T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE EKSTRÜZYON HIZI VE SICAKLIĞIN MALZEMENİN MEKANİK VE METALURJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZDEN ALPEREN ÇAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

EKİM - 2023
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Özden Alperen ÇAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE EKSTRÜZYON HIZI VE SICAKLIĞIN MALZEMENİN MEKANİK VE METALURJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZDEN ALPEREN ÇAL

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Bu çalışmada, günümüzde pek çok alanda kullanılmakta olan iki farklı alüminyum alaşımının ekstrüzyon yöntemiyle farklı hız ve farklı sıcaklık parametreleri altındaki üretimlerinde mekanik ve metalürjik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada DC döküm yöntemi ile dökülen AA6061 ve AA6063 alaşımları, malzemede hem yüzey kalitesini, hem de mekanik özellik değerlerini artırmak ve tanelerin homojen dağılımını sağlamak amacıyla ekstrüzyon öncesinde homojenizasyon ısıl işlemine maruz bırakılmıştır. Ekstrüzyon üretim metoduyla üretilen numunelere ayrıca yapay yaşlandırma işlemi de uygulanmıştır. Test numunelerine sertlik ve çekme deneyleri, mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ve mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlar mikroyapı sonuçlarıyla eşleştirildiğinde 450 °C sıcaklıktaki üretimlerin en uygun sonuçları verdiği, ekstrüzyon hızlarında ise bariz değişiklikler oluşturmadığı tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Alüminyum, AA6061, AA6063, Ekstrüzyon, Mikroyapı, Mekanik özellikler.

Ekim 2023, 100 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF EXTRUSION SPEED AND TEMPERATURE ON THE MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL IN THE EXTRUSION PRODUCTION OF ALUMINUM ALLOYS

ÖZDEN ALPEREN ÇAL

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA

In this study, the effects on mechanical and metallurgical properties of two different aluminium alloys used in many fields today were investigated by the extrusion method under different speeds and different temperature parameters. In the study, AA6061 and AA6063 alloys cast by the DC casting method were subjected to homogenisation heat treatment before extrusion to increase surface quality and mechanical property values and ensure homogeneous distribution of grains. The specimens produced by the extrusion production method were also subjected to an artificial ageing process. Test specimens were subjected to hardness and tensile tests and microstructure investigations. When the hardness and strength tests matched the microstructure results, it was determined that the production at 450 °C temperature gave the most suitable results and did not produce apparent changes in extrusion speeds.

KEYWORDS: Aluminium, AA6061, AA6063, Extrusion., Microstructure, Mechanical Properties.

October 2023, 100 Page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destek nedeniyle tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya teşekkürü bir borç bilirim. Teknik konularda bilgilerini esirgemeyen ve işletme imkânlarını seferber eden üretim müdürüm Sayın Ömer Faruk ERGENE'ye, alaşımların hazırlanması ve döküm prosesinde değerli çalışma arkadaşım Sayın Öner YÜZÜAĞCA'ya, ekstrüzyon üretimleri sırasında bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Bülent KURTOĞLU'na, numune hazırlama sürecinde destek sağlayan Sayın Serkan İNAN'a, imalat, çekme ve sertlik deneylerinde yardımını esirgemeyen Sayın Ferhat PİLEVNE ve Sayın Ozan TEPELİ'ye ve tüm bu çalışmaları gerçekleştirebilmem için bütün bu imkanları sunan değerli işverenim Sayın Engin ÖZTEL'e ve tüm Asistal Alüminyum ailesine teşekkürü ederim. Ayrıca tezime yaptığı katkılar nedeniyle jüri üyeleri Doç. Dr. Arif UZUN ve Dr. Öğr. Üyesi Uğur ARABACI'ya teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlıklarına teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bugünlere ulaşmamda maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de çalışmalarım süresince göstermiş oldukları sabır ve anlayıştan dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

ÖZDEN ALPEREN ÇAL

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI **3**
2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri 3
2.2 Alüminyum Alaşımlarının Gruplandırılması 5
2.2.1 Dövme (Mekanik İşlem) Alüminyum Alaşımları 5
2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları 8
2.3 Elementlerin Alaşımlara Uyguladığı Etkiler 10
2.3.1 Demirin Etkisi 11
2.3.2 Silisyumun Etkisi 11
2.3.3 Bakır Etkisi 11
2.3.4 Magnezyumun Etkisi 12
2.3.5 Manganezin Etkisi 12
2.3.6 Çinkonun Etkisi 13
2.3.7 Nikelin Etkisi 13
2.3.8 Alaşımı Etkileyen Geçiş Metalleri 13
3. ALÜMİNYUM - SİLİSYUM, ALÜMİNYUM - MAGNEZYUM VE ALÜMİNYUM BAKIR ALAŞIMLARI **15**
3.1 Alüminyum ve Silisyumdan Oluşan Alaşımlar 15
3.2 Alüminyum ve Magnezyumdan Oluşan Alaşımlar 16
3.3 Alüminyum ve Bakır İçeren Alaşımlar 18
3.4 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarında Termal Çevrim Fazları 19
3.5 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi 20
3.5.1 Çözeltiye Uygulanan Isıl İşlem (Solutıon Heat Treatment) 21
3.5.2 Su Verme (Quenching) 21
3.5.3 Yaşlandırma (Aging) 21
3.6 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüde Edildikten Sonraki Kullanım Alanları 22
3.7 6xxx Serisi Ekstrüzyon Alaşımlarında Uygulanan Üretim Prosesleri 24
3.7.1 Metal Ergitme 24
3.7.2 Direkt Soğutmalı Döküm Metodu 26
3.7.3 Homojenizasyon 29
4. EKSTRÜZYON **31**
4.1 Ekstrüzyon Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması 31
4.1.1 İleri Yönlü Ekstrüzyon 31
4.1.2 Geri Yönlü Ekstrüzyon 32

4.2 Ekstrüzyon 33
4.2.1 Hammadde Ön Isıtma 34
4.2.2 Ekstrüzyon Presleri ve Yardımcı Donanımlar 35
4.2.2.1 Ekstrüzyon presi 35
4.2.2.2 Kovan 36
4.2.2.3 Baskı pulu 36
4.2.2.4 Konveyör 37
4.2.2.5 Takım taşıyıcı 37
4.2.2.6 Basınç yüzüğü 37
4.2.2.7 Germe tertibatı 37
4.2.2.8 Soğutma 37
4.3 Ekstrüzyon Mekaniği 38
4.3.1 Plastik Şekil Verme ve Metal Akışı 38
4.3.2 Ekstrüzyon Basıncı 39
4.3.3 Ekstrüzyon Kuvveti 41
4.4 Ana Parametrelerin Ekstrüzyona Etkisi 41
4.4.1 Ekstrüzyon Oranı 42
4.4.2 Ekstrüzyon Hızı 43
4.4.3 Ekstrüzyon Sıcaklığı 43
4.4.4 Malzemenin Plastisite Sınırları 44
4.4.5 Ekstrüzyon Sonrası Soğutma 44
4.4.6 Yaşlandırma Isıl İşlemi 45
4.5 Alüminyum Ekstrüzyon Sürecinde Sıkça Karşılaşılan Kusurlar 45
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI 47
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 53
6.1 Materyal 53
6.2 Metot 54
6.2.1 Numunelerin Hazırlanması 59
6.2.2 Mikroyapı İncelemeleri 59
6.2.3 Sertlik Testleri 61
6.2.4 Çekme testleri 62
7. DENEY BULGULARININ TARTIŞILMASI 64
7.1 Mikroyapı İncelemeleri 64
7.1.1 OM Görüntülerinin Değerlendirilmesi 64
7.1.2 SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi 69
7.1.2.1 Mikroyapıların genel değerlendirmesi 76
7.1.3 EDS İncelemeleri 78
7.2 XRD Analizleri 79
7.3 Sertlik Testlerinin Değerlendirmesi 80
7.4 Çekme Testlerinin Değerlendirilmesi 83
7.4.1 Çekme Testi Kırılma Yüzeylerinin İncelemeleri 86
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 91
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Isıl İşlem Durumlarına Göre Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 7
Şekil 2.2 Isıl işlem durumlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 9
Şekil 3.1 Al- Si Faz Grafiği 15
Şekil 3.2 Al-Mg Faz Grafiği 17
Şekil 3.3. Al-Cu faz diyagramı 18
Şekil 3.4 Al- Mg2Si Faz Grafiği 20
Şekil 3.5 Çökelti ile sertleştirilebilir alaşımda aşırı doymuş α katı çözeltisinin yaşlanmasıyla oluşan bozulma ürünleri 22
Şekil 3.6 Tipik bir ekstrüzyon fabrikasında üretim süreçleri 24
Şekil 3.7 DC döküm metoduyla dökülmüş olan biyetlerin homojenize edilmesinden önceki görüntüleri 28
Şekil 3.8 Direkt soğutmalı döküm sistemi kesit görünümü 28
Şekil 4.1 İleriye ekstrüzyon yöntemi 32
Şekil 4.2 Geriye ekstrüzyon yöntemi 32
Şekil 4.3 Alüminyum Ekstrüzyon Prosesi Temel adımları 34
Şekil 4.4 Alüminyum Ekstrüzyon Presi 36
Şekil 6.1 Alüminyum kütüklerin döküm işlemiyle üretimi 55
Şekil 6.2 Alüminyum kütüklerden ekstrüzyon işlemiyle profil üretimi 57
Şekil 6.3 Alüminyum profillere yaşlandırma işleminin uygulandığı ısıl işlem fırınları 58
Şekil 6.4 Üretimi tamamlanan alüminyum profillerin çekme ve sertlik numunelerinin oluşturulması için CNC tezgâhında işlenmesi 59
Şekil 6.5 Mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirildiği metalografi laboratuvarı 61
Şekil 6.6 Deneylerde kullanılan sertlik cihazı 62
Şekil 6.7 Çekme cihazı ve çekme işlemi gerçekleştirilen numune görüntüsü. 63
Şekil 7.1 1 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 64
Şekil 7.2 2 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 64
Şekil 7.3 3 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 65
Şekil 7.4 4 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 65
Şekil 7.5 5 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 65
Şekil 7.6 6 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 65
Şekil 7.7 7 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 65
Şekil 7.8 8 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 66
Şekil 7.9 9 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 66
Şekil 7.10 10 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 66
Şekil 7.11 11 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 66
Şekil 7.12 12 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 66
Şekil 7.13 13 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 67
Şekil 7.14 14 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 67
Şekil 7.15 15 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 67
Şekil 7.16 16 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 67
Şekil 7.17 17 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 67

Şekil 7.18 18 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x) 68
Şekil 7.19 Tane boyutu analizinin grafiksel gösterimi 69
Şekil 7.20 1 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 70
Şekil 7.21 2 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 70
Şekil 7.22 3 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 70
Şekil 7.23 4 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 71
Şekil 7.24 5 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 71
Şekil 7.25 6 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 71
Şekil 7.26 7 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 72
Şekil 7.27 8 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 72
Şekil 7.28 9 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 72
Şekil 7.29 10 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 73
Şekil 7.30 11 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 73
Şekil 7.31 12 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 73
Şekil 7.32 13 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 74
Şekil 7.33 14 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 74
Şekil 7.34 15 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 74
Şekil 7.35 16 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 75
Şekil 7.36 17 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 75
Şekil 7.37 18 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x) 75
Şekil 7.38 Numunelerin EDS analizleri 78
Şekil 7.39 EN AW 6061 numunelerin XRD grafiği 79
Şekil 7.40 EN AW 6063 numunelerin XRD grafiği 80
Şekil 7.41 Sertlik grafiği 81
Şekil 7.42 Akma mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi 84
Şekil 7.43 Çekme mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi 84
Şekil 7.44 1 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 86
Şekil 7.45 2 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 86
Şekil 7.46 3 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 86
Şekil 7.47 4 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 87
Şekil 7.48 5 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 87
Şekil 7.49 6 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 87
Şekil 7.50 7 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 87
Şekil 7.51 8 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 87
Şekil 7.52 9 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 88
Şekil 7.53 10 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 88
Şekil 7.54 11 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x) 88

Şekil 7.55 12 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 88
Şekil 7.56 13 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 88
Şekil 7.57 14 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 89
Şekil 7.58 15 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 89
Şekil 7.59 16 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 89
Şekil 7.60 17 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 89
Şekil 7.61 18 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)..... 89

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Alüminyumun nitelikleri diğer metallerle mukayesesi 4
Tablo 2.2 Mekanik işlem alüminyum alaşımlarının gösterimi 6
Tablo 2.3 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıl işlem halleri 7
Tablo 2.4 Alüminyum Alaşımları İçin Temper Seri Numaraları 8
Tablo 2.5 Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi 9
Tablo 2.6 Tipik Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri 10
Tablo 3.1 En çok kullanılan döküm alaşımlarının çeşitli silisyum miktarları 16
Tablo 3.2 6063 Alüminyum Alaşımlarında Termal Çevrim Sırasında Meydana Gelen Faz 19
Tablo 6.1 6061 ve 6063 alaşım hammadde spektral analiz sonuçları 53
Tablo 6.2 Deney numunelerinin üretim sıralama ve parametreleri 56
Tablo 7.1 OM görüntülerinden elde edilen tane boyutu analizi 68
Tablo 7.2 Sertlik testi sonuçları (HBW) 81
Tablo 7.3 Çekme testi sonuçları 83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	**:** Alüminyum
Be	**:** Berilyum
Cr	**:** Krom
Cu	**:** Bakır
Fe	**:** Demir
Ga	**:** Galyum
Mg	**:** Magnezyum
Mn	**:** Manganez
N	**:** Newton
Ni	**:** Nikel
Pb	**:** Kurşun
Si	**:** Silisyum
Ti	**:** Titanyum
V	**:** Hacim
Zn	**:** Çinko
Zr	**:** Zirkoryum

Kısaltmalar

cm	**:** Santimetre
dk	**:** Dakika
mm	**:** Milimetre

1. GİRİŞ

Alüminyum, günümüzde pek çok sektörde kullanılmakta olan modern hayatın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiş bir metaldir. Hafifliği, dayanıklılığı ve çevreci özellikleri ile endüstride geniş bir yelpazede kullanılmakta olan alüminyum, modern dünyanın temel malzemelerindendir.

Alüminyumun en önemli özelliklerinden biri hafifliğidir. Yoğunluğu düşük olduğu için aynı hacimdeki diğer metallerden çok daha hafiftir, bu sebeple alüminyumun pek çok uygulama için ideal bir seçim olarak karşımıza çıkmasını sağlar. Lojistik sektöründe kullanılmakta olan araçların ağırlığını azaltmak için alüminyum ideal bir hafiflik sağlar. Sağlamakta olduğu hafiflik sayesinde yakıt verimliliği artmakta, emisyon salınımı azalmakta ve çevreye olan olumsuz etkiler en aza indirgenmektedir.

Alüminyumun bir diğer önemli özelliklerinin başında ise dayanıklılığı gelmektedir. Dış ortam faktöründe doğal olarak oluşan koruyucu oksit tabakası, paslanmaya ve korozyona karşı koruma kalkanı oluşturur. Alüminyum, dış mekanlarda ve çeşitli hava şartlarında uzun süre dayanıklılık gösteren bir malzemedir. İnşaat sektöründe kullanılan yapısal bileşenler, çatı kaplamaları, kapı ve pencere profilleri gibi alüminyum ürünler, dayanıklılıkları ve düşük bakım gereksinimleri sebebiyle tercih edilmektedir.

Alüminyumun işlenebilirliği de büyük bir avantaj sağlar. Dövme, haddeleme, ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi işlemlerle alüminyum çeşitli şekillerde ve formlarda üretimi sağlanabilir. Kolayca işlenebilirliği sayesinde alüminyum farklı sektörlerde geniş bir yelpaze sunar. İnşaat sektöründe, alüminyum profil ve paneller bina cephesi kaplamalarında, çatı sistemlerinde ve iç mekan uygulamalarında kullanılır. Otomotiv endüstrisinde, alüminyum parçalar araç gövdelerinde, motor bileşenlerinde ve şasilerde kullanılır. Elektrik ve elektronik endüstrisinde de alüminyumun iyi elektrik iletkenliği ve ısı dağılımı özellikleri sayesinde kablolar, radyatörler ve soğutucuların üretiminde tercih sebebi olmasını sağlar.

Alüminyum çevreci bir malzemedir. Geri dönüştürülebilirliği yüksek olan alüminyum, yeniden kullanılabilir ve bu şekilde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Geri dönüşüm süreci, alüminyum üretimi için gereken enerji sarfiyatını büyük oranda azaltır ve doğal kaynakların korunmasında önemli bir rol oynar. Geri dönüşümü sağlanan alüminyumun kalitesi birkaç kez yeniden kullanılabilir ve geri dönüşüm döngüsü tekrarlanabilir.

Sonuç olarak, alüminyum modern dünyanın önem arz eden malzemelerinden biridir. Hafifliği, dayanıklılığı, işlenebilirliği ve çevreci özellikleri sayesinde birçok sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. İnşaat, otomotiv, elektrik, elektronik ve ambalaj sektörlerinde alüminyumun çeşitli uygulamaları bulunur.

Gelecekte, alüminyumun kullanım alanlarının daha da genişleyerek inovatif uygulamaların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bilim ve teknolojideki ilerlemeler, alüminyumun özelliklerini daha da geliştirerek ve yeni fırsatlar yakalanmasında önemli rol oynayacaktır. Alüminyum, modern dünyanın sürdürülebilir ve yenilikçi bir geleceğinde kullanım alanı çeşitliliğini arttırarak sürekli devam edecektir.

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum, periyodik tabloda Al sembolüyle ifade edilen 13. elementtir ve yaygın bir elementtir. Doğada en fazla bulunan metallerden olmakla beraber bütün minerallerde bulunabilir. Fakat, saf halde bulunma durumu az görülmektedir. Alüminyum, hafifliğiyle ve yoğunluğu diğer metallerden daha az olması ile ön plana çıkmaktadır. Lojistik, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde çeşitli faydalar sağlar. Alüminyumun düşük yoğunluğu (2,7 gr/〖cm〗^3), taşıtların ağırlığını azaltmakta ve yakıt verimliliğini arttırırken aynı zamanda yüksek mukavemeti ile çok daha dayanıklı bileşenler oluşturmak için büyük fırsatlar sunmaktadır.

Alüminyum, periyodik tablonun üçüncü grubunda bulunan bir elementtir ve atom numarası 13'tür. Atom çapı 1,43 A°, iyon çapı ise 0,86 A° ve atom ağırlığı 26,97'dir. Alüminyum, diğer metaller gibi elektron dizilimine bağlı olarak bileşikler oluşturur. Elektron yapısı incelendiğinde, K kabuğunda iki elektronla doymuş bir 1s orbitali ve L kabuğunda iki elektronla doymuş bir 2s orbitali bulunur. Atomun dışında ise M kabuğunda üç elektron bulunur. Bu üç elektronun ikisi 3s orbitalinde, biri ise 3p orbitalinde bulunur. Bu nedenlerle alüminyum üç değerlikli olarak sınıflandırılır.

Alüminyum, diğer metallerle karşılaştırıldığında yumuşak bir yapıya sahip olup, demire kıyasla üç kat daha hafiftir. Alüminyum, diğer metallerle alaşımlanarak yoğunluğu artırıldığında, mekanik dayanımı da önemli ölçüde artmaktadır. Magnezyum ve berilyumdan sonra en hafif metal olan alüminyumun yoğunluğu 2,7 gr/cm³'dir. Alüminyumun sıvı ve katı hallerinin yoğunluğu, artan saflık seviyesiyle orantılı olarak değişir.

Alüminyumun önemli bir özelliği, iyi bir iletken olmasıdır. Alüminyum, bakırın sergilediği iletkenlik seviyesinin yaklaşık %60'ı kadar iletkenlik gösterir, ancak düşük yoğunluğu sayesinde birim kütle başına daha yüksek iletkenlik sunar. Bu nedenle, alüminyum, bakıra kıyasla daha yüksek bir iletkenlik seviyesine sahiptir. (Yılmaz, 2002).

Alüminyum, yüksek ısı transferi yeteneği nedeniyle ısı kazanı parçalarında tercih edilmektedir. Isı transferi, alüminyumun saflık derecesine bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, %99,489 saflıkta olan bir alüminyum metalinde 200°C'de 0,5 cal/cm s°C ısı transferi gerçekleşirken, %99,7 saflıkta olan bir alüminyum metalinde bu değer 0,531 cal/cm s°C'dir.

Alüminyumun korozyona karşı yüksek direnç göstermesi, gıda ve kimya endüstrileri, inşaat ve mimari sektörler, ev araç gereçleri gibi birçok önemli sektörde tercih edilmesinin bir başka sebebidir.

Ayrıca, alüminyumun esneklik katsayısı da önemli bir mekanik özelliğidir. Alüminyumun esneklik katsayısı çeliğin 1/3'üne denk gelir. Bu nedenle, çeşitli sektörlerde çeliğin yerine alüminyum tercih edildiğinde, esneme miktarının çeliğe kıyasla üç kat daha fazla olacağı unutulmamalıdır.

Alüminyumun birleşen pek çok özelliği, onu son derece önemli bir mühendislik malzemesi haline getirmiştir. Saf alüminyumun başlangıçta düşük dayanımına rağmen, alaşımlanarak dayanımı 690 Mpa'ya kadar çıkarılabilir. Alüminyumun özellikleri, ilave edilen elementlerin etkisiyle değiştirilebilir.

Alüminyumun bazı özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir (Yılmaz, 2002).

Tablo 2.1 Alüminyumun nitelikleri diğer metallerle mukayesesi (Yılmaz, 2002)

Özellik	Al	Cu	Fe	Zn	Mg
ÖzgülAğırlık(gr/cm^3)	2,70	8,94	7,87	4,1	1,74
Elektrik Direnci $\left(Ohm.\frac{mm^2}{2}\right)x10^{2}$	2,66	1,68	9,8	6,0	4,46
Isıl İletkenliği ($\frac{cal}{cm^2}/cm°C$	0,52	0,92	0,19	0,27	0,37
Isıl genleşme katsayısı (mm/mm°C).10^{-6}	24,0	16,7	11,9	33,0	25,7
Ergime Sıcaklığı (°C)	660	1083	1535	420	651
Yanma katsayısı (kcal/kg)	6970	-	1600	1270	6000
Uzama (%)	43	50	48	-	-
Sertlik (BHN)	19	25	70	-	-

2.2 Alüminyum Alaşımlarının Gruplandırılması

Alüminyumun diğer metallerle birleştirilmesi suretiyle elde edilen malzemeler alüminyum alaşımları olarak adlandırılmaktadır. Alüminyumun özelliklerini iyileştirmek veya istenen gereksinimlere uygun hale getirmek amacıyla gerçekleştirilir.

Alüminyum alaşımlarını gruplandırmak, farklı bileşimlerine ve üretim özelliklerine yapılır. Bir alüminyum alaşımı alüminyumun yanı sıra diğer alaşım elementlerini içerir. Bu elementler, alaşımın mukavemeti, sertliği, şekillendirilebilirliği, ısı direnci ve korozyona karşı dayanıklılığı gibi özelliklerini etkiler. Temel olarak, alüminyum alaşımları iki ana gruba ayrılabilir: dövme (mekanik işlem) alaşımlar ve dökme alaşımlar.

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında, Alüminyum Standartlar Birliği (ASA) tarafından oluşturulan standartlar temel alınır. Bunun yanı sıra DIN 1713, ASTM, ALCOA gibi farklı standartlar da kullanılmaktadır. Bu standartlar, alüminyum alaşımlarını mekanik işlem alaşımları ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayırır. Bu sınıflandırma, alaşımların özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre yapılmaktadır (Turhan, 2002).

Plastik deformasyon yöntemiyle şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan farklı bir mikroyapı ve bileşime sahiptir. Bu iki temel gruptaki alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilir. Isıl işlem, alüminyum alaşımlarında istenen dayanımı elde etmek için kullanılan bir üretim sürecidir (Kvande, 1999).

2.2.1 Dövme (Mekanik İşlem) Alüminyum Alaşımları

Mekanik işlem alüminyum alaşımlar, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Otomotiv, havacılık, inşaat ve ambalaj endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

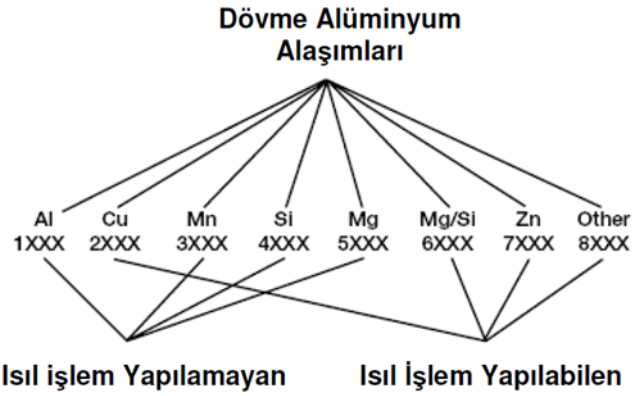
Dövme alüminyum alaşımları için genellikle kullanılmakta olan simgeleme metodu 1957 senesinde Alüminyum Birliği içerisinde geliştirilmiştir. Simgeleme yöntemi aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi dört haneli rakamlardan oluşmaktadır.

Tablo 2.2 Mekanik işlem alüminyum alaşımlarının gösterimi (Turhan, 2002)

SİMGE	Temel Alaşım Elementi	Faz Durumu
1xxx	Saf Alüminyum (%99.00Al)	Tek Faz
2xxx	Al-Cu	İki Faz
3xxx	Al-Mn	Tek Faz
4xxx	Al-Si	İki Faz
5xxx	Al-Mg	Tek Faz
6xxx	Al-Si-Mg	İki Faz
7xxx	Al-Zn	İki Faz
8xxx	Diğer elementler	
9xxx	Kullanılmayan dizi	

Bu dört basamaktan oluşan gösterimin ilk rakamı alüminyumun içerisindeki temel alaşım elementini belirtir. Son iki basamak %99 değerinin virgülden sonra gelen değerini gösterir. Binler basamağındaki rakam özel olarak denetlenmekte olan alaşım elementlerinin adetini gösterir. Örneğin 1052 alaşımını inceleyecek olursak alaşımın saf alüminyum ve saflık oranı olarak %99,52'dan az olmadığını gösterir.

2xxx'den 8xxx arasında olan alüminyum alaşımlarında ilk basamak alaşımın türünü, ikinci basamak ise alaşım reçetesindeki değişimleri, son iki basamak ise çeşitli alaşımların tanınmasını sağlamak amacıyla kullanılır. 9xxx serisi sadece deneysel çalışmada olan alaşımları anlamak amacıyla kullanılmaktadır. Üretime geçildiğinde 9xxx simgesi alınarak yerine özelliklerine en uygun olan simgesi verilir. Üretimi gerçekleştirilen alaşım standartlaşana kadar dört basamaklı simgenin önüne X konularak ifade edilir (Yılmaz, 2002).



Şekil 2.1 Isıl İşlem Durumlarına Göre Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (Yılmaz, 2002)

Mekanik işlem ile şekillendirilen alüminyum alaşımları, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Genellikle 2xxx, 4xxx, 6xxx ve 7xxx serileri, özellikleri değiştirmek amacıyla ısıl işleme tabi tutulan alaşımlardır. 3xxx ve 5xxx serisi alüminyum alaşımlarına ise genellikle ısıl işlem uygulanmaz.

Isıl işlem uygulamasını kabul etmeyen dövme alüminyum alaşımlarının giriş mukavemeti bakır, magnezyum, çinko ve silisyum olan farklı alaşım elementlerinin takviyesi ile arttırılmaktadır. Söz konusu elementler tek başına ya da farklı bileşimler şeklinde yapıya eklendiğinde artan sıcaklık ile birlikte alüminyumun içerisindeki katı çözünürlüğüne pozitif yönlü etkisi gözlemlenmiştir. Söz konusu alaşımların mukavemetini arttırmak amacıyla ısıl işlemler uygulanabilir (Aluminium Association, 1994).

Dövme veya döküm yöntemiyle oluşturulan alüminyum alaşımlarının ısıl işlem durumları, eklenen bir ya da birkaç harf ile tanımlanır.

Tablo 2.3 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısıl işlem halleri (Yılmaz, 2002)

Simge	Temel İşlem
F	Fabrikasyondan sonraki durumudur. Bu durum; mukavemet veya sertliğini değiştirmek için herhangi bir ek işlem yapılmadan imalattan sonraki fiziki yapısını belirtir
O	Tavlanmış, yeilenmiş (yeniden kristalleşmiş) alaşımlar için kullanılmaktadır. En yumuşak durumdur.
H	Yeniden kristallenme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin arttığını belirtir.
W	Çözeltiye alma ısıl işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı belirtir. Bu durum doğal yaşlanmadan dolayı yaşlanma süresinin verilmesi ile belirtilir.
T	Isıl işlem görmüş alaşımlar için kullanılmaktadır. Yaşlanma işlemi T harfini takip eden bir rakamla belirtilir. Uygulanan işlemlerden sonra elde edilen özelliklere uymayan özellikler mevcutsa ikinci bir rakam daha kullanılır.

Mukavemet kazandırma derecesi alaşımın ısıl işlem kabiliyetine uygun temper adlandırması “T” ve “H” ile gösterilir (Tablo 1.3). Diğer adlandırmalar ise alaşımın tavlandığını (O), çözündürme işlemine tabi tutulduğunu (W) veya üretildiği haliyle kullanıldığını (F) göstermektedir. “T” ve “H” dan sonra gelen rakamlar pekleşme oranını gerçekteki ısıl işlem şeklini ve alaşımın diğer özel işlem durumlarını açıklar (Kvande, 1999).

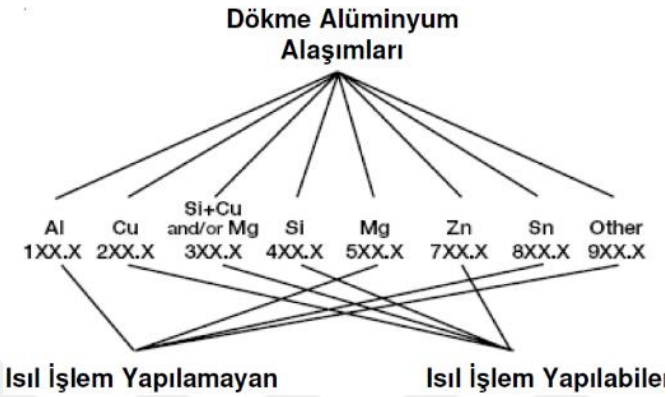
Tablo 2.4 Alüminyum Alaşımları İçin Temper Seri Numaraları (Metal Handbook, 1979)

Temper	Açıklama
F (M)	İmal edildiği şekilde (sıcak şekillendirme, dövme, döküm vs.)
0	Tavlanmış (mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendime, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme H18 temperleri ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş, kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısıl işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve esaslı olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esaslı olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4 (TB)	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5 (TE)	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T6 (TF)	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış
T7	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T8	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Dökme alüminyum alaşımları, döküm yöntemiyle üretim için geliştirilmiş olan alaşımlardır. Bu alaşımlar, döküm işlemine uygun sıvılaşma ve donma davranışları

sergiler. Dökme alaşımlar, genellikle 2xx.x, 3xx.x, 3xx.x+Si, 4xx.x, 5xx.x, 7xx.x ve 8xx.x gibi numaralandırılarak ifade edilir. Her numara, farklı alaşım bileşimlerini ve döküm özelliklerini temsil eder. Dökme alüminyum alaşımları, otomotiv, elektronik ve hafif yapı malzemeleri gibi farklı endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılır.



Şekil 2.2 Isıl işlem durumlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Yılmaz, 2002)

Tablo 2.5 Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi (Yılmaz, 2002)

Simge	Temel alaşım elementi
1xx.x	Alüminyum (en az %99.00)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum-bakır veya magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan dizi
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

1xx.x serisi alüminyum alaşımlarında, ikinci ve üçüncü basamaklar alüminyumun safiyet derecesini gösterir. Noktadan sonra gelen basamak ise döküm şeklini belirtir. Rakamsal karşılıkları ise şu şekildedir: 0 - Döküm, 1 - İngot (Külçe), 2 - Değişime uğramış ingot.

3xx.x'den başlayarak 9xx.x'e kadar olan alaşımlarda ise ikinci ve üçüncü rakamlar sadece bir sıralama numarasını temsil eder.

Alüminyum alaşımlarının gruplandırılması, istenen özelliklere göre malzeme seçimini kolaylaştırır. Dövme veya dökme alaşımlar, çeşitli özelliklere sahip olabilir ve belirli uygulama alanlarında daha sağlıklı performans sağlar. Bu alaşım gruplandırma sistemi, mühendislerin ve tasarımcıların alüminyum alaşımlarını doğru bir şekilde seçmelerine ve kullanmalarına yardımcı olur.

Tablo 2.6 Tipik Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri (Askeland, 1998)

Alaşım	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama	Döküm İşlemi
295-T6	248	166	5	Kum
319-F	186	124	2	Kum
380-F	317	159	3,5	Kokil Döküm
356-T6	228 262	166 186	3,5 5	Kum Kokil Döküm
384-F	331	166	2,5	Kokil Döküm
390-F	228	241	1	Pres Döküm
443-F	131 159 228	55 62 110	8 10 9	Kum Kokil Döküm Pres Döküm
413-F	297	145	2,5	Pres Döküm
518-F	310	193	7	Kum
713-T5	207	152	4	Kum
850-T5	159	76	10	Kum

Alüminyum alaşımları geniş bir yelpazede karşımıza çıkar ve çeşitli faaliyet alanları için farklı özelliklerde olabilirler. Mekanik işlem (dövme) alaşımlar ve dökme alaşımlar, bu çeşitliliği organize etmek ve anlamlandırmak için tercih edilen gruplandırma sistemidir. Alüminyum alaşımları, hafiflik, mukavemet ve dayanıklılık gibi çeşitli özellikleri bir araya getirerek modern endüstrinin ihtiyaçlarına cevap veren malzemelerdir.

2.3 Elementlerin Alaşımlara Uyguladığı Etkiler

Alüminyum alaşımlarının içerdiği alaşım elementleri demir, silisyum, bakır, magnezyum, manganez, çinko, kalay, nikel, titanyum, zirkonyum, krom, sodyum, fosfor ve lityumdur.

2.3.1 Demirin Etkisi

Alüminyum alaşımlarında demir, tane küçültme özelliği ile önemli bir rol oynar. Ayrıca, bazı alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık mukavemetini artırarak dökümlerin sıcak çatlama eğilimini azaltıcı bir etki gösterir. Bu özellikler, alüminyum alaşımlarının mekanik ve termal performansını geliştirerek kullanım alanlarını genişletmelerini sağlar (Yılmaz, 2002).

2.3.2 Silisyumun Etkisi

Silisyum ilavesi, silisyum alüminyum alaşımlarının birçok önemli özelliğini olumlu yönde etkiler. Bu alaşımlarda silisyum, akışkanlık, korozyon direnci ve kaynak yeteneği gibi özellikler üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ayrıca, tane boyutu küçültme ve modifikasyon işlemleri ile birlikte alaşımın işlenebilme yeteneğini ve döküm özelliklerini iyileştirir. Silisyum ilavesi aynı zamanda alaşımın sıcak çatlama eğilimini azaltır. Ancak %3'ten fazla silisyum ilavesi, talaş kaldırmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle, silisyum alüminyum alaşımlarının döküm ve işleme süreçlerinde dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

2.3.3 Bakır Etkisi

Alüminyum alaşımlarında bakır alüminyum alaşımına sertlik, dayanım, döküm kabiliyeti ve işlenebilirlik açısından çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Alüminyum içerisinde bakırın %12'ye kadar olan değeri dayanımı arttırırken %12'den daha fazla bakır içermesi yapıda gevrek bir oluşum sağlar (Yılmaz, 2002).

Bakır, dövme alaşımlarında genellikle %3 ile %5 aralığında tercih edilen bir elementtir. Bu oranlar, alaşımın mekanik işlem kabiliyetini en iyi seviyede tutmayı sağlar. %5'ten fazla bakır ilavesi, mekanik işlemleri zorlaştırabilir ve aynı zamanda elektrik geçirgenliği ile korozyon direncinde düşüşlere neden olabilir.

Alüminyum içerisinde bulunan bakır, özellikle yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle işleme kabiliyetini artırır. Bakırın yüksek sıcaklık dayanımı, alaşımın yüksek

sıcaklıkta şekillendirilebilmesini ve işlenebilmesini sağlar. Bu da dövme işlemleri sırasında alaşımın daha iyi performans göstermesini sağlar.

Bakır ilavesi, alüminyum alaşımlarının mekanik ve termal özelliklerini iyileştiren önemli bir faktördür. Ancak, doğru oranlarda kontrol edilmelidir, aşırı miktarda bakır kullanımı istenmeyen sonuçlara yol açabilir.

2.3.4 Magnezyumun Etkisi

Magnezyum, alüminyum alaşımlarında yüksek mukavemet, iyileştirilmiş korozyon direnci ve kaynak yeteneği gibi pozitif etkiler sağlayabilir. Ancak, magnezyumun alaşım içindeki miktarı arttıkça, alaşımın sünekliği azalabilir. Bu durum, alaşımın genelde daha kırılgan bir yapıya sahip olmasına yol açabilir.

Magnezyum ilavesi, alaşımın mekanik özelliklerini geliştirerek daha yüksek mukavemet sağlayabilir. Aynı zamanda korozyon direncini artırarak alaşımın daha dayanıklı olmasını sağlar. Bununla birlikte, magnezyumun sünekliği azaltması, alaşımın genellikle daha az dövülebilir ve şekillendirilebilir olmasına neden olur.

Magnezyumlu alüminyum alaşımların dökümü de zor olabilir. Magnezyum, döküm işlemlerinde genellikle yüksek buharlaşma hızına ve aşırı reaktif olmasına bağlı olarak döküm işlemini karmaşıklaştırabilir. Bu nedenle, magnezyumlu alüminyum alaşımların dökümü için özel döküm yöntemleri ve kontrol önlemleri gerekebilir.

Sonuç olarak, magnezyum ilavesi alüminyum alaşımlarına çeşitli avantajlar sağlayabilirken, süneklik azalması ve döküm zorlukları gibi bazı dezavantajları da beraberinde getirebilir. Bu nedenle, magnezyumlu alüminyum alaşımların kullanımı özel gereksinimler ve işlem prosedürleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.

2.3.5 Manganezin Etkisi

Doğru bilgiye göre, alüminyum alaşımlarına manganez ilavesi çekme mukavemetini artırabilir. Manganez, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirerek

daha yüksek mukavemet sağlar. Ayrıca, manganez ilavesi yeniden kristalleşme sıcaklığını artırabilir ve bu da alaşımın şekillendirilebilirliğini ve işlenebilirliğini iyileştirebilir.

Yeniden kristalleşme sıcaklığının artması, alaşımın sıcaklıkta yeniden kristalleşme sürecini başlatabilmesi anlamına gelir. Bu, alaşımın şekillendirme işlemlerinde daha iyi kontrol edilebilirlik ve işlenebilirlik sağlar. Ancak, bu süreçte korozyon direncinin zarar görmemesi önemlidir. Manganez ilavesiyle yeniden kristalleşme sıcaklığının 50-60°C seviyelerine yükseltilmesi, alaşımın şekillendirme işlemlerinde daha iyi performans gösterirken korozyon direncini olumsuz etkilemez.

Sonuç olarak, manganez ilavesi alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetini artırabilir ve yeniden kristalleşme sıcaklığını yükseltebilir. Bu, alaşımın mekanik özelliklerini geliştirirken şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik açısından avantaj sağlar. Ancak, korozyon direncinin korunması da önemli bir faktördür ve manganez ilavesinin bu yönde etkili olması gerekmektedir.

2.3.6 Çinkonun Etkisi

Çinko, alaşımın döküm özelliklerini düşürür fakat çekme mukavemeti, haddelenebilirlik ve işlenebilirlik yeteneklerinde olumlu katkı sağlar. Yüksek olarak çinko içeren alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi oluşturur.

2.3.7 Nikelin Etkisi

Alüminyum alaşımlarında nikel yüksek sıcaklık mukavemeti ve boyutsal kararlılık sağlar.

2.3.8 Alaşımı Etkileyen Geçiş Metalleri

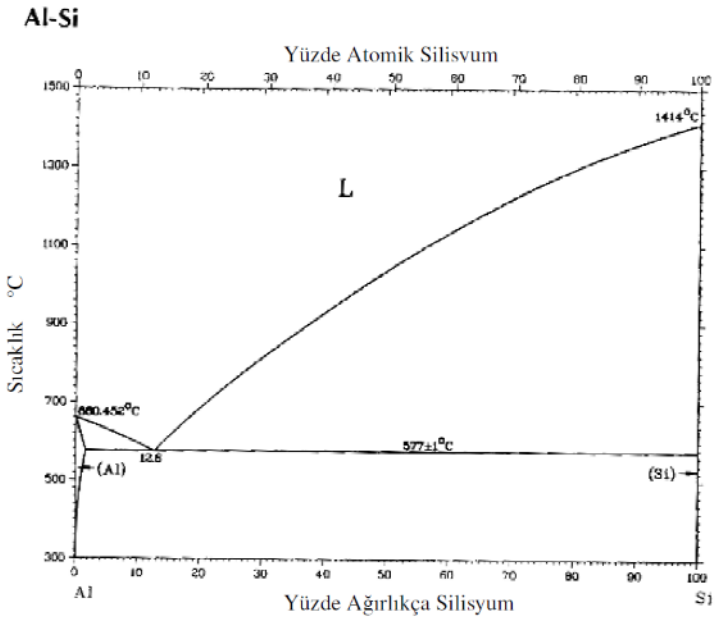
Alüminyum alaşımlarında geçiş metalleri olarak krom, zirkonyum, titanyum vb. kullanılmaktadır. Katı eriyik malzemede varolan geçiş metalleri alüminyumun temel alaşım elementlerinin balans rejimindeki çözünürlüğünü düşürmektedir. Geçiş metalleri katı eriyiğin mukavemetini arttırmak için kullanılır. Bunun yanı sıra katı

alüminyum eriyiğindeki geçiş metallerinin atom bağlarını güçlendirdiği ve atomların difüzyon hareketlerinin azalttığını savunmakta olan görüşler mevcuttur. Söz konusu olan görüşe göre geçiş metalleri eriyiğin dayanımını arttırmalıdır. Fakat alüminyumun içerisinde bulunan çinko ve magnezyum katı eriyiğindeki mukavemetini geçiş metalleriyle alaşımlandırarak dayanımın azaldığını gösteren uygulamalar mevcuttur. Çözünürlükteki artışı kabul edenler ile karşılaştırıldığında artış gözlemlenmesi daha doğru olarak yorumlanmaktadır. Krom ve zirkonyum hakkında da aynı yorumları yapmak mümkündür (Yılmaz, 2002).

3. ALÜMİNYUM - SİLİSYUM, ALÜMİNYUM - MAGNEZYUM VE ALÜMİNYUM BAKIR ALAŞIMLARI

3.1 Alüminyum ve Silisyumdan Oluşan Alaşımlar

Döküm alaşımlarının ana alaşım elementi silisyum içermektedir. 577ºC'de %11,7 Si bulunduran alaşım, alüminyumda ötektik bir yapı oluşturmaktadır (Şekil 3.1) (Brown, 1994).



Şekil 3.1 Al- Si Faz Grafiği (ASM, 1992)

Oda sıcaklığındaki silisyumun alüminyum içindeki çözünürlük seviyesi düşüktür. Ötektik sıcaklığında ise silisyumun alüminyum içindeki çözünürlük seviyesi %1,59'dur ve %12,6 Si noktasında ötektik ayrışma göstermektedir. Alüminyum silisyum alaşımlarının yapıları daha az sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında α ve β gibi iki katı eriyik karışımından oluşmaktadır. Bu alaşım karışımlarları aşağıdaki şekillerde bulunur:

1. Silisyum oranı ötektik bileşiminden düşük olan alaşımlarda, oranı sıcaklık ile birlikte değişen α katı eriyiği ve ötektik yapı (hipo ötektik alaşımlar)

2. Silisyum oranı ötektik bileşiminde olan alaşımlar için, ötektik yapı (ötektik alaşımlar)

3. Silisyum oranı ötektik bileşiminden daha fazla olan alaşımlar için, β katı eriyiği (pratik olarak silisyum) ve ötektik yapı. α katı eriyiği saf alüminyuma daha benzer özellikler gösterirken, β katı eriyiği ise saf silisyuma benzeyen özellikler sergiler (Turhan, 2002).

Silisyum takviyesi alaşımın ısıl işlem dayanımı ve akışkanlık gibi dökülme kabiliyetlerini pozitif biçimde etkiler.

Silisyum olarak zengin olan faz daha sert olmaktadır, bu sebeple silisyum takviyesi alaşımın sertliğini pozitif yönde etkiler, fakat işlenme kabiliyetini düşürür (Brown, 1994). Tablo 3.1'de sıkça kullanılan döküm alaşımlarının silisyum miktarları verilmiştir.

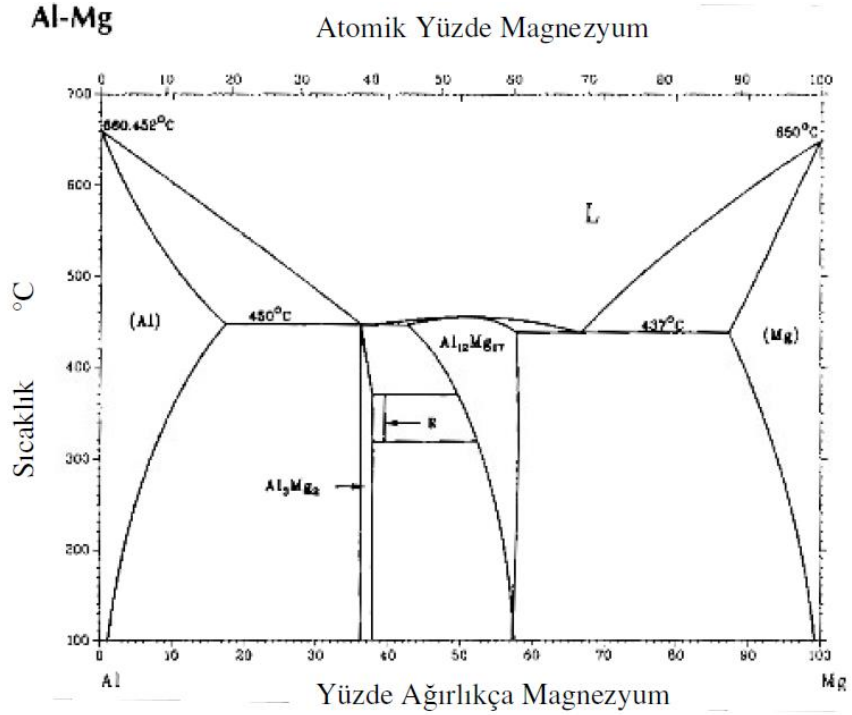
Tablo 3.1 En çok kullanılan döküm alaşımlarının çeşitli silisyum miktarları (Brown, 1994)

Alaşım	Silisyum içeriği	Tipik donma oranı
Düşük silisyum	4-6%	625-525
Orta silisyum	7,5-9,5%	615-550
Ötektik alaşımlar	10-13%	575-565
Özel hipo ötektik alaşımlar	>16%	650-505

Ötektik alaşımlar zayıf çeperli dökümler için uygundur. Fazla kuvvetin gerektiği yerlerde, düşük miktarlarda silisyum içeren eden alaşımlar tercih edilir. Hiper ötektik alaşımlar talaş kaldırma açısından işlenme kabiliyeti düşük alaşımlardır, bu alaşımlar daha çok pistonlarda olduğu gibi aşındırma yüzeyleri için uygundur (Brown, 1994).

3.2 Alüminyum ve Magnezyumdan Oluşan Alaşımlar

Alüminyum-Magnezyum karışımlarında magnezyum oda sıcaklığında %1,9; ötektik sıcaklığında ise (450ºC) %17,4 oranında alüminyumun içinde erimektedir. Alüminyum magnezyum alaşımları iki ötektik içerirler. Bunlar 437ºC'de %67,7 Mg ve 450ºC'de %35 Mg içeren iki ötektik yapıdır (Turhan, 2002) (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Al-Mg Faz Grafiği (ASM, 1992)

Al-Mg karışımından oluşan ısıl işlem uygulanabilen alaşımlarda uygun karakteristik yapı sergileyen bir katı eriyik mevcuttur. Fakat %8'in üstünde magnezyum içermekte olan alaşımlar ısıl işlemle sertleştirilme kabiliyetleri daha yüksektir (Turhan, 2002). Düşük miktarda magnezyum içeren alaşımlar ısıl işlem kabiliyeti bakımından yetersizlerdir. Bakır ve silisyum gibi takviye edilecek alaşım elementleri ısıl işlemle sertleşme kabiliyetini artırır ve mekanik özelliklerinin iyi olmasını sağlar. Ön gerilmeleri iki kat daha fazladır.

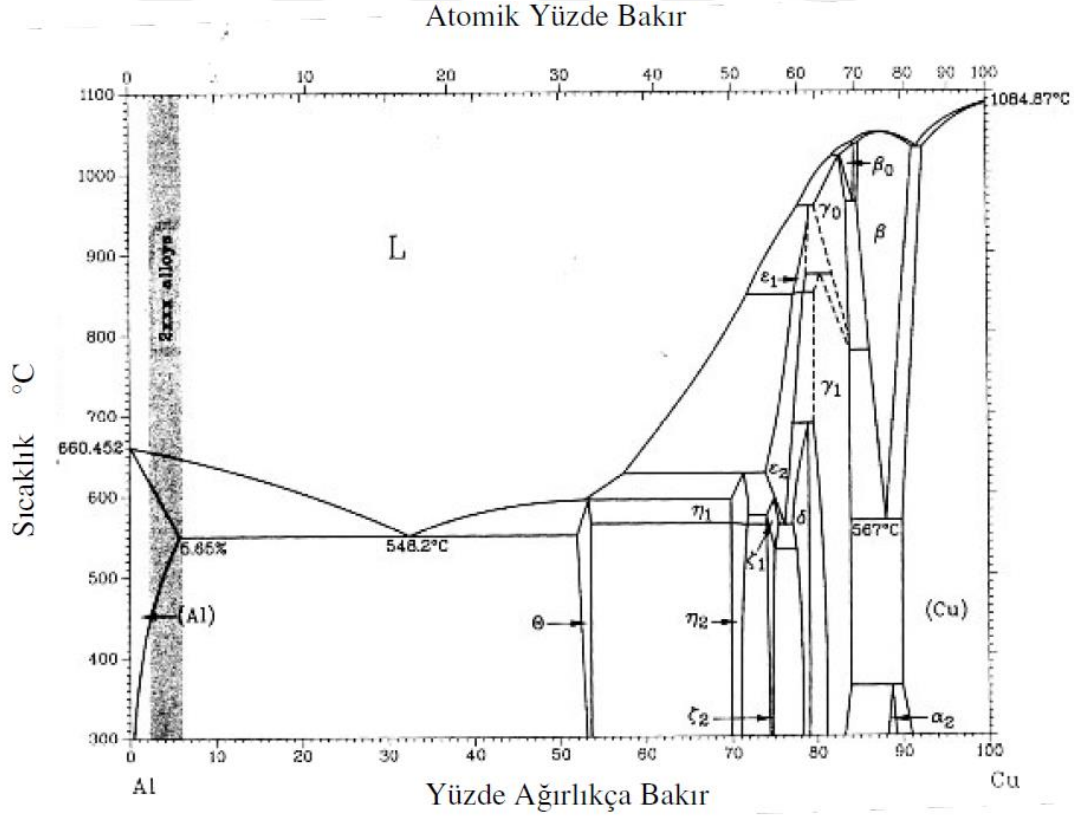
Yüksek orandaki silisyum alaşımlarında %1 oranında magnezyum kullanılmaktadır. %3 - %6 oranında magnezyum bulunduran fazla orandaki alaşımlar anodizasyon kabiliyetini arttırır ve dekoratif işlemlerde kullanılan profiller için çok parlak bir yüzey sağlar. Magnezyum takviyesi basınçlı döküm alaşımlarında kırılganlığı azaltmak için düşük oranlarda kullanılır. Magnezyum bulunması sıvı alüminyumdaki oksidasyon kaybını arttırmaktadır (Brown, 1994).

3.3 Alüminyum ve Bakır İçeren Alaşımlar

Alüminyum bakır alaşımları ısıl geçirgenliği, işlenme kabiliyeti, sertliği ve mukavemeti arttırmaktadır. %4-6 oranlı bakır içeren alaşımların ısıl işlemleri daha etkili olmaktadır.

Bakır takviyesi alaşımın dökülebilirliğini düşürür ve korozyon direnci ile ısıl işlem direncini de paralel olarak düşürmektedir. (Brown, 1994).

Endüstriyel olarak ciddi alana sahip olan alaşım Al-Cu alaşımlarıdır. Alüminyum-bakır alaşım reçetesinin faz diyagramı fazla karışık olsa da (Sekil 3.3), bu yapıda bulunan alaşımlar θ (Al2Cu) fazı ve alüminyum katı çözeltisi arasında oldukça basit bir ötektik yapı bulunan diyagramın alüminyum bölgesinde sınırlandırılır. Alaşımların söz konusu olan grubu (2xxx serisi olarak belirlenen) %2,3 ile 6,3 oranı gibi çok düşük oranlarda bakır içerir ve hipotetik alaşımlar oluşturmaktadır (ASM, 1992).



Şekil 3.3. Al-Cu faz diyagramı (ASM, 1992)

Diyagramın bu bölümü önemli bir özelliği alüminyum solvus çizgisinin şeklidir. Ötektik sıcaklıkta (548,2ºC), %5,65 Cu alüminyumda çözünmektedir. Düşük sıcaklıklarda, balans durumunda hızla düşmekte olan katı çözelti alüminyumda durağan olarak bulunabilen bakırın oranı oda sıcaklığında %1'den daha az yükseliş göstermektedir. Bu çökelme sertleşmesinde solvus çizgisinin tipik şeklidir. Bu alaşımlardan olası biri katı çözelti bölgesine yakın bir alanda ya da bu alandaki sıcaklık altında homojenize edildiği durumda doyurucu ama daha düşük bir sıcaklıkta yaşlandırma işlemine tabi tutulmak suretiyle sertleştirilebilir.

3.4 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarında Termal Çevrim Fazları

6xxx serisi alüminyum alaşımların içerisinde bulunan öncül alaşımlandırma elementleri alüminyum, magnezyum ve silisyum olup ayrıca demir, bakır, manganez, krom, titanyum ve çinko elementleri de bulunmaktadır. Magnezyum ve silisyum alaşımın birincil mukavemet arttırıcı Mg2Si çökeltisini oluşturmak amacıyla birleştirilir. Ekstrüzyon prosesindeki bütün termal çevrim ikincil faz partiküllerinin büyümesine ya da çözünmesine olanak sağlar.

Çeşitli alüminyum alaşımları Mg2Si çökelmesini oluşturmakta gerekli olandan daha fazla silikon içermektedir. İçeriğinde bulunan fazla olan silikon elementsel silikon olarak çökelebilmekte ve bununla birlikte AlFeSi fazı içerisinde de bulunabilmektedir. Fazla silikon malzemenin dayanımını arttırmakta olduğu için takviye edilir.

Tablo 3.2 6063 Alüminyum Alaşımlarında Termal Çevrim Sırasında Meydana Gelen Faz

Faz	Yapı	Stokiyometri
β	Anti- CaF2 Structure a=0,635nm	Mg/Si=2
β'	HCP a=0,407nm c=0,705nm	Mg/Si ~1,1
β''	Monoclinic a=0,153 b=0,405 c=0,683 β=105,5°	Mg/Si = 1,2
α-Al(FeMn)Si	Hexagonal	(FeMn)3Si2Al15
β-Al(FeMn)si	Monoclinic a=b=0,612nm c=4,15 nm β=91	FeSiAl5

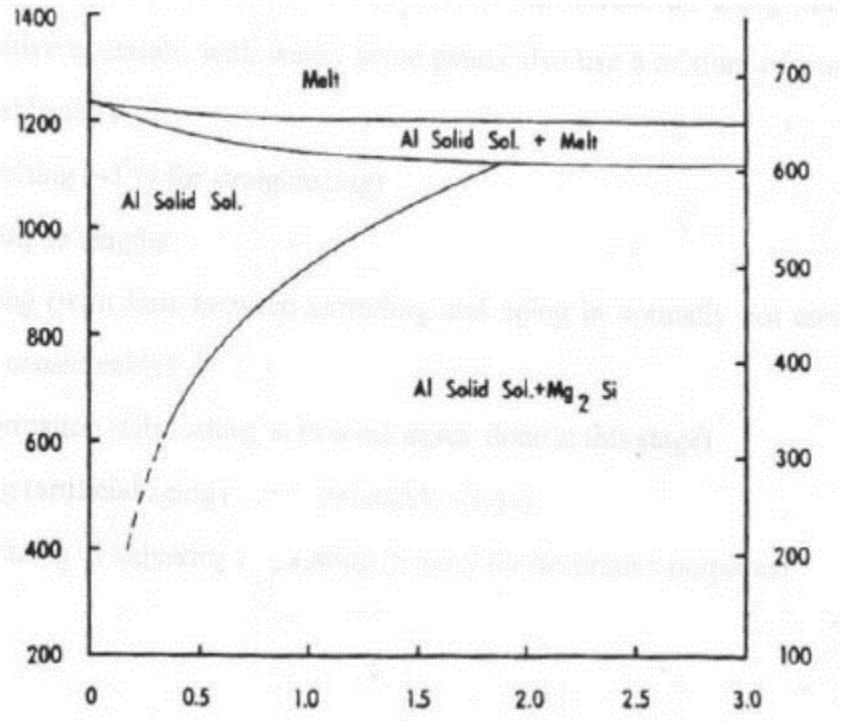
Tablo 3.2'de verilen bu fazlar alaşımın kimyasına bağlıdır. Bununla birlikte tabloda gösterilen fazlar mikro yapıda baskın olan fazlardan oluşup malzemenin ekstrüde edilebilirliğini ve niteliğini belirlemekte olan fazlardan bahsedilmiştir.

6xxx serisi alaşımların içerisindeki çökelme düzeni genel olarak aşağıdaki gibidir:

SSS (Aşırı Doymus Katı Çözelti) →Guineer-Preston (GP) zone → β "-iğnesel→ β'-çubuksu → β-levha (Bartolucci, 1995).

3.5 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Dayanımı yüksek istenen uygulama alanları için geliştirilmiş olan bir alaşımın sünek bir kalıp içinde dağılarak dislokasyon hareketlerindeki rahatlığı engellemekte olan partiküllerden oluşan bir yapıda olması talep edilir. Eşit miktarda parçacık için daha rijit bir dağılım daha fazla malzemenin dayanımının artması yönünde rol oynamaktadır. Bu şekilde olan bir dağılım yüksek sıcaklıklar altında tek fazlı ama soğutma sırasında bulunduğu kalıp içinde diğer bir fazın çökeldiği bir alaşımın kullanılmasıyla sağlanabilir. Kalıp içinde arzu edilen çökelti dağılımının yakalanabilmesi amacıyla bu talebe uygun bir ısıl işlem tercih edilmelidir. Ancak sertleşme bu yapı ile oluşursa bu sistem çökelme sertleşmesi ya da yaşlandırma sertleştirmesi adı altında tanımlanır (Brooks, 1993).



Şekil 3.4 Al- Mg2Si Faz Grafiği (Usta, 2001)

Al-Mg2Si faz grafiğinin magnezyum silisid fazının maksimum çözünebilirliği 595°C de %1,85 dir. Ortaya çıkan magnezyum silisidin oranı bulunmakta olan magnezyum ve silisyum seviyesine oranla değişmektedir. Çökeltilerin çözünmesi faz diyagramının katı çözelti kısmında çökelme ise katılaşma çizgisinin altında bir sıcaklıkta oluşum sağlar (Bartolucci, 1995).

Çökelme sertleşmesi prosesi üç ana adımdan oluşur:

3.5.1 Çözeltiye Uygulanan Isıl İşlem (Solutıon Heat Treatment)

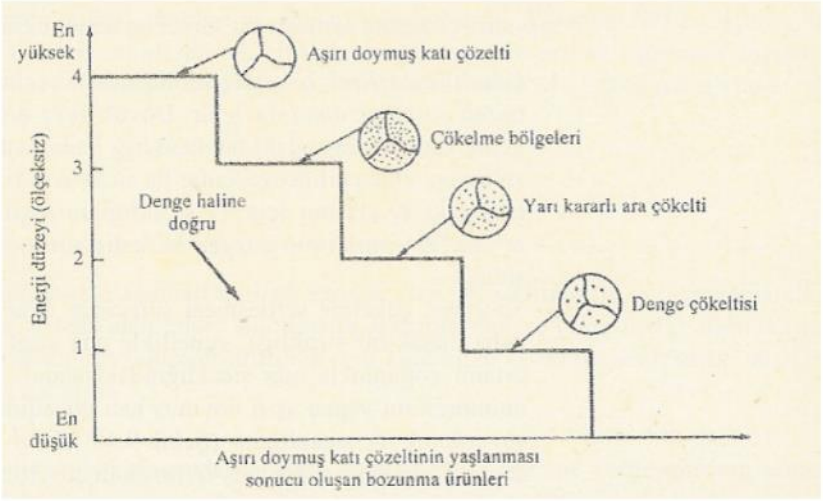
Çökelme sertleşmesi prosesindeki başlangıç adımıdır. Söz konusu aşamaya çözeltiye alma da denilebilir. Dövme ve döküm durumundaki numune çözen ile çözünen arasında bir sıcaklığa ulaşıncaya dek ısıtılarak ve tek şekilli bir katı çözelti yapı oluşturulana dek ısıtılır.

3.5.2 Su Verme (Quenching)

Çökelme sertleşmesi prosesindeki bir diğer adımdır. Numune bulunduğundan çok daha düşükte bulunan bir sıcaklığa, genelde oda sıcaklığına ulaşıncaya dek soğutulmaktadır ve soğutma ortamı genellikle oda sıcaklığındaki sudur. Su verme aşamasından sonra alaşım numune yapısı aşırı doymuş katı çözeltidir (Super Saturated Solute Solution, SSSS).

3.5.3 Yaşlandırma (Aging)

Çökelme sertleşmesi prosesindeki üç ve sonuncu adımdır. İncecik dağılmış olan çökeltilerin oluşturulması amacıyla çözelti ısıl işlemi uygulanan ve su verilmiş alaşım numunesi yaşlandırılmalıdır. Çökelme sertleşmesi aşamasının varoluş gayesi, alaşım içerisinde ince ve dağılmış çökeltiler meydana getirmektir. Alaşımın içindeki ince çökeltiler, şekil değiştirme esnasında aykırı yerleşimleri çökeltileri kesmek veya etrafından dolanmak suretiyle hareket etmesini önler. Şekil değiştirme esnasında aykırı yerleşimlerin hareketlerinin sınırlanmış olması alaşımın mukavemetini olumlu yönde etkiler (Smith, 2001).



Şekil 3.5 Çökelti ile sertleştirilebilir alaşımda aşırı doymuş α katı çözeltisinin yaşlanmasıyla oluşan bozulma ürünleri (Smith, 2001)

Ekstrüzyon prosesi sırasında alüminyum alaşımlarında oluşan bozunma malzemeleri oluşmaktadır. Varolan görsel incelenirse proses sırasında yapının içinde bulunan Mg2Si fazının yaşlandırma ısıl işlemi ile kararlı bir denge fazı halinde çökelerek yapının dayanımını yükselttiği yorumu yapılabilir.

3.6 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüde Edildikten Sonraki Kullanım Alanları

Geri kazanılabilir olması, alüminyumun sağladığı en önemli avantajlarından birisidir. Alüminyum, kalitesinden herhangi bir değer eksilmeden tekrarlı olarak geri dönüştürülebilmektedir (Zeytin, 2000). Bu durum hem çevresel boyutta hem de ekonomik boyutta önem arz etmektedir. Otomotiv alanında alüminyum, otomobilin motorunda, hareket sistemi ve vitesinde kullanılır. Bunun haricinde soğutma sistemi ve kasada yassı ürün olarak alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Otomobil içerisinde kullanılan tüm parçalar geri kazanılabilirdir ve geri kazanma oranı %90'dan daha fazladır. Geri kazanma, enerji ve hammadde kaynaklarının korunması bakımından oldukça önemli bir teknolojik parametredir (Schultz, 1998).

Alüminyum 3 nedenle geri kazanımdan yüksek verim sağlar:

1. Alüminyumun asal özelliği geri kazanım ile bozulmaz.

2. Geri dönüşüm işlemi, geri dönüşüm olmadan gerçekleştirilen imalat ile kıyaslandığında, %95 oranında daha düşük miktarda enerjiye ihtiyaç duyar.

3. Alüminyum manyetik yapıda değildir. Bu durum alüminyumu diğer malzemelerden rahatlıkla ayrılarak fark yaratmasına olanak sunar. Alüminyumun, yüksek düzeylerde geri dönüşüm kabiliyeti alternatifi olmayan talep alanlarında tercih edilmesine olanak sağlamaktadır.

Söz konusu olan 6xxx seri alüminyum alaşımları, ekstrüzyon sanayisinde oldukça yaygın bir biçimde kullanılır. Bu alaşımlar, kapı ve pencere çerçeveleri gibi uygulamalarda tercih edilir. Tüm uygulamalar içerisinde alüminyum, hafif olması, iyi şekil alabilmesi, korozyon direnci ve diğer malzemelere kıyasla daha fazla olan dayanımı kaynaklı olarak talep görür (Bartolucci, 1995).

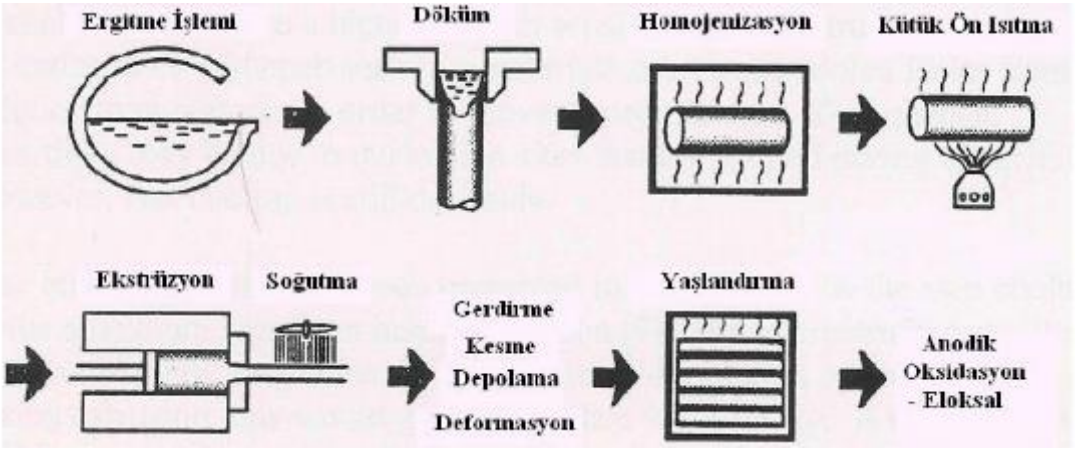
Alüminyumun, taşımacılık faaliyet alanında özellikle de hava yolu taşımacılığında her zaman elzem bir yeri olmuştur. Enerji bakımından daha verimli olan demiryolu ve karayolu taşımacılığına olan gereksinimin artması alüminyumu önemli bir ihtiyaç haline getirmiştir.

Alüminyumun en önemli yararının hafif olması ve ağırlıktan tasarruf sağlaması olduğu söylenebilir. Bu sebeple yolcu taşımacılığında en çok yarar sık aralıklarla hızlanıp yavaşlan trenlerde sağlanmakta, böylece alüminyumun modern banliyö sistemlerinde geniş çapta kullanımını mümkün kılmaktadır. Demiryolu yük taşımacılığında vagonlardaki sahip olunan yük seviyelerinin ve korozyon performanslarının yüksek olması önem arz etmektedir.

Alüminyumun demiryolu alanındaki kullanımına ek olarak asıl üstünde çalışma yapılması gereken talep alanı karayolu taşımacılığı ve özellikle de binek araçlardır. Yolcu arabalarında kullanılan alüminyum miktarı son yıllarda düzenli biçimde artış göstermiş ve günümüzde ABD ve Japonya'da araba başına 60 kg civarlarına ulaşmıştır. Alüminyumun bu faaliyet alanında kullanılmasındaki asıl sebep ise alüminyumun sağladığı ağırlık tasarrufundan yararlanarak yakıt veriminin arttırılması ve emisyonların azaltılması düşüncesidir (Sheasby, 1994).

3.7 6xxx Serisi Ekstrüzyon Alaşımlarında Uygulanan Üretim Prosesleri

Alüminyum alaşımlarının, dayanımı potansiyel avantajından bütünüyle faydalanabilmek için uygun değer şartları altında işlenmesi gerekmektedir. Alüminyumum ekstrüzyonu sırasında, alaşımın kimyası, mikro yapısı ve ekstrüzyon işlem şartları gibi pek çok etken nihai ürün özelliklerini etkiler. (BjØrnbakk, vd., 2002). Ekstrüzyon işletmelerinde alüminyum alaşımların mikro yapısı homojenizasyon, ekstrüzyon, döküm, ekstrüzyon sonrası soğutma, kütük ön ısıtma ve yapay yaşlandırma işlemlerini göstermektedir.



Şekil 3.6 Tipik bir ekstrüzyon fabrikasında üretim süreçleri (Bartolucci, 1995)

3.7.1 Metal Ergitme

Alüminyum ekstrüzyon yöntemiyle üretim tesislerinde ilk proses yeniden ergitme işlemidir. İlk etapta fırınlar, indirgenme hücrelerinden direkt olarak sıvı alüminyum ile veya ingotlarla tekrardan ergitilmek için doldurulur. Alaşım elementleri, alaşım elementi mastır ingot ve hurda da arzu edilen şekilde eklenir (Smith, 2001).

Uzun alevli doğal gaz brülörlü ergitme fırınları, son yıllarda alüminyumun ergitilmesi için en yoğun olarak tercih edilen ergitme fırınlarıdır. Neredeyse tüm sanayi tipi fırınlarda büyük ölçülerde enerji kaybı meydana gelmektedir. Bir ergitme fırını ortalamada %30 düzeyinde termal verimlilikle çalışmaktadır. (U.S. Department Of Energy, 2001)

Metal ergitme prosesi sırasında temel olarak gerçekleştirilen işlem bir geri kazanım sürecidir. Geri dönüşüm, günümüzde üretim üzerine istenilen ekonomik etki ve çevreye olan katkısı sebebiyle alüminyum endüstrisinin olmazsa olmaz kısımlarından biri haline gelmiştir. Birincil cevherden üretim ile kıyaslandığında alüminyumun geri kazanımı %95 oranında bir enerji tasarrufu sağlamaktadır bu nedenle çok fazla önem arz etmektedir. Ayrıca, hurdalar vasıtasıyla ikincil alüminyum üretimi daha düşük miktarda su, gaz ve atık gaz emisyonuna yol açmaktadır (Yang ve Okazaki, 2007).

Ergitme işlemi sırasında alüminyum alaşımları atmosferik oksijenle oluşturduğu reaksiyondan dolayı oksitlenmeye meyillidir. Eriyik ergitme prosesi sonucunda oksitler ve birbirlerinden ayrı orijinli katı emprüteler oluşmaktadır. Fırın astarından refrakter parçacıkları, katı şarjda kirleticiler, cüruf artıkları vb. gelmektedir. Emprüteler, döküm içerisindeki ve tamamlanmış üründeki inklüzyonların oluşmasını ve ürünün işlenme işlemleri gerçekleştirilirken iyi olmayan mekanik ve istenilmeyen karakterizasyon sorunları ortadan kaldırmak amacıyla eriyik içerisinden döküm işlemine başlanmadan tahliye edilmelidir (Bilginoğlu Endüstri, 2006)

Ergitme işlemi sırasında

• Ergitme işleminde fırınlara devamlı azot verilerek eriyik metal inklüzyonlardan arındırılır ve homojen bir metal eriyik karışımı sağlanır.

• Gaz Giderme Sistemi aracılığıyla metal içerisindeki tehlikeli gazlar ve empüriteler ortadan kaldırılır, ekstrüzyon ve profil üretimi esnasında metal temizliği ve tehlikeli gazların etkisi nedeniyle karşılaşılabilecek pek çok sorunun önüne geçilir.

• Döküm hızı ile ilişkili olarak eriyik içerisine otomatik şekilde AlTiB enjekte edilir ve tanecik yapısı inceltilmek suretiyle alaşıma ve ekstrüzyona uygun olan hem kimyasal hem de fiziksel özellikler kazandırılır ve eloksal tarzında yüzey işlemlerde yüzey kalitesinin artmasında önemli rol oynar.

• Kalitenin artması bakımından her döküm işleminde yenilenen tandem tipi seramik filtreler aracılığıyla sıvı metal içerisindeki oksitler ve arzu edilmeyen empüriteler tutulur.

• Cüruf içinde sıkışan sıvı alaşım parçacıkların yeniden metalik eriyik içine geri dönmesi için cüruf devamlı olarak hareket ettirilir (Asaş Alüminyum, 2003)

Özellikler belirtilen söz konusu işlemlerin tümü döküm sırasında oluşturulmuş ergimiş alüminyumun safiyet ayarı üzerinde doğrudan etkisi olan işlemlerdir. Bahsedilen işlemlerin sağlıklı ve düzgün şekilde yapılmaması düşük saflık derecesine neden olur ve nihai kısımında ekstrüzyon işleminde:

- Ekstrüzyon ürün yüzeyinin daha pürüzlü bir yapıda olması
- Ürünün mukavemetinin daha düşük olması
- Aşındırıcı etkiye sahip kirliliklerden dolayı kalıp ömrünün kısa olması ve sonuç olarak yüksek maliyetlerin ortaya çıkması
- Eloksal kalitesinin daha düşük seviyede olması
- Korozyon dayanımının daha düşük seviyede olması
- Ekstrüzyon hızının daha düşük seviyede olması gibi problemlere neden olacaktır (Yılmaz, 2002).

Cüruf, alüminyum metal, karbit, alüminyum oksit, çesitli tuzlar, nitrit ve başka ergitme ürünlerinin karışımından oluşmaktadır. Söz konusu karışım bir taraftan, sıvı metal ile gerçekletirilmekte olan işlemler sırasında alüminyumun içine karışarak bir kirlilik meydana getirmekte diğer taraftan da barındırdığı sıvı alüminyum ile birlikte metal kaybetmeye sebebiyet vermektedir (Ertan vd. 2002).

3.7.2 Direkt Soğutmalı Döküm Metodu

DC sürekli döküm işleminden yararlanılarak kullanılan ticari alüminyum hadde, ekstrüzyon ya da dövme üretim metodlarında kullanılma amacıyla ingotlar şeklinde dökülür. 60 yıldır uygulanan bu metod W.T.Ennnor öncülüğünde bulunmuştur (Wagstaff, 2006). İngot ve biletler alüminyum ürünlerin tamamının imalatında önemli

görev üstlenir. İngot ve biletlerin baskıya alınması ya da haddelenmesi ile levha, folyo, plaka, tel ve boru imal edilebilir (Aluminum Association,1994).

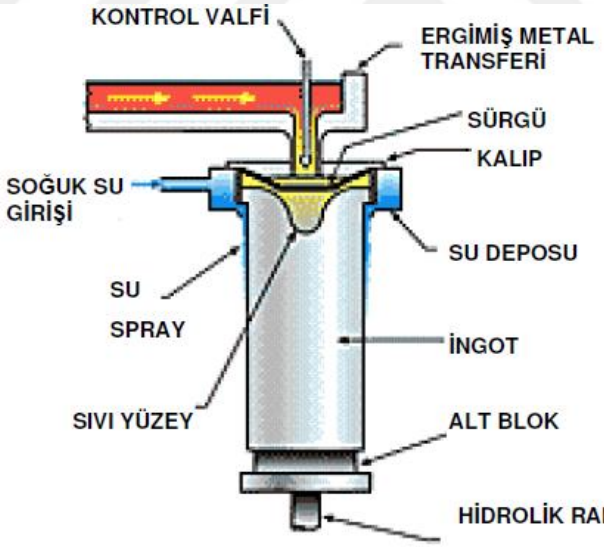
Başlangıçta, sıvı metal yol açıcı bir blok aracılığıyla örtülen bir kalıp içine dökülecektir. Kalıp içerisinden geçen ve sıvı metali soğutmaya yardımcı olan suyla birlikte devamlı olarak soğutulur. Soğuma işlemi sırasında katı dış kabuk oluştuğunda, yol verici blok metal seviyesi daha yüksekte sürerken döküm hız sabiti ile birlikte azalır. Metalin dış bölümü katılaşırken, iç kısmındaki merkez bölgesi hala sıvı haldedir. İngotun tamamı soğumaya devam ettiği sürece kalıptan ingotun üzerine doğrudan olmak suretiyle su püskürtülerek katılaşma sıcaklığının altına erişilir.

Ergiyen metalin katılaşması sırasında, alaşım elementleri hem sıvı hem de katı faz üzerinde yeniden dağılım gösterirler. Katılaşma işlemlerinin önemli bir bölümünde bu sırada reçetede makro segragasyonlar ve homojensizlikler oluşur. Akış yönünde oluşan bu durum ısıl işlemler sırasında metalin sergilediği davranışı etkilemekte ve uniform olmayan mekanik niteliklerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı DC döküm metodundaki en önemli problemdir.

Dökümhanede ergiyen sıvı fazdaki berrak alüminyum direkt olarak kalıplara dökülebilir ya da 1200-1500 C° derece aralığında tutulan fırınlara metal boşaltılır (Aluminum Association, 2004).



Şekil 3.7 DC döküm metoduyla dökülmüş olan biyetlerin homojenize edilmesinden önceki görüntüleri (Wagstaff, 2006)



Şekil 3.8 Direkt soğutmalı döküm sistemi kesit görünümü (Wagstaff, 2006)

Direkt soğutmalı döküm metodunda kullanılmakta olan kalıp, birkaç inç derinliğinde olup ingotun eksenel yapısını oluşturmaktadır. Kalıbın içinde, döküm çukuru yönünde azalan soğutma suyu püskürtülmesi ile metalin hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlamaktadır. İşlem, talep edilen uzunluğa ulaşılıncaya kadar devam etmektedir. Bu proses dikey ve yatay olmak üzere uygulanabilmektedir (Aluminum Association, 2004). Şekil 3.7'de direkt soğutmalı döküm metodu ile imal edilen bir kütükin dökümü sırasında kullanılan makine elemanları ve oluşan bölgeler görülmektedir.

Direkt soğutmalı döküm metodunun asıl avantajı katılaşmanın biletin dar kesitinde oluşması ve sağlıklı bir şekilde kontrol edilebiliyor olmasıdır. Direkt soğutmalı döküm metodu ile en düşük segregasyonlu ince tane yapısına sahip metal imalatı yapılabilmektedir. Döküm tablası üstündeki yüksek sayıdaki kalıp, dökümhanedeki yüksek imalat hızlarında ingotun dökülmesini sağlamaktadır (Wagstaff, 2006).

3.7.3 Homojenizasyon

Ekstrüzyondan önceki yüksek sıcaklık ısıtma prosesi olan homojenizasyon işlemi, alüminyum ekstrüzyon teknolojisinde çok elzem bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Homojenizasyon sürecinin metalürjisi çok fazla sayıda prosesten oluşmaktadır ve bu nedenle karmaşık bir işlemdir. Bu sürecin ana yapısı alaşımın kimyasına bağlıdır. Ancak AA6xxx (Al-Mg-Si) ekstrüzyon alaşımları için en önemli tepkimeler Al (Fe,Mn) intermetaliklerin ve Mg ve Si çözelti miktarının artarak alüminyum matris içindeki Mg-Si parçacıklarının çözünmesini sağlayan faz dönüşümleridir. Homojenizasyon işlemi boyunca tüm alaşım elementlerinin katı çözelti içerisine alınması ile birlikte ekstrüzyon için yüksek seviyelerde basınçlar gerekmektedir ancak bütün alaşım elementleri yapay yaşlandırma sırasında daha ince yapıda olan β çökeltileri biçiminde çökelerek ekstrüze edilmiş ürünlerde mukavemetin artmasına neden olur. Homejenizasyon ısıl işlemi sırasında Mg ve Si atomlarının bir kaçı çökeltilerin içerisinde yer alarak yararlı bir durum oluşur. Bu çökeltiler sıcak akma direncini düşürmekle birlikte, ekstrüzyon işlemi ile birlikte meydana gelen deformasyon sırasında da hızlı bir şekilde çözünürler (Kool, vd., 2000).

Homojenizasyon süreci boyunca, β-AlFeSi fazı Si miktarınca daha yoksul olan ve esktrüzyon prosesinde daha fazla talep gören küresel α fazına dönüsür. α fazı düzlemsel β-AlFeSi fazından daha düşük miktarda mikro kırıklara yol açan morfolojisi nedeniyle malzemenin sünekliligini artırır. α fazı ekstrüzasyonu yapılmış yüzeylerdeki kopma (pickup) hatalarının azalmasına neden olur (Kuijpers, vd., 2003).

Homojenizasyonu yapılmış kütüklerde homojenizasyon sıcaklığına göre soğutma hızının fazla olması daha yüksek verim alınmasını sağlar. Homojenizasyon sıcaklığından yapılan hızlı bir soğutma esnasında (150°C/saat) normal mikroskop ile

görülebilen Mg2Si parçacıklarının çökelmeden katı çözelti içinde kalmasına neden olur (Ulucak, 2000).

Malzemenin pek çok sayıda niteliği, homojenizasyondan sonra 6063 kütüklere farklı soğutma hızları uygulanmasından önemli düzeyde etkilenir. Bu sebeple direkt ekstrüzyon ile ekstrüzyon ve sürtünme ile oluşan yükler, ekstrüzasyonu yapılan parçaların yüzey kaliteleri, ele alınan en yüksek düzeyde ekstrüzyon oranı ve ekstrüzyon işleminden sonra yapılan yapay yaşlandırma prosesinden sonra ortaya çıkan mekanik nitelikleri etkileyen Mg2Si çökeltilerinin boyut ve dağılımlarına bağlı olarak gerçekleşmektedir (Lang ve Castle, 1978).

Alüminyum alaşımlarının homojenizasyonu, yüksek seviyelerdeki sıcaklıklar ve yüksek işleme süreleri barındıran imalat süreçlerinin tümünde pahalı bir bileşendir. Belirli çevrimler değişmesine rağmen 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının homojenizasyon işlemleri 530–590 °C derece düzeylerinde ve 6 ile 8 saat aralığında bir demleme süresinde (soak time) uygulanmaktadır. Bundan dolayıdır ki homojenizasyon süresi ve sıcaklığının azaltılması uygulanmakta olan işlem maliyetlerinin de azaltılmasında oldukça etkili bir faktördür (Claves, vd., 2002).

4. EKSTRÜZYON

Ekstrüzyon esas olarak dolaylı bir basma işlemidir, kütük adındaki metal bir kütüğün basma kuvveti ile birlikte kendisinden biraz daha ufak ebatta bir kalıp içerisinden akmasının sağlandığı plastik şekillendirme yöntemine verilen isimdir. Dolaylı olarak kullanılan basma kuvvetleri, biyet, kovan ve kalıp arasındaki tepkiden oluşur ve oldukça yüksek değerlere ulaşır. Biyet, kovan ve kalıp arasındaki tepki neticesinde malzeme içinde oluşan yüksek gerilmeler biyetin şeklinin değişmesi esnasında malzeme içinde çatlakların oluşmasına engel olur ve oldukça etkilidir (Saha, 2005). Biyetin döküm yapısını değiştirmek için kullanılabilecek en iyi yöntem ekstrüzyon prosesidir. Bu yöntemde biyet yalnızca basma gerilmelerine maruz kalır (Saha, 2005).

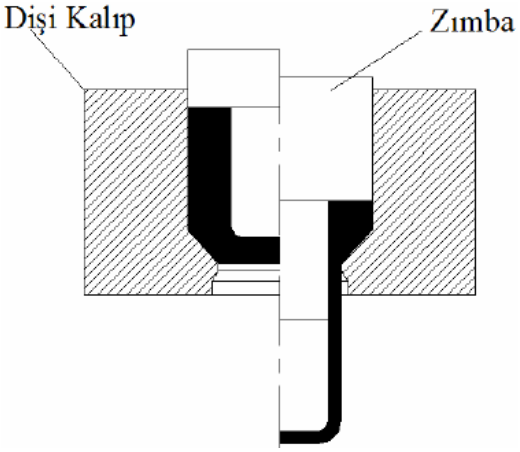
Ekstrüzyon işlemi, işlemin yapılış biçimine ve kullanılan alaşıma bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda da ortam sıcaklığında da yapılabilir. Sıcak ekstrüzyon işleminde, biyet işlem öncesi ısıtılır bu nedenle şekil değiştirme işlemi daha rahat bir şekilde sağlanabilir (Saha, 2005).

4.1 Ekstrüzyon Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Alüminyum endüstrisinde iki temel tip ekstrüzyon metodu yaygın bir biçimde kullanılır. Bu iki metod, ileriye ve geriye ekstrüzyon yöntemleridir.

4.1.1 İleri Yönlü Ekstrüzyon

Alüminyum ekstrüzyonunda en sık kullanılan ve en önemli olan teknik ileriye ekstrüzyon yöntemidir. Bu yöntem, kovanın içine yerleştirilen biyetin ıstampa adındaki itici yardımıyla uygulanan basınç ile, kalıp boşluğundan geçmesi temeline göre oluşturulmuş olan bir üretim şeklidir



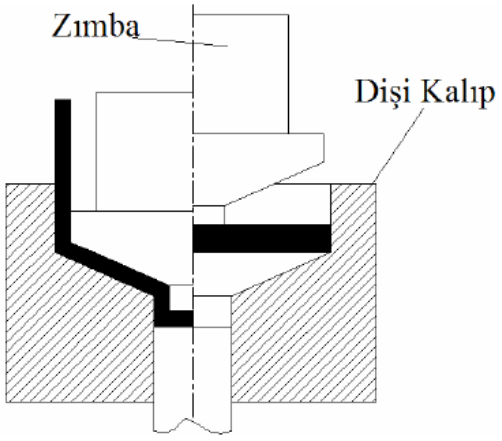
Şekil 4.1 İleriye ekstrüzyon yöntemi (Uzun ve Erişkin, 2002)

İleri ekstrüzyon yöntemi, boru ve çubuk üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle, kalıbın şekline ve yapısına bağlı olarak içi boş veya dolu kesitli profiller üretilebilir.

Bu yöntemde, metal ve kalıp aynı yönde hareket eder. İleri doğru hareket eden ıstampa, biyeti kovan içinde sıkıştırır. Bu hareket sırasında, sürtünme kuvvetleri nedeniyle ıstampa tarafından uygulanması gereken basınç oldukça yüksektir (Saha, 2005).

4.1.2 Geri Yönlü Ekstrüzyon

Bu yöntemde, içi boş olan ıstampanın ucuna kalıp takılır ve kalıp kovanın içinde hareket eder. Biyet ise kalıbın içinde sabit durur. Bu nedenle, bu yöntemde kovan ile biyet yüzeyleri arasında sürtünme oluşmaz. Bu özellik, biyetin merkezindeki malzemenin biyetin kenarlarına göre hareket etmediği anlamına gelir (Saha, 2005).



Şekil 4.2 Geriye ekstrüzyon yöntemi (Uzun ve Erişkin, 2002)

4.2 Ekstrüzyon

Elde edilen kütük biçiminde imal edilen malzemeler, ekstrüzyon döküm yöntemiyle üretilir. Bu yöntemde, farklı uzunluk ve çaplarda kütükler, DC döküm metoduyla üretilir. Bu malzemeler, sabit kesitli uzun profillerin imal edilmesi için bir kalıp içinden itilme ya da çekme yöntemiyle şekillendirilir. İçi boş olan bu profillerin ekstrüzyon işlemi genellikle bir pim veya mandrel kullanılarak gerçekleştirilir. Bazı malzemeler soğuk ekstrüzyon yöntemiyle, bazıları ise sıcak ekstrüzyon yöntemiyle işlenir.

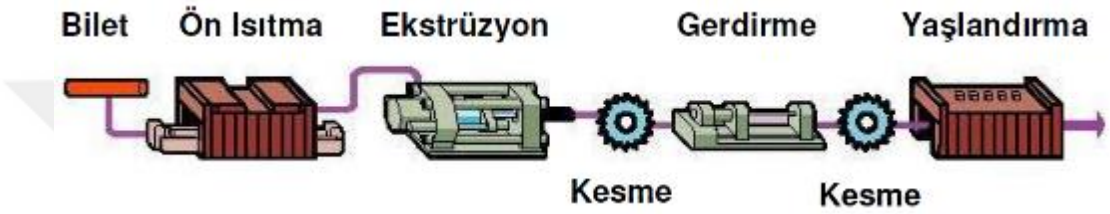
Alüminyum kütüklerin endüstriyel yöntemler aracılığıyla karmaşık şekillere dönüştürülmesi için ekstrüzyon, oldukça kullanışlı ve en yaygın kullanılan bir yöntemdir. Genellikle ekstrüzyon, sıcak işleme operasyonu olarak gerçekleştirilir. Metal, uygun akma gerilimine ulaşması için ısıtılır.

Ekstrüzyon sürecinde alaşım elementleri çözelti içinde dağılırken, yaygın geçiş elementleri ise çökelerek ve çalışma doğrultusunda sıralanarak kalır. Bu durum, alaşım elementlerinin homojen bir dağılımını sağlar ve yeniden çekirdeklenmeyi geciktirir veya önler. Ayrıca, uzunlamasına veya lifli tanelerin sonraki işlemler sırasında yerinde kalmasına yardımcı olur. İstenilen mikroyapıya sahip bir ürün elde etmek için ısıl işlem uygulanabilir.

İşletmelerde ekstrüzyon prosesinin verimini artırmak ve atık malzeme miktarını azaltmak için bilgisayar programlarından yararlanmak giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu otomasyon uygulamaları, operasyon parametrelerinin optimum seviyede olmasını sağlamayı ve organizasyon verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu, optimum metalurji ve en yüksek kalitede kütüklerin imal edilmesi için büyük önem taşımaktadır.

Ekstrüzyon işleminin başarıyla gerçekleştirilebilmesi için birçok metalürjik parametre etkilidir. Bu nedenle, mükemmel kütük kalitesini elde etmek için tek bir faktör yeterli olmamaktadır, çünkü bu parametrelerin birlikte uyumlu bir şekilde ele alınması gerekmektedir (Langerweger, 1997).

Bir ekstrüzyon işletmesinin modernizasyonuyla verimli bir şekilde işletilmesi, pres zamanını ve gelen kütük stoğundan en iyi şekilde faydalanmayı gerektirir. Bir kütüğün ekstrüzyon işlemi için harcanan sürenin her anı ve kütüklerin tedarik sürecindeki her gelişme, yüksek maliyetlere yol açabilir. Pres verimliliği, profil kesimi ve gerdirilmesi gibi süreç akışı sınırlamaları, uzun çevrim sürelerine sebep olan ekipman kısıtlamaları ve manipülasyon gibi faktörlerle kontrol edilir. Ayrıca, operasyon verimli bir şekilde yönetiliyorsa, pres performansı kütüğün ekstrüzyon süresi temel alınarak kontrol edilir.



Şekil 4.3 Alüminyum Ekstrüzyon Prosesi Temel adımları

4.2.1 Hammadde Ön Isıtma

Alüminyum kütüklere, yapı içindeki Mg2Si'nin bütünüyle çözünmesini sağlamak amacıyla ön ısıtma işlemi uygulanır (Ulucak, 2000). Bu yüksek sıcaklık seviyelerinde çökeltiler çözünür ve sonrasında kütük birkaç dakika gibi kısa bir süre içinde istenilen nihai sıcaklığa düşürülür.

Ön ısıtma sıcaklıklarını belirlerken dikkate alınması gereken iki durum bulunmaktadır. İlk olarak, deformasyon noktasının altındaki sıcaklık, yüzey hatalarına neden olmadan yüksek ekstrüzyon hızlarını mümkün kılacak kadar düşük seçilmelidir. İkinci olarak, alaşım elementlerinin katı çözelti oranının yüksek sıcaklıklara çıkıldığında tam olmasına dikkat edilmelidir. Bu iki durum göz önünde bulundurularak en uygun ekstrüzyon sıcaklığı belirlenmelidir.

Ekstrüzyon sürecinde, matris içerisinde oluşan Mg2Si parçacıkları çözelti miktarını, yaşlandırma işlemi sonrasında kazanılan mukavemeti ve ekstrüzyon hızını etkiler. Ekstrüzyon işlemi sırasında meydana gelen çoğu yırtılma olayı, çıkış esnasındaki düşük sıcaklıklarda ve buna bağlı olarak düşük hızlarda gerçekleşir. Bu durum,

ekstrüzyon süreci boyunca Mg2Si çökeltilerinin ilgili yapı içinde bulunması nedeniyle ergime başlangıcına yol açar (Finkelnburg, vd., 1992).

4.2.2 Ekstrüzyon Presleri ve Yardımcı Donanımlar

Ekstrüzyon sürecinde önemli bir konu da ekstrüzyon presleri ve ilgili ekipmanlardır. Ekstrüzyon işleminin doğru ve tamamlanmış bir şekilde gerçekleştirilmesi için, uygun yardımcı donanımların da mevcut olması önemlidir. Bu yardımcı ekipmanlar, ekstrüzyon parametrelerinin belirlenmesi ve işlem sürecinin başarılı bir şekilde yürütülmesi için gereklidir.

4.2.2.1 Ekstrüzyon presi

Ekstrüzyon presi, alüminyum ekstrüzyon işlemi için en önemli ekipmandır ve işlemin ilerleyişini etkiler. Bu pres, hidrolik bir güç kaynağı, basınç kontrol sistemi ve büyük bir piston tarafından çalıştırılan uygun bir zımbayı içerir. Ayrıca, malzemenin uygun sıcaklığa getirilmesini sağlayan bir kütük ısıtma fırını, sıcak kesim testeresi, ara transfer ve yükleme tertibatı gibi yardımcı ekipmanlar da bulunmaktadır. Ek olarak, alüminyumun zımbaya yapışmasını önleyen bir işleme tertibatı, uygun parametrelere sahip bir kovan, kalıp destekleri ve tüm bu bileşenleri birleştiren bir gövde bulunmaktadır (Tiernan, 2005).



Şekil 4.4 Alüminyum Ekstrüzyon Presi (Asistal Alüminyum, 2023)

4.2.2.2 Kovan

Kovan, alüminyum malzemenin basınç uygulandığında tutulmasını sağlar. Ekstrüzyon sıcaklığında tutulması gereken ön ısıtma işlemi yapılmış alüminyum malzeme için kovan sürekli olarak ısıtılır. Kovan, yüksek basınca dayanabilmesi için sıcak iş çeliğinden yapılan silindirlerin birleştirilmesiyle oluşturulur (Tuzcuoğlu, 2005). Bu nedenle, kalıbın en maliyetli bölümüdür.

4.2.2.3 Baskı pulu

Basınç pulu, alüminyum kütük ve piston arasında bulunan, kovanın çapından daha küçük bir elemandır. Ekstrüzyon işlemi sırasında, kovan içine yerleştirilen kütüğün tamamı çekilemez. Kütük, kalıba işlenen profilin ortasından akarken, atık malzemeler kalıbın belirli boşluklarında birikir. Sonuç olarak, bu atık alüminyum malzeme basınç pulu yardımıyla dışarıya atılır (Tuzcuoğlu, 2005).

4.2.2.4 Konveyör

Taşıma bandı, ekstrüzyon işlemi sonucunda çekilen profilleri desteklemek için kullanılan bir bileşendir. Presin çıkışında bulunan taşıma bandı üzerinde, profillerin soğumasını sağlamak için büyük soğutma fanları bulunmaktadır. Taşıma bandının uzunluğu, bir seferde çekilen profillerin rahatlıkla yerleştirilebileceği kadar uzun olmalıdır (Tuzcuoğlu, 2005).

4.2.2.5 Takım taşıyıcı

Takım taşıyıcılar, kalıp yatakları, kalıp tutucu ve basınç halkası gibi bazı takım bileşenlerini destekler (Tuzcuoğlu, 2005).

4.2.2.6 Basınç yüzüğü

Basınç halkası, kalıp takımının uzunluğunu takım taşıyıcının uzunluğuna kadar uzatır ve pres basıncının dengeli bir şekilde dağılmasına yardımcı olur (Tuzcuoğlu, 2005).

4.2.2.7 Germe tertibatı

Germe düzenekleri, ekstrüzyon sırasında profillerde oluşan dalgalanma ve katlanmaları düzeltmek için kullanılan bir düzendir. Profili belirli bir noktadan sabitleyerek, diğer taraftan hidrolik bir çekici yardımıyla çekme işlemi gerçekleştirir (Tuzcuoğlu, 2005).

4.2.2.8 Soğutma

Alüminyum profil, yaklaşık 500ºC sıcaklıkta çıkartılır ve kısa bir süre içinde yaklaşık dört dakika içinde 250ºC'ye kadar soğutulmalıdır. Bu şekilde, ısı yeniden kristalleştirme bandının altına düşürülmüş olur (Tuzcuoğlu, 2005).

4.3 Ekstrüzyon Mekaniği

4.3.1 Plastik Şekil Verme ve Metal Akışı

Metallere şekil verme işlemlerinde, plastisite teorisi kullanılarak kalıcı şekil değiştirme mekanizmaları incelenir. Bu teoriye dayanarak aşağıdaki konular üzerinde analizler ve tahminler yapmak mümkündür:

1. Metal akış parametreleri: Malzeme gerinimi, gerinim hızı ve malzeme hızı gibi faktörler metal akışını etkiler.

2. Sıcaklık ve ısı transferi: Sıcaklık, metalin akış özelliklerini ve plastisite davranışını etkiler. Isı transferi ise malzemenin sıcaklık dağılımını belirler.

3. Gerilmeler, basınç, şekillendirme kuvveti ve enerji: Şekillendirme sürecinde ortaya çıkan gerilmeler, basınç, şekillendirme kuvveti ve enerji miktarı önemli parametrelerdir.

Ekstrüzyon işlemi sırasında metal akışı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında şunlar bulunur:

1. Biyet-kovan ve metal-kalıp sürtünmesi: Biyet ve kovan arasındaki sürtünme, akışın düzgün olmasını etkiler. Metal ve kalıp arasındaki sürtünme ise şekillendirme sürecini etkileyebilir.

2. İşlem sırasında biyet malzemesinin özellikleri: Biyet malzemesinin akış özellikleri, deformasyon direnci ve plastisite davranışı, ekstrüzyon sürecini etkiler.

3. Ekstrüzyon oranı: Ekstrüzyon oranı, biyetin çapının kalıba göre ne kadar daralacağını belirler. Bu da akışın şekline ve profilin özelliklerine etki eder.

Ekstrüzyon işlemiyle üretilen alüminyum parçaların özellikleri, proses sırasında metalin akış şeklinden önemli ölçüde etkilenir. Metal akışını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. İşte bu faktörlerden bazıları:

1. Ekstrüzyon türü: İleriye veya geriye ekstrüzyon gibi farklı ekstrüzyon yöntemleri, metalin akışını etkiler.

2. Presin kapasitesi, geometrisi ve kovan boyutu: Presin gücü ve tasarımı, metalin akış hızını ve şeklini belirler. Kovan boyutu da profilin boyutunu ve şeklini etkiler.

3. Kalıp ve kovandaki sürtünme etkileri: Kalıp ve kovan arasındaki sürtünme, metal akışının düzgünlüğünü ve şekil hassasiyetini etkiler.

4. Kalıbın tipi, tasarımı ve şeklin kalıp üzerindeki yerleşimi: Kalıbın tasarımı ve şekli, profilin özelliklerini ve metalin akışını belirler.

5. Biyet boyu ve alaşım türü: Biyetin uzunluğu ve alaşımın özellikleri, metalin akış davranışını etkiler.

6. Kovan ve biyet sıcaklığı: Kovan ve biyetin sıcaklığı, metalin plastisite özelliklerini ve akış hızını etkiler.

7. Ekstrüzyon oranı ve hızı: Ekstrüzyon oranı, biyetin boyut değişimini ve akış şeklini belirler. Ekstrüzyon hızı da metalin akış hızını etkiler.

8. Kalıp ve takımların sıcaklığı: Kalıp ve takımların sıcaklığı, metalin akışını ve soğuma sürecini etkiler.

4.3.2 Ekstrüzyon Basıncı

Ekstrüzyon işleminin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği, esas olarak azami basınç değeri ile belirlenir. Bu değer, presin kapasitesinin altında olmalıdır. Ekstrüzyonun başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için belirtilen faktörlerin önemi büyüktür:

1. Ekstrüzyon sıcaklığı: Metalin uygun sıcaklıkta olması, akış özelliklerini etkileyerek ekstrüzyonun gerçekleşmesini sağlar.

2. Ekstrüzyon hızı: Metalin istenilen profil şeklini alabilmesi için uygun hızda akması önemlidir. Hız, profilin kalitesini ve özelliklerini etkiler.

3. Ekstrüzyon oranı: Biyetin kesit alanının kalıp kesit alanına oranıdır. Bu oran, malzemenin akışkanlığını ve ekstrüzyonun gerçekleşebilme kabiliyetini belirler.

4. Ekstrüzyon basıncı: Ekstrüzyon işlemi sırasında uygulanan basınç, metalin şekillendirilmesinde kritik bir rol oynar. Doğru basınç seviyesi, malzemenin akışını ve şekil alma sürecini etkiler.

5. Biyetin bileşimi: Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi, ekstrüzyon sürecini ve sonuçta elde edilen ürünün özelliklerini etkiler.

6. Biyet uzunluğu: Ekstrüzyon işlemi için kullanılan biyetin uzunluğu, profilin istenen boyutlarda ve özelliklerde olmasını sağlar.

7. Kovan, kalıp ve takımların sıcaklığı: Bu bileşenlerin sıcaklığı, malzemenin akışını etkiler ve doğru şekillenme sağlanması için önemlidir.

Bu faktörlerin dikkate alınması, ekstrüzyon işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesine ve istenen ürün kalitesinin elde edilmesine yardımcı olur.

İleriye ekstrüzyon prosesinde malzeme, kalıp içerisinden dışarı doğru akarken basınç en yüksek değerine ulaşır. Bu basınç farkı, biyetin kovan içindeki sürtünme kuvvetlerine karşı hareket etmesi için gereken kuvveti temsil eder. Toplam basınç ise istampa üzerine gelen toplam basınçtır.

Metallerin ekstrüzyon işleminde, ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon basıncı, ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranı arasında çeşitli ilişkiler bulunmaktadır:

1. Biyet sıcaklığının yükselmesi, ekstrüzyon için gereken basıncı düşürür. Daha yüksek sıcaklık, malzemenin daha iyi akmasını sağlar ve daha düşük bir basınç uygulanmasını gerektirir.

2. Biyetin uzunluğu arttıkça, daha yüksek basınçlara ihtiyaç duyulur. Bu, malzemenin daha uzun bir yol kat etmesi ve şekillendirilmesi gerektiği anlamına gelir.

3. Ekstrüzyon oranı yükseldikçe, ekstrüzyon basıncı da artar. Ekstrüzyon oranı, biyetin kesit alanının kalıp kesit alanına oranını ifade eder. Daha yüksek bir oran, daha fazla malzeme akışını sağlar ve dolayısıyla daha yüksek bir basınç gerektirir.

4. Ekstrüzyon hızının normal sınırlar içinde artması durumunda, ekstrüzyon basıncı neredeyse hiç değişmez ve biyetin sıcaklık düzeyi ekstrüzyon aralığında kalır. Bu durumda, ekstrüzyon hızı daha az etkili bir faktördür.

Yukarıdaki ilişkiler, malzemenin akışını ve şekillendirme sürecini yönlendiren önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin dikkate alınması, ekstrüzyon işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine ve istenen ürün özelliklerinin elde edilmesine yardımcı olur.

4.3.3 Ekstrüzyon Kuvveti

Ekstrüzyon kuvveti (Fr), ekstrüzyon oranı, biyet-kovan arayüzey sürtünme şartları, biyet malzemesinin akma gerilmesi, kalıp yüzeyi sürtünme şartları ve başlangıçtaki biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı gibi diğer süreç değişkenleri ile ilişkilidir. Ekstrüzyon işlemi için gerekli olan kuvvet, ekstrüzyonun başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi ve malzemenin istenen şekle dönüşebilmesi için önemlidir.

$$F_r = P_t * A_c \tag{4.1}$$

Ekstrüzyon kuvveti yukardaki eşitlik ile verilir (Saha, 2005). Verilen eşitlikte, Pt ekstrüzyon basıncını ve Ac de kovan iç boşluk alanını temsil eder.

4.4 Ana Parametrelerin Ekstrüzyona Etkisi

Ekstrüzyon sistemleri yüksek maliyetli işlemlerdir. Bu nedenle, ekonomik ve verimli bir şekilde kullanılması için ekstrüzyon parametreleri ve işleme etkileri hakkında bilgi

sahibi olmak önemlidir. Ekstrüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için gereken kuvvet ve çıkan malzemenin kalitesini etkileyen temel değişkenler aşağıda sıralanmıştır:

1. İşlem Sıcaklığı: Ekstrüzyon işlemi için uygun sıcaklık, kuvvet gereksinimini etkiler. Sıcaklığın doğru ayarlanması, malzemenin plastisitesini artırarak akışını kolaylaştırabilir ve kuvvet gereksinimini azaltabilir.

2. Ekstrüzyon Oranı: Ekstrüzyon oranı, biyetin kesit alanının kalıp kesit alanına oranını ifade eder. Daha düşük bir ekstrüzyon oranı, daha az kuvvet gerektirebilir. Ekstrüzyon oranının uygun seviyede ayarlanması önemlidir.

3. Malzemenin Akma Gerilmesi: Malzemenin akma gerilmesi, malzemenin şekil değiştirme yeteneğini ve akış davranışını etkiler. Daha düşük bir akma gerilmesine sahip malzemeler, daha az kuvvet gerektirebilir. Malzemenin doğru seçimi önemlidir.

4. Şekil Değiştirme Hızı: Ekstrüzyon işlemindeki şekil değiştirme hızı da kuvvet gereksinimini etkiler. Daha yüksek bir şekil değiştirme hızı, daha fazla kuvvet gerektirebilir. Şekil değiştirme hızının uygun şekilde kontrol edilmesi önemlidir.

Bu değişkenlerin doğru şekilde ayarlanması, ekstrüzyon işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca, malzeme seçimi, kalıp tasarımı ve diğer parametrelerin doğru şekilde optimize edilmesi, maliyetleri azaltabilir ve kaliteli ürünlerin elde edilmesine yardımcı olur.

4.4.1 Ekstrüzyon Oranı

Birden farklı çıkışa sahip bir ekstrüzyon kalıbının ekstrüzyon oranı (ER)

$$E_R = \frac{A_c}{n * (A_E)} \tag{4.2}$$

olarak tanımlanmaktadır (Saha, 2005). Belirtilen eşitlikte, AC kovan yüzeyi, n adet simetrik çıkışın varlığını ve AE olarak adlandırılan elde edilen ürünün kesit alanını temsil eder. Ekstrüzyon işlemiyle oluşturulan bir şeklin ekstrüzyon oranı, şeklin

üretimi sırasında kullanılan mekanik enerji miktarını doğrudan yansıtan bir göstergedir.

Düşük değerlerdeki ekstrüzyon oranlarıyla yapılan işlemlerde, ekstrüzyon işlemine tabi tutulan alüminyumun yapısı, döküm halindeki alüminyumun yapısına benzer ve bu yapı mekanik açıdan zayıftır. Bu nedenle, ekstrüzyon oranı %10'un altında olan ürünlerde malzemenin literatürde belirtilen fiziksel ve mekanik özelliklere tam olarak uyacağının garantisi verilemez (Saha, 2005).

Ekstrüzyon işlemi genellikle sıcak şekillendirme yöntemi olarak kabul edilir. Sıcak şekillendirme, işlem sıcaklığı ve gerinim hızının malzemenin deformasyon sırasında kendi kendine iyileşmesine izin verdiği bir işlem olarak tanımlanır. Ekstrüzyon işlemi, düşük şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan metal ve alaşımlar için yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu şekilde, ekstrüzyon için gereken kuvvetler azaltılmış olur.

4.4.2 Ekstrüzyon Hızı

Bir metalin ekstrüzyona tepkisi, deformasyon hızından etkilenebilir. İşlem hızı arttıkça ekstrüzyon basıncı da artar.

Yüksek ıstampa hızı, ekstrüzyon sırasında sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu artış, gerinim hızının ıstampa hızıyla ve oluşan ısı miktarının da gerinim hızıyla orantılı olmasından kaynaklanır. Düşük ıstampa hızıyla oluşan ısının dağılması daha uzun bir süre gerektirir. Alüminyumun yüksek termal iletkenliği nedeniyle bu etki daha belirgin hale gelir.

4.4.3 Ekstrüzyon Sıcaklığı

Ekstrüzyon için en önem arz eden parametrelerden birisi sıcaklık faktörüdür. Sıcaklık miktarı yükseldikçe malzemelerin akma gerilimlerinin düşmesinden dolayı şekil değiştirme süreçleri daha kolay olmaktadır.

Ancak başlangıç sıcaklığı arttıkça, proses sırasında meydana gelen yerel sıcaklık artışları malzeme içinde kısmi erimelere yol açar, bu da en yüksek ekstrüzyon hızının azalmasına neden olur.

4.4.4 Malzemenin Plastisite Sınırları

Malzemenin plastisite sınırları, metallerin plastik deformasyon gösterebilmesi için tolerans gösterdikleri maksimum gerilme miktarını ifade eder. Bu sınırlar, malzemenin akma gerilmesi ile ilişkilidir ve genellikle akma eğrisi olarak bilinen gerilim-gerinim eğrisi üzerinde belirtilir.

Plastik deformasyon esnasında malzemenin şekillendirme kuvveti veya gerilmesi, akma gerilmesine, parçanın geometrisine ve sürtünmeye bağlıdır. Dolayısıyla, malzemenin plastisite sınırlarının belirlenmesinde akma gerilmesi önemli bir parametredir. Akma gerilmesini etkileyen faktörler arasında malzemenin metalurjik yapısı ve bileşimi, şekil değiştirme miktarı, şekillendirme sıcaklığı ve gerinim deformasyon hızı yer almaktadır (Saha, 2005).

4.4.5 Ekstrüzyon Sonrası Soğutma

Ekstrüzyon sonrası hızlı ve kontrollü bir soğutma işlemi, yüzey kalitesi ve Mg2Si parçacıklarının boyutları açısından büyük önem taşır. Ekstrüzyon yapılmış parçaların parçacık boyutları, mekanik özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir. Büyük Mg2Si parçacıkları sertleştirme yeteneklerini sınırlayabilir ve katı çözelti içindeki Mg ve Si miktarını azaltarak yaşlanma potansiyelini etkileyebilirler.

Pres işleminden çıkan ekstrüzyon ürününün (profil, lama, boru ve çubuk gibi) hızlı bir şekilde soğutulması, Mg2Si parçacıklarının çökelmeden katı çözelti içinde kalmasını hedefler.

Ekstrüzyon sonrası üründe, Mg2Si parçacıklarının çökelme olmadan katı çözelti içinde kalması için hızlı bir soğutma işlemi uygulanmalıdır. Bu amaçla, pres işleminden çıkan sıcak ürünün hızla, belirli bir hızda (örneğin, 95°C/dakika), 260°C'ye kadar soğutulması gerekmektedir. Bu yöntem, sonraki yapay yaşlanma prosesinde

maksimum mekanik özelliklere ulaşmayı sağlamaktadır. Ayrıca, eloksallama işlemi sonrasında düzgün bir yüzey elde etmek için mikroyapı içinde yansıtıcı parçacıklar bulunmamaktadır (Ulucak, 2000).

4.4.6 Yaşlandırma Isıl İşlemi

Yapay yaşlandırma işlemi, üretimin son aşamasıdır ve bu aşamada ürünler, belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletilerek aşırı doymuş katı çözeltiden çok küçük ve sınırlı sayıda Mg2Si çöktürülmesiyle en üst düzeyde mekanik özellikler ve eloksal kalite elde edilir (Ulucak, 2000).

Doğal yaşlandırma, oda sıcaklığında yapılan yaşlandırmaya verilen isimdir, yapay yaşlandırma ise daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen yaşlandırma işlemlerini ifade eder. Birçok alaşım, yapay yaşlandırmaya ihtiyaç duyar. Yapay yaşlandırma sıcaklığı, genellikle oda sıcaklığı ile çözelti ısıl işlemi arasındaki sıcaklık farkının belirli bir yüzdesi arasında değişir (Smith, 2001).

6000 serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma sertleşmesi, ısıl işlem sürecinin bir parçası olarak mekanik deformasyonla etkileşir. Bu durum, ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi üretim koşullarının önemli bir bileşenidir (Yao, vd., 2001).

Yapay yaşlandırma sırasında, Magnezyum ve Silisyum içerisinde zenginleşen GP zonları oluşur. Belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen yapay yaşlandırma, yapıda β fazının oluşmasına yol açar. Bu faz, alaşımın en yüksek düzeyde sertlik kazandığı temel bir fazdır. Uzatılmış yapay yaşlandırma sürecinden sonra, çökelti kalınlıklarında artış ve çökelti çevresindeki aşırı doymuş katı çözelti miktarında azalma gözlenir. Yapay yaşlandırma sırasındaki sıcaklık artışı, aşırı doymuş çözelti miktarının azalmasına neden olur (Latkowski ve M. Bronickiet 1989).

4.5 Alüminyum Ekstrüzyon Sürecinde Sıkça Karşılaşılan Kusurlar

Ekstrüzyon metodu ile imal edilen alüminyum profillerde farklı çeşitte hatalar meydana gelmektedir. Ekstrüzyon sonrasında oluşan hatalar, ürünün müşteri tarafından kabul edilmesine engel olan tüm kusurlar ve kalitesizlikler olarak

nitelendirilebilir. Bunlar imalat yöntemindeki değişikliklerden, kalıbın tasarımından, malzemeden ve tesisin çalışma koşullarından dolayı ortaya çıkabilmektedir.

Ekstrüzyon sonrası oluşan hatanın hangi faktörden kaynaklandığının belirlenmesi için, oluşan hatanın üretimin hangi aşamasında ve nasıl oluştuğunun çok iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Alüminyum ekstrüzyonunda; profilin basılması, takozun hazırlanması, ürünün oda sıcaklığına ısıtılması aşamalarında oluşan metalürjik olayların iyice bilinmesi üretimde pek çok hatanın kaynağına ulaşılmasına yardımcı olacaktır.

Homojenizasyonun yetersiz olması döküm yapısındaki iri çökeltilerin çözünmemesinden dolayı oluşan hatalara sebep olacaktır. Bu duruma örnek olarak AlMgSi alaşımlarında demir bakımından zengin bileşiklerin (ß-AlFeSi) profil yüzeyinde kalıp çizgilerine yol açtığı belirtilmiştir. Bu hatanın ortadan kaldırılması için homojenizasyon sıcaklığının yükseltilmesi gerekmektedir. Takozların ekstrüzyon sıcaklığına yüksek olmayan hızlarda ısıtılması AlMgSi alaşımlarında, Mg2Si fazının iri tanecikler halinde çökelmesine ve profil yüzeyinde kalıp çizgilerinin çıkmasına sebebiyet vermektedir. Mg2Si fazında bölgesel olarak çökelme olması ise, eloksal prosesinden sonra yüzeyin parlaklık özelliği kazanmasına engel olmaktadır.

Alüminyum ekstrüzyon sürecindeki bir diğer hata, ekstrüde edilen alüminyum profillerin dış yüzeyinde büyük taneli bir yapı oluşmasıdır. Bu hata, kalıptaki kesimler ve takoz kovan ara yüzeyi nedeniyle fazla şekil değiştiren malzemenin, ekstrüzyonun ilerleyen aşamalarında artan sıcaklık etkisiyle bölgesel olarak rekristalizasyon ve tane büyümesine maruz kalması sonucu meydana gelir. AlMgSi alaşımlarında çözülmüş bileşenlerin çözelti içinde kalabilmesi için hızlı bir soğutma işlemi gereklidir. Bu şekilde, istenen mekanik özelliklerin yanı sıra eloksal işleminden sonra iyi bir yüzey elde edilebilir. Yavaş bir soğutma işlemi sonucunda ise Mg2Si fazının çökelmesi, parlak eloksal işlemi uygulanan alüminyum profillerde mat bölgelerin ve çeşitli lekelerin oluşmasına neden olabilir. Bu hatanın önlenmesi için profil yüzeyine kalıptan çıkarken soğutma püskürtülmesi gerekmektedir (TMMOB).

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Tez konusu ile ilgili ya da benzer olduğu düşünülen bazı çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Huang ve Prangnell (2007) malzemelerin en iyi şekillenmesini sağlayan mikro yapıyı elde etme amacıyla bir deformasyon tekniği olan sürekli sürtünme ile açısal ekstrüzyon tekniği üzerine çalışma yapmışlardır. Sac metallerin işlenebilirliklerini artırmak için bu tekniği ticari alanlarda kullanılan alüminyum alaşımlar ile denemişlerdir. Oldukça benzer özelliklere sahip tanecik yapısı iyileştirilmiş malzemelerde ortalama olarak 0,6 μm tanecik boyutu elde edilmiş ve işlem sonuna kadar mikro yapı ve doku deformasyon süreci ve homojenliği raporlanmıştır.

Mol vd. (2005) yaptıkları çalışmada AA 6063 alaşımını kullanmış ve ekstrüzyonu yapılan alaşımın korozyon etkisi üzerine durmuşlardır. Çapları 20 cm ve boyları 70 cm olan 10 ayrı parça kullanılmıştır. Bu parçaları ilk olarak 565 (±20)°C'lik sıcak fırınlarda 6 saat süre ile homojenize etmişlerdir. Ardından 17°C sıcaklıkta ve 180 dm^3 soğuk su banyosuna daldırmışlardır. Bu numunelerden ikisi soğutulma işlemine bırakılmış diğer sekiz parça ise 250°C, 325°C, 400°C ve 450°C gibi farklı sıcaklıklarda 24 saat boyunca yaşlandırmaya bırakılmıştır. Çalışmada korozyon etkisi üzerinde durulmuş ve malzemelerde ekstrüzyondan sonra oluşan korozyon ve bunların sebepleri araştırılmıştır. Çalışma neticesinde oyuk korozyon mekanizmasının Mg_2Si çökeleklerinin oranına ve boyutuna bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Karabay vd. (2005) yapmış oldukları çalışmada AA6101 alaşımının mekanik davranışı üzerinde direkt ekstrüzyon işlemindeki ekstrüzyon oranının etkilerini incelemişlerdir. AAAC tip alüminyum alaşımını iletkenin üretimi esnasında beslenecek kütük malzeme olarak kullanmışlar ve sıkıştırma yönteminden yararlanmışlardır. Çeşitli sıcaklıklardaki kütük malzemelerin ekstrüzyonu yapılmasıyla ekstrüzyon oranının etkisini incelemişlerdir. Kütük malzemeleri, yavaş soğuma ve su verme koşullarında çekilmeye hazır duruma getirmişlerdir. Ana malzemenin ekstrüzyon çıkış sıcaklığını ve akış hızını sabit tutmak için, AA6101 malzemesini 10; 30 ve 50 mm'lik üç farklı çapta kalıp aracılığıyla doğrusal olarak ekstrüze etmişlerdir. T1 ve T6 ısıl işlemi

uygulanmış numunelere mekanik testler uygulamışlardır. Çalışma neticesinde ekstrüzyon oranının en yüksek gerilme kuvveti üzerinde etkili olduğunu, çekme işlemine tabi tutulan AA6101 alaşımının sertlik ve çekme değerlerinde düşüş olduğunu gözlemişlerdir.

Doğan çalışmasında, alüminyum alaşımlarının üzerinde uygulanabilecek ısıl işlemler ve elde edilebilecek sonuçlar üzerinde durmuştur. Yapmış olduğu çalışmada alüminyum alaşımlarına uygun ısıtma ortamlarında (hava fırınları, tuz banyoları gibi), tavlama, stabilizasyon, homojenleştirme, gerilme, çözündürme, yeniden kristalleştirme gibi ısıl işlemler uygulayarak alaşımlara elektrik iletkenliği, ısıl iletkenlik, manyetik hassasiyet, yansıtıcılık ve iyi işlenebilirlik gibi özelliklerin kazandırılabileceğini ve arttırılabileceğini görmüştür. Alüminyum alaşımlarında uygulanmakta olan ısıl işlemlerin önemli bölümünü yaşlandırma (çökeltme) ısıl işlemi sağlamaktadır. Yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda alaşımların çekme ve akma mukavemetleri, korozyon dayanımı ve sertlik gibi yüksek mekanik mukavemet özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

Sun, yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarını incelediği çalışmasında, Al-Mg-Si alaşımını %16 soğuk işlem uygulayarak sertleştirmiştir. Al-Si-Cu ve Al-Mg-Si alaşımlarına uygulanan ısıl işlem 525°C ve 7 saat süreyle çözeltiye aldıktan sonra su verme ve 175°C'de 16 saat süre ile yaşlandırma yaparak ve çözeltiye alma işleminden sonra %16 seviyesinde soğuk işlem uygulayarak yaşlandırmıştır. Yapmış olduğu çalışmada yaşlandırma işleminin iletkenlik seviyesini arttırdığını ve en yüksek iletkenlik seviyesinin çözeltiye alınıp, soğuk işlem yapıldıktan sonra yaşlandırma yapılan Al-Mg-Si alaşımında elde edildiğini tespit etmiştir. Yapmış olduğu yaşlandırma işlemlerinin sertlik ve mukavemet sonuçlarını da iyileştirdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra metal-abrasiv deneylerinin sonucunda soğuk işlemin aşınma mukavemeti üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. En iyi aşınma direncini Al-Mg-Si alaşımı göstermiştir.

Aydıner çalışmasında silisyum katkısının Zn-Al alaşımlarının tribolojik özelliklere etkisini incelemiştir. Kokil döküm yöntemiyle Zn-Al ve Zn-Al-Si alaşımları hazırlanmıştır. Çinko alüminyum silisyum alaşımlarının içyapısının alüminyum

fazlarını çevreleyen çinko fazları ve silisyum fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Silisyum fazının büyüklük ve dağılımının takviye edilen silisyum oranına bağlı olduğu görülmüş olup uygulanan ısıl işlem sonucunda dendritik yapının ortadan kalkarak ince taneli bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Silisyum parçacıklarında herhangi bir değişimin ortaya çıkmadığı da tespit edilmiştir. Silisyum takviyesinin %2 oranına kadar sertlik ve çekme mukavemetini arttırdığı bu oranın üzerinde silisyum oranı ile birlikte düştüğü tespit edilmiştir. Silisyum katkılı çinko esaslı alaşımların aşınma davranışları, sertlik, çekme mukavemeti ve sürtünme katsayısı ile alakalı olduğu görülerek silisyum takviyesinin hem mekanik, hem de tribolojik özellikleri iyileştirdiği saptanmıştır.

Hekimoğlu çalışmasında bakır katkısının alüminyum alaşımlarının sürtünme ve aşınma özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Çinko alüminyum alaşımlarında sertliğin artan bakır oranıyla sürekli arttığı tespit edilmiştir. Çekme mukavemetinin ise %2 oranına kadar artan bakır oranıyla arttığı, fakat bu oranın üzerinde artan bakır oranının çekme mukavemetini azalttığı ifade edilmiştir. Alaşımın sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığının bakır oranına göre düzenli bir değişim göstermediği tespit edilmiş olup, çözündürme ve su verme işlemleri sonrasında uygulanmış olan yaşlandırma işlemi ile alaşımların sertlik, mukavemet ve aşınma dirençlerinin ciddi oranda artarak bakır takviyesinin alaşımın mekanik ve tribolojik özelliklerine olumlu yönde etkisi gösterilmiştir.

Darıdereli, alüminyum alaşımlarına uygulanan yaşlandırma işleminin mikroyapı, mekanik özellikler ve aşınma direncine olan etkilerini incelediği çalışmasında, AA 6063 alaşımının ekstrüzyon sonrası farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma ısıl işlem aşamalarından geçirerek farkı özelliklerde numuneler elde etmiştir. Uygulanmış olan ısıl işlem prosesleri sonrası sertlik, çekme, darbe ve aşınma deneyleri yaparak mekanik özellikler ve aşınma dayanımları belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda optimum yaşlandırma değerlerinin 175°C ve 8 saat süre ile olduğu saptanmış olup, yaşlandırma ile malzemenin sertlik ve aşınma dirençlerinin arttığını ifade etmiştir.

Caniaz yaptığı çalışmasında; AA6063 alaşımlarının endüstriyel uygulamalarda en yaygın üretim şeklinin DC sürekli döküm yöntemi olduğunu ve ekstrüde

edilebilirliğinin mükemmel olduğunu ifade etmiştir. Döküm işleminin ardından homojenizasyon ısıl işlemi kullanılarak döküm yapıda yoğun olarak bulunan ve mekanik özellikleri (ekstrüde edilebilirlik) olumsuz etkileyen iğne formundaki β-AlFeSi intermetalik fazının, daha yuvarlak ve küçük, zincir şeklinde olan α-AlFeSi intermetalik fazına dönüştürülerek alaşımın mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesinin sağlandığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada alüminyum matris içerisinde çok az miktarda bulunan intermetalik fazların matristen ayrılarak XRD işlemi ile karakterize edilebileceği selektif çözündürme tekniği ile fazlar hakkında bilgilerin değerlendirilebileceği ifade edilmiştir.

Avşar çalışmasında, 6061 alüminyum alaşımını üç farklı sıcaklık ve sürede yaşlandırmanın, alaşımın mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Maksimum dayanıma uzun süreli yaşlandırma işlemlerinde ya da yüksek sıcaklıklardaki yaşlandırma işleminde daha kısa sürede ulaşılabildiği ortaya koyulmuştur. Yaşlandırma işleminde düşük sıcaklık kullanmanın faydası olabileceği ve uzun süre korunabileceği ifade edilmiştir.

Haydar yapmış olduğu çalışmasında; ticari saflıktaki alüminyuma K2TiF6 ve KBF4 tuzlarını ilave ederek Al-5Ti-1B tane incelticiler üreterek ergitme, alaşımlandırma ve döküm işlemleri esnasında parametrelerde yapılan değişikliklerin ve döküm sonrası gerçekleştirilen plastik şekil verme işlemi ile nihai ürünün tane inceltme performansına yaptığı katkılar üzerinde durmuştur. Sıvı alüminyuma yeterince yüksek sıcaklıkta K2TiF6 ve KBF4 takviye ederek yeterli süre verildiğinde Al-5Ti-1B alaşımı üretmenin mümkün olduğu söylenmiştir. Al-5Ti-1B tane inceltici alaşımın yapısında oluşan TiAl3 ve TiB_2 fazlarının boyut ve dağılımlarının tane küçültme etkinliğini belirleyen en önemli faktör olduğu belirtilmiştir. Al-5Ti-1B tane inceltici üretimi için, ergiyik haldeki ticari saf alüminyuma ilave edilen florür tuzlarına ek olarak KF takviye edilmesi, cürufta çözünen alüminyumun geri kazanımını sağlayarak üretim verimliliğinin arttırabileceği ifade edilmiş, daha iyi tane küçültme performansı için ilgili proseslerde çalışmalara devam edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Onur yapmış olduğu çalışmada iki farklı alüminyum alaşımı olan AA 6013 ve AA 6082 alaşımlarının farklı sürelerdeki yaşlandırma işlemi sonrası mekanik ve

işlenebilirlik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Yaşlandırma işlemi sonrasında her iki alaşımın mekanik özelliklerinde artış olduğu ifade edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasına bağlı olarak alaşımların işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. 6 saat süre ile yapılan yaşlandırma işlemlerinin mekanik ve işlenebilirlik özellikleriyle 24 saatlik yaşlandırma işlemi sonucundaki alaşımların mekanik ve işlenebilirlik özellikleri arasında önemli bir artış olmadığı tespit edilmiştir.

Yazıcı çalışmasında, 6005A alaşımlarında meydana gelen yeniden kristalleşme tabaka yapısının sebep olduğu düşük mekanik özellikler ve kötü yüzey görünümüne etkisi olan ana faktörlerin anlaşılabilmesi amacıyla farklı Mn ve Cr oranına sahip iki farklı kompozisyonu incelemiştir. Kimyasal kompozisyonda yapılan Mn ve Cr oranındaki artışın Mn ve Cr yönünden düşük olan kompozisyona göre yeniden kristalleşme tabakasında önemli ölçüde iyileşme sağladığı ifade edilmiştir.

Bayram, yaptığı çalışmasında ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisi üzerine olan çalışmasında, profilin kalitesine hız, sıcaklık ve sürtünme parametrelerinin doğrudan etkisinin olduğunu, hammadde sıcaklığı ve profil çıkış sıcaklığının sürekli kontrolü ile yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerdeki artış olduğunu tespit etmiştir. Optimum parametreleri doğru kullanarak profil hasarlarının ve işçilik maliyetlerini azaltarak verimin arttırılabileceği ifade edilmiştir. Profil matrisinde ekstrüzyon hızı ile matris kanal uzunluğunun birlikte değerlendirmesi gerektiği ifade edilerek kanal uzunluğu arttıkça ekstrüzyon hızının arttığını ve profil kalitesinin iyileştiğini belirtmiştir. Ayrıca bu çalışmada uygun yağ ve yağlama yöntemlerinin seçilmesiyle ekstrüzyon kuvveti ve fireni azaldığı belirtilmiştir.

Asa yapmış olduğu çalışmada; AA 6061 alaşımının homojenizasyon prosesinin ekstrüzyon kabiliyetine olan etkisini incelemiştir. Orta ve yüksek mukavemetli ısıl işlemle sertleştirilebilen alüminyum alaşımlarının fabrikasyon proses zincirinde önemli bir adım olan homojenizasyon işleminin soğutma hızındaki düşüş ile şekil değiştirme gerilimini ve sertleşme kabiliyetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu alaşımlar için standartlarda öngörülen sertlik değerlerini elde edebilmek için

homojenizasyon soğutma hızının alaşıma bağlı olarak kritik bir değerin altına düşürülmemesi gerektiği önemle ifade edilmiştir.

Daşçılar, 6063 alüminyum alaşımının iki farklı hızda ekstrüzyonunu gerçekleştirdiği çalışmasında farklı hızların profilin sertlik değerlerinde çok önemli farkların oluşturmadığını tespit etmiştir. Ekstrüzyon sonrası yapılan yaşlandırma işleminde istenen sertlik değerini sağlayan numunenin yüksek hızda üretilen numune olduğu, ekstrüzyon hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı ifade edilmiştir. Buradan yola çıkarak yüzey pürüzlülüğü ile anodik oksidasyon işlem kalitesi arasındaki paralel ilişki incelendiğinde imalat şartlarında kullanılan iki farklı hız değerinin de uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Demirtaş, 6061 alüminyum alaşımlarında ara vererek yaptığı yaşlandırma işlemlerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Malzemenin yapısındaki Mg ve Si değerlerinin yaşlandırma sıcaklığında ve mekanik özelliklerde değişimler meydana getirdiğini ifade edilmiştir. 20 dakika deney şartlarında mekanik özelliklerde değişimlerin gözlemlendiği, 90 dakika deney şartlarında birim deformasyon hariç diğer mekanik özelliklerde önemli ölçüde azalma meydana geldiği ve bu sebeple sürenin kısa tutulması gerektiği tespit edilmiştir. Malzemenin 90 dakika deney şartlarında mekanik özelliklerinde önemli bir değişikliğin gözlemlenmediği ve elde edilen veriler ışığında 20 dakika deney şartlarında toplam uzama miktarlarında %100'e yakın artışlar elde edildiği ortaya koyulmuştur.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada T6 ısıl işlemli EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımlı alüminyum profiller araştırma konusuna uygun yöntem ve proseslerle üretilmiştir. Çalışmada ekstrüzyon işleminde sıcaklık ve ekstrüzyon (baskı) hızının etkilerini belirlemek için, üçer farklı sıcaklık ve ekstrüzyon hızı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar aşamasında deneylerde kullanılan malzemeler ve yöntemlere sırasıyla aşağıdaki konu başlıkları içerisinde değinilmiştir. Tez çalışmasında profil üretimleri ve çekme testleri Asist Alüminyum Profil San. ve Tic. A.Ş. fabrikalarında gerçekleştirilmiş olup, mikroyapısal incelemelerin tamamı ve sertlik testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

6.1 Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılacak olan EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımlı hammaddelerin kimyasal kompozisyonları TS EN 573-3 standardına göre belirlenmiştir. Tablo 6.1'de döküm işlemleri gerçekleştirilen EN AW 6061 ve EN AW 6063 alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu (spektal analiz) verilmiştir.

Tablo 6.1 6061 ve 6063 alaşım hammadde spektral analiz sonuçları

Element	EN AW 6061 Alaşım	EN AW 6063 Alaşım
Al	98,0	98,8
Si	0,636	0,430
Fe	0,217	0,175
Cu	0,199	0,0287
Mn	0,0499	0,0173
Mg	0,824	0,474
Zn	0,0109	0,0111
Cr	0,0066	0,0077
Ni	0,0065	0,0114
Ti	0,0143	0,0146
Be	0,0002	0,0002
Pb	0,0062	0,0065
V	0,0135	0,0135
Zr	0,0010	0,0010
Ga	0,0103	0,0110

6.2 Metot

Alüminyum profil malzemelerin üretimi için, döküm kütükler öncelikle, işletmenin alüminyum dökümhanesinde DC döküm ve airslip yöntemi ile dökülmüştür. Hurda ve saf alüminyum olarak işletmeye gelen alüminyum hammaddeler 720°C sıcaklıktaki ergitme fırını içerisine atılıp sıvı metal oluşturulup istenilen özelliklere uygun alaşım elementleri ilave edilerek üretilmiştir. İstenen alaşım oranları spektrometre cihazıyla kontrol edilip ilgili standartlar doğrultusunda (TS EN 573-3) doğru oranlar elde edildikten sonra döküm prosesi başlamıştır. Ergitme fırınlarında TS EN 573-3 standardına uygun alaşımlandırılarak ergiyik metal döküm tezgâhlarında airslip metodu ile hammadde haline getirilen alüminyum kütükler testere vasıtasıyla istenen boya kesilerek proses firelerinden arındırılmıştır. Dökümü gerçekleştirilen alüminyum kütüklerin istenen boylarda kesimi gerçekleştirildikten sonra her döküm için alaşım içeriğini ve şarj numarasını belirten markalamalar yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan alüminyum kütükler, çapı 178 mm, boyları ise 6000 mm olacak şekilde üretilmiştir. Daha sonra döküm mikroyapısının daha homojen olması için numuneler ısıl işlem fırınlarında 560-580°C sıcaklıklarda 10-12 saat sürelerde homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Homojenizasyon prosesi tamamlandıktan sonra tane yapısı korumak amacıyla numuneler ayrıca 4 saat kadar soğutma işlemine tabii tutulmuştur. Çalışmanın planına uygun olarak üretilen kütükler, makine kapasitesine uygun boylar elde etmek için daha sonra sıcak kesim testeresinde kesilerek alüminyum takozlar elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan hammadelerin boyu 75 cm'dir. Alüminyum kütüklerin döküm işlemiyle üretim sürecini ifade eden görseller Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Alüminyum kütüklerin döküm işlemiyle üretimi

Bu çalışmada tercih edilen üretim yöntemi ekstrüzyondur. Ekstrüzyon, üretilen alüminyum kütüklerin belirlenen sıcaklıklarda ısıtılıp hidrolik baskı gücüyle bir kalıptan geçirilerek sıcak şekil verme işlemidir. Numune üretiminde kullanılacak olan kalıp en az 3 saat süre ile kalıp tav ocaklarında ısıtılmıştır. Kalıp tav ocağından çıkarılan kalıp için ideal baskıya hazır olma sıcaklığı 450°C'dir. Kalıp, kalıp yatağına (kaset) uygun şekilde yerleştirilir. Ekstrüzyon prosesinde üretim ve deneysel numune alma şartlarına elverişli olması nedeniyle tek figürlü solid yapılı bir kutu profil kalıbı tercih edilmiştir. Konteyner sıcaklığı ise 420°C olarak belirlenmiştir. Konteyner sıkma basıncı 200 bar ve ana silindir basıncı ise akış rejimine ulaşıldığında 165 bar olarak ayarlanmıştır. Yine çalışmanın içeriğine uygun olması amacıyla ekstrüzyon (baskı) hızları da değiştirilerek toplamda üç farklı hızda üretim gerçekleştirilmiştir. Profilin mekanik özelliklerine doğrudan etkisi olan soğuma hızı bu çalışmada 95°C/dk olarak ölçülmüştür. Profilin ekstrüzyonu esnasında hız değişikliklerinin daha doğru saptanabilmesi için hız geçişleri için pres durdurularak değişiklikler yapılmıştır. Bu

sayede hız geçiş bölgeleri belirlenerek numunelerin karışması engellenmiş ve üzerlerine deney numaraları yazılarak ayrı ayrı sınıflandırma yapılmıştır.

Çalışmada EN AW 6061 ve EN AW 6063 malzemelerin ekstrüzyon yöntemiyle üretiminde sıcaklık ve ekstrüzyon hızının üretim ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için sıcaklıklar; 420ºC, 450ºC ve 480ºC, hızlar ise; 10 m/dk, 13 m/dk ve 15 m/dk olarak belirlenmiştir. 420ºC, 450ºC ve 480ºC olarak belirlenen sıcaklıklar döküm kütüklerin kalıba ilk giriş sıcaklığıdır. Bu sayede çalışma için Tablo 6.2'de verilen sıralama ve parametrelerde deney düzeneği oluşturulmuştur.

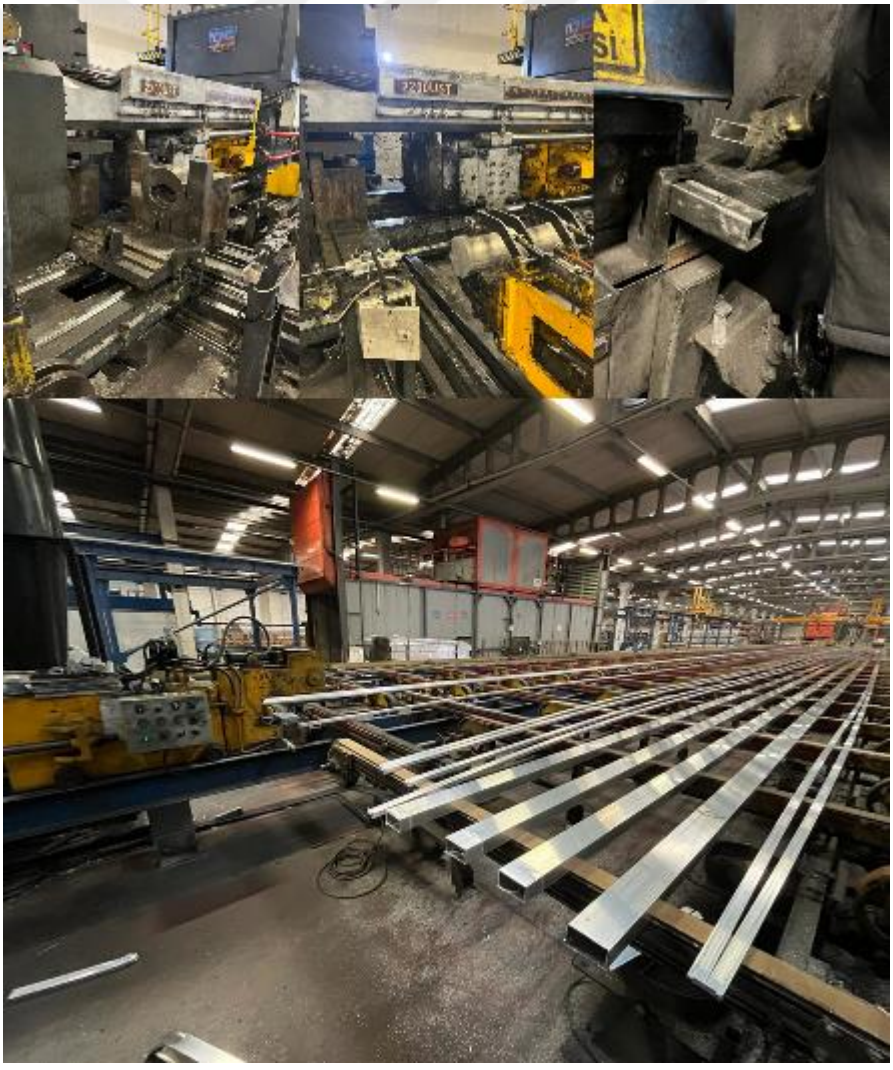
Tablo 6.2 Deney numunelerinin üretim sıralama ve parametreleri

Sıra No	Deney No.	Alaşım	Sıcaklık (°C)	Ekstrüzyon Hızı (m/dk)
1	61-1	EN AW 6061 T6	420	10
2	61-2			13
3	61-3			15
4	61-4		450	10
5	61-5			13
6	61-6			15
7	61-7		480	10
8	61-8			13
9	61-9			15
10	63-1	EN AW 6063 T6	420	10
11	63-2			13
12	63-3			15
13	63-4		450	10
14	63-5			13
15	63-6			15
16	63-7		480	10
17	63-8			13
18	63-9			15

Sıcak kesim testeresinde uygun boya kesilen alüminyum kütük hammaddeler bir transfer arabası vasıtasıyla öncelikle isleme tertibatına taşınmıştır. İsleme işlemi alüminyum kütüğün baskı sonunda basıyı yapan ekipmana (zımba) yapışmasını

önlemek amacıyla gerçekleştirilir. Transfer tertibatı vasıtasıyla yüklemeye taşınan kütük baskı yani ekstrüzyon işlemi için hazırdır. Devreye alınacak olan kalıp pres çıkış ağzına kaset yatakları vasıtası ile taşınmıştır. Kütükler kütük kalıp arkası ile konteyner arasına yükleme ile taşınmıştır. Daha sonra konteyner kapanarak kütükler ekstrüzyon işlemine hazır hale getirilmiştir. Ana silindirin yatayda ileri yönlü hareketi ile de ekstrüzyon başlamıştır.

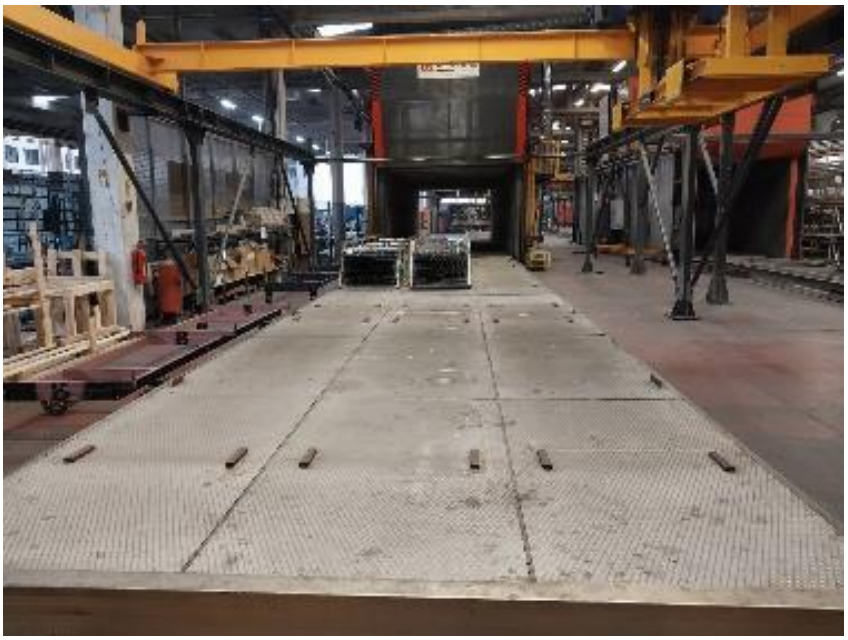
Ø178 mm ve 750 mm uzunluğundaki alüminyum döküm kütüklerden, proses fireleri de dahil olmak üzere ortalama 2,5 mm kesit kalınlığında ve 38000 mm uzunluğunda kutu profil olacak şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretimlere ait görseller Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2 Alüminyum kütüklerden ekstrüzyon işlemiyle profil üretimi

Pres çıkışında ekstrüde edilmiş alüminyum profil akış yönünde çekici robota kadar taşınır. Çekici robot profil gramajı ve tercih edilen hammadde boyuna göre süreci tamamladıktan sonra profili bir sonraki robota aktararak ilk boydaki üretimi tamamlamak için kesim noktasına geri döner. İkinci kütüğün baskıya girmesiyle beraber bir önceki kütüğün bitim noktasıyla arasında bir kaynama noktası oluşur. Profil boylaması bu kaynak noktası baz alınarak gerçekleştirilir. Bu çalışmanın amacını oluşturan Tablo 6.1'de verilen parametrelerin değiştirilebilmesi için her bir kütük uygun parametrede fırından çağırılmıştır. Baskı esnasında uygun numunenin üretimi gerçekleştikten sonra aynı sıcaklıktaki farklı bir hıza geçmeden önce pres durdurularak bir kaynak (ekleme) noktası elde edilmiştir. Elde edilen bu kaynak noktası parametre geçişlerinin kaçırılmaması için kullanılmıştır.

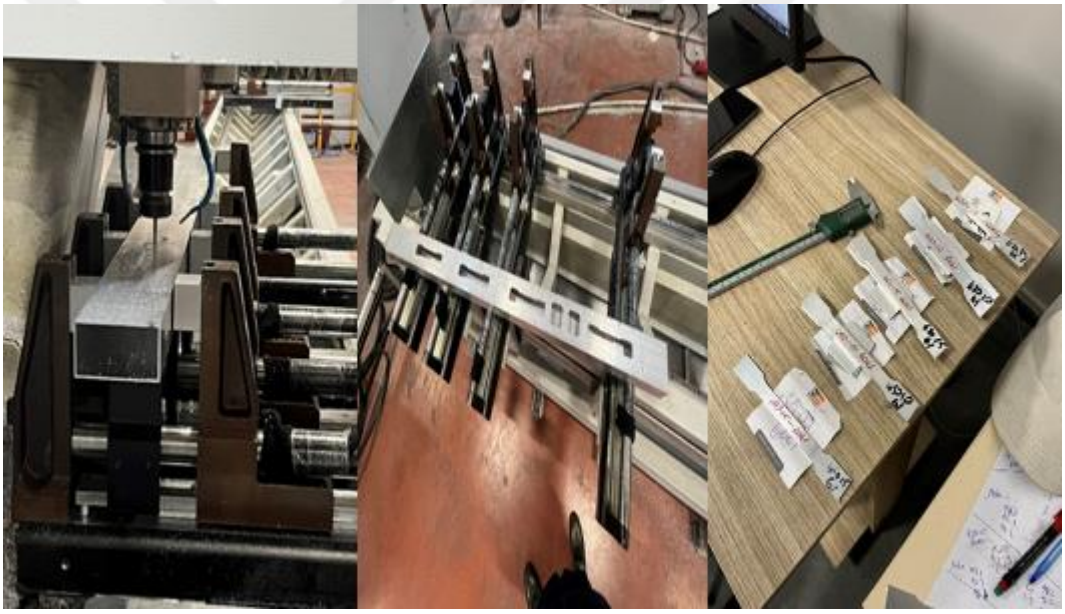
Ekstrüze profiller, proses esnasında oluşabilecek eğrilik, dalgalanma, sehim gibi proses hatalarından arındırılmak için üretim sonrasında germe prosesine tabi tutularak, boylama testeresinde hız ayrım noktalarından kesilerek birbirinden ayrılmıştır. Germe işleminden sonra profiller parametre değişikliklerini ifade eden ek noktalarından kesilerek her bir profilin üzerinde deney parametreleri ayrı ayrı not edilmiştir. Daha sonra üretimi gerçekleştirilen EN AW 6061 ve EN AW 6063 alüminyum profillere T6 ısıl işlem şartlarında 8 saat süre ve 185°C sıcaklıkta yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem fırınları Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 Alüminyum profillere yaşlandırma işleminin uygulandığı ısıl işlem fırınları

6.2.1 Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada temel olarak farklı alüminyum alaşımları (EN AW 6061 ve EN AW 6063), farklı sıcaklık (420°C, 450°C, 480°C) ve farklı hızlarda (10 m/dk, 13 m/dk, 15 m/dk) ekstrüzyon işleminde değişkenlerin (malzeme, sıcaklık, hız) malzemenin mekanik ve metalürjik yapısında oluşturduğu etkileri belirlemek hedeflenmiştir. Belirlenen parametreler altında üretimi gerçekleştirilen numunelerin mikroyapı incelemelerinin yapılması için numuneler öncelikle uygun boyutlarda CNC'de işlenmiştir. Alüminyum profiller Şekil 6.4'te görüldüğü gibi işletmenin mekanik işlem bölümünde CNC ile işlenerek standartlara uygun numuneler üretilmiş ve üzerlerine uygun markalamalar yapılmıştır.



Şekil 6.4 Üretimi tamamlanan alüminyum profillerin çekme ve sertlik numunelerinin oluşturulması için CNC tezgâhında işlenmesi

6.2.2 Mikroyapı İncelemeleri

Deneyleri gerçekleştirilen numunelerin Optik Mikroskop (OM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopi (EDS) ve X Işını Kırınım (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, malzeme biliminde önemli rol oynayan bir araştırma alanıdır. Bu incelemeler, malzemelerin içyapısını ve bileşenlerini anlamak için kullanılan çeşitli analiz yöntemlerini içermektedir. Bu yöntemlerden OM, SEM, EDS ve XRD analizleri çalışmamızda tercih edilen

yöntemler olmuştur. OM ve SEM, numunenin mikroyapısını, tane boyutunu, faz dağılımını ve benzeri özellikleri yüksek çözünürlükte görüntülemek için kullanılan mikroskop teknikleridir. EDS ise SEM ile birlikte kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, numunenin bileşenlerini belirlemek için kullanılır. SEM ile birleştirilen EDS, numunenin yüzeyindeki elementlerin tespit edilmesini sağlar. XRD tekniği ise malzemelerin kristallografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların belirlenmesini sağlayan hasarsız bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarının mikroyapısını ayrıntılı bir şekilde incelemek için güçlü bir araç sağlaması için söz konusu yöntemler birlikte kullanılmıştır.

Üretilen profillerden alınan numunelerde malzeme, sıcaklık ve hızın neden olduğu içyapısal değişimler, bu aşamada incelenmiş ve değerlendirilmiştir. CNC işleme ile elde edilmiş mikroyapı numuneleri ATM ticari markalı Brillant 250 cihaz ile uygun boyutlarda kesilerek bakalite alma işlemi için şekillendirilmiştir. Bakalite alma işlemi ise yine ATM ticari markalı Opal 460 cihazı ile numunelerin inceleme yapılacak yüzeyleri altta kalacak şekilde bakalite gömülmüştür.

OM, SEM, EDS ve XRD incelemeleri için en uygun görüntüyü alabilmek için bakalite gömülü numunelerin yüzeyleri üzerinde ATM ticari markalı Saphir 520 model cihaz ile parlatma ve zımparalama işlemleri yapılmıştır. Sırasıyla 100, 200, 320, 400, 500, 600, 800, 1200 ve 2500 gritlik zımparalarla aşamalı olarak numunelerin yüzey pürüzlükleri bertaraf edilmiştir. Daha sonra 6 ve 3 mikronluk keçe ve solüsyonlar yardımıyla parlatma işlemi gerçekleştirilmiş ve numuneler alkolle kurulanmıştır. Numunelerin dağlama işlemlerinde ise 6 ml HCl, 8 ml HNO_3, 4 ml HF ve 82 ml saf H_2O kullanılmıştır. Dağlama işlemlerinde EN AW 6061 malzemeler 120 saniye, EN AW 6063 malzemeler ise 180 saniye dağlama ayıracı içerisinde tutulmuştur. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler alkol ile temizlenmiş ve mikroyapısal incelemelere hazır hale getirilmiştir. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde yapılan mikroyapı incelemelerinde; OM incelemeleri Leica marka DM4000 model, SEM ve EDS incelemeleri Jeol marka JSM 6060 LV model, XRD incelemeleri ise Bruker marka D8 Advance cihazlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirildiği Metalografi Laboratuvarı Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5 Mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirildiği metalografi laboratuvarı (https://webupload.gazi.edu.tr/upload/234/2022/8/18/751de4e4-58cc-45c0-8adb-d7da6a404b64-gazI-lab-turkce.pdf)

6.2.3 Sertlik Testleri

Sertlik ölçümleri, malzemelerin plastik deformasyona karşı direncini, yüzey sertliğini ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu ölçümler, malzemelerin mikroyapısı, bileşenleri ve üretim süreçlerine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmesini sağlar. Makro sertlik ölçümleri genellikle Brinell yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Brinell sertlik testi büyük ölçekli sertlik ölçümleri için kullanılır. Bu testte, bir çelik bilye belirli bir yük altında malzemenin yüzeyine batırılır. Yük bırakıldıktan sonra bilye izi ölçülerek sertlik değeri elde edilir. Brinell sertlik testi, genellikle sünek ve yumuşak malzemelerin sertlik ölçümlerinde tercih edilir.

Tez çalışmasında, mikroyapı incelemeleri tamamlanan numuneler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Emcotest Duravision 2000 marka cihaz (Şekil 6.5) ile sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Sertlik testlerinde Brinell yöntemi, 2,5 mm çapında batıcı uç ve Alüminyum alaşımları için uygun olan 31,25 kg yük kullanılmıştır. Numune üzerinden 5 ayrı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır.

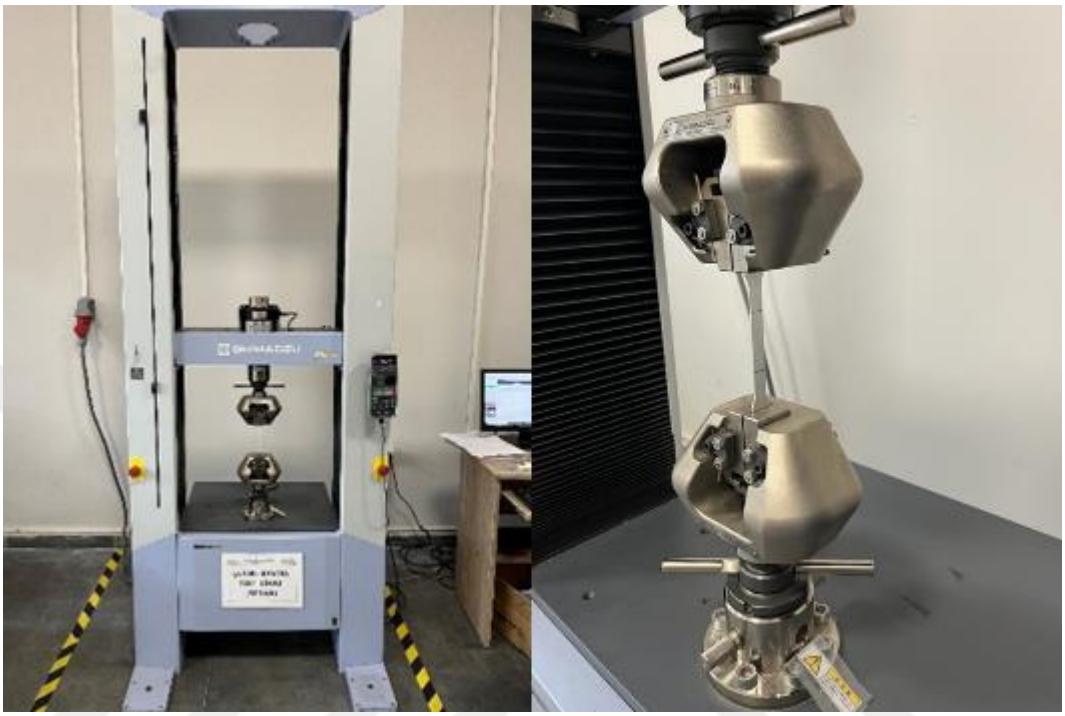


Şekil 6.6 Deneylerde kullanılan sertlik cihazı

6.2.4 Çekme testleri

TS EN 6892-1 standardına uygun olarak kesilen numuneler Asist Alüminyum Profil San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarlarındaki Shimadzu çekme cihazında (Şekil 6.6) yine aynı standarda uygun olarak çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri, malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan, malzemelerin tasarım ve üretim aşamalarında rolü olan önemli bir test yöntemidir. Bu testler, malzemelerin dayanımını, gerilme sınırlarını, kırılma davranışını ve deformasyon özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu bilgiler, malzemelerin kullanım amacına uygunluğunu ve performansını değerlendirmek, ürün kalitesini artırmak ve tasarım optimizasyonu yapmak için de ayrıca kullanılır. Bu test ile malzemelerin akma, çekme ve kopma mukavemeti, elastisite modülü, uzama miktarı gibi önemli mekanik özellikleri tespit edilerek malzeme performansı hakkında bilgi sağlanır. Deneylerde kullanılan çekme cihazı, bir çene sistemi, yük hücresi, deformasyon ölçüm cihazı ve kontrol biriminden oluşmuştur. Numune çeneler arasına yerleştirilir ve belirli bir hızda çekme işlemi başlar. Cihaz, numunenin deformasyonunu ve uygulanan yükü ölçerek, numunenin gerilim – gerinim verilerini ortaya koyar. Tez çalışması için her deney kapsamında 3

adet numune hazırlanmış, ölçümü gerçekleşen 3 numunenin ortalama akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri hesaplanarak sonuçlar raporlanmıştır.



Şekil 6.7 Çekme cihazı ve çekme işlemi gerçekleştirilen numune görüntüsü.

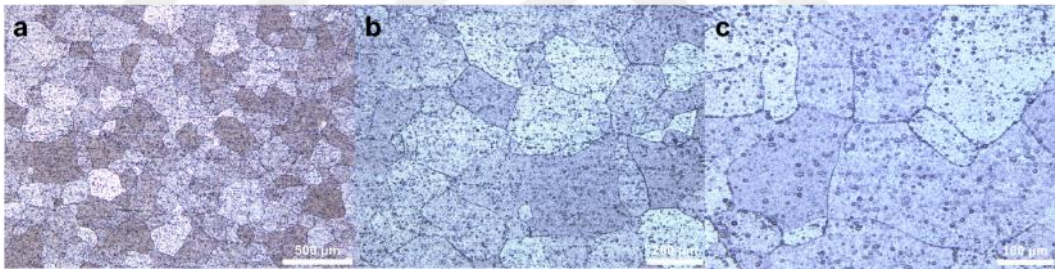
7. DENEY BULGULARININ TARTIŞILMASI

Ekstrüzyon metoduyla üretilen EN AW 6061 ve EN AW 6063 profillerden alınan numuneler mikroyapı incelemeleri (OM, SEM, EDS, XRD), sertlik ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

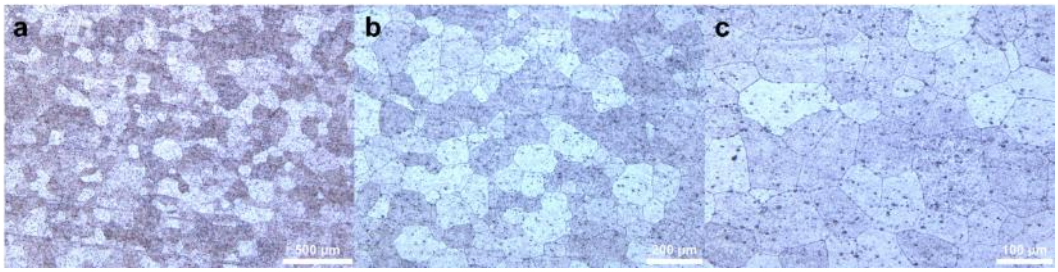
7.1 Mikroyapı İncelemeleri

7.1.1 OM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

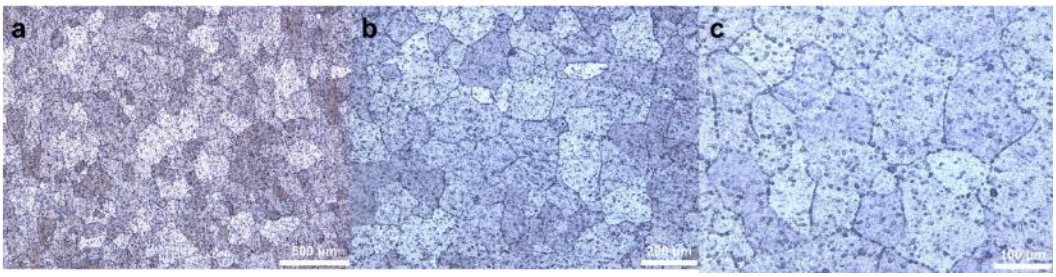
EN AW 6061 ve EN AW 6063 profillerden alınan numuneler öncelikle mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Sonuçların birbirini desteklemesi açısından üretilen malzemeler için hem OM, hem de SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. OM görüntüleri Şekil 6.1 – 6.18 arasında verilmiştir.



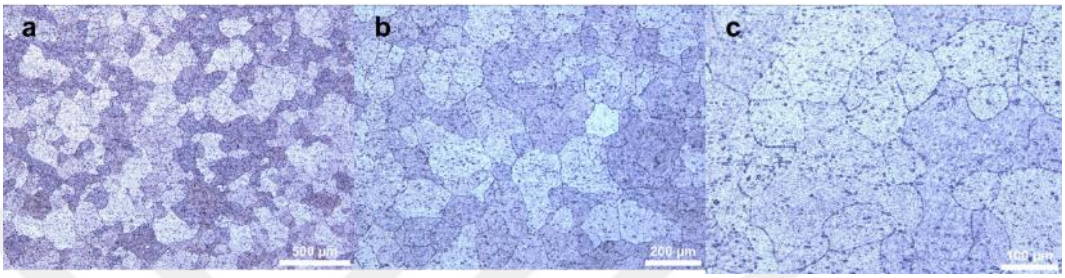
Şekil 7.1 1 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



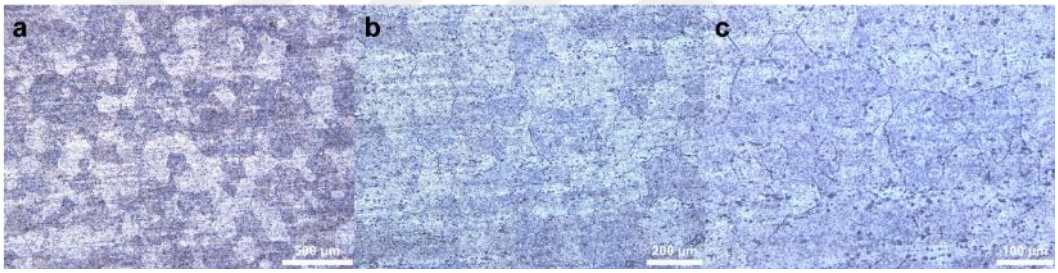
Şekil 7.2 2 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



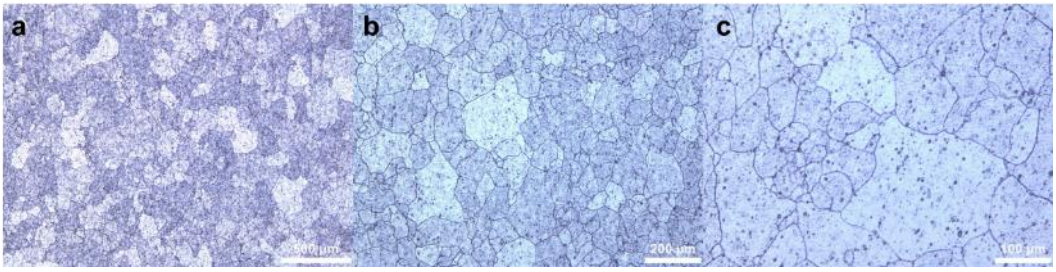
Şekil 7.3 3 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



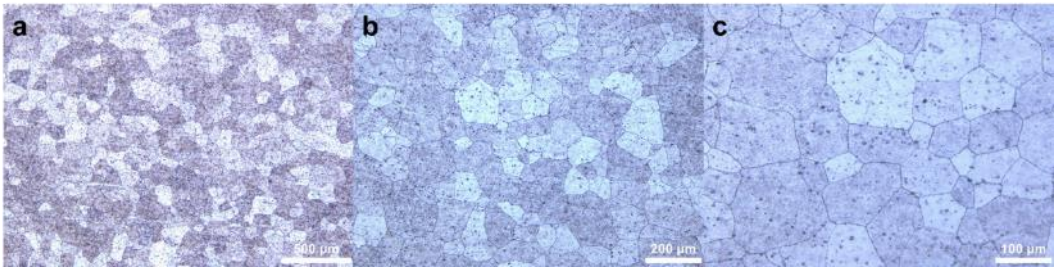
Şekil 7.4 4 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



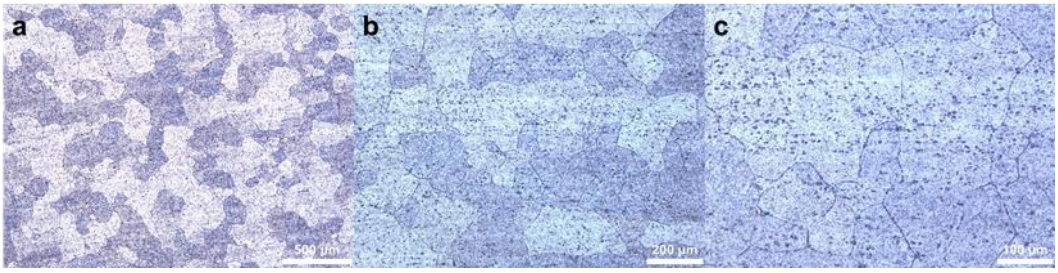
Şekil 7.5 5 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



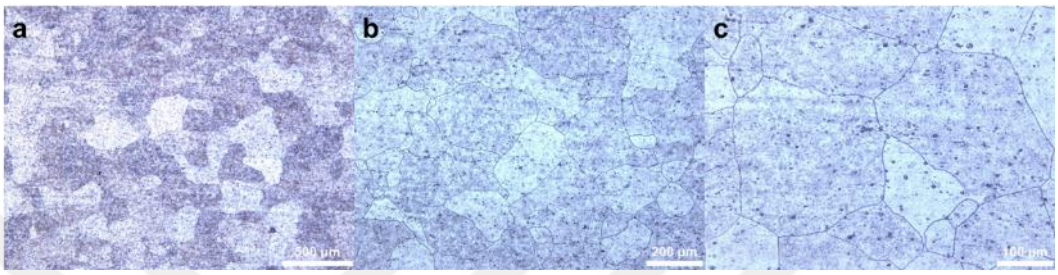
Şekil 7.6 6 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



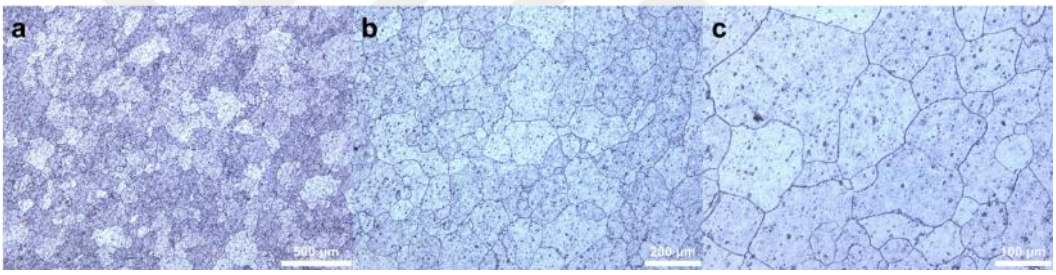
Şekil 7.7 7 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



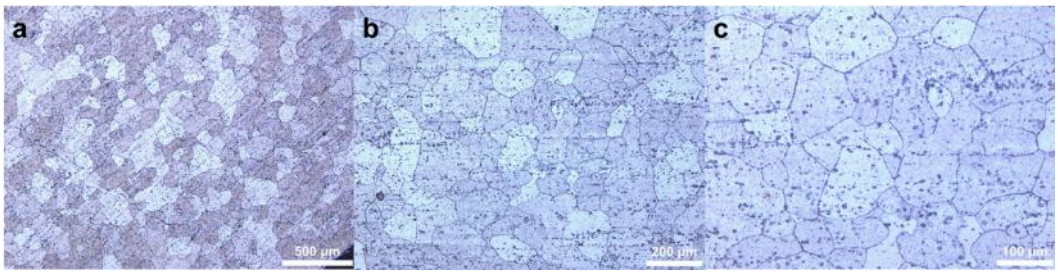
Şekil 7.8 8 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



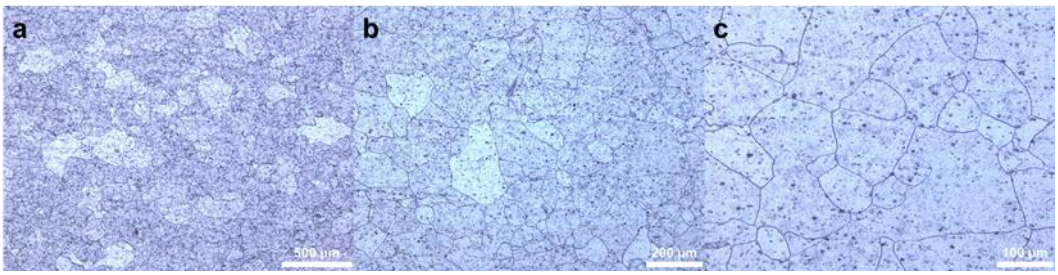
Şekil 7.9 9 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



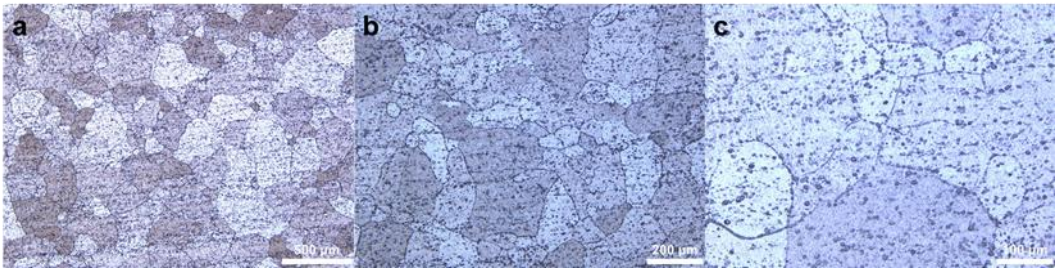
Şekil 7.10 10 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



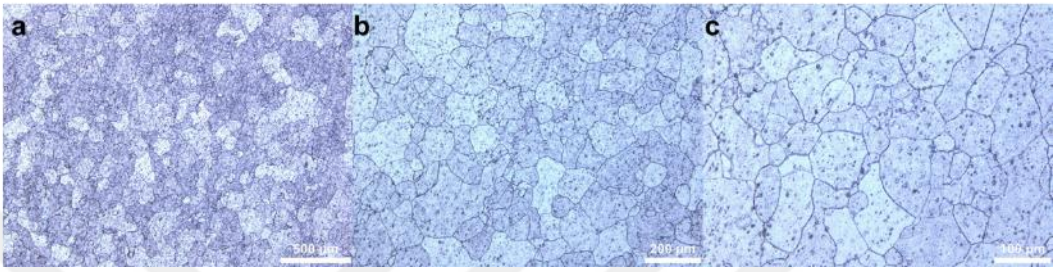
Şekil 7.11 11 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



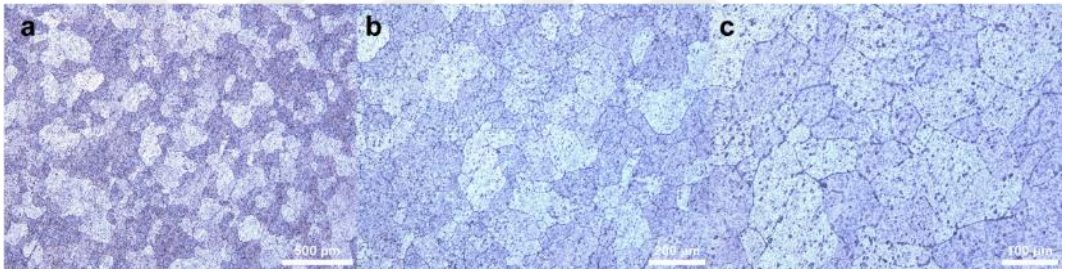
Şekil 7.12 12 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



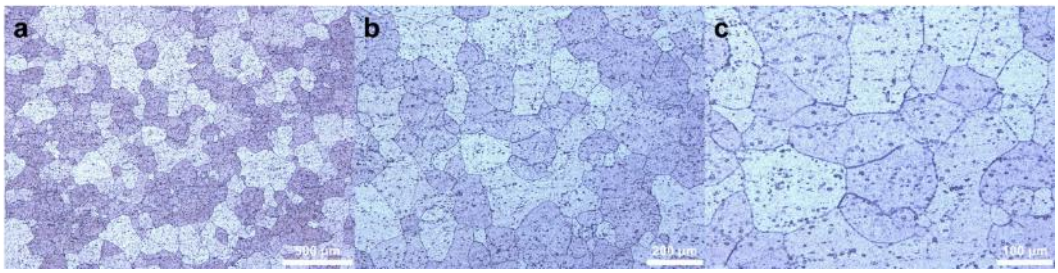
Şekil 7.13 13 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



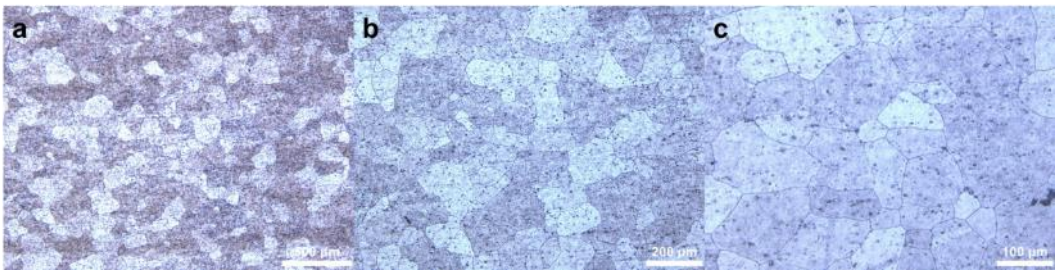
Şekil 7.14 14 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



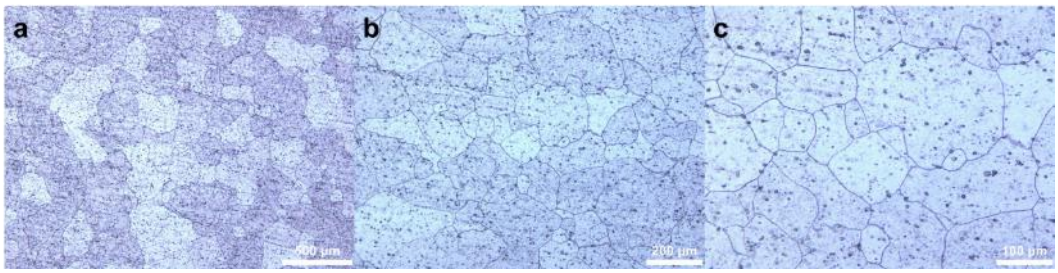
Şekil 7.15 15 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



Şekil 7.16 16 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)



Şekil 7.17 17 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)

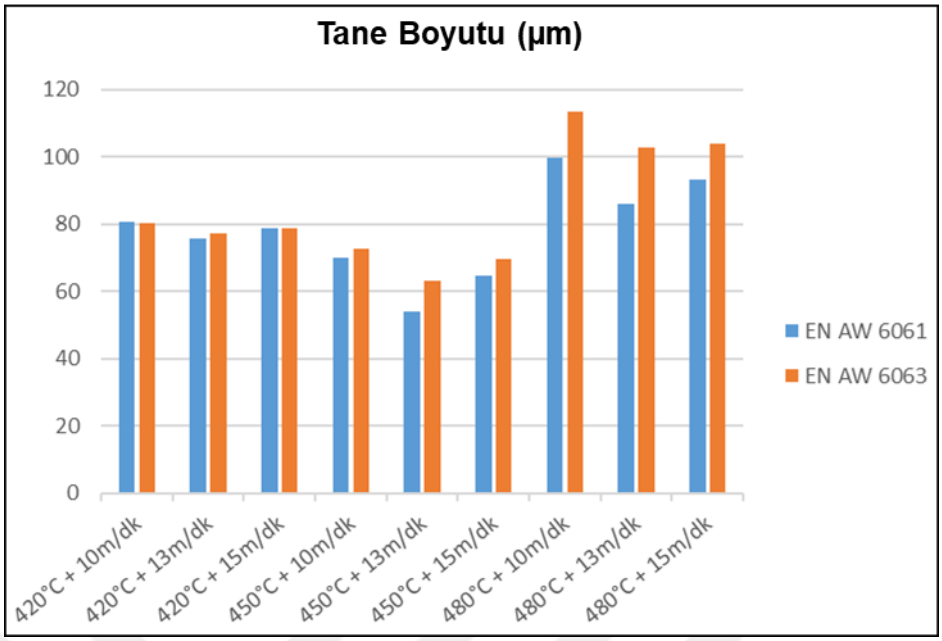


Şekil 7.18 18 numaralı numunenin OM görüntüleri (a.50x, b.100x, c.200x)

Optik mikroskop görüntülerinde mikroyapının genel olarak birbirine benzeyen eş eksenel tanelerden oluştuğu görülmüştür. Sıcaklık ve ekstrüzyon hızlarına bağlı olarak tane boyutunun da değişkenlik gösterdiği ayrıca tespit edilmiştir. Tane boyutundaki söz konusu değişimleri tespit etmek üzere optik mikroskop görüntüleri alınırken, mikroyapı görüntülerini desteklemesi açısından cihaz özelliğine uygun olarak numunelere ayrıca tane boyutu analizi de yapılmıştır. Numunelerin tane boyutlarını ortaya koyan analiz Tablo 7.1'de ve grafik olarak Şekil 7.19'da verilmiştir.

Tablo 7.1 OM görüntülerinden elde edilen tane boyutu analizi

Deney No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Ekstrüzyon Hızı (m/dk)	Tane Boyutu (µm)
1	EN AW 6061	420	10	80,71
2			13	75,54
3			15	78,5
4		450	10	70,06
5			13	53,76
6			15	64,54
7		480	10	99,8
8			13	85,98
9			15	93,3
10	EN AW 6063	420	10	80,12
11			13	77,01
12			15	78,66
13		450	10	72,77
14			13	62,96
15			15	69,72
16		480	10	113,36
17			13	102,66
18			15	103,82

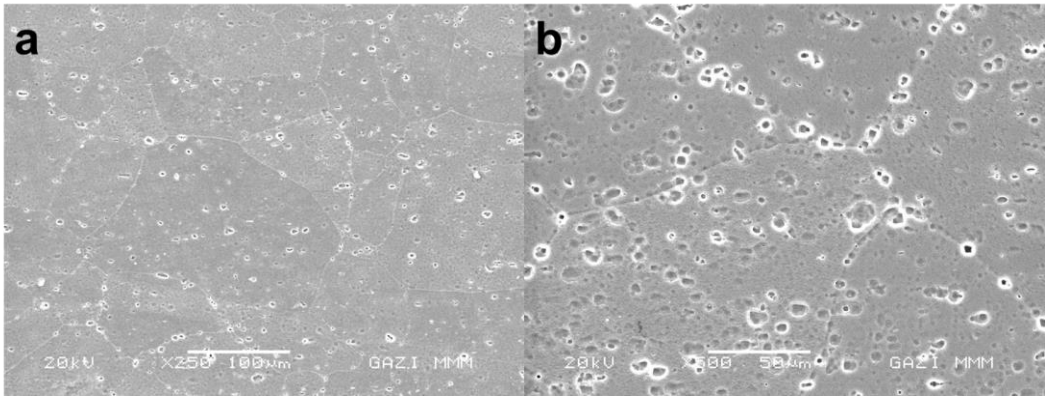


Şekil 7.19 Tane boyutu analizinin grafiksel gösterimi

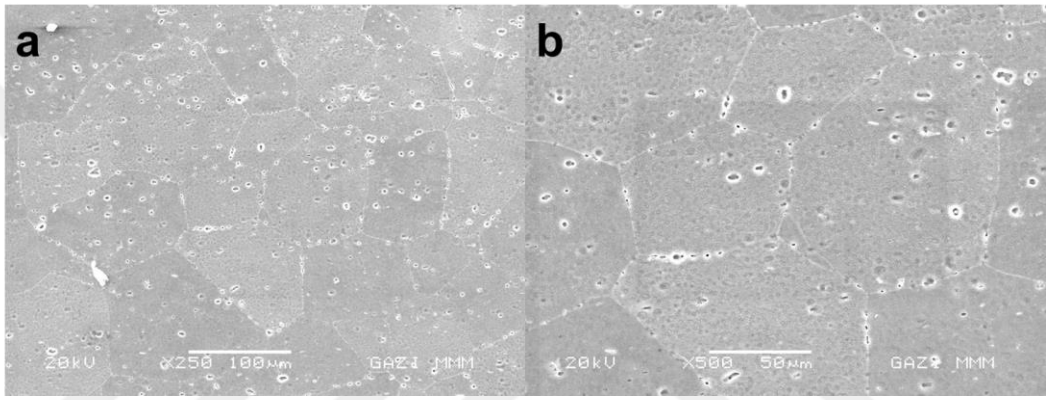
Tablo 7.1'de ve Şekil 7.19'da verilen tane boyutu analizleri değerlendirildiğinde; EN AW 6061 ve EN AW 6063 profil üretimlerinde en ince taneli mikroyapının 450°C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızlarında üretilen profiller olan 5 numaralı deney (53,96 µm) ve 14 numaralı deneyde (62,96 µm) olduğu raporlanmıştır. Sıcaklıklar mukayese edildiğinde en ince tane yapısının 450°C, en iri tane yapısının ise 480°C'de oluştuğu tespit edilmiştir. Daha düşük sıcaklık olan 420°C'de ise her iki sıcaklık değerinin arasında ortalama değerlerde taneler ölçülmüştür. Sıcaklık artmasına rağmen tane boyutundaki düşüş dinamik yeniden kristalleşme ile ilgilidir. Sıcaklık artmasına rağmen yüksek deformasyon ve çok sayıda çekirdeklenme sayesinde ince taneli yapılar oluşmuştur.

7.1.2 SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

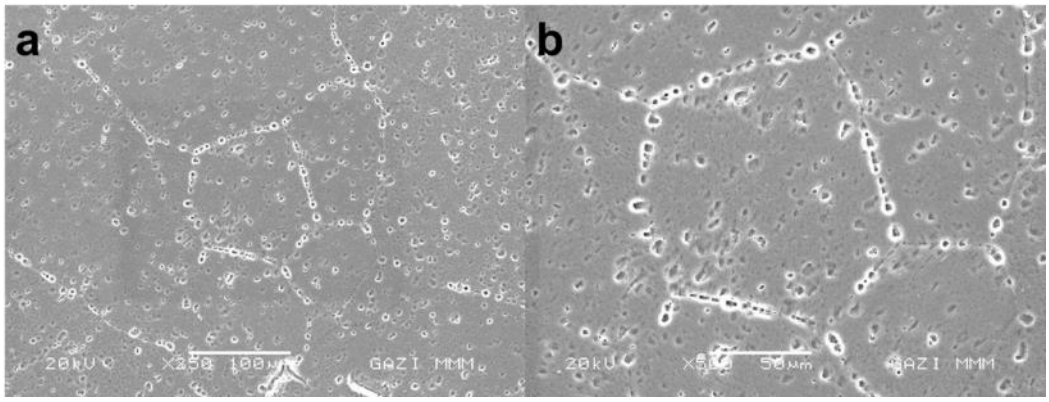
EN AW 6061 ve EN AW 6063 profillerden alınan numuneler uygulanan OM incelemeleri ve tane boyutu analizinden sonra elde edilen görüntü ve sonuçları desteklemesi açısından numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri Şekil 6.20 – 6.37 arasında verilmiştir.



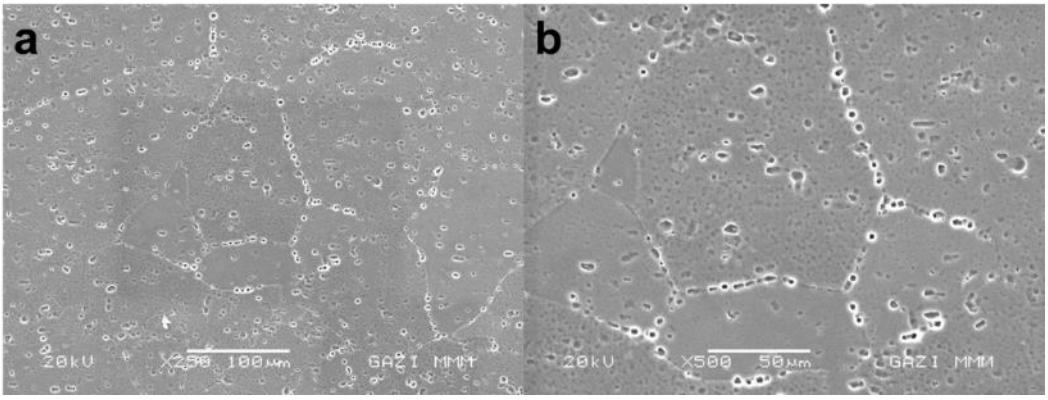
Şekil 7.20 1 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



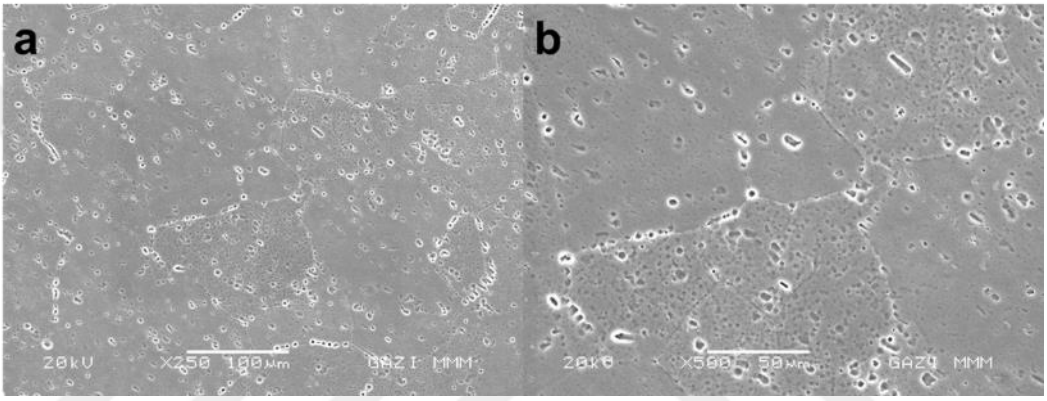
Şekil 7.21 2 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



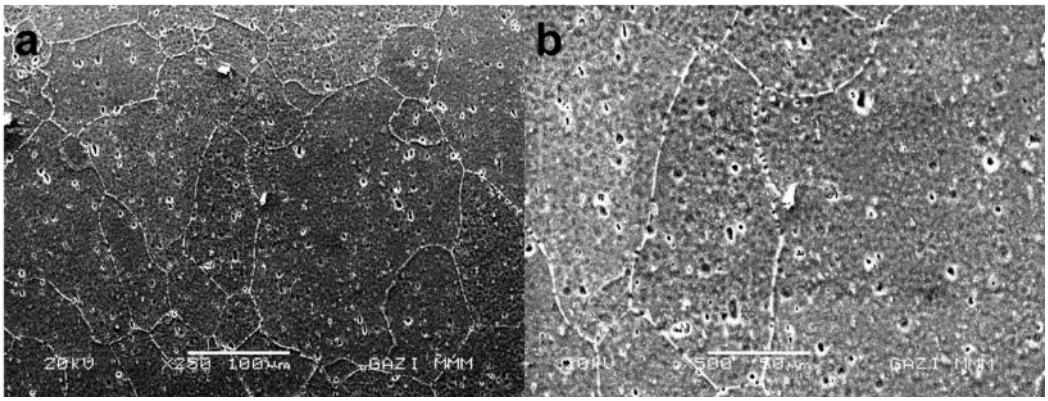
Şekil 7.22 3 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



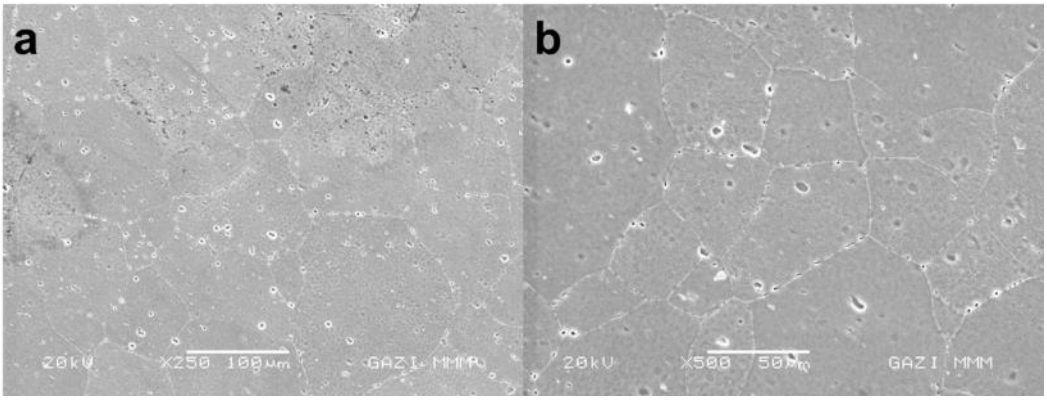
Şekil 7.23 4 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



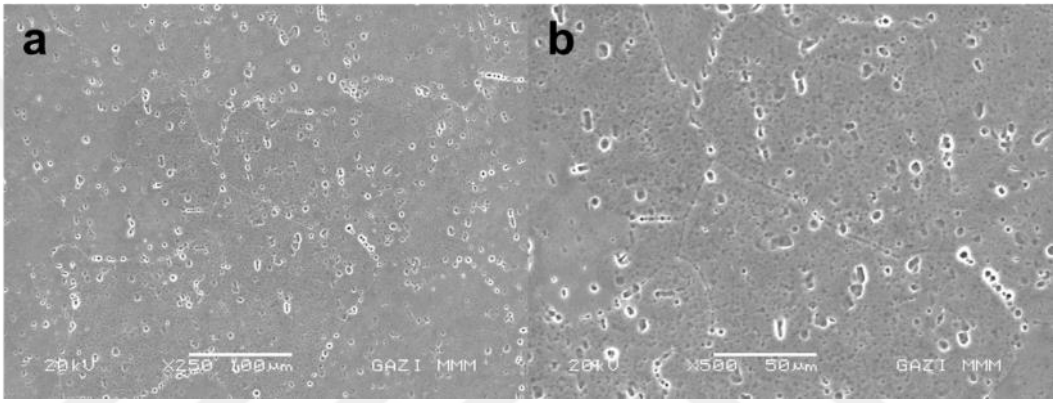
Şekil 7.24 5 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



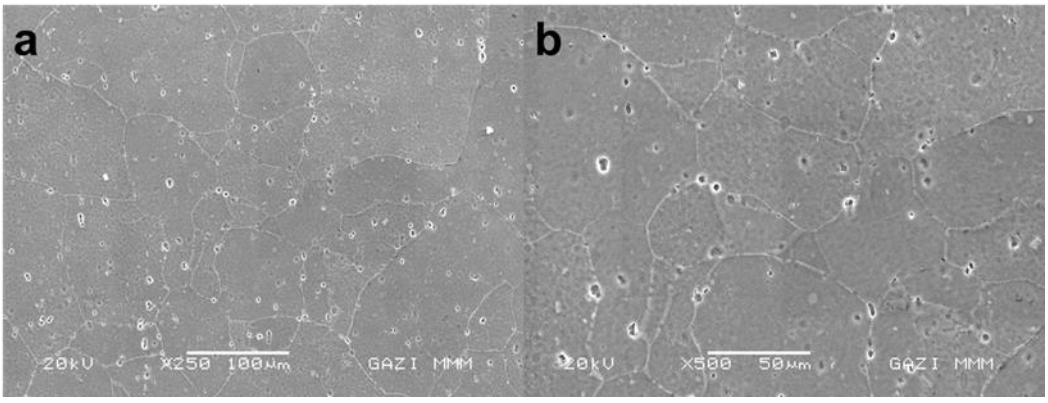
Şekil 7.25 6 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



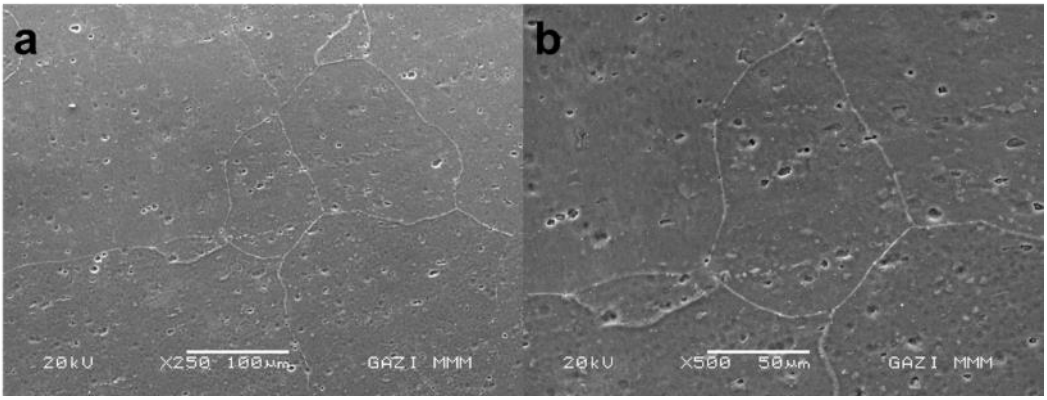
Şekil 7.26 7 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



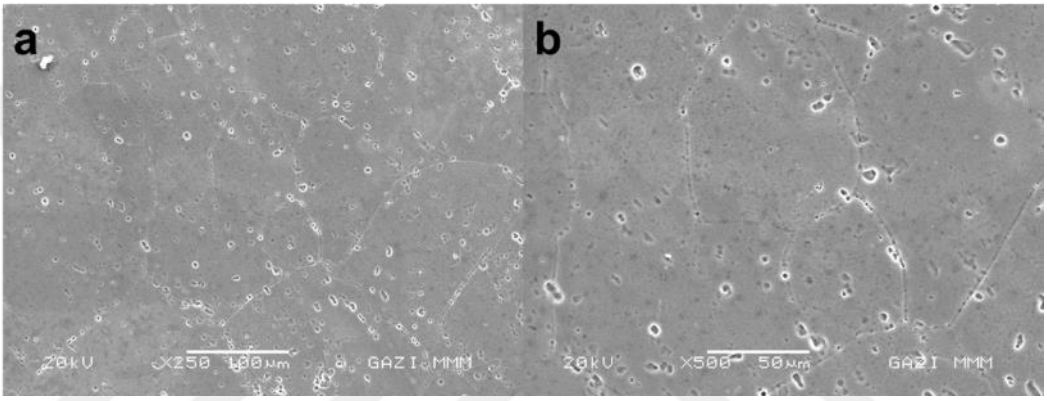
Şekil 7.27 8 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



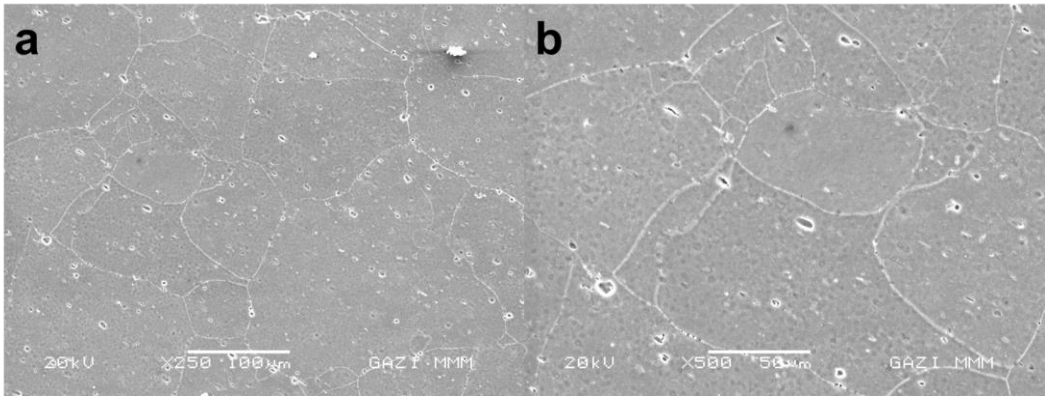
Şekil 7.28 9 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



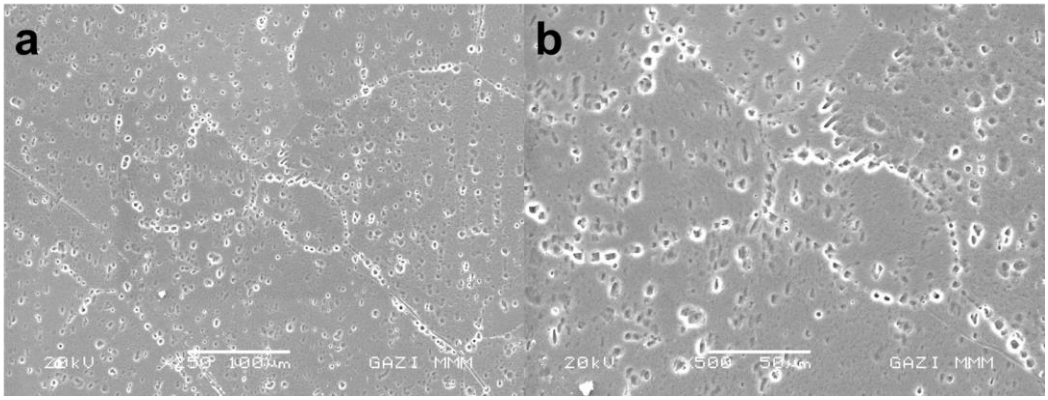
Şekil 7.29 10 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



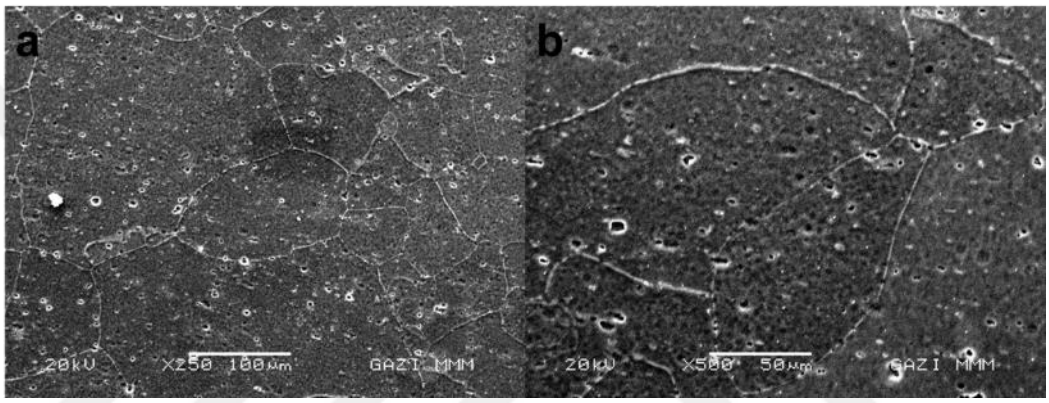
Şekil 7.30 11 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



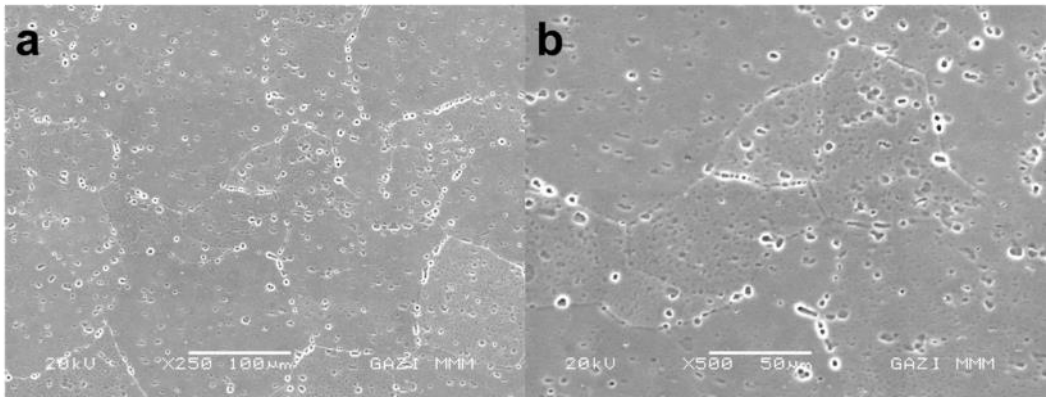
Şekil 7.31 12 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



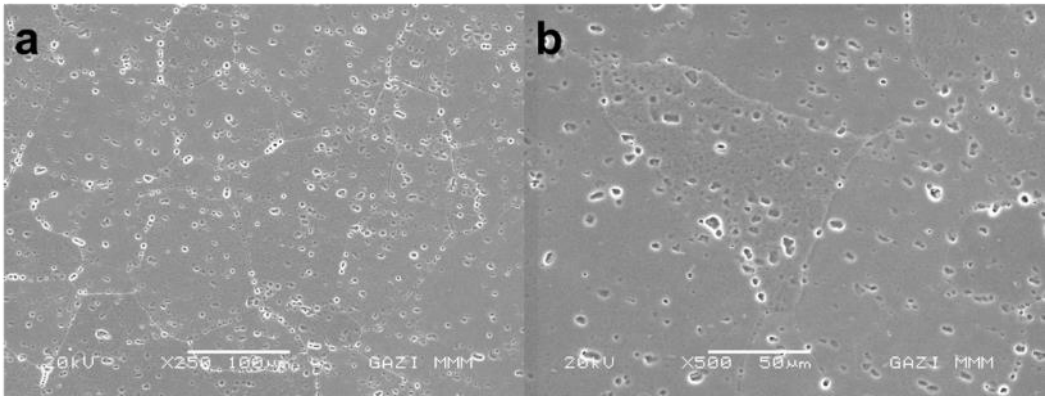
Şekil 7.32 13 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



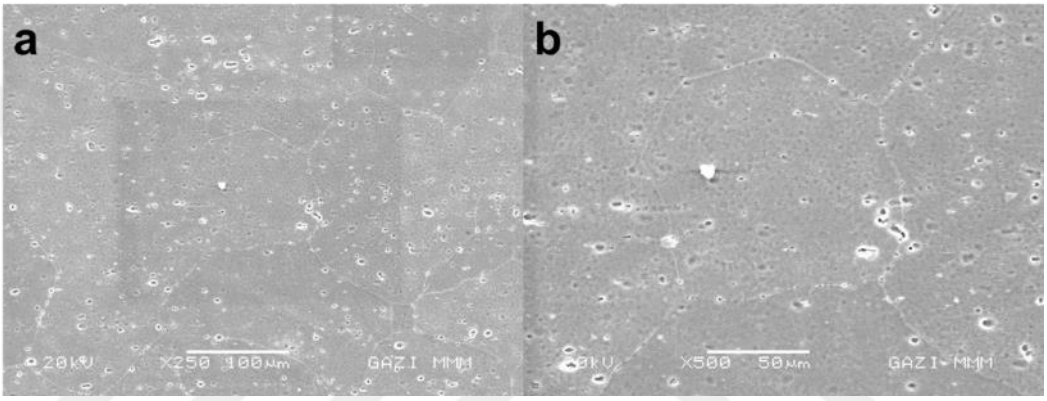
Şekil 7.33 14 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



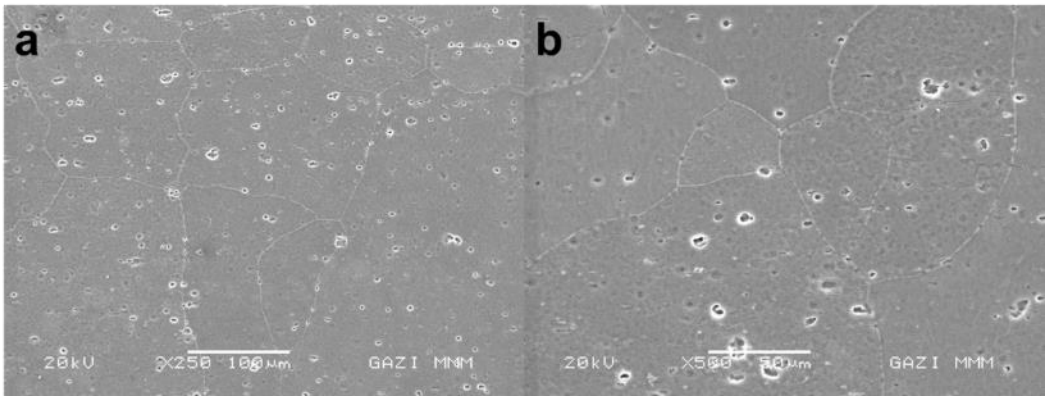
Şekil 7.34 15 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



Şekil 7.35 16 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



Şekil 7.36 17 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)



Şekil 7.37 18 numaralı numunenin SEM görüntüleri (a.250x, b.500x)

SEM görüntüleriyle elde edilen mikroyapıların OM görüntülerine benzerlik gösterdiği anlaşılmakta olup, taneler daha yüksek çözünürlük ve büyütmelerde elde edilmiştir. Genel olarak benzer görüntüler tespit edilmiş olup, büyük görüntüleme nedeniyle tane boyutları hakkında ayrıntılı yorumlar yapılamamıştır.

7.1.2.1 Mikroyapıların genel değerlendirmesi

OM ve SEM görüntülerinde sıcaklığın daha yüksek (480 °C), ekstrüzyon hızının ise daha yavaş olduğu (10 m/dk) uygulamalarda alüminyum kütüklerin daha çok sıcaklık ve ısıya maruz kalması nedeniyle daha iri tanelerin oluştuğu görülürken, nispeten düşük sıcaklık (420 °C) ve daha yüksek hızda (15 m/dk) gerçekleşen üretimlerde ortalama tane boyutlarının elde edildiği gözlemlenmiştir. Tane boyutunun en düşük olduğu deneylerin ise ortalama sıcaklık (450 °C) ve ortalama ekstrüzyon hızı (13 m/dk) değerlerinde oluştuğu görülmüştür. Tane boyutunun sıcaklık değerinin normal şartlarda en düşük sıcaklık değeri olan 420 °C ve en yüksek ekstrüzyon hızı olan 15 m/dk uygulamalarda en düşük değerleri alması beklenirken, nispeten daha yüksek sıcaklık değeri olan 450 °C ve daha düşük hız olan 13 m/dk hızlarda daha düşük değerlerin gözlemlenmesinde, uygulanan plastik deformasyon işlemi ve sıcaklığın birlikte neden olduğu dinamik yeniden kristalleşmenin etkili olduğu düşünülmektedir. Elde edilen OM ve SEM görüntüleri ile tane boyutu analizi ile tez çalışmasındaki malzemelerin dinamik yeniden kristalleşmesi için en elverişli sıcaklığın 450 °C, en elverişli ekstrüzyon hızının ise 13 m/dk olduğu ortaya çıkmıştır.

Yapı - işlem – özellik – performans döngüsünde, tane boyutu malzemelerin yapısal kararlılığını etkileyen önemli bir unsurdur. Uygulanan sıcaklık ve ekstrüzyon hızının neden olduğu işlem parametrelerindeki değişim, tane boyutunda değişime neden olmuş ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimler de kaçınılmaz olmuştur. Bu durum yine söz konusu döngüde malzemelerin performansını etkilemektedir. Tane boyutları azaldıkça malzemenin sertliği ve mukavemeti artarken, sünekliği azalmaktadır. Malzemenin sıcaklığı arttığında ise tane boyutları irileşirken sertlik ve mekanik mukavemette düşüş, süneklikte ise artışlar tespit edilir. Ekstrüzyon hızının artması malzemenin mukavemetli olmasını arttırır fakat sünekliği düşürür. Düşük sıcaklıkta deformasyonu deformasyon sertleşmesi etkilemektedir fakat yüksek sıcaklıklarda ise deformasyondaki hız daha etkili olmaktadır. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, 10 m/dk'da gerçekleşen üretimlerde tane irileşmesi, 15 m/dk'da gerçekleşen üretimlerde düzenli tane yapıları, 13 m/dk'da gerçekleşen üretimlerde ise dinamik yeniden kristalleşme için yeterli şartların oluşması sebebiyle tanecik yapısının daha küçük olduğu düşünülmektedir.

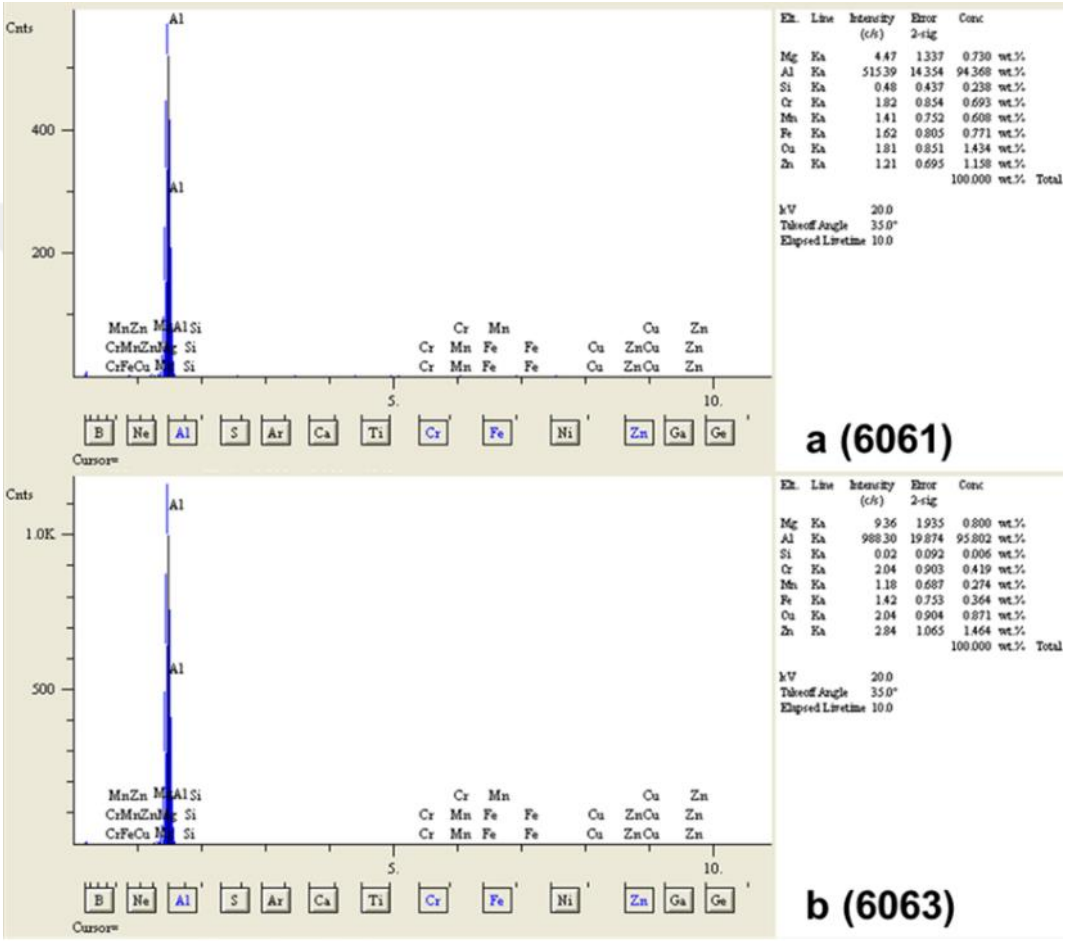
Deformasyon esnasında meydana gelen yeniden kristalleşme, durağan haldeki ya da statik yeniden kristalleşmeden farklıdır. Dinamik yeniden kristalleşme düşük ve orta istif hatası bulunan YMK yapılı metal ve alaşımlarda sıcak deformasyon esnasında meydana gelmektedir. Ekstrüzyon yüksek deformasyonun uygulandığı yöntemlerden birisi olup, sıcak deformasyon sınırlarında oluşması kaçınılmazdır. Ekstrüzyon esnasında mevcut tanelerin enerjileri artar ve yeniden kristalleşme çekirdeklenmeleri için gerekli potansiyele ulaşır. Dinamik yeniden kristalleşmede çekirdeklenmeler genellikle tane sınırlarında oluşmaya başlar ve devam eder. Tane sınırlarında büyüyen çekirdeklerde deformasyonla birlikte dislokasyon yoğunluğu da artar. Bu nedenle taneler çok irileşmeye fırsat bulamadan belirli bir boyuta ulaşır ve daha fazla çekirdeklenmeyle birlikte dinamik yeniden kristalleşme olayı bu şekilde devam eder. Dinamik yeniden kristalleşme artan deformasyon oranlarıyla birlikte, statik yeniden kristalleşmeye nazaran çok daha hızlı bir şekilde yayılmaya devam eder. Çünkü yeniden kristalleşmede sürekli tane büyümesi vardır. Dinamik yeniden kristalleşmede ise tane büyümesi bir boyuta ulaşır ve daha ince taneler şeklinde çekirdeklenmeler devam eder (Yıldırım, 2001).

6061 alaşımlarından üretimi yapılan numunelerin mikroyapıları incelendiğinde sıcaklık ve hız arttıkça tane yapısı iri tanelerden daha düzenli ufak tanelere doğru ilerlemektedir. Sıcaklığın ve hız parametrelerinin düşük olduğu numunelerde profiller uygun çıkış sıcaklıklarına ulaşamadığı ve ani soğumaya maruz kaldıkları için tane yapısı irili ufaklı geçişlerle sağlanmıştır. Buna rağmen herhangi bir homojenliği bozan çatlak tespit edilmemektedir. Tane yapısının rijitliği açısından bu çalışmada en ideal hız ve sıcaklık 450°C ve 13 m/dk parametrelerinden gerçekleşen imalatlarda olduğu görülmektedir. Ekstrüzyon esnasında profilin çıkışında sürtünmeden oluşan sıcaklık değerleri arttıkça soğutma hızının arttırılması düzenli tanecik yapısını sağlamakta bu sebeple herhangi bir soğutma ekipmanı kullanmadan yapılacak olan imalatlarda tanecik yapısının düzeni açısından çok yüksek sıcaklıkta hammadde tercih edilmemelidir.

EN AW 6061 ve EN AW 6063 malzemelerin tane boyutları mukayese edildiğinde ise görüntü ve analizlerden her iki malzemenin tane boyutları arasında dikkat çekici farklılıkların da olmadığı tespit edilmiştir.

7.1.3 EDS İncelemeleri

Bu çalışmada kullanılan iki farklı alaşım türü olan EN AW 6063 ve EN AW 6061 alaşımlarına SEM incelemeleriyle birlikte EDS analizleri uygulanmıştır. Aynı kimyasal spektruma sahip olması nedeniyle iki numune üzerinden analiz yapılması uygun görülmüş olup, grafikler Şekil 7.38'de verilmiştir.



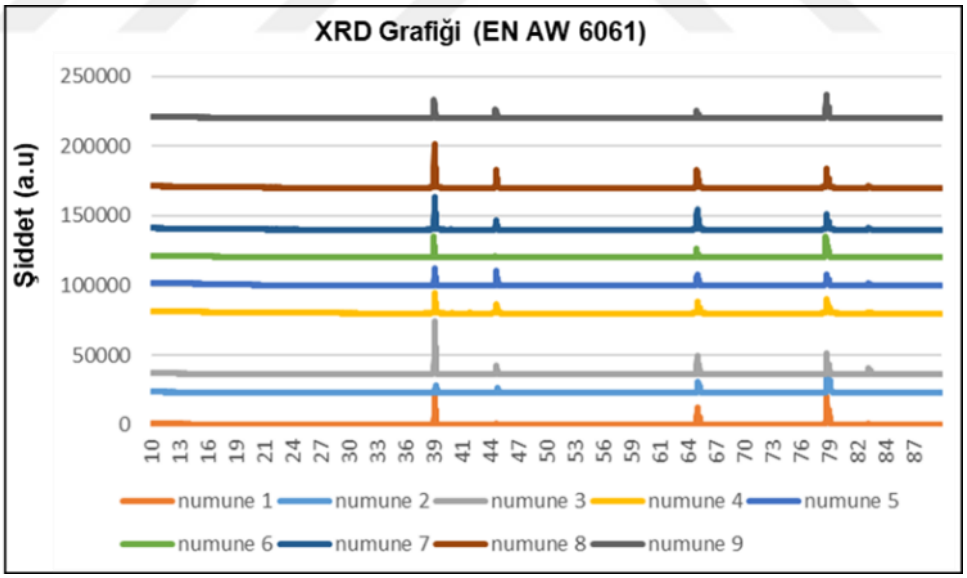
Şekil 7.38 Numunelerin EDS analizleri

EDS ölçüm sonuçları incelendiğinde EN AW 6061 alaşımının içerisinde bulunan silisyum, demir, bakır, manganez oranlarının EN AW 6063 alaşımındaki oranlardan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüze edilmiş profillerden alınan numunelerin EDS incelemeleri ile dökümü yapılan malzemenin spektrometre analizleri birbiriyle uyuşmaktadır. 6061 alaşımının içerisinde yer alan alaşım elementleri ve oranlarının yüksek olması nedeniyle mukavemet ve sertlik ölçümleri kapsamında 6063 alaşımına kıyasla yüksek sonuçlar elde edilmesi hususu ilerleyen aşamalarda anlatılacaktır.

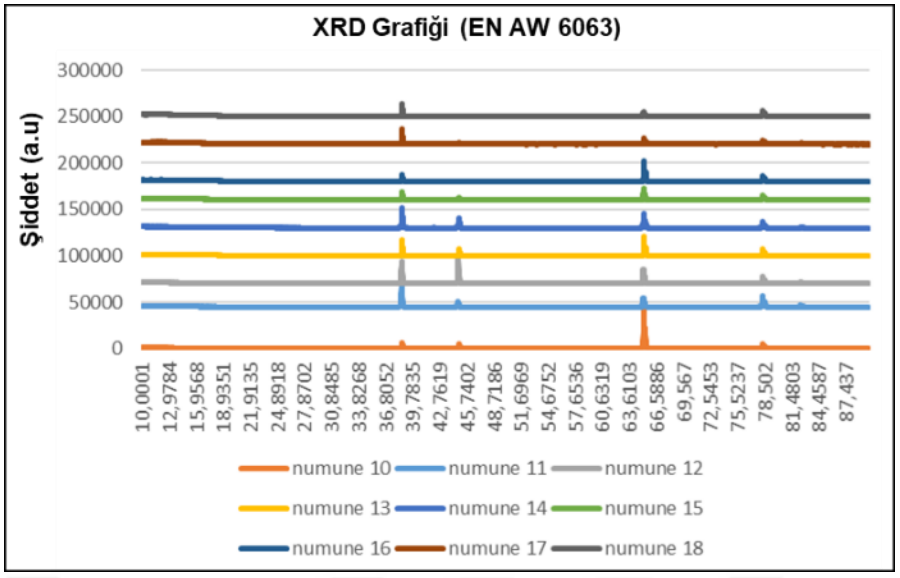
Özellikle silisyum, demir, bakır ve manganez içeriği, bu farklılığın oluşmasında temel alaşım elementleridir. Demir içeriği tane boyutunda küçültme oranını arttırarak mekanik ve mukavemet özellikleri arttırıcı yönde etki etmektedir. Silisyum tane boyutunu küçültür ve mekanik özelliklere olumlu katkı verir. Bakır alüminyuma mukavemet ve sertlik sağlamaktayken yüksek sıcaklıklara hızlı ulaşma kabiliyeti ile ekstrüze edilirken de alaşımlara kolaylık sağlamaktadır. Manganez ise çekme mukavemetini arttırmakta birlikte malzemenin rekristalizasyon sıcaklığını yükseltmektedir. Deney sonuçlarında ortaya çıkan veriler literatürü doğrular niteliktedir.

7.2 XRD Analizleri

İmalat sonrasında oluşan yapılar ve yönlenmeler hakkında bilgi edinmek için numunelere X- ışını difraksiyonu (XRD) incelemeleri yapılmıştır. Numunelerden alınan XRD verileri ışığında oluşturulan grafikler sırasıyla Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'da verilmiştir.



Şekil 7.39 EN AW 6061 numunelerin XRD grafiği



Şekil 7.40 EN AW 6063 numunelerin XRD grafiği

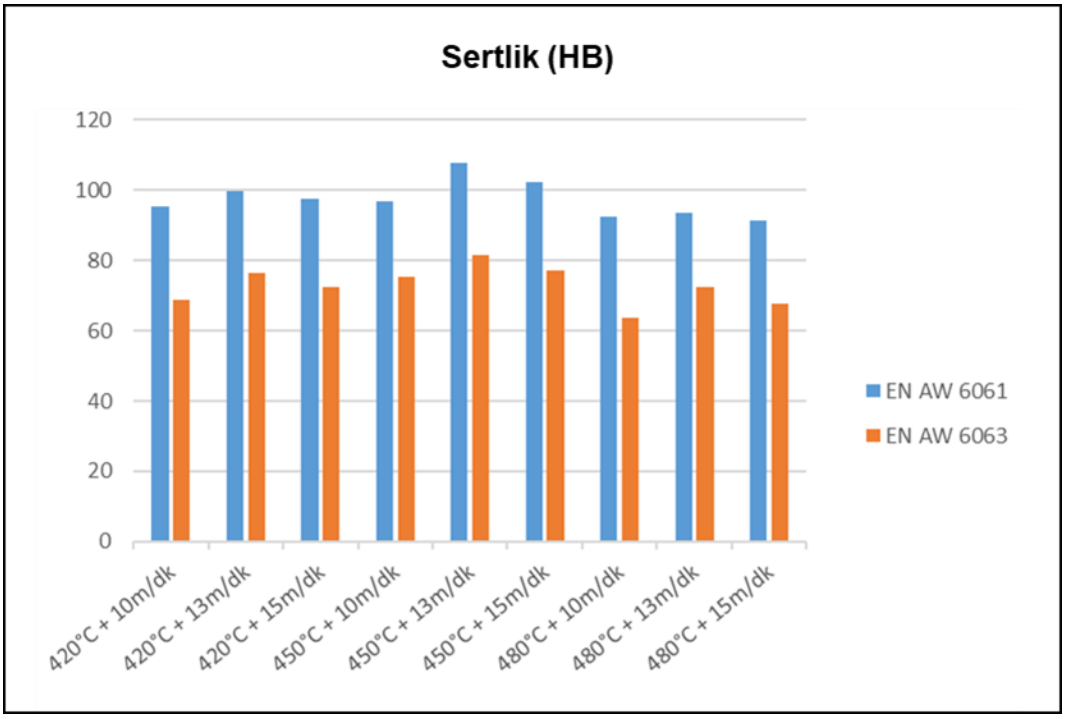
XRD analizleri sonucunda hem EN AW 6061, hem de EN AW 6063 alaşımında oluşan piklerin yaklaşık aynı açı değerlerinde, alaşımların sahip olduğu içeriklere uygun olarak farklı şiddet değerlerinde oluştuğu görülmüştür. Analizlerde farklı faz ve bileşik oluşumlarının olmadığı gözlemlenmiştir.

7.3 Sertlik Testlerinin Değerlendirmesi

Sertlik deneyi, bir malzemenin plastik deformasyona karşı direncini belirlemek amacıyla yapılan bir test yöntemidir. Bu deneyde, numunelerin makrosertlik değerleri Brinell metoduyla gerçekleştirilmiştir. Numunelere 31,25 kg ağırlığında bir yük uygulanarak gerçekleştirilen ölçümlerde 2,5 mm çapında batıcı uç kullanılmıştır. Her numuneye sabit uygulanan yük, belirli bir süre boyunca sabit tutularak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Yük uygulandıktan sonra, numunenin yüzeyinde oluşan izin çapı hesaplanarak Brinell sertlik okuyucusu tarafından sertlik değerleri cihaz tarafından otomatik hesaplanmıştır. veya mikroskop aracılığıyla görüntülendi. Her numune için beş ayrı noktadadan ölçümler gerçekleştirilmiştir. EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımlarından alınan numunelere gerçekleştirilen sertlik sonuçları “HBW” biriminden Tablo 7.2’de ve grafik olarak Şekil 7.41’de verilmiştir.

Tablo 7.2 Sertlik testi sonuçları (HBW)

Deney No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Ekstrüzyon Hızı (m/dk)	Ortalama Sertlik (HBW)
1	EN AW 6061	420	10	95,2
2			13	99,7
3			15	97,4
4		450	10	96,9
5			13	107,7
6			15	102,4
7		480	10	92,6
8			13	93,4
9			15	91,4
10	EN AW 6063	420	10	68,9
11			13	76,5
12			15	72,4
13		450	10	75,2
14			13	81,4
15			15	77,1
16		480	10	63,7
17			13	72,4
18			15	67,7



Şekil 7.41 Sertlik grafiği

Tablo 7.1 ve Şekil 7.41'de verilen sertlik sonuçları alaşım bazlı EN AW 6061 T6 profillerden başlayarak incelendiğinde en yüksek sertlik değeri 107,7 HB ile 5 numaralı numunede (450°C sıcaklık, 13 m/dk hız) görülmüştür. En düşük sertlik değeri ise bu grupta 9 numaralı numunede (480°C sıcaklık, 15 m/dk hız) 91,4 HB ile ölçülmüştür. TS EN 755-2 alüminyum ve alüminyum alaşımlarından imal edilmiş profillerin mekanik özelliklerini içeren standartta 6061 alaşım ile üretilen ve yapay yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış olan yani T6 ısıl işlem formundaki ekstrüzyon profillerinde aranması gereken sertlik şartı minimum 95 HB'dir. Ekstrüzyon hızı ve hammadde sıcaklığı yükseldikçe çıkış sıcaklığı buna paralel olarak yükselmiş, soğuma hızı dakikada 95°C olarak ölçümlenmiştir. Yapay yaşlandırma sonrası sertlik değerlerinde bu parametrelere oranla doğru orantılı bir artış gözlemlenmiştir. Sertlik tablosu ve grafiği incelendiğinde; standartta belirtilen bu şart, 420 °C ve 450 °C sıcaklıklarda sağlanmış, fakat 480 °C için gerçekleştirilen ölçümlerde çok küçük farklar olsa dahi bu şarttan daha düşük değerlerde sertlik değerleri elde edilmiştir. Buradan 420 °C ve 450 °C sıcaklıkların tüm ekstrüzyon hızlarında üretimler için uygun olduğu belirlenirken, 480 °C sıcaklığın tüm ekstrüzyon hızlarında profil üretimleri için uygun olmadığı kanaatine varılmıştır.

EN AW 6063 T6 profillerden alınan sertlik sonuçları incelendiğinde ise en yüksek sertlik değeri 14 numaralı numunede (450 °C sıcaklık, 13m/dk hız) 81,4 HB olarak tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise 16 numaralı numunede (480°C sıcaklık, 10 m/dk hız) 63,7 HB olarak ölçülmüştür. TS EN 755-2 alüminyum ve alüminyum alaşımlarından imal edilmiş profillerin mekanik özelliklerini içeren standartta 6063 alaşım ile üretilen ve yapay yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış olan T6 ısıl işlemli ekstrüzyon profillerinde aranması gereken minimum sertlik şartı 75 HB olarak belirtilmiştir. Sertlik tablosu ve grafiği incelendiğinde; 6063 alaşıma sahip profillerde standardı sağlayamayan numuneler olduğu gözlemlenmiştir. Deneylerde 10, 12, 16,17 ve 18 numaralı deneylerden elde edilen ölçümlerde söz konusu sınır şartın altında kalan ölçümler elde edilmiştir. Sınır şartı sağlayan deneyler ise 11, 13, 14 ve 15 numaralı deneylerdir. Söz konusu deneylerde 450 °C'de gerçekleşen tüm üretimlerde sınır şartın üzerinde sertlik değerleri elde edilmiştir. 420 °C'de 13 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleşen deneyde de yine sınır şartın çok az üzerinde bir değer elde edilmiş ve şart sağlanmıştır. Sertlik testlerinden elde edilen sonuçlar mikroyapı sonuçlarıyla

eşleştirildiğinde 450 °C sıcaklığın üretimler için en uygun sonuçları verdiği görülmüştür. Ekstrüzyon hızlarında ise tane boyutu analizinde olduğu gibi optimum sonuçların 13 m/dk hızda gerçekleştirilen üretimlerde olduğu anlaşılmıştır.

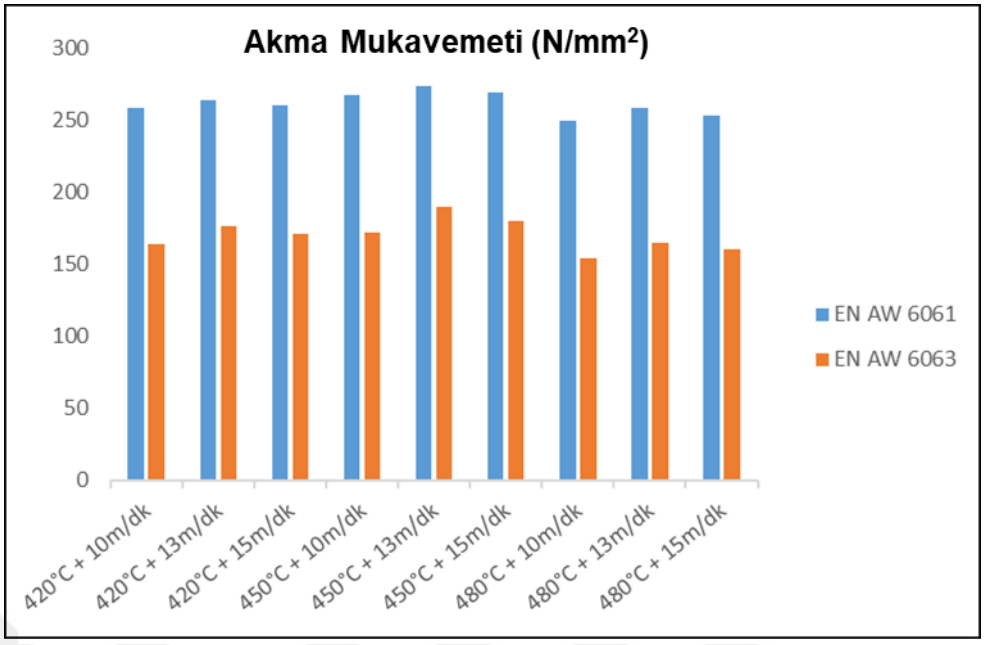
7.4 Çekme Testlerinin Değerlendirilmesi

Üretilen profillerden elde edilen numunelerin çekme deneyine ait akma dayanımı değerleri, maksimum çekme dayanımı ve % uzama değerleri Tablo 7.3 ve Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'te verilmiştir.

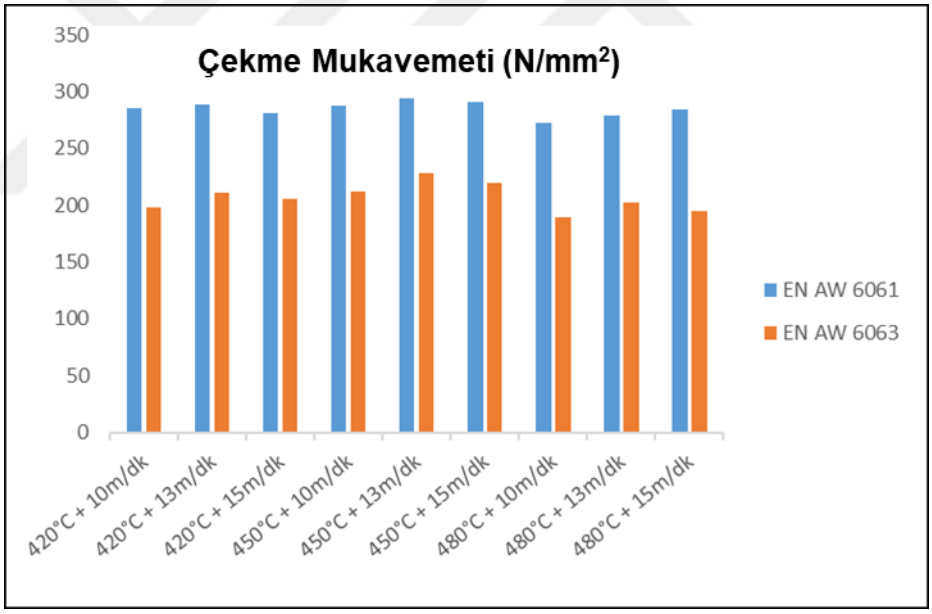
Çekme deneyleri sonrasında elde edilen verilerin incelenmesinde ve mukayesesinde TS EN 755-2 alüminyum ve alüminyum alaşımlarından imal edilmiş profillerin mekanik özelliklerini içeren standart baz alınmıştır. EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımlarla, farklı hız ve sıcaklık parametrelerinde üretilen 18 farklı numunenin çekme testleri sonucunda kopma bölgeleri çekme numunelerinin genellikle orta noktasında oluşmuştur.

Tablo 7.3 Çekme testi sonuçları

Deney No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Ekstrüzyon Hızı (m/dk)	Akma Mukavemeti (N/mm^2)	Çekme Mukavemeti (N/mm^2)	Uzama (%)
1	EN AW 6061	420	10	258,323	285,734	9,30
2			13	263,799	288,316	9,82
3			15	260,858	281, 347	10,08
4		450	10	268,117	287,934	10,70
5			13	274,362	293, 637	9,28
6			15	269,740	291,348	8,34
7		480	10	249,744	272,766	11,92
8			13	259,023	279,094	11,04
9			15	253,797	284,532	10,36
10	EN AW 6063	420	10	164,011	198,320	12,05
11			13	176,765	210,989	10,79
12			15	170,951	205,722	9,65
13		450	10	172,227	216,099	13,02
14			13	189,915	228,035	11,80
15			15	180,015	219,931	11,36
16		480	10	154,656	189,921	13,72
17			13	165,015	202,041	11,33
18			15	160,141	195,034	10,15



Şekil 7.42 Akma mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 7.43 Çekme mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi

Çekme deneyleri sonucunda; T6 ısıl işlemli üretimi sağlanan numunelerin aynı ekstrüzyon hızı ve sıcaklık değerlerindeki mukayesesinde EN AW 6061 alaşımının daha yüksek mukavemet sergilediği, EN AW 6063 alaşımının ise nispeten daha düşük mukavemet sergilediği tespit edilmiştir. Hammadde kimyasal spektrum analizi ve EDS analizinde tespit edildiği üzere alaşımların sahip olduğu alaşım elementleri ve içerik oranlarının bu farkta etkili olduğu düşünülmektedir.

EN AW 6061 alaşımı için gerçekleştirilen çekme deneylerinde en yüksek mukavemet değerleri 450 °C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 5 numaralı deneyde ölçülürken (Akma mukavemeti: 274 N/mm^2, Çekme mukavemeti: 294 N/mm^2), en düşük mukavemet değerleri 480 °C sıcaklık ve 10 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 7 numaralı deneyde (Akma mukavemeti: 250 N/mm^2, Çekme mukavemeti: 273 N/mm^2), ölçülmüştür.

EN AW 6063 alaşımı için gerçekleştirilen çekme deneylerinde ise; en yüksek mukavemet değerleri EN AW 6061 alaşımında olduğu gibi, 450 °C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 14 numaralı deneyde ölçülürken (Akma mukavemeti: 190 N/mm^2, Çekme mukavemeti: 228 N/mm^2), en düşük mukavemet değerleri yine EN AW 6061 alaşımında olduğu gibi, 480 °C sıcaklık ve 10 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 16 numaralı deneyde (Akma mukavemeti: 155 N/mm^2, Çekme mukavemeti: 190 N/mm^2) olduğu raporlanmıştır. % uzama değerleri EN AW 6061 alaşımında %8-12 arasında değerler görülürken, EN AW 6063 alaşımında %9-14 arasında uzama değerleri görülmüştür. EN AW 6063 alaşımında % uzama değerlerinin daha yüksek çıkmasında alaşım içeriğinin etkisi olduğu düşünülmektedir.

Çekme deneyi sonuçlarında, sertlik sonuçlarında olduğu gibi mukavemet değerlerinde de sonuçların birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmüştür. Her iki alaşımda en yüksek sonuçların görüldüğü 450 °C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızı parametrelerinde dinamik yeniden kristalleşmenin de etkisiyle daha mukavemetli sonuçlar elde edilmiştir.

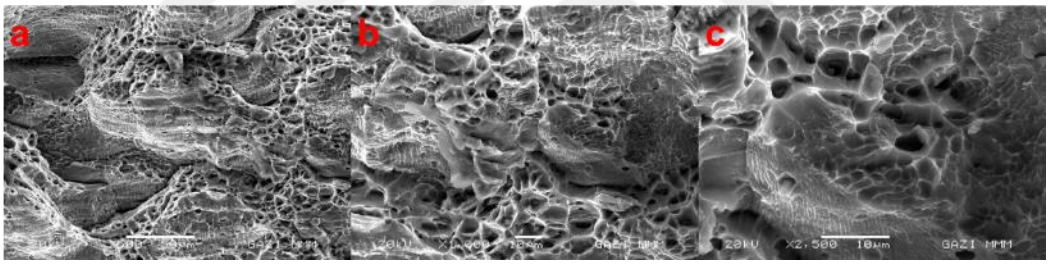
Çekme deneyi sonuçlarından elde edilen verilere göre EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımlarla üretilen profillerde sıcaklık arttıkça dayanımın artış göstermesi malzemenin plastik deformasyona uğrayıp, rekristalizasyon sonrası mukavemet davranışının arttığını göstermiştir.

TS EN 755-2 standardına uygun olarak T6 ısıl işlemi uygulanmış EN AW 6061 alaşımlarının çekme testleri için minimum sınır şartı, akma mukavemeti için 240 MPa, çekme mukavemeti için 260 MPa, % uzama değerleri için ise minimum %6 olarak

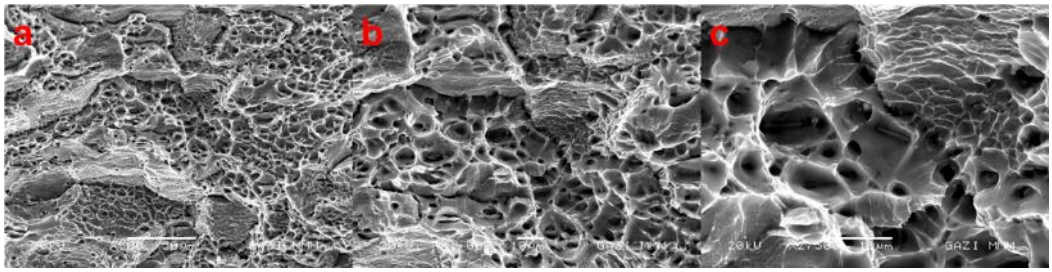
belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında tüm üretimlerin sınır şartları taşıdığı görülmüştür. Yine standarda uygun olarak T6 ısıl işlemi uygulanmış EN AW 6063 alaşımlarının çekme testleri için minimum sınır şartı, akma mukavemeti için 170 MPa, çekme mukavemeti için 215 MPa, % uzama değerleri için ise minimum %8 olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında söz konusu malzeme için 450 °C sıcaklıkta gerçekleşen üretimlerin sınır şartları taşıdığı, diğer üretimlerde ise sınır şartlarda belirlenen mukavemet değerlerine erişilemediği görülmüştür.

7.4.1 Çekme Testi Kırılma Yüzeylerinin İncelemeleri

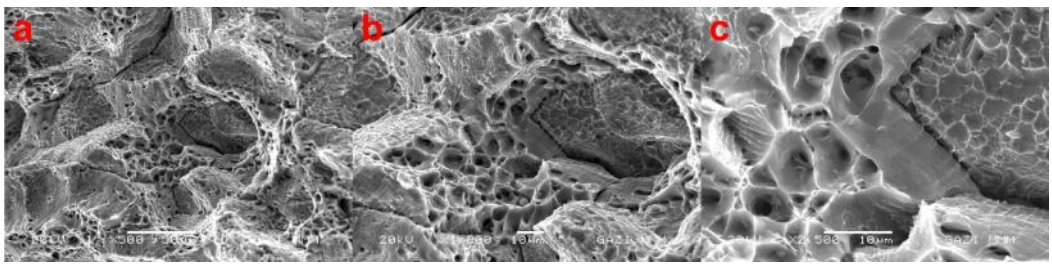
Çekme testleri sonrasında numunelerin kopma yüzeylerine kırılma çeşidini belirlemek üzere kırılma yüzeyi SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerden alınan SEM görüntüleri deney sıralamasına uygun olarak Şekil 7.44 – Şekil 7.61 arasında verilmiştir.



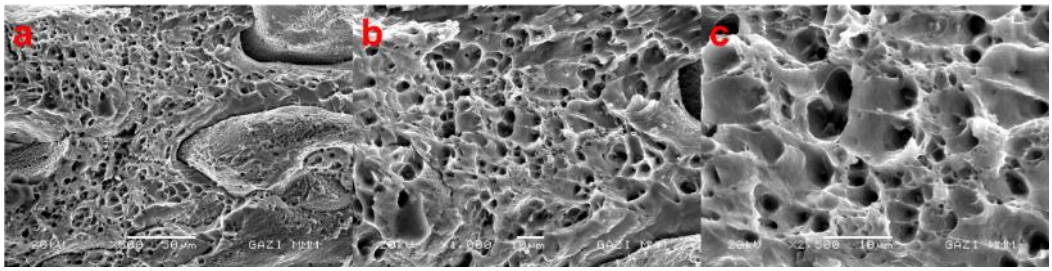
Şekil 7.44 1 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



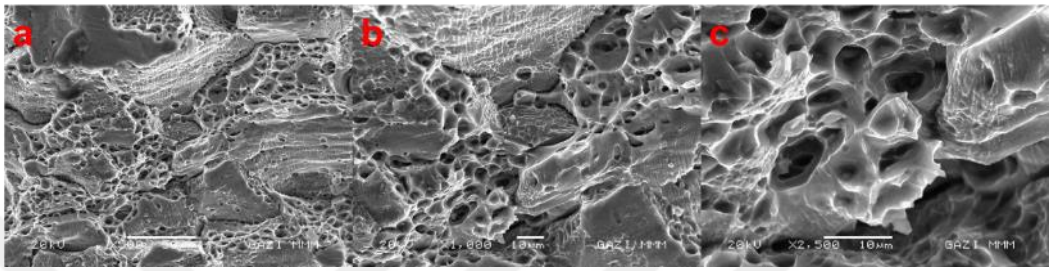
Şekil 7.45 2 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



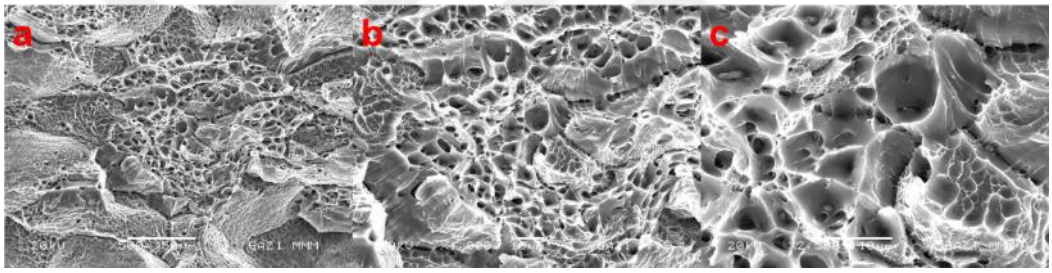
Şekil 7.46 3 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



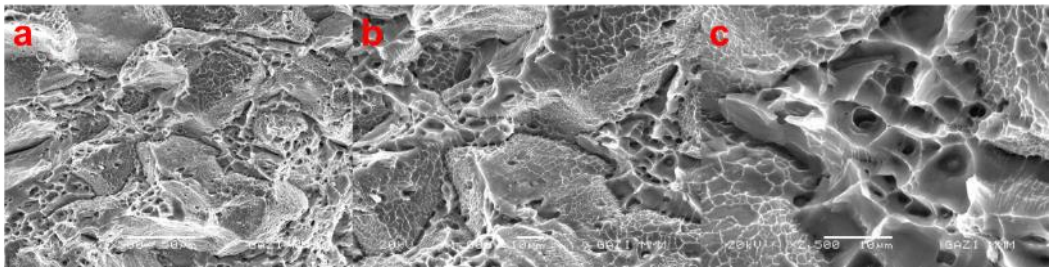
Şekil 7.47 4 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



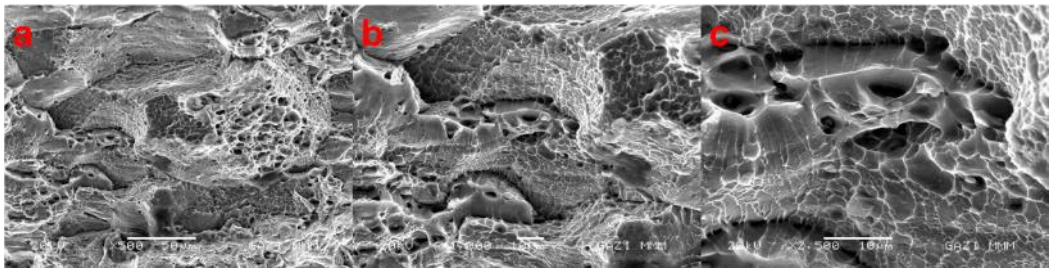
Şekil 7.48 5 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



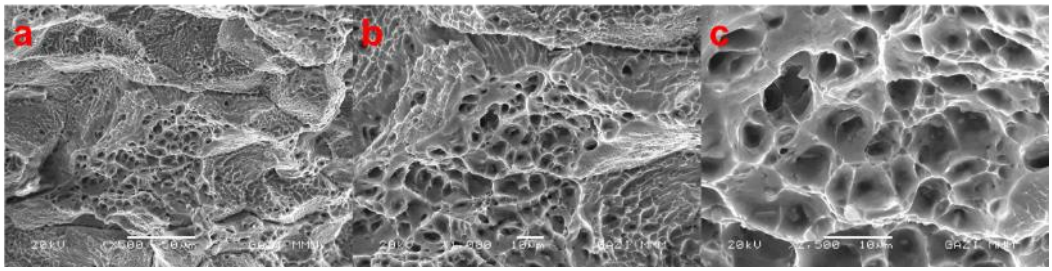
Şekil 7.49 6 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



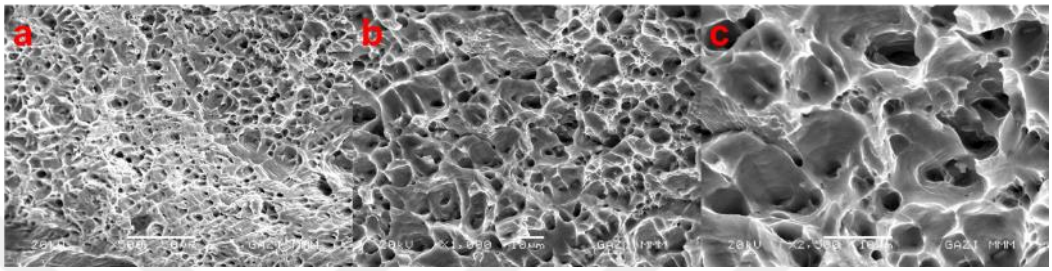
Şekil 7.50 7 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



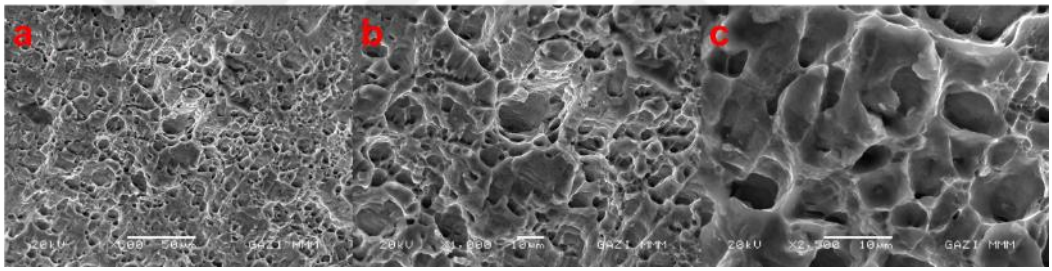
Şekil 7.51 8 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



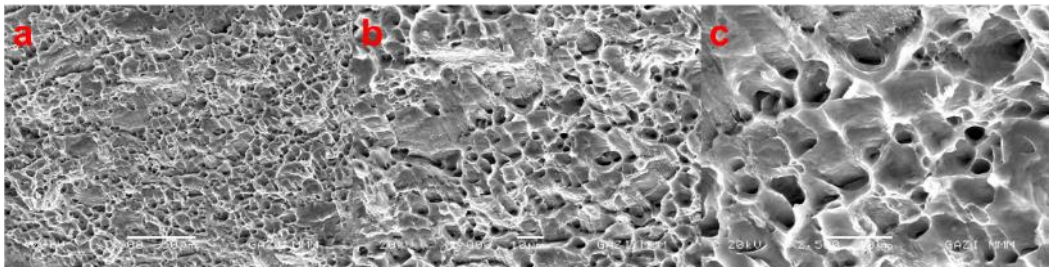
Şekil 7.52 9 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



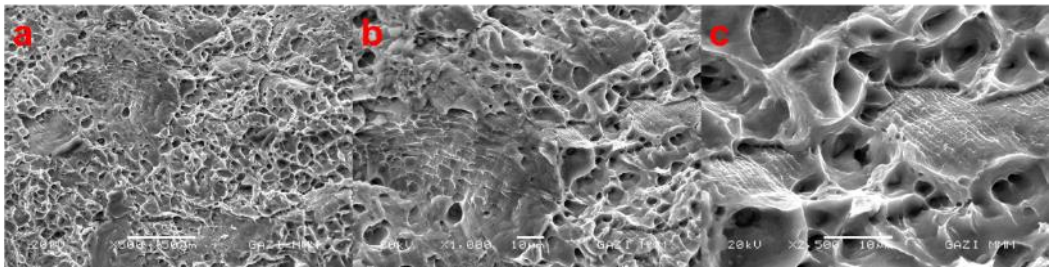
Şekil 7.53 10 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



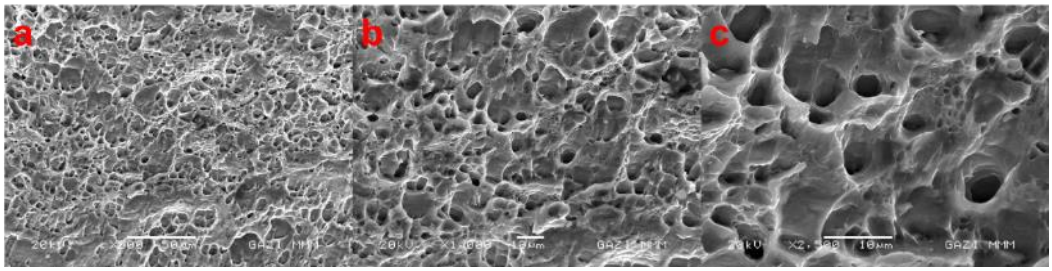
Şekil 7.54 11 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



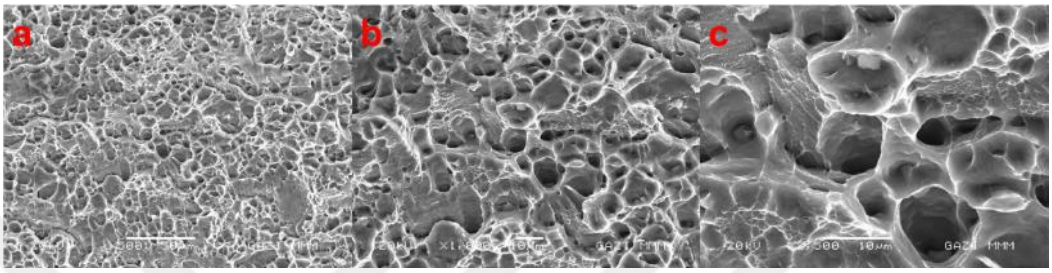
Şekil 7.55 12 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



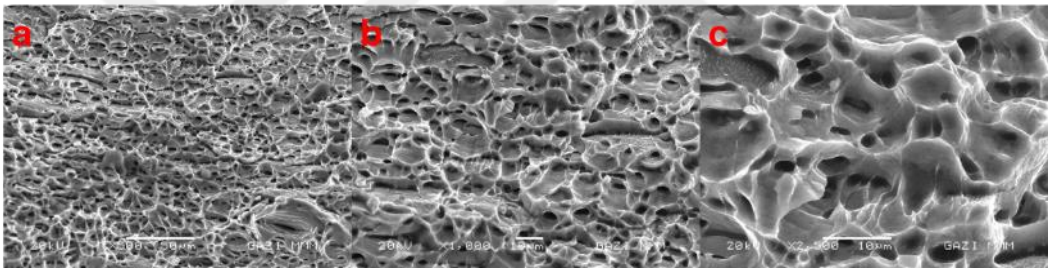
Şekil 7.56 13 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



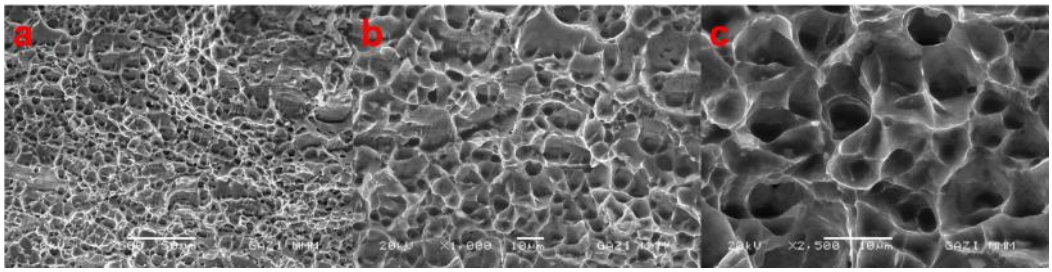
Şekil 7.57 14 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



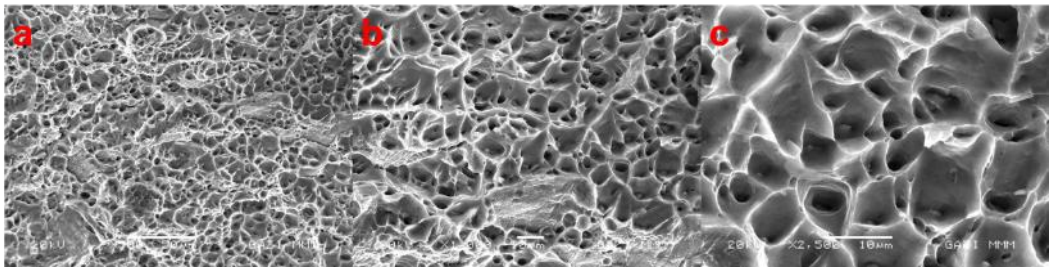
Şekil 7.58 15 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



Şekil 7.59 16 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



Şekil 7.60 17 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)



Şekil 7.61 18 numaralı deney kırılma yüzeyi görüntüleri (a.500x, b.1000x, c.2500x)

Şekil 7.44 – Şekil 7.61'de çekme testinden sonra kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde ekstrüzyonla üretilmiş alüminyum alaşımlarında genel olarak sünek kırılma tipi tespit edilirken, bazı görüntülerde klivaj düzlemlerinin de görüntülerde yer alması nedeniyle birleşik (sünek-kırılgan) kırılmanın olduğu kanaatine varılmıştır. SEM görüntülerinde görülen çukurlar, peteğimsi ve lifli yapılar, EN AW 6061 ve EN AW 6063 yapısında mükemmel bir arayüzey eklemi ve fark edilebilir uniform bir uzama ile sünek bir kırılma olduğunu göstermektedir. Ayrıca, görüntülerde yer yer oluşan klivaj düzlemleri gibi yapılar gevrek bir kırılmaya işaret etmektedir. Çekme numunelerindeki eş eksenli çukurumsu, bal peteğimsi lifli yapılar sünek kırılma modunu doğrulamaktadır. Alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu nedeniyle çekme yüklemesi sırasında, dislokasyon hareketinin engellenmesi ve malzemeyi deforme etmek için gereken gerilimin artması nedeniyle klivaj düzlemlerinin oluşumuna neden olabilir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Bu çalışmada EN AW 6061 ve EN AW 6063 alaşımları ekstrüzyon yöntemiyle kutu profil olarak üretilmiş ve üretim aşamasında uygulanan sıcaklık ve ekstrüzyon hızının malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Optik mikroskop görüntülerinde mikroyapının genel olarak birbirine benzeyen eş eksenel tanelerden oluştuğu görülmüştür. Sıcaklık ve ekstrüzyon hızlarına bağlı olarak tane boyutunun da değişkenlik gösterdiği ayrıca tespit edilmiştir.

- Tane boyutu analizleri değerlendirildiğinde; EN AW 6061 ve EN AW 6063 profil üretimlerinde en ince taneli mikroyapının dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle 450°C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızlarında üretilen profiller olan 5 numaralı deney (53,96 µm) ve 14 numaralı deneyde (62,96 µm) olduğu, sıcaklıklar mukayese edildiğinde ise; en ince tane yapısının 450°C, en iri tane yapısının ise 480°C'de oluştuğu tespit edilmiştir.

- EDS incelemeleri ile dökümü yapılan malzemenin spektrometre analizleri birbiriyle uyuşmuştur.

- XRD analizleri sonucunda hem EN AW 6061, hem de EN AW 6063 alaşımında oluşan piklerin yaklaşık aynı açı değerlerinde, alaşımların sahip olduğu içeriklere uygun olarak farklı şiddet değerlerinde oluştuğu, analizlerde farklı faz ve bileşik oluşumlarının olmadığı gözlemlenmiştir.

- EN AW 6061 T6 profillerden başlayarak incelendiğinde en yüksek sertlik değeri 107,7 HB ile 5 numaralı numunede (450°C sıcaklık, 13 m/dk hız) görülmüştür. En düşük sertlik değeri ise bu grupta 9 numaralı numunede (480°C sıcaklık, 15 m/dk hız) 91,4 HB ile ölçülmüştür.

- EN AW 6063 T6 profillerden alınan sertlik sonuçları incelendiğinde ise en yüksek sertlik değeri 14 numaralı numunede (450°C sıcaklık, 13m/dk hız) 81,4 HB olarak

tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise 16 numaralı numunede (480°C sıcaklık, 10 m/dk hız) 63,7 HB olarak ölçülmüştür.

- Çekme deneyleri sonucunda; T6 ısıl işlemli üretimi sağlanan numunelerin aynı ekstrüzyon hızı ve sıcaklık değerlerindeki mukayesesinde EN AW 6061 alaşımının daha yüksek mukavemet sergilediği, EN AW 6063 alaşımının ise nispeten daha düşük mukavemet sergilediği tespit edilmiştir. Hammadde kimyasal spektrum analizi ve EDS analizinde tespit edildiği üzere alaşımların sahip olduğu alaşım elementleri ve içerik oranlarının bu farkta etkili olduğu düşünülmektedir.

- EN AW 6061 alaşımı için gerçekleştirilen çekme deneylerinde en yüksek mukavemet değerleri 450 °C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 5 numaralı deneyde ölçülürken (Akma mukavemeti: 274 N/mm2, Çekme mukavemeti: 294 N/mm2), en düşük mukavemet değerleri 480°C sıcaklık ve 10 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 7 numaralı deneyde (Akma mukavemeti: 250 N/mm2, Çekme mukavemeti: 273 N/mm2), ölçülmüştür.

- EN AW 6063 alaşımı için gerçekleştirilen çekme deneylerinde ise; en yüksek mukavemet değerleri EN AW 6061 alaşımında olduğu gibi, 450 °C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 14 numaralı deneyde ölçülürken (Akma mukavemeti: 190 N/mm2, Çekme mukavemeti: 228 N/mm2), en düşük mukavemet değerleri yine EN AW 6061 alaşımında olduğu gibi, 480°C sıcaklık ve 10 m/dk ekstrüzyon hızında gerçekleştirilen 16 numaralı deneyde (Akma mukavemeti: 155 N/mm2, Çekme mukavemeti: 190 N/mm2) olduğu raporlanmıştır.

- TS EN 755-2 standardına uygun olarak T6 ısıl işlemi uygulanmış EN AW 6061 alaşımlarının çekme testleri için tüm üretimlerin sınır şartları taşıdığı görülmüştür. Yine standarda uygun olarak T6 ısıl işlemi uygulanmış EN AW 6063 alaşımlarının çekme testleri için 450°C sıcaklıkta gerçekleşen tüm üretimlerin sınır şartları taşıdığı, diğer üretimlerde ise sınır şartlarda belirlenen mukavemet değerlerine erişilemediği tespit edilmiştir.

- Çekme testinden sonra yapılan kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde; ekstrüzyonla üretilmiş alüminyum alaşımlarında genel olarak sünek kırılma tipi tespit edilirken, bazı görüntülerde klivaj düzlemlerinin de görüntülerde yer alması nedeniyle birleşik (sünek-kırılgan) kırılmanın olduğu kanaatine varılmıştır.

- Çekme ve sertlik testlerinde, sonuçların birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmüştür. Her iki alaşımda en yüksek sonuçların görüldüğü 450°C sıcaklık ve 13 m/dk ekstrüzyon hızı parametrelerinde dinamik yeniden kristalleşmenin de etkisiyle daha mukavemetli sonuçlar elde edilmiştir.

- Sertlik ve mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlar mikroyapı sonuçlarıyla eşleştirildiğinde 450°C sıcaklığın üretimler için en uygun sonuçları verdiği görülmüştür. Ekstrüzyon hızlarının ise bariz bir değişiklik oluşturmadığı tespit edilmiştir.

- Mekanik test sonuçlarında ölçümlerin nispeten birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmüştür. Bu durum sıcaklık ve ekstrüzyon hızının parametre etkinliklerinin ortaya konacağı çalışmalar için bu tez çalışmasının bir ön çalışma olarak değerlendirilebileceğini, fakat sıcaklık ve hız parametreleri için birbirinden daha uzak değerlerin seçilmesinin daha uygun olacağını ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

Abdizadeh, H., Ashuri, M., Tavakoli Moghadam, P., Nouribahadory, A., Baharvandi, H.R. (2011). Improvement in physical and mechanical properties ofaluminum/zircon composites fabricated by powder metallurgy method,Mater. Des., 32, 4417-4423.

Asaş Aluminyum, www.asasalu.com.tr

Askeland Donald, R. (1998). Science & Engineering of Materials Ders Kitabı. University of Missouri-Rolla.

ASM (1992). ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams. ASM International The Materials Information Society: Volume 3, 1740 s.

Bahar Ayşe, F. (2003). Finite Element Analysis of Extrusion Dies. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız

Bartolucci Stephen (1995). Effect of Thermal Cycles on Mıcrostructure ond Extrudabılıty Of AA6xxx Alloys, Materials Science and Engineering Department Rensselaer Polytechnic Institute

Bilginoğlu Endüstri, www.bilginogluendustri.com.tr

BjØrnbakk Elin Beate (2002). The influence of homogenization cooling rate kütük preheating temperatures and die geometry on the T5 properties for tree 6xxx alloys extruded under industrial conditions, Materials Science Forum Vols. 396-402(2002), pp.405-410.

Brooks Charlie, R., (1993). Principle Of Heat Treating Of Nonferrous Alloys, University of Tennessee, 1993

Brown John, R., (1994). Foseco Non-Foundryman's Handbook. Elevent Edition, Revised and,

Butterworth Heinemann, s 39-40.

Ekici, A. A., Uslan, İ. & Sarıtaş, S. (2005). Ekstrüzyonla Tam Yoğunlaştırılmış Püskürtme Şekillendirme Alüminyumun Mikroyapısal İncelenmesi. 4th International Powder Metallurgy Conference, Turkish Powder Metallurgy Association Sakarya University, Sakarya, TURKEY, 1279-1288.

Ertan, S., Kavaklıoğlu, B. & Büyükakkaş F. (2002). Alüminyum Sıvı Metal Temizliğinde Kullanılan Flakslar, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu

Huang, Y., & Prangnell, P. B. (2007). Continuous frictional angular extrusion and its application in the production of ultrafine-grained sheet metals. Scripta Materialia 56: 333–336.

Karabay, S., Yılmaz, M. & Zeren, M. (2005). Investigation of extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6101 from the kütüks homogenisedrapid quenched and as-cast conditions. Journal Of Materials Processing Technology 160: 138–147.

Karabin, M. E., Barlat, F. & Becker, R. (2003). A simplified analysis of the effect of microstructure gradient on the stress relief of aluminum plates and extrusions. International Journal Of Mechanical Sciences 45: 1483–1503.

Kvande, H. (1999). Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, Light Metal Age, p:44-53

Lapovok, R., Ye Barnett, M. R. & Davies, C. H. J. (2004). Construction of extrusion limit diagram for AZ31 magnesium alloy by FE simulation. Journal Of Materials Processing Technology 146:408–414.

Metal Handbook (1979). Vol. 2,9th Ed. American Society for metal

Milenin, A. A., Berski, S., Banaszek, G. & Dyja, H. (2004). Theoretical analysis and optimisation of parameters in extrusion process of explosive cladded bimetallic rods. Journal Of Materials Processing Technology 157–158: 208–212.

Mol, J.M.C., Van De Langkruis, J., De Wit, J. H. W. & Van Der Zwaag, S. (2005). An integrated study on the effect of pre- and post-extrusion heat treatments and surface treatment on the filiform corrosion properties of an aluminium extrusion alloy. Corrosion Science, 47: 2711-2730.

Nagarajan, D., Chakkingal, U. & Venugopal, P. (2007). Influence of cold extrusion on the microstructure and mechanical properties of an aluminium alloy previously subjected to equal channel angular pressing. Journal Of Materials Processing Technology 182: 363–368.

Saha, P. K. (2005). Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisi. çev. E. Keleşoğlu ve Y. Erarslan, ASM International The Materials Information Society, Ege Basımevi, İstanbul

Schultz RA Hauptrich (1998). Trends in Aluminum Use for Passenger Cars and Light Trucks in North America, Light Metal Age, p:108-103.

Senkov, O. N., Senkova, S. V., Scott, J. M. & Miracle, D. B. (2005). Compaction of amorphous aluminum alloy powder by direct extrusion and equal channel angular extrusion. Materials Science And Engineering A 393: 12-21.

Sheasby, P.C. (1994). Alüminyum Yüzey İşlemlerinin Geleceği, Alcan International Ltd.

Smith William, F. (2001). Material Science& Engineering Ders Kitabı, University of Central Florida.

Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 69 s.

The Aluminum Association (1994). Aluminum Standards and Data

Tiernan, P. Hillery, M. T., Draganescu, B. & Gheorghe, M. (2005). Modelling of cold extrusion with experimental verification. Journal Of Materials Processing Technology, 168: 360–366.

TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası, Alüminyum Ekstrüzyon ve Hadde Alaşımları (Pratik Bilgiler) Yayin No:1

Turhan, S. (2002). Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 64 s.

Tuzcuoğlu, F. (2005). Kişisel Notları. İstanbul.

U.S. Department Of Energy (2001). Energy Effiency in Aluminum Melting.

Usta, M. (2001). The Influence of Thermal Treatment on the Cast Structure of 6XXX Aluminum Alloys, Ph.D. Thesis.

Uzun, İ. ve Erişkin, Y. (2002). Saç Metal Kalıpçılığı Ders Kitabı, Ankara, s 179.

Wagstaff, (2006). www.wagstaff.com

Yang, F. & Okazaki, K. (2007). Indentation behavior of aluminum processed by equal channel angular extrusion: effect of bending angle. Scripta Materialia 56: 185–188.

Yıldırım, S. (2001). Saf Bakırın Yüksek Sıcaklıktaki Mekanik Davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s. 35.

Yılmaz, B. (2002). Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 70 s.

Zeytin, H. K. (2000). 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1, Otomobil Endüstrisinde Alüminyum Kullanımı.