

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

6XXX SERİSİ ALÜMİNYUM DÖVME ALAŞIMLARININ
YAŞLANMA PARAMETRELERİNİN KOROZYON DAVRANIŞINA
ETKİSİ

Murat DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Programı

Danışman
Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**6XXX SERİSİ ALÜMİNYUM DÖVME ALAŞIMLARININ YAŞLANMA
PARAMETRELERİNİN KOROZYON DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Murat DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 09/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alptekin KISASÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Gökhan ÖZER, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan 6xxx Serisi Alüminyum Dövme Alaşımlarının Yaşlanma Parametrelerinin Korozyon Davranışına Etkisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Murat DOĞAN

İmza

Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama süresince bana her türlü desteği sağlayan, mühendislik bakış açısı ile sorunları çözmeme yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER'e ve Arş. Gör. Serhat ACAR'a teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda mezun olduğum günden bu yana mühendislik yaklaşımları ile bana destek olan Kubilay ÖZTÜRK'e, başta yöneticilerim Akın OBALI, Ayşe OBALI ve Gökçen GÖKÇE olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma, desteklerini her zaman hissettiğim başta kardeşim Zeynep DOĞAN olmak üzere bütün aileme, tez yazım sürecinde her zaman motivasyonumu yüksek tutan çok değer verdiğim sevgili Aysel AKIN'a teşekkürü borç bilirim. Deneyler için her türlü imkânı sağlayan Arslan Alüminyum ailesinden Cenk Arslan, Pelin Arslan, Pınar Arslan ve Uğur DOMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Murat DOĞAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez.....	9
2 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	10
2.1 Alüminyum Tarihçesi	10
2.2 Alüminyum Üretimi.....	11
2.2.1 Birincil Alüminyum Üretimi	12
2.2.2 İkincil Alüminyum Üretimi	15
2.3 Alüminyumun Özellikleri ve Tercih Sebepleri.....	16
2.3.1 Hafiflik	17
2.3.2 İletkenlik	18
2.3.3 Korozyon.....	18
2.3.4 Şekillendirme	19
2.3.5 Geri Dönüşüm	19
2.3.6 Yansıma	20
2.3.7 Mukavemet/Ağırlık Oranı	20
2.3.8 Esneklik.....	20
2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	20
2.4.1 Dövme Alüminyum Alaşımları.....	22
2.4.2 Döküm Alüminyum Alaşımları	25
2.5 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı.....	25
2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Karakteristiği	25
2.5.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyon Çeşitleri.....	27

2.6 Çökelme Sertleşmesi.....	32
2.6.1 Çözeltiye Alma Isıl İşlemi	32
2.6.2 Isıl İşlem Kondisyonları	32
2.6.3 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme	34
2.6.4 Yaşlandırma	34
2.7 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	35
2.7.1 Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum Üretimi.....	35
2.7.2 Alüminyum Kullanım Alanları	35
3 ALÜMİNYUM SÜREKLİ DÖKÜM	40
3.1 Alüminyum Döküm Yöntemleri	40
3.1.1 Sürekli ve Yarı-Sürekli DC Döküm Yöntemi.....	41
3.1.2 Sürekli Levha Dökümü	42
3.2 Metal Ergitme ve Rafinasyonu	46
3.3 Yarı Sürekli Döküm Teknolojisi (D.C. Döküm)	47
3.3.1 Düşey Yarı-Sürekli Alüminyum Biyet DC Döküm Yöntemi.....	50
3.3.2 Yatay Sürekli Alüminyum Biyet DC Döküm Yöntemi	52
3.3.3 Alüminyum Biyet DC Döküm Değişkenleri	52
3.4 Biyet Dökümü Sonrası Isıl İşlemler	54
3.4.1 Homojenizasyon Isıl İşlemi.....	54
3.4.2 Çözeltiye Alma	55
3.4.3 Çökeltme Sertleşmesi	56
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
4.1 Deneyisel Çalışmalar	58
4.1.1 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	58
4.2 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Ekipmanlar.....	59
4.2.1 Dökümde Kullanılan Ekipmanlar	59
4.2.2 Thermo Scientific ARL 3460 Optik Emisyon Spektrometresi	60
4.2.3 Homojenizasyon Fırını	60
4.3 Deneyisel Çalışmalar	61
4.3.1 Döküm	61
4.3.2 Isıl İşlem.....	63
4.3.3 Brinell Sertlik Testi.....	64
4.3.4 Metalografik İnceleme.....	64
4.3.5 Korozyon Testleri	64

5 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
5.1 Deneyisel Analizlerin Sonuçları	67
5.1.1 Sertlik Deneyleri Analiz Sonuçları	67
5.1.2 Mikroyapı Deneyleri Analiz Sonuçları	69
5.1.3 TAFEL Eğrileri	81
5.1.3 Kütle Kaybı Analiz Sonuçları	89
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
KAYNAKÇA	93
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	98

SİMGE LİSTESİ

α -AlFeSi	Alfa Alüminyum Demir Silisyum İntermetaliği
AlF ₃	Alüminyum Florür
pH	Asitlik Derecesi
Cu	Bakır
β -AlFeSi	Beta Alüminyum Demir Silisyum İntermetaliği
Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Boehmit
Zn	Çinko
Fe	Demir
Al ₂ O ₃ -3H ₂ O	Gibsit
Ag/AgCl	Gümüş /Gümüş Klorür Referans Elektrod
CaF ₂	Kalsiyum Florid
CO ₂	Karbon Dioksit
Kg	Kilogram
Na ₃ AlF ₆	Kriyolit
Cr	Krom
Mg	Magnezyum
Mg ₂ Si	Magnezyum Silisit
Mn	Manganez
μ	Mikron
mg/cm ² /gün	Miligram/Santimetre Kare/Gün
mm	Milimetre
mV	Milivolt
mV/s	Milivolt/saniye tarama hızı
V _{SCE}	Referans Elektrot Potansiyeli
°C	Santigrat Derece
cm ²	Santimetre Kare
Si	Silisyum
NaCl	Sodyum Klorür
Ti	Titanyum
g/cm ³	Yoğunluk
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

OCP	Açık Devre Potansiyeli (Open Circuit Potential)
DC	Ani Soğutma (Direct Chill)
OA	Aşırı yaşlanmış (Over-Aged)
UA	Az yaşlanmış (Under-Aged)
kT	Bin Ton
BAE	Birleşik Arap Emirlikleri
NA	Doğal yaşlanmış (Naturally-Aged)
AC	Döküm (As-Cast)
HÖ	Homojen Öncesi
HS	Homojen Sonrası
PA	Pik yaşlanmış (Peak-Aged)
X-Ray	X ışını

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yıllara göre birincil alüminyum üretimi.....	11
Şekil 2.2 Hall-Heroult hücreleri.....	12
Şekil 2.3 Boksitten alüminyum üretimi akış diagramı.....	13
Şekil 2.4 Prebaked tipli anot ile alüminyum elde edilmesi.....	14
Şekil 2.5 Otomobilde malzeme dağılımı, %	18
Şekil 2.6 Alüminyum serileri ve ana alaşım elementleri	22
Şekil 2.7 Alüminyum oksit filmi	27
Şekil 2.8 Alüminyum ve alaşımlarının korozyon çeşitleri.....	28
Şekil 2.9 İçyapıdaki intergranül taneler arası ve çukurcuk korozyonunun görünümü	29
Şekil 2.10 Gerilmeli Korozyon	30
Şekil 2.11 Alüminyum metalinin bakır karsısında galvanik korozyona uğraması	31
Şekil 3.1 Geleneksel düşey DC döküm	41
Şekil 3.2 Tek merdaneli döküm.....	43
Şekil 3.3 Hazelett döküm	44
Şekil 3.4 Blok döküm prensibi	44
Şekil 3.5 İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemindeki katılaşma bölgesinin kesiti	45
Şekil 3.6 Direkt soğutmalı döküm sistemi yerleşimi.....	47
Şekil 3.7 Junghans tarafından geliştirilen alüminyum biyet dökümü.....	48
Şekil 3.8 Wagstaff düşey sürekli döküm makinesi.....	51
Şekil 3.9 Wagstaff Airslip döküm kalıbı	54
Şekil 3.10 AA 6063 için sırasıyla döküm sonrası (a) ve homojenizasyon sonrası (b) mikro yapı resimleri	55
Şekil 3.11 Yaşlanma adımlarındaki sıcaklık ve çözünme yüzdeleri.....	57
Şekil 4.1 Ergitme fırınına hurda profil şarjı.....	59
Şekil 4.2 Ergitme fırınının döküm için devrilmesi	60
Şekil 4.3 Homojenizasyon fırını.....	61
Şekil 4.4 Tabla üstünde kalıplara dağılan sıvı metal	62
Şekil 4.5 Döküm sonlandıktan sonra Wagstaff döküm kuyusundan çıkarılan biyetler	63
Şekil 4.6 Korozyon testi çalışma elektrodu numunelerinin iletkenlik ölçümü.....	65

Şekil 4.7 Korozyon test cihazı (Ivium Compactstat).....	65
Şekil 4.8 %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma korozyon testi	66
Şekil 5.1 6061 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri	72
Şekil 5.2 6061 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	73
Şekil 5.3 6082 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri	74
Şekil 5.4 6082 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	75
Şekil 5.5 6063 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri	76
Şekil 5.6 6063 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	77
Şekil 5.7 6005-A döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	78
Şekil 5.8 6005-A 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri	79
Şekil 5.9 6061 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (siyah), 24 saat (kırmızı), döküm (gri), homojen sonrası (mavi)	82
Şekil 5.10 6061 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (siyah), 24 saat (kırmızı), doğal (mavi).....	82
Şekil 5.11 6082 TAFEL eğrileri; 4 saat (mavi), 8 saat (yeşil), 24 saat (gri), döküm (siyah), homojen sonrası (kırmızı).....	84
Şekil 5.12 6082 TAFEL eğrileri; 4 saat (siyah), 8 saat (kırmızı), 24 saat (yeşil), doğal (mavi)	84
Şekil 5.13 6063 TAFEL eğrileri; 4 saat (kırmızı), 8 saat (siyah), 24 saat (yeşil), döküm (mavi), homojen sonrası (gri)	85
Şekil 5.14 6063 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (mavi), 24 saat (siyah), doğal (kırmızı)	86
Şekil 5.15 6005-A TAFEL eğrileri; 4 saat (gri), 8 saat (mavi), 24 saat (siyah), döküm (yeşil), homojen sonrası (kırmızı).....	87
Şekil 5.16 6005-A TAFEL eğrileri; 4 saat (siyah), 8 saat (mavi), 24 saat (yeşil), doğal (kırmızı)	87

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Hurdaların değerlendirilmesinde geri kazanım oranları	16
Tablo 2.2	Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi	21
Tablo 2.3	Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlem ve üretim koşulları.....	33
Tablo 2.4	Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemleri.....	34
Tablo 2.5	Sektöre göre alüminyum tüketimi tahmini (2014-2025) (bin ton)	36
Tablo 3.1	Alüminyum alaşımlarının likidüs ve döküm sıcaklıkları.....	52
Tablo 4.1	Deneylerde kullanılan 6xxx alaşımların kimyasal kompozisyonları	58
Tablo 5.1	Homojenizasyon öncesi (döküm) ve homojen sonrası sertlik değerleri.....	67
Tablo 5.2	6061 ve 6082 alaşımlarına ait 4 saat, 8 saat, 24 saat ve doğal yaşlanmış numune sertlikleri	68
Tablo 5.3	6063 ve 6005-A alaşımlarına ait 4 saat, 8 saat, 24 saat ve doğal yaşlanmış numune sertlikleri	68
Tablo 5.4	Alaşıma ve yaşlandırma koşullarına göre korozyon modu.....	80
Tablo 5.5	Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı	88
Tablo 5.6	Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı	89

6xxx Serisi Alüminyum Dövme Alaşımlarının Yaşlanma Parametrelerinin Korozyon Davranışına Etkisi

Murat DOĞAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan 4 farklı 6xxx serisi alaşımın farklı yaşlandırma koşullarında göstermiş olduğu korozyon davranışlarının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Dövme alaşımı olan 6xxx serisi alaşım ürünleri, bu proses için hammadde üretiminde yaygın olarak kullanılan doğrudan soğutmalı (direct-chill) döküm yöntemi ile elde edilmiştir. Bu serinin ana alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Farklı elementsel kompozisyon aralıklarına sahip olan 6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımları bu araştırmada incelenmiştir. Çalışma kapsamında doğrudan soğutmalı döküm sonrası homojenizasyon işlemine tabi tutulan dövme hammaddesi malzemelere çökeltme sertleşmesi gerçekleştirilebilmesi için çözeltiye alma ısı işlemi uygulanmıştır. 550 °C'de 2 saat boyunca çözeltiye alınmış numuneler 180 °C'de 4 saat, 8 saat ve 24 saat olmak üzere 3 farklı süre ve koşulda yaşlandırılmıştır. Oda sıcaklığında yaşlandırmaya bırakılan çözeltiye alınmış numune doğal olarak yaşlandırılmış koşulda incelenmiştir. Yaşlandırma koşullarının korozyona etkisini incelemek amacıyla numunelere oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi içinde

potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen TAFEL eğrileri kullanılarak yaşlandırma koşullarının kantitatif olarak karşılaştırılabileceği korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akımı (I_{corr}) değerleri hesaplanmıştır. Pik yaşlanmış koşulun karşılaştırılabilmesi için numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik yöntemiyle elde edilmiştir. Korozyon testleri sonrasında numunelerin göstermiş olduğu baskın korozyon modu ve şiddetinin incelenmesi amacıyla metalografik incelemeler görüntü analiz destekli optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kütle kaybı testlerinde en yüksek kütle kaybı 6005-A alaşımında elde edilmiştir. Kütle kaybı testlerinde en yüksek korozyon dayanımı ise 6082 alaşımının doğal yaşlandırılmış koşulunda elde edilmiştir. 6082 8 saat pik yaşlandırılmış numunesinin korozyon davranışı TAFEL eğrilerinden elde edilen sonuçlar ile diğer alaşımlar ve yaşlandırma koşulları ile kıyaslandığında korozyonun görece geç başladığı aynı zamanda düşük i_{corr} değeri sayesinde korozyonun çok yavaş devam ettiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum dövme alaşımları, yaşlanma parametreleri, korozyon

Effect of Aging Parameters of 6xxx Series Aluminium Wrought Alloys on Corrosion Behavior

Murat DOĞAN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

In this study, studies were carried out to investigate the corrosion behavior of 4 different 6xxx series alloys, which are widely used in the industry, under different aging conditions. 6xxx series alloy products, which are wrought alloys, were obtained by the direct chill casting method, which is widely used in the production of semi product for this process. The main alloying elements of this series are magnesium and silicon. 6061, 6082, 6063 and 6005-A alloys with different elemental composition ranges were investigated in this research. Within the scope of the study, solution heat treatment is applied to the wrought semi products, which are subjected to homogenization after Direct Chill casting, in order to achieve precipitation hardening. The samples which is solution heat treated in 550 °C during 2h were aged at 180 °C for 3 different conditions as 4 hours, 8 hours and 24 hours. The solution heat treated sample, which was left to age at room temperature, was examined in the naturally aged condition. In order to investigation the effect of aging conditions to corrosion behaviour, the potentiodynamic polarization test was measured on the samples in 3.5% NaCl

solution at room temperature. By using the TAFEL curves obtained as a result of these tests, the corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current (I_{corr}) values with which the aging conditions can be compared quantitatively were calculated. In order to compare the peak aged condition, the hardness values of the samples were obtained by Brinell hardness method. In order to examine the dominant corrosion mode and severity of the samples after the corrosion tests, metallographic examinations were carried out under an image analysis supported optical microscope. In the mass loss tests performed in 3.5% NaCl solution, the highest mass loss was obtained in 6005-A alloy. In the mass loss tests, the highest corrosion resistance was obtained in the naturally aged condition of 6082 alloy. Corrosion behavior of 6082 8 hours peak aged sample compared to the results obtained from TAFEL curves and other alloys and aging conditions, it was observed that the corrosion started relatively late and the corrosion continued very slowly thanks to the low i_{corr} value.

Keywords: Aluminum wrought alloys, aging parameters, corrosion

1.1 Literatür Özeti

Çalışmamızın bu bölümünde literatür çalışmalarına yer verilmektedir.

Alüminyum, 19. yüzyılın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik açıdan kritik bir malzeme haline gelmiştir. Alüminyumun daha önce kullanılamamasının nedeni, alüminyum cevherden üretiminin zorluğundan kaynaklanmıştır. Ergimiş kriyolitte çözünmüş alüminyum oksidin (Al_2O_3) elektrolitik indirgenmesi, Amerika Birleşik Devletleri'nde Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul T. Heroult tarafından birbirlerinden bağımsız olarak geliştirildikten sonra alüminyum endüstrisi doğmuştur. Alüminyumun benzersiz nitelikleriyle tutarlı malzeme özellikleri sayesinde üretimi ve kullanımındaki büyümeye üç önemli endüstriyel gelişmenin ortaya çıkması, büyük fayda sağlamıştır. Bunlardan ilki, içten yanmalı motorla çalışan ilk araçların piyasaya sürülmesi olmuştur. Alüminyum, mühendislik değeri artan bir otomotiv malzemesi olarak rol oynamıştır. İkincisi, uzun mesafeli iletim için ve elektrik üretim alanlarından elektrik enerjisi sağlayan havai kablo ağını desteklemek için gereken kulelerin inşası için çok büyük miktarlarda hafif iletken metal gerekliliği yer almıştır. Birkaç on yıl içinde, Wright kardeşlerin uçağı icat etmesiyle üçüncü bir önemli uygulama alanı ortaya çıkmıştır. Bu, uçak gövdeleri, motorlar ve nihayetinde füze gövdeleri, yakıt hücreleri ve uydu bileşenleri için yapısal olarak güvenilir, güçlü ve kırılmaya dayanıklı parçaların geliştirilmesiyle alüminyum endüstrisi ile ortaklaşa büyüyen tamamen yeni bir endüstriyi doğurmuştur. Ancak alüminyum sektörünün büyümesi bu gelişmelerle sınırlı kalmamıştır. Alüminyumun ilk ticari uygulamaları ayna çerçeveleri, ev numaraları ve servis tepsileri gibi yenilik öğelerini içermiştir. Yemek pişirme kapları da erken dönemde önemli bir pazarı oluşturmuştur. Zamanla, alüminyum uygulamaları, modern yaşamın hemen hemen her yönünün kullanımdan doğrudan veya dolaylı olarak etkileneceği ölçüde çeşitlenmiştir.

Bugün alüminyum, yapısal bir malzeme olarak kullanımında yalnızca çelik tarafından geride bırakılmıştır [1].

Alüminyum çelikten sonra en çok kullanılan ikinci, demir dışı metaller kategorisinde ise birinci sırada en çok kullanılan metaldir. Çeliğin yaklaşık üçte bir ağırlığına sahip olan alüminyum 2.7 g/cm^3 olan yoğunluğu ile literatürde hafif metal olarak bilinmektedir. Yüksek özgül dayanıma sahip olmasından kaynaklı olarak alüminyum özellikle yüksek hızlı trenler, tekneler, uçaklar ve otomobil gövde panelleri gibi ulaşım alanında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasındadır. Hafiflik dışında alüminyum yüksek elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik, şekil alma kabiliyeti ve korozyon dayanımına sahiptir. 4 ile 9 pH aralığında kararlı olan oksit filmi sayesinde alüminyum korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Alüminyum yüzeyi atmosfere maruz kaldığı anda ince, görünmez bir oksit filmi kısa sürede oluşur ve bu yüzeye kimyasal olarak bağlı oksit filmi sayesinde kendini daha fazla oksidasyondan koruyabilir [2].

6061 ve 6013 levha malzemenin mikroyapısı ve korozyon davranışı doğal ve pik yaşlandırılmış ısıt işlemlerinde incelenmiştir. Transmisyon elektron mikroskobu ile yapılan incelemede doğal olarak yaşlanmış numunede sertleştirme fazları ortaya çıkarmadığı gözlemlenmiştir. Pik yaşı temperde, 6061 alaşımında β " çökeltiler gözlenmişken, 6013-T6 levha numunesinde hem β " hem de q' fazları oluşmuştur. Belirgin tane sınırı çökmesi gözlemlenmemiş olup, Alaşımların korozyon potansiyelleri 6061 ve 6013, artan yaşlandırma ile daha aktif değerlere kaydığı görülmüştür. 6013 levha içeriğinde bulunan bakır için T4 ve T6 temperleri arasındaki potansiyel fark daha belirgin olmuştur. Sulu bir klorür-peroksit çözeltisine daldırıldığında, 6061 alaşımı, sırasıyla T4 ve T6 temperlerinde ağırlıklı olarak taneler arası korozyona ve çukurlaşmaya maruz kalmıştır. Aksine, 6013 levha, doğal olarak yaşlandırılmış durumda çukurlaşmaya karşı hassas olduğu ve en yüksek yaşlandırılmış malzemede hâkim saldırı olarak taneler arası korozyon gözlemlenmiştir. 6061 ve 6013 alaşımlarının her ikisi de T4 ve T6 temperlerinde gerilimli korozyon çatlağına dirençli olduğu tespit edilmiştir [3].

6061 ve 6013 levha malzemelerinin gerilimli korozyon çatlağı davranışı, doğal yaşlanmış ve pik yaşlanmış ısıt işlemlerinde incelenmiştir. 0,6 M NaCl ve 0,6

M NaCl + 0,06 M NaHCO₃'ün sulu çözeltileri kullanılarak sabit deformasyon, sabit yük ve sabit uzama hızı testleri gerçekleştirilmiştir. Alaşımların mikro yapısı transmisyon elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Korozyon potansiyellerini belirlemek için havalandırılmış ve havası alınmış sulu klorür ve/veya bikarbonat çözeltilerinde potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri yapılmıştır. Sabit deformasyon ve sabit yük koşulları altında, enine yönde gerilmiş 6061 ve 6013 alaşımları hem T4 hem de T6 temperlerinde gerilimli korozyon çatlağına karşı dirençli olduğu tespit edilmiştir. Sabit uzama oranı test tekniği, 6061-T4 alaşımında çevre kaynaklı çatlamayı gösterirken, diğer alaşımların sünekliğindeki bozulmaya çukurlaşma ve taneler arası korozyon neden olduğu görülmüştür. Taneler arası korozyona karşı hassasiyet 6013-T6 levhada gerilimli korozyon çatlamasına neden olmamıştır [4].

Farklı Mg/Si oranlarına ve Cu içeriklerine sahip özel olarak hazırlanmış 6xxx serisi alüminyum alaşımları (Al-Mg-Si) doğal yaşlandırma, yetersiz yaşlandırma, pik yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma koşullarında incelenmiştir. Genel anlamda bu tür alaşımların korozyon davranışını araştırmak için potansiyodinamik polarizasyon ve 0,1 M NaCl'de daldırma testi kullanılmıştır. Sonuçlar, korozyon hızı ve morfolojisinin yaşlanma koşullarına ve çözünen madde içeriğine önemli bir bağımlılığı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum 6xxx serisi alaşım korozyonunun daha geniş bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Korozyon oranının doğal olarak yaşlanmış durumda en düşük olduğunu ve esas olarak Cu ve ardından Mg/Si oranı ile ilgili olduğu görülmüştür. Cu ve Zn açısından zengin yüksek mukavemetli alaşımlar ile kıyaslandığında 6xxx serisi alaşımlar genel olarak iyi korozyon dayanımına sahiptir. Literatürde orta sert olarak adlandırılan 6xxx serisi alaşımlar Mg₂Si çökeltisi sayesinde yaşlandırılarak 5xxx serisi alaşımlardan daha mukavemetli fakat 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlardan daha düşük mukavemete sahiptir. Mg₂Si çökeltisi alüminyum matrisi ile kıyaslandığı zaman yaklaşık - 1.2 V_{SCE} açık devre potansiyeli daha aktif olduğu görülmektedir. Bu durum yaşlanmanın bir fonksiyonu olarak çökeltilerin oluşumu ve dağılımının korozyon davranışını etkilediğini göstermektedir. Alaşımın kimyasal kompozisyonundaki Mg ve Si içerikleri ve Mg/Si oranının korozyon davranışı üzerindeki etkileri Cu içeriğinden kaynaklanan etki ile kıyaslandığında

nispeten daha küçüktür çünkü Cu ilavesinin alaşımların korozyonu üzerinde olumsuz bir etkisi vardır ve korozyon duyarlılığına esas olarak Cu içeriği hakimdir [5].

Shaw ve arkadaşları, 0,05 M HCl çözeltisi içinde $-300 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ 'da bakır içeren AA 6xxx alaşımlarının anodik polarizasyonu, tane sınırlarında önemli miktarda hidrojen gazı oluşumu ile taneler arası korozyona neden olmuştur. AA 6xxx alaşımındaki düşük bakır içeriğiyle korozyon, alaşımın muhtemelen mikro yapıdaki Mg_2Si çökeltilerinden kaynaklı olarak önemli intragranüler (taneler içi çukurlaşma) korozyon olarak görülmüştür. Kompozisyon içeriğinde artan bakır ile intragranüler korozyon azalmış olup, taneler arası korozyon derecesi artmıştır. Taneler arası korozyonun, alaşımın 1-2 mm içine nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Klorür içeren ortamlara maruz kalan bakır içeren AA 6xxx alaşımları için açık devre koşullarında taneler arası korozyon kaydedilmiştir; ancak penetrasyon derinlikleri çok daha düşük bulunmuş [6].

Alüminyum alaşımlarının homojenleştirilmesi, dökümden sonra gerçekleştirilen bir yüksek sıcaklık (450-600 °C) ısıtılması işlemidir. Homojenizasyon ısıtılması işlemi üç ayrı aşamadan oluşmuştur; ısıtma, tutma ve soğuma. Homojenleştirmenin metalurjik önemi, alüminyum biyetlerin sonraki plastik deformasyon süreçlerindeki özelliklerine vurgu yapılarak, ele alınması gerekmektedir. Sürekli tip biyet homojenizasyonu, prosesin sıcaklık farklarını önemli ölçüde iyileştirerek tutma süresinin en aza indirilmesini sağlamıştır. Ancak yığılma tipi homojenleştirme, farklı seri alüminyum alaşımları için uygulamalarda esneklik sağlamaktadır. Yumuşak 6060 ve 6063 alaşımları, 6061 ve 6082 gibi daha sert alaşımlara kıyasla daha yüksek bir tutma sıcaklığına sahiptirler. Homojenizasyon sonrası soğutma hızı, son mekanik özellikleri etkilemenin yanı sıra ekstrüzyon işlemi sırasında kütüğün davranışını da etkileyebilmektedir. Homojenleştirmenin bir sonucu olarak meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin anlaşılması, biyet döküm işleminin daha kontrollü olma gereksinimini ortaya çıkarmıştır [7].

Ezuber ve arkadaşları, deniz suyunda 23 ve 60°C'de AA 5083 ve AA 1100 alüminyum alaşımlarını test etmiştir. Polarizasyon grafikleri, alaşımların çukurlaşma saldırısına maruz kaldığını göstermiştir. Her iki alaşımında korozyon

potansiyeli, test sıcaklığındaki artışla azalmıştır. Ağırlık kaybı testleri, her iki alaşım için de düşük korozyon oranı değerleri ortaya çıkarmıştır ve bu alaşımların deniz suyu ortamlarında faydalı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Alüminyum alaşımlarındaki çukur morfolojisi, AA 5083 alaşımında yarım küre şeklinde izole edilmiş daha derin çukurlar gösterirken, AA 1100 alaşımı numuneler daha fazla sayıda sığ çukur ortaya çıkarmıştır. Sonuçlar, alüminyum alaşımındaki intermetalik parçacıkların türünün, çukur morfolojisinde ve deniz suyunda pasiflik bozulmasında önemli bir rol oynadığını göstermiştir [8].

Korozyon ile ilgili olarak, alüminyum alaşımlarının üniform korozyonunun rolü geçmişte her zaman hesaba katılmamıştır. 2024-T3, 6061-T6 ve 7075-T6 alüminyum alaşımları üzerindeki homojen korozyonun etkisi, öneminin nicel kanıtı için bu çalışmada incelenmiştir. Optik profilometri (OP) ile birleştirilen ön ağırlık kaybı deneyleri, tekdüze korozyona atfedilen korozyonun, lokalize korozyonla karşılaştırıldığında çok önemli olduğunu göstermiştir. Sıcaklık (20, 40, 60, 80°C), başlangıç pH'ı (3, 5, 8, 10) ve klorür konsantrasyonu (0,01, 0,1, 1M) gibi çevresel değişkenlerin etkisini anlamak için 1, 7 ve 30 gün boyunca bir dizi serbest daldırma testi yapılmıştır. Zamanla, homojen korozyon sonuçları, değişken pH ve sıcaklığa bağlı korozyon ürünü oluşumu ile birlikte sıcaklığa güçlü bir bağımlılık sergilemiştir [9].

Tane inceltme ve tane boyutunun farklı alaşımların korozyon direncini nasıl etkilediğine dair tam bir anlayış henüz geliştirilememiştir. Kesin bir "tane boyutu-korozyon direnci" ilişkisinin belirlenmesi, doğası gereği karmaşık olmuştur. Çünkü tane inceltmeyi elde etmek için gereken işlem aynı zamanda mikro yapıya başka değişiklikler de getirmiştir. Bu çalışma, tane boyutundaki ve işlemedeki değişimin yüksek saflıkta alüminyumun korozyon direncini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. ~100 μm ile ~2000 μm arasında bir dizi tane boyutuna sahip alüminyum numuneler, soğuk haddeleme, kriyo haddeleme, eşit kanallı açısallı presleme ve yüzey mekanik aşındırma işlemi dahil olmak üzere farklı işleme yolları kullanılarak üretilmiştir. İncelenen tüm numunelerin değerlendirilmesi, tane boyutu küçüldükçe korozyon hızının azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur [10].

Alüminyum alaşımları için yapılan çalışmalarda normalde çözeltiye alma ısı işlemine tabi tutulan numuneler kullanılır. AA 7150'nin korozyonunda çözeltiye alma ısı işleminin önemli bir rolü olduğu elektrokimyasal, mikroskopik ve profilometrik çalışmalarla ortaya konmuştur. Çözeltiye alma ısı işlemi, bileşen parçacık tipini ve sonraki işleme için malzemedeki özellikleri belirler ve bu nedenle yalnızca korozyonda temel bir faktör değil, aynı zamanda daha fazla hasara dayanıklı AA 7150 geliştirmek için tasarlanabilecek bir faktör olmuştur. $MgZn_2$ ve Al_2MgCu içeriğini en aza indiren optimize edilmiş bir çözeltiye alma ısı işleminin korozyon direnci üzerindeki olumlu etkisi gözlemlenmiştir [11].

Ekstrüzyon, alüminyum alaşımında istenilen şeklin oluşturulması için kullanılır. Ekstrüzyon işlemini kontrol eden önemli parametre, ekstrüzyon ekipmanı ve parametrelerinin bir fonksiyonu olan ekstrüzyon hızıdır. Homojenleştirilmiş AA 6063 alaşımlı kütükler, ekstrüzyon hızına bağlı olarak farklı ıstampa hızlarında (3, 6, 10 mm s⁻¹) ekstrüde edildi ve ardından 185 °C'de 6 saat yaşlandırıldı. Ekstrüde edilen numuneler korozyon, mikroyapı ve mekanik özellikleri açısından incelenmiştir. Ekstrüzyon hızının ve yaşlanmanın AA 6063'ün korozyon davranışı üzerindeki etkileri, 0,5 M NaCl sulu çözeltisinde dinamik polarizasyon ve empedans teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler, yaşlanmış numune için azalan ıstampa hızının korozyon direncini iyileştirdiğini göstermiştir [12].

T78 aşırı yaşlandırma işleminin AA 6056'nın 1 M sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içindeki korozyon davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Fazla yaşlandırılmış alaşım, AA 6056-T6 ile aynı lokal taneler arası korozyon mekanizmalarını sergilemiştir. Bununla birlikte, AA 6056-T78 kaba intermetalik Al-Mg-Si içeren parçacıkların, AA 6056-T6 koşulundan daha reaktif olduğu ve çukurlar için çekirdeklenme bölgeleri oluşturduğu bulunmuştur. Çukurlaşma ve taneler arası korozyon birbirine çukur duvarlarında çekirdeklenen taneler arası korozyon nedeniyle bağımlı olduğu bulunmuştur. AA 6056'nın T78 aşırı yaşlandırmanın, T6 pik yaşlandırma işlemine kıyasla taneler arası korozyona karşı daha iyi bir direnç sunduğunu göstermiştir [13].

Bir dizi çalışmada, Svenningsen ve arkadaşları [14],[15],[16],[17], 6xxx serisi alaşımın daha düşük Cu içeriğine sahip olan numunelerinin taneler arası korozyona direnç gösterdiğini bildirmiştir. Taneler arası korozyona duyarlılık, yapay yaşlanmanın en uzun süredeki aşırı yaşlanma koşuluna doğru önemli ölçüde azalmaktadır. Aşırı yaşlanma, çukurlaşma duyarlılığını ortaya çıkarmaktadır. Yüksek Cu içeriğine sahip olan numuneler önemli ölçüde taneler arası korozyon sergilemektedir. Taneler arası korozyon duyarlılığı, tane sınırı çökeltileri ve bitişik tükenmiş bölge arasındaki mikro galvanik eşleşmenin sonucu oluşmaktadır. Numuneler, doğal olarak yaşlandırılmış koşullarda taneler arası korozyona karşı duyarlılık göstermektedir. Özetle, ağırlıkça %0.12'ye kadar Cu içeriği taneler arası korozyona neden olabilirken, düşük Cu içeriğine sahip olan alaşım ise direnç göstermektedir.

Al-Mg-Si-Cu alaşımının (AA6061) korozyon özelliklerine 140–225 °C sıcaklık aralığında düşük yaşlandırma, pik yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma koşullarında ısıtılma işlemin etkisi araştırılmıştır. Alaşımın korozyon davranışını araştırmak için nötr NaCl çözeltisinde potansiyodinamik polarizasyon testi ve asitleştirilmiş NaCl çözeltisine daldırma testi uygulanmıştır. Sonuçlar, baskın korozyon formunun ve elektrokimyasal korozyon parametrelerinin yaşlanma koşullarına önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Aşırı yaşlandırılmış durum için en yüksek korozyon sonuçları elde edilmiştir [18].

6056-T6 alüminyum alaşımının korozyon davranışı 1 M NaCl çözeltisinde incelenmiştir. Taneler arası korozyon, çukurlaşmanın tane sınırında çekirdeklenip buradan yayıldığı için çukurlaşma ve taneler arası korozyonun birbirine bağımlı olduğu görülmüştür. Çukurların ilk önce tanelerin içinde geliştiği ve mikroskobik tünellerde büyüdüğü gözlemlenmiştir [19].

Donatus ve arkadaşları, yüksek korozyon dayanımı sebebiyle ray, gemi yapımı ve genel denizcilik uygulamaları ile son derece önemli mühendislik alüminyum alaşımları arasında olan AA5083-O ve AA6082-T6'nın farklı sürtünme karıştırma kaynaklarının korozyona duyarlılığı incelenmiştir. Her iki alaşımın ısıdan etkilenen bölgelerinde tane sınırı hassasiyeti, Mg_2Si parçacıklarının iki alaşım

arasındaki sınır boyunca dağılımı ve AA5083 arasındaki galvanik etkileşimleri korozyon duyarlılığından sorumlu olduğu gözlenmiştir [20].

Cu içermeyen 6111 benzeri bir alaşımın taneler arası korozyon davranışı, farklı klorür konsantrasyonlarına sahip çözeltilerde incelenmiştir. Alaşımın çukurlaşmaya ve taneler arası korozyona duyarlı olduğu bulunmuştur. Alaşım üzerindeki taneler arası korozyon saldırısı, çukurlar çapraz kesitli olmadıkça daha az görülmüştür. Sonuç olarak, taneler arası korozyon duyarlılığı ile Cu içermeyen 6xxx alüminyum alaşımı üzerinde de bir bağlantı kurulmuştur [21].

Bakır, taneler arası korozyona duyarlılık getirebildiği, farklı ağırlıkça Cu içeren numune alaşımları kullanılarak araştırılarak görülmüştür. En düşük bakır içeren alaşım, korozyon testinde taneler arası korozyona dirençli olmuştur. Ağırlıkça %0.18 bakır içeriği, doğal olarak yaşlandırılmış durumda yüzeysel korozyon göstermiştir. Yetersiz yaşlandırılmış koşul taneler arası korozyona karşı oldukça hassas davranış göstermiş olup, pik yaşlandırma veya aşırı yaşlandırma durumunda ise yalnızca biraz hassas olduğu görülmüştür. Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskopunda, T4'te ve yetersiz yaşlanmış temperlerde görünür tane sınırı çökmesi göstermezken, T6 ve aşırı yaşlanmış temperlerde Cu içeren çökeltilerden oluşan tane sınırları gözlemlenmiştir. Uzatılmış yapay yaşlanma süresi ile taneler arası korozyona karşı duyarlılık, tane sınırı çökeltilerinin büyümesiyle bakır açısından zengin tane sınırı filminin tüketiminden kaynaklı olduğu görülmüştür [22].

Eckermann ve arkadaşları, korozyon prosesleri sırasında Al-Mg-Si içerisindeki Mg_2Si çökeltilerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. 1M NaCl çözeltisinde, Mg_2Si parçacıklarının Mg tarafından seçici olarak alaşımsızlaştırıldığı, işlemin ilk birkaç saniye içinde başladığı ve yaklaşık 20 dakika sonra sona erdiği bulunmuştur. Tüm yüzeyin açık devre potansiyeli, bu 20 dakika içerisinde aktif Mg çözünmesi ile kontrol edilmiştir. Alaşımsızlaştırmadan sonra, Mg_2Si kalıntısı (Si bakımından zengin) katodik olarak aktiftir. Mg_2Si kalıntılarının çukurlaşma potansiyelini değiştirmedeği gözlemlenmiştir [23].

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı; 6xxx serisi dört farklı dövme alaşımının mevcut ticari üretim parametreleri dâhilinde farklı yaşlanma koşullarında yaşlandırılması ile oluşan yapıların korozyon davranışı üzerine olan etkisinin detaylandırılarak araştırılmasıdır. Aynı zamanda yapıda çökeltilerin oluşması ve bu çökeltilerin dağılımı ile kimyasal kompozisyondaki Cu içeriğine bağlı olarak korozyon davranışındaki değişimin incelenmesi amaçlanmaktadır.

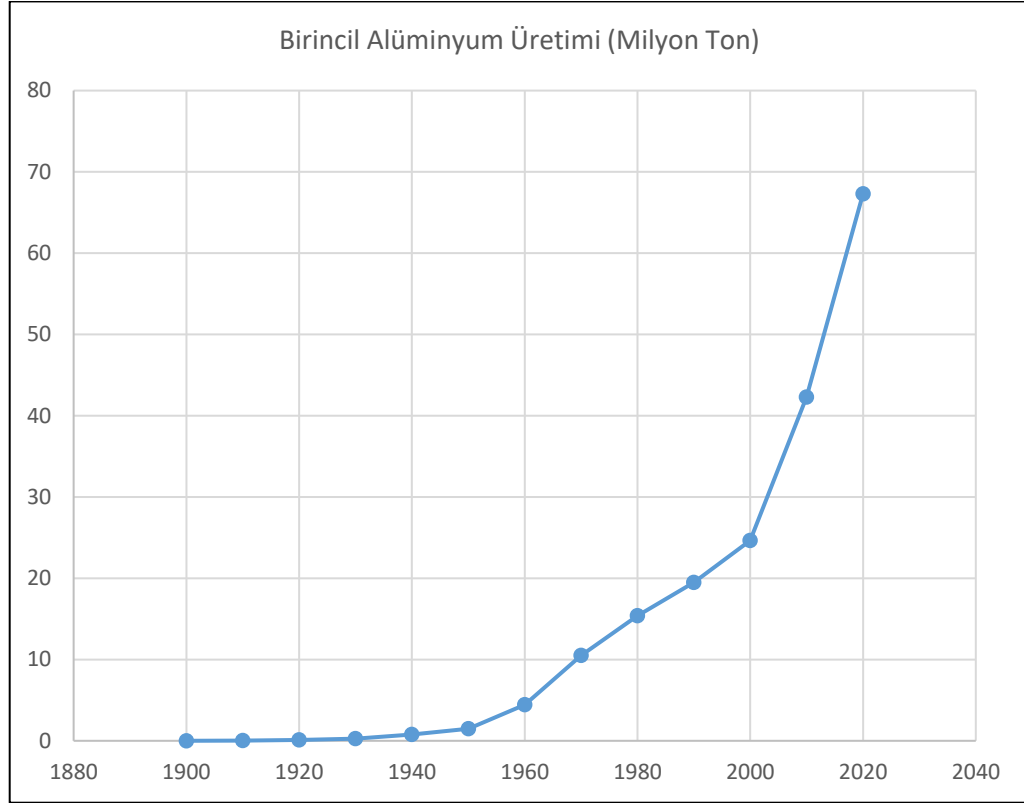
1.3 Hipotez

Endüstride ekstrüde mamullerde yaygın olarak kullanılan 6xxx serisi çökeltme sertleşmesi gösteren alaşım serisinin pik yaşlandırılmış koşulda kullanılması korozyon davranışı açısından olumsuzluklar içermektedir. Farklı yaşlandırma koşulları ile 6xxx serisi alaşımların korozyon davranışları geliştirilerek, uygun yaşlandırma koşulu ile iyi korozyon mukavemetinin sağlanması amaçlanmıştır.

2.1 Alüminyum Tarihçesi

Alüminyum, yalnızca 200 yıl önce keşfedilen "genç" bir metaldir. 1808 yılında İngiliz H. David, alumium adını verdiği yeni bir metalin varlığını kanıtladı. Bu isim daha sonra alüminyum olarak değiştirilmiştir. Ergimiş alüminyum tuzlarının elektrolizi ile demir katotları kullandığı için alüminyum ve demir alaşımını elde etmiştir. 1825 yılında Dane NC Oersted çok az miktarda saf alüminyum üretmiştir. 1827 ve 1845 yılları arasında Alman F. Wöhler, potasyumu susuz alüminyum klorür ile reaksiyona sokarak alüminyum tozu üretmek için ilk işlemi geliştirmiştir. Yeni metalin en dikkat çekici özelliği gibi görünen yoğunluk da dahil olmak üzere, alüminyumun bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. 1821 yılında Perre Berthier tarafından keşfedilmiş ve adını bulunduğu “Les Baux de Provence” kasabasından alan boksit, alümina üretmek için kullanılan bir cevher olup, üretim için en yaygın işlem Bayer prosesidir. Bayer prosesi 100 yılı aşkın bir süre önce Avusturyalı kimyager Carl Josef Bayer tarafından keşfedilmiş olup, ancak günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya çapındaki alümina rafinerilerinin yaklaşık %90'ı Bayer prosesini kullanmaktadır. Bayer yönteminin prensibi, boksitin yüksek sıcaklıkta konsantre kostik soda (NaOH) içinde kolayca çözünmesi ve Alüminyum Hidroksit olarak kristalleştirilip çöktürülerek, sonrasında kalsinasyon ile alümina eldesine dayanır. 1886'da, Fransa'dan Paul-Louis Toussaint Héroult ve Amerika Birleşik Devletleri'nden Charles Martin Hall, bağımsız olarak, farklı ülkelerde Ergimiş kriyolit içinde çözülmüş alüminanın elektrolizi yoluyla saf alüminyum üretme ticari sürecini icat etmişlerdir. Hall-Héroult işlemi, bugün hala birincil alüminyum üretmek için kullanılmaktadır. Fransa, İsviçre ve Amerika Birleşik Devletleri'nde birkaç alüminyum üretim tesisi o yıllarda üretime başlamıştır. Dünya birincil alüminyum üretimi 1900'de 6.000 tona ulaşmıştı ve özellikle 1950'den beri büyümeye devam etmiştir. Daha yakın zamanlarda, Çin üretiminin gelişmesiyle bağlantılı olarak daha da büyük bir artış olmuştur. Şekil 2.1, 1900

yılından 2020 yılına kadar olan 120 yıllık süreçteki birincil alüminyum üretimini göstermektedir. Bugün, birincil alüminyum üretimi yıllık 67 milyon tona ulaşmış olup, geri dönüşümde 34 milyon ton ile yadsınamayacak büyüklüktedir. 1888'den beri dünyada üretilen tüm alüminyumun %75'inin, alüminyumun korozyona karşı doğal direnci ve geri dönüşümündeki gelişen teknolojiler sayesinde bugün hala kullanıldığını belirtmek gerekir [24][25].



Şekil 2.1 Yıllara göre birincil alüminyum üretimi [26]

2.2 Alüminyum Üretimi

Alüminyum imalat süreçleri; birincil alüminyum üretimi ve ikincil alüminyum üretimi olmak üzere iki yönetime ayrılırlar. Alüminyumun birincil üretimi, enerji yoğun bir süreçtir ve boksit, alüminyumun ana cevheridir. Ülkemizde birincil alüminyum üretimi sadece Seydişehir'de bulunan Eti Alüminyum fabrikasında yıllık yaklaşık 80.000 ton üretimle yapılmaktadır. Ülkemdeki enerjide dışa bağımlılığın yüksek olması nedeniyle, enerji ihtiyacı birincil üretimin yalnızca %5'i olan, ikincil üretim tesislerinde daha yoğun üretim yapılmaktadır.

2.2.1 Birincil Alüminyum Üretimi

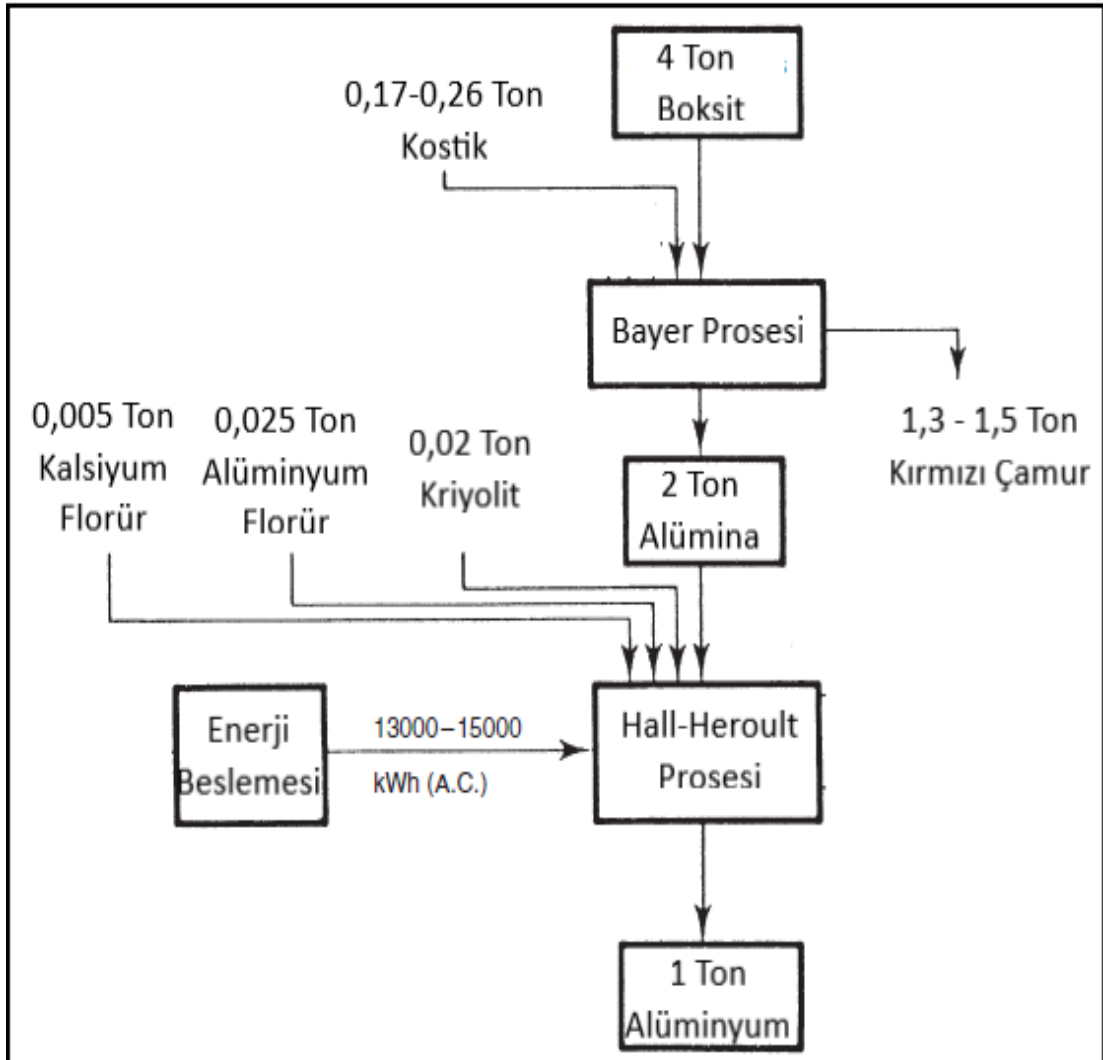
Boksitin ana alüminyum içeren mineralleri, hidratlı alümina, gipsit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ve böhmitin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) çeşitli biçimleridir. Gerçek kimyasal bileşim, her rezervin konumu ve jeolojisine göre değişir. Birincil alüminyum, Bayer işlemi ve Hall-Heroult işlemi olmak üzere iki ayrı, enerji yoğun işlem kullanılarak cevherden üretilir. Bayer prosesinde toz haline getirilmiş boksit, 240°C 'ye varan sıcaklıklarda güçlü kostik soda içinde çözülür. Alüminanın çoğu, süzme yoluyla giderilebilen, esas olarak demir oksit ve silikadan oluşan "kırmızı çamur" adı verilen çözünmeyen bir tortu bırakarak üretilir.



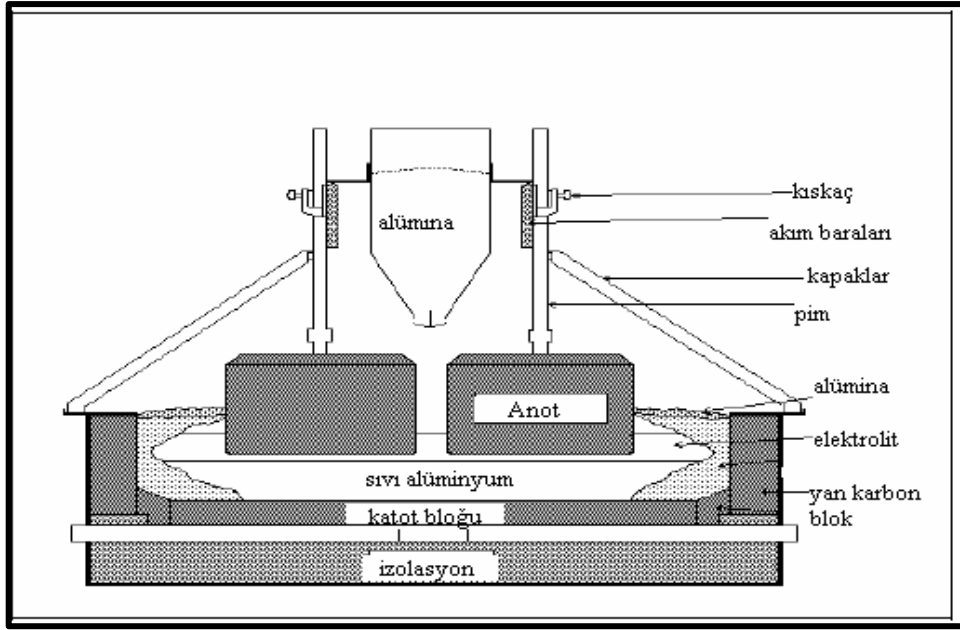
Şekil 2.2 Hall-Heroult hücreleri [27]

Yaklaşık %56 Al_2O_3 içeren boksit, genellikle açık ocak madenciliği ile çıkarılmaktadır. Hall-Héroult işlemi, Şekil 2.2'de gösterilmiş olan indirgeme tankları adı verilen büyük karbon veya grafit astarlı çelik tanklarda gerçekleşir. Şekil 2.3'de birincil alüminyum üretimi akış şeması verilmiştir. Yaklaşık 4 ton

boksitten 1 ton alüminyumun üretilmesi için 2 ton Al_2O_3 üretilir. Ayrıca 4 ton boksit, kırmızı çamur adı verilen 1,5 ton atık mineral üretmektedir. Sıvı alüminyum, öncelikle kriyolitten oluşan ergimiş bir tuz elektrolitinde çözülmüş alüminanın elektrolitik indirgenmesiyle üretilir. Esas olarak sıvı alüminyum üretimi kriyolitten oluşan Ergimiş tuz elektrolitinde çözünen alüminanın elektrolitik indirgenmesiyle oluşmaktadır. Ergimiş bir sentetik kriyolit (Na_3AlF_6), AlF_3 ve CaF_2 karışımı içinde hacimce %3-8'lik bir Al_2O_3 çözülür ve Hall-Heroult hücrelerinde 960 °C'de elektrotermal olarak indirgenir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi birincil alüminyum üretimi için, katotta oluşan ürün ergimiş alüminyumdur ve anotta oluşan ürün ise büyük ölçüde CO_2 ve az miktarda CO'dur [27].



Şekil 2.3 Boksitten alüminyum üretimi akış diyagramı [27]



Şekil 2.4 Prebaked tipli anot ile alüminyum elde edilmesi [27]

2.2.1.1 Kırma ve Ufalama İşlemi

Boksit önce ezilir ve gerekli boyuta küçültülür. Ezilmiş olan boksit içerisinde kil parçacıklarını çıkartmak için yıkanır ve sonra kurutulur.[28].

2.2.1.2 Çürütme

Bulamaç sindiriciye gönderilir. Burada 3-4 atmosfer basınç altında 145 °C sıcaklığa ısıtılır. Bir süre bekleyen çamur kostik sodaya eklenir ve istenmeyen yapılar kazanın dibine çöker. Oluşan sodyum alüminat sedimantasyon tankına girer [28].

2.2.1.3 Dinlenme

Çökeltme sürecini hızlandırmak ve daha saf hale getirmek için sodyum alüminatın içine belirli kimyasallar eklenir. Sıvı daha sonra birkaç farklı filtreden geçer ve kalan kırmızı çamur olur. Bileşik bir sedimantasyon tankına gönderilir [28].

2.2.1.4 Çökelme

Dekantöre gönderilen sıvıya çok az miktarda alümina ilave edilerek çökeltme işlemi tetiklenir. Sonuç olarak, alümina tankın dibine çökmeye başlar. Alümina hidrat koyulaştırma tanklarına yerleştirilmiştir [28].

2.2.1.5 Kalsinasyon

Kalsinasyon işlemi, suyu alümina hidrattan ayırma işlemidir. Karışım 1100°C'de kurutulur ve alümina bir toplama kısmına aktarılır [28].

2.2.2 İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil alüminyum üretimi, alüminyumun sürdürülebilirlik açısından en önemli özelliklerinden biri olan geri dönüştürülebilirliğinden yararlanmaktadır. İkincil üretim genellikle alüminyum hurdalarının parçalanması ve tasnif edilmesiyle başlar. Alüminyum dışındaki metalik ve metalik olmayan malzemelerin alüminyumdan ayrılmasını sağlamak için bir manyetik ayırıcı kullanılır. Günümüzde X-ray teknolojisi sayesinde atık ayrıştırma bir üst seviyeye ulaşmıştır. Bu teknolojiyi kullanan bir cihaz, X-ışını kimyasal bileşimine dayalı olarak bir taşıma bandında dolaşan alüminyum hurdayı alaşımlarına göre ayırabilir. Bu, alaşım elementlerinin kullanımını azaltarak önemli maliyet tasarruflarına yol açmaktadır. Tüketici sonrası geri dönüştürülmüş alüminyum, enerji tüketimini %95 azaltır ve işçilik, sermaye maliyetlerini en aza indirir. Günümüzde son kullanıcı hurda geri dönüşümü, yaklaşık 20 milyon ton birincil alüminyum ihtiyacını ortadan kaldırmakta, 80 milyon ton boksit tasarrufu sağlamakta, 22-25 milyon ton kırmızı çamur oluşumunu engellemekte ve böylece yaklaşık 300 milyon ton CO₂ emisyonunun önüne geçmektedir. Kullanılmış alüminyumun geri dönüştürülmesi, daha az enerji ve hammadde tüketimi demektir. Tüketici sonrası alüminyumdan alüminyum üretimi, sera gazı emisyonlarını %95 ve atık kirliliğini %97 oranında azaltır. Ayrıca birincil alüminyum çıkarmanın yüksek yatırım maliyeti ve yüksek elektrik maliyeti ana maliyetlerden biri olduğu için hurda alüminyumun geri dönüşüm oranı her geçen gün artmaktadır. İkincil üretim için gerekli alüminyum sıvısını elde etmek için atık alüminyum ergitme fırınında ergitilir. Doğal gazla çalışan iki odalı veya tek odalı ergitme fırınları genellikle ergitme için kullanılır. İki bölmeli bir fırında piroliz, ergitme verimliliğini artırmak için atıktaki organik bileşikleri uzaklaştırır. Bir odada piroliz sıcaklıklarında alüminyum hurdası organik bileşenlerinden ayrıştırılırken, diğerinde birincil külçeler ergitilmekte ve sıvı metalin odalar arasında transferini sağlamak için pompalar kullanılmaktadır. Ergimiş sıvı metal, döküm için bir bekletme fırınına

aktarılır. Bu sırada devrilemli tek odalı alüminyum bekletme fırınında alaşımlama işlemi yapılır. Yolluk ile sıvı metal taşınır ve gerekli malzemelere göre ilgili döküm işlemi hazırlanır. Alüminyum geri dönüşümünde birçok farklı hurda tipi kullanılır ve bu hurdalar farklı geri kazanım oranlarına sahiptir. Tablo 2.1 fırınlar için hurda geri kazanım oranlarını göstermektedir [29][30].

Tablo 2.1 Hurdaların değerlendirilmesinde geri kazanım oranları

Hurda Cinsi	Geri Kazanım Oranı %		
	Reverber Fırın	Döner Fırın	İkiz Kamaralı Fırın
Levha, Kırpıntı, Ara iş	87	90	93
Preslenmiş Talaş, Folyo	80	85	90
Döküm Makine Parçaları	85	88	
İçecek Kutuları	75	85	85
Şişe Kapakları	65	70	75

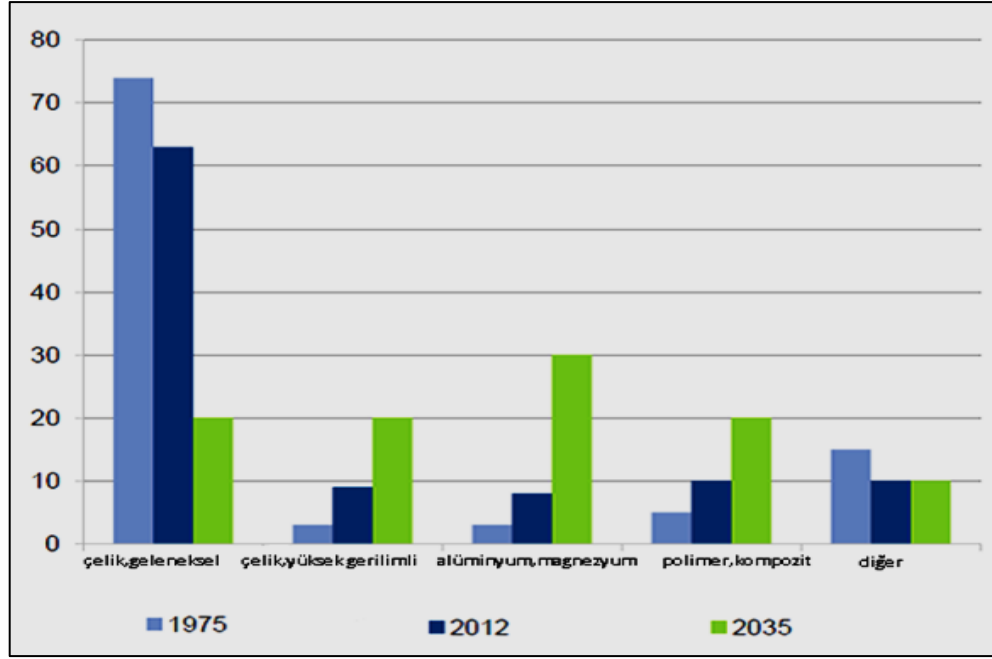
2.3 Alüminyumun Özellikleri ve Tercih Sebepleri

Alüminyumun en dikkat çekici özelliklerinden biri çok yönlülüğüdür. Üç yüzden fazla alaşım bileşimi yaygın olarak tanınmaktadır. Alaşımı çeşitli uygulamalar için en ekonomik ve çekici yapan alüminyumun özellikleri görünüm, hafiflik, üretilebilirlik, fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve korozyon direncidir. Alüminyum sadece $2,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir, bu da çeliğin ($7,83 \text{ g/cm}^3$), bakırın ($8,93 \text{ g/cm}^3$) veya pirincin ($8,53 \text{ g/cm}^3$) yaklaşık üçte biri kadardır. Atmosfer, su (tuzlu su dahil), petrokimyasallar ve birçok kimyasal sistem dahil çoğu ortamda mükemmel korozyon direnci sağlamaktadır. Alüminyum yüzeyler oldukça yansıtıcı olabilir. Alüminyumun çok çeşitli dalga boylarında yansımaları, çeşitli dekoratif ve işlevsel uygulamalar için seçilmesine yol açmıştır. Alüminyum genellikle mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik sergiler. Alüminyum genellikle aynı ağırlıktaki bakırdan neredeyse iki kat daha iletken olduğu için

tercih edilir. Alüminyum, yüksek gerilim iletim kablolarında elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanıklılık gereksinimlerini karşılayabilir. Alüminyum alaşımları, ısı eşanjörleri, elektrikli ısıtma ekipmanlarının yanı sıra otomotiv silindir kafaları ve radyatörleri için kullanılır. Alüminyum, elektrik ve elektronik endüstrilerinde önemli bir özellik olan ferromanyetik olmamasından dolayı tercih edilir. Alüminyum alaşımları içeren ürünler de toksik değildir. Yiyecek ve içecek kaplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı alüminyum alaşımları yumuşak çeliklerden daha güçlüdür. Bununla birlikte, saf alüminyum ve belirli alüminyum alaşımlarının dayanım ve sertliği son derece düşüktür [31][32].

2.3.1 Hafiflik

Alüminyum başta ulaşım sektörü olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ olan çok hafif bir metal olmasıdır. Alüminyum ve alaşımlarının ağırlığı, aynı hacimdeki demir, çelik veya bakırın yalnızca üçte biri kadardır. Alüminyum, yaşlandırma ile yüksek mukavemet için alaşımlandırılabilir ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı elde etmek için sertliği artırılabilir. Küresel iklim değişikliği karşısında, alüminyumdaki yapılan daha hafif araçlar yakıt tüketimini azaltabilir, böylece çevre kirliliğini ve sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Ortalama bir araç için ağırlığın %10 oranında azaltılması, yaklaşık olarak %5-6 oranında yakıt tasarrufu anlamına gelir. Şekil 2.5, bir otomobilde kullanılan malzemelerin dağılımını ve alüminyum miktarını göstermektedir [29][33].



Şekil 2.5 Otomobilde malzeme dağılımı, % [29]

2.3.2 İletkenlik

Alüminyum hafif ve oldukça iletken bir malzeme olduğundan, yüksek gerilim iletim hatlarında, dağıtım baralarında ve yerel bina güç dağıtım sistemleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıradan alüminyum, iyi bir ısı iletkenidir ve termal iletkenliği, baz metaller arasında en iyi olan bakırın yaklaşık %60'ı kadardır. Alüminyum alaşımlarının termal iletkenliği, kimyasal bileşime olduğu kadar şekillendirme ve ısıl işlem koşullarına da bağlıdır. 19. yüzyılın sonunda, bu özellik, alüminyum alaşımlarının ev ve profesyonel mutfak gereçlerinin imalatında kalaylı bakırın yerini almasına yol açtı. Alüminyum ısı eşanjörleri pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Bunlar; arabalar, buzdolapları, klimalar, deniz suyunun tuzdan arındırılması, güneş panelleri, elektronik ekipmanlardaki radyatörler gibi birçok uygulamayı içerir [29][34].

2.3.3 Korozyon

Atmosfere maruz kalma sonrası alüminyumun yüzey bölgesinde hızlıca ince oksit film tabakası oluşmaktadır. Bu oksit film zarar görse bile kendini hemen yenileyebilme özelliğine sahiptir. Oksit tabakasının kalınlığı genellikle 1-8 nanometredir. Alüminyumdaki alümina genellikle amorf olarak kabul edilir. Alüminyum endüstrisi, mevcut gelişimini bu oksit filme borçludur. Yüzeyindeki

doğal oksit film nedeniyle korozyona dayanıklı bir metaldir. Bununla birlikte, koruyucu oksitler oluşturmak için pasifleştirilen diğer metaller gibi, halojenür iyonlarına karşı kararsızdırlar. Lokal korozyona ve çukurlaşmaya eğilimlidirler. Alüminyum ve alaşımlarının genel korozyon davranışını etkileyen iki ana faktör vardır: Birincisi malzemenin faaliyet gösterdiği ortam, ikincisi ise malzemenin metalürjik ve kimyasal yapısıdır. Malzemelerin çalışabileceği ortamlar atmosferik, toprak altı ve çeşitli kimyasal ortamlar gibi çok farklı ortamlar olabilir. Ek olarak, sülfat ve klorür yoğunluğu fazla olan endüstriyel ve deniz bulunan ortamlar alüminyum ve alaşımları açısından en çok tehlike barındıran ortamlardandır. Alüminyumun saflığı azaldıkça ve alaşım elemanları eklendikçe korozyon direnci azalmaktadır. Bakır korozyon direncini diğer elementlere göre daha fazla etkileyen alaşım elementidir. Metallerin korozyonu, metal ile sulu çözelti arasındaki elektrokimyasal maddelerden geçen ve metalin atomik yapısına bağlı olarak karmaşık bir elektrokimyasal süreçle ilerler. Metal-çözelti arayüzünde, elektrik yüklerinin taşınması elektrokimyasal etkilere neden olur. Hava ile çıktıklarına giren alüminyum, yüzeyini başka kalıntılara karşı koruyan ve normal hava sıcaklıklarına maruz kalmanın neden olduğu korozyondan koruyucu şeffaf bir doğal oksit film içerir. Taneler arası korozyon direncini en üst sınırını çıkarmak ve korozyonu sınırlandırmak için alaşım elementleri sınırları, ısı işlemler ve koruyucu kaplamalar dikkatli bir şekilde seçilmelidir [29][34].

2.3.4 Şekillendirme

Alüminyum sünek bir malzeme olmasından kaynaklı olarak kolay şekil alabilir. Alüminyum mamullerin plastik deformasyon yöntemi ile üretim süreçlerinde kolay şekil alabilirliğinin büyük avantajı vardır. Bu kolay şekil alabilirlik sayesinde alüminyum profiller, levhalar ve dövme ürünler kolay ve kaliteli bir şekilde üretilir.

2.3.5 Geri Dönüşüm

Alüminyum geri dönüşümü hem enerji açısından verimli hem de ekonomik olarak avantajlar sağlamaktadır. Alüminyumun ikincil üretimi, birincil metali cevherden üretmek için gereken enerjinin yalnızca %5'ini gerektirir. Çevre koşulları ve

sürdürülebilir bir ekonomi yaratma hedefi nedeniyle son 20 yılda geri dönüştürülmüş metal tüketiminin arttığı görülmüştür [29][34].

2.3.6 Yansırma

Alüminyum yüzey pürüzsüz ise radyo dalgalarını, görünür ışığı ve yüzeye çarpan mikrodalga ışınlarını çok iyi yansıtır. Alüminyum, görünür ışığın %80'ini ve termal dalgaların %90'ını yansıtırma özelliğine sahiptir. Alüminyum alaşımlarının uygulama alanı ve kullanımına bağılı olarak, polisaj ile parlak bir yüzey veya satinaj ile “mat” bir görünüm elde edilebilir [29][34].

2.3.7 Mukavemet/Ağırlık Oranı

Nispeten yüksek mukavemet ile düşük yoğunluğun kombinasyonu, alüminyum alaşımları için yük taşıma kapasitesinde hiçbir kayıp olmadan daha ağır metallerin yerini alması için birçok avantaj sağlamaktadır. Mükemmel korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirlik ile birleşen bu özellik, alüminyumun teknelerde, uçaklarda ve otomotiv uygulamalarında geniş çapta kullanılmasına yol açmıştır. Alüminyum alaşımları için deformasyonla ve yaşlandırma ile gerçekleştirilen sertleştirme işlemleri kullanılarak 700 MPa'a kadar yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir [29][34].

2.3.8 Esneklik

Alüminyum darbe enerjisini absorbe etme özelliğine sahiptir. Bu özelliğı sayesinde özellikle arabada bir çarpma anında oluşan yüksek enerjiyi çok iyi emer. Büyük bir esnekliğe sahip elastik bir malzemedir [29][34].

2.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları temel üretim süreçlerine göre dövme alaşımlar ve döküm alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Dövme alüminyum ve alaşımları dört basamakla tanımlanır. Alüminyuma eklenen alaşım elementlerine karşılık gelen; dört basamaklı sınıflandırma kullanılır. Bu sınıflandırmalarda, sisteminin ilk rakamı alüminyuma eklenen ana alaşım elementini gösterir. 2xxx serisinden ana 7xxx gruplarına kadar her grup, en yoğun alaşım elementinin adını almıştır. Dövme alaşımlar söz konusu olduğunda, ana imalat sürecinde biyet veya düz levha şeklinde dökülen alaşımlar, plastik şekillendirme işlemi yoluyla ürüne

dönüştürülür. Döküm alaşımlar için, sıvı metal tüm olası bileşim ve performans parametrelerine sahiptir ve doğrudan ürün şekillerine dökülmektedirler. Tablo 2.2'de gösterildiği gibi dövme ve döküm alaşımlar, element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır [26][34][35][36].

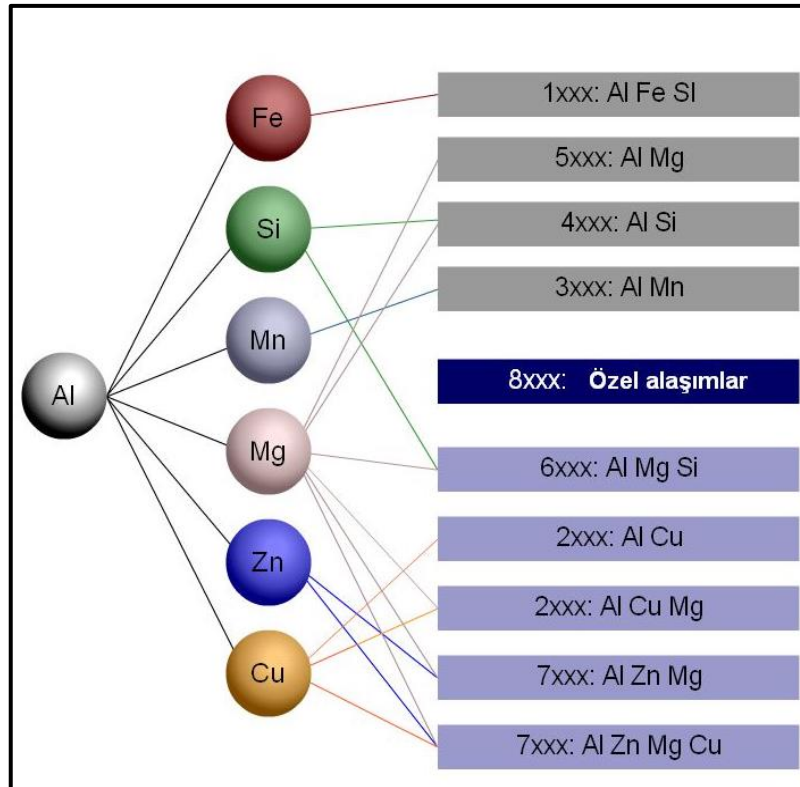
Tablo 2.2 Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi [36]

Dövme Alasımlar		
1xxx	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Mg içeriyorsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li, Sn, Zr veya B	Yaşlandırılabilir
Dökme Alasımlar		
1xx.x	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2xx.x	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları yaşlandırılabilir
4xx.x	Al-Si	Yaşlandırılmaz
5xx.x	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
7xx.x	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xx.x	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

2.4.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar adından da anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekillendirme işlemleriyle üretilirler. Dört basamaklı tanımlamanın ilk basamağı, hangi temel alaşım elementinin alüminyum alaşımını içerdiğini gösterir. 1xxx, saf alüminyum (%99,00) gösterir. Son iki hane, %99 değer noktasından sonraki sayıyı temsil eder. 2xxx ile 8xxx arasındaki alüminyum alaşımları için, ilk hane alaşım serisine karşılık gelir, ikinci hane değişimdir (modifikasyon) ve son iki hanenin özel bir anlamı yoktur. Çeşitli alüminyum alaşımları, alaşımı serideki diğer alaşımlardan ayırt etmek için seri numaraları olarak verilmiştir.

Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması genellikle alaşım elementlerinin katkısına dayansa da, bu alaşımlar yaşlanmaya uygunluğunu da göz önünde bulundururlar. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi mor ve mavi renkli seriler yaşlandırılmaya uygunken gri renkli seriler uygun değildir [26][34][35][36].



Şekil 2.6 Alüminyum serileri ve ana alaşım elementleri [36]

2.4.1.1 1xxx Serisi Alaşımlar

1xxx serisi, en az %99 alüminyum içeren ticari olarak saf alüminyumı ifade eder. Bu malzemeler çok yüksek morfolojiye, elektriksel iletkenliğe ve korozyon direncine sahiptir. 1xxx serisinin son iki hanesi %99 değerinden sonraki kısmı belirlemek için kullanılır. Örneğın, 1100 malzemesi %99,00 saf alüminyum içeriir, 1050 malzemesi %99,50 saf alüminyum içeriir ve 1060 malzemesi %99,60 saf alüminyum içeriir [26][34][35][36].

2.4.1.2 2xxx Serisi Alaşımlar

Alüminyum-bakır-magnezyum alaşımları, ilk çökeltme sertleştirmesi görölmüş alaşımlardır. İlk çökeltme sertleştirme alaşımı 2017 alaşımıydı. Bu alaşımlar mikroyapıda %4 Cu, %0,6 Mg ve %0,7 Mn içermektedir. Yapısında %4,4 Cu, %0,5 Mg, %0,8 Mn ve %0,8 Si içeren 2014 alaşımı daha sonra yapay yaşlandırmaya karşı 2017 alaşımına göre daha reaktif olacak şekilde geliştirildi. Cu, en yoğun kullanılan Al-Cu-Mg serisi alaşım elementidir. Bugün 2xxx alaşımlarda, magnezyum içeriğii %0,5'ten %1,5'e çıkarılarak yüksek mukavemet elde edilmiştir. Al-Cu alaşımlarına magnezyum ilavesi, Al-Cu alaşımlarının çökeltme sertleşmesini büyük ölçüde hızlandırır ve güçlendirir [26][34][35][36][37].

2.4.1.3 3xxx Serisi Alaşımlar

3xxx alüminyum serisindeki en önemli alaşım elementi manganezdır. Alaşımlarda mangan, mukavemeti düşük bir oranda artırır. Bu serideki 3003, 3004 ve 3105 alaşımları, yüksek korozyon direnci ve işlenebilirlik sunar. 3xxx serisi alaşımlar, çatı kaplama sistemleri ve içecek kutuları gibi gıda ve inşaatın çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [26][34][35][36].

2.4.1.4 4xxx Serisi Alaşımlar

4xxx serisi alüminyum alaşımlarına silisyum ilavesi, kaynak ve lehimleme sırasındaki erime noktasını düşürür, böylece alaşımın kaynak performansını ve lehimleme performansını iyileştirir. Silisyum, alaşımın akışkanlığını artırır ve özellikle döküm teknolojisinde karmaşık geometriili şekillerin üretimine olanak tanır. Kaynak teli için yaygın olarak 4043 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır [26][34][35][36].

2.4.1.5 5xxx Serisi Alaşımlar

Alüminyum 5xxx serisi, yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlayan magnezyum elementi içerir. Gemi çerçeveleme ve diğer denizcilik uygulamalarında ve otomotiv iç panellerinde kullanılır. Bu alaşım serisinin mukavemeti, magnezyum içeriğine göre değişir [26][34][35].

2.4.1.6 6xxx Serisi Alaşımları

6xxx alüminyum alaşımları, Mg_2Si çökeltilerinin meydana geldiği oranlarda magnezyum ve silisyum bulunması nedeniyle güçlü ve korozyona dayanıklıdır. AA 6061 alaşımı, yumuşak çelikle karşılaştırılabilir akma dayanımına sahip en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir [26][34][35][36].

2.4.1.7 7xxx Serisi Alaşımları

Bu serideki en önemli alaşım elementi çinkodur. 7xxx serisi iki alt gruba ayrılır: Al-Zn-Mg alaşımları (örn. 7005) ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımları (örn. 7075 ve 7178). Uçak malzemesi olarak, minimum 580 MPa çekme dayanımına sahip 7178 alaşımı kullanır. 7xxx ve 2xxx serisi alüminyum alaşımları en dayanımlı alaşımlar olmalarına rağmen sünek bir yapıya sahip değildir. 1xxx, 3xxx, 5xxx ve 6xxx alüminyum alaşımları, düşük mukavemete rağmen yüksek sünekliğe sahiptir [26][34][35][36][38].

2.4.1.8 8xxx Serisi Alaşımları

Son yıllarda özellikle havacılık endüstrisinde yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu malzemelere olan talep, alüminyum-lityum alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Al-Li alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek elastisite modülleri, yüksek yorulma dirençleri ve düşük ve yüksek sıcaklık toklukları ile bilinirler. Alüminyum alaşımlarına lityum eklenmesinin ana nedenleri, yoğunluğu azaltmak ve elastisite modülünü arttırmaktır. Alüminyuma eklenen her %1 lityum için alaşımın yoğunluğu %3 azalır ve elastisite modülü %6 artar. Geleneksel olarak (%1,0 ila %2,0) lityum içeren alaşımlar yaşlandırma işlemine tabi tutulabilir. Hızlı katılaşma işleminden sonra %4'e kadar lityum eklenebilir; bu daha fazla mukavemet ve daha düşük ağırlık sağlayabilir. Diğer geleneksel alüminyum alaşımlarına göre 3-4 kat daha yüksek olan üretim maliyetleri nedeniyle; lityum

içerikli alüminyum alaşımlarının aktif kullanımı ile ilgili olarak, ekonomik ve teknik olarak maliyet düşürme temelli girişimlerde bulunulmuştur [26][34][35][36].

2.4.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımları; tipik olarak kum döküm, basınçlı döküm ve kokil döküm işlemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özelliklere sahiptir ve talaşlı imalata uygundur. Döküm alaşımlar kaynaklanabilir. Yaşlandırma, dövme alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bazı döküm alaşımlarında da başarıyla uygulanabilir. Bu özelliklere ek olarak elektrik direnci ve korozyon direnci de yüksektir. Bu nedenle, döküm alaşımlarının kimyasal bileşimi dövme alaşımlarından çok farklıdır, silisyum %5-12 oranında en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik bir element olduğu için, ilavesi alaşımın akışkanlığını arttırırken, malzemenin mukavemetini de arttırır. Sertleşebilir alaşıma %0,3 ila %1 oranında magnezyum elementi ilave edilerek çökelti (Mg_2Si) ile malzemenin mukavemeti arttırılır. Bakır, yüksek sıcaklık direncini arttırmak ve $CuAl_2$ bileşikleri şeklinde çökelmiş bir faz oluşturmak için %1 ile %4 arasındaki miktarlarda kullanılır. Çinko elementi aynı şekilde malzemeye eklenir ve $MgZn_2$ çökeltileri oluşur. Döküm alüminyum alaşımlarına tane azaltıcı olarak bor (B) ve titanyum (Ti), ötektik yapı düzenleyici olarak sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri eklenir. Kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler diğer özellikleri kontrol etmek için kullanılabilir. Hafif döküm alaşım yapıları sergileyen bu alaşım kombinasyonlarının özelliklerine rağmen, özellikle otomotiv endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bazı bileşimsel özellikler, ergimiş metali kalıba dökmeden önce ısıl işlemle veya döküm yapısının güçlendirilmesiyle değiştirilebilir [39][40][41].

2.5 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı

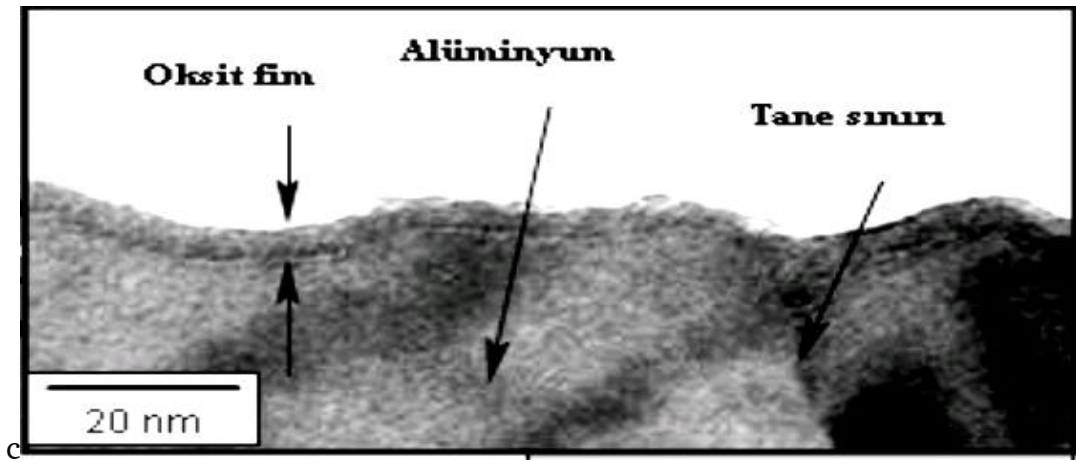
2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Karakteristiği

Alüminyum alaşımları, diğer metallerin yanı sıra az miktarda bakır, manganez, silisyum, magnezyum ve çinko içerir. Alaşımlar, saf alüminyumdan daha iyi mekanik özelliklere ancak daha düşük korozyon direncine sahip olarak

ulaşabilirler. Bununla birlikte, alüminyum alaşımları, havacılık da dahil olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları HCl çözeltisinde kararsızdır. Güçlü negatif potansiyeli nedeniyle, alüminyum alaşımlarının korozyonu, birçok pozitif yüklü metalle temas ettiğinde büyük ölçüde artar. Alüminyum ve alaşımları alkalilere karşı özellikle hassastır. Artan alkali konsantrasyonu ile korozyon hızı artar. Amonyak, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit ve baryum hidroksite karşı düşük dayanımları bu kategoriye girmektedir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, orta derecede agresif ortamlarda oldukça dirençlidir. Ancak bu malzemeler, aşındırıcı gazlar ve katı parçacıklarla dolu endüstriyel ve deniz ortamlarında çukurlaşma korozyonuna karşı hassastır. Düşük mukavemetli döküm alüminyum alaşımları, saf alüminyuma yakın, yüksek korozyon direncine sahiptir. Orta mukavemetli döküm alüminyum alaşımlarının su verilmiş ve tavllanmış formları, saf alüminyum ve düşük mukavemetli dökme alüminyum alaşımlarından daha düşük korozyon direncine sahiptir. Yüksek mukavemetli döküm alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, orta mukavemetli alaşımlardan çok daha düşüktür. Düşük korozyon direncine sahip olan Duralumin, en yaygın kullanılan yüksek mukavemetli alüminyum alaşımıdır. Duralumin'de taneler arası korozyon yaygındır. Mukavemet kaybıyla ilişkili en tehlikeli korozyon, tane sınırı korozyonudur. Yüksek magnezyum içerikli alüminyum alaşımları, Duralumin'den daha fazla korozyona dayanıklıdır. Bunun nedeni, daha elektronegatif olan magnezyum alaşımındaki Mg_2Al_3 takviye bileşenidir. Bu durumda yüzey kalıntıları hızla çözünür ve alaşım yüzeyi eşpotansiyel hale gelir. Bununla birlikte, magnezyum alaşımlarındaki anodik kalıntılar yüzey boyunca biriktiğinde, taneler arası korozyona duyarlı hale gelir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, Alüminyum koruyucu oksit film tarafından üretilen pasifliği sayesinde korozyona karşı mükemmel bir dirence sahiptir. Bu direnç sayesinde doğal ortamlarda, deniz suyunda, birçok toprak türünde, kimyasalda ve çoğu gıdada yıllarca kullanılabilir. Bu özellikler sayesinde alüminyum ve alaşımları, binaların dış cephelerinde, yüksek gerilim elektrik hatlarında, gemi inşaatı üst yapılarında, ulaşım alanında ve boru hatları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Bu ince koruyucu film, aşınma gibi bir hasar görürse çoğu ortamda hemen yeniden oluşur ve alüminyum korozyondan korumaya devam etmektedir. Bu film kendi kendini yenileyemeyecek koşullarda hasar gördüğünde ise korozyon meydana gelmektedir.

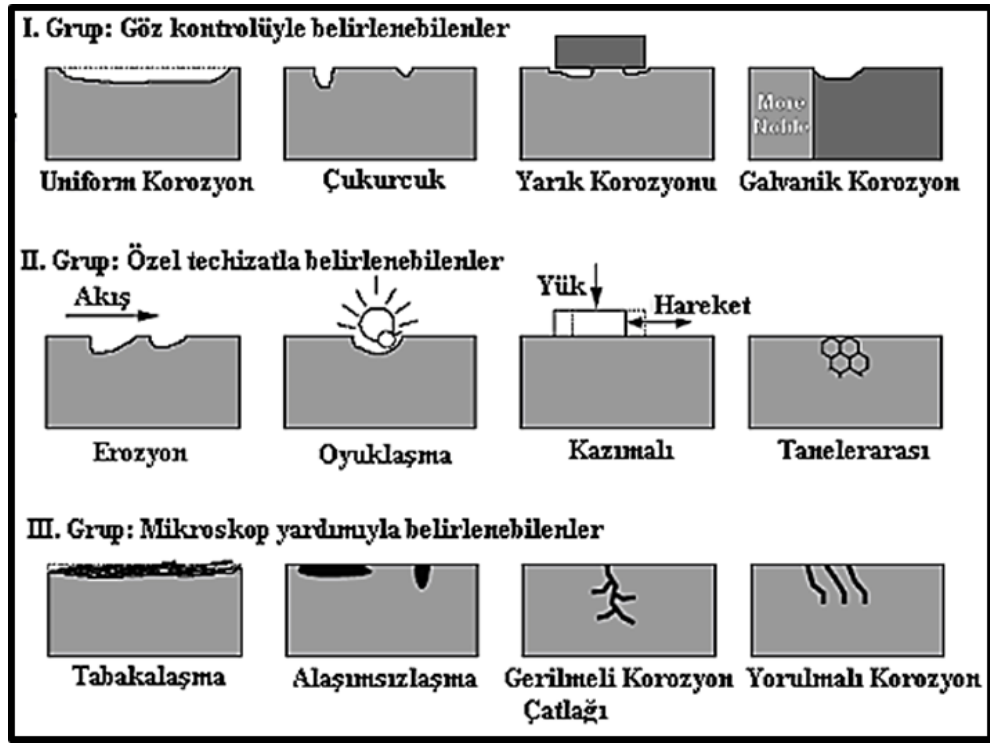
Alüminyum oksit film genellikle iki katmandan oluşur. Metale yakın olan iç oksit tabakası, yalnızca ortamın sıcaklığı ile belirlenen bir kalınlıkta susuz amorf bir tabakadır. Ortam tarafında ise susuz katmanı örten daha kalın, daha az koruyucu olan sulu bir dış oksit tabakası bulunmaktadır [1][34][42][43].



Şekil 2.7 Alüminyum oksit filmi [34]

2.5.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyon Çeşitleri

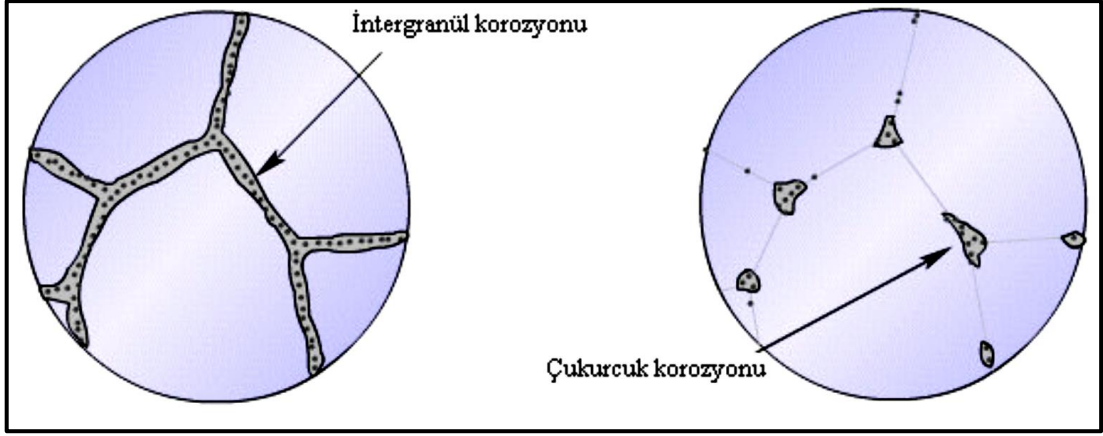
Alüminyum ve alaşımlarında gözlenen korozyon, genellikle alüminyum oksit tabakasında bulunan kusurlar, izler ve intermetalik parçacıklardan kaynaklanır. Sonuç olarak, çeşitli korozyon türleri meydana gelir; bunlar çukurlaşma korozyonu, taneler arası korozyon, galvanik korozyon, filiform korozyon ve gerilmeli korozyondur. Alüminyum ve alaşımlarının korozyon tipleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Alüminyum ve alaşımlarının korozyon çeşitleri [44]

2.5.2.1 Çukurcuk Korozyonu

Lokal taneler arası korozyonun daha basit hali çukurlaşma korozyonudur. Çukurlaşmanın özelliği, metal yüzeyin yalnızca küçük bir bölümünü etkilemesidir. Ancak küçük bir alanda oluşmasına rağmen metal yapının hızla bozulmasına ve katot yüzeyinde anodik reaksiyona neden olur. Oluşan girintilerin sayısı alaşım tipine göre değişir. Örnek olarak, saf alüminyum alaşımlarında mikro yapı içerisinde ki 1-2 cm alanda 100 adet çukur gözlenirken, bakırın ana alaşım elementi olduğu 2xxx serisi alaşımlarda 1-2 cm alanda 1000 adet çukur gözlemlenmiştir. Alüminyumda oyuklaşma korozyonunun oluşma formülü oldukça karmaşıktır ve mekanizma iki aşamadan oluşur. Alüminyumda gözlemlenen oyuklaşma korozyonunun tetikleyicileri, esas olarak oksit tabakasındaki yüzey kusurları veya alaşım elementlerinin ve ortamdaki klor gibi agresif ajanların neden olduğu ayrışmadır. Klorürler lokal olarak oksit tabakasını yok eder ve yüzeyde mikro çatlaklara neden olur. Yüzeyde başlayan birçok çukurdan çok azı uzar. Araştırmalar bize alüminyumda gözlenen çukurlaşma korozyonunun sürekli olmadığını söylüyor. Alüminyumun çukurlaşma korozyonu Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



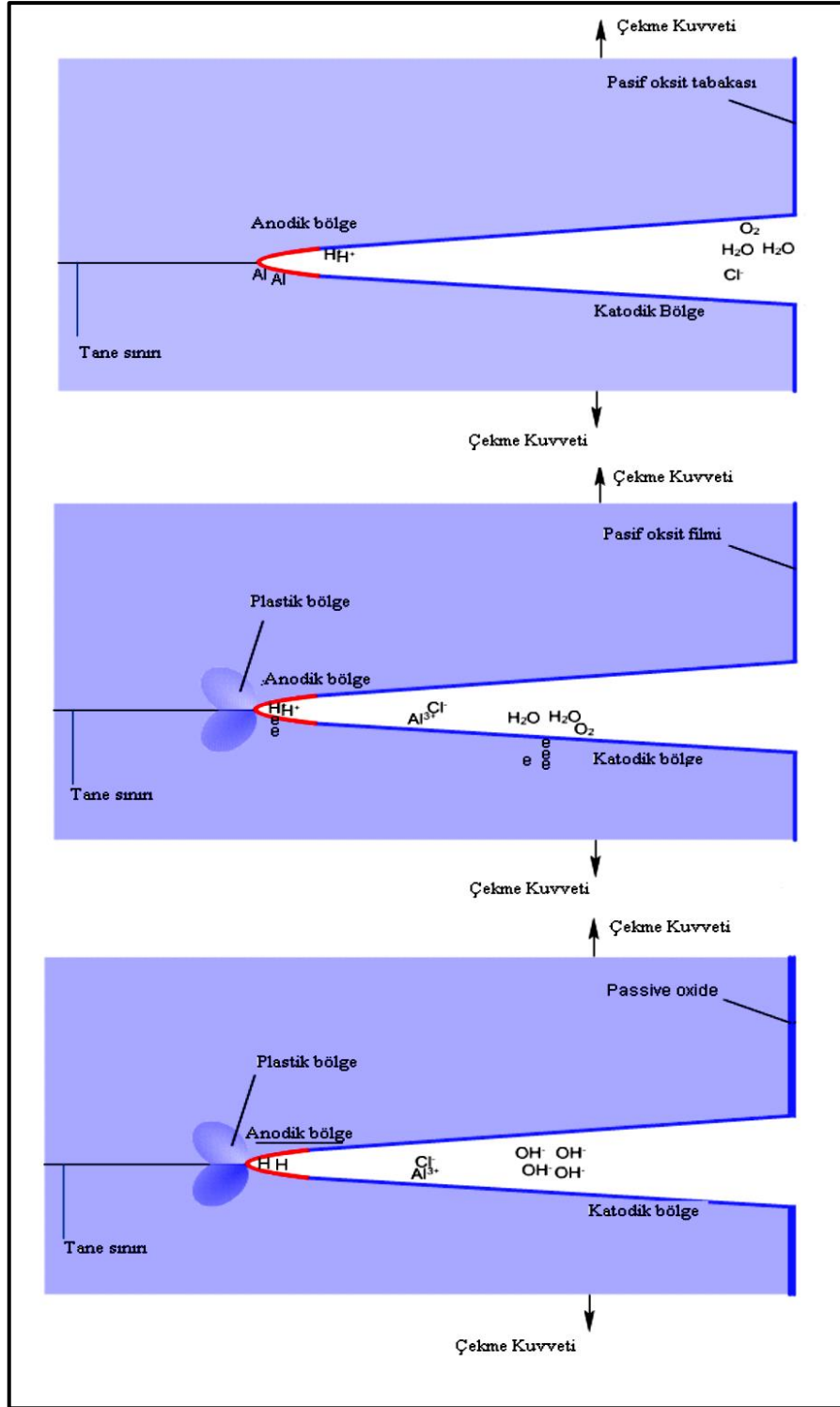
Şekil 2. 9 İçyapıdaki intergranül taneler arası ve çukurcuk korozyonunun görünümü

2.5.2.2 Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyonun oluşabilmesi için üç koşul aynı anda gerçekleşmelidir:

- Gerilmeli korozyon direnci düşük alaşım
- Hasarın oluşmasına uygun ortam
- Yüksek yükleme

Gerilmeli korozyon, ancak bu üç faktörün aynı anda hareket oluşması ve negatif etkiye sahip olması anlamına gelir. Kırılma enerjisindeki azalma tek başına gerilmeli korozyon çatlağını etkilemez. Alüminyumdaki çatlak yolları ağırlıklı olarak taneler arasındır. Çatlaklar tane sınırları boyunca yayılır. Korozyonun tek bir model ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıda olması sonucunda gerilmeli korozyon çatlağının meydana gelmesini açıklayan birçok teori ve model oluşmaktadır [1]. Şekil 2.10'da gerilmeli korozyon gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Gerilmeli Korozyon [1]

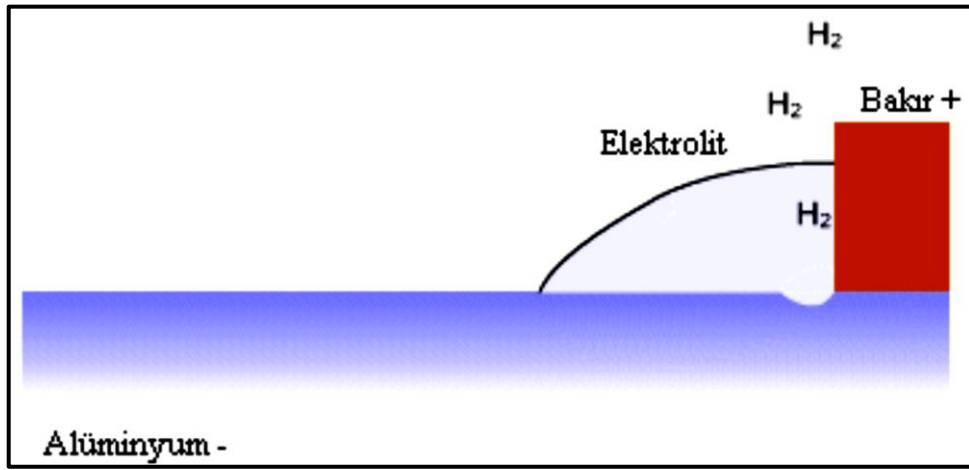
2.5.2.3 Filiform Korozyon

Filiform korozyon, organik kaplamalar altında tipik olarak %40 ila %90 ortam nemi arasında oluşan bir korozyon türüdür. Bu tip korozyona genellikle kaplama kusurları veya mekanik etkiler sonucu yüzeyde oluşan çizikler neden olur. Filiform

korozyonu bir yüzey etkisi ile olmasına rağmen, baskın bir problemdir. Kaplama kusurları olarak, yüzeydeki izler korozif ortam tarafından kuyruk gibi yüzeyde büyümeye zorlanarak filiformların büyümesine neden olmaktadır.

2.5.2.4 Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, bir tür lokalize korozyondur. Oluşabilmesi için, potansiyel farkı en az 50 mV olan iki metal veya alaşımın, korozyona uğratici bir elektrot aracılığıyla birbiriyle doğrudan temas halinde olması gerekir. İki metalden daha az asil olanı, korozyon reaksiyonunda anot görevi görür ve çözünmeye başlar. Bakırın alüminyum metal üzerindeki galvanik korozyonu Şekil 2.11'de gösterilmiştir [1][34].



Şekil 2.11 Alüminyum metalinin bakır karşısında galvanik korozyona uğraması [34]

2.5.2.5 Taneler Arası Korozyonu

Taneler arası korozyon, tanenin kendisinde belirgin bir korozyon olmamasına rağmen, tane sınırının veya yakın alanların korozyonudur. Bu saldırı, tane sınırı ile tane sınırına yakın tane bölgesi arasındaki potansiyel farktan kaynaklanır. Bu korozyon esas olarak 2xxx, 5xxx, 7xxx ve 6xxx serilerinde meydana gelir. İntermetalik bileşikler, tane sınırlarına yakın yarı sürekli bir yapıda büyürlerse, o bölgede taneler arası korozyona neden olabilirler. Bununla birlikte taneler arası korozyon oluşmasında, tane sınırına çökelenler tek neden değildir. Tane sınırı çökmesi sırasında, çözünmüş Cu ve Mg atomları tane sınırları boyunca yayılmasından kaynaklı da oluşur. Şekil 2.9'da taneler arası korozyon gösterilmiştir.

2.6 Çökelme Sertleşmesi

Genel olarak alüminyum alaşımlarının sertliğini artırmanın 2 yolu vardır; Bunlar soğuk işlem ve çökeltme sertleştirmedir. Çökeltme sertleşmesi gösteren alaşımlar; 2xxx, 6xxx ve 7xxx'dir. Günümüzde çok yüksek dayanımlı alaşımlara erişim, bu yöntemlerden birinin veya birkaçının kullanılması ile sağlanır. Alaşım elementleri, özelliklerini değiştirmek ve istenen özellikleri vermek için bir baz metale eklenir. Alaşım elementleri katıldıkça, elektriksel iletkenlik ve süneklikte bir azalmanın yanı sıra sertlik ve mekanik dayanımda bir artış gözlenir. Buna sertleştirici fazdan ötürü katı çökeltme sertleşmesi denir. Duralumin, adını 1. Dünya Savaşı sırasında zeplinlerine ilk kez çökeltme sertleştirmesi uygulayan Alman metalurji şirketi Dürener'den almıştır. Yaşlandırma sırasında oluşan çökeltilerin intermetalik olduğu durumlarda elde edilen sertlik çok daha yüksektir ki bu ideal bir durumdur.

2.6.1 Çözeltiye Alma Isıl İşlemi

Çökeltme sertleşmesi üç temel adım gerektirir.

- Çözeltiye alma ısı işlemi
- Su verme
- Çökelme (yaslandırma) işlemi

Çözeltiye alma ısı işleminde, sertleştirici fazların çözeltiye alınması için çözeltiye alma sıcaklığına ısıtılır ve bu sıcaklıkta bir süre tutulur ve sonra hızlı soğutulur. Hızlı soğutma durumunda, numune su soğutması ile hızlı bir şekilde düşük bir sıcaklığa, genellikle oda sıcaklığına soğutulur.

Oda sıcaklığında su çoğunlukla ani soğutma işlemi için kullanılmaktadır. Su yardımıyla hızlı soğutma sonrası alaşım numunesinin yapısında aşırı doymuş bir katı çözelti elde edilir [26][36].

2.6.2 Isıl İşlem Kondisyonları

Tablo 2.3'te alüminyum alaşımları için üretim koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösteren kondisyonlar verilmiştir. Bu kondisyonlar ve numaralandırılması alüminyum malzeme için gerçekleştirilen üretim süreçleri ve ısı işlemler hakkında bilgi verir.

Tablo 2.4'te ise yaşılandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işleme göre verilen kondisyon numaraları görülmektedir. Proseste hem üretim hem de ısı işlemler bu kondisyonları etkilemektedir [26][36].

Tablo 2.3 Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlem ve üretim kondisyonları [26]

Sembol	Açıklaması
F	Üretim- ürünlerde hiçbir özel ısı kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi
O	Tavlama- uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır.
H	Şekil değiştirme sertleştirmesi- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısı işlem uygulanması takip eder. H' yi genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
W	Çözeltiye alma ısı işlemi- kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşılanmayı sağlayan tav uygulanır.
T	Çökelme Sertleşmesi- Isıl işlem daha sert malzemeler sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme ve ısı işlem sertleştirmesiyle birlikte uygulanır.

Tablo 2.4 Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler [26]

Sembol	Açıklaması
T1	Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaslandırma
T2	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaslandırma
T3	Çözeltiye alma ısıt işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaslandırma
T4	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve doğal yaslandırma
T5	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra yapay yaslandırma
T6	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve yapay yaslandırma
T7	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaslandırma)
T8	Çözeltiye alma ısıt işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaslandırma
T9	Çözeltiye alma ısıt işlemi, yapay yaslandırma ve soğuk şekillendirme
T10	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaslandırma

2.6.3 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme

Alüminyuma eklenen en önemli alaşım elementleri bakır, magnezyum, silisyum ve çinkodur. Bu elementler katı çökelti oluşturur.

Yüksek sıcaklıktaki katı çözelti oluşumu, doymuş çözeltiye ulaşmak için hızlı bir şekilde soğutulduğunda, sertleştirici fazı tane sınırları boyunca çöker. Bu işleme çökeltme sertleşmesi denir. Bakırın yanı sıra magnezyum, silisyum ve çinko içeren alüminyum alaşımları için de yaygın olarak kullanılmaktadır [26][36].

2.6.4 Yaşlandırma

Yaşlandırma işlemi, sertlik ve mukavemette istenen artış meydana gelene kadar malzemenin uygun sıcaklıkta tutulmasını gerektirir. Çökeltme sertleşmesi işleminin amacı, alaşımda ince bölünmüş çökelti oluşturulmasıdır. Aşırı doymuş çökelti kararsız olduğundan, ikinci fazın çökmesi için açık bir eğilim vardır.

Malzeme çözeltiye alındıktan sonra oda sıcaklığında bekletilirse doğal olarak yaşlanmış olur. Çözeltiye alma sonrasında fırında belirli bir sıcaklıkta ve sürede bekletilirse bu yapay yaşlanma olur [26][36].

2.7 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

2.7.1 Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum Üretimi

Türkiye’de ve Dünya’da alüminyum sektörünün giderek büyümesi ile birlikte tüm dünyada ve ülkemizde alüminyum ürünlerine olan ilgi artmakta ve güçlü bir talep olduğu görülmektedir. Alüminyum sektörünün büyüklüğünü ortaya koyan en net veri, Türkiye’de bu sektörde faaliyet gösteren firma sayısı ve çalışan sayısıdır. Yaklaşık 1.500 aktif şirkette 30.000’den fazla kişi istihdam edilmektedir. Son 10 yılda %10 büyüyen sektör, demir dışı metaller ihracatında %35’lik payla ilk sırada yer almaktadır. Yenilenebilir enerji ve güneş panelleri gelecekte alüminyuma olan talebi artıracaktır. Güç dağıtımı için mevcut bakır kablolar, gelecekte alüminyum bazlı bileşenlerle değiştirileceği ön görülmektedir. Alüminyum talebinin ana itici güçleri sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği konuları ile ilgilidir. Karbonsuzlaştırma politikaları ve ulaşım sektöründe fosil yakıtlardan uzaklaşma, elektrikli araç üretimini ve dolaylı yoldan alüminyuma olan ihtiyacı artırmaktadır. Pandemi döneminde özellikle gıda ambalajlama için artan bir talep görülmüştü ve artışın yeni ürünlerde çevre dostu ambalajlara olan talebin artması ile birlikte artacağı düşünülmektedir [29][30].

2.7.2 Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum üretim yöntemine bağlı olarak farklı alanlarda kullanılmaktadır. Dövme ürünler, yarı mamullerin haddeleme, ekstrüzyon, dövme ve tel çekme işlemlerinden geçerek şekil verilmesinden oluşmaktadır. Haddeleme işleminde levha ve plaka gibi yassı ürünler üretilirken, ekstrüzyon işleminde alüminyum biyetler kalıplar aracılığıyla şekillendirilerek içi boş veya dolu profiller elde edilir. Dövme işlemi sırasında, dövme alüminyum ürünler, net bir şekle sahip olacak şekilde alüminyum çubuklardan üretilir. Alüminyumun farklı kullanım alanlarındaki özelliklerinden kaynaklanan bazı avantajlar ve bazı sektörlerde yeni alaşımlarla ikamesinin artması nedeniyle alüminyum tüketimi tüm endüstriyel sektörlerde diğer metallerden daha hızlı artmaktadır. Teknoloji geliştikçe ve

alüminyum yeni uygulamalar buldukça, üretim yöntemleri, ürün tasarımı ve kalite kontrol konularında araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [29][30]. Tablo 2.5'te kullanım alanlarına göre üretimler verilmiştir.

Tablo 2.5 Sektöre göre alüminyum tüketimi tahmini (2014-2025) (bin ton)
[29][30]

Sektör	2014	2015	2020	2025
Ulaşım	18.992	20.129	25.793	32.508
Yapı & İnşaat	15.463	16.445	21.011	27.569
Ambalaj	10.075	10.620	13.790	17.674
Elektrik&Elektronik	9.667	9.997	11.811	13.935
Endüstriyel	6.037	6.330	7.579	9.174
Dayanıklı Tüketim	2.744	2.882	3.361	3.890
Savunma & Diğer	6.872	7.007	7.762	8.674
Dünya Toplamı	69.850	73.410	91.107	113.424

2.7.2.1 Ulaştırma Endüstrisi

Birçok değişken, bir otomobil üreticisinin malzeme seçim kriterlerini etkiler. 21. Yüzyılda, yakıt tüketimi, küresel ısınma ve sınırlı enerji kaynakları gibi konular daha da önem kazanmaya başlamıştır. Bu durumlar, otomotiv alanında malzeme seçimini etkileyen önemli faktörlerdir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri otomobil üretiminde egzoz gazı emisyonu, düşük yakıt tüketimi ve kullanıcı güvenliği için belirli gerekliliklere sahiptir. Bu standartları karşılamak için otomobil üreticileri artık emisyon verimliliğini artırmak için hibrit sistemler ve araç ağırlığını azaltmak için yeni malzemeler geliştirmeye çalışıyor. Bu nedenle otomotiv yapımında kullanılan malzemelerin çevre üzerinde önemli bir etkisi vardır. Hafif malzemeler kullanmak hem ağırlığı hem de yakıt tüketimini azaltmamızı sağlar. Otomotiv endüstrisinde küresel ihtiyaçlardan kaynaklı olarak esas olan ağırlık azaltma hedefi sebebiyle küresel çelik talebinde azalmalar ile

birlikte alüminyum benzeri hafif malzemelerin kullanımında artışlar meydana gelmiştir. Hafif metallerin otomobillerde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte alüminyum ve otomotiv endüstrisi iş birliği yapmaya başlamıştır [29][30].

2.7.2.2 Ambalaj Endüstrisi

Alüminyum ambalajlar su, gaz, buhar, ışık ve mikroorganizmaların geçişini engeller. Sıcağa ve soğuğa karşı dayanıklıdır. Hava değişimlerine ve çevresel etkilere karşı duyarsızdır. Bu özellikleri özellikle gıda ve ilaç alanında aranır malzeme olmasını sağlamıştır. Ultraviyole VE kızılötesi ışınlar ışınlarına karşı korur. Folyo formda vakumlu paketlemede ve metalize folyo formda ısı paketlenmede en çok tercih edilen malzemedir. Folyo ambalajın oluşturduğu güçlü metal katman, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve uzun raf ömrü sağlarken tam ürün koruması sağlar. Gıda endüstrisinde, nispeten düşük asitli sıvıları işleyen tanklar ve bunları taşıyan borular, korozyona dayanıklı alüminyum alaşımlardan yapılır. Burada da aynı sıvılar ve kimyasallar benzer alaşımlardan yapılmış tanklarda taşınır. Tahıl ambarlarının ve tahıl taşıma araçlarının gövdeleri, taşıma verimliliğini artırmak için yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından yapılmıştır [29][30].

2.7.2.3 Gıda Endüstrisi

Alüminyum kutu toplama ve geri dönüşüm programları, artan toplumsal farkındalık ve alüminyum üreticilerinin desteği ile hızla büyümüştür. Alüminyumun en çok kullanıldığı alanlardan biri de içecek kutularıdır. Alüminyum kullanımının birçoğunu oluşturan metal meşrubat kutularının dünyada %80'i alüminyumdan üretilmektedir. Bunun sebepleri arasında hafiflik, kolay açılabilirlik, darbe dayanımı, sağlamlık, geri dönüştürülebilirlik ve hızlı soğuma özellikleri sayılabilir [29][30].

2.7.2.4 Elektrik / Elektronik Endüstrisi

Alüminyumun elektrik iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle yüksek gerilim hatlarında en çok tercih edilen iletken malzemelerden biri halinde gelmiştir. Alüminyum ayrıca yer altı kablolarında, elektrik borularında ve motor sargılarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Muhafazalar, yongalar, transistör soğutucuları,

veri kayıt panoları ve ekipman muhafazaları, elektronikte alüminyumun ana uygulamalarıdır [29][30].

2.7.2.5 İnşaat Endüstrisi

Alüminyum, diğer yapı malzemelerine göre düşük ağırlığı ve üstün dayanım/ağırlık oranının yanı sıra korozyona karşı da oldukça dayanıklıdır. Hafifliği, yüksek korozyon direnci, dayanıklılığı, az bakım gerektirmesi, geri dönüştürülebilirliği ve çok yönlülüğü nedeniyle çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerde, merdivenlerde, çatı ve bina iskelelerinde, mimari sera yapımında da kullanılmaktadır. Metal ve farklı şekillerde sonsuz profil oluşturma imkânı sağlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan alüminyum, eloksallı kaplaması sayesinde hem sağlamlık hem de dekoratif özellikler açısından inşaat sektörüne birçok seçenek sunmaktadır. Son yıllarda, inşaat için alüminyum küresel olarak genişlemiş ve büyük bir pazar payı kazanmıştır [29][30].

2.7.2.6 Diğer Kullanım Alanları

Alüminyum ve alaşımları ayrıca buzdolapları, dondurucular, havalandırma sistemleri, spor malzemeleri ve mutfak aletleri imalatında kullanılmaktadır [29].

2.7.2.7 Alüminyum ve Alaşımlarının Yeni Kullanım Alanları

Gelecekte enerji daha değerli hale gelirse, alüminyum içeren piller yeni bir uygulama alanı olarak yaygın bir şekilde kullanılacaktır. Kurşun piller veya nikel-kadmiyum pillerle donatılmış elektrikli araçların seyir menzilinın artık alüminyum içerikli pillerle 100 kilometreden 300 kilometreye çıkarılabileceği hesaplanıyor. Alüminyum içerikli piller, sıradan kurşun pillere göre yedi kat daha fazla enerji depolayabilmektedir. Bununla birlikte, maliyet hala yüksek olduğundan, araştırmalar maliyeti düşürmeye devam ederek yaygın olarak kullanılabilir hale getirecektir. Alüminyumun bir diğer önemli uygulama alanı cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlardır. Bir diğer önemli yeni uygulama alanı, rijitlik-ağırlık oranının önemli olduğu havacılık endüstrisidir. Alüminyum köpük paneller ve sandviç paneller de yakın zamanda kullanılmaya başlanmıştır. Köpüklü alüminyum kullanımı, hafifliği ve korozyon direnci nedeniyle deniz taşımacılığında oldukça avantajlı bir malzemedir. Alüminyum köpük panel üretim süreci nedeniyle, özellikle özelleştirilmiş ürünlerin seri üretimden daha önemli

olduğu nakliye endüstrisinde iyi bir alternatiftir. Alüminyum köpük panel, alüminyumun en çok kullanılan endüstri olduğu inşaat sektöründe en popüler malzemedir. Binaların giydirme cephe, bölme ve çatı kaplamalarında kullanılan mükemmel bir yalıtım malzemesidir. Ayrıca ses yalıtımı özelliğinden dolayı viyadük ve otobanlarda gürültü bariyeri olarak kullanılmaktadır. Alüminyum köpük panel, hareketli köprü ve prefabrik yapıların yapımında oldukça avantajlı bir malzemedir. Alüminyum köpük panel, endüstriyel uygulamalar için çok yüksek bir potansiyele sahiptir [29][30].

3.1 Alüminyum Döküm Yöntemleri

Alüminyum döküm yöntemleri de alaşım serilerinde olduğu gibi gruplara ayırmak mümkündür. Alüminyum döküm yöntemlerini sürekli döküm ve bir kalıbın şeklini alarak yapılan süreksiz döküm yöntemlerine ayırmak mümkündür. Sürekli dökümde kendi içerisinde yarı-sürekli ve sürekli döküm olmak üzere ikiye ayrılır. Yarı sürekli döküm haddeleme için üretilen slablar ile ekstrüzyon için üretilen biyetleri içerir. Yarı sürekli dökümde alüminyum ürünler bir kuyuya dökülür ve döküm kuyusunun boyunun kısıtlı olması prosesi yarı sürekli hale getirir. Yatay da gerçekleşen dökümler ise boy kısıtı olmadığı için sürekli olarak devam eder.

Sürekli döküm yönteminde soğuk haddeleme prosesi için kullanılan levhaların dökümü; ikiz merdaneli veya ikiz bantlı sürekli döküm yöntemiyle, tel çekme prosesi için kullanılan kabloların üretimi Properzi döküm tekerleği ile dövme prosesi için çubuklar, yatay DC döküm ile gerçekleştirilir.

Sürekli olmayan döküm yöntemlerinde ise kullanılan kalıba bağlı olarak, kalıcı kalıba döküm ve harcanabilir kalıba döküm olarak ikiye ayrılmaktadır.

Harcanabilir kalıba döküm yönteminde döküm parçayı kalıptan çıkarmak için yapılan her dökümde kalıbın bozulması ve yeni kalıbın hazırlanmasını gerektirmektedir. Üretim hızını belirleyen sınırlayıcı faktör genellikle dökümün gerçekleştirilmesi süresinden ziyade kalıp hazırlanması için geçen süreden kaynaklanmaktadır. Harcanabilir kalıba yapılan döküm yöntemleri kalıp türüne göre; Kum kalıba döküm, kabuk kalıba döküm, vakumlu kalıplama, kaybolan köpük, hassas döküm, alçı kalıba döküm ve seramik kalıba döküm yöntemlerinden oluşmaktadır. Kalıcı kalıba döküm yönteminde ise daha yüksek üretim hızlarına ulaşılması metalden veya diğer dayanıklı malzemelerden yapılan kalıpların birçok dökümde tekrar tekrar kullanılabilmesi sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Kalıcı kalıba yapılan döküm yöntemleri türüne göre; yüksek basınçlı döküm, metal

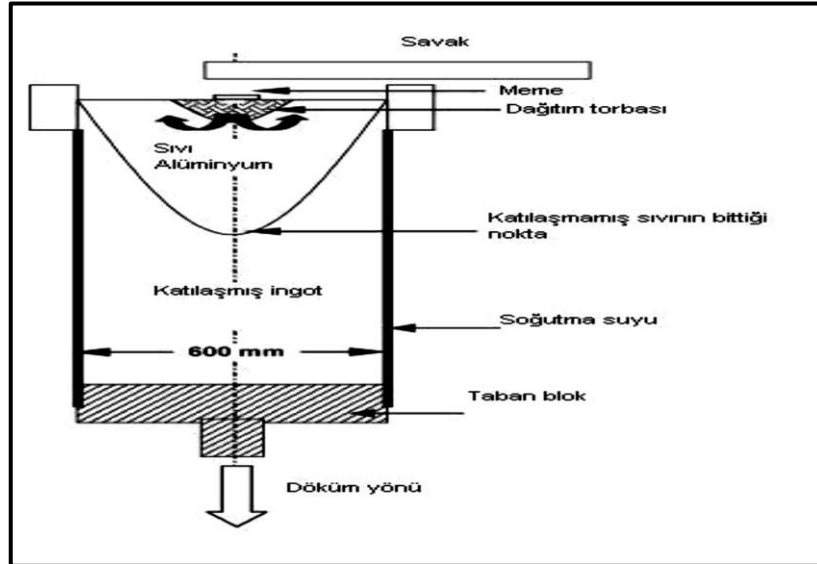
kalıba döküm, düşük basınçlı döküm, sıkıştırma döküm ve savurma döküm yöntemlerinden oluşmaktadır

3.1.1 Sürekli ve Yarı-Sürekli DC Döküm Yöntemi

VAW (Almanya) ve Alcoa (ABD) tarafından icat edilmiştir ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun haricinde bakır, çinko ve magnezyumda da bu yöntem kullanılmaktadır. DC İngilizce de “Direct-Chill” yani ani soğutmanın kısaltmasıdır. Bu isim yöntemin soğutma şeklinden gelmektedir. DC döküm genellikle düşeyde yarı sürekli olarak gerçekleştirilen bir döküm yöntemidir. Bazı uygulamalarda yatay da sürekli DC döküm gerçekleştirilmiştir. Hadde slabı ve ekstrüzyon biyeti üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Dövme alaşımları ile DC döküm yöntemi ile aşağıdaki dökümler gerçekleştirilebilir:

- Ekstrüzyon biyetler yatay ve dikey olarak üretilebilir. Dikey olarak yapılan üretimler maksimum 10 metre uzunluğunda yarı sürekli olarak gerçekleştirilir.
- Sıcak hadde levha ve plaka üretiminde kullanılacak olan slablar dikey DC döküm yöntemi ile üretilmektedir.



Şekil 3.1 Geleneksel düşey DC döküm [45]

DC dikey dökümün şematik diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Döküm çukurunun üzerindeki döküm tablası sabitlenir ve metal, uygun kesitteki biyet ya da slab dökümü için su soğutmalı kalıplarda katılaştırılır. DC işleminde, fırından kalıba yolluklarla sıvı metal transfer edilir. Tabla üstünde ki yolluklar kalıplara sıvı metal akışını dağıtır. Kalıpların su soğutma sistemi, doğrudan katılma için ince kanallar ile kalıp içerisinde dolaşır. Biyet katılaştıkça, alt tabla kuyunun dibine doğru inmeye devam eder. Sıvı metal, kalıp içerisine sürekli olarak döküm hızına uygun şekilde beslenir ve su soğutmalı kalıp tarafından soğutulur. Kalıptan katı halde çıkan alüminyum üzerine soğuk su püskürtülerek soğutulur.

DC yöntemiyle dökülen slab veya biyet homojenleştirme ısı işlemine tabi tutulur. Homojenizasyon ısı işleminden sonra slab, sıcak haddeleme ile istenen levha kalınlığa indirilir. Alüminyum biyetler ise ekstrüzyon preslerinde istenilen şekillerde profil olarak üretilir [45][46].

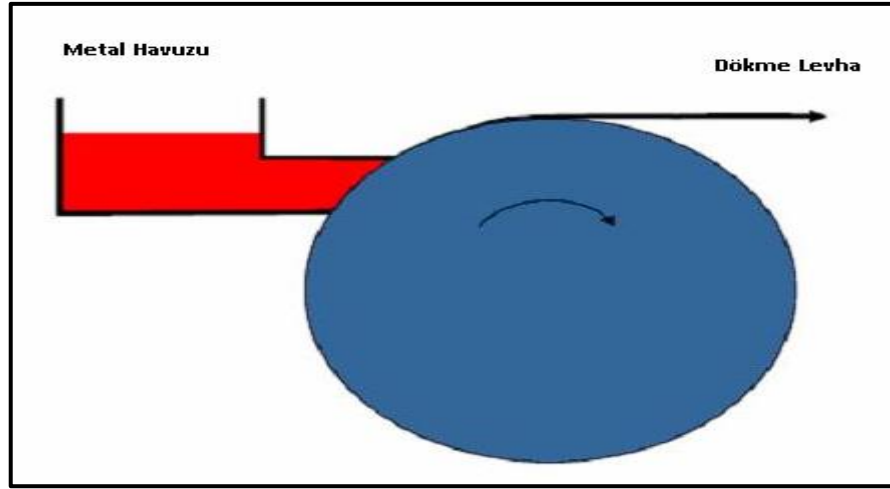
3.1.2 Sürekli Levha Dökümü

Levha dökümünün endüstriyel ölçekte gelişimi, levha döküm işleminin 1930'larda ve 40'larda dövme alaşımlar için DC döküm işleminin yerini almasıyla başlamıştır. 1950'lerde Hunter Mühendislik, ikiz merdaneli sürekli döküm makineleri geliştirmiştir. William Hazelett bağımsız olarak iki sonsuz çelik kayışın arasından levha sürekli dökümünü geliştirilmiştir. Günümüzde Hazelett makinaları çinko, bakır ve bakır alaşımları üzerinde de kullanılmaktadır. Sürekli döküm prosesi, yüksek verim ve düşük yatırım maliyeti nedeniyle birçok modern fabrikanın ilk tercihi haline gelmiştir. Ancak bazı durumlarda bu teknik sınırlıdır. Bu teknik kullanılarak tüm alüminyum alaşımları dökülemez. Genellikle 1xxx, 3xxx, 5xxx, 8xxx serisi alüminyum alaşımları üretilmektedir. Sürekli döküm prosesi ile üretilen dökümler, geleneksel DC döküm prosesi ile üretilenlere göre daha ince olduğu için döküm sonrası haddeleme prosesinin tasarımı da farklıdır. Sürekli döküm levha ürünlerinin çoğu sıcak haddeleme gerektirmez ve daha az soğuk haddeleme ve tavlama adımı nedeniyle nihai ürünü elde etmek için gereken işlem maliyeti ve süresi daha düşüktür [47, 48]. Sürekli döküm işlemi, alüminyum levhalar, şeritler, folyolar ve yassı ürünler üretmek için kullanılır. Sürekli döküm işleminde dökülen levhalar literatürde yassı ürünler olarak da anılmaktadır.

Sürekli döküm işlemi ile 3 ila 20 mm kalınlıktan 2150 mm genişliğe kadar malzeme dökümü yapılabilir. DC işleminden farklı olarak, şerit döküm ile üretilen ilk ürün, yarı mamul olarak kabul edilebilir. Sürekli döküm prosesi ile üretilen ürünler, geleneksel prosesler ile üretilen ürünlerin kalitesine sahip değildir. Sıcak olmayan haddeleme üretiminde, yüksek kalite gereksinimleri olan ürünlerde sorunlar vardır. Magnezyum içeriği %3'ten fazla olan alaşımların sürekli dökümü kolay değildir. Ayrıca, sürekli döküm ile yapılan ürünlerin şekillendirilebilirliğinin belirli sınırlamaları vardır [49,50].

3.1.2.1 Tek Merdaneli Döküm

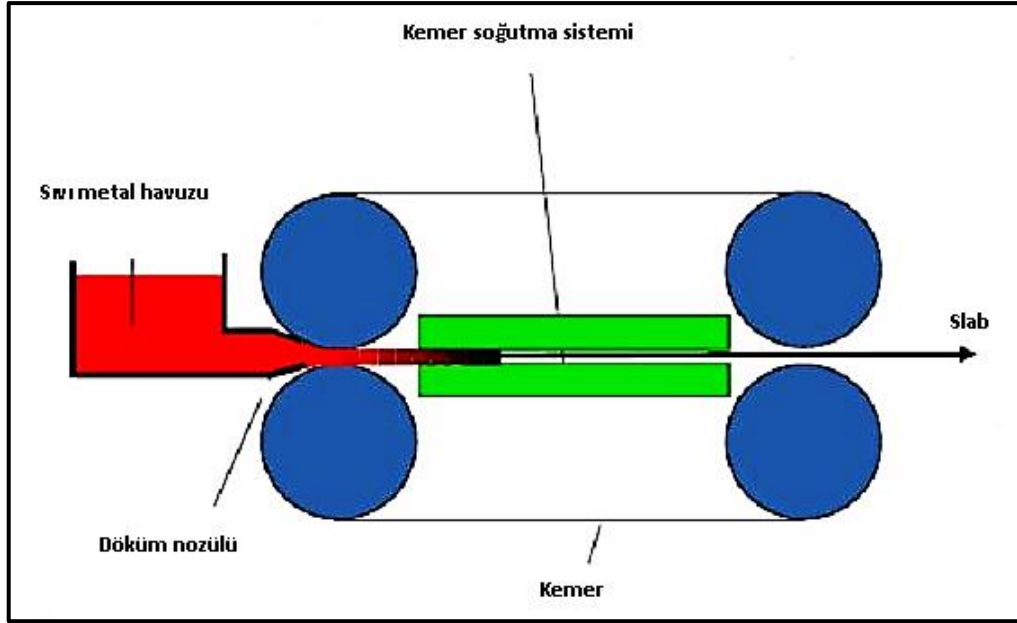
Sıvı metal, dahili su soğutmalı merdane (döküm tekerleği) ile çelik kayış arasına dökülür. Sıvı metal, merdane ve çelik kayış yüzeyiyle temas eder ve burada katılaşır. Merdane yüzeyine temas eden ve katılaşan levhalar döner merdane ile çelik kayışın temasının bittiği yerden çıkar. Şekil 3.2, tek merdaneli döküm işlemini göstermektedir [47].



Şekil 3.2 Tek merdaneli döküm [47]

3.1.2.2 Hazelett Döküm

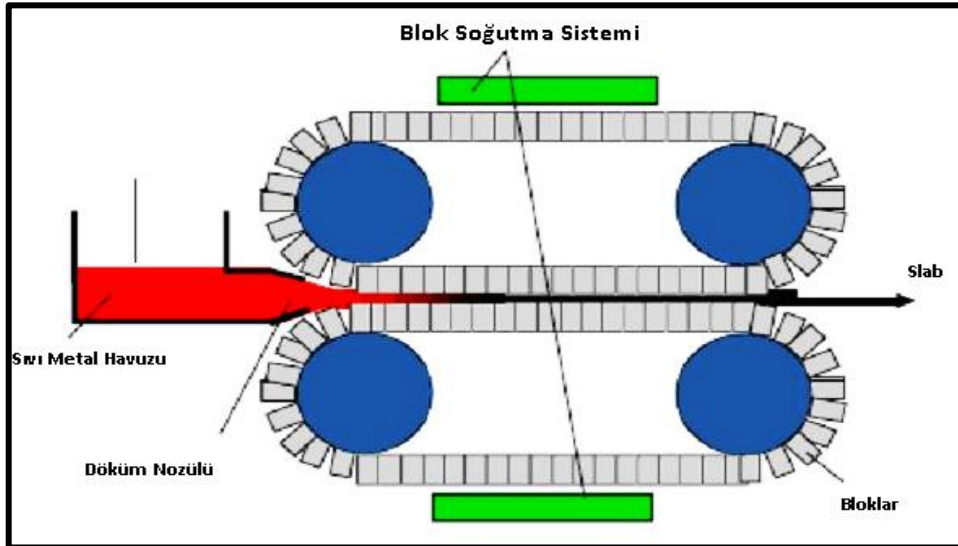
Sıvı metal; ikiz bant döküm yönteminde sistemi çevreleyen şekil 3.3'de gösterildiği gibi çelik bant arasında katılaşmaktadır. Hazelett döküm prosesi olarak adlandırılan bu yöntem, 15 ila 20 mm kalınlığında ve 1500 mm genişliğinde levhalar üretebilmektedir. İkiz merdaneli dökümden daha geniş çeşitlilikte alaşımlar üretilir. Proses, içecek kutuları ve gövde panellerinin üretimi için uygundur [47][48].



Şekil 3.3 Hazelett döküm [47]

3.1.2.3 Blok Döküm Teknolojisi

Soğutma blokları birbirine göre ayarlanabilecek şekilde zıt yönlerde hareket eden hat üzerine monte edilmiştir. Sıvı metal bu bloklar arasında katılaşmaktadır fakat bloklar arasındaki küçük aralıklar yüzünden bu aralıklardan metal sızıntısı olarak yüzeyde kıymık benzeri kusurlara yol açmaktadır. Blok döküm prensibi Şekil 3.7'de gösterilmiştir [47].

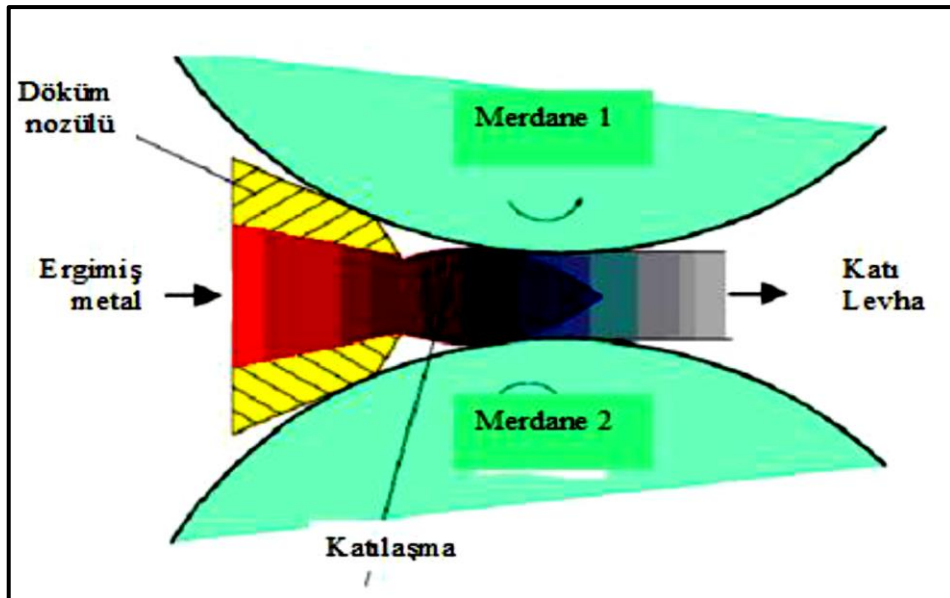


Şekil 3.4 Blok döküm prensibi [47]

3.1.2.4 İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi

Döküme uygun sıcaklık ve seviyede olan ergimiş metalin tandış öncesi gaz giderme ve filtrasyon gibi metal rafinasyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir. İkiz merdaneli sürekli döküm prosesinde, tandışe gelen rafine edilmiş sıvı metal tip adı verilen ve dökülen levhanın boyutlarını ayarlamayı sağlayan, seramik bir kalıba aktarılır. Bu tipler döküm öncesinde tip ısıtma fırınlarında ısıtılır. “İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi” olarak belirtilen sürekli levha döküm tekniğinin bu şekilde adlandırılmasının sebebi, birbirlerine zıt yönde dönen iki merdanelerin arasındaki boşluktan beslenen ve su ile soğutulan ergimiş metalin katılaşmasını içermesidir. Bir dökümün geniş levha döküm olarak adlandırılabilmesi için genişliğinin 1200-2300 mm olması gerekmektedir. 6 mm kalınlık için uygun döküm hızı 1m/dk’dır ve bu döküm, dar katılaşma aralığına sahip alaşımlar için uygun olmaktadır. Genellikle, saf alüminyum, 3xxx ve magnezyum oranı %2,5’a olan 5xxx alaşımları bu yöntemle üretilir. Yüksek magnezyum barındıran alaşımlarda döküm hızının daha yavaş olmasının sebebi katılaşma aralığının geniş olmasıdır.

Şekil 3.5’de ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemindeki katılaşma bölgesinin kesiti gösterilmiştir [47] [48] [49] [50].



Şekil 3.5 İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemindeki katılaşma bölgesinin kesiti [48]

Alüminyum levha üretimi için ikiz merdaneli döküm yöntemi Hunter Mühendislik tarafından ilk olarak 1948 yılında geliştirilmiştir. Hunter döküm makinası adıyla bilinen ikiz merdaneli döküm makinaları ile levha döküm, kalın slabların sıcak haddeleme ile daha maliyetli olması yerine ucuz bir alternatif oluşturmuştur. Sıcak hadde maliyetinden kaçma 1950 ve 1960'lı yıllarda popülerleşmiştir. Fata Hunter markasıyla ikiz merdaneli levha dökümde kullanılan döküm makinalarına metal seramik kalıp yardımıyla ergiyik metal, merdaneler arasına 15 derecelik açıyla yerleşir. Döküm genişliği ve döküme uygun alaşımlar sınırlıdır. 1970'lerin sonunda yapılan Super Caster ve daha sonrasında Speed Caster makinaları yapılmıştır. 2134 mm genişlikte kenarı kesilmiş levha dökabilen makinelerde dar katılaşma aralığına sahip alüminyum alaşımları için kullanılmaktadır. İlk makinelerde su ile soğutulan merdaneler yatay olarak yerleştirilmiştir ve refrakter besleme kalıbı ergimiş metali aşağıdan beslemektedir [51]. Novelis firması tarafından geliştirilen 3CM makinelerle üretilen levha kalınlıkları tipik olarak 3-12 mm'dir ve döküm hızı alüminyum için 1,6 m/dk'dır. Geleneksel ikiz merdaneli döküm makinesinde merdaneler düşük hıza sahip olup, son ürün döküm alüminyum levha kalınlığı 6-10 mm arasındadır. [51][52][54][55].

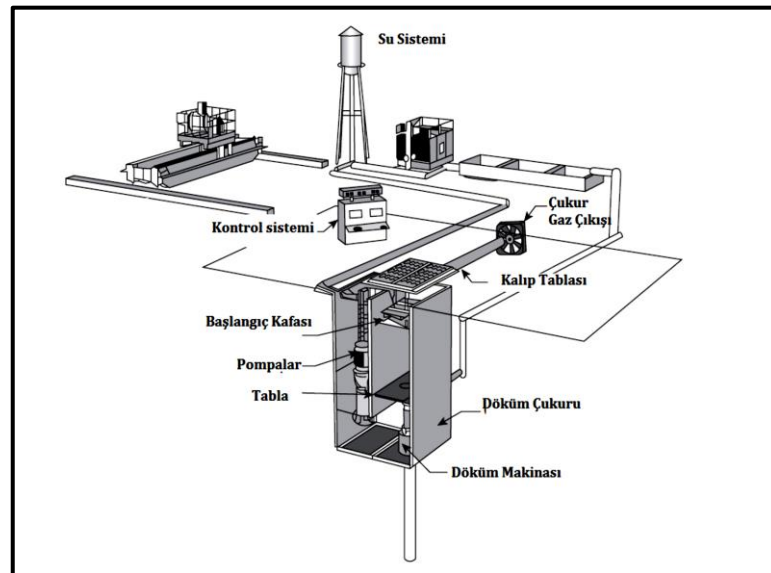
3.2 Metal Ergitme ve Rafinasyonu

Uzun yıllar hurdanın yeniden ergitilmesiyle üretilen alüminyum, boksitten üretilen birincil metalden daha az değerliydi. Bunun nedeni, genellikle geri dönüştürülmüş olan metalin birincil alüminyuma göre daha düşük olan saflığı konusundaki endişeydi. Ergimiş alüminyum için rafinasyon teknolojisinin geliştirilmesi, bu düşüncenin artık var olmamasının ana nedenidir. Geri dönüştürülmüş metalin artık hemen hemen her uygulamada birincil ile rekabet edebilir hale gelmesini sağlayan rafinasyon teknolojisi, geri dönüştürülmüş alüminyumunu çevresel faktörler nedeni ile tercih edilen malzeme haline getirmiştir. Ergimiş alüminyumunu rafine etmek için kullanılan teknolojinin çoğu sadece son otuz yılda geliştirilmiştir ve bir zamanlar alüminyum üretim akış şemasında küçük bir dipnot olan şey şimdi dökümde en önemli hususlardan biri haline gelmiştir. Geri dönüşüm tesisleri tarafından kullanılan rafinasyon yöntemi ve teknolojisinin seçimi birkaç faktöre bağlıdır. Bunlar; yeniden ergitilen hurdanın türü, kullanılan fırının türü, üretilen ürünün türü ve en önemlisi müşterilerin ihtiyaçlarıdır.

Alüminyum alaşımlandırılması esnasında hem birincil hem de ikincil alüminyum kullanılır bu nedenle, yeniden ergitilmiş alüminyum hurdasının rafine edilmesi için kullanılan teknolojinin çoğu, ergimiş birincil metali rafine etmek için de kullanılır. Temel prensipler aynı olduğu için, ikincil alüminyum için arıtma teknolojisinin yöntemi esasen genel olarak ergimiş alüminyumun rafine edilmesinin bir yöntemidir [28].

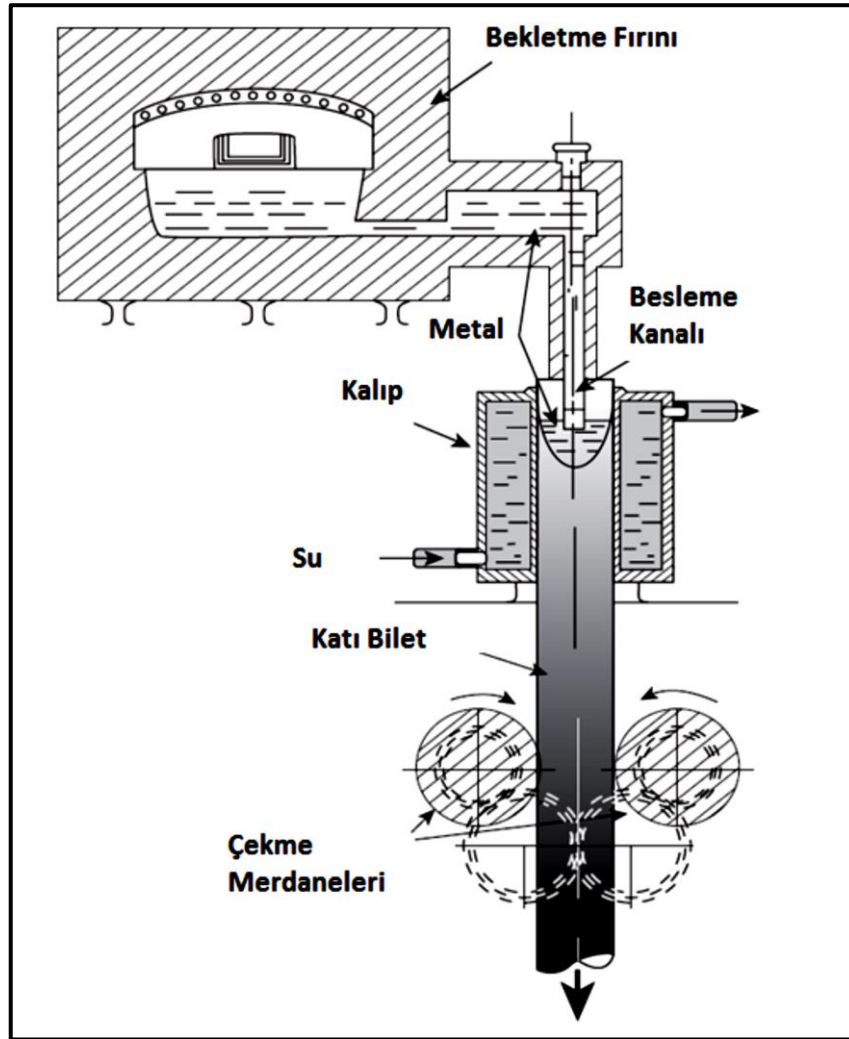
3.3 Yarı Sürekli Döküm Teknolojisi (D.C. Döküm)

1930'ların sonlarında, alüminyum uçaklar dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktaydı. Askeri ve sivil uçak geliştirmeye devam etmek için dövme alüminyum ürünlerin seri üretimine ihtiyaç vardı. Haddeleme, ekstrüzyon veya dövme için gerekli olan alüminyum biyet ve slab üretim teknolojisinin gelişimini dikkate alırsak, 1924'ten 1939'a kadar kalıcı kalıplarda döküldüklerini görmekteyiz. Kalıcı döküm işlemi ile üretilen plakalarda üç ana sorun vardı. Bunlar; döküm sırasında türbülanslı akış, soğutma sırasında hava boşluklarının oluşması ve malzeme boyunca değişen düşük soğutma hızları. Bu problemlerden yola çıkılarak sürekli döküm adı verilen bir prosesin iyileştirilmesi çözüm olarak bulunmuştur [24]. Sistem şekil 3.6'da gösterildiği gibi birçok komponentten oluştuğu için daha kompleks bir yapıya sahiptir [53].



Şekil 3.6 Direkt soğutmalı döküm sistemi yerleşimi [45]

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi Siegfried Junghans 1930’ların başında bugün kullandığımıza benzer bir teknik geliştirdi ve makineleri ilk olarak Almanya’daki Wieland fabrikasında pirinç dökmek için kullanılmıştır. Kalıp, su ceketı ile çevrili, her iki tarafı açık bir bakır borudan oluşmuştur. Sıvı metal kalıba üstten verilmiştir ve katılaşılan metal alttan silindirler aracılığıyla çekilerek döküm hızı ayarlanmıştır. Kalıptaki ergiyiğin sabit bir seviyede tutulması için ergiyik beslemesini çekme hızına senkron olarak ayarlamak için özel bir sistem kullanılmıştır. Katı metalin kalıp duvarlarına yapışmasını önlemek için kalıp yağlanmış ve yukarı, aşağı sallanmıştır. Bu başarılı süreç, o tarihlerde Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri’nde bakır ve alüminyum alaşımlarının dökümü için yaygın olarak kullanılmıştır [24][27].



Şekil 3.7 Junghans tarafından geliştirilen alüminyum biyet dökümü [24]

Sürekli döküm işlemi, bugün endüstride alüminyum kütük dökümü için kullanılan en yaygın işlemdir. Hammaddenin alınması ile nihai döküm süreci arasında birçok süreç vardır. Konvansiyonel sürekli döküm ile üretilen biyetlerin katılaştırılması iki soğutma yöntemi ile gerçekleştirilir. Sıvı metal önce başlatma kafası adı verilen bir taban plakasına dökülür. Ergimiş metal kalıp içinde belirli bir yüksekliğe ulaştığında alt tabla, Ergimiş metalin akış hızına eşit bir hızla aşağı iner. Bu yöntemde, döküm ürünün enine kesit şekli kalıbın şekli ile belirlenir, genellikle haddelenmiş ürünler için dikdörtgen, ekstrüde edilmiş için dairesel olur. Taban, zincir veya hidrolik sistem ile belirli bir hızda indirilir. Su soğutmalı kalıbın duvarlarıyla temas halindeki sıvı metal, hemen katılaşır. Sıvı-katı geçişinin neden olduğu büzülme nedeniyle katılaşma metalin dış yüzeyi içe doğru büzülerek ısı transferini engelleyen bir hava boşluğu oluşturur. Dış yüzey daha sonra katılaşma sırasında meydana gelen büzülme nedeniyle kalıp duvarlarından ayrılır. Dış yüzeyin bu şekilde şekillendirilmesi ve büzülmesi, katılaşmış metalin sürekli olarak kalıptan çıkarılmasına izin verir [47]. Katılaşma için kalıp duvarından kalıba ısı transferine "birincil soğutma" denir. Katılaşma, bu bölgede var olan birçok mekanizma nedeniyle karmaşıktır. Kalıbın hemen altındaki bir delik, ikinci bir soğuma periyodunu başlatarak yüze su püskürtür. Püskürtülen su sonucunda hızlı soğutma, katılaşmanın hızlıca gerçekleşmesine katkıda bulunmaktadır. Bu durum da tanecik ve mikroyapısal değişikliklerle kolayca gözlemlenmesine sebep olur. Ancak katılaşan metalin merkezine yaklaştıkça soğuma hızı düşer ve yapı giderek kabalaşır. Ergiyiğin çoğu katılaştıktan hemen sonra, metal içinden geçerken katı malzeme içinde huni şeklinde bir boşluk oluşur. Belirli bir sıvı metal derinliği her zaman vardır ve derinliği döküm koşullarına bağlıdır. Döküm hızına bağlı olarak bu derinlik artabilir. Katılaşma hızı düşük olduğunda daha derin çukurlar oluşur ve açıları küçülür. Döküm hızları genellikle 50 ile 100 mm/dk arasındadır. Sürekli dökümün katılaşma hızı, su soğutmasız kalıba dökümden neredeyse 10 kat daha hızlıdır. Katılaşma hızındaki bu farklılık, dökümün yapısında önemli değişikliklere yol açabilmektedir. Sürekli dökümde, hızlı soğumadan kaynaklı taneler daha incedir. Sürekli dökümde, hızlı ısı iletimi, tanelerdeki alaşım elementlerinin homojenleşmesini engeller, bu nedenle tane

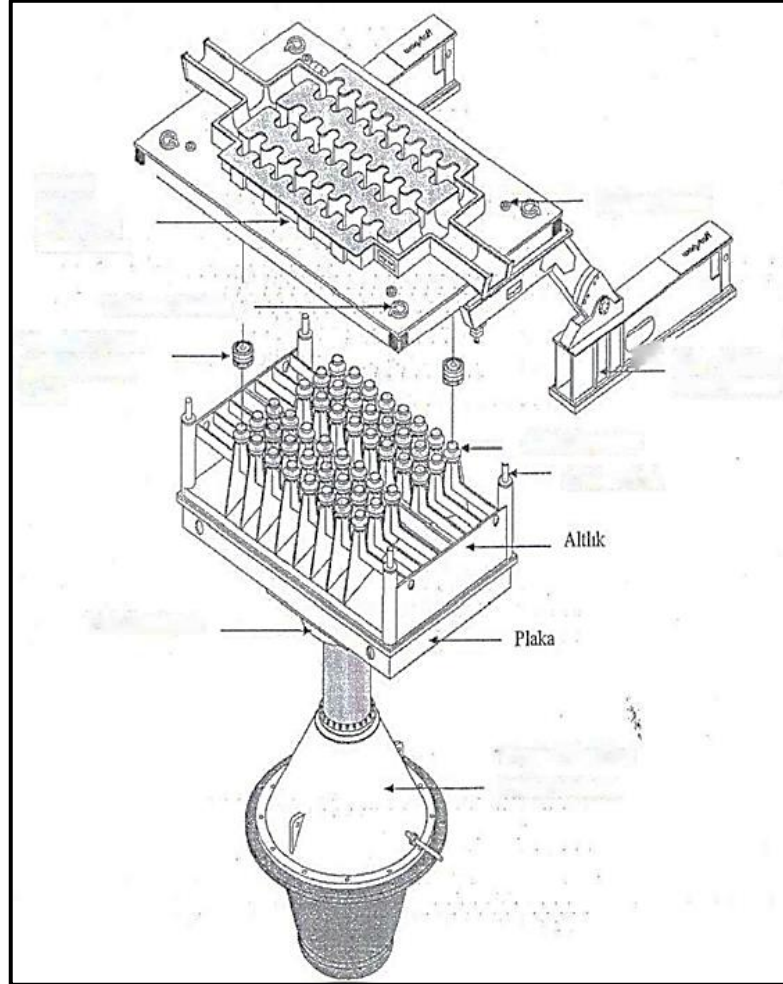
aşırı doygunluğu ve çökelme, yavaş soğutmalı sürekli dökümden daha yüksektir. Aşırı doygunluk ve tane ayrışması homojenleştirme ile ortadan kaldırılabılır.

Farklı biyet çapları ve farklı seriler için DC dökümde buna uygun farklı döküm kalıpları gerekmektedir. Bu soruna çözüm olarak, modüler kalıp tasarımları ile halihazırda kullanılan döküm makinelerinin kapasiteleri büyük oranda artabilmektedir. Modüler tasarım, tabla bileşenlerinin çabuk bir şekilde değiştirilmesini sağlar. Bu tasarım, aynı makinede farklı hız ve biyet boyutlarının kullanılmasına izin verir [45, 46].

3.3.1 Düşey Yarı-Sürekli Alüminyum Biyet DC Döküm Yöntemi

Günümüzde ekstrüzyon biyeti, dikey yarı sürekli döküm işlemi kullanılarak üretilmektedir. Sıvı metal doğrudan fırın yolluğundan, özel bir refrakter malzeme ile kaplı döküm tablası üstü yolluklardan su soğutmalı bir kalıplara akmaktadır. Tabla üzerindeki sıvı metal her kalıba ulaştığında, döküm başlatılır ve tabla üstündeki metal seviyesi sadece hafifçe dalgalanacak şekilde akış sağlanır. Geleneksel DC döküm proseslerinde, biyetin ısısı katılaştırma işlemi sırasında kalıp duvarlarından atılır. Bunun sonucunda kalın ve homojen olmayan bir dış kabuk oluşur. Wagstaff AirSlip prosesinde ise kalıp yoluyla gerçekleşen soğuma oranı çok düşüktür. Doğrudan suyla olan ikincil soğutma işlemi biyetteki ısının büyük bölümünü alır. Bu da sıvı bölümünün sıg olmasını ve çok ince kabuklu, ince taneli, yüzeyi kusursuz derecede pürüzsüz biyetler elde edilmesini sağlar. Wagstaff AirSlip prosesinde geleneksel kalıp tasarımına göre daha kısa bir kalıp, daha yüksek döküm hızı, bağımsız su püskürtme delikleri, kalıptan ısı atılmasını en az düzeye indiren ve ikincil soğutmayı artıran bir hava yataklaması kullanılır. Wagstaff AirSlip kalıbına beslenen yağ ve hava, döküm halkasının etrafındaki kanalların içinden akar. Hava karışımı geçirimli grafit halkanın içinden akarken, ergimiş alüminyum ile döküm halkası arasında bir hava yataklaması oluşturur. Bu yataklama, Ergimiş alüminyumun grafit halkayla temas etmesini önler. Wagstaff AirSlip kalıbının kısa olması ve kalıp tarafından soğutmanın minimum düzeyde tutulması nedeniyle, kalıptan çıktığı anda biyetin yüzey sıcaklığı geleneksel yöntemlerdekinden daha yüksektir. Bu sıcak yüzeyi yeterince soğutmak için suyun yüzeye daha büyük bir kuvvetle çarpması gerekmektedir. Bu nedenle AirSlip

kalıplarında, geleneksel kalıplardakinden daha yüksek su akış hızı ve daha geniş bir çarpma açısı kullanılır. Wagstaff dikey yarı sürekli döküm makinesi ve bileşenleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Wagstaff düşey sürekli döküm makinesi [46]

Döküm sıcaklığı, sürekli dökümde kusursuz ve sorunsuz döküm elde etmek için malzeme cinsine göre en optimum döküm sıcaklığının belirlenmesi ve sağlanması gerekmektedir. Aynı soğutma koşullarında, dökümün kalıptan çıktıktan sonra katılaşma mesafesinin daha kısa olması idealdir. Bu, döküm sıcaklıklarını olabildiğince düşük tutarak elde edilir. Ancak döküm sıcaklığının belirli bir seviyenin altına düşürülmesi erken katılaşmaya neden olabilmekte ve kalıp beslemesi tıkanması, akışın bozulması gibi sorunlara yol açabilmektedir. Döküm süresi düşürülebildiği için aşırı ısınma sıcaklığı da azaltılabilir. Böylece enerji ve refrakter malzemelerden tasarruf edilebilir.

3.3.2 Yatay Sürekli Alüminyum Biyet DC Döküm Yöntemi

Genel olarak sürekli döküm teknolojisinin gelişim aşamalarında döküm kalıbı dikey olarak konumlandırılmıştır ve endüstride yaygın olarak dikey döküm kullanılmıştır. Bu durumun bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajların başında döküm boyu kısıtı gelmektedir. Sürekli döküm prosesinde kalıbın yatay olarak konumlandırılması bazı avantajlar sağlamaktadır. Bunlar, yatayda boy kısıtı olmadan sürekli döküm yapmayı, yatay döküm kalıbı konumlandırılması sayesinde metal içerisindeki oksitte azalma, ergiyik metal debisi kontrolüne ihtiyaç duyulmamasını ve düşük akış nedeniyle metalik kirliliklerin döküme gitmesini engellemeyi sağlamaktadır. Genellikle bu döküm yönteminde kullanılan kalıplar bakırdan imal edilmiştir. Kimi uygulamalarda kalıp malzemesi olarak alüminyum da kullanılmıştır. Kalıplar, iç kısmında su soğutma ceketlerine sahiptir. Genel itibariyle, yatay döküm ile ilgili çalışmalar döküm hızı ve tane küçültme üzerinden ilerlemiştir [47].

3.3.3 Alüminyum Biyet DC Döküm Değişkenleri

Döküm hızı ve sıcaklığı, kalıp tipi, metal yüksekliği ve su akış hızı alüminyum biyet dökümünde üretim verimini etkileyen temel değişkenlerdendir.

3.3.3.1 Döküm Sıcaklığı

Oksidasyonu ve gaz emilimini önlemek adına fırında bulunan ergiyik metal sıcaklığı olabildiğince düşük olmalıdır. Tablo 3.1’de gösterildiği gibi genel olarak sıvı alüminyum, alaşımın likidüs sıcaklığının 28 °C’nin üstündeki sıcaklıklara erişilip dökülmesi gerekmektedir.

Tablo 3.1 Alüminyum alaşımlarının likidüs ve döküm sıcaklıkları [46]

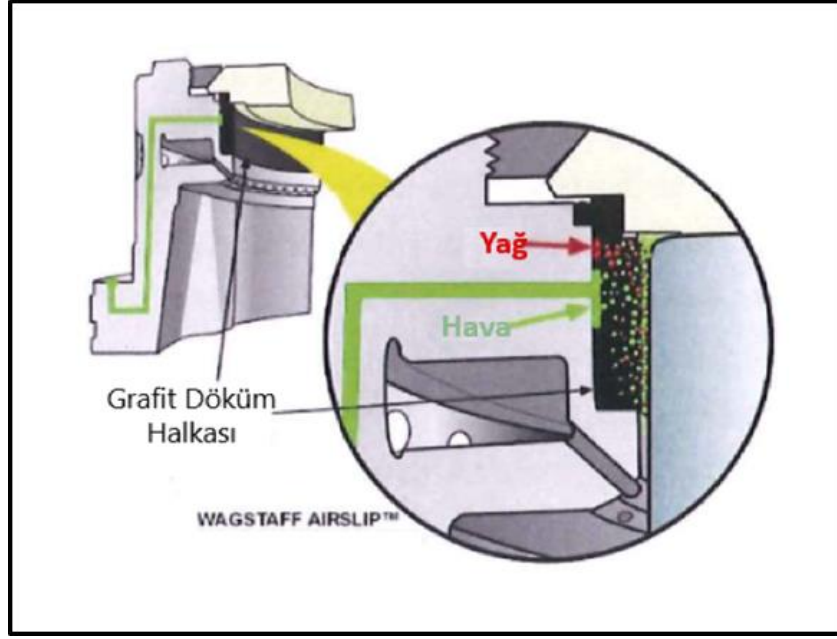
Alaşım Sistemi	Likidüs Sıcaklığı °C	Döküm Sıcaklığı °C
Al, AlMn	660	688
AlMg, AlMgSi	650	678
AlCuMg, AlZnMgCu	640	668

3.3.3.2 Döküm Hızı

DC döküm yönteminde döküm hızı prosesin birçok noktasını belirleyen ana faktörlerden biridir. Döküm hızı, biyet çapı ve döküm yapılan alaşım serisine bağlı olarak değişiklik gösterir. Genellikle, çap büyüdükçe ve daha yumuşak alaşımlardan sert alaşımlara geçilince döküm hızı düşmektedir. 228 mm çapındaki AA 6063 biyet dökümü için tercih edilen döküm hızı 102 mm/dk'dır.

3.3.3.3 Kalıp Tipi

Kalıp malzemesi hafif, kolay işlenebilirlik ve yüksek ısıl iletkenlik gibi özelliklere sahip olmalıdır. 6061 T-651 ısıl işleme tabi tutulmuş alüminyum alaşımıdır ve uygun döküm kalıbı malzemeleridir. DC kalıplar, soğutma suyunun önce kalıp duvarlarına temas edeceği ve ardından kalıptan çıkarken döküm yüzeyine püskürtüleceği şekilde tasarlanır. Bu DC döküm ilkeleri göz önünde bulundurularak, farklı tipte kalıplar geliştirilmiştir. DC döküm biyetlerde bulunan yüzey ve yüzey altı kusurlarının soğuma sırasında kabuk oluşumundan sonra oluşan boşluklarla ilgili olduğu bilinmektedir. Boşluklar kalıba ısı akışını yavaşlatır ve katılaşmış metalin yeniden ergimesi kusuruna yol açar. Wagstaff AirSlip hava yataklı kalıplama teknolojisi 1983 yılında geliştirildi ve üstün yüzey kalitesi ve yapısal performans için MaxiCast yönteminin yerini aldı. Wagsatff Airslip kalıp teknolojisi hava ve yağ beslemesi yapan grafit döküm halkasına sahiptir. Bu sayede geleneksel yöntemle göre biyetin kalıp yüzeyine teması engellenerek, pürüzsüz yüzeyler elde edilir. Wagstaff Dual-Jet teknolojisi ile sürekli soğutmanın sağlanabilmesi için biyet yüzeyine temas eden suyun geri sekmesinden ziyade yüzeyi sıyrarak biyet üzerinde akması istenir. Bunun için, farklı açılarda iki soğutma suyu deliği kullanılır. Birinci delik yüzeye su çarpmasını sağlarken, ikinci delik ise çarpıp geri seken suyun biyet yüzeyinde kalmasını sağlanmaktadır. Kalıp kesiti şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Wagstaff Airslip döküm kalıbı [46]

3.3.3.4 Metal Yüksekliği

Kalıbın dibinden ergiyik metal seviyesine kadar olan mesafe metal yüksekliği olarak adlandırılmaktadır. İdeal metal yüksekliği döküm tablasının üst yüzeyinden 40 mm aşağıda olmalıdır.

3.2.1.5 Su Akış Hızı

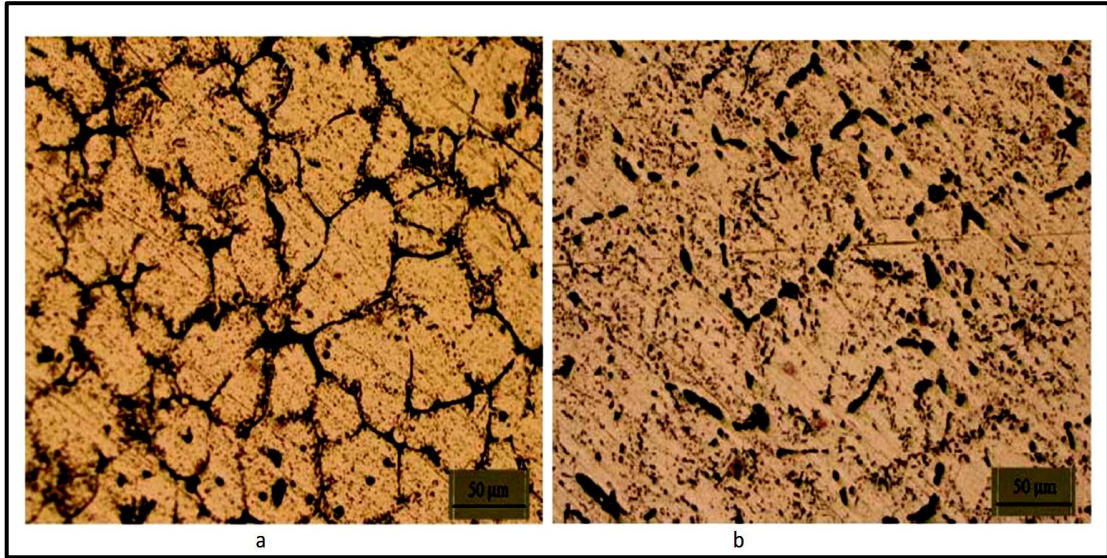
DC döküm sırasında katılaşmanın verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için yaklaşık 1 Mj/kg ısı transferi gerekmektedir. Bu ısının biyetten verimli bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için döküm prosesi sırasında kalıba beslenen döküm suyu debisi ve döküm suyu sıcaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir.

3.4 Biyet Dökümü Sonrası Isıl İşlemler

3.4.1 Homojenizasyon Isıl İşlemi

Dökülmüş biyetler, ekstrüzyondan önce homojenizasyon ısı işlemine tabi tutularak, döküm koşulu altında elde edilen biyet kalitesi ideal değildir ve sonraki işlemlerde şekillendirilebilirlik açısından zayıftır. Homojenleştirme işlemi üç ana adımdan oluşur bunlar; biyeti belirli bir oranda ısıtmak, belirli bir süre boyunca sabit bir sıcaklıkta tutmak ve makul bir hızda soğutmaktır. DC Döküm ile üretilen biyet belli bir süre yüksek sıcaklığa maruz bırakılır.

Yüksek sıcaklıklarda difüzyon artar ve alaşımanın konsantrasyon farkı azalır. Homojenleştirme işleminin sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, homojenlik o kadar hızlı sağlanır. Öte yandan, lokal ergimeyi önlemek için homojenleştirme sıcaklığı, her bir alaşım mikro yapısındaki en düşük ergime sıcaklığına sahip fazın ergime sıcaklığını geçmemelidir. Biyet soğutması, homojenleştirme sürecinde önemli bir rol oynar ve sonraki süreçleri etkiler. Biyet, şarj işlemi sırasında hızlı ve eşit bir şekilde soğutulmalıdır. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının homojenleştirme ısı işlemi sırasında tane sınırlarındaki, sürekli ve iğne benzeri β -AlFeSi, kesikli ve küresel yapıları α -AlFeSi'ye dönüşerek şekillendirilebilirliği artırılır. Homojenizasyon ısı işlemi sonrasında şekil 3.10'da gösterildiği gibi incelenen mikroyapıda β 'dan α 'ya dönüşüm yapının homojenlik oranını vermektedir [7].



Şekil 3.10 AA 6063 için sırasıyla döküm sonrası (a) ve homojenizasyon sonrası (b) mikro yapı resimleri

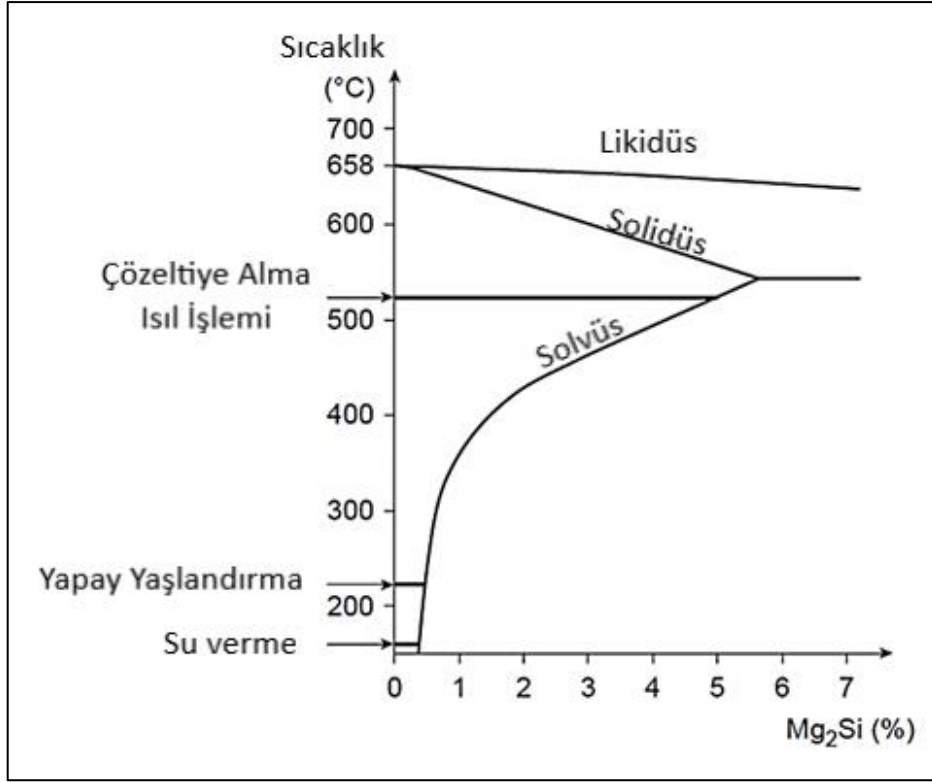
3.4.2 Çözeltiye Alma

Çökeltme sertleşmesi gösterebilen her alaşımanın ısı işlemi iki adımlı çözeltiye alma ve çökeltme işlemleriyle gerçekleştirilmektedir. 6xxx serisi için Mg_2Si sertleştirici fazın önce çözeltiye alma işlemi ile matris fazda çözündürülmesi ve daha sonra yaşlandırma işlemi ile bu sertleştirici fazın yeniden çöktürülmesi esasına dayanmaktadır. Çözeltiye alma ısı işlemi çözeltiye alma sıcaklığına çıkarılıp bu sıcaklıkta ısı ve zamanın etkisi ile beraber difüzyon mekanizmasıyla alaşımda yer alan ikincil fazın alaşımanın yapısına alınması sağlanır.

Çözeltiye alınmış yapı, çözeltiye alma sıcaklığından oda sıcaklığına aşırı doymuş çözelti elde etmek amacıyla aniden soğutulur. Genellikle ekstrüzyon profil üretiminde pres çıkışında çözeltiye alma sıcaklığına ulaşılır ve bu sıcaklıktan pres çıkışında ani soğutma ile çözeltiye alma ısı işlemi gerçekleştirilir.

3.4.3 Çökeltme Sertleşmesi

(1xxx) saf alüminyum, ana alaşım elementi olarak manganez (3xxx) veya magnezyum (5xxx) içeren ve diğer elementlerden sadece küçük miktarlarda içeren alaşımlar, çökeltme sertleşmesi göstermedikleri için deformasyon (gerinim) sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Saf alüminyum, çökeltme sertleştirme sağlamak için çözeltiye girebilecek kayda değer miktarda elemente sahip değildir. Bu nedenle, saf alüminyum, 3xxx ve 5xxx serisi alaşımlar için soğuk haddeleme, gerdirme, çekme veya bunların bazı kombinasyonları, sertleştirme için uygulanan başlıca yoldur. Öte yandan, bakır içeren 2xxx serisi, çinko ve magnezyum içeren 7xxx serisi ve magnezyum ve silisyum içeren 6xxx serisi gibi alaşım serileri kayda değer bir derecede çözeltiye girer ve kayda değer bir çökeltme sertleşmesi için olanak sağlar. Bu nedenle, çözeltiye alma ısı işlemi çözeltiye alınmasına izin verecek yüksek sıcaklıkta tutma, çözelti içinde tutmak için yeterince hızlı bir soğutma ve ardından doğal yaşlandırma (oda sıcaklığında bekletme) veya yapay yaşlandırma (bir fırında orta derecede yüksek bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletme) ile gerçekleştirilir. Sonuç olarak bakır içeren 2xxx, magnezyum ve silisyum içeren 6xxx veya çinko ve magnezyum içeren 7xxx alaşım serileri daha yüksek mukavemetli serilerdir. Şekil 3.11’de gösterildiği gibi alüminyum biyet içerisinde hem magnezyum hem de silisyum mevcut olduğunda, Mg_2Si fazı ile mükemmel çökeltme ile sertleşme yeteneği sağlar. Bu, genel olarak mükemmel korozyon direnci ile birlikte, ısı işlem görmeyen alaşımlara kıyasla daha yüksek mukavemetlerle ulaşmasını sağlar. 6xxx tipi alaşımlar, ekstrüde edilmesi en kolay alüminyum alaşımları arasındadır ve bu nedenle, karmaşık şekiller için yaygın olarak kullanılır. Çözeltiye alma ısı işleminden hemen sonra bir miktar doğal yaşlanma başlar, bu nedenle şekillendirme işlemleri malzeme su verildikten hemen sonra planlanmalıdır.



Şekil 3.11 Yaşlanma adımlarındaki sıcaklık ve çözünme yüzdeleri [34]

4.1 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan 6082, 6063, 6061 ve 6005-A malzemeler, deneylerde kullanılan ekipmanlar ve yapılan analizler ile ilgili bilgiler verilecektir. Deneyler için gerçekleştirilen ergitme, döküm, homojenizasyon ısıtma işlemi ve sertlik ölçümleri Arslan Alüminyum tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıtma işlemi, mikroyapı analizleri ve korozyon testleri Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneyler için kullanılan 6xxx alüminyum alaşımı malzemeler Arslan Alüminyum dökümhanesinde Wagstaff Air Slip dikey döküm makinesi ile dökülmüş bilyelerdir. Alüminyum'un ergitilmesi ve alaşımlandırılması Sistem Teknik ergitme ve tutma fırınında gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1'de 6xxx alaşımların kimyasal kompozisyonları verilmektedir.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan 6xxx alaşımların kimyasal kompozisyonları

Alaşım Elementleri	6061	6082	6063	6005-A
Si	0,565	0,994	0,412	0,612
Fe	0,192	0,206	0,197	0,260
Mg	0,872	0,684	0,480	0,517
Cu	0,205	0,045	0,024	0,093
Mn	0,050	0,520	0,032	0,146
Cr	0,065	0,009	0,004	0,058
Ti	0,023	0,020	0,022	0,022

4.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Ekipmanlar

4.2.1 Dökümde Kullanılan Ekipmanlar

Alüminyum biyet dökümünde doğalgaz ile çalışan brülörlere sahip reverber tipi fırınlar kullanılmıştır. Bu fırınların haciminin 3'te 1'lik kısmını sıvı alüminyum banyosu oluştururken 3'te 2'lik kısmını fırın atmosferi oluşturur. Şekil 4.1'de Reverber Fırına yüklenen hurda profiller görülmektedir. Sıvı metal oluştuktan sonra analize göre sıvı alüminyum banyosu içerisindeki kütleye uygun olarak alaşımlandırma yapıldı. Alaşım döküme uygun olduktan sonra fırın şekil 4.2'de görüldüğü gibi hidrolik devirme silindirleri yardımıyla devrilerek yolluklara sıvı metal akışı sağlanmıştır. Yolluklar vasıtasıyla fırında alaşımı hazır olan sıvı metalin döküm tablasına ulaşması sağlanmıştır. Sıvı metale yolluklarda ağırlıkça % 93 alüminyum % 5 titanyum ve %1 bor içeren Al-5Ti-1B aşılama yapılarak dökümde tane inceltmesi ve çatlak oluşumunun engellenmesi sağlanmıştır. Yine döküm tablasına giden yolluklarda sıvı metale rafinasyon işlemi uygulanmıştır. Döküm yapı içerisinde boşluklara neden olacak sıvı metal içerisindeki çözünmüş hidrojen döner Novelis degazer yardımı ile argon gazı verilerek giderilmiştir. Bir diğer rafinasyon işlemi ise seramik köpük filtre yardımı ile metalik safsızlıkların sıvı metal içerisinden giderilmesi sağlanmıştır. 228 mm alüminyum biyet dökümü Wagstaff Air Slip döküm makinesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Ergitme fırınına hurda profil şarjı



Şekil 4.2 Ergitme fırınının döküm için devrilmesi

4.2.2 Thermo Scientific ARL 3460 Optik Emisyon Spektrometresi

Deneysel çalışmalarda kullanılan 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri Thermo Scientific ARL 3460 optik emisyon spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir.

4.2.3 Homojenizasyon Fırını

Döküm sonrası biyetlerin homojenizasyonundaki önemli parametrelerden biri homojenizasyon sıcaklığıdır. Bu sıcaklık, malzeme içerisindeki en düşük ergime sıcaklıklı faza göre seçilir ve bu sıcaklığın bölgesel ergimelerin olmaması için geçilmemesi gerekir. 228 mm çapındaki 4 farklı alaşımda dökülmüş biyetlerin homojenizasyon ısı işlemi 585 °C'de 8 saatte ısıtılıp bekletildikten sonra 4 saatte oda sıcaklığına soğutulması ile yığma (batch) tipi homojenizasyon fırınında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'de Sistem Teknik homojenizasyon fırını gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Homojenizasyon fırını

4.3 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar ilk başlangıçta istenilen alaşımların ergitme fırınlarında hazırlanması ve sonrasında doğrudan soğutmalı (DC) dikey döküm makinesi ile dökülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Dökülen biyetler homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutularak şekil alabilirliği artırılmıştır. Malzemeler çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında farklı yaşlandırma koşullarına tabi tutulmuştur. Farklı ısıl işlem koşullarındaki biyetlere korozyon testi ve mikro yapı incelemeleri yapılarak karşılaştırma sağlanmıştır.

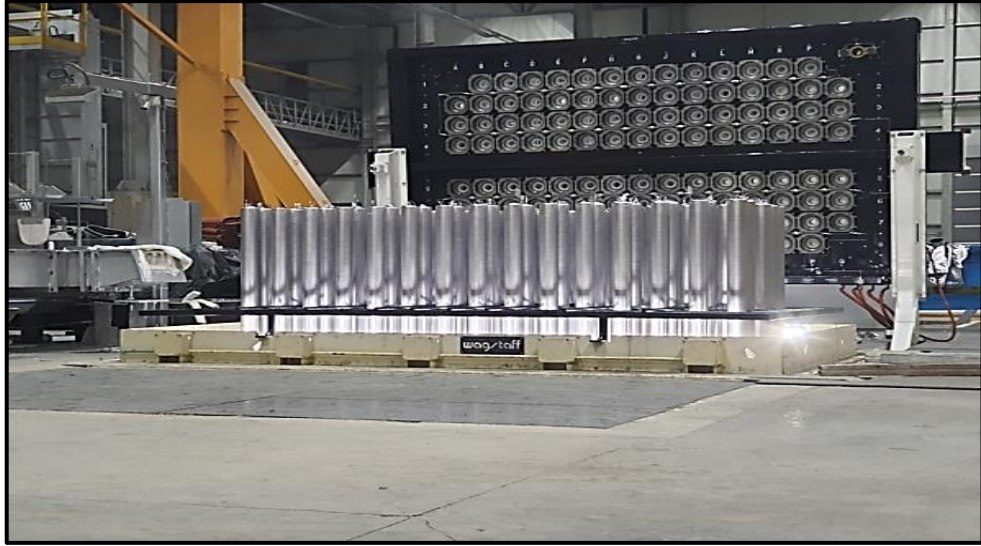
4.3.1 Döküm

Ergitme fırınlarında hurda ve külçelerin ergitilmesi sonucu elde edilen sıvı metal bekletme fırınlarına aktarılır ve kimyasal kompozisyona göre gerekli alaşım elementleri eklenir. Deneysel çalışmalarda kullanılan 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri Thermo Scientific ARL 3460 optik emisyon spektrometresi kullanılarak, ergiyik banyosu içindeki sıvı alüminyumun kimyasal kompozisyonuna bakılarak, uygun alaşım aralığına göre magnezyum, siliyum, mangan, bakır ve krom ilavesi yapılmıştır. Standartlar içinde ki istenilen kompozisyon alınan numune de elde edildikten sonra fırın döküm için devrilmeye başlanmıştır.



Şekil 4.4 Tabla üstünde kalıplara dağılan sıvı metal

Döküm tablasına gelen rafine edilmiş metal, Şekil 4.4’de görüldüğü gibi yolluklar vasıtası ile kalıplara dağılmıştır. Tüm alaşımlar için döküm tablası üstünde sıvı alüminyum sıcaklığı döküm boyunca 685-695 °C aralığında tutulmuştur. Tüm kalıplar sıvı metal ile dolduktan sonra döküm başlatılmıştır. Alt tabla kontrollü olarak döküm hızında aşağı doğru hareket etmeye başlamıştır. Döküm hızı genel olarak döküm biyet çapına göre değişkenlik gösterir. Bizim deneyimiz için kullandığımız biyetler 228 mm çapında olup, döküm başlangıcında ilk 93 mm boya kadar 86 mm/dk döküm hızı ile başladıktan sonra 102 mm/dk döküm hızı ile devam etmiştir. İstenilen alışımda 6400 mm boyunda dökülen biyetler için toplam döküm süresi 1 saat sürmüştür. Her alaşım için ayrı ayrı 6400 mm boyunda dökümler gerçekleştirilmiştir. Kalıpta katılaşan biyetin üzerine hızlı soğutma için su verilmiştir. Katılaşma ve hızlı soğutma ile sağlanan mukavemet için çapa göre değişiklik gösteren döküm suyu debisinin kontrolü proseste büyük önem arz etmektedir. 228 mm çapında ki biyetler için dökümde ilk başlangıçta 170 mm boya kadar 3700 litre/dakika su debisi sağlanmış olup, sonrasında 5300 litre/dakika su debisi ile döküme devam edilmiştir. Biyet katılaştıkça döküm kuyusunun aşağısına doğru uzamıştır. Biyet istenilen boya gelince döküm sonlandırılmıştır ve kuyudaki biyetler çıkarılarak dökümdeki istenmeyen yapının giderilmesi için homojenizasyon ısı işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.5’de döküm sonlandıktan sonra Wagstaff döküm kuyusundan çıkarılan biyetler gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Döküm sonlandıktan sonra Wagstaff döküm kuyusundan çıkarılan biyetler

4.3.2 Isıl İşlem

Döküm sonrası heterojen yapının, sonraki plastik deformasyon süreçleri için daha iyi şekil alabilir hale gelebilmesi amacıyla homojenizasyon ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem üç aşamadan oluşur bunlar; ısıtma, tutma ve soğutmadır. Döküm sonrası biyetlerin homojenizasyonundaki önemli parametrelerden biri homojenizasyon sıcaklığıdır. Bu sıcaklık, malzeme içerisindeki en düşük ergime sıcaklıklı faza göre. 228 mm çapındaki 4 farklı alaşımda dökülmüş biyetlerin homojenizasyon ısıtma işlemi 585 °C'de 8 saatte ısıtılıp bekletildikten sonra 4 saatte oda sıcaklığına soğutulması ile batch tipi homojenizasyon fırınında gerçekleştirilmiştir. Döküm biyetlerden homojenizasyon ısıtma işlemi öncesi ve sonrası numuneler alınmıştır Alınan numuneler Struers Labotom-3 kesme cihazı ile kesilerek boyutları 15 mm x 15 mm x 40 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin çözeltiye alma ısıtma işlemi 550 °C'de 2 saat boyunca gerçekleştirilmiştir, ardından oda sıcaklığında suda soğutma yapılmıştır. Bu numunelerin içinden seçilen bir grup bir hafta (168 saat) sürede doğal yaşlandırılmıştır. Diğer numuneler ise sırasıyla, yetersiz yaşlandırılmış (UA), pik yaşlandırılmış (PA), aşırı yaşlandırılmış (OA), olarak adlandırılan koşulları elde etmek için 4 saat, 8 saat, 24 saat boyunca 180 °C'de yapay olarak yaşlandırılmıştır. Doğal yaşlandırılmış (NA) ve döküm koşulundaki numuneler (AC) olarak adlandırılmıştır.

4.3.3 Brinell Sertlik Testi

Döküm, homojenizasyon ve yaşlandırma sonrası biyetlerden numunelere OMAG 330 SRD sertlik cihazında 62,5 kg yük altındaki 2,5 mm bilye uçlu Brinell sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik testi her numune için 4 kez tekrarlanmıştır.

4.3.4 Metalografik İnceleme

Dökümden gelen numuneler ile farklı yaşlandırma koşullarına tabi tutulmuş numuneler metalografik olarak hem daha rahat hazırlamak hem de korozyon testlerinde çözelti kabına sığabilmesi için ilk aşamada boyutları küçültülmüştür. Numuneler 240 numara zımparadan 2000'e kadar kademeli olarak zımparalandıktan sonra sırasıyla 1 μm ve 0.25 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Dağlama işlemi Keller ayracı (2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCl , 1,0 ml HF , 95 ml su) ile 35 saniye süreyle yapılmıştır. Metalografik incelemeler görüntü analizörü destekli Nikon Eclipse MA 100 ışık mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

4.3.5 Korozyon Testleri

Deneyisel çalışmalarda korozyon testleri olarak Potansiyodinamik Polarizasyon Testi ve Daldırma ve Kütle Kaybı Testi uygulanmıştır.

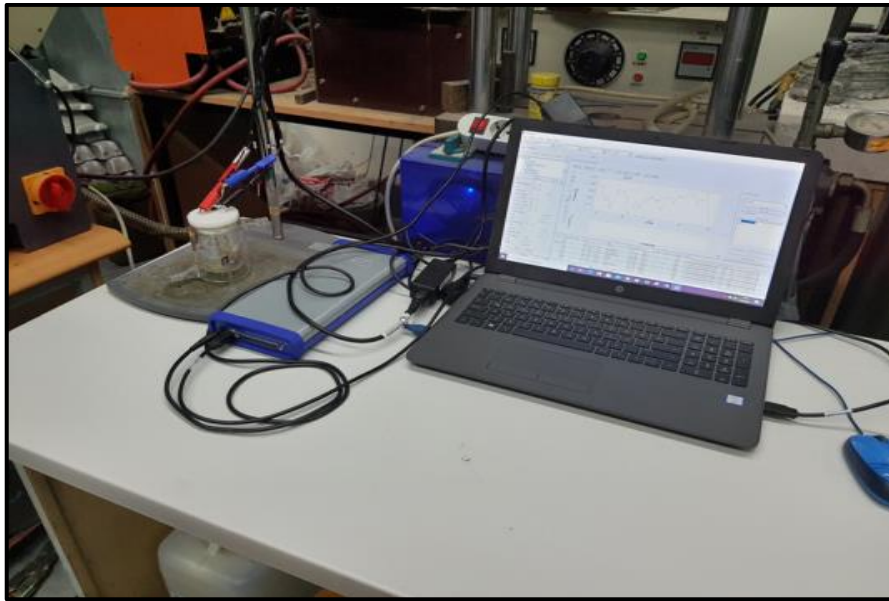
4.3.5.1 Potansiyodinamik Polarizasyon Testi

6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımı numunelere oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Zımparalanmış ve parlatılmış her numunenin yüzeyi 1 cm^2 'e olacak şekilde maskelenmiştir. Korozyon hücrelerini tamamlamak için numuneye iletken tel silikonladıldıktan sonra şekil 4.6'da gösterildiği gibi iletkenliği test edilmiştir.



Şekil 4.6 Korozyon testi çalışma elektrodu numunelerinin iletkenlik ölçümü

Potansiyodinamik polarizasyon test cihazı (Ivium Compactstat), şekil 4.7’de gösterildiği gibi bir elektrokimyasal hücre, bir çalışma elektrotu, bir referans elektrot ve bir karşıt elektrottan oluşmaktadır. Referans elektrot olarak 0.065 mV potansiyele sahip bir Ag/AgCl çözeltisi kullanılmıştır. Karşıt elektrot olarak 4 cm² yüzey alanına sahip bir platin plaka kullanılmıştır. Çalışma elektrotu olarak test numuneleri olan farklı yaşlandırma koşullarındaki 6061, 6082, 6063 ve 6005-A numuneler kullanılmıştır.

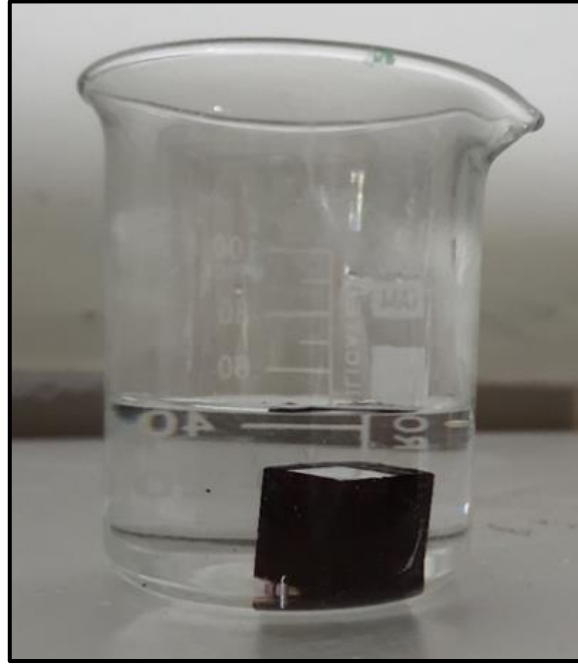


Şekil 4.7 Korozyon test cihazı (Ivium Compactstat)

İlk olarak, numuneler çözeltide 15 dakika tutularak numunelerin bir açık devre potansiyeli (OCP) belirlenmiştir. Daha sonra ölçülen OCP değerlerinin 250 mV altında ve üstünde 0,5 mV/s tarama hızı ile potansiyodinamik polarizasyon deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, bu testler sonucunda elde edilen TAFEL eğrileri kullanılarak korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akımı (I_{corr}) değerleri hesaplanmıştır.

4.3.5.2 Daldırma ve Kütle Kaybı Testi

Zımparalanmış ve parlatılmış 6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımı numunelerin ilk tartımı yapıldıktan sonra yüzeyleri 1 cm²'e olacak şekilde maskelenmiştir. Daldırma korozyon testi uygulanarak kütle kayıplarının ölçülmesi için oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi içine 14 gün boyunca hareketsiz ortamda şekil 4.8'de gösterildiği gibi bekletilmiştir. 14 gün sonra numuneler çözeltiden çıkarılarak alkol ve saf su ile korozyon ürünleri yüzeyden uzaklaştırılarak test sonrası tartımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma korozyon testi

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Deneysel Analizlerin Sonuçları

Bu kısımda yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Sertlik verileri, mikro yapı analizleri, potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve kütle kaybı verileri 6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımı numunelerin farklı yaşlandırma koşullarına göre oluşabilecek korozyon davranışındaki değişkenliklere ışık tutmaktadır.

5.1.1 Sertlik Deneyleri Analiz Sonuçları

Her gerçekleştirilen ısıtıl işlem adımı sonrasında numunelere sertlik testi uygulanmıştır. Homojenizasyon öncesi (HÖ) ve homojen sonrası (HS) numuneler için 4 kez tekrarlanan sertlik testi sonrasında elde edilen brinell cinsinden sertlik değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Homojenizasyon öncesi (döküm) ve homojen sonrası sertlik değerleri

Numune	6063 HÖ	6063 HS	6061 HÖ	6061 HS	6005-A HÖ	6005-A HS	6082 HÖ	6082 HS
Ortalama Değer (HB)	43,7	39,9	54,7	41,2	50,9	43,1	52,7	47

Numunelerin homojenizasyon ısıtıl işlemi sonrasında sertlik değerleri düşmüştür. Bu durum, homojenizasyon sırasında tane sınırlarındaki iğnesel yapıdaki β -AlFeSi intermetalik birleşiklerinin küresel yapıdaki α -AlFeSi intermetalik bileşiklerine dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Örnek olarak, Şekil 5.1 (a)’de tane sınırlarındaki iğnesel yapının şekil 5.1 (c)’de küresel yapıya dönüştüğü görülmektedir. Bu sayede homojenizasyon sonrasında ekstrüzyon ile plastik deformasyona tabi tutulacak biyetlerin daha iyi şekil alması sağlanmaktadır.

Tablo 5.2 6061 ve 6082 alaşımlarına ait 4 saat,8 saat, 24 saat ve doğal yaşlanmış numune sertlikleri

Numune	6061 4h	6061 8h	6061 24h	6061 doğal	6082 4h	6082 8h	6082 24h	6082 doğal
Ortalama Değer (HB)	106,1	112,2	106,9	67,3	107,6	110,9	105,3	73,6

Tablo 5.3 6063 ve 6005-A alaşımlarına ait 4 saat,8 saat, 24 saat ve doğal yaşlanmış numune sertlikleri

Numune	6063 4h	6063 8h	6063 24h	6063 doğal	6005-A 4h	6005-A 8h	6005-A 24h	6005- A doğal
Ortalama Değer (HB)	64,8	70,6	62,7	44,5	94,6	95,4	88,8	57

Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'den elde edilen sertlik verilerine göre pik sertliğe karşılık gelen yaşlandırılmış koşula 6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımları için 8 saat yaşlandırılmış numunelerde ulaşılmıştır. Bu duruma göre, 4 saat yaşlandırılmış numuneler yetersiz yaşlandırılmış, 24 saat yaşlandırılmış numuneler ise aşırı yaşlandırılmış koşul olarak adlandırılmaktadır. Alaşım elementleri alüminyum alaşımına birçok farklı özellik kazandırabildiği gibi malzemenin sertliğini etkilemektedir. Alaşım elementleri sınırları belirlenirken, malzemeden istenilen yüksek sertlik ya da kolay şekil alma gibi özelliklere bağlı olarak elementler için alt ve üst sınırlar belirlenir. İstenilen sertliğin elde edilmesi için bu alt ve üst sınırlara uygun alaşım elementleri yüzdeleri ile alaşımlandırma yapılır. Tablo 4.1'de belirtilen alaşım elementleri dikkate alındığında özellikle 6082 alaşımının yüksek magnezyum, silisyum ve manganez içermesi yüksek sertliğe sahip olmasına neden olmuştur. Aynı şekilde 6061 alaşımının yüksek magnezyum, silisyum ve bakır içeriği yüksek sertliğe sahip olmasını sağlamıştır. 6005-A alaşımı yüksek manganez içeriği sayesinde orta sertlik kazanmaktadır. 6063 alaşımı kolay şekil alabilirlik açısından alaşım elementleri üst sınırları düşük tutulmuştur. Magnezyum ve silisyum oluşturduğu birleşik ile sertliği artırırken,

manganez tane küçültücü etkisi ile sertlik artışı sağlamaktadır. Bakır yoğunluğu bakımından hem ağırlık hem de sertlik kazandırmaktadır.

5.1.2 Mikroyapı Deneyleri Analiz Sonuçları

Mikroyapı sonuçları, numunelerin metalografik olarak hazırlanması ile birlikte korozyon ortamına tabi tutulması öncesi ve sonrası yapıların karşılaştırılması ile elde edilmiştir. Alaşımın ve yaşlandırma koşulunun, baskın korozyon modu metalografik görüntülerde göstermiş olduğu davranışa göre tespit edilmiştir. Yaşlandırma koşulunun, yapıda korozyon sonrası mikroyapı görüntüsünde ve baskın korozyon modunda büyük etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu etkinin ana nedeni yaşlandırma koşuluna bağlı olarak dağılan çökeltinin matris faz ile arasında gerçekleşen mikro galvanik korozyondur. 6xxx alaşım serisinin ana çökelti fazı olan magnezyum silisit (Mg_2Si) matris faza göre daha anodik olduğu için çökeldiği bölgenin etrafındaki matris faz ile oluşturduğu mikro galvanik hücrede matris fazın katot gibi davranmasına neden olarak çözünmeye neden olmaktadır. Tablo 5.4’de alaşım ve yaşlandırma koşuluna göre baskın korozyon modu özetlenmiştir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’deki 6061 alaşımına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, baskın korozyon modunun çukurlaşma korozyonu olduğu görülmektedir. Yaşlanma süresi arttıkça çukurlaşmanın arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.1’de (a) görseli 6061 alaşımının döküm sonrası mikroyapısını göstermektedir. 6061 Döküm mikroyapısı için açık renkli kısımlar 6061 alüminyum matrisi, koyu renkli sürekli kısımlar ise tane sınırlarını göstermektedir. Döküm koşulları tane sınırı sürekli ve iğnesel yapıda olup, $\beta-AlFeSi$ intermetalik yapıdan oluşmaktadır. Bu yapı sonraki şekillendirme süreçlerinde zorluklara neden olduğu için homojenizasyon ısı işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.1 (c) görselinde 6061 alaşımının homojen sonrası mikroyapısı görülmektedir. Mikroyapı görselinde kesikli ve küresel yapıdaki tane sınırları görülmektedir. Homojenizasyon ısı işlemi sonrasında tane sınırları küresel $\alpha-AlFeSi$ intermetalik bileşiklerine dönüşmesi görülmekte olup, homojenizasyon sonrası elde mikroyapı şekil alabilirlik açısından daha iyi olduğu bilinmektedir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’deki 6061 alaşımının farklı koşullarındaki mikro yapı görsellerinin sol kısmında

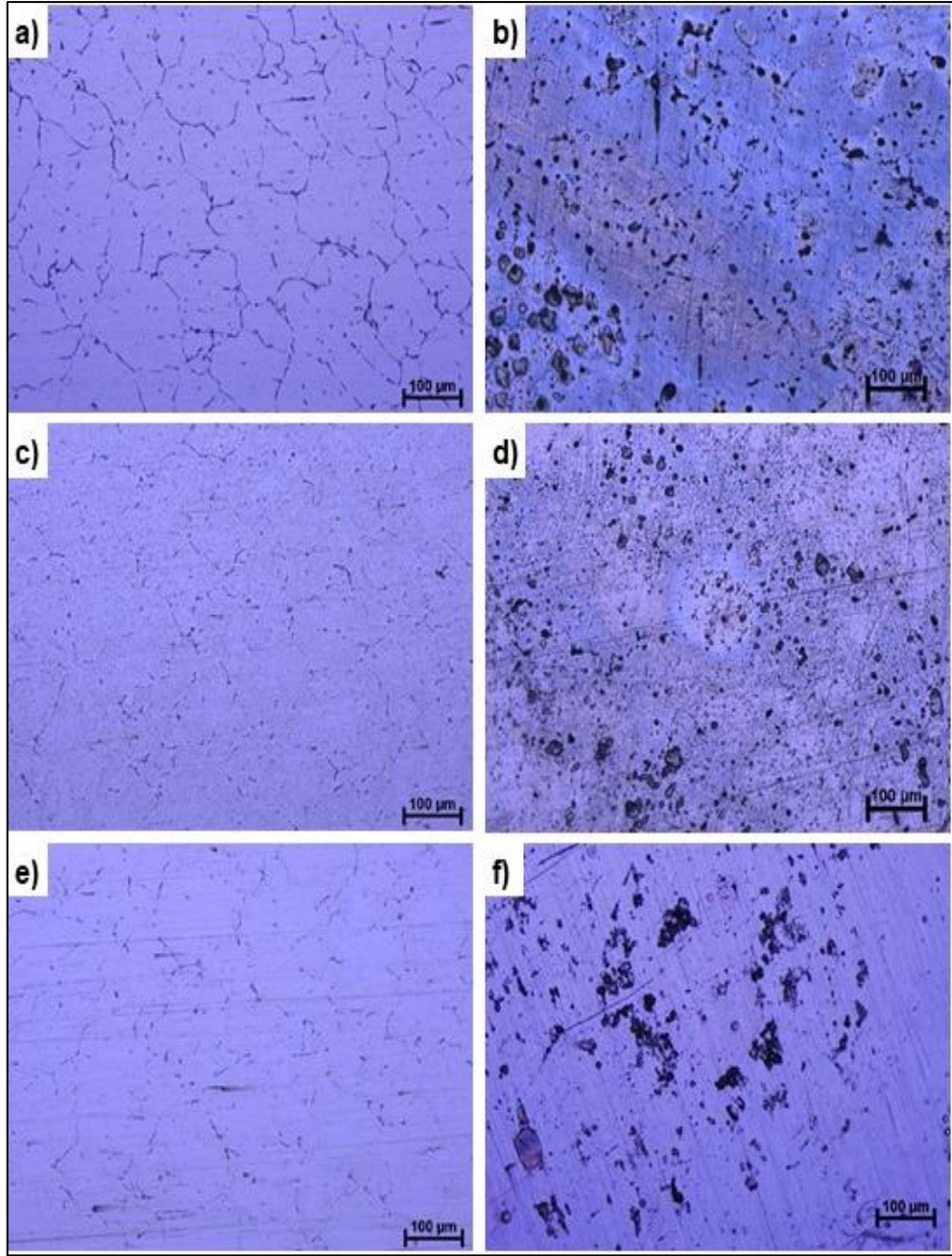
bulunan (a), (c) ve (e) mikroyapıları korozyon testi öncesi yapıyı gösterirken, sağ kısımda bulunan (b), (d) ve (f) mikroyapıları korozyon testi sonrası yapıyı göstermektedir. Korozyon testi sonrası incelenen yapıda açık renkli kısımlar matris fazı gösterirken koyu renkli kısımlar ise çözünen kısımları göstermektedir.

Şekil 5.2 de farklı yapay olarak yaşlandırılmış koşullardaki mikroyapıların sonuçları karşılaştırıldığında korozyon sonrası mikroyapılarda (d) ve (f)'de küresel formda koyu renkli yüzeylerin çok yoğun olduğu görülmektedir. 8 saat yaşlandırılmış (d) ve 24 saat yaşlandırılmış (f) mikro yapısında yoğun şiddette çukurlaşma korozyonu gözlemlenmiştir. 4 saat yaşlandırılmış (b) mikroyapısında ise düşük şiddette çukurlaşma görülmüştür.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'deki 6082 alaşımına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, baskın korozyon modunun çukurlaşma korozyonu olduğu görülmektedir. Yaşlanma süresi arttıkça çukurlaşmanın arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.3'deki (a) ve (c) mikroyapıları incelendiğinde döküm koşulu mikro yapısı (a)'nın sürekli β -AlFeSi intermetalik tane sınırlarının (c)'de kesikli α -AlFeSi intermetalik küresel tane sınırlarına dönüştüğü görülmektedir. 6082 doğal yaşlanmış koşuldaki mikro yapı (f) incelendiğinde çözünme tane sınırlarında gerçekleşerek lokal taneler arası korozyona neden olduğu görülmektedir. Bu durumun doğal yaşlanma ile tanelerin çökmesi için yapay yaşlanmaya göre verilen uzun süreden kaynaklı tane sınırlarına çökelen ince çökeltiiler sebebi oluşan mikro galvanik hücreler nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.4'de farklı yapay olarak yaşlandırılmış koşullarda ki 6082 alaşımına ait mikroyapılar incelendiğinde korozyon sonrası mikroyapılarda 4 saat yaşlandırılmış (b) mikroyapıda seyrek koyu bölgeler tespit edilerek, düşük şiddette çukurlaşma korozyonu görülmüştür. (d) ve (f)'de küresel formda koyu renkli yüzeyler çok daha yoğun olarak tespit edilmiştir. 8 saat yaşlandırılmış (d) ve 24 saat yaşlandırılmış (f) 6082 alaşımı mikro yapısının yoğun şiddette çukurlaşma korozyonuna sahip olduğu görülmüştür.

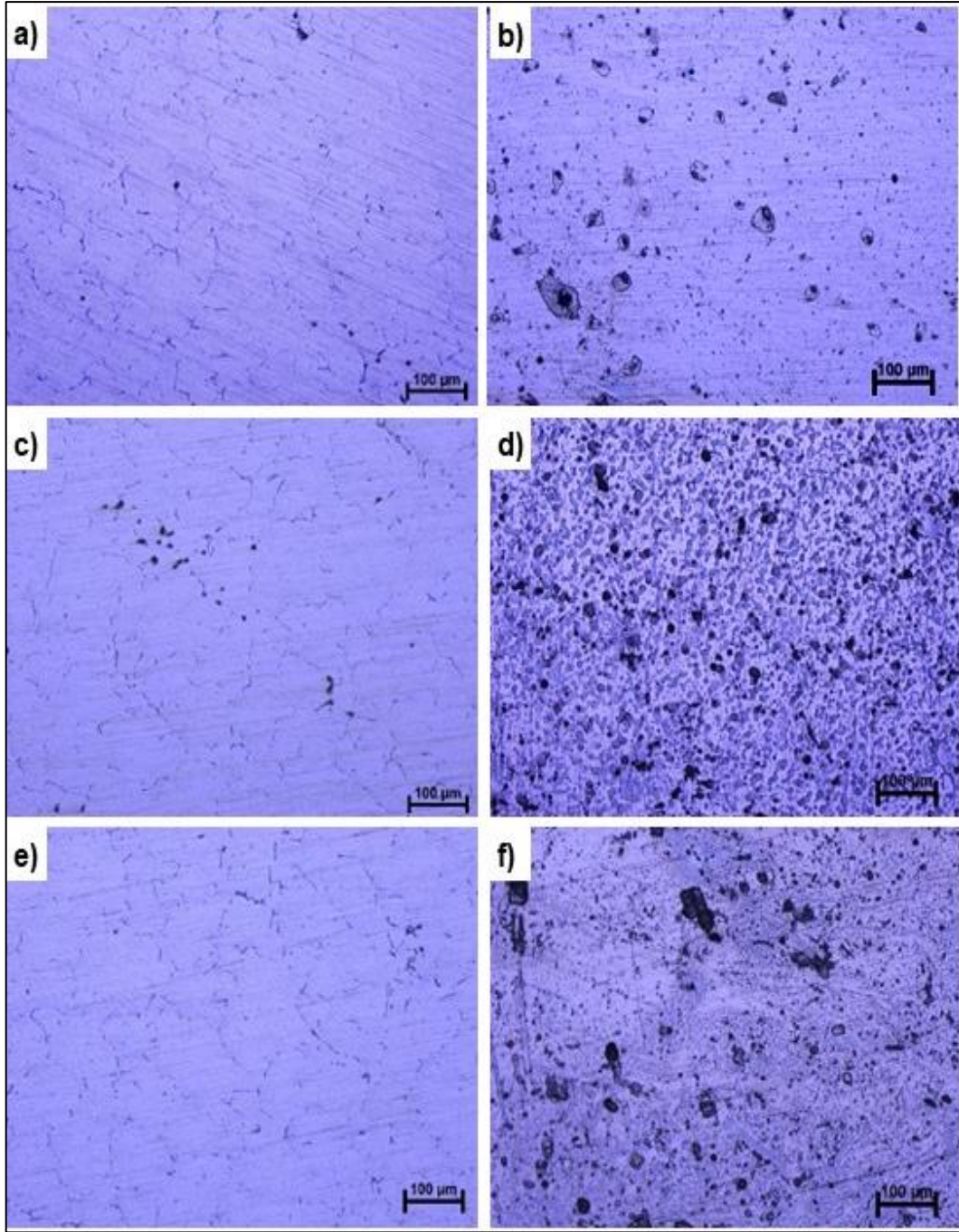
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki 6063 alaşımına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, baskın korozyon modunun çukurlaşma korozyonu ve taneler arası korozyon olduğu görülmektedir. 6063 alaşımı içerisinde ki düşük magnezyum ve

silisyum içeriği yüzünden çökeltilerin ince dağılanarak taneler arası korozyona neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.5’de döküm mikro yapısı (a)’nın homojenizasyon ısı işlemi sonrasında iğnesel ve sürekli formdaki tane sınırlarının homojen sonrası mikroyapı (c)’de kesikli ve küresel forma dönüştüğü görülmektedir. Şekil 5.6’da 24 saat yaşlandırılmış koşuldaki mikroyapıda (f) tanelerin sınırlarında ki çökeltilerin çözünmesi ile oluşan yoğun taneler arası korozyon görülmüştür. 4 saat yaşlandırılmış (b) koşulda da lokal teneler arası korozyon ile birlikte bir miktar çukurlaşma görülmüştür. 8 saat yaşlandırılmış (d) koşulda çukurlaşma korozyonu görülmüştür. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’deki 6005-A alaşımına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, baskın korozyon modunun çukurlaşma ve taneler arası korozyon olduğu görülmektedir. Şekil 5.8’deki yaşlandırılmış koşullarda daha yoğun bir şekilde taneler arası korozyon görülmektedir. Şekil 5.8’de 4 saat yaşlandırılmış koşulda (b) ve 8 saat yaşlandırılmış koşulda (d) lokal taneler arası korozyon gözlenmiştir. 24 saat yaşlandırılmış koşulda (f) ise hem lokal taneler arası korozyon hem de çukurlaşma korozyonu görülmüştür. Bu durumun ana nedeni literatürde birçok çalışmada alaşımın taneler arası korozyonunun Mg/Si içeren tane sınırı çökeltileri ile oluşan mikro-galvanik korozyondan kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Literatürde yine birçok çalışmada, taneler arası korozyon ile alaşım kompozisyonu içerisindeki bakır içeriği ile bir bağlantı kurulmuştur. Bakır içeriğinin artması ile birlikte taneler arası korozyonun arttığı görülmüştür. Bu bağlantıdan yola çıkarak bakır içeriği düşük numune ile test yapılan bir literatür çalışmasında da düşük bakır içeriğinde taneler arası korozyon görülmüştür. Bu bağlamda, literatür çalışmalarından farklı olarak 6061 alaşımında yüksek bakır içeriğine rağmen taneler arası korozyon gözlemlenmemiştir [19][22][56][57][58][59][60][61].



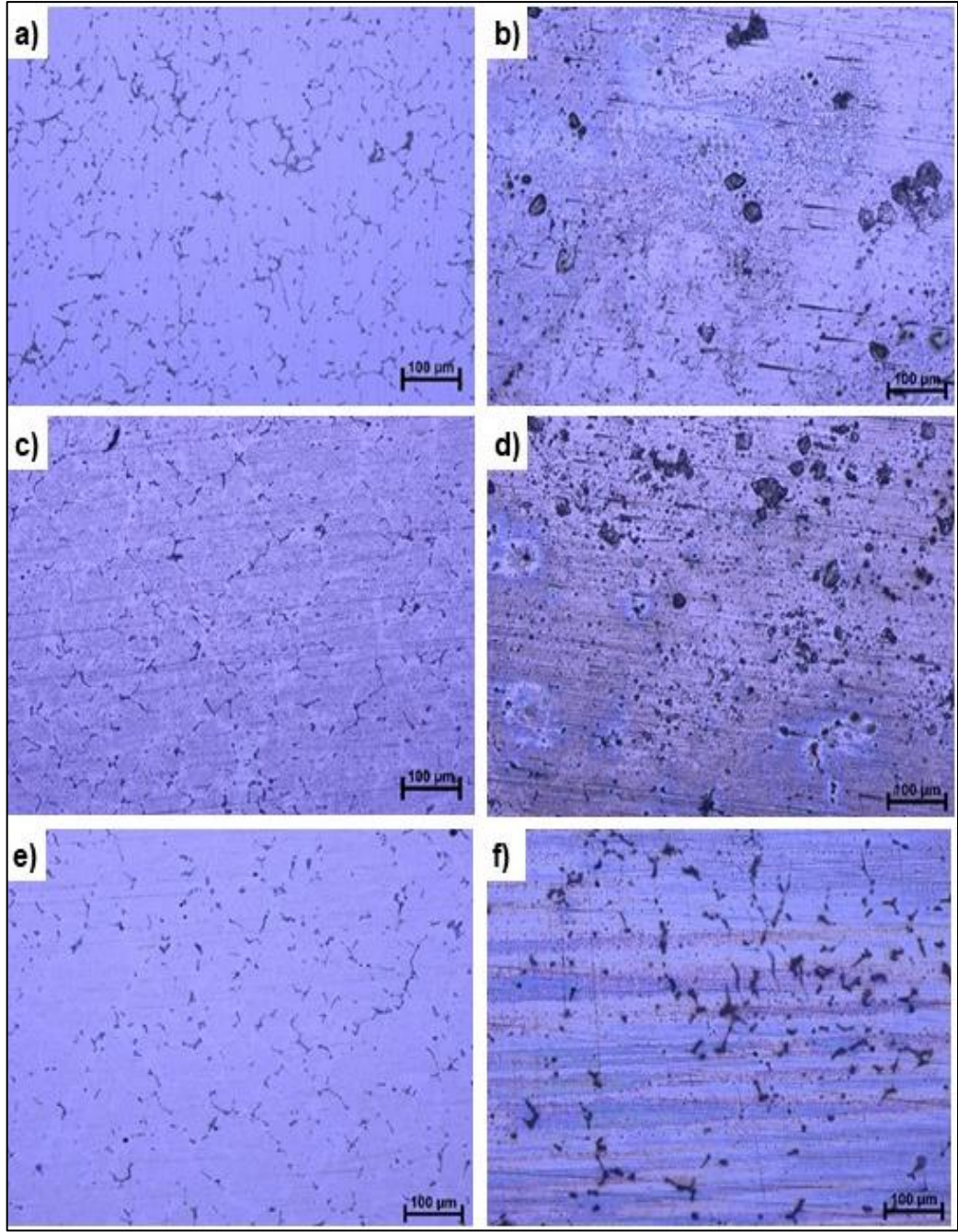
Şekil 5.1 6061 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) döküm korozyon testi öncesi, b) döküm korozyon testi sonrası, c) homojen sonrası korozyon testi öncesi, d) homojen sonrası korozyon testi sonrası, e) doğal yaşlanmış korozyon testi öncesi, f) doğal yaşlanmış korozyon testi sonrası.



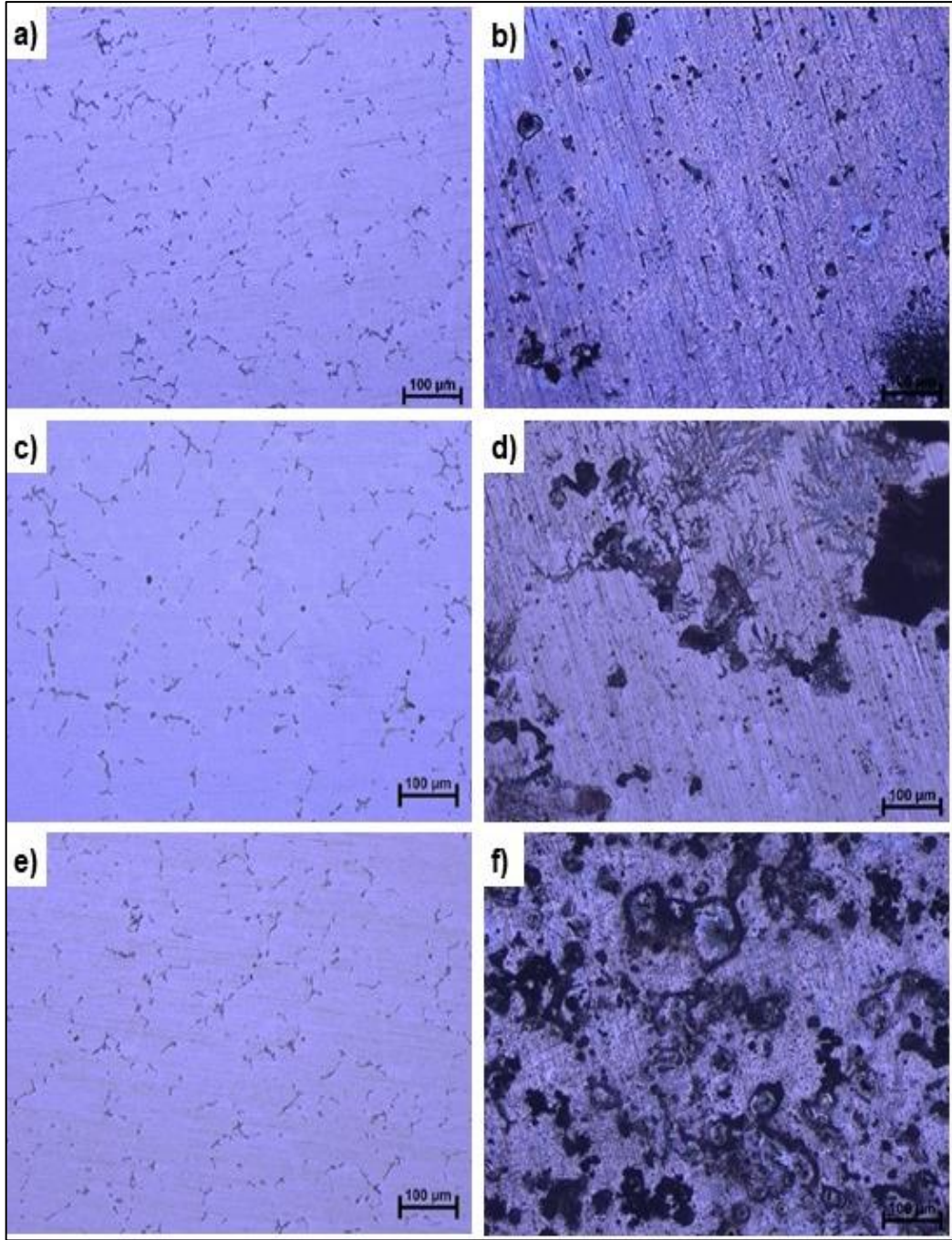
Şekil 5.2 6061 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) 4 saat korozyon testi öncesi, b) 4 saat korozyon testi sonrası, c) 8 saat korozyon testi öncesi, d) 8 saat korozyon testi sonrası, e) 24 saat korozyon testi öncesi, f) 24 saat korozyon testi sonrası.



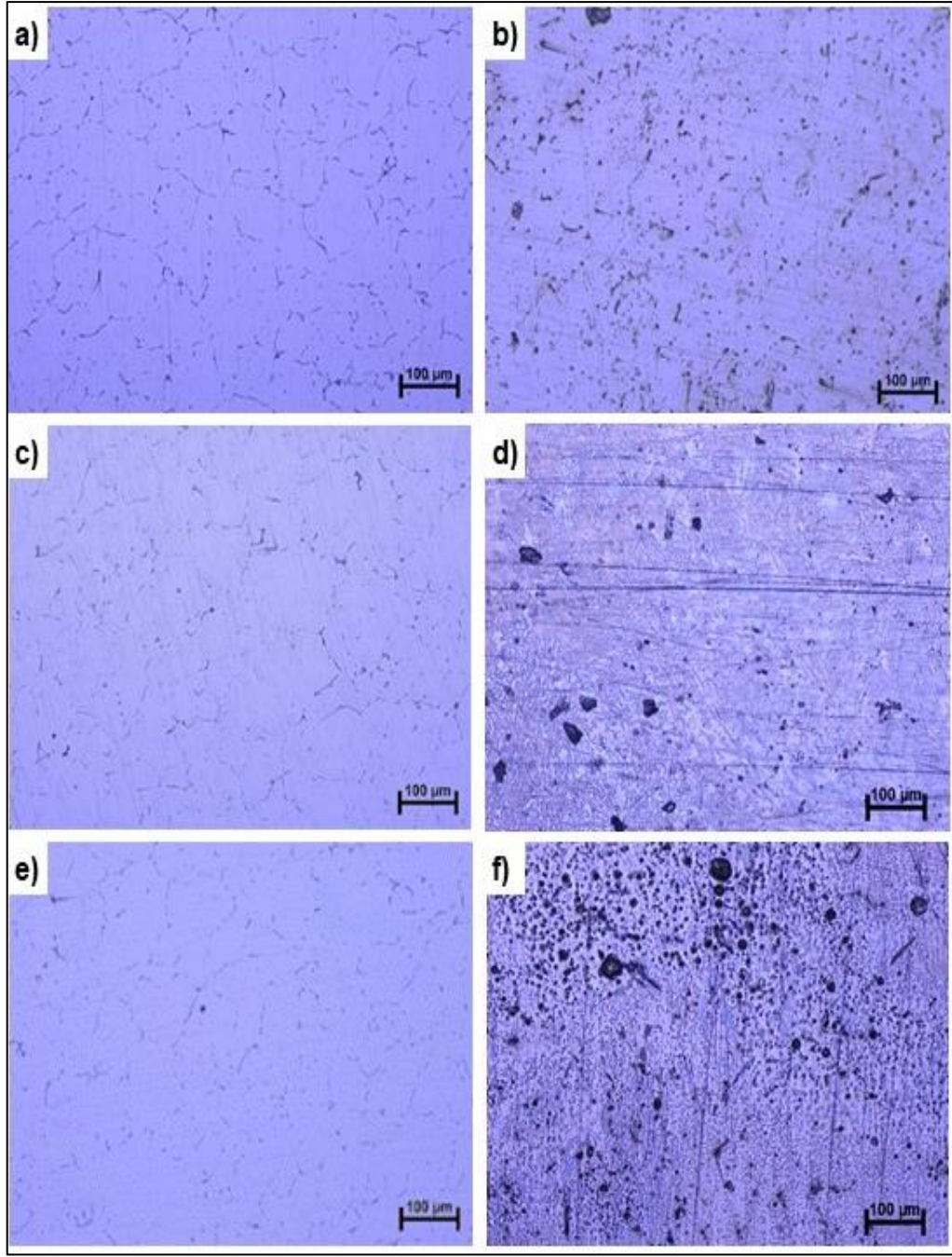
Şekil 5.3 6082 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) döküm korozyon testi öncesi, b) döküm korozyon testi sonrası, c) homojen sonrası korozyon testi öncesi, d) homojen sonrası korozyon testi sonrası, e) doğal yaşlanmış korozyon testi öncesi, f) doğal yaşlanmış korozyon testi sonrası.



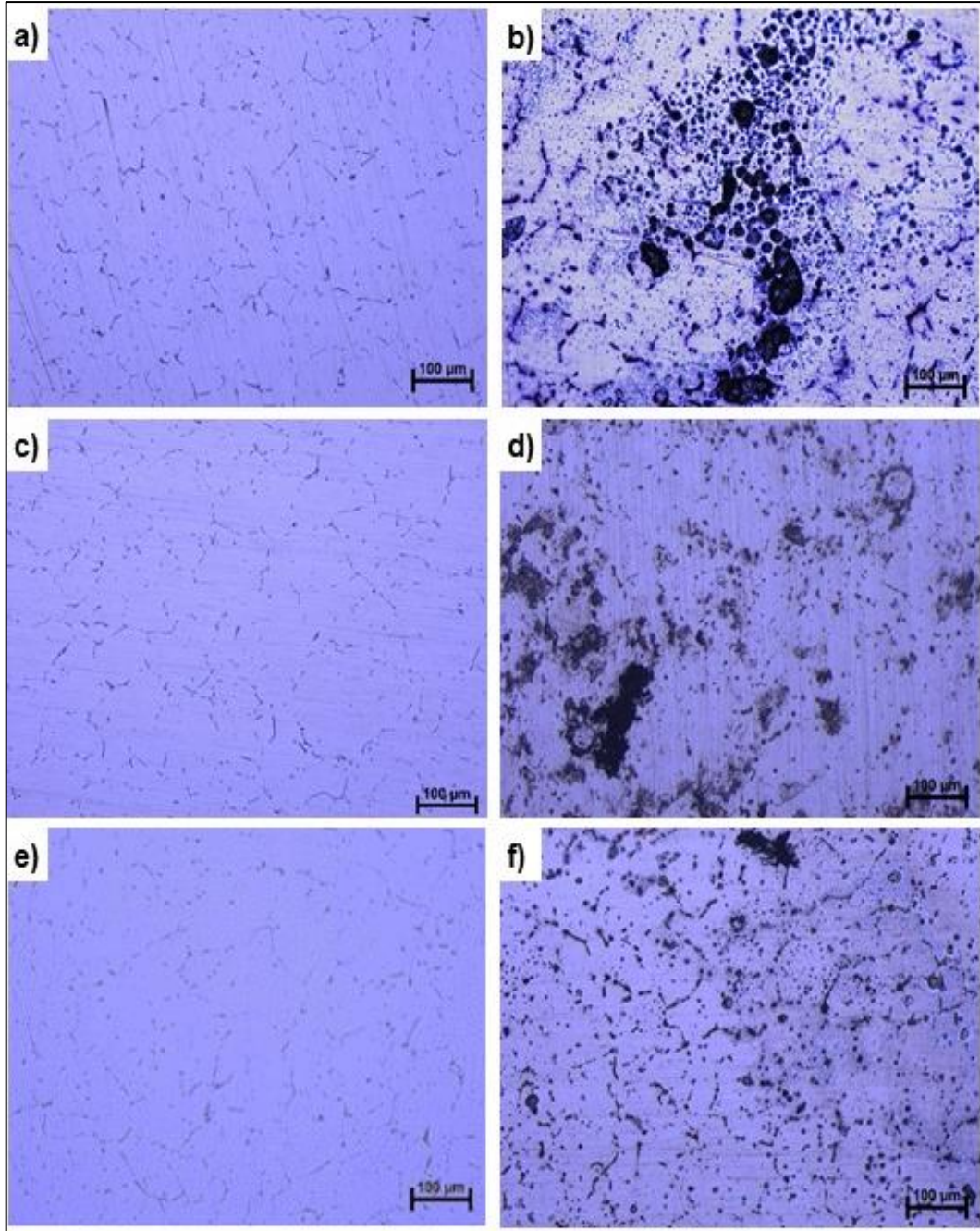
Şekil 5.4 6082 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) 4 saat korozyon testi öncesi, b) 4 saat korozyon testi sonrası, c) 8 saat korozyon testi öncesi, d) 8 saat korozyon testi sonrası, e) 24 saat korozyon testi öncesi, f) 24 saat korozyon testi sonrası.



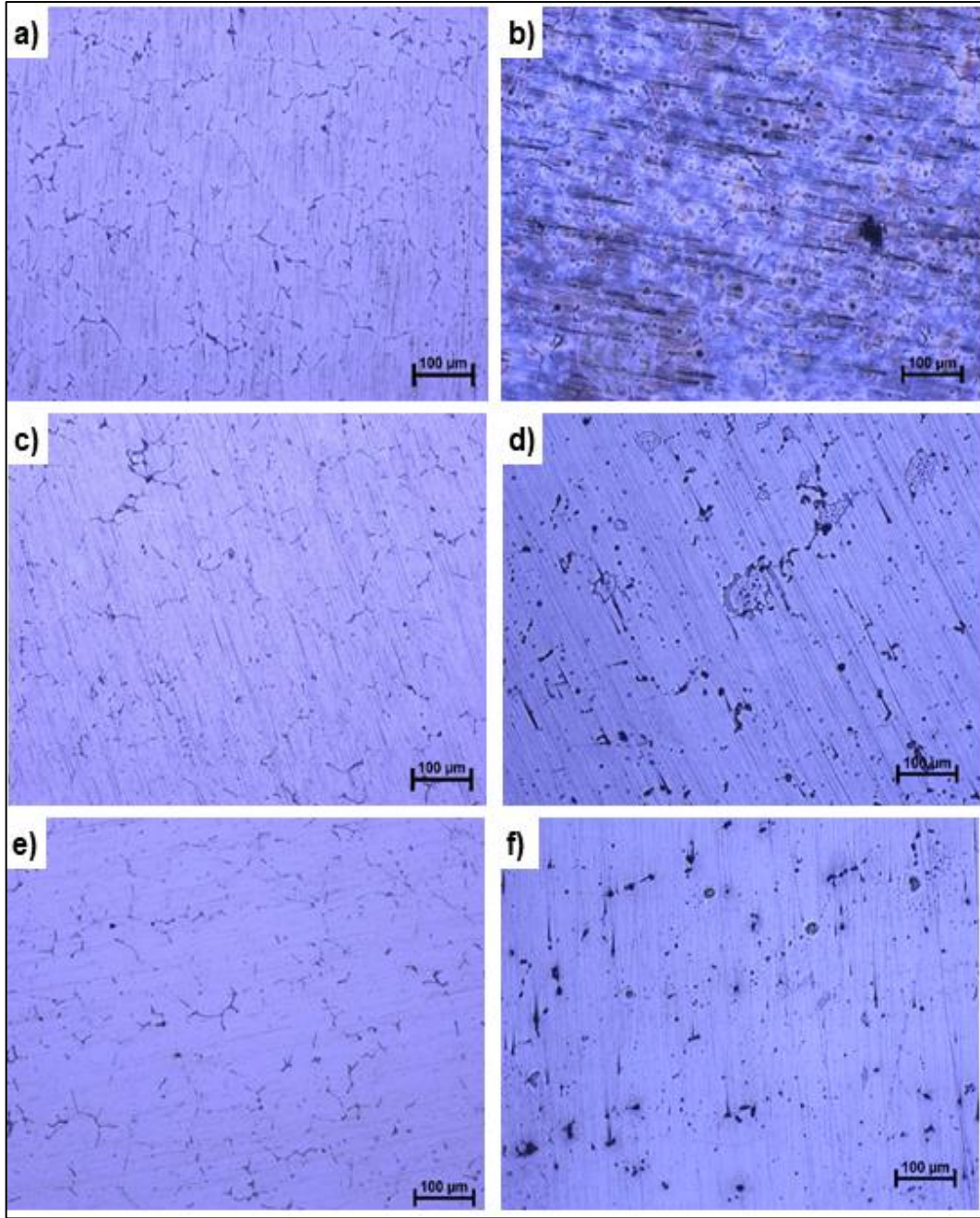
Şekil 5.5 6063 döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) döküm korozyon testi öncesi, b) döküm korozyon testi sonrası, c) homojen sonrası korozyon testi öncesi, d) homojen sonrası korozyon testi sonrası, e) doğal yaşlanmış korozyon testi öncesi, f) doğal yaşlanmış korozyon testi sonrası.



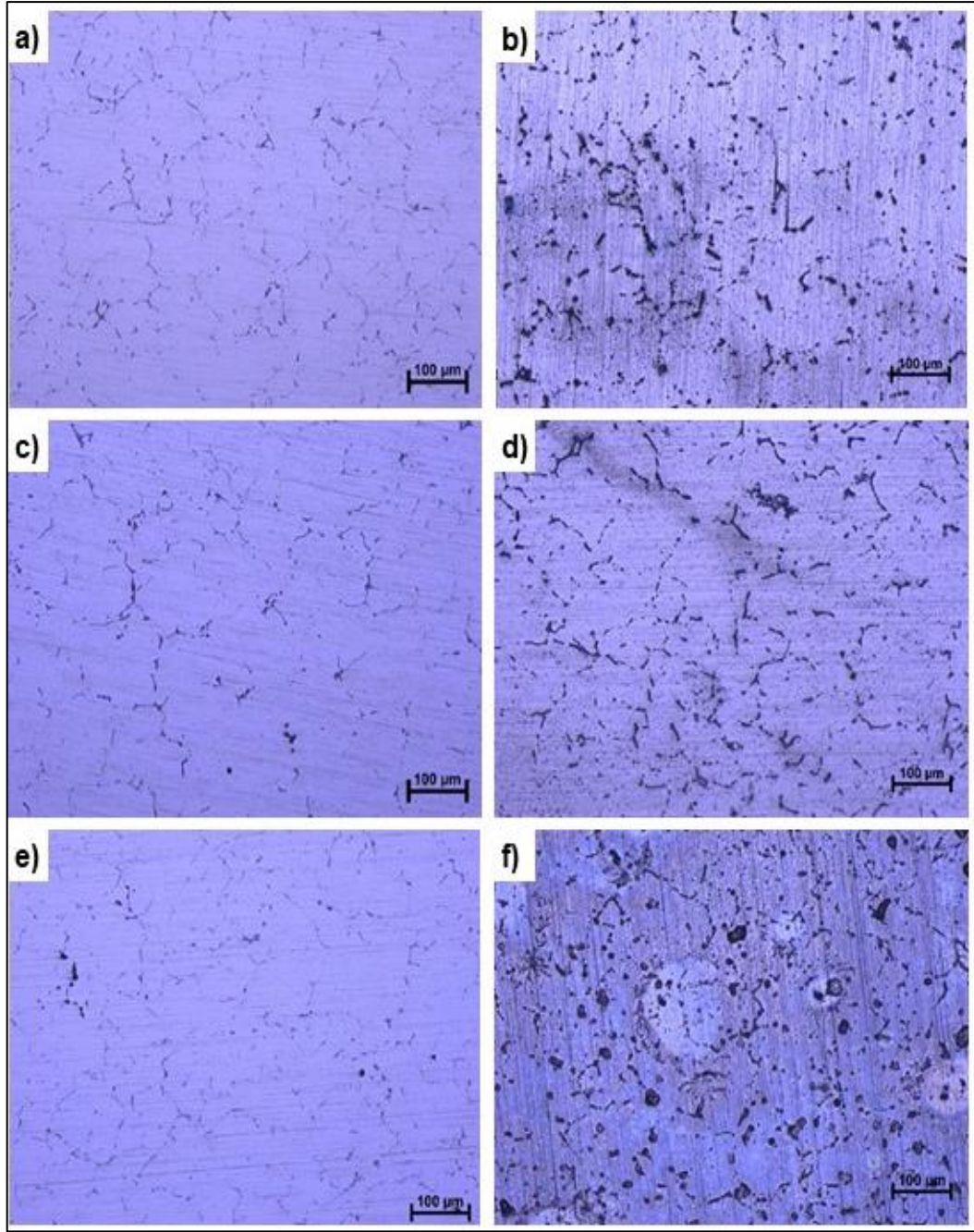
Şekil 5.6 6063 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) 4 saat korozyon testi öncesi, b) 4 saat korozyon testi sonrası, c) 8 saat korozyon testi öncesi, d) 8 saat korozyon testi sonrası, e) 24 saat korozyon testi öncesi, f) 24 saat korozyon testi sonrası.



Şekil 5.7 6005-A döküm, homojen sonrası ve doğal yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) döküm korozyon testi öncesi, b) döküm korozyon testi sonrası, c) homojen sonrası korozyon testi öncesi, d) homojen sonrası korozyon testi sonrası, e) doğal yaşlanmış korozyon testi öncesi, f) doğal yaşlanmış korozyon testi sonrası.



Şekil 5.8 6005-A 4 saat, 8 saat ve 24 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

a) 4 saat korozyon testi öncesi, b) 4 saat korozyon testi sonrası, c) 8 saat korozyon testi öncesi, d) 8 saat korozyon testi sonrası, e) 24 saat korozyon testi öncesi, f) 24 saat korozyon testi sonrası.

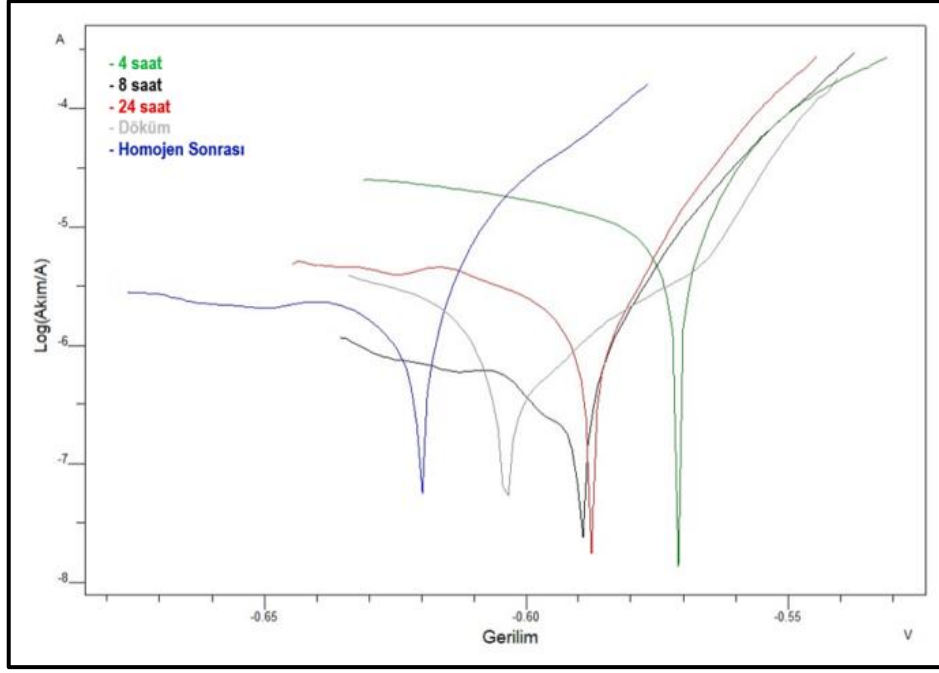
Tablo 5.4 Alaşım ve yaşlandırma koşullarına göre korozyon modu

Numuneler	Korozyon Modu
6061 (4 saat)	Az Seviyede Çukurlaşma
6061 (8 saat)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6061 (24 saat)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6061 (Doğal)	Az Seviyede Çukurlaşma
6061 (Döküm)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6061 (H. Sonrası)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6082 (4 saat)	Az Seviyede Çukurlaşma
6082 (8 saat)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6082 (24 saat)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6082 (Doğal)	Lokal Taneler Arası Korozyon
6082 (Döküm)	Az Seviyede Çukurlaşma
6082 (H. Sonrası)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6063 (4 saat)	Lokal Taneler Arası Korozyon ve Çukurlaşma
6063 (8 saat)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6063 (24 saat)	Lokal Taneler Arası Korozyon
6063 (Doğal)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6063 (Döküm)	Az Seviyede Çukurlaşma
6063 (H. Sonrası)	Az Seviyede Çukurlaşma
6005-A (4 saat)	Lokal Taneler Arası Korozyon
6005-A (8 saat)	Lokal Taneler Arası Korozyon
6005-A (24 saat)	Lokal Taneler Arası Korozyon ve Çukurlaşma
6005-A (Doğal)	Az Seviyede Çukurlaşma
6005-A (Döküm)	Orta Seviyede Çukurlaşma
6005-A (H. Sonrası)	Orta Seviyede Çukurlaşma

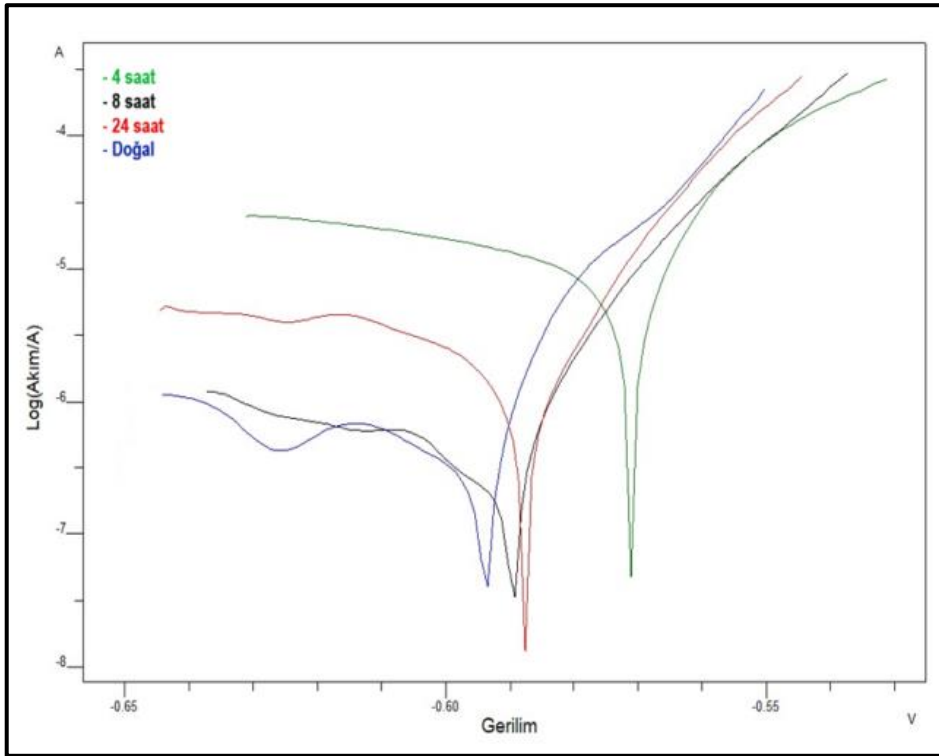
5.1.3 TAFEL Eğrileri

OCP değerlerinin 250 mV altında ve üstünde 0,5 mV/s tarama hızı ile elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri 6061 alaşımı için Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da, 6082 alaşımı için Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de, 6063 alaşımı için Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de, 6005-A alaşımı için Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon test cihazına (Ivium Compactstat) ait olan Ivium Soft yazılımı yardımıyla hesaplanan korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri Tablo 5.5'te verilmiştir. %3,5 NaCl çözeltisi içinde gerçekleştirilen kütle kaybı sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'deki 6061 alaşımına ait TAFEL diyagramı incelendiğinde, 4 saat (az yaşlandırılmış) koşulun diğer koşullara kıyasla korozyon başlangıcının en geç olduğu görülmektedir. Homojenizasyon sonrası koşulda ise malzeme korozyon dayancı daha düşük olarak korozyon en erken başlamıştır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de mikroyapı görüntülerinde görüldüğü gibi 4 saat yaşlandırılmış koşul daha az çukurlaşma korozyonu gösterirken homojen sonrası koşulu ise orta seviyenin üzerinde bir çukurlaşma korozyonu göstermektedir. Tablo 5.5'deki sonuçlar ile karşılaştırıldığında 6061 4 saat yaşlandırılmış koşulun yüksek korozyon akımı nedeniyle korozyonun geç başladıktan sonra hızlı devam edeceği düşünülse de Tablo 5.6'daki kütle kaybı sonuçları ile karşılaştırıldığında 6061 4 saat yaşlandırılmış koşul, 0,05 mg/cm²/gün ile en düşük kütle kaybına sahiptir. Onu takiben 6061 8 saat yaşlandırılmış koşul 0,06 mg/cm²/gün ile görece düşük kütle kaybına sahiptir. 6061 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda ise en düşük korozyon akımı değerlerine ulaşılmıştır. Korozyon görece erken başlasa da ilerleyen sürede daha yavaş devam edeceği görülmektedir. Homojen sonrası koşulda ise erken başlayan korozyon ve görece yüksek korozyon akımı göz önünde bulundurulduğunda 0,11 mg/cm²/gün kütle kaybı değeri ile görece yüksek kütle kaybı değeri ile diğer sonuçlar ile örtüşmektedir. Döküm koşulunda numune korozyona görece erken başlayarak ve yüksek korozyon akımı nedeniyle 0,17 mg/cm²/gün kütle kaybı değeri ile en yüksek kütle kaybına sahiptir.



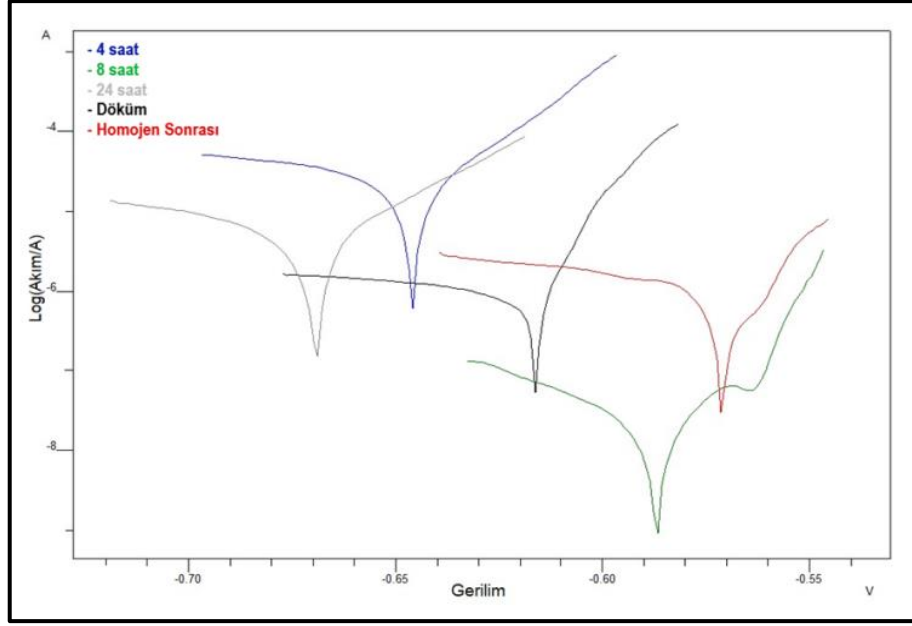
Şekil 5.9 6061 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (siyah), 24 saat (kırmızı), döküm (gri), homojen sonrası (mavi)



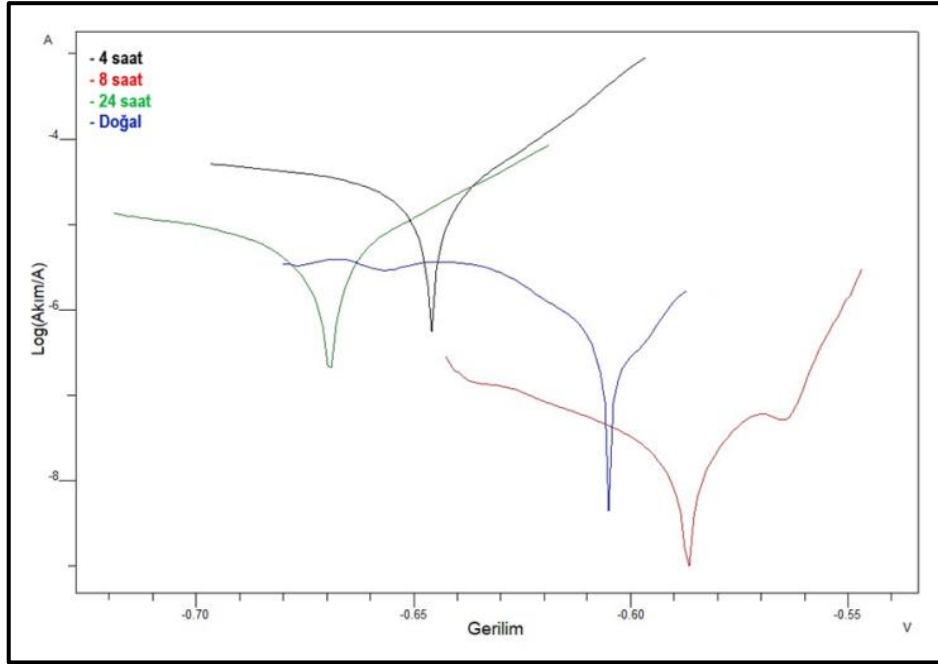
Şekil 5.10 6061 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (siyah), 24 saat (kırmızı), doğal (mavi)

6082 homojen sonrası numunesinin Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 deki 6082 alaşımına ait TAFEL diyagramlarında diğer koşullara kıyasla korozyon başlangıcının en geç olduğu görülmektedir.

6082 alaşımı 24 saat aşırı yaşlandırılmış koşulunda ise malzemede korozyon en erken başlamıştır. Homojen sonrası koşul orta seviyenin üzerinde bir çukurlaşma korozyonu gösterdiği Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'deki mikroyapı görüntülerinde görülmektedir. 6082 homojen sonrası koşulun yüksek korozyon akımı nedeniyle korozyonun geç başladıktan sonra hızlı devam ettiği Tablo 5.5' deki TAFEL sonuçları ve Tablo 5.6'daki $0,11 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ değerindeki en yüksek kütle kaybından görülmektedir. 6082 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda ise en düşük korozyon akımı değerlerine ulaşılmıştır. Korozyon görece geç başlayıp ilerleyen sürede de daha yavaş devam edeceği görülmektedir. Kütle kaybı verileri 6082 (8 saat) pik yaşlandırılmış koşul için $0,07 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ olarak hesaplanmıştır. Doğal yaşlandırılmış koşul görece düşük korozyon akımına sahip olup, aynı zamanda korozyonda diğer koşullara göre görece daha geç başlamıştır. Bu durum, Tablo 5.6'daki kütle kaybı değerleri ile karşılaştırıldığında $0,03 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ kütle kaybı değeri diğer koşullara kıyasla düşük korozyon akımında etki ile çok düşük kalmaktadır. 6082 alaşımı endüstride yaygın olarak kullanılan hem mukavemet açısından hem de korozyon dayanımı açısından yüksek korozyon dayancına sahip olduğu bilinmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde özellikle 6082 doğal yaşlandırılmış koşul için düşük kütle kaybı değerleri, korozyon akımı elde edilmiş olup, görece korozyonun diğer numuneler ile kıyaslandığı zaman geç başladığı görülmektedir.



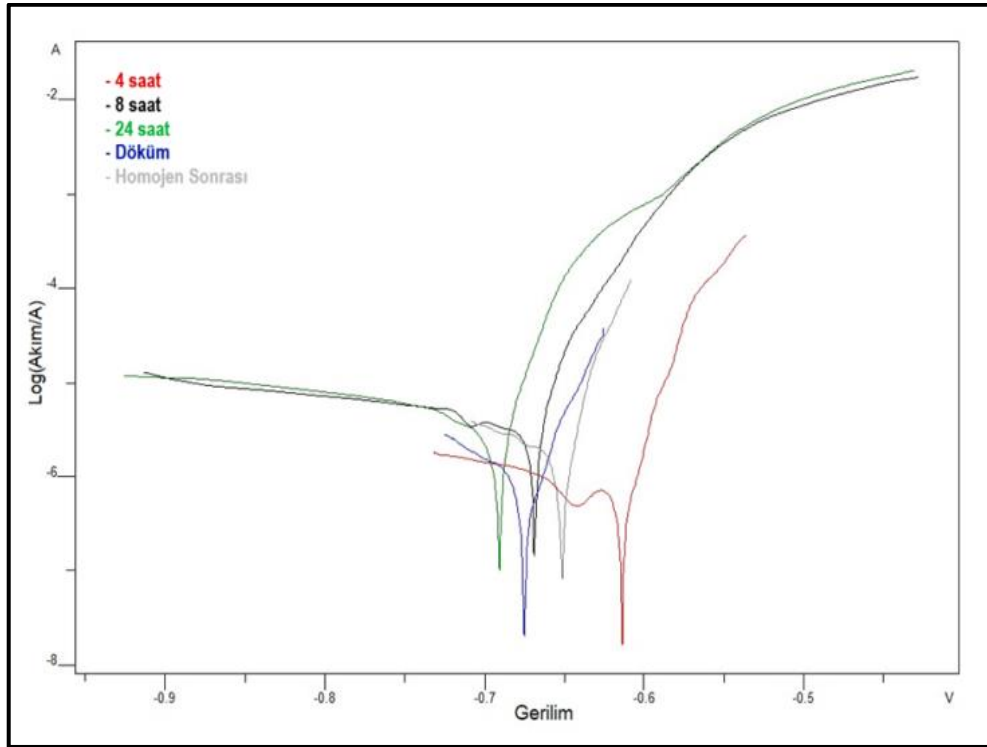
Şekil 5.11 6082 TAFEL eğrileri; 4 saat (mavi), 8 saat (yeşil), 24 saat (gri), döküm (siyah), homojen sonrası (kırmızı)



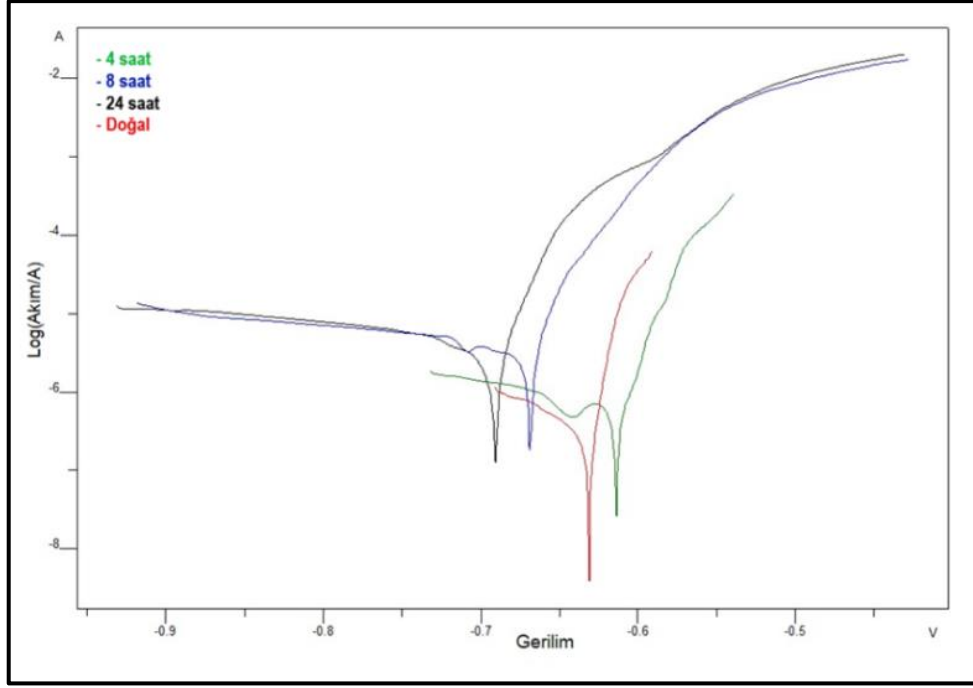
Şekil 5.12 6082 TAFEL eğrileri; 4 saat (siyah), 8 saat (kırmızı), 24 saat (yeşil), doğal (mavi)

6063 alışımı için Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 deki TAFEL eğrileri, Tablo 5.5' deki korozyon akımları ve Tablo 5.6'daki kütle kaybı sonuçları karşılaştırıldığı zaman 6063 4 saat az yaşlandırılmış koşuldaki numune diğer numunelere göre korozyona en geç başlayan numune olmuştur.

Korozyon akımı diğer numunelere göre düşük olduğu için korozyonun geç başladıktan sonra da korozyon hızı olarak yavaş devam ettiği söylenilebilir. 6063 4 saat yaşlandırılmış koşul için kütle kaybı verileri de korozyon akımı ve TAFEL eğrileri sonuçları ile benzer bir sonuç vererek $0,04 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ değeri ile 6063 alaşımı içerisinde karşılaştırılan tüm koşullar içerisinde en düşük kütle kaybı değerine sahiptir. 6063 4 saat yaşlandırılmış koşulda ise yetersiz yaşlandırmadan kaynaklı olduğu düşünülerek lokal taneler arası korozyon görülmüştür. 6063 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda ise en yüksek korozyon akımı değeri görülmüştür. Korozyon başlangıcı da görece erken olmakta olup, bu durum mikroyapıda orta seviyede çukurlaşma korozyonuna neden olmaktadır. 6063 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda kütle kaybı $0,06 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ değeri ile görece yüksek kalmaktadır.

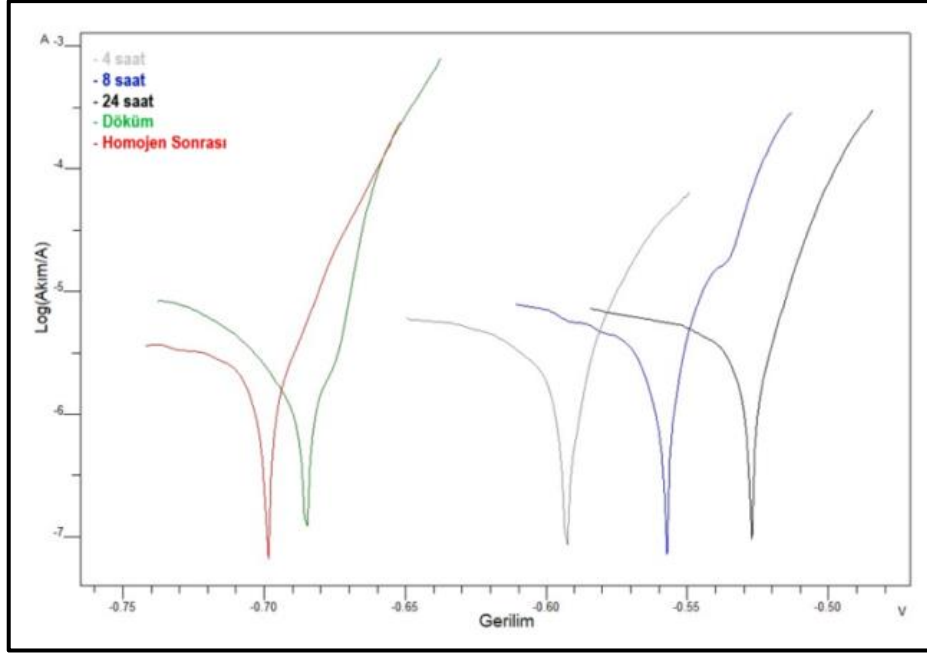


Şekil 5.13 6063 TAFEL eğrileri; 4 saat (kırmızı), 8 saat (siyah), 24 saat (yeşil), döküm (mavi), homojen sonrası (gri)

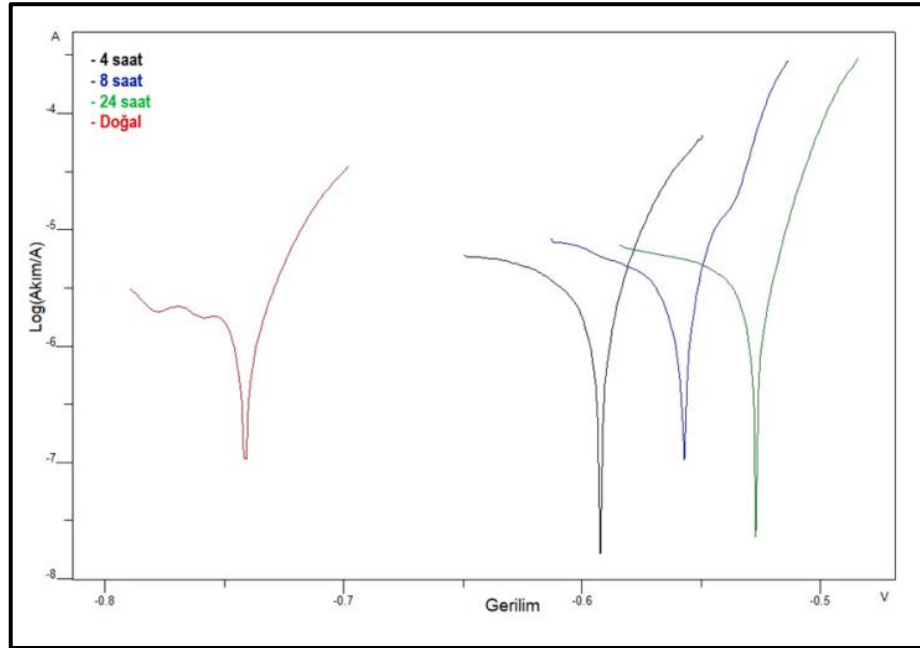


Şekil 5.14 6063 TAFEL eğrileri; 4 saat (yeşil), 8 saat (mavi), 24 saat (siyah), doğal (kırmızı)

6005-A alaşımı için Tablo 5.5' deki korozyon akımları incelendiğinde 6005-A 4 saat yaşlandırılmış koşulda en düşük korozyon akımı değeri elde edilmiştir. Görece geç başlamış korozyon ile orantılı bir şekilde Tablo 5.6'daki kütle kaybı verilerinde de 6005-A alaşımı 4 saat yaşlandırılmış koşul için 6005-A alaşımı farklı koşulları içerisinde düşük fakat diğer alaşımlara kıyasla yüksek sayılabilecek bir değer olan $0,14 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ kütle kaybı değeri elde edilmiştir. 6005-A alaşımı döküm ve homojen sonrası koşul için $0,25 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ ile diğer koşullara ve alaşımlara kıyasla en yüksek kütle kaybı verileri elde edilmiştir. Şekil 5.15'deki TAFEL eğrileri incelendiğinde döküm ve homojen sonrası koşul için korozyonun görece erken başladığından kaynaklı olarak yüksek kütle kaybı olduğu sonucuna varılmıştır. Doğal yaşlandırılmış koşul 6005-A alaşımı için diğer koşullara kıyasla $0,12 \text{ mg/cm}^2/\text{gün}$ ile en düşük kütle kaybına sahiptir.



Şekil 5.15 6005-A TAFEL eğrileri; 4 saat (gri), 8 saat (mavi), 24 saat (siyah), döküm (yeşil), homojen sonrası (kırmızı)



Şekil 5.16 6005-A TAFEL eğrileri; 4 saat (siyah), 8 saat (mavi), 24 saat (yeşil), doğal (kırmızı)

Literatürde Liang ve arkadaşları [5] tarafından farklı yaşlandırma koşulları ve alaşım kompozisyonlarındaki 6xxx serisi numuneler için korozyon testi yapılan çalışmada tüm numuneler için doğal olarak yaşlandırılmış numune en düşük korozyon akımı değerlerine sahip olmuştur. Tablo 5.5’de korozyon akımı değerleri literatürdeki bu çalışma ile karşılaştırıldığında 6061 için en düşük korozyon akımı

değeri doğal yaşlandırılmış koşulda elde edilmiştir. 6082 alaşımında ise en düşük korozyon akımı değeri 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda elde edilmiş olup, 8 saat yaşlandırılmış koşuldan sonra en düşük değer doğal yaşlandırılmış koşulda elde edilmiştir. 6063 alaşımı için en düşük korozyon akımı değeri doğal yaşlandırılmış koşulda elde edilmiştir. 6005-A alaşımı içinse en düşük korozyon akımı değeri 4 saat yaşlandırılmış koşulda elde edilmiştir. 6005-A alaşımı için en düşük kütle kaybı doğal olarak aynı çalışmada elde edilen kütle kaybı verileri incelendiğinde genellikle aşırı yaşlandırılmış koşul diğer yaşlandırılmış koşullara göre en yüksek kütle kaybına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum Tablo 5.6'daki kütle kaybı sonuçları ile karşılaştırıldığında 6082 alaşımı hariç diğer tüm alaşımlardaki yaşlandırılmış olan koşullarda aşırı yaşlandırılmış koşul en yüksek kütle kaybı değerine sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 5.5 Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı

Numuneler	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)
6061 (4 saat)	-0,5704	2.19×10^{-6}
6061 (8 saat)	-0,5893	8.67×10^{-8}
6061 (24 saat)	-0,5872	2.48×10^{-7}
6061 (Doğal)	-0,5945	8.36×10^{-8}
6061 (Döküm)	-0,6045	1.15×10^{-7}
6061 (H.Sonrası)	-0,6193	4.22×10^{-7}
6082 (4 saat)	-0,6458	3.45×10^{-6}
6082 (8 saat)	-0,5865	4.23×10^{-9}
6082 (24 saat)	-0,6692	3.60×10^{-7}
6082 (Doğal)	-0,6053	6.34×10^{-8}
6082 (Döküm)	-0,6156	1.93×10^{-7}

Tablo 5.5 Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı (devamı)

6082 (H. Sonrası)	-0,5717	1.42×10^{-7}
6063 (4 saat)	-0,6126	1.32×10^{-7}
6063 (8 saat)	-0,6681	7.84×10^{-7}
6063 (24 saat)	-0,689	6.15×10^{-7}
6063 (Doğal)	-0,6319	5.33×10^{-8}
6063 (Döküm)	-0,6748	1.17×10^{-7}
6063 (H.Sonrası)	-0,6511	1.79×10^{-7}
6005-A (4 saat)	-0,5938	1.29×10^{-7}
6005-A (8 saat)	-0,5573	4.67×10^{-7}
6005-A (24 saat)	-0,527	3.30×10^{-7}
6005-A (Doğal)	-0,7411	2.71×10^{-7}
6005-A (Döküm)	-0,6848	1.87×10^{-7}
6005-A (H. Sonrası)	-0,6979	1.96×10^{-7}

5.1.3 Kütle Kaybı Analiz Sonuçları

%3,5 NaCl çözeltisi içine 14 gün boyunca hareketsiz ortamda daldırma gerçekleştirilen kütle kaybı ölçümleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı

Numuneler	Kütle Kaybı (mg/cm ² /gün)
6061 (4 saat)	0,05
6061 (8 saat)	0,06
6061 (24 saat)	0,14
6061 (Doğal)	0,08

Tablo 5.6 Korozyon potansiyeli ve korozyon akımı (devamı)

6061 (Döküm)	0,17
6061 (H. Sonrası)	0,11
6082 (4 saat)	0,08
6082 (8 saat)	0,07
6082 (24 saat)	0,06
6082 (Doğal)	0,03
6082 (Döküm)	0,1
6082 (H. Sonrası)	0,11
6063 (4 saat)	0,04
6063 (8 saat)	0,06
6063 (24 saat)	0,06
6063 (Doğal)	0,05
6063 (Döküm)	0,06
6063 (H. Sonrası)	0,09
6005-A (4 saat)	0,14
6005-A (8 saat)	0,14
6005-A (24 saat)	0,18
6005-A (Doğal)	0,12
6005-A (Döküm)	0,25
6005-A (H.Sonrası)	0,25

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda; dört farklı 6xxx serisi alaşım için gerçekleştirilen farklı yapay yaşlanma koşulları ile birlikte farklı korozyon davranışı sonuçları elde edilmiştir.

6061, 6082, 6063 ve 6005-A alaşımları için daldırma korozyon testleri ile 14 gün boyunca %3.5 NaCl çözeltisi içindeki kütle kaybı sonuçlarında en yüksek kütle kayıpları 6005-A alaşımında elde edilmiştir. Kütle kaybı testlerinde en yüksek korozyon dayancı 6082 doğal yaşlandırılmış koşulda elde edilmiştir. Bu durumda 6082 alaşımının endüstride denizcilik sektöründe yaygın kullanımı nedeniyle korozyon dayanımının iyi olduğu bilinmekteydi fakat doğal yaşlandırılmış koşul için 6082 alaşımı özelinde bir çalışmaya rastlanılmamıştır [20]. Bu dayanımın doğal yaşlanmanın bir sonucu olarak ince dağılan Mg_2Si 'ler yardımıyla gerçekleştiği düşünülmektedir. Tabi bu durum korozyon dayanımı açısından bir avantaj sağlarken Tablo 5.3'deki sertlik değerleri ile kıyaslandığında doğal yaşlandırılmış koşul, diğer yaşlandırılmış koşullara göre sertlik bakımından düşük kalmaktadır.

6082 alaşımı 8 saat pik yaşlandırılmış koşulda en düşük icorr değerine sahip olup, aynı zamanda düşük korozyon potansiyeline sahiptir. TAFEL eğrilerinden elde edilen değerlerde 6082 8 saat pik yaşlandırılmış numunenin korozyon davranışı için diğer alaşımlar ve yaşlandırma koşulları ile kıyaslandığında korozyonun görece geç başladığı aynı zamanda düşük icorr değeri sayesinde korozyonun çok yavaş devam ettiği sonucuna varılmıştır. 6005-A homojen sonrası ve döküm koşulundaki numuneler TAFEL eğrileri incelendiğinde korozyonun erken başlayarak düşük korozyon direnci sergilediği görülmüştür. Daldırma testi sonuçları da bu bulgular ile örtüşerek, 6005-A homojen sonrası ve döküm koşulu numuneler için 0,25 mg/cm²/gün kütle kaybı ile diğer koşullara kıyasla en yüksek kütle kaybı görülmüştür.

Alaşımlı elementi oranı bakımından karşılaştırma yapılacak olursa, 6063 alaşımı kolay şekil alınabilirliği sayesinde genel kullanım amaçlı ekstrüzyon profillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mukavemet gerektiren endüstriyel profillerde yaygın olarak kullanılan 6082 alaşımı ile kıyaslandığında en düşük kütle kaybı verisine sahip olmasada 6063 alaşımı tüm koşulları için görece düşük kütle kaybı verilerine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle 6063 doğal yaşlandırılmış koşul 0,05 mg/cm²/gün ile görece düşük kütle kaybına sahip olmakla birlikte, 6082 doğal yaşlandırılmış koşula göre daha düşük korozyon akımına sahiptir. 6005-A alaşımı yine 6063 alaşımı ile karşılaştırıldığında yakın bir kompozisyona sahip olsa da korozyon dayanımı açısından ne yazık ki yakın bir sonuç gösterememiştir. Tablo 4.1'deki kimyasal kompozisyon incelendiğinde 6063 ve 6005-A arasındaki en belirgin fark, manganez içeriği ile olduğu görülmektedir. Özellikle kaynaklanabilirlik açısından yapısal profillerde kullanılan 6061 alaşımı diğer alaşım kompozisyonlarına kıyasla daha yüksek bakır içeriğine sahiptir.

Literatürde birçok çalışma, mikroyapısal heterojenliklerin oluşturduğu elektrokimyasal potansiyellerdeki farklılıklar korozyonun temel nedenini oluşturduğunu göstermiştir. Heterojenlikler; inklüzyonlar, çökelmiş fazlar, çözünen bölgeler ve yüzey kusurlarından kaynaklı olabilir. Al-Mg-Si alaşımları söz konusu olduğunda Mg₂Si ana çökeltme fazını oluşturmaktadır. Bu faz çökelindiği bölgede oluşturduğu mikro galvanik hücre ile korozyona neden olmaktadır. Ancak, fazla miktarda Si ve Cu, Fe gibi alaşım elementleri kullanıldığında ve Al-Mg-Si alaşım sistemine eklenildiğinde, bir dizi ikinci faz partikülleri ve çözünen bölgeler ortaya çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum Al-Mg-Si alaşımlarında korozyon mekanizmasını anlamada çok daha karmaşık bir mikro yapıya neden olmuştur. Bu karmaşık çökelen yapı, bakır içeriğinin artışı ile birlikte taneler arası korozyonun arttığını göstermiştir [19][22][56][57][58][59][60][61]. Fakat özellikle 6005-A alaşımı için taneler arası korozyon çok yoğun bir şekilde görünürken 6061 alaşımı için taneler arası korozyon davranışı görülmemiştir.

En yüksek korozyon hızları 6082 ve 6061 alaşımlarının 4 saat yetersiz yaşlandırılmış koşullarında görülmüştür. Her iki alaşımda yüksek silisyum içeriğine sahiptir. Bu durum yetersiz yaşlanma ile birlikte silisyumun doğrudan çökeltmesinden kaynaklı olarak korozyon hızını artırdığı düşündürmektedir.

- [1] Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys Copyright, 1999 ASM International®, J.R. Davis, editor, p 1-24 All rights reserved., DOI: 10.1361/caaa1999p001 www.asminternational.org
- [2] M.C. Reboul, B. Baroux, “Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys”, *Materials and Corrosion* 2011, 62, No. 3 DOI: 10.1002/maco.201005650
- [3] B. Reinhold, “Investigation on microstructure and corrosion behaviour of 6XXX series aluminium alloys”, *Materials Science Forum* Vols. 519-521 (2006) pp 735-740 Online available since 2006/Jul/15 at www.scientific.net (2006) Trans Tech Publications, Switzerland, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.735
- [4] B. Reinhold, “On the stress corrosion cracking behaviour of 6XXX series aluminium alloys”, DLR – German Aerospace Center, Institute of Materials Research, Köln, Germany, 2010
- [5] W.J. Liang, P.A. Rometsch, L.F. Cao, N. Birbilis, “General aspects related to the corrosion of 6xxx series aluminium alloys: Exploring the influence of Mg/Si ratio and Cu”, *Corrosion Science* 76 (2013) 119–128, journal homepage: www.elsevier.com/locate/corsci, 0010-938X/\$ - see front matter 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.06.035>
- [6] B.A. Shaw, M.M. McCosby, A.M. Abdullah, H.W. Pickering, “The localized corrosion of Al 6XXX alloys”, Article in *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, July 2001, DOI: 10.1007/s11837-001-0087-7
- [7] B. Rinderer, “The metallurgy of homogenisation”, Consulting in Partnership Pty Ltd, Melbourne, Australia, abrinderer@iinet.net.au, *Materials Science Forum* Vol 693 (2011) pp 264-275 Online: 2011-07-27, © (2011) Trans Tech Publications, Switzerland, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.693.264
- [8] H. Ezuber, A.F. El-Houd, El-Shawesh, “A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater”, College of Engineering, University of Bahrain, P.O. Box 32038, Bahrain, b Petroleum Research Center, P.O. Box 6432, Tripoli, Libya, Available online 2 February 2007, Available online at www.sciencedirect.com, *Materials and Design* 29 (2008) 801–805
- [9] I.W. Huang, H. Belinda, L. Yang, F. Rudolph, G. Buchheit, “Dependence on Temperature”, pH, and Cl⁻ in the Uniform Corrosion of Aluminum Alloys 2024-T3, 6061-T6, and 7075-T6, *Electrochimica Acta* <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.125>
- [10] K.D. Ralston, D. Fabijanica, N. Birbilis, “Effect of grain size on corrosion of high purity Aluminium”, All rights reserved. doi: 10.1016/j.electacta.2010.09.023, *Electrochimica Acta* 56 (2011) 1729–1736,

Contents lists available at ScienceDirect *Electrochimica Acta*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/electacta

- [11] D.K. Xu, N. Birbilis, D. Lashansky, P.A. Rometsch, B.C. Muddle, "Effect of solution treatment on the corrosion behaviour of aluminium alloy" AA7150: Optimisation for corrosion resistance, doi: 10.1016/j.corsci.2010.09.015, *Corrosion Science* 53 (2011) 217–225, Contents lists available at ScienceDirect, *Corrosion Science*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/corsci
- [12] B. Aytaç, M.U. Daşçılar, "The effect of extrusion speed on the structure and corrosion properties of aged and non-aged 6063 aluminum alloy", 0254-0584/\$ – see front matter © 2011 Elsevier B.V. All rights reserved., doi: 10.1016/j.matchemphys.2011.09.029
- [13] V. Guillaumin, G. Mankowski, "Influence of Overaging Treatment on Localized Corrosion of Al 6056", Laboratoire Interfaces et Matériaux, UPRESA CNRS 5071, ENSCT, 118 route de Narbonne, 31077 Toulouse Cedex 04, France., *Corrosion*–January 2000
- [14] G. Svenningsen, M.H. Larsen, J.H. Nordlien, and K. Nişancioğlu, "Effect of high temperature heat treatment on intergranular corrosion of AlMgSi(Cu) model alloy," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 1, pp. 258–272, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2004.12.003.
- [15] G. Svenningsen, M.H. Larsen, J.H. Nordlien, and K. Nisancioglu, "Effect of thermomechanical history on intergranular corrosion of extruded AlMgSi (Cu) model alloy," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 12, pp. 3969–3987, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2006.03.018.
- [16] G. Svenningsen, M.H. Larsen, J.C. Walmsley, J.H. Nordlien, and K. Nişancioğlu, "Effect of artificial aging on intergranular corrosion of extruded AlMgSi alloy with small Cu content," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 6, pp. 1528–1543, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2005.05.045.
- [17] G. Svenningsen, J.E. Lein, A. Bjørgum, J.H. Nordlien, Y. Yu, and K. Nişancioğlu, "Effect of low copper content and heat treatment on intergranular corrosion of model AlMgSi alloys," *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 1, pp. 226–242, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2004.11.025.
- [18] K. El-Menshawey, A. Abdel-Wahab E. El-Sayed, Mohammed E. El-Bedawy, Hafez A. Ahmed, Saed M. El-Raghy, "Effect of aging time at low aging temperatures on the corrosion of aluminum alloy 6061", 0010-938X/\$ - see front matter 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi: 10.1016/j.corsci.2011.09.011, *Corrosion Science* 54 (2012) 167–173, journal homepage: www.elsevier.com/locate/corsci
- [19] V. Guillaumin, G. Mankowski, "Localized corrosion of 6056 T6 aluminium alloy in chloride media", 0010-938X/00/\$ - see front matter # 1999 Elsevier Science Ltd. All rights reserved., PII: S0 01 0 -9 38X(9 9) 00 0 53 -0, *Corrosion Science* 42 (2000) 105±125
- [20] U. Donatus, G.E.Thompson, X. Zhou, J. Wang, A. Cassell, K. Beamish, "Corrosion susceptibility of dissimilar friction stir welds of AA5083 and

- AA6082 alloys”, *Materials Characterization* (2015), doi: 10.1016/j.matchar.2015.07.002
- [21] A. Shi, B.A. Shaw, E. Sikora, “The Role of Grain Boundary Regions in the Localized Corrosion of a Copper-Free 6111-Like Aluminum Alloy”, *Engineering Science and Mechanics Department, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, Corrosion—JUNE 2005, 0010-9312/05/000113/\$5.00+\$0.50/0 © 2005, NACE International*
- [22] M.H. Larsen, J.C. Walmsley, O. Lunder, R.H. Mathiesen, K. Nişancıoğlu, “Intergranular Corrosion of Copper-Containing AA6xxx AlMgSi Aluminum Alloys”, *Journal of The Electrochemical Society*, 155 11 C550-C556 2008 0013-4651/2008/155 11 /C550/7/\$23.00 © The Electrochemical Society
- [23] F. Eckermann, T. Suter, P.J. Uggowitzer, A. Afseth, P. Schmutz, “The influence of MgSi particle reactivity and dissolution processes on corrosion in Al–Mg–Si alloys”, doi: 10.1016/j.electacta.2008.05.078, *Electrochimica Acta* 54 (2008) 844–855, Contents lists available at ScienceDirect, *Electrochimica Acta*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/electacta
- [24] G.E. Dmitry, “Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys”, 2008, CRC Press, pp. 1-17
- [25] D. Günay, “Alüminyum sektörü hakkında bir değerlendirme,” *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Müdürlüğü*, GA-06-07-08, Ankara, (Eylül 2006), 2006.
- [26] M. Ak, “AA206 alüminyum döküm alaşımında empürite demirin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi,” Ph.D. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [27] I.J. Polmear, “Light Alloys”, 2006, Elsevier, pp. 15-20
- [28] *Handbook of Aluminum Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing*, 2003, Marcel Dekker, George E. Totten, D. Scott MacKenzie
- [29] M. Yılmaz, “Alüminyum Sektöründe Yeni Kullanım Alanları”, *II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi*, 13-15 Mayıs 2003, Seydişehir
- [30] V. Güven, M. Mustafaoğlu, “Dünya ve Türkiye’de Alüminyum Pazarı ve Ticareti”, *Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi*, 13-15 Mayıs 2003, Seydişehir
- [31] W. Callister, “Materials Science and Engineering”, Utah University, Utah, 1990
- [32] D.G. Altenpohl, “Aluminium: Technology, Applications, and Environment. The Aluminium Association and The Minerals”, *Metals Materials*, Washington, 1998
- [33] P.K. Mallick, “Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles”, 2010, CRC Press, p10-29
- [34] C. Vargel, “Corrosion of Aluminium Second Edition”, 2020, Elsevier, pp. 3-16.
- [35] S. Ertan, M. DüNDAR, Y. Birol, K. Sarıoğlu, C. Romanowski, “Light Metals”, TMS. 2000
- [36] H.I.A. AL-Saadı, R.F. Tunay, R.F. “Sunı yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 5, no. 3, pp. 525–532, 2017.

- [37] S. Güven, Y. Delikanlı, “Aa 2024 alüminyum alaşımında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi,” *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 2, no. 2, pp. 13–20, 2019.
- [38] R. Yılmaz, D. Özyürek, E. Kibar, “Yeniden çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi,” *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 2, 2012.
- [39] Y. Çevirir, S. Necip, M. Yıldırım, “Isıl işlem süresinin ötektik-altı al-si alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisi,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 18, no. 3, ss. 1036–1042, 2018.
- [40] F. Vatansever, A.T. Ertürk, S. Karabay, “Alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin T6 ısıl işlemi ile iyileştirilmesi,” *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 20, no. 60, ss. 797–803, 2018.
- [41] F. Gül, “Alsi10mg döküm alaşımlarının bazı mekanik özellikleri üzerine ikincil yaşlandırma işleminin etkisi,” *Journal of Natural & Applied Sciences*, vol. 18, no. 1, 2014.
- [42] B. Yüksel, “6063 alüminyum alaşımının sertliği ve taneler arası korozyonu üzerine suni yaşlandırmanın etkisi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 23, no. 4, ss. 395–398, 2017.
- [43] A. Temel, “Alüminyumun elektrokimyasal ve korozyon karakteristiği,” *Makine & Metal Dergisi*, 114:37-41, 2001
- [44] M. Elusta, “İsotiyosiyanattan sentezlenen biskarbotiyoamid türevlerinin ve tetrazol türevlerinin korozyon inhibisyon etkisinin deneysel ve kuantum kimyasal olarak incelenmesi,” Ph.D., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [45] P.K. Saha, “Aluminum extrusion technology”, ASM International, Ohio. 2000
- [46] S. Ertan, M. Dünder, Y. Birol, K. Sarıoglu, C. Romanowski, “Light Metals”, TMS. 2000
- [47] M. Godat, B. Steiner, T. Staubli, “Mainstrip TRC Production Plant”, (2004)
- [48] F. Büyükbaş, “Çift merdaneli sürekli levha döküm yöntemi ile üretilmiş AA3003 alaşımlı alüminyum levhalarda proses parametrelerinin özelliklere etkisi”, *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi*, 2001
- [49] S.X. Zhou, J. Zhong, D. Mao, and P. Funke, “Experimental study on material properties of hot rolled and continuously cast aluminum strips in cold Rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 363-373., 2003
- [50] A. Erden, “İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemiyle üretilen aa6016 alaşımının mikro ve makro yapısal incelenmesi”, *FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006
- [51] K. Kurt, “Direk soğutmalı ve çift merdaneli döküm yolu ile üretilen 6xxx serisi kaynaklı ve kaynaksız alüminyum alaşımlarının oyuklanma korozyonu davranışı”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006

- [52] A. Yorulmaz, “Direkt soğutmalı döküm yönteminde sıvı metal kalitesi ve döküm şartlarının nihai ürün kalitesine etkisi”, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016
- [53] J. Grandfield, D.G. Eskin, I. Bainbridge, I. “Direct-Chill Casting Of Light Alloys”, Science And Technology, John Wiley & Sons., 2013
- [54] V.I. Dobatkin, “Continuous casting and casting properties of alloys”, Oborongiz, Moscow, pp.66-71., 1948
- [55] V.A. Livanov, “Casting of Large Ingots for Sheet Production from Aluminum Alloys”, Paper presented at Aluminum Alloys, Oborongiz, Moscow, pp. 128-168., 1955
- [56] Z.X. Wang, H. Li, F.F. Miao, W.J. Sun, B.J. Fang, R.G. Song, Z.Q. Zheng, “Improving the intergranular corrosion resistance of Al-Mg-Si-Cu alloys without strength loss by a two-step aging treatment”, Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process. 590 (2014), pp. 267–273.
- [57] S.K. Kairy, T. Alam, P.A. Rometsch, C.H.J. Davies, R. Banerjee, N. Birbiliş, N. “Understanding the origins of intergranular corrosion in copper-containing Al-Mg-Si alloys”, Metall Mater. Trans. A 47 (2016), pp. 985–989.
- [58] M.D. Hass, “Hosson, Grain boundary segregation and precipitation in aluminium alloys”, Scripta Mater 44 (2001), pp. 281–286.
- [59] F.L. Zeng, Z.L. Wei, J.F. Li, C.X. Li, X. Tan, Z. Zhang, Z.Q. Zheng, “Corrosion mechanism associated with Mg₂Si and Si particles in Al-Mg-Si alloys”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 21 (2011), pp. 2559–2567.
- [60] A.K. Bhattamishra, K. Lal, “Microstructural studies on the effect of Si and Cr on the intergranular corrosion in Al-Mg-Si alloys”, Mater. Des. 18 (1997) 25–28.
- [61] M.H. Larsen, J.C. Walmsley, O. Lunder, K. Nişancioğlu, “Effect of excess silicon and small copper content on intergranular corrosion of 6000-Series aluminum alloys”, J. Electrochem. Soc. 157 (2010) C61–C68.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

1. Doğan M. Tütük İ. Acar S. Öztürk K. Güler K.A. (2021). “Investigation of The Corrosion Behavior of AA 6082 Alloy in Different Aging Conditions”, 6. International Conference on Material Science and Technology, 26-28 Kasım, Kapadokya, Nevşehir
2. Doğan M. Tütük İ. Acar S. Öztürk K. Güler K.A. (2022). “Effect of Aging Conditions of AA6063 and AA6061 Alloys on Corrosion Behavior”, 10. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu, 3-4 Mart, İSTANBUL
3. Doğan M. Tütük İ. Acar S. Öztürk K. Güler K.A. (2022). “Investigation of The AA6005-A Alloy’s Corrosion Behavior in Different Aging Conditions”, 21. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-8 Ekim, İSTANBUL