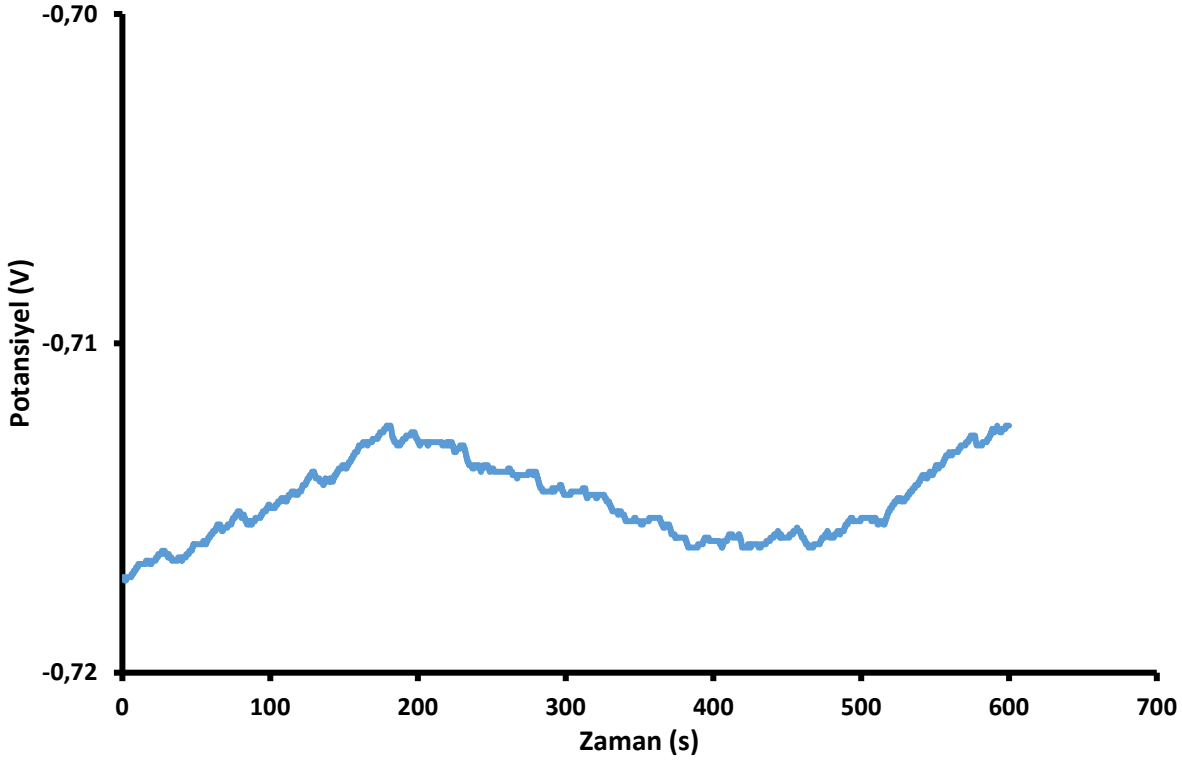
Şekil 4.40: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



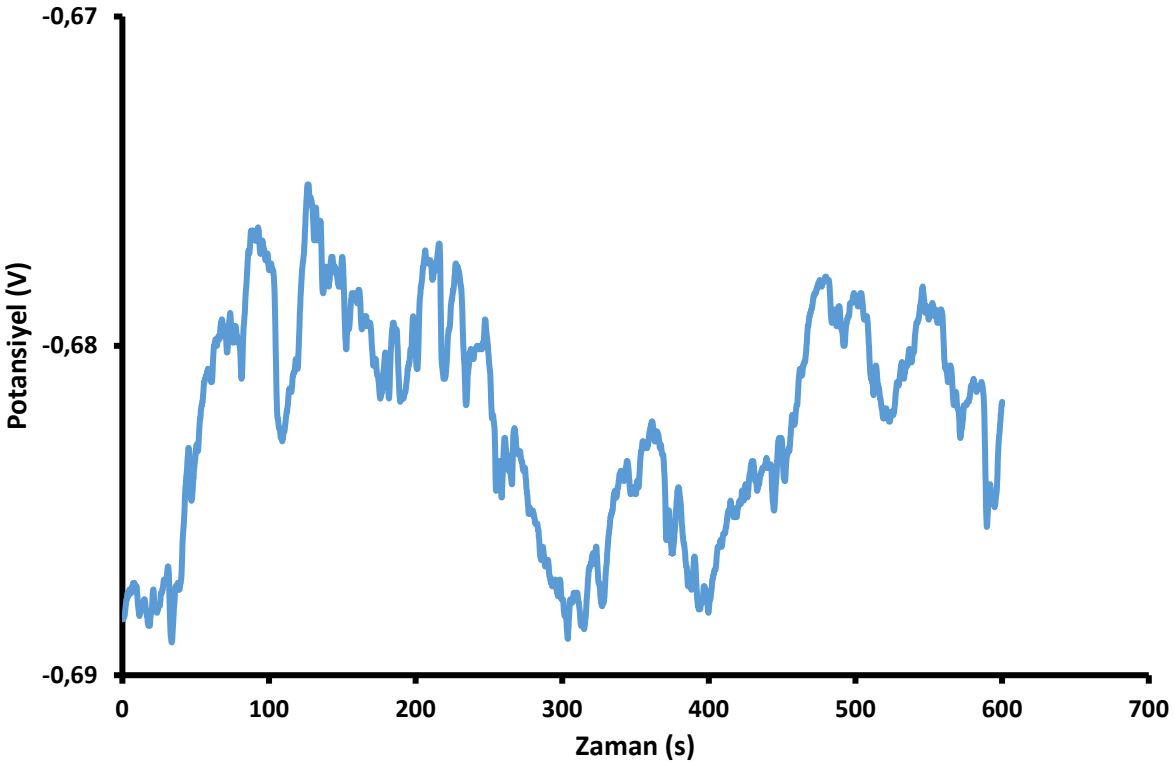
Şekil 4.41: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



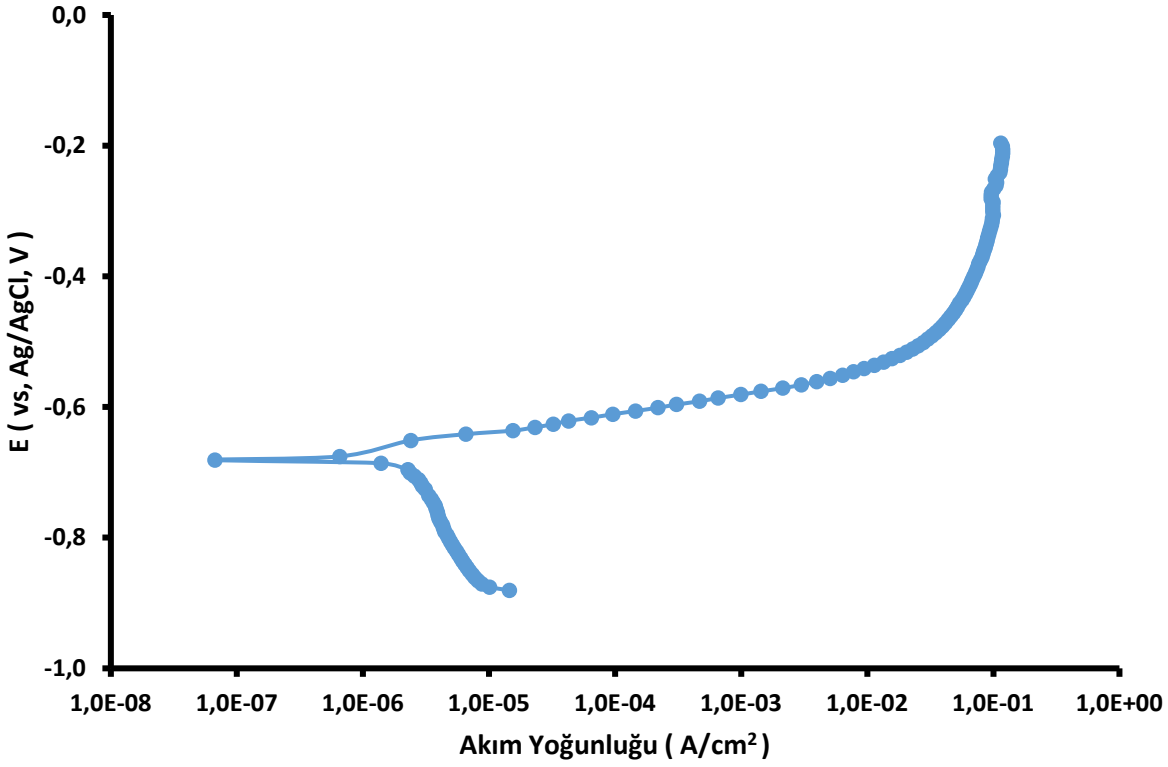
Şekil 4.42: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



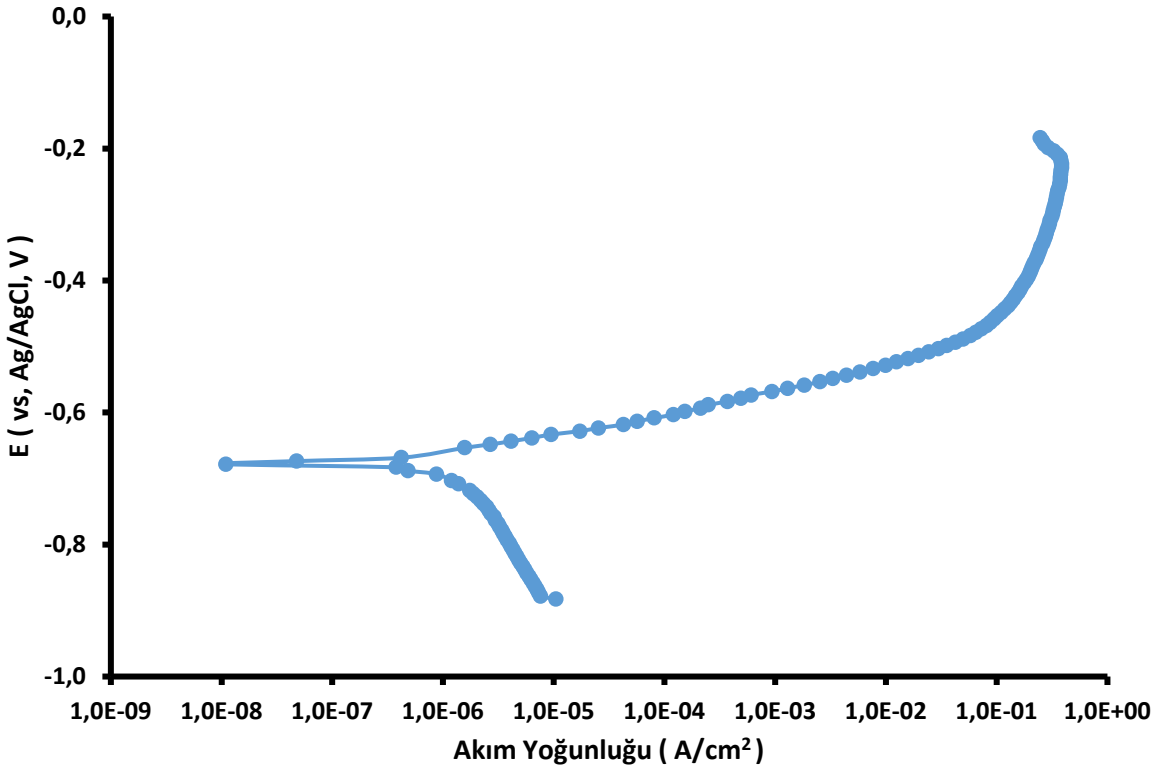
Şekil 4.43: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



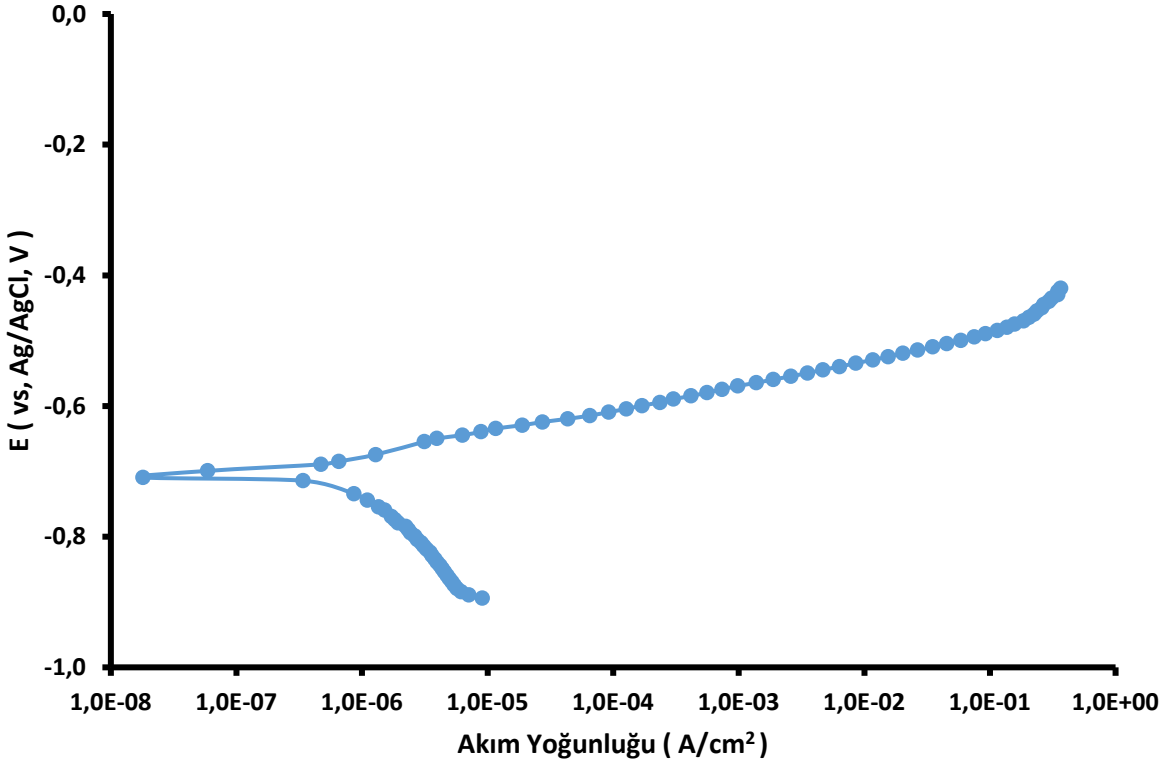
Şekil 4.44: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



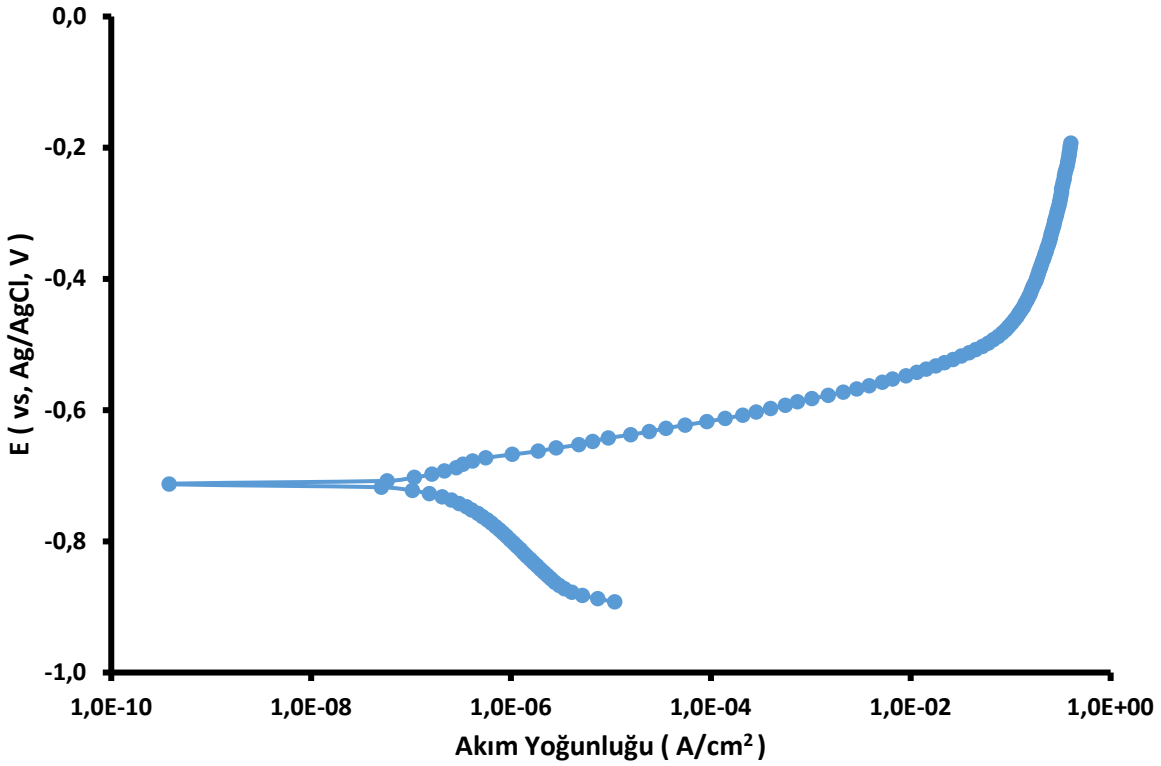
Şekil 4.45: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



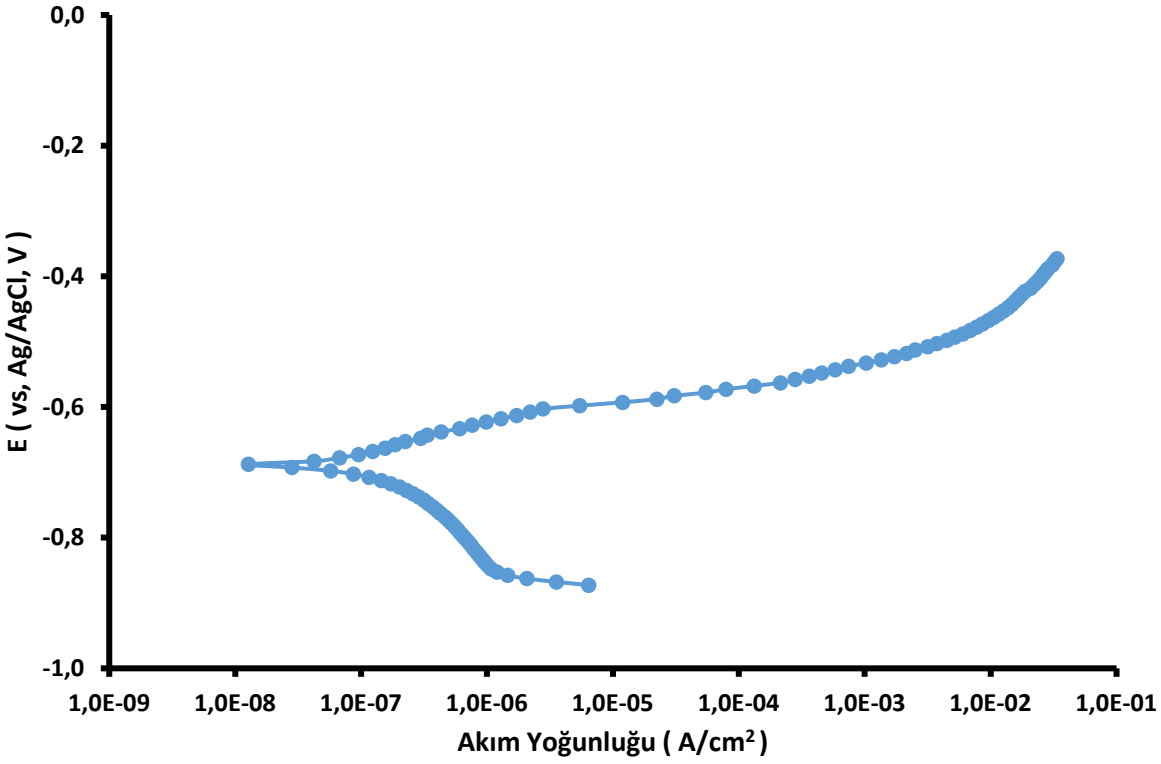
Şekil 4.46: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.47: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.48: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



Şekil 4.49: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi

Tablo 4.5: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	Icorr (µA)	CR (mm/yıl)
Numune 3	-683	0,113	48,83e^{-3}
Numune 4	**-677**	**0,0888**	**38,39e^{-3}**
Numune 5	-707	0,0429	18,41e^{-3}
Numune 6	**-712**	**0,081**	**35,02e^{-3}**
Numune 7	-688	0,0562	24,12e^{-3}

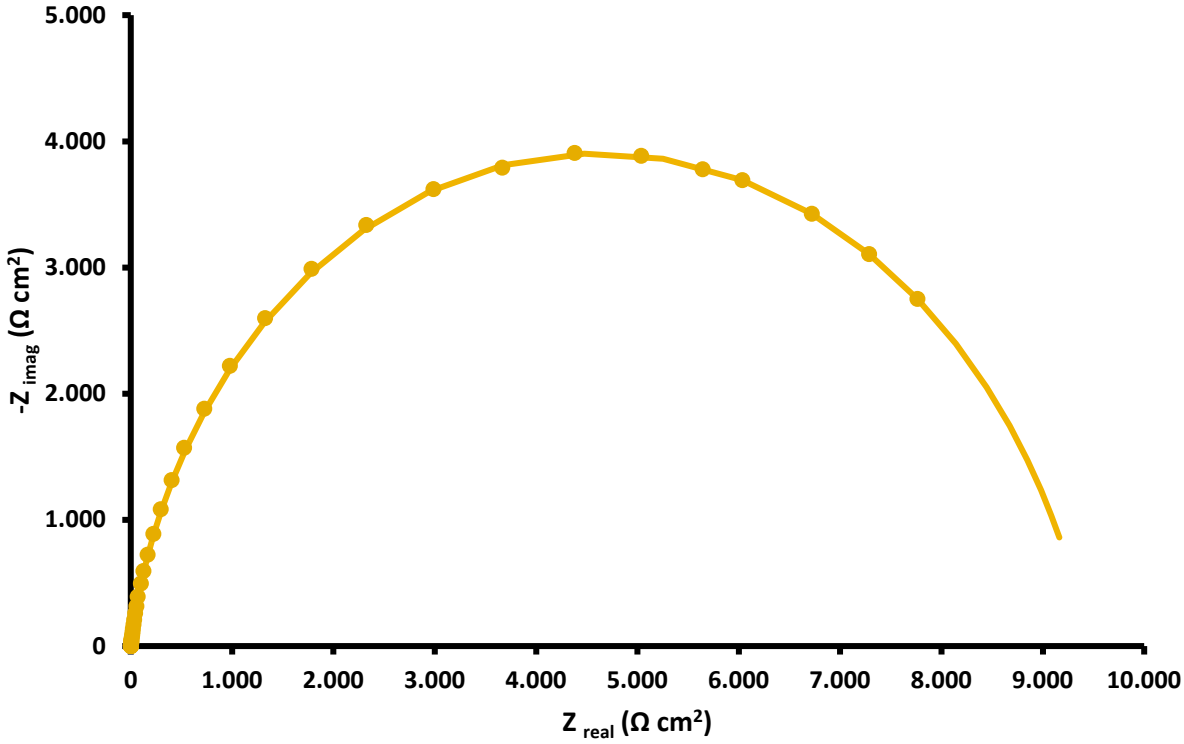
Tablo 4.5'te Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametrelerin değerleri verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 5'in korozyon akım değeri 0,0429µA, korozyon potansiyel değeri -707 mV ve korozyon hızı değerinin 18,41e^{-3} mm/yıl olduğu görülmektedir. Numune 3'ün korozyon hızı 48,83e^{-3} mm/yıl, Numune 4'ün korozyon hızı 38,39e^{-3} mm/yıl, Numune 6'nın korozyon hızı 35,02e^{-3} mm/yıl ve Numune 7'nin korozyon hızı 24,12e^{-3} mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kokil kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 5 olduğu görülmüştür. Numune 5'in korozyon akım değerinin kokil kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.50, Şekil 4.51, Şekil 4.52, Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te verilen Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.6: Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.

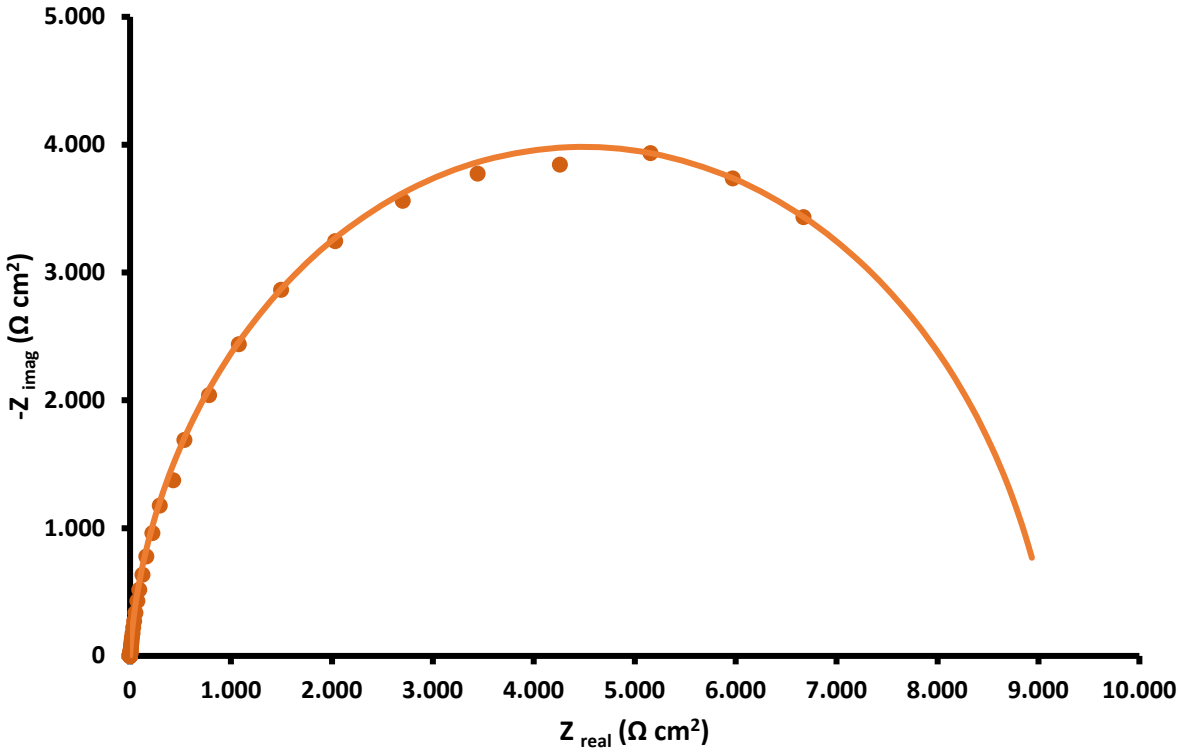
	Rcor (Ω)	Ccor (S*s^n)	n	Rpore (Ω)	Cpore (S*s^m)	m
Numune 3	9464	10,01e^{-6}	0,95	790	8,841e^{-6}	1
Numune 4	**9559**	**9,964e^{-6}**	**0,92**	**815**	**8,649e^{-6}**	**1**
Numune 5	19420	4,735e^{-6}	0,93	1476	6,148e^{-6}	0,98
Numune 6	**12630**	**8,978e^{-6}**	**0,81**	**948**	**8,363e^{-6}**	**1**
Numune 7	12880	5,104e^{-6}	0,85	1027	6,793e^{-6}	1

Tablo 4.6'da elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 3, Numune 4, Numune 5, Numune 6 ve Numune 7'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. Rcor değerleri açısından değerlendirme yapılacak olursa, en yüksek Rcor değerine sahip olan Numune 5 olduğu görülecektir. Yüksek Rcor değerinden düşük Rcor değerine doğru bir sıralama yapılacak olursak; Numune 5'ten sonra Numune 7, Numune 6, Numune 4 ve Numune 3 şeklinde sıralayabiliriz. Aynı karşılaştırma durumunu Rpore için yapacak olursak, sıralamanın değişmediği anlaşılmaktadır. Tablo 4.6'daki Cpore değerlerini incelersek en yüksek değerin 8,841e-6 ($S*s^m$) ile Numune 3'e ait olduğunu görmekteyiz. Cpore değerlerinden en düşük değerin 6,148e-6 ($S*s^m$) ile Numune 5'e ait olduğunu tespit etmekteyiz.

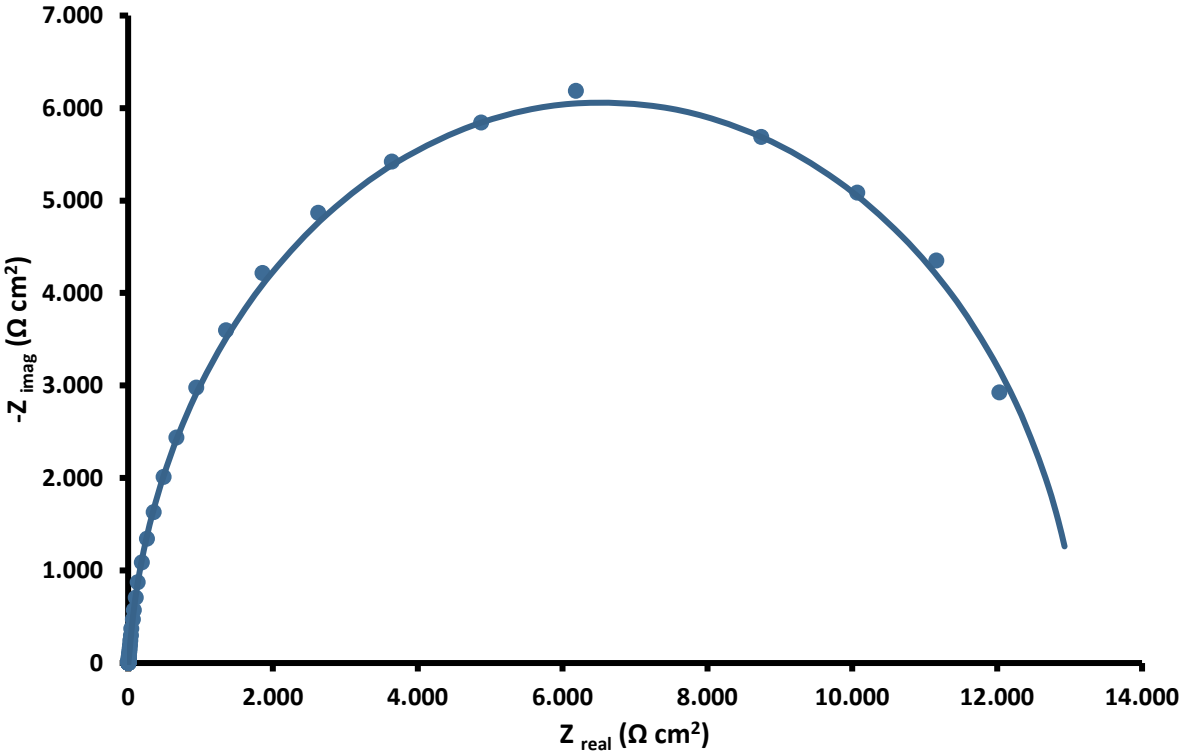
Tablo 4.6'daki tüm veriler incelendiğinde korozyon direnci en yüksek olan alaşım Numune 5 olmaktadır. Numune 1 ile kıyaslama yaptığımızda kokil kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli alaşımların hepsinin korozyon dayanımında artış söz konusudur, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.



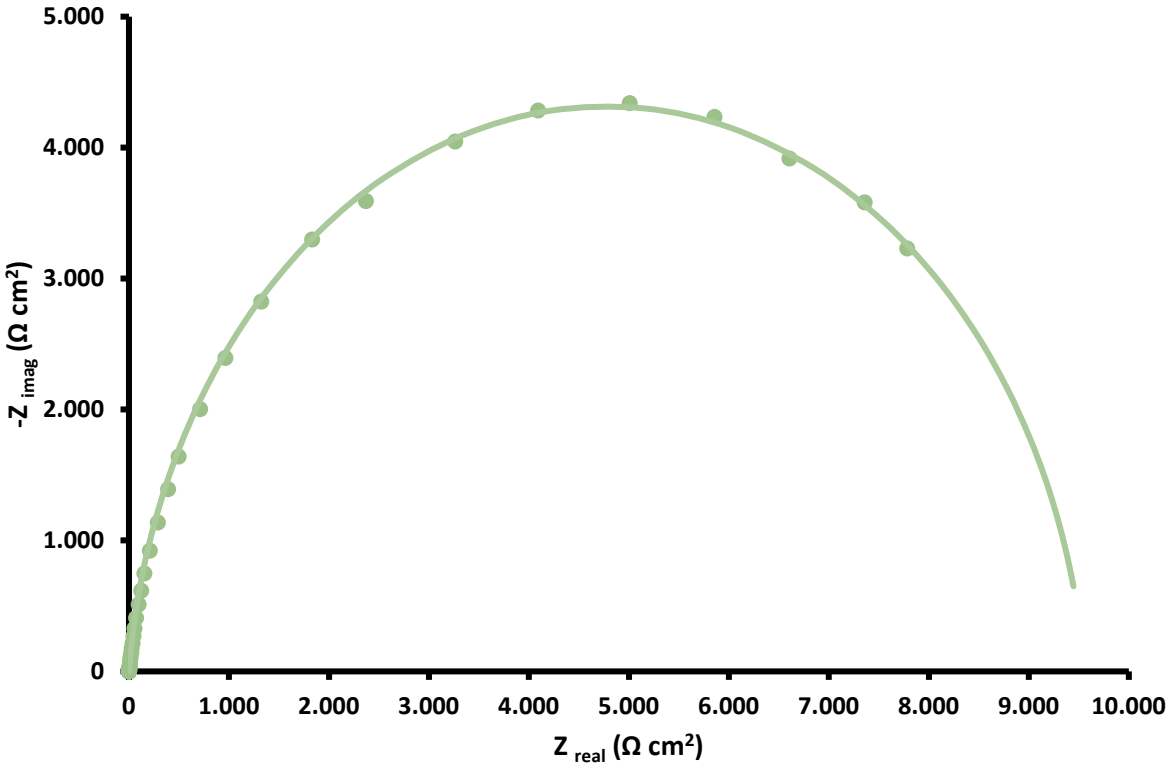
Şekil 4.50: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 3 alaşımının Nyquist diyagramı



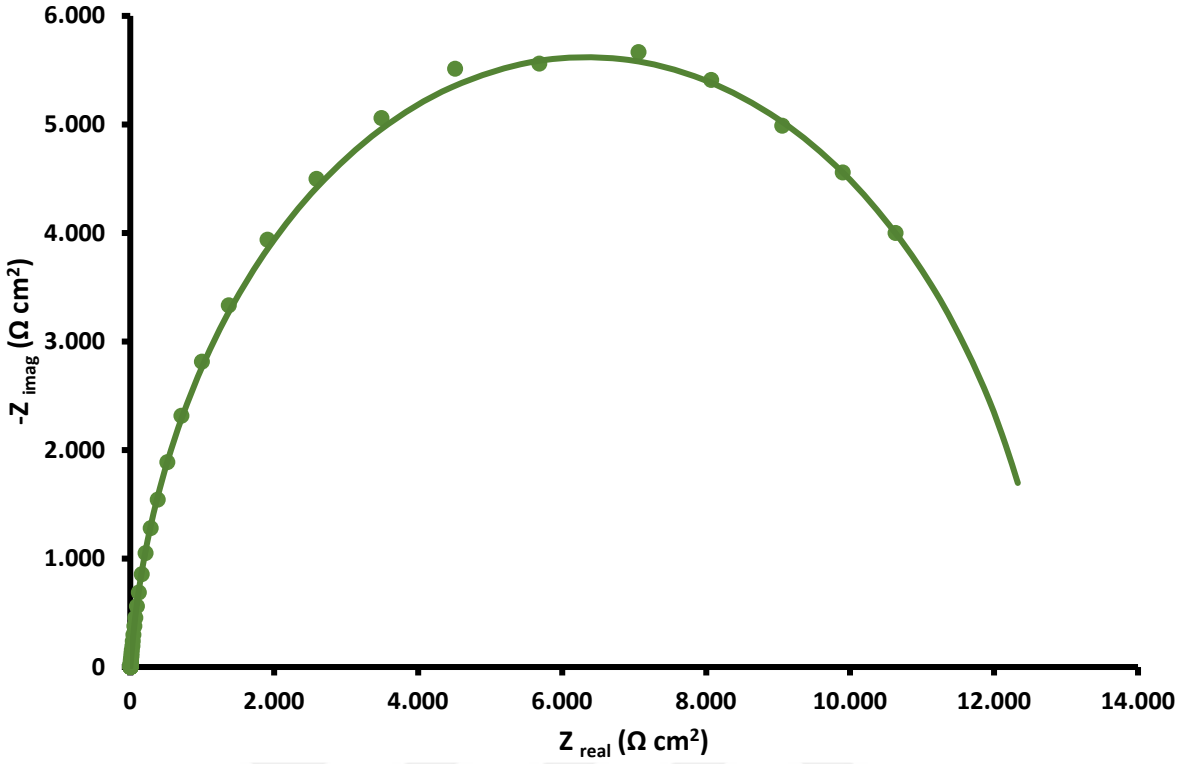
Şekil 4.51: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 4 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.52: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 5 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.53: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 6 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.54: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 7 alaşımının Nyquist diyagramı

Şekil 4.55, Şekil 4.56, Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da sırasıyla Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün açık devre potansiyeli grafikleri verilmiştir. Şekil 4.60, Şekil 4.61, Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'te sırasıyla Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'ün Tafel ekstrapolasyon yöntemi sonucu ortaya çıkan potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmektedir.

Tablo 4.7: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	**Icorr (µA)**	**CR (mm/yıl)**
Numune 10	-640	0,32	$124{,}9e^{-3}$
Numune11	**-730**	**0,23**	**$108{,}42e^{-3}$**
Numune 12	-593	0,1	$42{,}93e^{-3}$
Numune 13	**-740**	**0,224**	**$103{,}56e^{-3}$**
Numune 14	-661	0,147	$63{,}42e^{-3}$

Tablo 4.7'de Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametrelerin değerleri verilmiştir. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 12'nin korozyon akım değeri 0,1µA, korozyon potansiyel değeri -593 mV ve korozyon hızı değerinin $42,93e^{-3}$ mm/yıl olduğu görülmektedir. Numune 10'un korozyon hızı $124,9e^{-3}$ mm/yıl, Numune 11'in korozyon hızı $108,42e^{-3}$ mm/yıl, Numune 13'ün korozyon hızı $103,56e^{-3}$ mm/yıl ve Numune 14'ün korozyon hızı $63,42e^{-3}$ mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kum kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 12 olduğu görülmüştür. Numune 12'in korozyon akım değerinin kum kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.65, Şekil 4.66, Şekil 4.67, Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da verilen Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

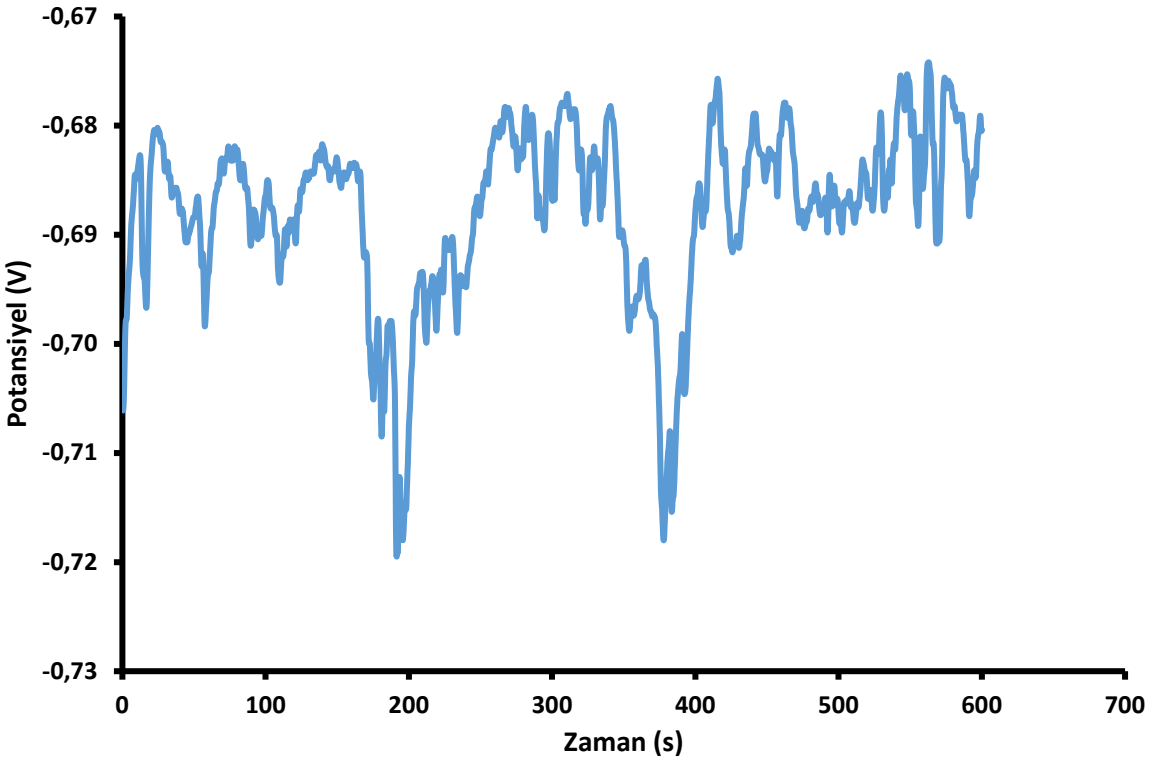
Tablo 4.8: Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Rcor (Ω)	**Ccor ($S*s^n$)**	**n**	**Rpore (Ω)**	**Cpore ($S*s^m$)**	**m**
Numune 10	**5015**	**$7,116e^{-6}$**	**0,9**	**198**	**$10,94e^{-6}$**	**0,98**
Numune11	5677	$9,453e^{-6}$	0,85	423,2	$10,31e^{-6}$	1
Numune 12	**5916**	**$28,7e^{-6}$**	**0,75**	**108,9**	**$10,04e^{-6}$**	**1**
Numune 13	**5749**	**$9,03e^{-6}$**	**0,9**	**198**	**$10,8e^{-6}$**	**0,98**
Numune 14	**5811**	**$8,41e^{-6}$**	**0,75**	**147**	**$10,61e^{-6}$**	**1**

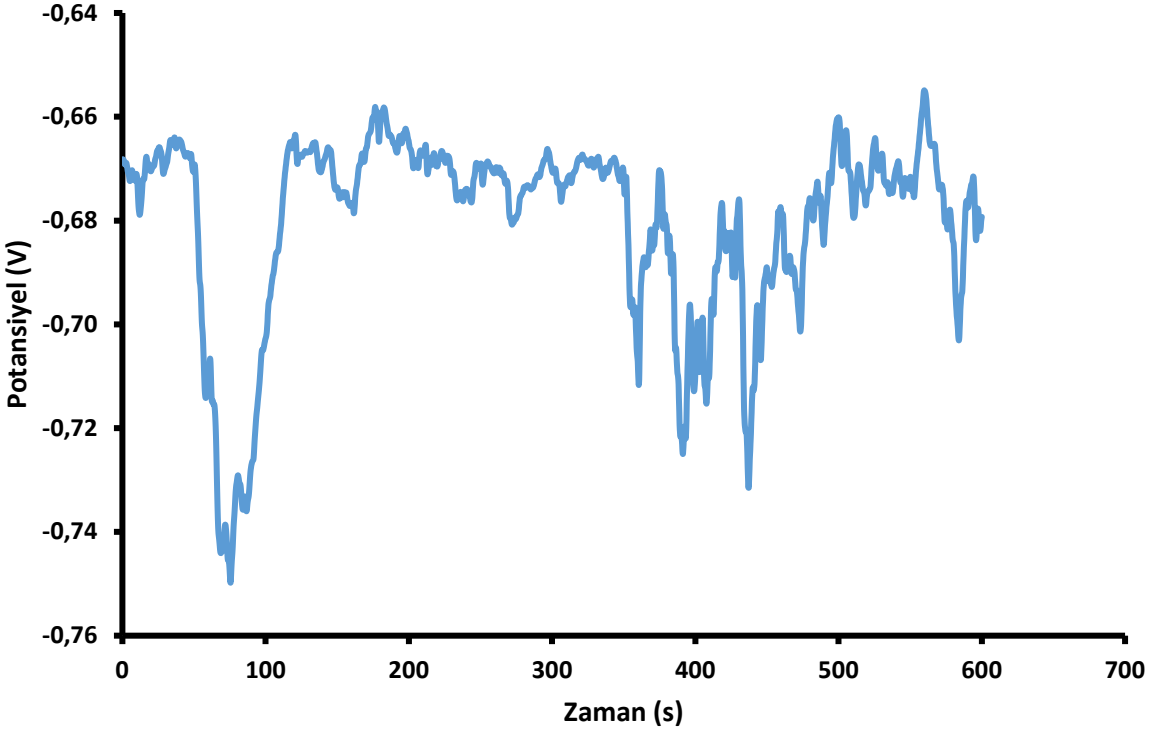
Tablo 4.8'de elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 10, Numune 11, Numune 12, Numune 13 ve Numune 14'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri

ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. Rcor değerleri açısından değerlendirme yapılacak olursa, en yüksek Rcor değerine sahip olan Numune 12 olduğu görülecektir. Yüksek Rcor değerinden düşük Rcor değerine doğru bir sıralama yapılacak olursak; Numune 12'ten sonra Numune 14, Numune 13, Numune 11 ve Numune 10 şeklinde sıralayabiliriz.

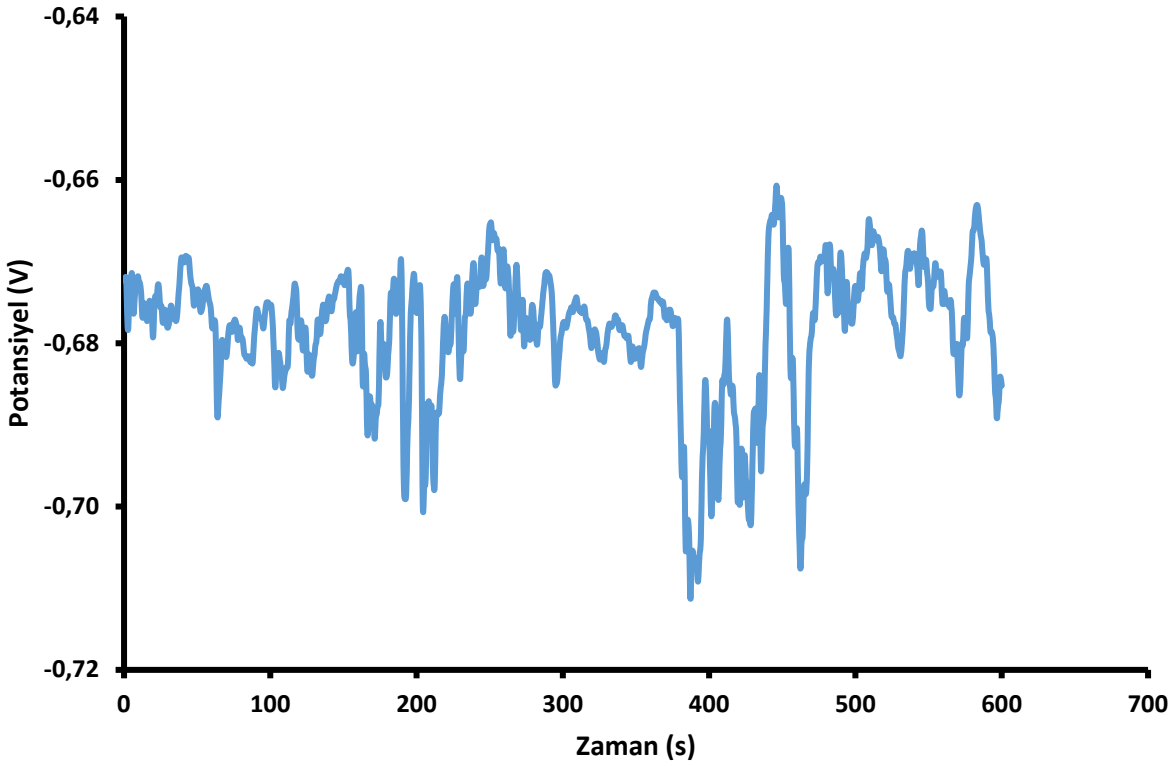
Tablo 4.8'deki tüm veriler incelendiğinde korozyon direnci en yüksek olan alaşım Numune 12 olmaktadır. Numune 8 ile kıyaslama yaptığımızda kum kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli alaşımların hepsinin korozyon dayanımında artış söz konusudur, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.



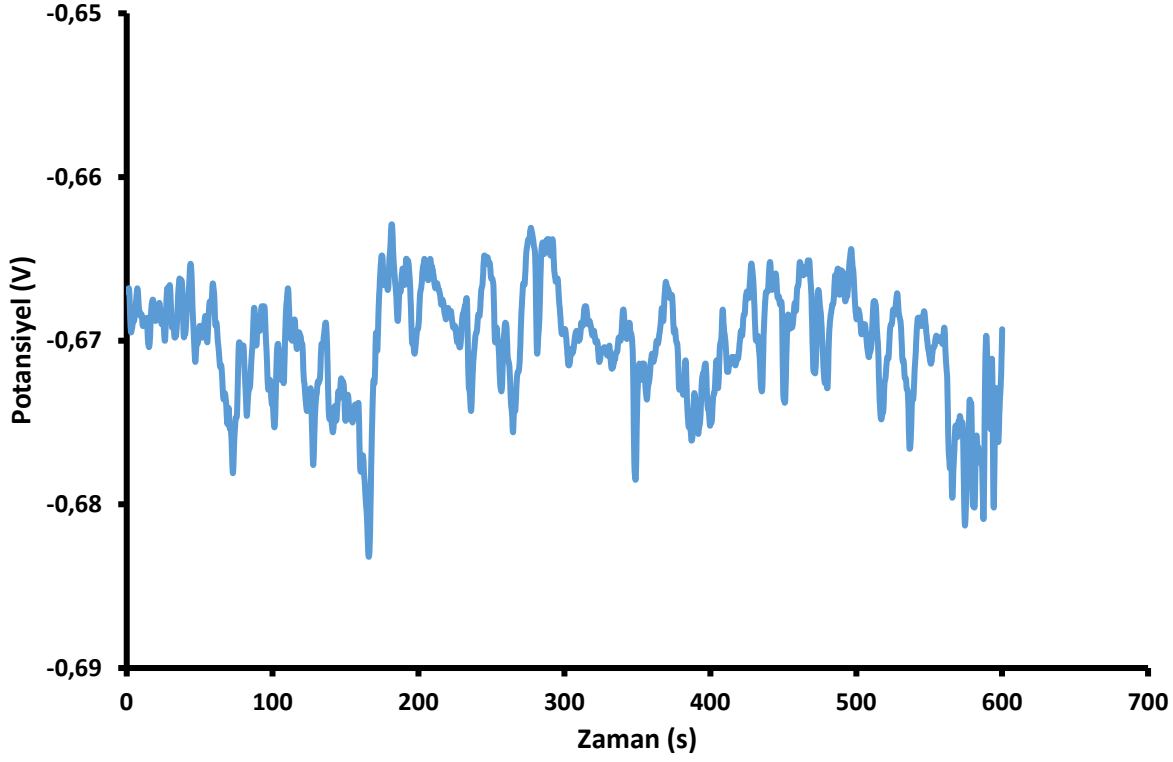
Şekil 4.55: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



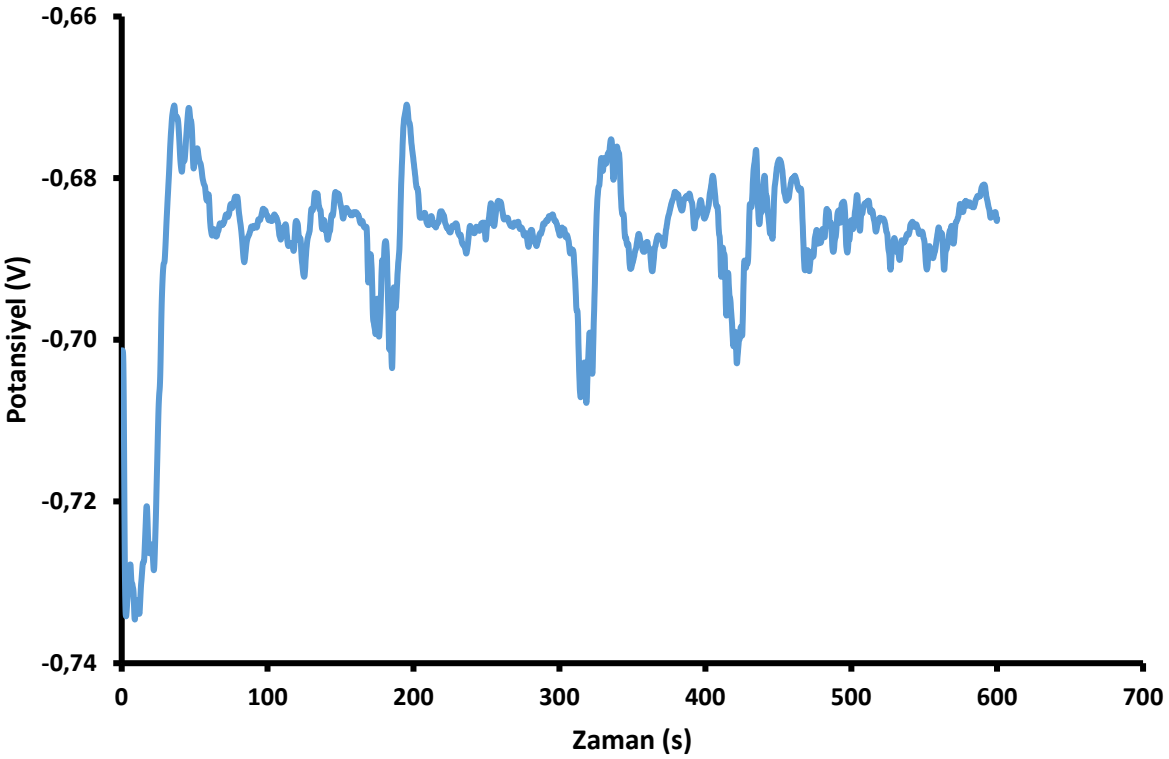
Şekil 4.56: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



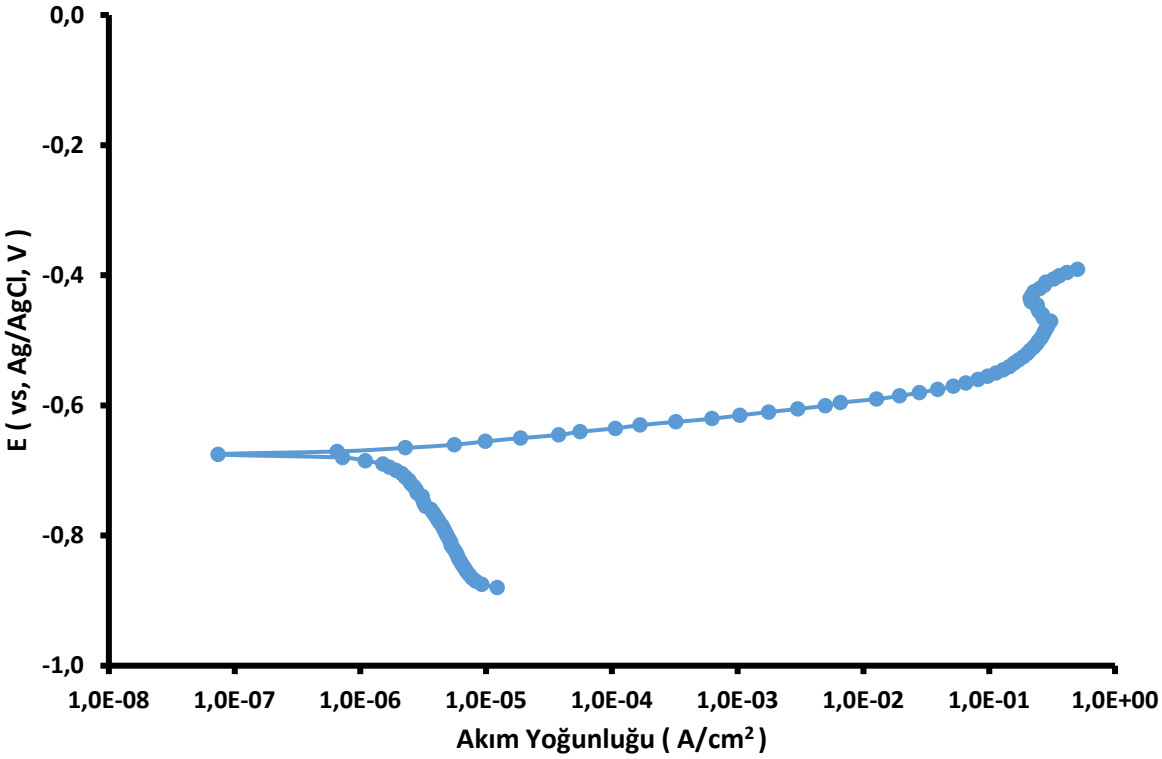
Şekil 4.57: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



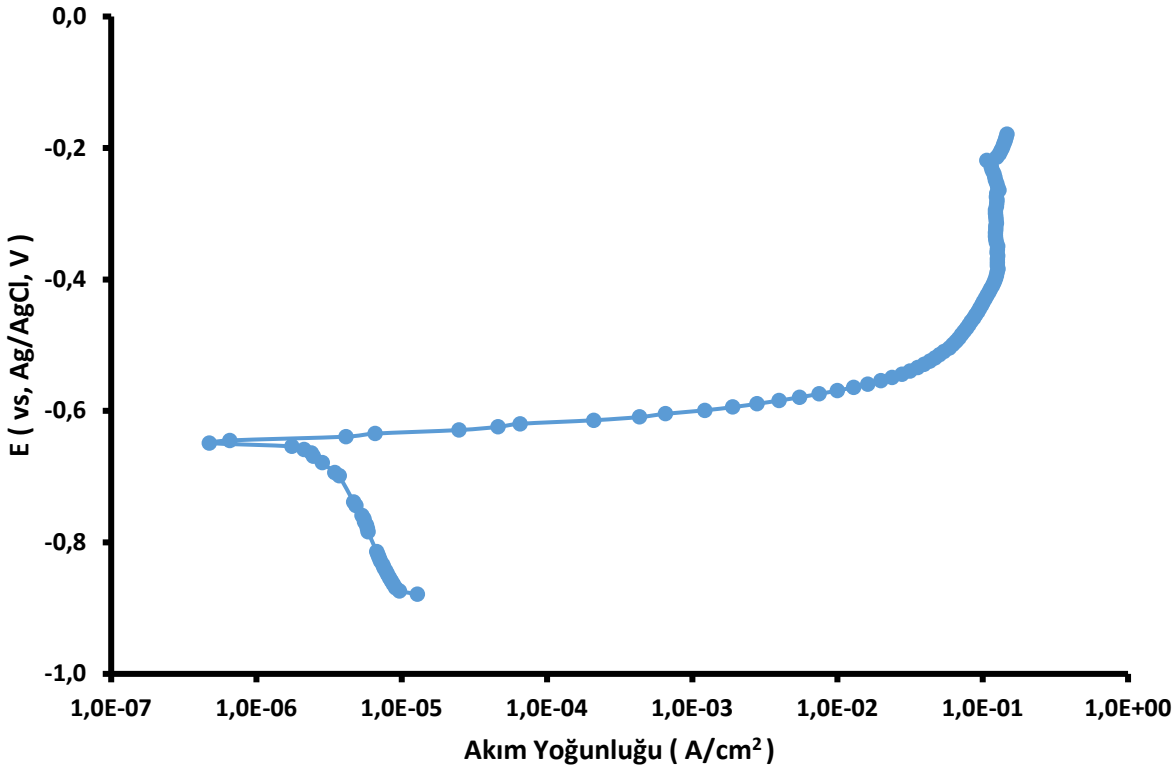
Şekil 4.58: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



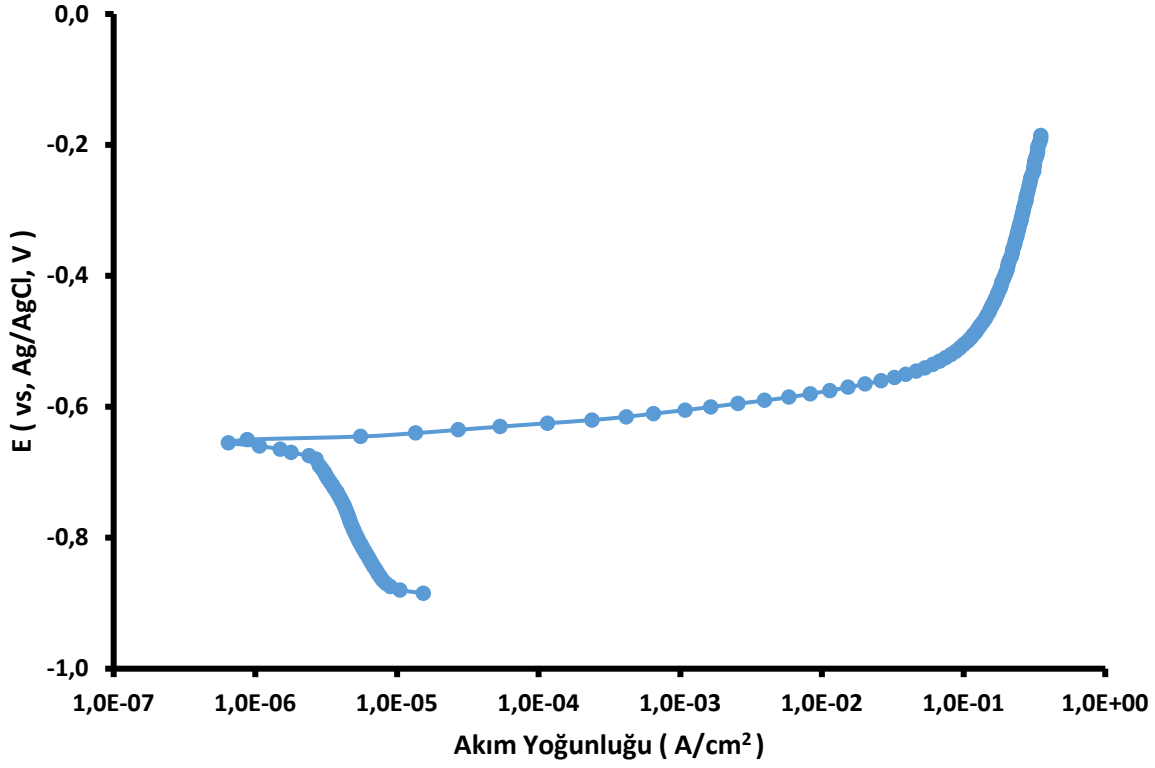
Şekil 4.59: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



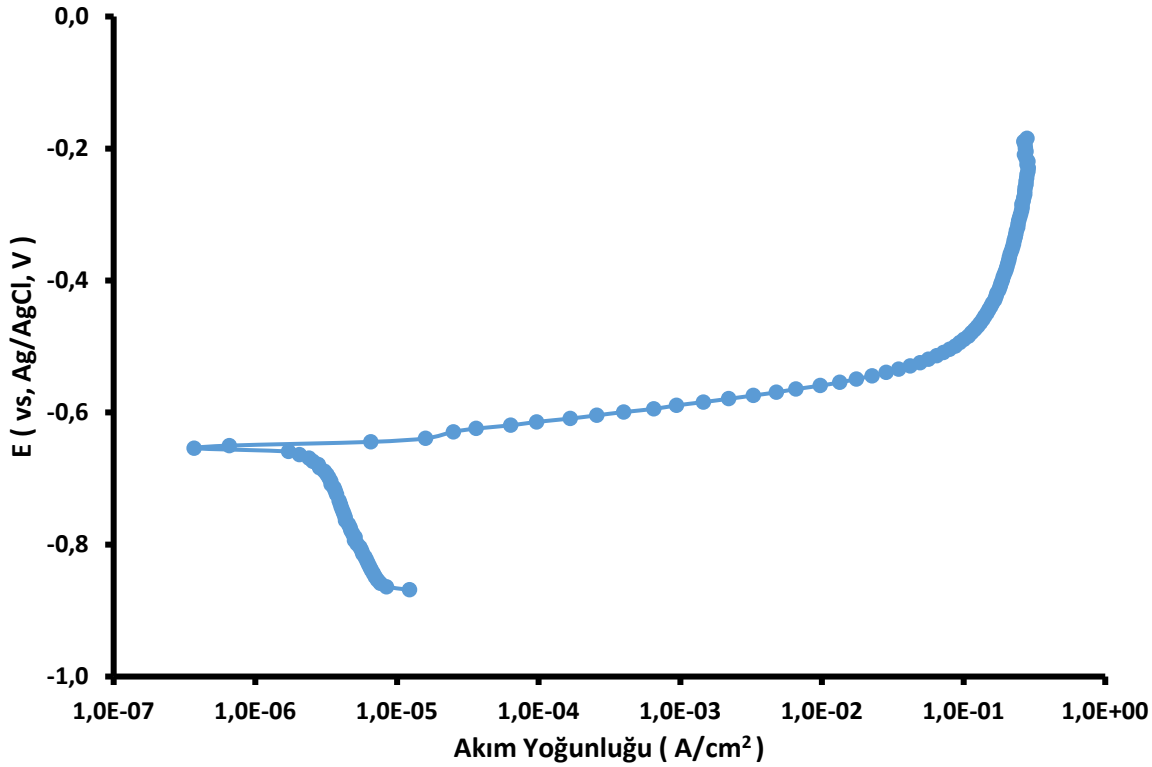
Şekil 4.60: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



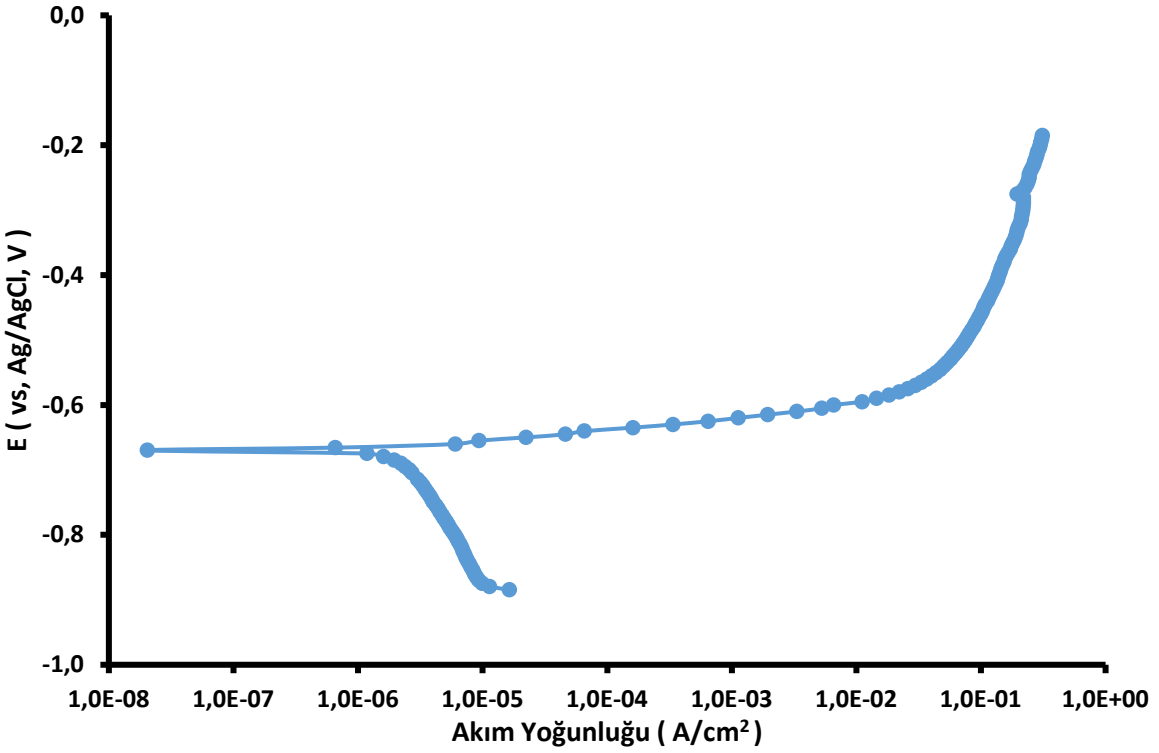
Şekil 4.61: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



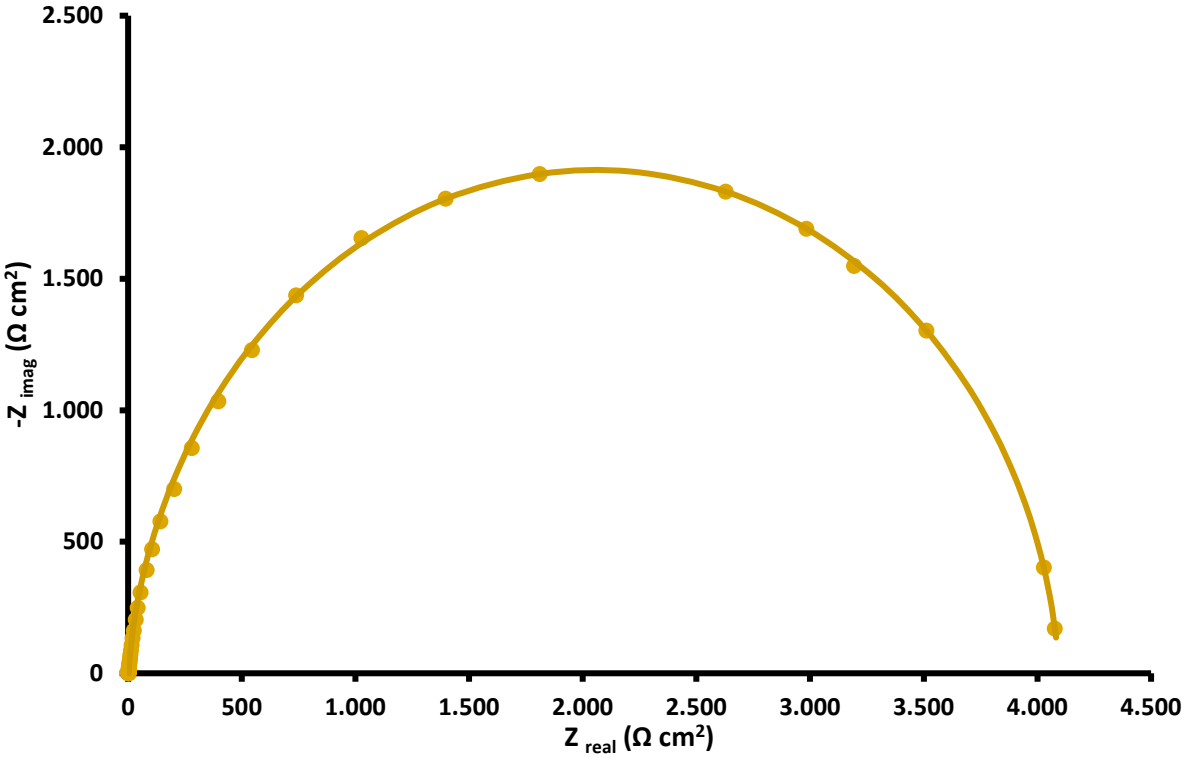
Şekil 4.62: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



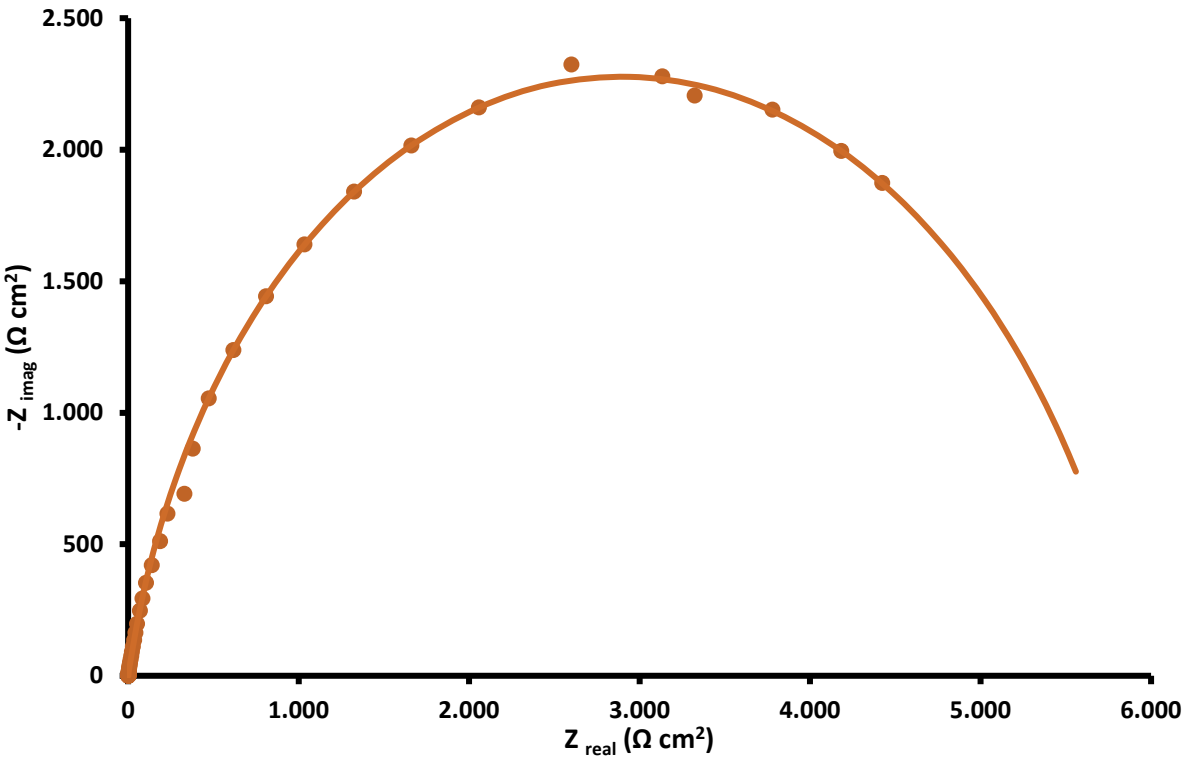
Şekil 4.63: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



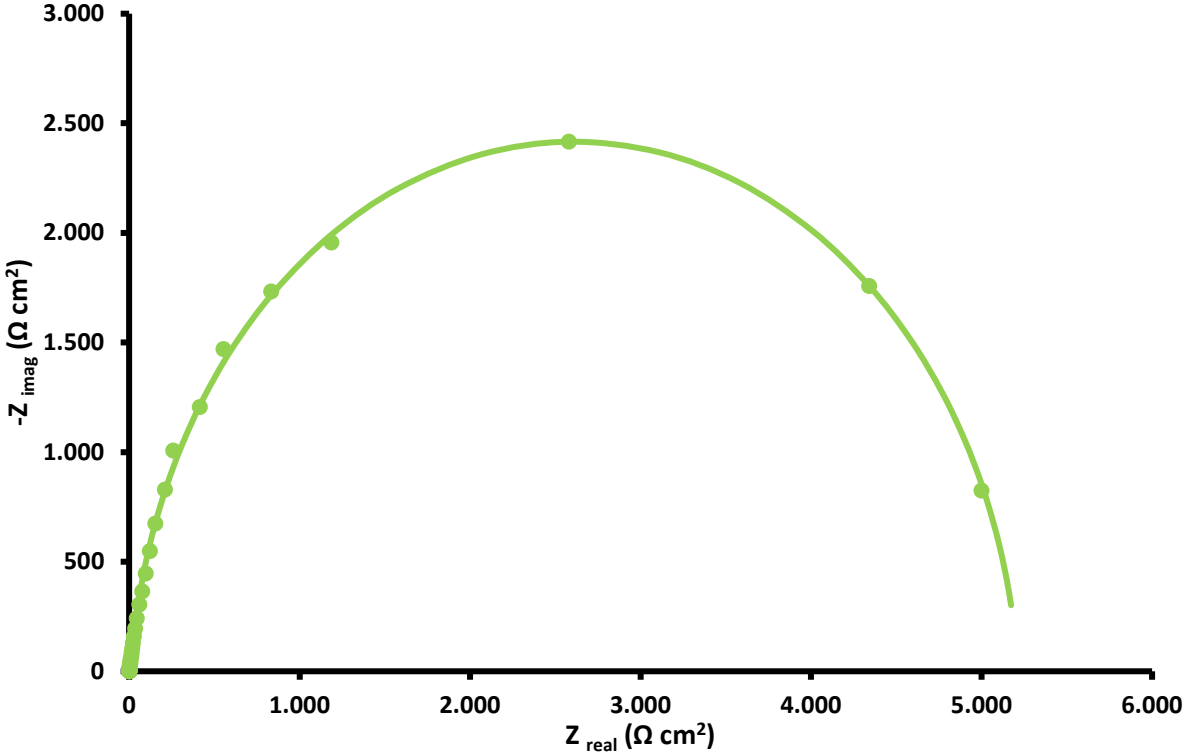
Şekil 4.64: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



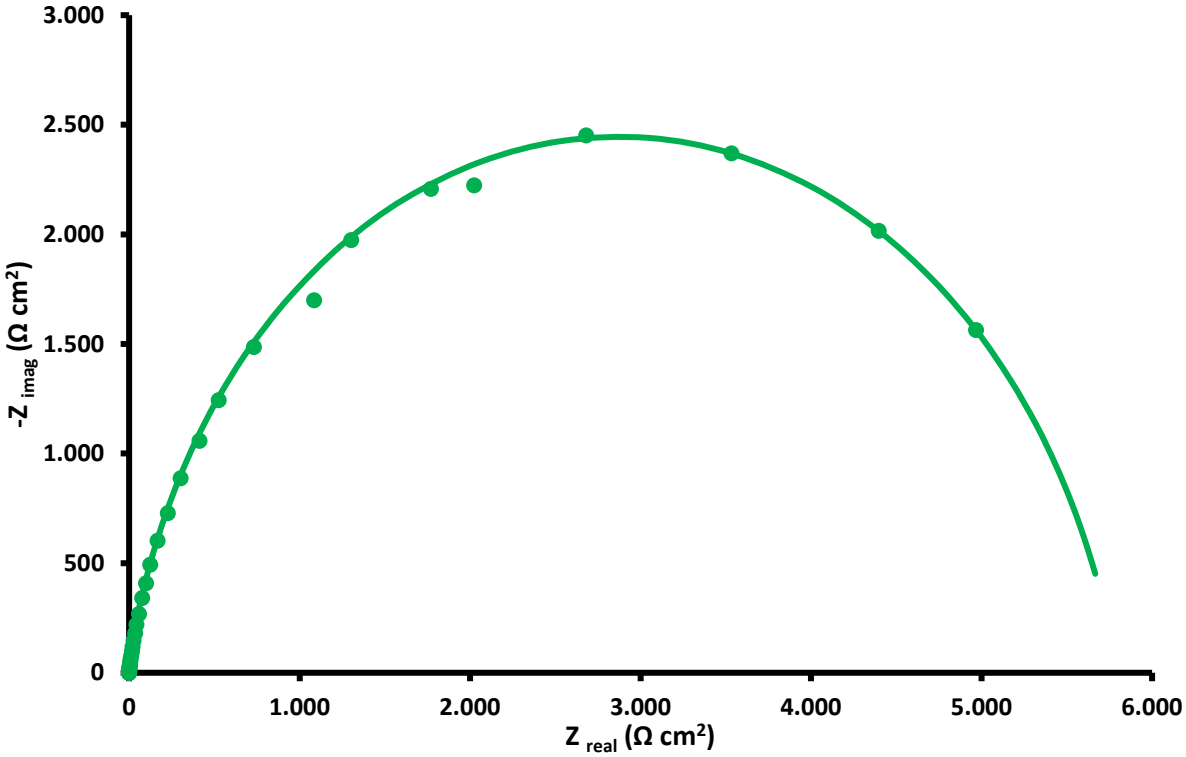
Şekil 4.65: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 10 alaşımının Nyquist diyagramı



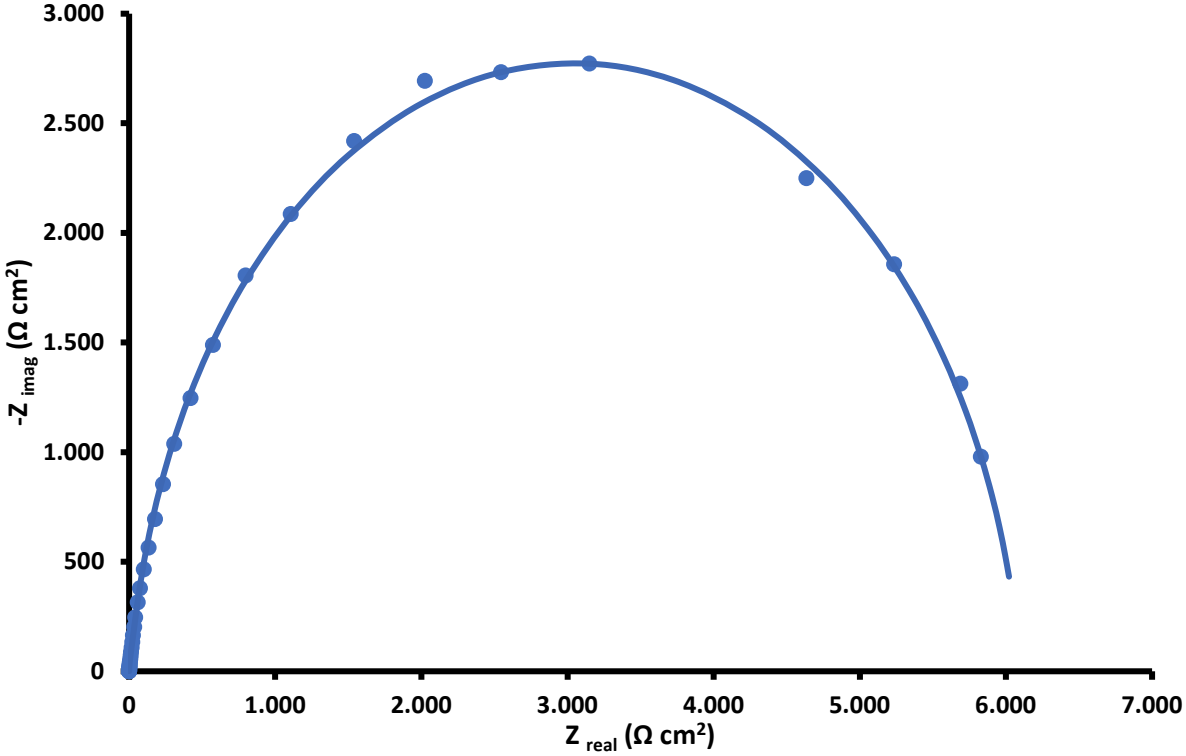
Şekil 4.66: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 11 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.67: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 12 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.68: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 13 alaşımının Nyquist diyagramı



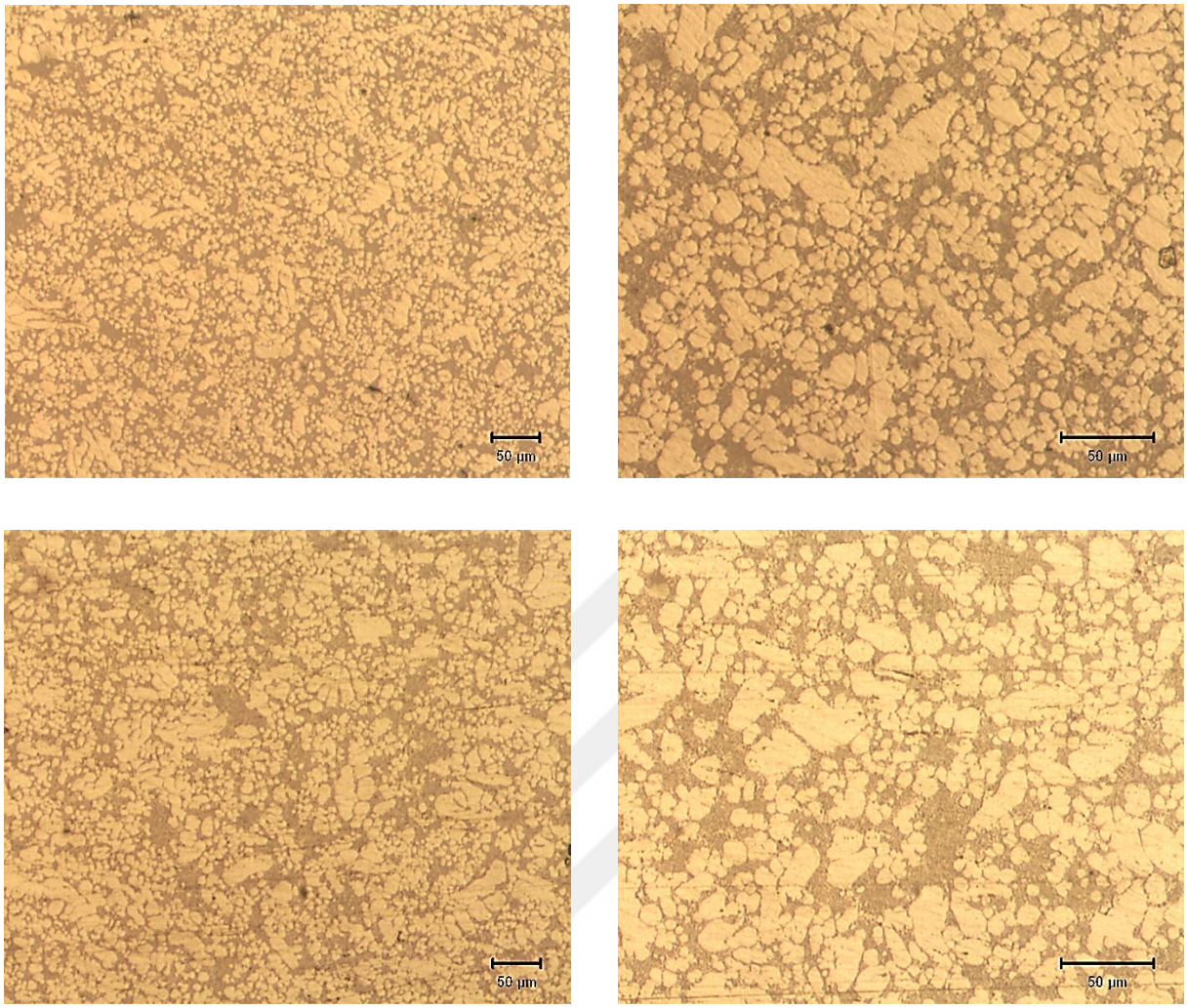
Şekil 4.69: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 14 alaşımının Nyquist diyagramı

4.4. VANADYUM İLAVESİ

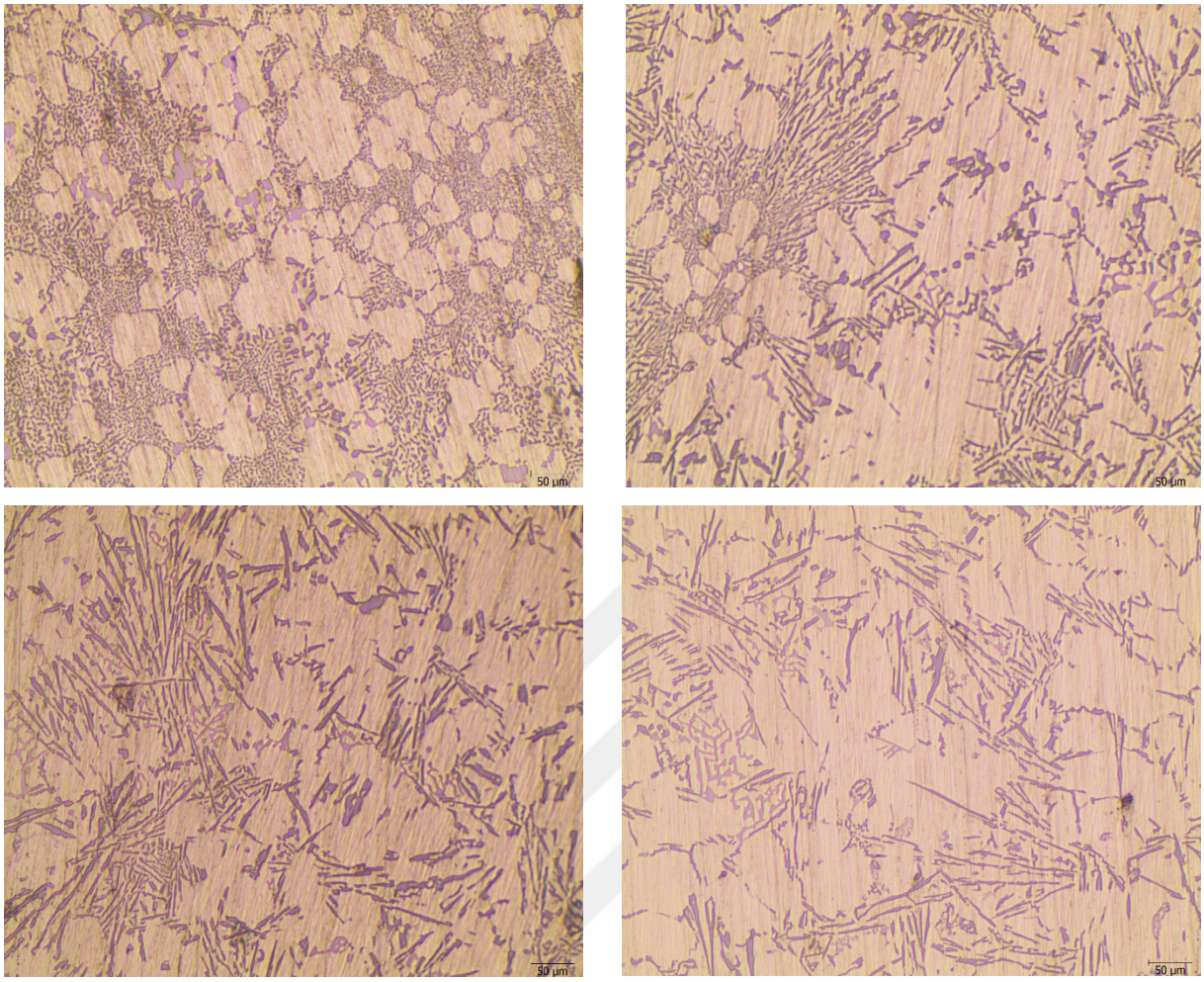
A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça %0,01, %0,02, %0,04 ve %0,08 oranında V içerecek şekilde Al-10V master alaşımı ilaveleri ile kokil kalıba dökümleri yapılan alaşımlara sırasıyla Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18 olarak isim verilmiştir.

A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça %0,01, %0,02, %0,04 ve %0,08 oranında V içerecek şekilde Al-10V master alaşımı ilaveleri ile kum kalıba dökümleri yapılan alaşımlara sırasıyla Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22 olarak isim verilmiştir.

Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'da vanadyum ilaveli numunelere ait mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde %0,01 vanadyum ilave edildiğinde ötektik faz oranı en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Artan vanadyum ilave oranı ile birlikte ötektik faz oranı düşüş göstermiştir, bunun yanı sıra birincil silisyum fazı oranı artmıştır ve iğnemsi bir şekilde yapıda yer almaktadır.



Şekil 4.70: Kokil kalıba döküm (a) Numune 15, (b) Numune 16, (c) Numune 17, (d) Numune 18.

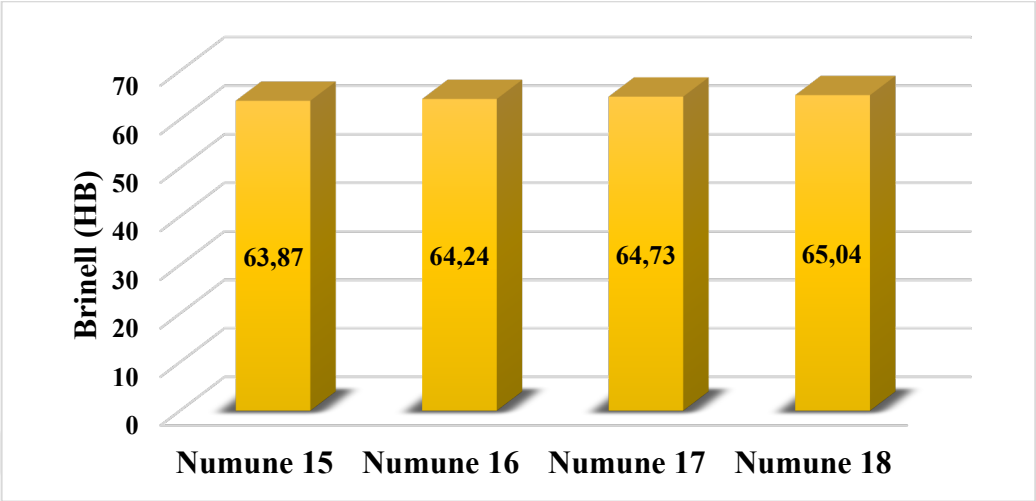


Şekil 4.71: Kum kalıba döküm (a) Numune 19, (b) Numune 20, (c) Numune 21, (d) Numune 22.

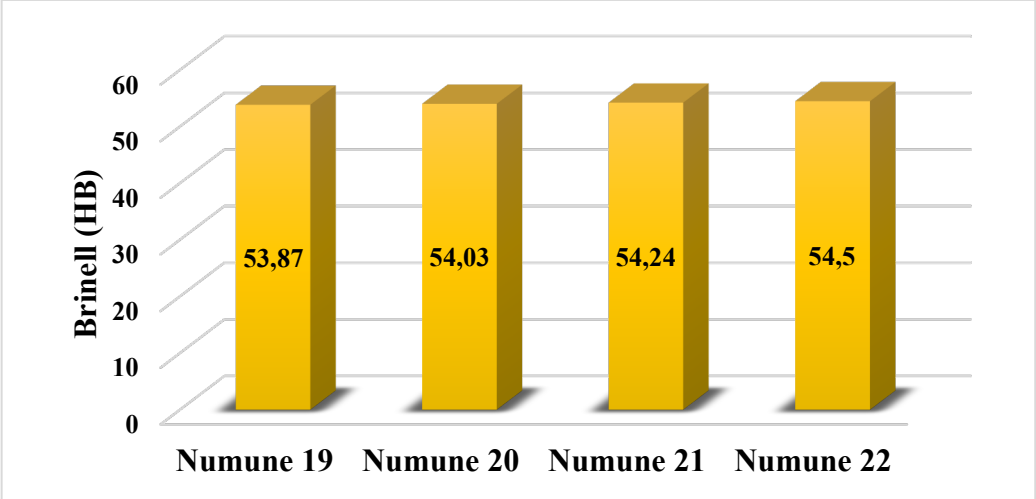
Şekil 4.72'de Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait Brinell sertlik değerleri gösterilmiştir. Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 65,04 HB ile Numune 18 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ayrıca vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %4,2, %4,8, %5,6 ve %6,1 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.73'de Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait Brinell sertlik değerleri gösterilmiştir. Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 54,5 HB ile Numune 22 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir

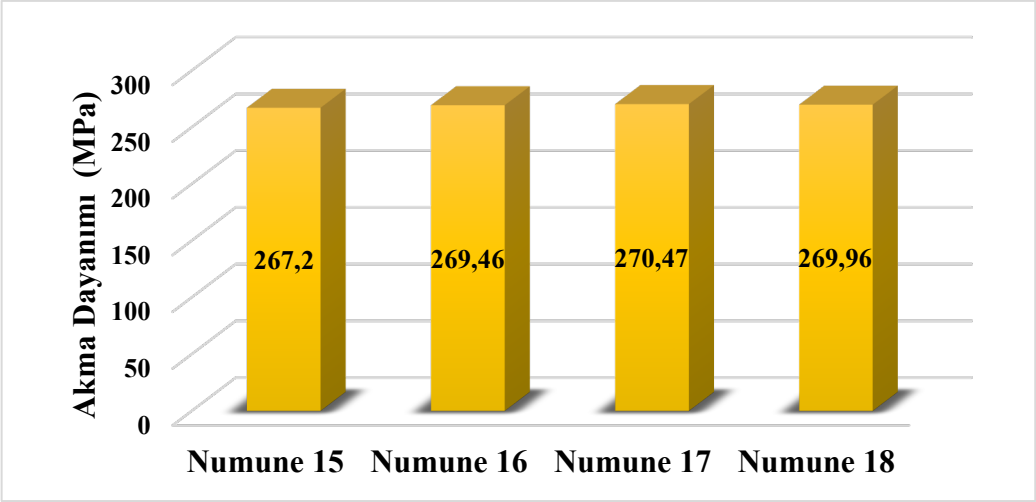
artış söz konusudur. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %3,8, %4,1, %4,5 ve %5 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



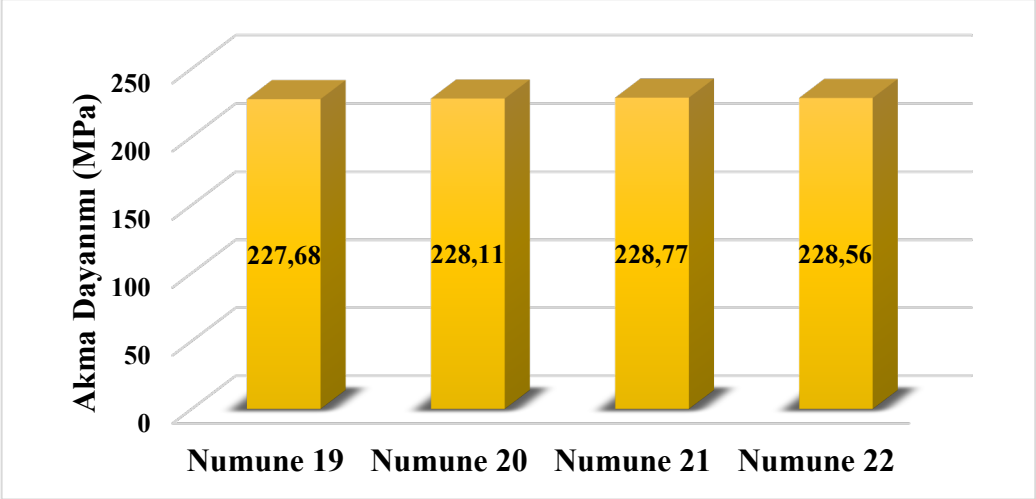
Şekil 4.72: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in ait Brinell sertlik değerleri



Şekil 4.73: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin Brinell sertlik değerleri



Şekil 4.74: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in akma dayanım değerleri

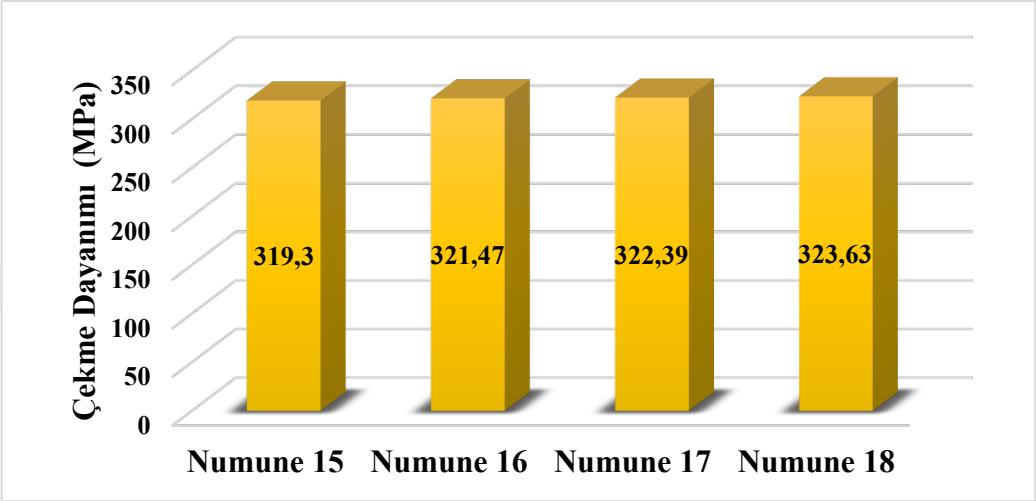


Şekil 4.75: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin akma dayanım değerleri

Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in akma dayanım değerleri Şekil 4.74'te verilmiştir. Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 270,47 MPa ile Numune 17 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %6,2, %7,1, %7,5 ve %7,3 oranında artış olduğu hesaplanmıştır. Artış oranlarına bakıldığında aralarında çok yüksek farklar olmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 4.75'te Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait akma dayanım değerleri gösterilmiştir. Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en

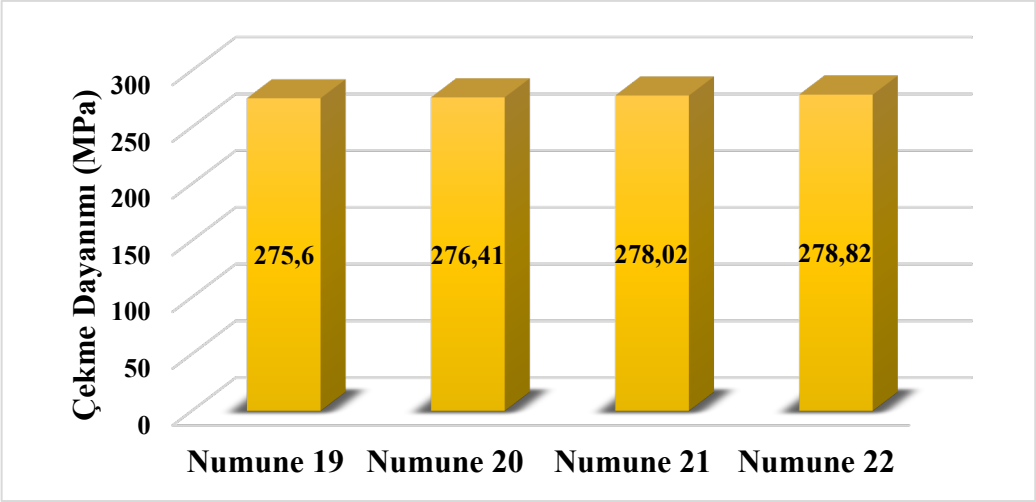
yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 228,77 MPa ile Numune 21 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %4,1, %4,3, %4,6 ve %4,5 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



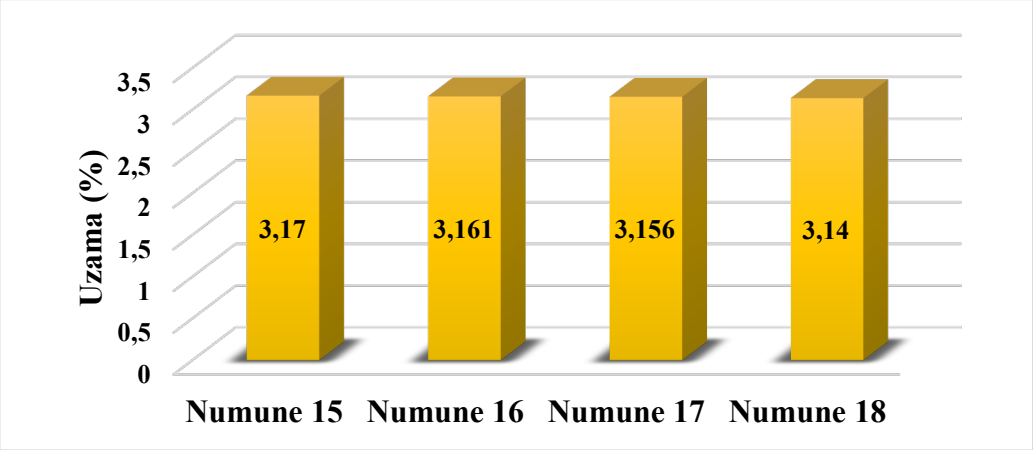
Şekil 4.76: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in çekme dayanım değerleri

Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in çekme dayanım (UTS) değerleri Şekil 4.76'da verilmiştir. Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 323,63 MPa ile Numune 18 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ayrıca vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %3,2, %3,9, %4,2 ve %4,6 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

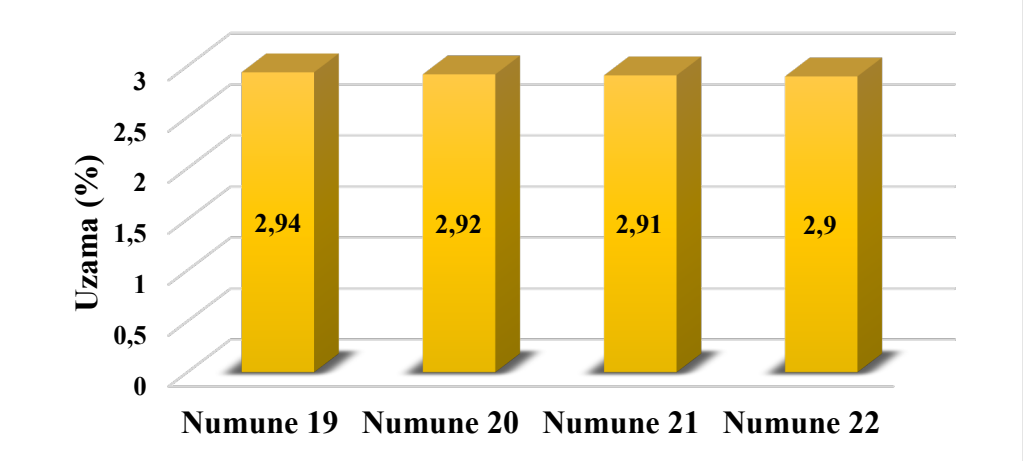
Şekil 4.77'de Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait çekme dayanım değerleri gösterilmiştir. Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 278,82 MPa ile Numune 22 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %2,8, %3,2, %3,7 ve %4 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.77: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin çekme dayanım değerleri



Şekil 4.78: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in %uzama değerleri



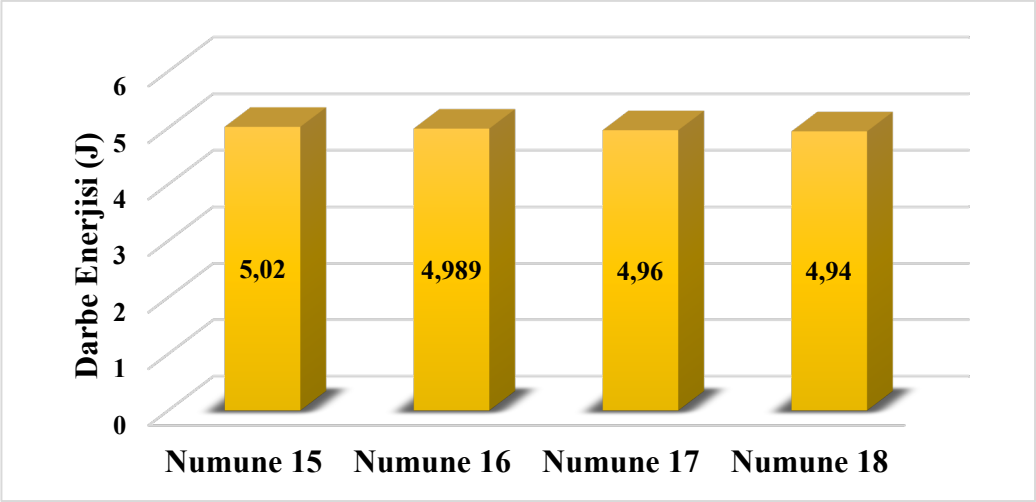
Şekil 4.79: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin %uzama değerleri

Şekil 4.78'de Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in %uzama değerleri verilmiştir. Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %3,17 ile Numune 15 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin %uzama değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla ters orantılı bir artış söz konusudur.

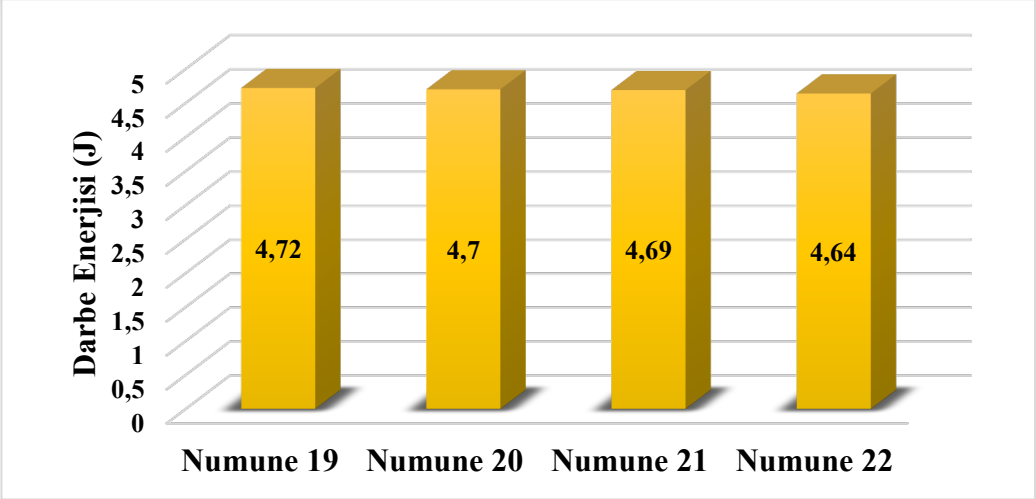
Şekil 4.79'da Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait %uzama değerleri verilmiştir. Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %2,94 ile Numune 19 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin %uzama değerlerini %3,12'ye kadar arttırdığı anlaşılmıştır.

Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in darbe enerji değerleri Şekil 4.80'de verilmiştir. Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 5,02 J ile Numune 15 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin darbe enerji değerlerini düşürdüğü anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir azalış söz konusu olmuştur. Numune 1 ile kıyaslandığında sırasıyla %1, %1,6, %2,1 ve %2,5 oranında azalma olduğu hesaplanmıştır.

Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin darbe enerji değerleri Şekil 4.81'de verilmiştir. Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 4,72 J ile Numune 19 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin darbe enerji değerlerini düşürdüğü anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir azalma söz konusu olmuştur. Numune 8 ile kıyaslandığında sırasıyla %1,8, %2,2, %2,5 ve %3,5 oranında azalma olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.80: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in darbe enerjisi değerleri



Şekil 4.81: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin darbe enerjisi değerleri

Potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanırken ilk olarak açık devre potansiyelinin sabit bir değere ulaşması için numuneler 600 saniye süre boyunca çözeltide bekletilmiştir. Şekil 4.82, Şekil 4.83, Şekil 4.84 ve Şekil 4.85'te sırasıyla Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'in açık devre potansiyeli grafikleri verilmiştir.

Açık devre potansiyelinin sabit bir değere gelmesinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testi başlamıştır. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile Şekil 4.86, Şekil 4.87, Şekil 4.88 ve Şekil 4.89'da gösterilmiş olan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden korozyon akım (Icorr) ve korozyon potansiyeli (Ecorr) değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra denklem 2.27'den korozyon hızı (CR) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.9: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	Icorr (µA)	CR (mm/yıl)
Numune 15	-734	0,232	$99,42e^{-3}$
Numune 16	**-720**	**0,203**	**$87,12e^{-3}$**
Numune 17	-652	0,105	$45,08e^{-3}$
Numune 18	**-649**	**0,128**	**$54,89e^{-3}$**

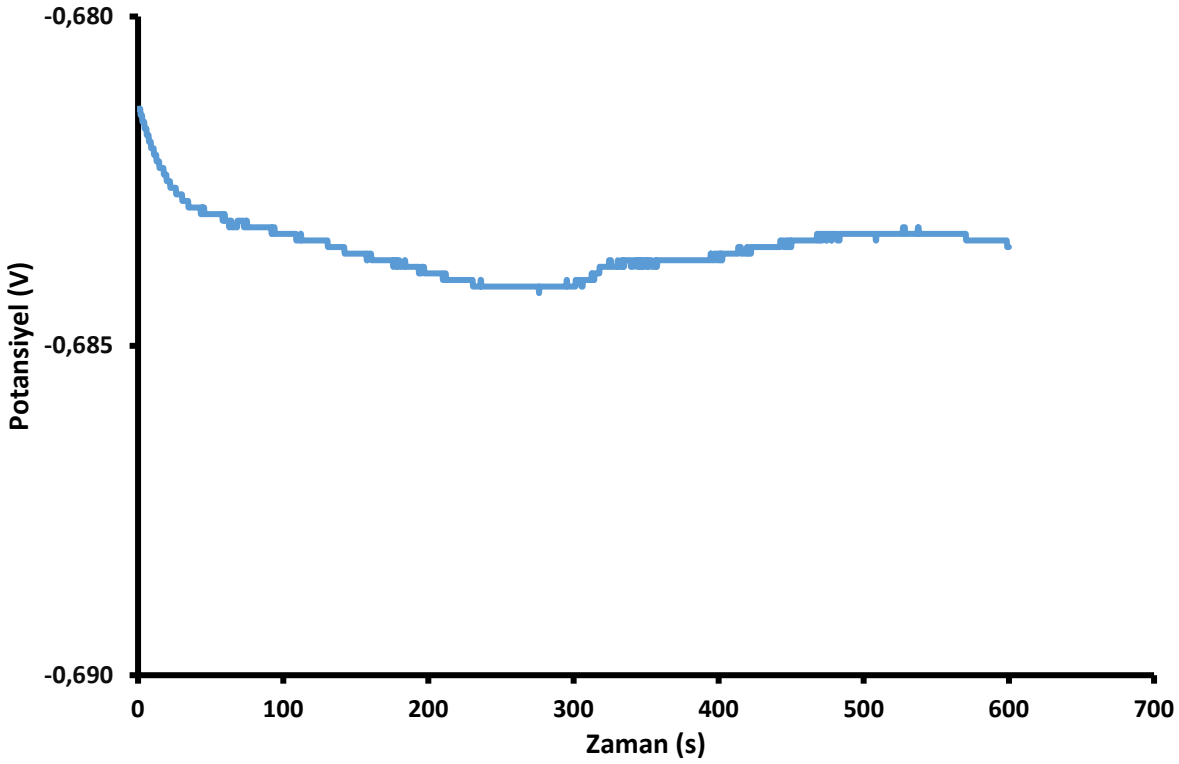
Tablo 4.9'da Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametrelerin değerleri verilmiştir. Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 17'nin korozyon akım değeri 0,105µA, korozyon potansiyel değeri -652 mV ve korozyon hızı değerinin $45,08e^{-3}$ mm/yıl olduğu görülmektedir. Numune 15'in korozyon hızı $99,42e^{-3}$ mm/yıl, Numune 16'nın korozyon hızı $87,12e^{-3}$ mm/yıl ve Numune 18'in korozyon hızı $54,89e^{-3}$ mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 17 olduğu görülmüştür. Numune 17'nin korozyon akım değerinin kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.90, Şekil 4.91, Şekil 4.92 ve Şekil 4.93'teverilen Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.10: Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.

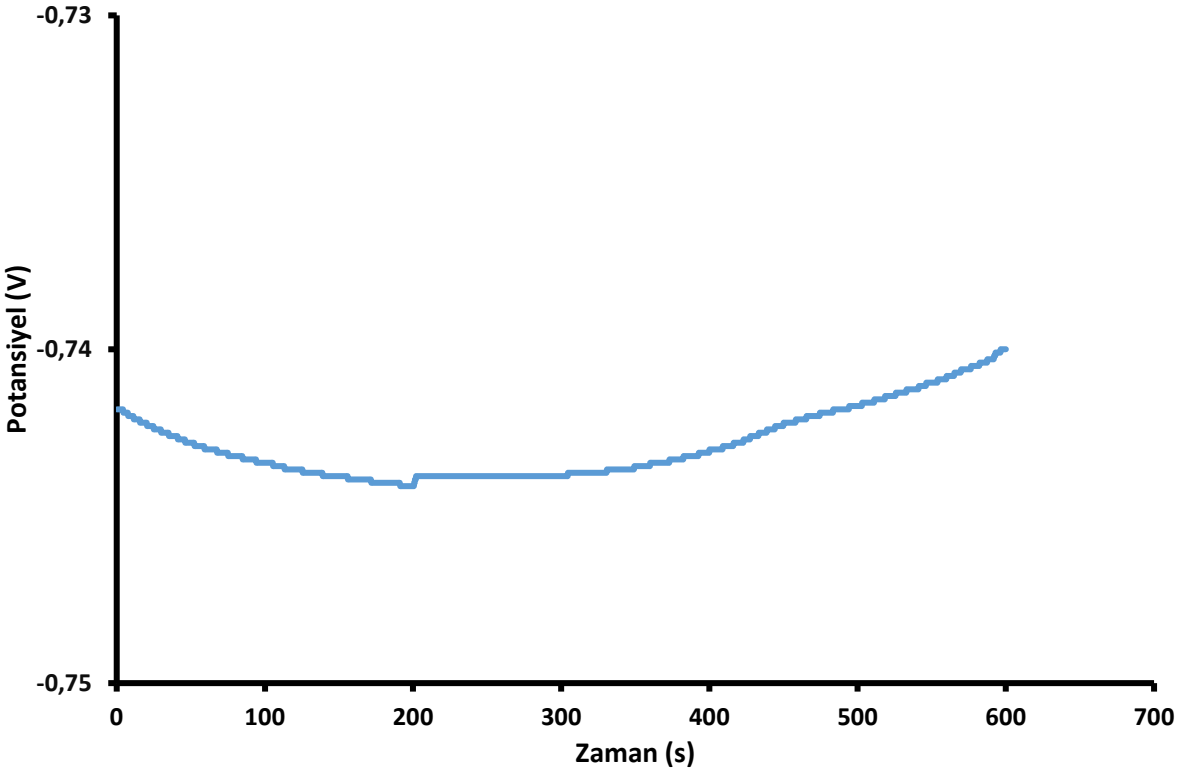
	Rcor (Ω)	Ccor ($S*s^n$)	n	Rpore (Ω)	Cpore ($S*s^m$)	m
Numune 15	4985	$15e^{-6}$	0,76	818,7	$10,73e^{-6}$	0,99
Numune 16	**5297**	**$1,637e^{-6}$**	**0,61**	**834,9**	**$11,52e^{-6}$**	**0,98**
Numune 17	9554	$0,41e^{-6}$	1	938,7	$13,37e^{-6}$	0,93
Numune 18	**8247**	**$1,285e^{-6}$**	**0,93**	**845**	**$14,89e^{-6}$**	**1**

Tablo 4.10'da elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 15, Numune 16, Numune 17 ve Numune 18'e ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. Rcor değerleri açısından değerlendirme yapılacak olursa, en yüksek Rcor değerine sahip olan Numune 17 olduğu görülecektir. Yüksek Rcor değerinden düşük Rcor değerine doğru bir sıralama yapılacak olursak; Numune 17'den sonra Numune 18, Numune 16 ve Numune 15 şeklinde sıralayabiliriz.

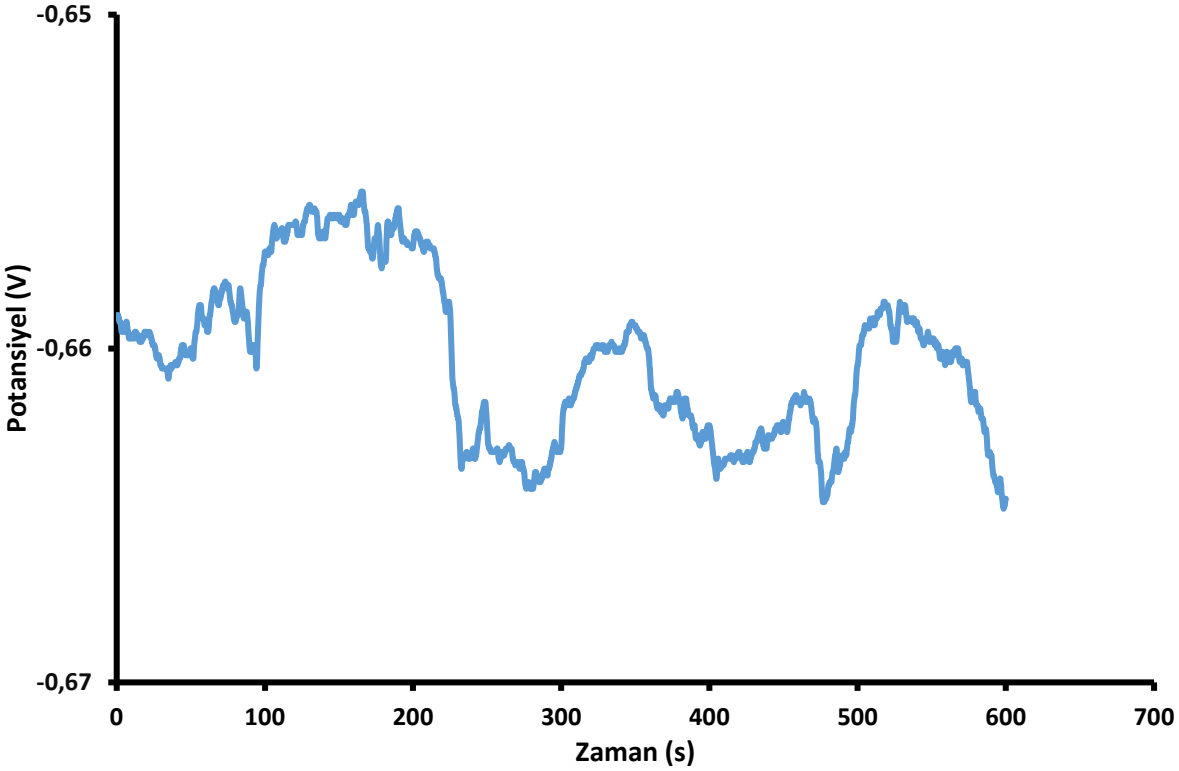
Tablo 4.10'daki tüm veriler incelendiğinde korozyon direnci en yüksek olan alaşım Numune 17 olmaktadır. Numune 1 ile kıyaslama yaptığımızda kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli alaşımların hepsinin korozyon dayanımında artış söz konusudur, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.



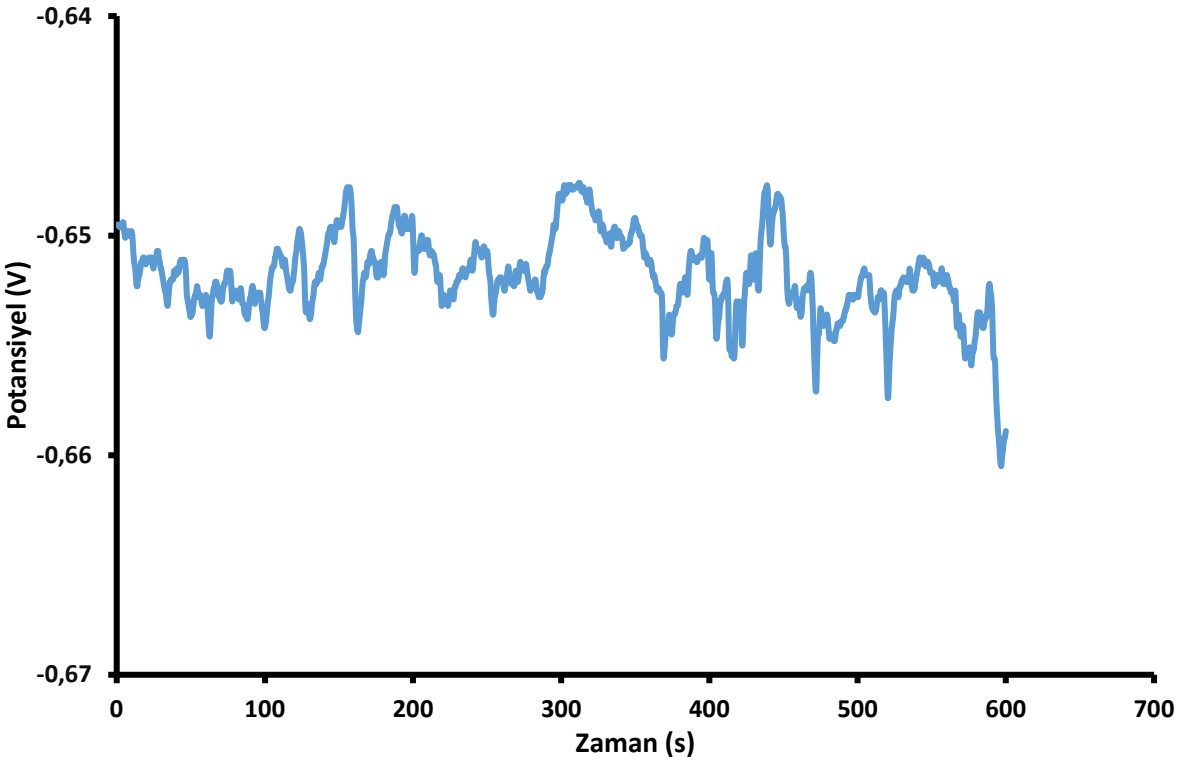
Şekil 4.82: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



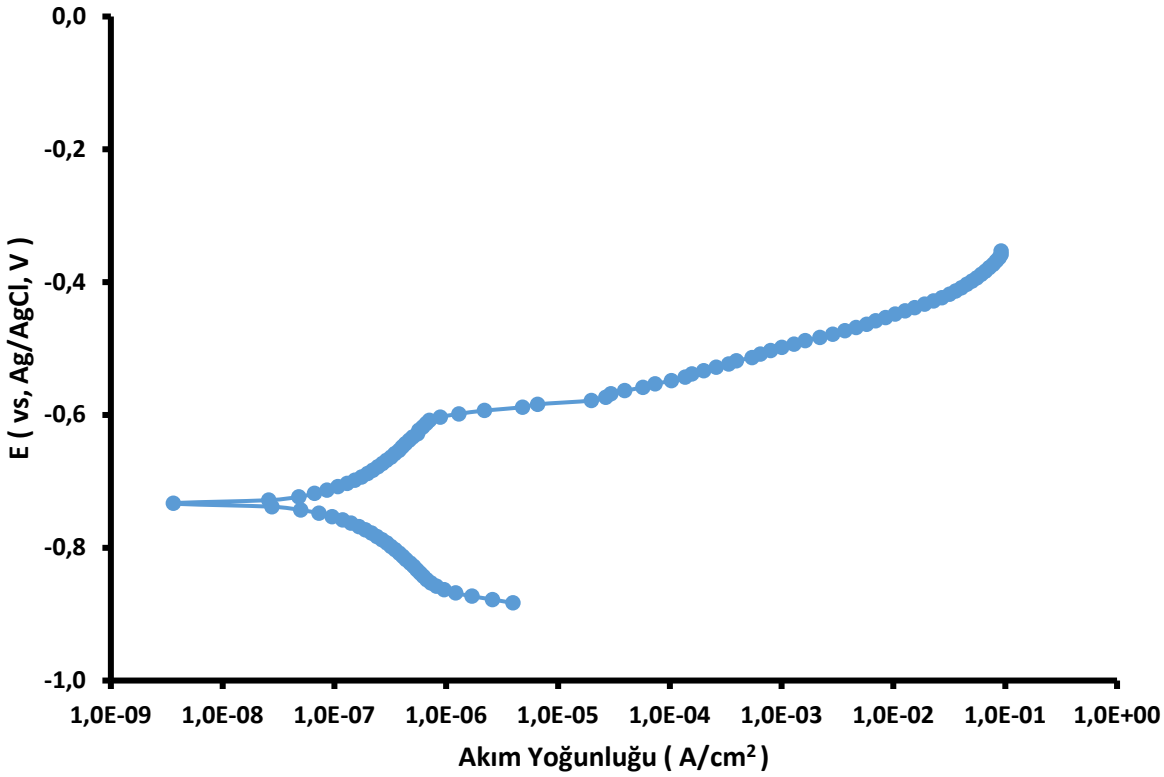
Şekil 4.83: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



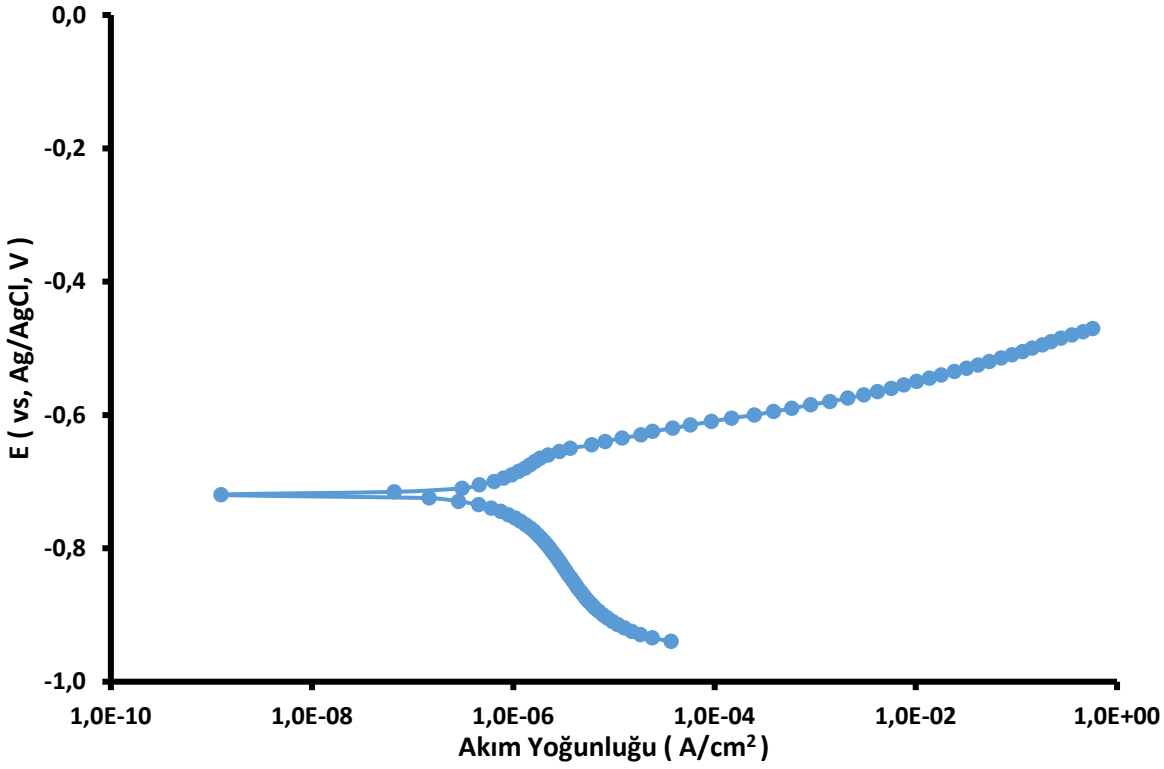
Şekil 4.84: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



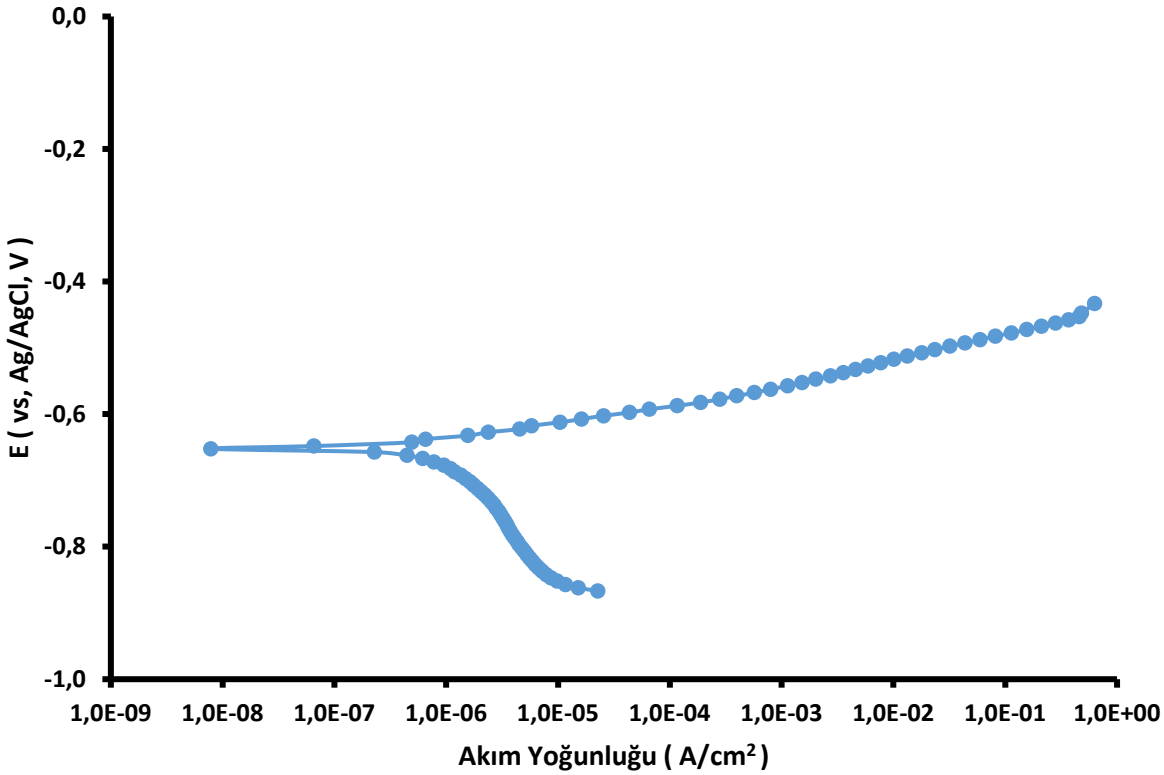
Şekil 4.85: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



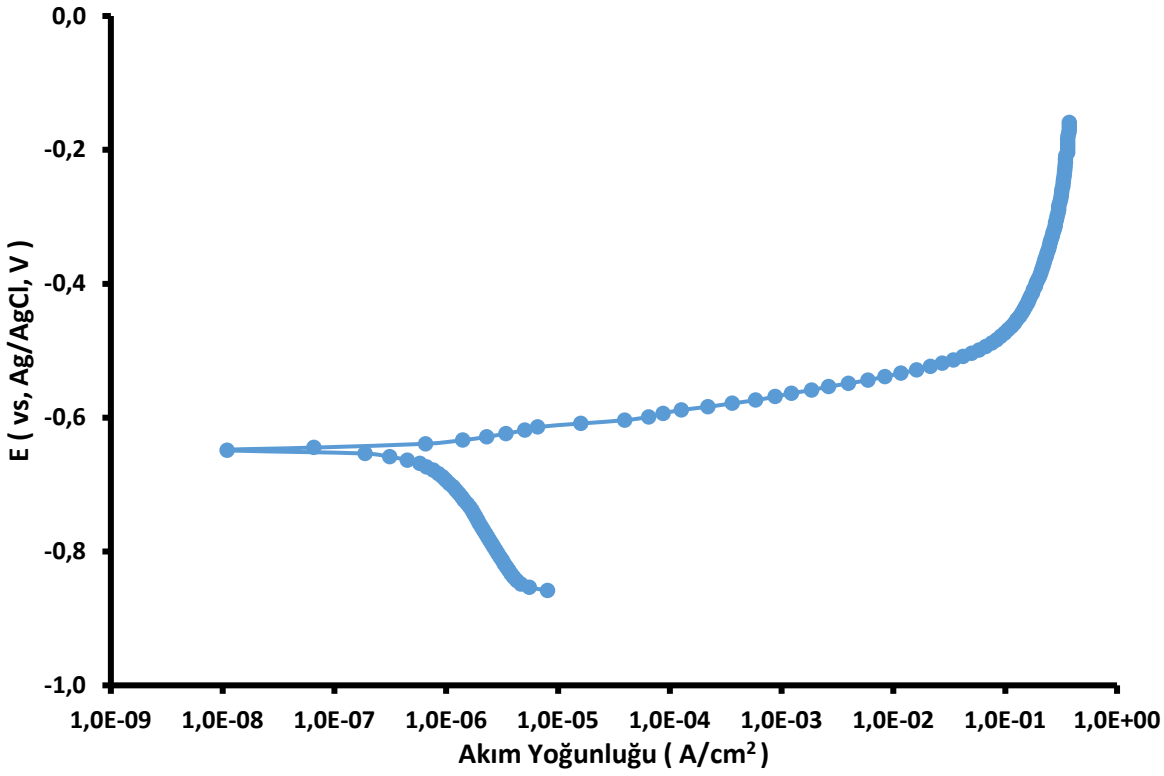
Şekil 4.86: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



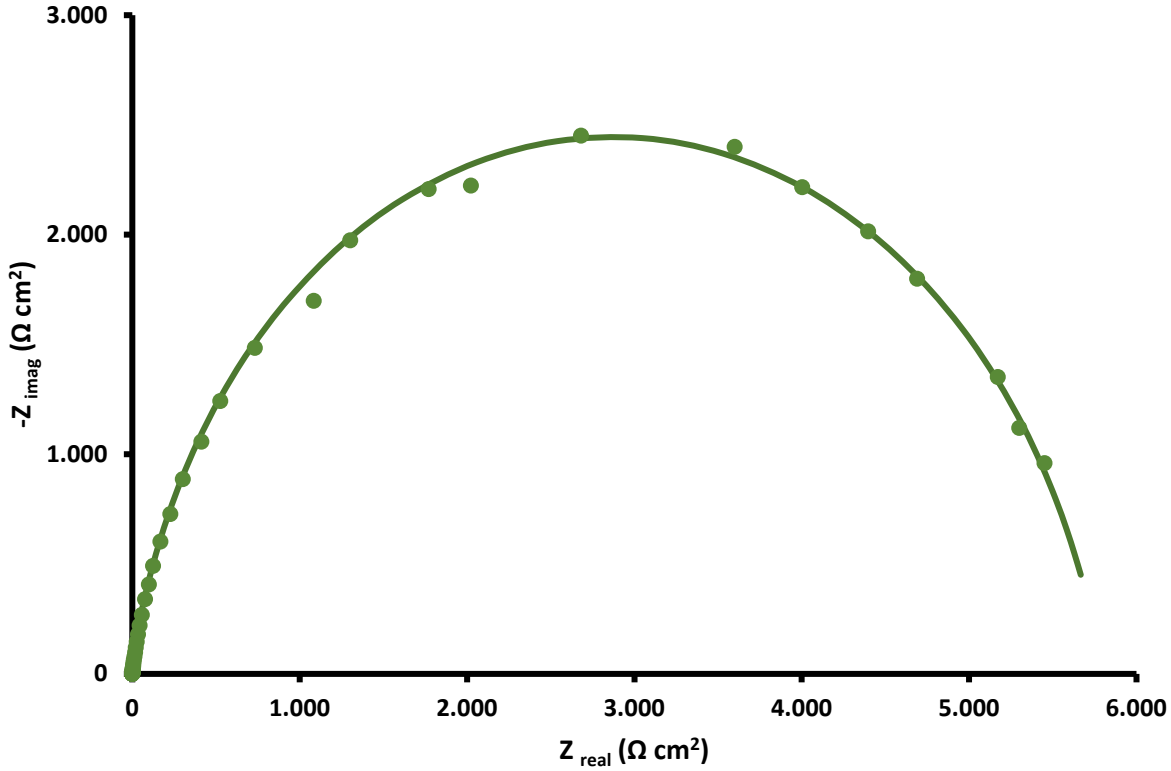
Şekil 4.87: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



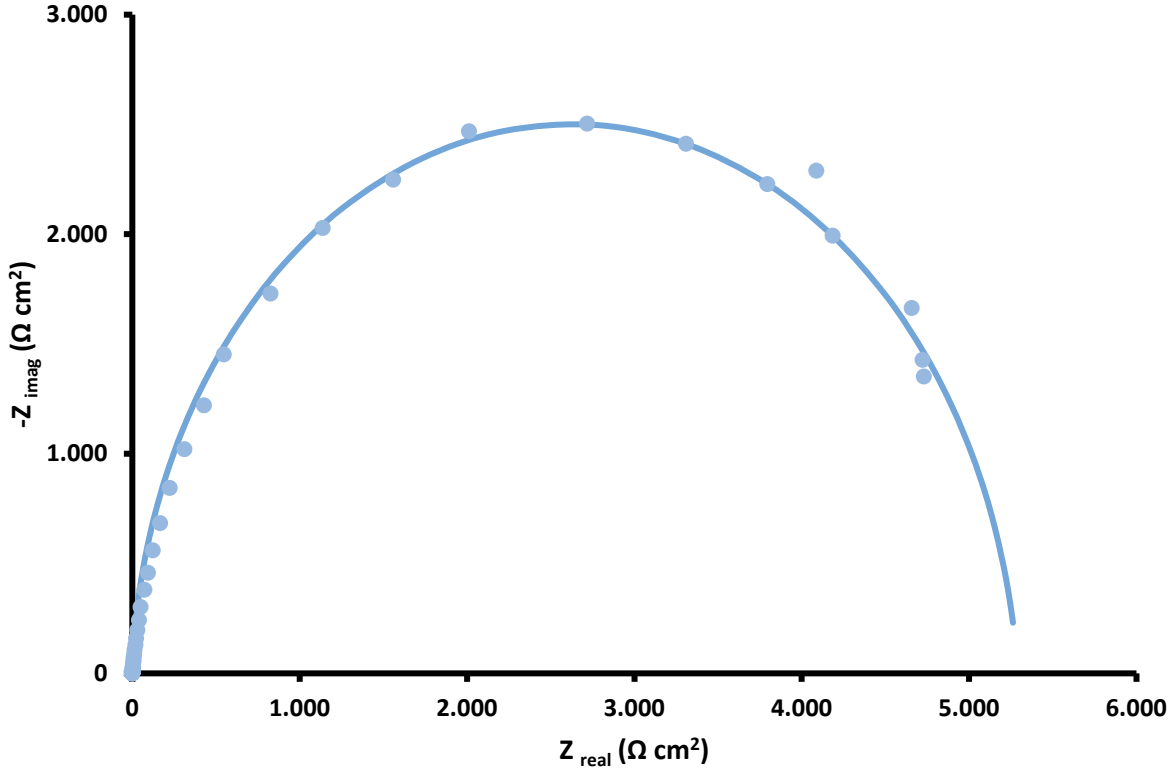
Şekil 4.88: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



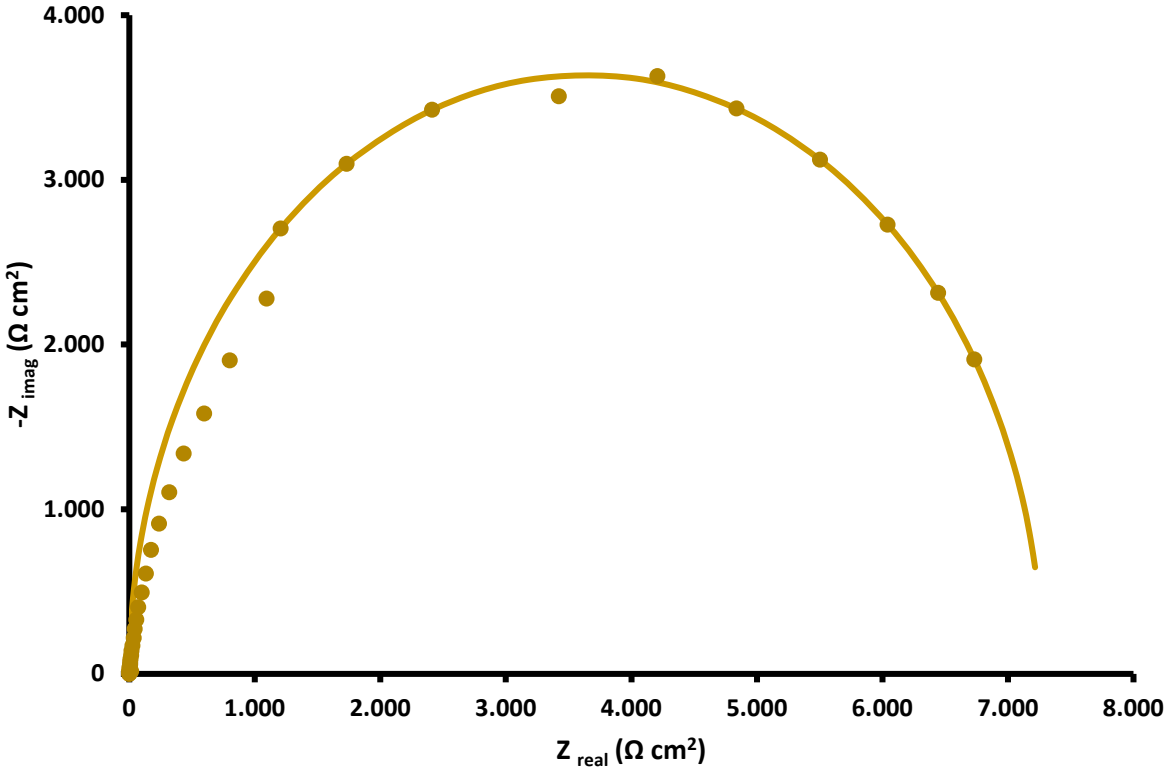
Şekil 4.89: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



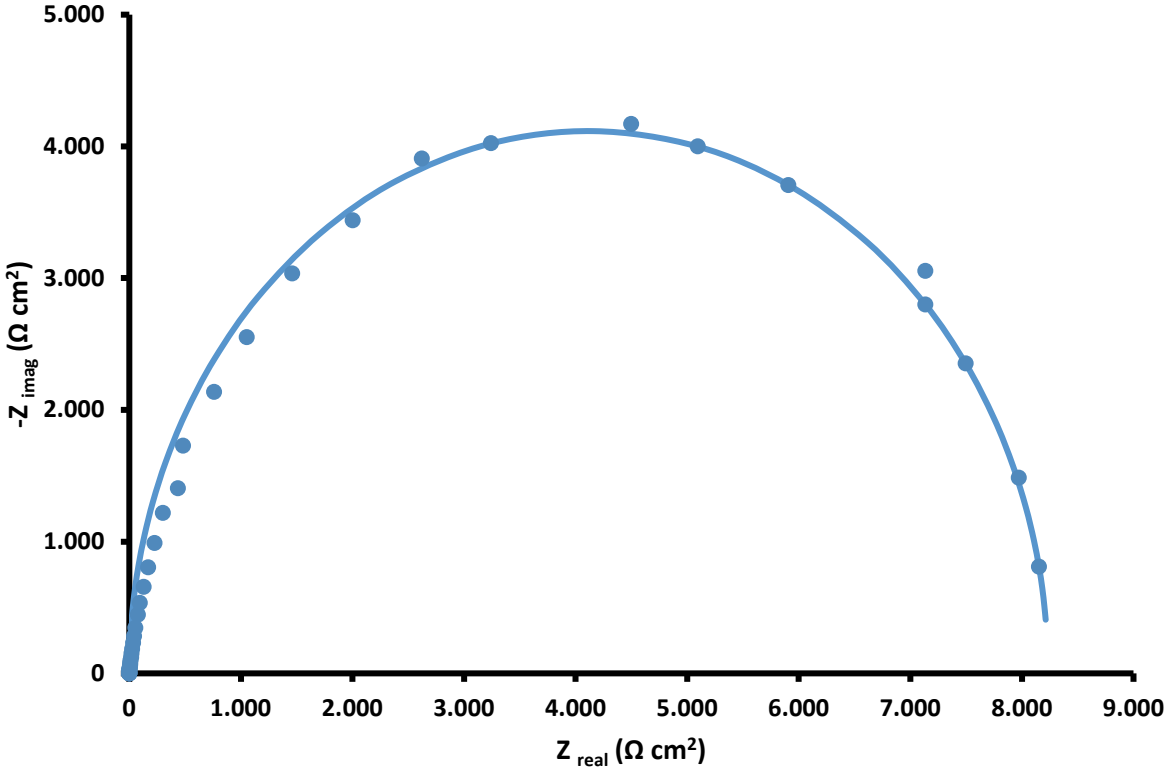
Şekil 4.90: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 15 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.91: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 16 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.92: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 17 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.93: Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 18 alaşımının Nyquist diyagramı

Şekil 4.94, Şekil 4.95, Şekil 4.96 ve Şekil 4.97'te sırasıyla Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'nin açık devre potansiyeli grafikleri verilmiştir.

Açık devre potansiyelinin sabit bir değere gelmesinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testi başlamıştır. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile Şekil 4.98, Şekil 4.99, Şekil 4.100 ve Şekil 4.101'de gösterilmiş olan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden korozyon akım (Icorr) ve korozyon potansiyeli (Ecorr) değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra denklem 2.27'den korozyon hızı (CR) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.11: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

	Ecorr (mV)	Icorr (µA)	CR (mm/yıl)
Numune 19	-643	1	$429,5e^{-3}$
Numune 20	**-652**	**0,718**	**$310,7e^{-3}$**
Numune 21	-674	0,459	$198,6e^{-3}$
Numune 22	**-669**	**0,554**	**$239,8e^{-3}$**

Tablo 4.11'de Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametrelerin değerleri verilmiştir. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 21'in korozyon akım değeri 0,459µA, korozyon potansiyel değeri -674 mV ve korozyon hızı değerinin $198,6e^{-3}$ mm/yıl olduğu görülmektedir. Numune 19'un korozyon hızı $429,5e^{-3}$ mm/yıl, Numune 20'nin korozyon hızı $310,7e^{-3}$ mm/yıl ve Numune 22'nin korozyon hızı $239,8e^{-3}$ mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kum kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 21 olduğu görülmüştür. Numune 21'in korozyon akım değerinin kum kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.

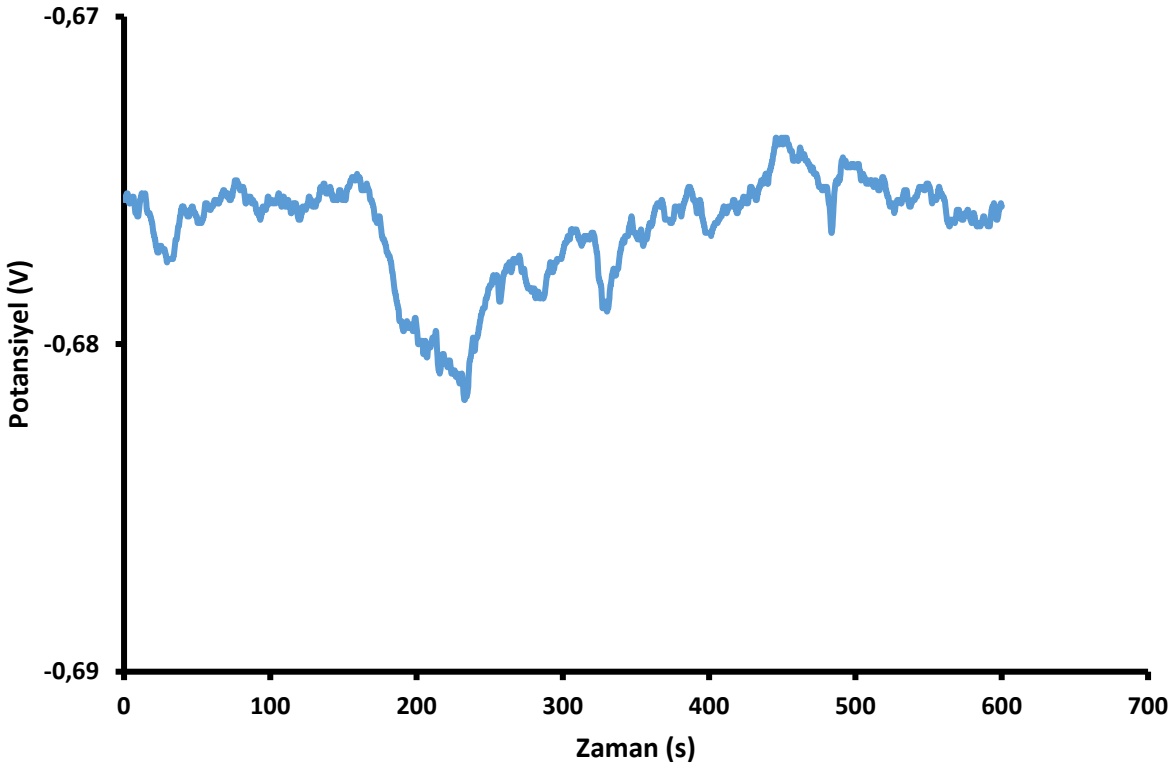
Şekil 4.102, Şekil 4.103, Şekil 4.104 ve Şekil 4.105'te verilen Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait Nyquist diyagramları incelendiğinde kapasitif lupların çaplarının farklılık teşkil etmesine rağmen şekillerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.12: Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler.

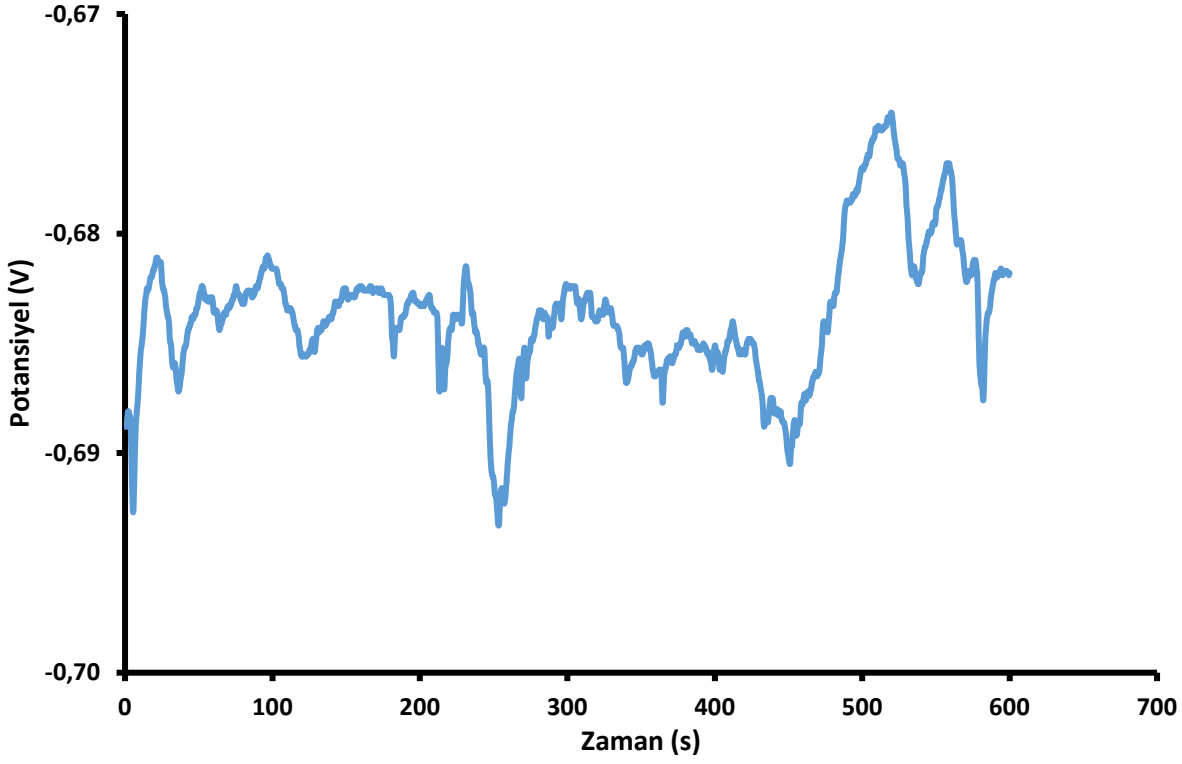
	Rcor (Ω)	**Ccor ($S*s^n$)**	**n**	**Rpore (Ω)**	**Cpore ($S*s^m$)**	**m**
Numune 19	4450	$27e^{-6}$	1	348,6	$8,56e^{-6}$	0,95
Numune 20	**4515**	**$22,3e^{-6}$**	**0,76**	**357,1**	**$13,24e^{-6}$**	**1**
Numune 21	4613	$18,7^{-6}$	0,96	448,9	$15,69e^{-6}$	0,956
Numune 22	**4561**	**$19,73e^{-6}$**	**0,91**	**415,8**	**$14,57e^{-6}$**	**0,981**

Tablo 4.12'de elektrokimyasal empedans spektroskobi testleri gerçekleşen Numune 19, Numune 20, Numune 21 ve Numune 22'ye ait Nyquist diyagramından elde edilen elektrokimyasal parametreler verilmiştir. Yüksek Rcor ve düşük Ccor değerleri, numunelerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Düşük Rpore ve yüksek Cpore değerleri ise alaşım yüzeyindeki gözeneklerin korozyon dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. Rcor değerleri açısından değerlendirme yapılacak olursa, en yüksek Rcor değerine sahip olan Numune 21 olduğu görülecektir. Yüksek Rcor değerinden düşük Rcor değerine doğru bir sıralama yapılacak olursak; Numune 21'den sonra Numune 22, Numune 20 ve Numune 19 şeklinde sıralayabiliriz.

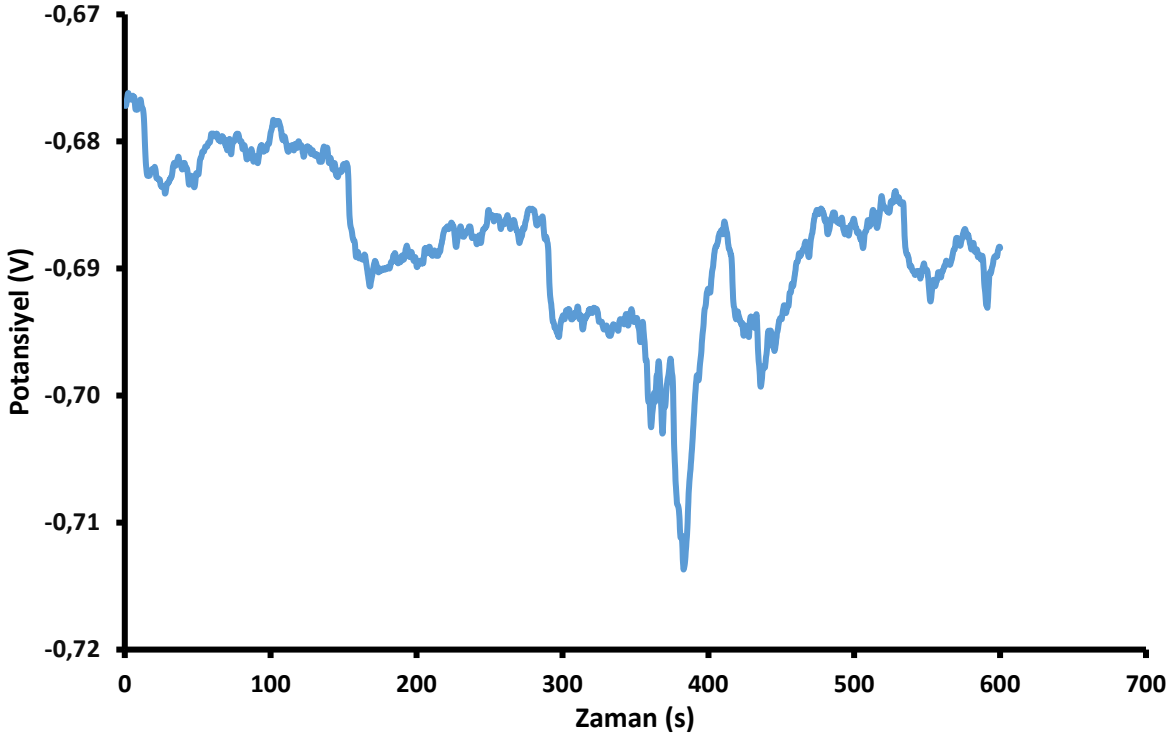
Tablo 4.12'deki tüm veriler incelendiğinde korozyon direnci en yüksek olan alaşım Numune 21 olmaktadır. Numune 8 ile kıyaslama yaptığımızda kum kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli alaşımların hepsinin korozyon dayanımında artış söz konusudur, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.



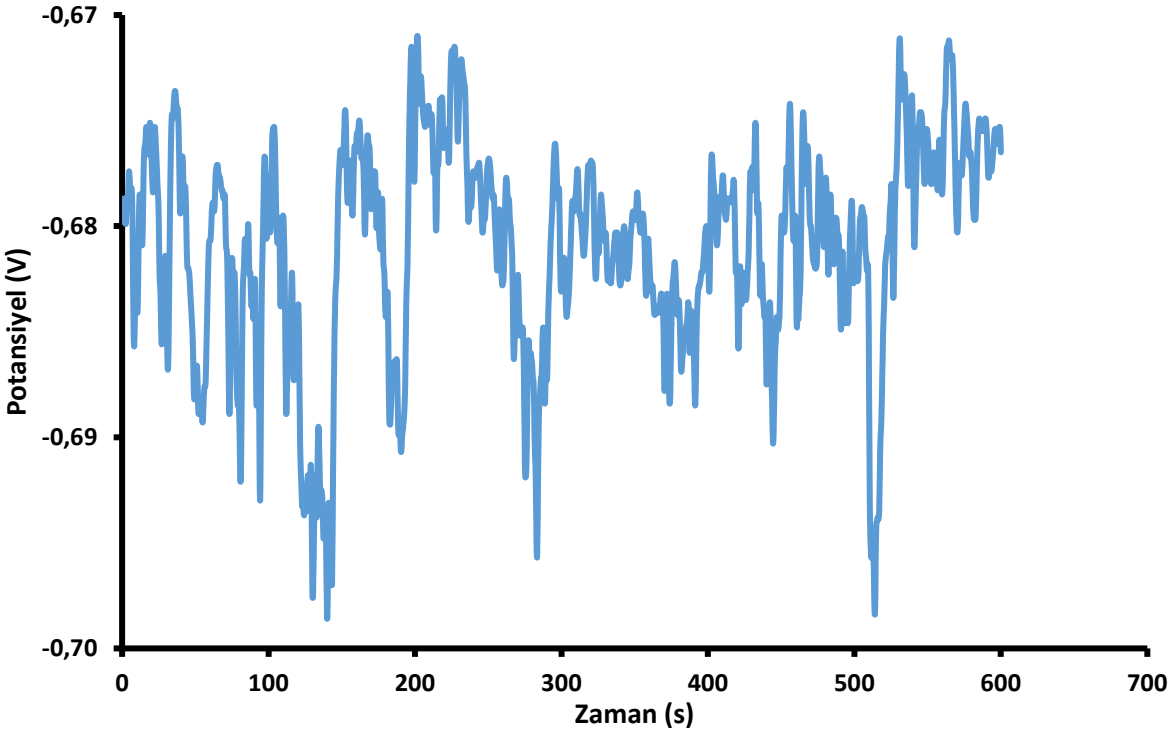
Şekil 4.94: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



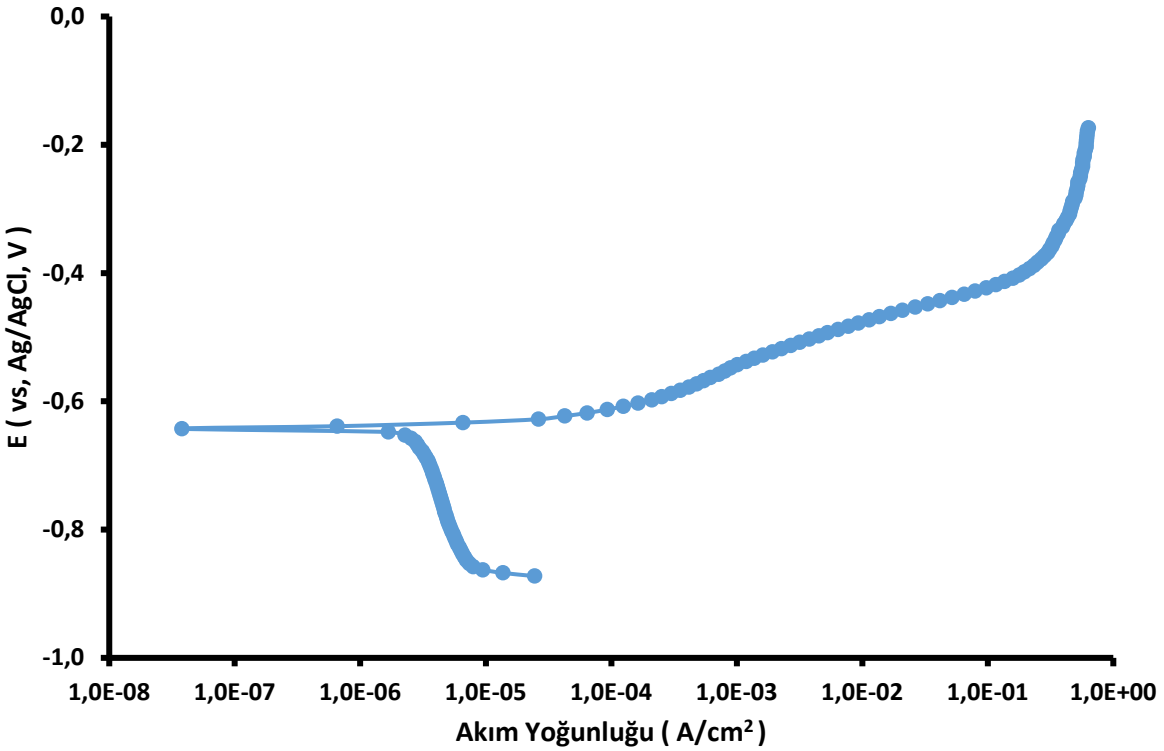
Şekil 4.95: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



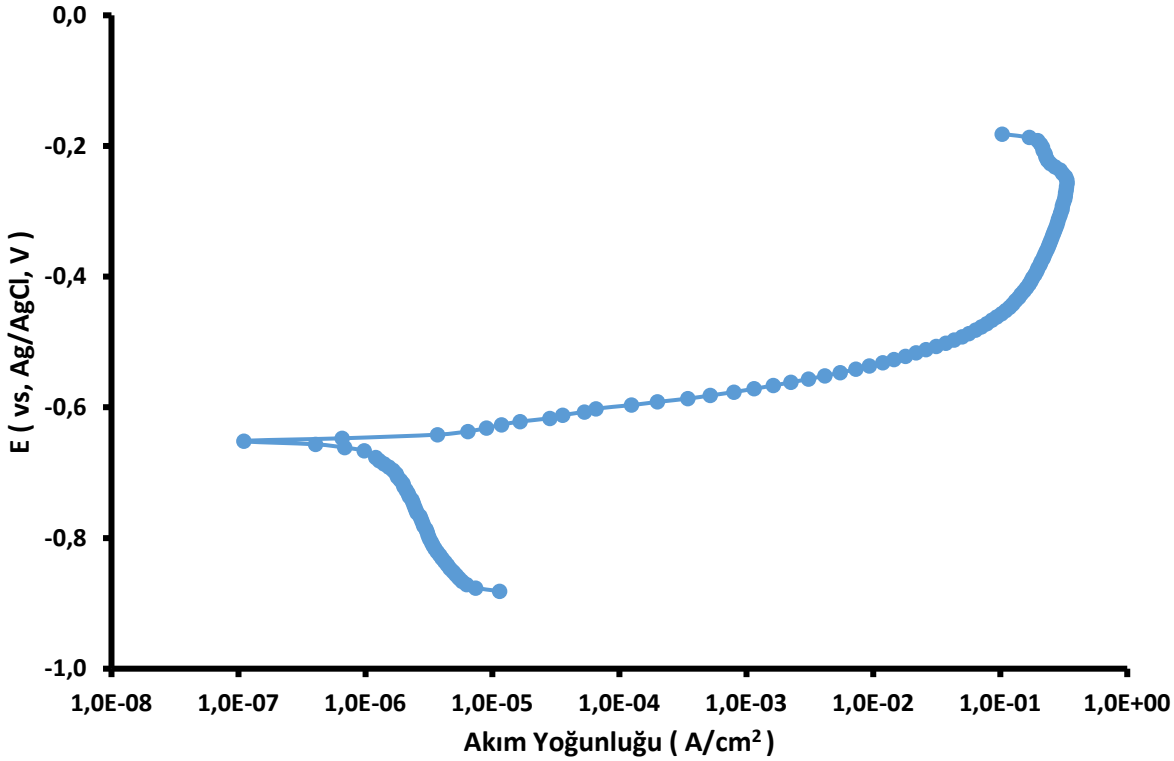
Şekil 4.96: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



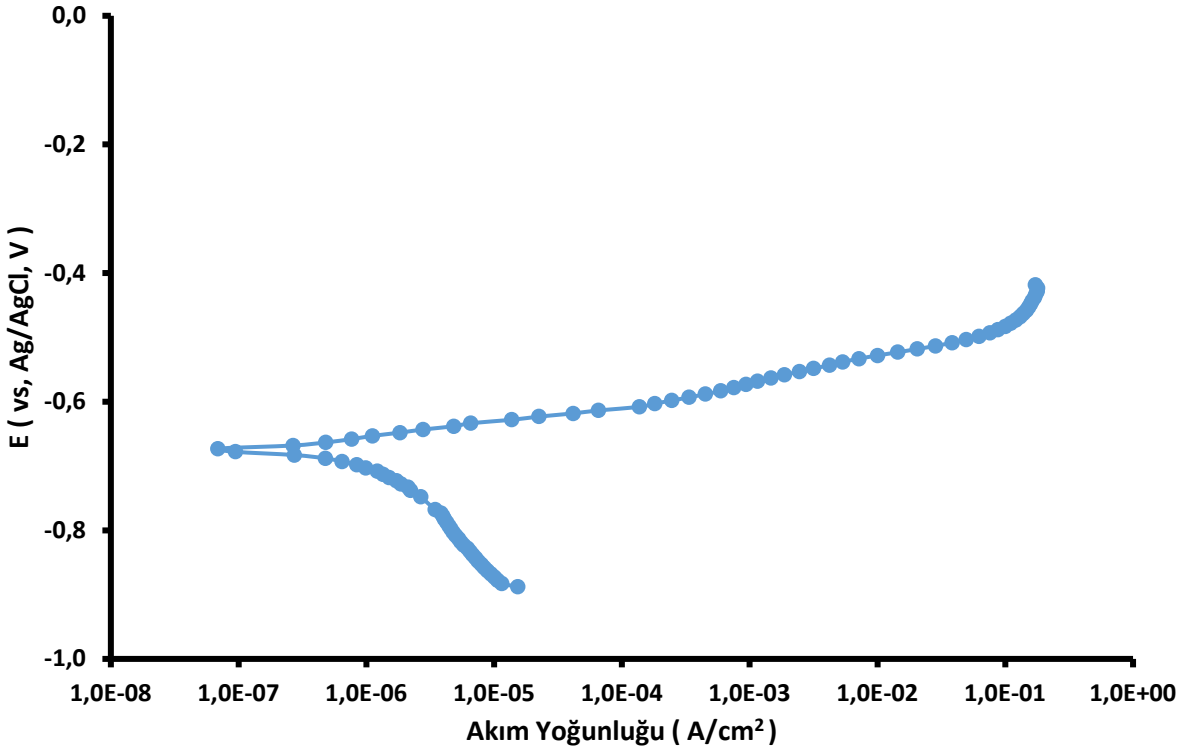
Şekil 4.97: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının açık devre potansiyeli (OCP)



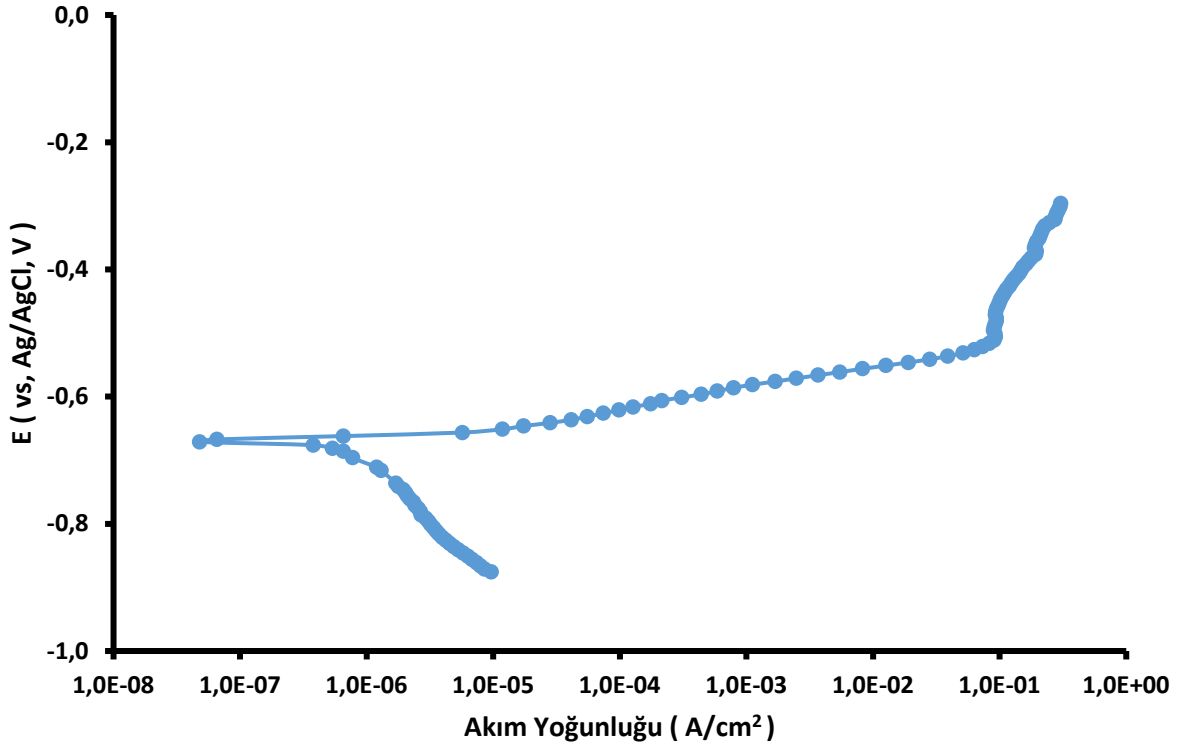
Şekil 4.98: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



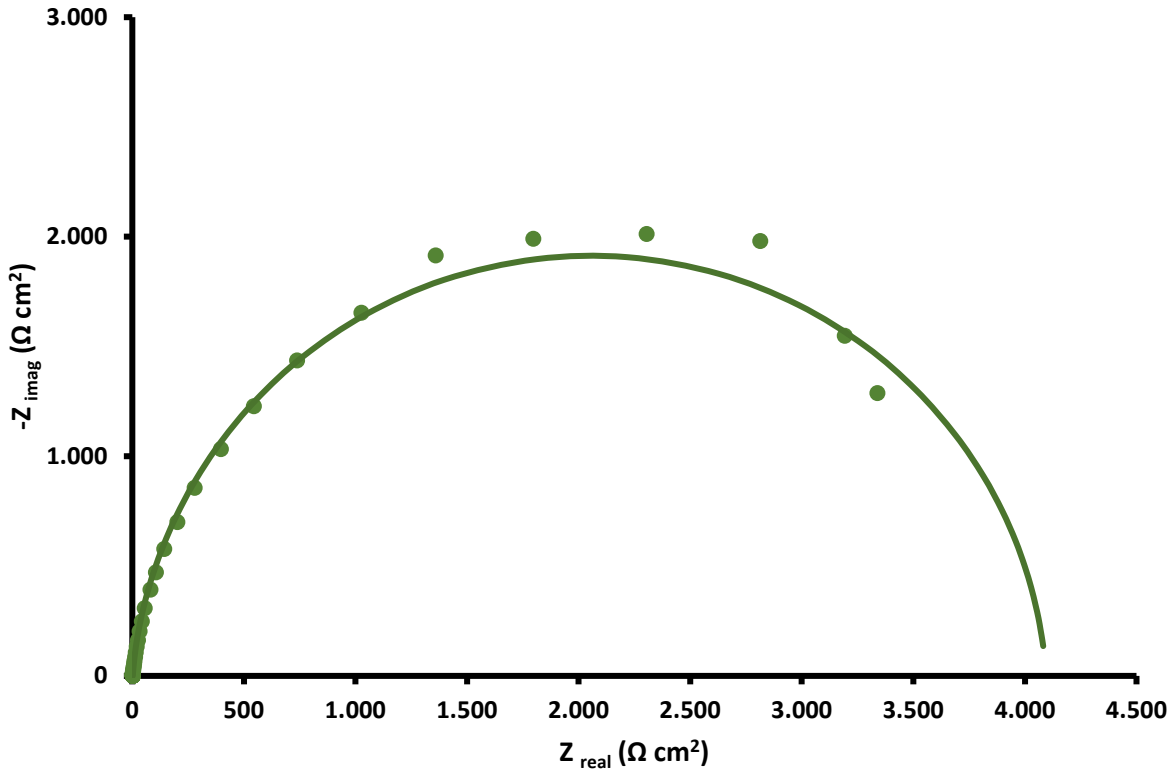
Şekil 4.99: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



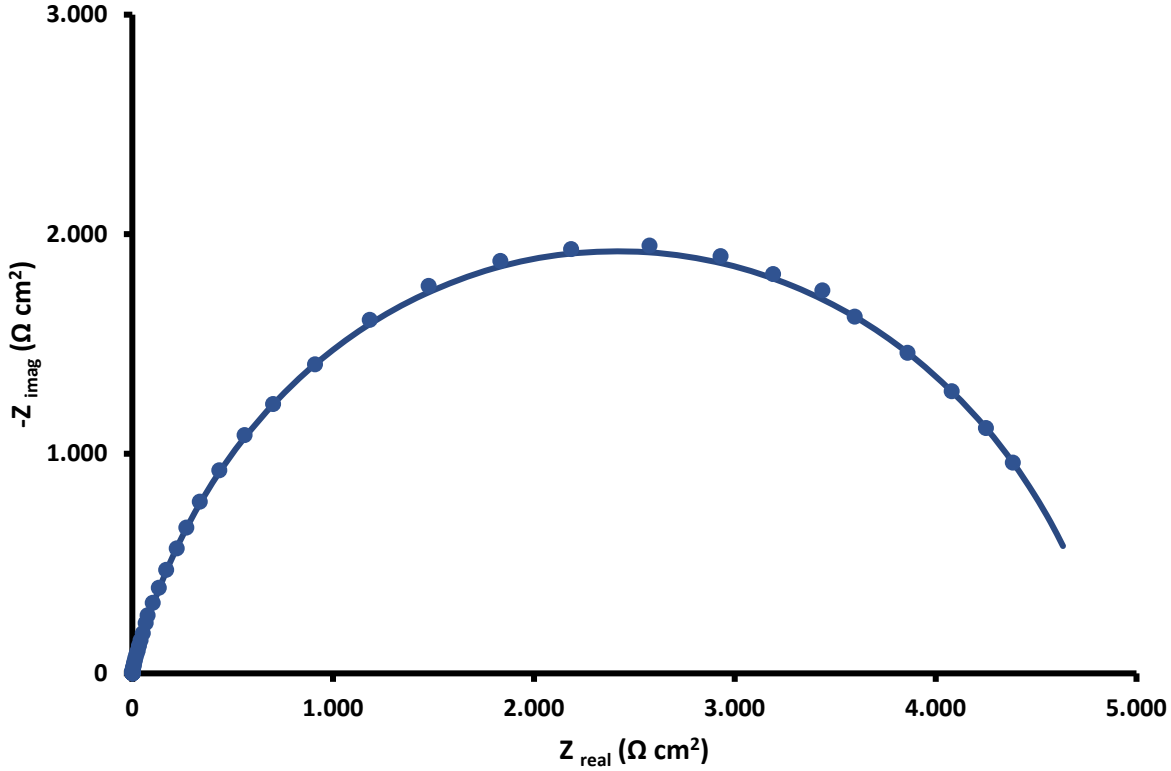
Şekil 4.100: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



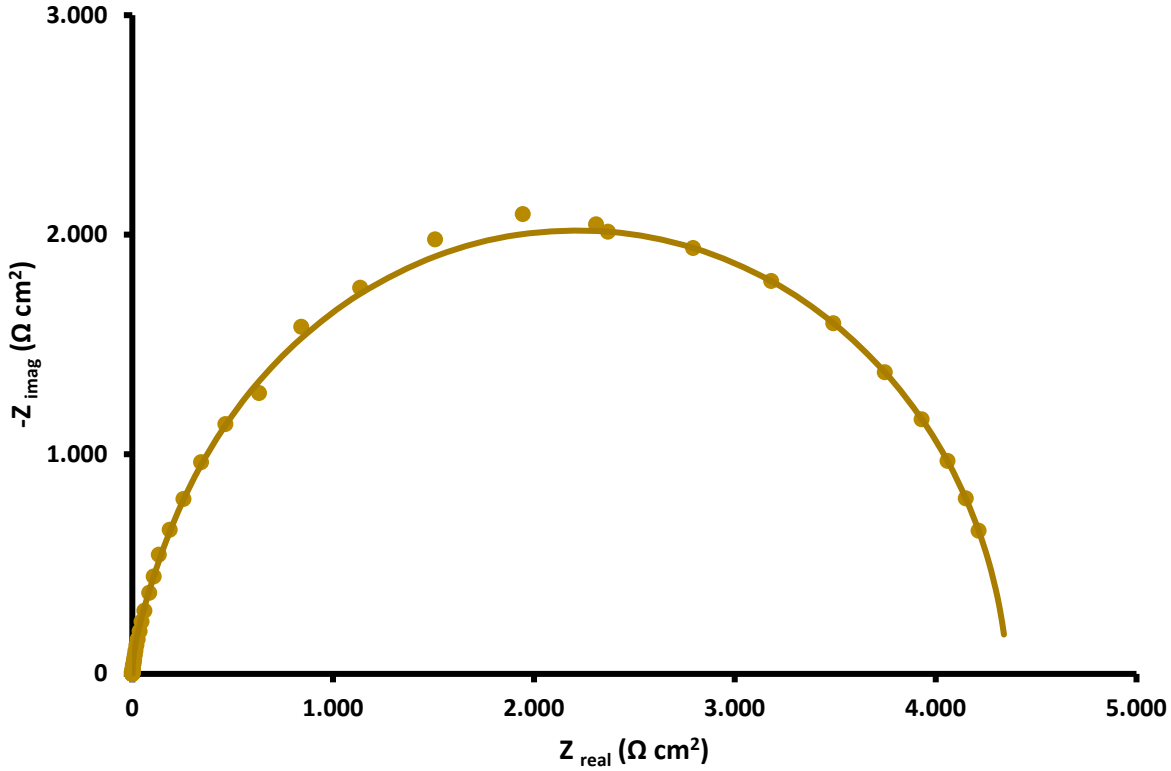
Şekil 4.101: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi



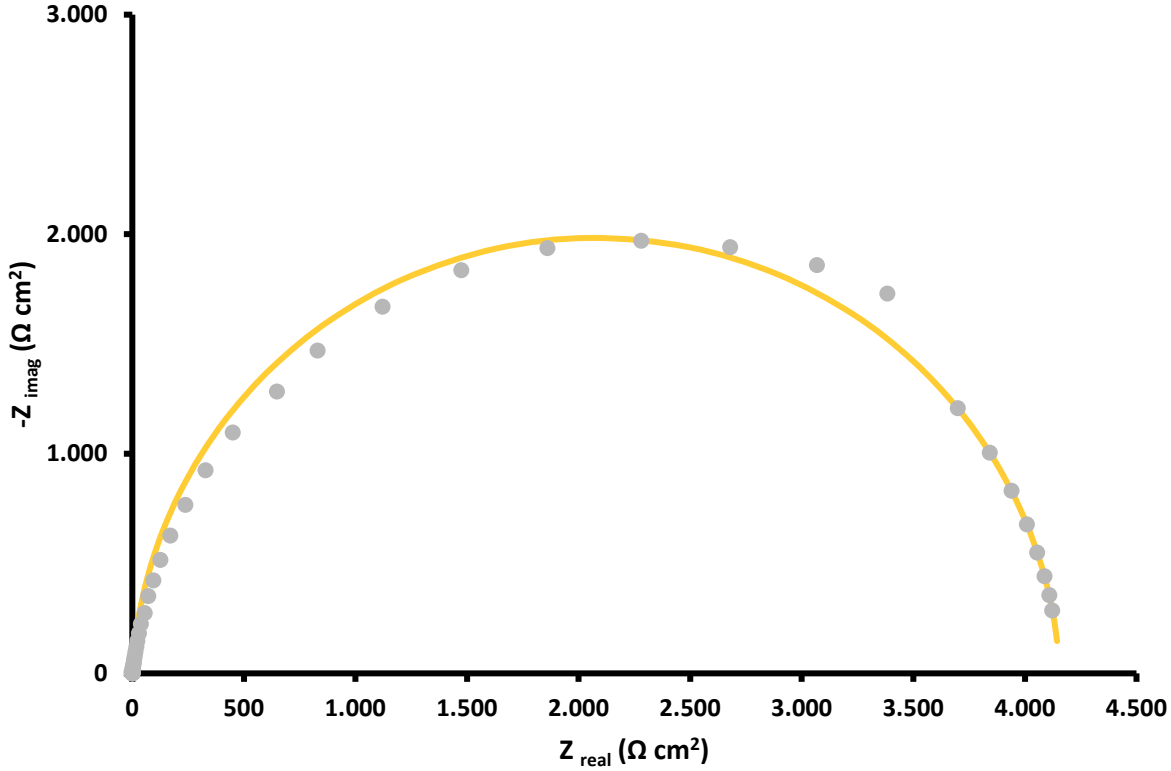
Şekil 4.102: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 19 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.103: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 20 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.104: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 21 alaşımının Nyquist diyagramı



Şekil 4.105: Kum kalıba dökümü yapılan Numune 22 alaşımının Nyquist diyagramı

5. TARTIŞMA

Kokil kalıba yapılan döküm işlemi ile modifiyesiz, stronsiyum, bor ve vanadyum modifiyeli A360 alaşımının mikroyapısı incelendiğinde fazların şekilleri, boyutları ve oranları hakkında bilgiler elde edilmiştir. Tane boyutunun ve şeklinin, eriyiğin döküm kalitesini ve mekanik özelliklerini etkilediği açıkça kanıtlanmıştır. Tane boyutu kontrolünün önemi, yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde anlaşılmıştır [69]. Kum kalıba yapılan dökümde yavaş soğuma hızının Si büyümesine katkıda bulunmasından dolayı kokil kalıba döküme göre dendritik yapının daha belirgin bir hale geldiği gözlenmiştir. Kokil kalıba yapılan dökümlerde katılaşma esnasındaki soğuma hızı kum kalıplardan daha hızlı olduğu için mikroyapı incelemesinde daha ince taneli yapılar ortaya çıkmaktadır [90-94].

Tane boyunun yanı sıra ötektik silisyum morfolojisinin de modifiyeler ile birlikte değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Tane boyutu kadar ötektik silisyum morfolojisinin alüminyum döküm işleminde önemli olduğu literatürde yapılan çalışma ile desteklenmiştir [69].

Stronsiyum modifiyesi ile birlikte A360 alaşımının ötektik sıcaklığı üzerine düşüş yönünde etki ettiği anlaşılmıştır. Yapılan çalışmaya göre stronsiyum, alüminyum-silisyum ötektik sıcaklığını değiştirmektedir [73].

Yapılan çalışmalarda 200 ppm ile 300 ppm arası eklenti miktarı alaşımın modifikasyon için kullanılması gereken en ideal miktar olarak ortaya çıkmaktadır [86,95-100].

Bor modifiyesi ile birlikte A360 alaşımının mikroyapısı incelendiğinde ötektik faz oranın azaldığı, birincil alüminyum fazının daha küresel bir görünüme dönüştüğü görülmüştür. Laboratuvar testleri, AlB_2 parçacıkları içeren alüminyum-bor ana alaşımlarının mükemmel tane inceltme sağladığını doğruladı. Daha sonra bu çalışmaları ile ilgili olarak patent alınarak, dökümhane denemelerinde de Al-B master alaşımlarının iyi tane incelticiler olduğunu doğruladılar [73].

A360 alaşımı standartları incelendiğinde, testleri yapılmış olan numunelerin akma dayanımı, çekme dayanımı, %uzama ve darbe enerjileri sonuçlarının standart değerlerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [91-93].

Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.

Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır. Yapılan bir çalışmada döküm yöntemi HPDC şeklinde uygulanmıştır, değişen bor oranlarının akma dayanımındaki tekrarlabilirliği kontrol edilmiştir [95]

Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 354,3 MPa ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak bor ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.

Kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerin akma dayanımının kum kalıba dökümü yapılmış numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. A360 alaşımı standartları incelendiğinde, testleri yapılmış olan numunelerin akma dayanımı sonuçlarının standart değerlerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [91-99].

Kokil kalıba yapılan döküm işlemi ile modifiyesiz, stronsiyum, bor ve vanadyum modifiyeli A360 alaşımının korozyon özellikleri incelendiğinde her bir ilavenin korozyon özelliklerini değiştirdiği anlaşılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Numune 1'in sertlik değerini 61,3 HB olarak, numune 8'in sertlik değeri 51,9 HB olarak ölçülmüştür.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in akma dayanımının kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'e göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 1'in çekme dayanımı 309,4 MPa olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 8'in çekme dayanımı 268,1 MPa olarak ölçülmüştür.
- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 8'in % uzama değerleri karşılaştırıldığında kum kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,56 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.
- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 8'in darbe enerji değerleri kıyaslandığı zaman kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %5,13 oranında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır.
- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1'in korozyon akım değerinin ve Numune 8'e kıyasla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Korozyon hızları bakımından karşılaştırıldığında da Numune 1'in korozyon hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Bütün parametreler incelendiğinde kokil kalıba dökümü yapılan Numune 1'in korozyon dayanımının kum kalıba dökümü yapılan Numune 8'e kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.
- Sr modifiyeli A360 alaşımının kokil kalıba yapılmış olan dökümünün (Numune 2) sertlik değerinde 2,45% oranında, kum kalıba yapılmış olan dökümün (Numune 9) sertlik değerinde 2,5% oranında düşüş görülmüştür.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'in akma dayanımının kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'a göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış Numune 2'in çekme dayanımı 326,1 MPa olarak ölçülmüştür. Kum kalıba dökümü yapılmış Numune 9'in çekme dayanımı 279,9 MPa olarak ölçülmüştür.

- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 9'in % uzama değerleri karşılaştırıldığında kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,7 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2 ile kum kalıba yapılan dökümü yapılan Numune 9'un darbe enerji değerleri kıyaslandığı zaman kokil kalıba yapılan dökümün yaklaşık %6,12 oranında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır.

- Kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2'in korozyon akım değerinin ve Numune 9'a kıyasla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Korozyon hızları bakımından karşılaştırıldığında da Numune 2'in korozyon hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Bütün parametreler incelendiğinde kokil kalıba dökümü yapılan Numune 2'nin korozyon dayanımının kum kalıba dökümü yapılan Numune 9'a kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.
- Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 67,43 HB ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 56,42 HB ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 311,4 MPa ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 240 MPa ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 354,3 MPa ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 292,77 MPa ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %4,6 ile Numune 5 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %3,12 ile Numune 12 olduğu tespit edilmiştir.
- Bor ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 6,37 J ile Numune 7 olduğu tespit edilmiştir.

- Bor ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 5,33 J ile Numune 14 olduğu tespit edilmiştir.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 5 olduğu görülmüştür. Numune 5'in korozyon akım değerinin kokil kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.
- Kum kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 12 olduğu görülmüştür. Numune 12'in korozyon akım değerinin kum kalıba dökümü yapılmış olan bor ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.
- Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin sertlik değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ayrıca vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur.
- Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 65,04 HB ile Numune 18 olduğu tespit edilmiştir.
- Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek sertlik değerine sahip olanın 54,5 HB ile Numune 22 olduğu tespit edilmiştir.
- Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 270,47 MPa ile Numune 17 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.
- Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek akma dayanım değerine sahip olanın 228,77 MPa ile Numune 21 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin akma dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusu olmamıştır.
- Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 323,63 MPa ile Numune 18 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ayrıca vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur.

- Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek çekme dayanım değerine sahip olanın 278,82 MPa ile Numune 22 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin çekme dayanım değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir artış söz konusudur.

- Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %3,17 ile Numune 15 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda bor ilavesinin %uzama değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla ters orantılı bir artış söz konusudur.

- Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek %uzama değerine sahip olanın %2,94 ile Numune 19 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin %uzama değerlerini arttırdığı anlaşılmıştır, ancak vanadyum ilave miktarının artmasıyla ters orantılı bir artış söz konusudur.
- Vanadyum ilaveli kokil kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 5,02 J ile Numune 15 olduğu tespit edilmiştir. Numune 1'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin darbe enerji değerlerini düşürdüğü anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir azalış söz konusu olmuştur.
- Vanadyum ilaveli kum kalıba dökümü yapılmış numunelerden en yüksek darbe enerji değerine sahip olanın 4,72 J ile Numune 19 olduğu tespit edilmiştir. Numune 8'e göre kıyaslama yapıldığında farklı oranlarda vanadyum ilavesinin darbe enerji değerlerini düşürdüğü anlaşılmıştır, bunun yanı sıra vanadyum ilave miktarının artmasıyla doğru orantılı bir azalma söz konusu olmuştur.
- Kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 17 olduğu görülmüştür. Numune 17'nin korozyon akım değerinin kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.
- Kum kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numunelerin korozyon dayanımı en yüksek olanın Numune 21 olduğu görülmüştür. Numune 21'in korozyon akım

değerinin kokil kalıba dökümü yapılmış olan vanadyum ilaveli numuneler ile kıyaslandığında en düşük olduğu anlaşılmıştır.

- Nyquist eğrisinde de kapasitif lupların şekillerinin aynı iken çapları farklılık göstermektedir.
- Korozyon olayının aynı mekanizma üzerinden geliştiğini anlaşılmıştır.
- Korozyon direncinin ilave edilen stronsiyuma, bora ve vanadyuma bağlı olarak farklı olduğu kanıtlanmıştır.
- Korozyon direnci, ötektik faz oranıyla iyi bir uyum içindedir.

KAYNAKLAR

1. Chen, L., Myung, N., Sumodjo, P.T.A., Nobe, K., A comparative electrodissolution and localized corrosion study of 2024 Al in halide media. Electrochimica Acta, 1999. 44: p. 2751-2764.

2. Dymek, S., and Dollar, M., TEM investigation of age-hardenable Al2519 alloy αjected to stress corrosion cracking tests. Materials Chemistry and Physics, 2003. 81: p. 286-288.

3. Fuente, D.d.l., Otero-Huerta, E. and Morcillo, M., Studies of long-term weathering of aluminium in the atmosphere. Corrosion Science, 2007. 49: p. 3134-3148.

4. Guillaumin, V., and Mankowski, G., Localized corrosion of 2024 T351 aluminium alloy in chloride media. Corrosion Science, 1999. 41: p. 421-438.

5. Komisarov, V., Talianker, M., and Cina, B., The effect of retrogression and reaging on resistance to stress corrosion of an 8090 type aluminium alloy. Materials Science and Engineering, 1996. A 221: p. 113-121.

6. Liu, X.F., Filiform corrosion attack on pretreated aluminium alloy with tailored surface of epoxy coating. Corrosion Science, 2007. 49: p. 3494-3513.

7. Mishra, A.K., and Balasubramaniam, R., Corrosion inhibition of aluminium alloy AA2014 by rare earth chlorides. Corrosion Science, 2007. 49: p. 1027- 1044.

8. Moon, S.-M., Sakairi, M., and Takahashi, H., Behavior of second-phase particles in Al5052 alloy during anodizing in a sulfuric acid solution. Journal of Electrochemical Society, 2004. 151(7): p. B399-B405.

9. Páez, M.A., Foong, T.M., Ni, C.T., Thompson, G.E., Shimizu, K., Habazaki, H., Skeldon, P. and Wood, G.C., Barrier-type anodic film formation on an Al-3.5 wt% Cu alloy Corrosion Science, 1996. 38(1): p. 59-72.

10. Schafer, H., and Stock, H.R. and Improving the corrosion protection of aluminium alloys using reactive magnetron sputtering. Corrosion Science 2005. 49(4): p. 953-964.

11. Solomon, J.S., and Hanlin, D.E., AES and SEM characterization of anodised aluminium alloy adherends for adhesive bonding application. Applications Of Surface Science, 1980. 4: p. 307-323.

12. Zhou, W., Aung, N.N., Choudhary, A. and Kanouni, M. , Heat-transfer corrosion behaviour of cast Al alloy. Corrosion Science, 2008. 50: p. 3308- 3313.

13. Bakos, I., Szabó, S., Corrosion behaviour of aluminium in copper containing environment. Corrosion Science, 2008. 50: p. 200-205. 347

14. Wernick, S., Pinner, R., and Sheasby, P.G., The surface treatment and finishing of aluminium alloys. Vol. 1. 1989, Teddington: Finishing Publication Ltd.

15. Bridenbaugh, P.R. Aluminium - 2000 and beyond. in Aluminium Technology '86. 1986: Institute of metals.

16. Mizun, K., and Takagi, Y., Surface analysis of aluminium alloys for automotive body panels, in Nippon steel technical report. 1996. p. 13-21.

17. History Of Aluminum: facts and information on aluminum. 2006 [cited 2009 11/11/2009]; Available from: http://www.historyofaluminum.com/usage.php.

18. Berlanga-Labari, C., Biezma-Moraleda, M. V., & Rivero, P. J. (2020). Corrosion of cast aluminum alloys: a review. *Metals*, *10*(10), 1384.

19. Johanson, A. (2013). *Effect of vanadium on grain refinement of aluminium* (Master's thesis, Institutt for materialteknologi).

20. McCartney, D. G. (1989). Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. *International Materials Reviews*, *34*(1), 247-260.

21. ARSLAN, İ., GAVGALI, E., & ÇOLAK, M. Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve Al10Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, *7*(2), 237-244.

22. Sıgworth, G.K., Kuhn, T.A., “Refinement of Aluminium Casting Alloys”, AFS Transactions, Vol.115, pp.1-12, 2007.

23. Fan, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qın, T., Zhou, X.R., Thompson, G.E., Pennycook, T., Hashımoto, T., “Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system”, Acta Materialia 84, 292-304, 2015.

24. Wang, X., Lıu, Z., Daı, W., Han, Q., “On the Understanding of Aluminum Grain Refinement by Al-Ti-B Type Master Alloys, Metallurgical and Materials Transactions B”, DOI: 10.1007/s11663-014-0252-3, 2014.

25. Ibarra, D.G., “Control of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloys by Thermal Analysis”, Department of Mining and Metalurgical Enginering McGill University, Montreal Canada 1-38, 1999.

26. Lin, B., Li, H., Xu, R., Xiao, H., Zhang, W., & Li, S. (2019). Effects of Vanadium on Modification of Iron-Rich Intermetallics and Mechanical Properties in A356 Cast Alloys with 1.5 wt.% Fe. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *28*(1), 475-484.

27. Di Giovanni, M. T., Cerri, E., Casari, D., Merlin, M. A. T. T. I. A., Arnberg, L. A. R. S., & Garagnani, G. L. (2016). The influence of Ni and V trace elements on high-temperature tensile properties and aging of A356 aluminum foundry alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *47*(5), 2049-2057.

28. Casari, D., Ludwig, T. H., Merlin, M., Arnberg, L., & Garagnani, G. L. (2014). The effect of Ni and V trace elements on the mechanical properties of A356 aluminium foundry alloy in as-cast and T6 heat treated conditions. *Materials Science and Engineering: A*, *610*, 414-426.

29. Casari, D., Ludwig, T. H., Merlin, M., Arnberg, L., & Garagnani, G. L. (2015). Impact behavior of A356 foundry alloys in the presence of trace elements Ni and V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *24*(2), 894-908.

30. Ludwig, T. H., Schaffer, P. L., & Arnberg, L. (2013). Influence of some trace elements on solidification path and microstructure of Al-Si foundry alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *44*(8), 3783-3796.

31. Elhadari, H. A., Patel, H. A., Chen, D. L., & Kasprzak, W. (2011). Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(28), 8128-8138.

32. Wu, Y., Liao, H., & Zhou, K. (2014). Effect of minor addition of vanadium on mechanical properties and microstructures of as-extruded near eutectic Al–Si–Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, *602*, 41-48.

33. Dæhlen, E. S. (2013). *The Effect of Vanadium on AlFeSi-Intermetallic Phases in a Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloy* (Master's thesis, Institutt for materialteknologi).

34. Z. Chen, et al.Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B Acta Mater., 120 (2016), pp. 168-178

35. Wu, H. T., Wang, L. C., & Kung, S. K. (1981). Influence of grain refine master alloys addition on A 356 aluminum alloy. *J Chin. Foundryman's Assoc*, *29*, 18.

36. Sigworth, G. K. (1984). The grain refining of aluminum and phase relationships in the Al-Ti-B system. *Metallurgical Transactions A*, *15*(2), 277-282.

37. Sigworth, G. K., & Guzowski, M. M. (1987). Grain refining of hypoeutectic Al-Si alloys. *Giessereipraxis*, *5*, 51-58.

38. Tøndel, P. A., Halvorsen, G., & Arnberg, L. (1993). Light metals.

39. Nafisi, S., & Ghomashchi, R. (2007). Boron-based refiners: implications in conventional casting of Al–Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *452*, 445-453.

40. Birol, Y. (2012). AlB3 master alloy to grain refine AlSi10Mg and AlSi12Cu aluminium foundry alloys. *Journal of alloys and compounds*, *513*, 150-153.

41. Birol, Y. (2012). Performance of AlTi5B1, AlTi3B3 and AlB3 master alloys in refining grain structure of aluminium foundry alloys. *Materials Science and Technology*, *28*(4), 481-486.

42. Richards, J. W. (1890). *Aluminium: its history, occurrence, properties, metallurgy and applications, including its alloys*. HC Baird & Company.

43. Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy production and materials manufacturing*. CRC press.

44. Sheasby, P. G., Pinner, R., & Wernick, S. (2001). *The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys* (Vol. 1, p. 231). Materials Park, OH: ASM international.

45. George, F. (2011). *Chromium-free conversion coating of aluminium-copper alloys* (Doctoral dissertation, The University of Manchester (United Kingdom)).

46. Hind, A. R., Bhargava, S. K., & Grocott, S. C. (1999). The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, *146*(1-3), 359-374.

47. Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes* (Vol. 1). CRC press.

48. Embury, J. D. (1996). Strengthening mechanisms in Al alloys-an overview of natural limits and engineering possibilities. In *Materials Science Forum* (Vol. 217, pp. 57-70). Trans Tech Publications Ltd.

49. Moshier, W. C., Davis, G. D., & Ahearn, J. S. (1987). The corrosion and passivity of aluminum exposed to dilute sodium sulfate solutions. *Corrosion science*, *27*(8), 785-801.

50. Osório, W. R., Freire, C. M., & Garcia, A. (2005). The role of macrostructural morphology and grain size on the corrosion resistance of Zn and Al castings. *Materials Science and Engineering: A*, *402*(1-2), 22-32.

51. Donelan, P. (2000). Modelling microstructural and mechanical properties of ferritic ductile cast iron. *Materials Science and Technology*, *16*(3), 261-269.

52. Santos, C. A., Quaresma, J. M. V., & Garcia, A. (2001). Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. *Journal of Alloys and Compounds*, *319*(1-2), 174-186.

53. Osório, W. R., Santos, C. A., Quaresma, J. M. V., & Garcia, A. (2003). Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure of Zn–Al castings. *Journal of Materials Processing Technology*, *143*, 703-709.

54. Siqueira, C. A., Cheung, N., & Garcia, A. (2002). Solidification thermal parameters affecting the columnar-to-equiaxed transition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *33*, 2107-2118.

55. Kurzydłowski, K. J., Ralph, B., Bucki, J. J., & Garbacz, A. (1996). The grain boundary character distribution effect on the flow stress of polycrystals: The influence of crystal lattice texture. *Materials Science and Engineering: A*, *205*(1-2), 127-132.

56. Quaresma, J. M., Santos, C. A., & Garcia, A. (2000). Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings, and mechanical properties of Al-Cu alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *31*, 3167-3178.

57. Hall, E. 0. (2012). *Yield point phenomena in metals and alloys*. Springer Science & Business Media.

58. Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, *64*(9), 747.

59. Henry, S., Minghetti, T., & Rappaz, M. (1998). Dendrite growth morphologies in aluminium alloys. *Acta Materialia*, *46*(18), 6431-6443.

60. Filip, R., Kubiak, K., Ziaja, W., & Sieniawski, J. (2003). The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, *133*(1-2), 84-89.

61. Kahraman, B. (2009). *Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi* (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

62. Dalquist, S., & Gutowski, T. (2004). Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: die casting. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*.

63. Mondolfo, L. F. (1976). Aluminum alloys. Structure and properties. Butterworth and Co. London-Boston.

64. Fayomi, Ojo Sunday Isaac & Popoola, Patricia & Udoye, Nduka. (2017). Effect of Alloying Element on the Integrity and Functionality of Aluminium-Based Alloy. 10.5772/intechopen.71399.

65. Lu S-Z, Hellawell A. Modification of Al-Si alloys: Microstructure, thermal analysis and mechanics. JOM. 1995;47(2):38-40

66. Polmear, I. (2005). *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. Elsevier.

67. Kılıç, Ö., Acar, S., & Güler, K. A., (2019). *The effect of orbital shaking on the microstructure of lost foam cast A356 aluminum alloy* . 9th International Aluminium Symposium (pp.256-260). İstanbul, Turkey

68. Yapıcı, C. (2012). *Alti5b1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

69. Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. Asm International

70. Shabestari, S. G., & Moemeni, H. (2004). Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, *153*, 193-198.

71. Sigworth, G. K., & Kuhn, T. A. (2007). Grain refinement of aluminum casting alloys. *International Journal of Metalcasting*, *1*(1), 31-40

72. Lu, H. T., Wang, L. C., & Kung, S. K. (1981). Grain refining in A356 alloys. *J. Chin. Foundrym. Assoc*, *29*, 10-18.

73. Sigworth, G. K., & Guzowski, M. M. (1993). *U.S. Patent No. 5,180,447*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office

74. Nogita, K., McDonald, S. D., & Dahle, A. K. (2003). Effects of boron-strontium interactions on eutectic modification in Al-10 mass% Si alloys. *Materials Transactions*, *44*(4), 692-695

75. Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. Asm International.

76. Twite, R. L., & Bierwagen, G. P. (1998). Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys. *Progress in organic coatings*, *33*(2), 91-100.

77. Sinyavskii, V. S., Ulanova, V. V., & Kalinin, V. D. (2004). On the mechanism of intergranular corrosion of aluminum alloys. *Protection of metals*, *40*, 481-490.

78. PE, P. A. S. (2009). Fundamentals of corrosion: Mechanisms, causes, and preventative methods.

79. Gümüş, M. (2007). *Alüminyum yüzeyler için antikorozif boya ve kaplama şekillerinin geliştirilmesi ve kaplama altı korozyon davranışlarının elektrokimyasal yoldan incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).

80.https://www.gamry.com/application-notes/corrosion-coatings/basics-of-electrochemical-corrosion-measurements/ [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2023]

81. https://www.gamry.com/assets/Uploads/Echem-Corrosion-Measurement.pdf [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2023]

82.https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/ [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2023]

83. https://www.gamry.com/application-notes/EIS/potentiostatic-eis-tutorial/ [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2023]

84. Kuznetsov, V., Maljusch, A., Souto, M.R., Bandarenka, A.S. and Schuhmann, W., 2014: Characterisation of localised corrosion processes using scanning electrochemical impedance microscopy, Electrochemistry Communications, 44, p. 38-41.

85. Acar, H. Y. *Panı/ceo2 nanokompozit Kaplamalar İle Karbon Çelik Ve Alüminyum Metallerinin Korozyonunun Önlenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

86. Kocaman, E., & Şirin, S. (2023). Effect of Al5Ti1B Grain Refiner and Al10Sr Modifier on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of A360 Alloy. International Journal of Automotive Science And Technology, 7(1), 30-36.

87. Wang SR, Ma R, Wang YZ, Wang Y, Yang LY. Growth mechanism of primary silicon in cast hypoeutectic Al-Si alloys. Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed 2012;22:1264–9.)

88. Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (1985). Corrosion and corrosion control.

89. Hekimoğlu, A. P., Çalış, M., & Ayata, G. Stronsiyum ve Stronsiyum-Magnezyum katkılarının Al-9Si Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi.

90. Kosgey BK, Maranga SM, Kihiu JM, Ando Y. Investigation on Hardness of Gravity Die Cast Secondary Al-10Si Piston Alloy with Trace Addition of Sr , Fe and Mn 2014;1:51–6.

91. Fan B, Mo J, Zhang J, Shen H, Liu R. Effect of Sr Modifier on Microstructure and Mechanical Properties of ZL102 Casting Suspension Clamp. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2020;525:1–6.

92. Bayar, H., Subasi, M., & Karatas, C. (2015). SiC Takviyeli Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit Malzemenin Yüksek Basınçlı Kalıp Dökümü ve Mekanik Özellikleri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, *3*(4), 603-612.

93. Rheinfeldeng Alloys GmbH & Co. KG. *Handbuch Primary Aluminium Casting Alloys*; Rheinfeldeng Alloys GmbH & Co. KG: Rheinfelden, Germany, 2010.

94. Aran, Ahmet. "Döküm teknolojisi imal usulleri ders notları." *İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul* (2007).

95. Gursoy, O., Colak, M., Tur, K., & Dispinar, D. (2021). Characterization of properties of Vanadium, Boron and Strontium addition on HPDC of A360 alloy. *Materials Chemistry and Physics*, *271*, 124931.

96. Kalkan, İ.H., 2023, *Stronsiyum modifikasyonunun AlSi9 alaşımında mikroyapı değişiminin istatistiksel olarak incelenmesi ve korozyon karakterizasyonunun belirlenmesi*, Doktora, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

97. Closset, B., Gruzleski, J.E., 1982, Structure and properties of hypoeutectic Al-Si-Mg alloys modified with pure strontium, Metallurgical Transactions A, 13, 945–951.

98. Zhang, W., Ma, S., Wei, Z., Bai, P., 2019, The Relationship between Residual Amount of Sr and Morphology of Eutectic Si Phase in A356 Alloy, Materials 2019, Vol. 12, Page 3222, 12, 3222.

99. Zhang, J., Pang, Z., Sun, C., Liu, N., Chen, H., 2020, Effect of strontium modification on the morphology of primary si in hypereutectic Al-Si alloys, Materials Science Forum, 993 MSF, 12–21.

100. Fortini, A., Lattanzi, L., Merlin, M., Garagnani, G.L., 2018, Comprehensive Evaluation of Modification Level Assessment in Sr-Modified Aluminium Alloys, International Journal of Metalcasting, 12, 697–711.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



Eda Ergün Songül Doktora Tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

%16	%14	%4	%8
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%5
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
3	openscience.ub.uni-mainz.de İnternet Kaynağı	%1
4	d-scholarship.pitt.edu İnternet Kaynağı	%1
5	earsiv.kastamonu.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	%1
6	Submitted to Imperial College of Science, Technology and Medicine Öğrenci Ödevi	%1
7	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	Submitted to Eskisehir Osmangazi University Öğrenci Ödevi	<%1
9	pdffox.com	