



**ETİAL 160 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KOKİL
KALIBA DÖKÜMÜNDE ERBİYUM ELEMENTİ
İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Çağrı GÜLTEKİN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin TABAK

2024

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ETİAL 160 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE
ERBİYUM ELEMENTİNİN İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağrı GÜLTEKİN

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin TABAK

BAYBURT – 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK ve Dr. Öğr. Üyesi Yasemin TABAK danışmanlığında, Çağrı GÜLTEKİN tarafından hazırlanan “Etial 160 Alüminyum Alaşımının Kokil Kalıba Dökümün Erbiyum Elementi İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 08.07.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ŞİRİN

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Murat KUL
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında hazırlamış olduğum “Etial 160 Alüminyum Alaşımının Kokil Kalıba Dökümün Erbiyum Elementi İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08.07.2024

Çağrı GÜLTEKİN



ÖN SÖZ

Üniversite hayatımda, yüksek lisans dönemimde ve tez hazırlama aşamasında benden bilgi ve deneyimlerini aktaran, her an ve her koşulda yardım eden, meslek sevgisi ve sabrıyla bana rehberlik yapan tez danışmanım Doç. Dr. Murat ÇOLAK' a,

Tez hazırlama aşamasında her an ve koşulda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Dr. Yasemin TABAK'a,

Üniversite hayatım ve yaşantım boyunca her konuda desteğiyle yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan, mutluluklarımızı ve üzüntülerimizi hep beraber paylaştığımız Yunus Emre ASAN' a,

Yaşantım boyunca sürekli varlığını hissettiğim, her an benimle olan ve kararlarımı destekleyen sevgili aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Çağrı GÜLTEKİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ETİAL160 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE ERBİYUM ELEMENTİ İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Çağrı GÜLTEKİN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin TABAK

Bayburt-2024, Sayfa: 50

Alüminyum döküm endüstrisinde, alaşım özelliklerini geliştirmek gelişen teknoloji gereksinimlerine bağlı olarak önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, Etial 160 alaşımına erbiyum elementi takviyesiyle sıvı metal temizliği, akıcılık ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin kapsamlı deneysel çalışmalarla incelenmesidir. Dökümler kokil kalıba döküm yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, Etial 160 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Erbiyum (Er) elementi takviyesinin alaşımın karakteristiğine etkileşimi araştırılmıştır. Çalışmada, Er takviye oranı %0,03, %0,05 ve %0,1 olarak kokil kalıplara dökümler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda vakum altında katılaştırma (RPT), K-mold kalıbı, mekanik test kalıbı, farklı kesit kalınlıkları olan 4 kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbı tercih edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Er ilavesinin alaşım akıcılık özelliklerine olumsuz etki ettiği, sıvı metal ilerleme mesafelerinde azalma olduğu görülmüştür. Mekanik test sonuçları açısından Er ilavesi alaşım özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ilavesiz dökümde 153 MPa olan çekme gerilmesi maksimum %0,1 Er ilaveli dökümde 236 MPa' a kadar çıktığı belirlenmiştir. % uzama değerlerinde 3,04 uzamadan Er ilavesi sonucu 4,56 seviyelerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Er ilavesinin mikroyapı incelemeleri sonucu yapının değiştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etial 160, akıcılık, mekanik testler, mikroyapı, kokil kalıba döküm.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

THE EFFECT OF THE ADDITIONAL ERBIUM ALLOY ELEMENT ON MOLD CASTING OF ETİAL 160 ALUMINUM ALLOY

Çağrı GÜLTEKİN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

Second Advisor: Assist. Prof. Dr. Yasemin TABAK

Bayburt-2024, Pages: 50

In the aluminum casting industry, improving alloy properties is important due to developing technological requirements. The aim of this study is to investigate the effects of Erbium element addition to Etial 160 alloy on liquid metal cleanliness, fluidity and mechanical properties through comprehensive experimental studies. Castings were carried out by permanent mold casting method. In the experiments, the interaction of Erbium (Er) element addition to Etial 160 aluminum alloy at different rates on the alloy characteristics was investigated. In the study, castings were made in permanent molds with Er addition rates of 0.03%, 0.05% and 0.1%. In the experiments, reduced pressure test (RPT), K-mold, mechanical test mold, 4-channel fluidity mold with different section thicknesses and spiral fluidity mold were preferred. When the results were examined, it was seen that Er addition had a negative effect on alloy fluidity properties and a decrease in liquid metal advance distances. In terms of mechanical test results, it was determined that Er addition contributed to the improvement of alloy properties. In the experiments, it was determined that the tensile stress, which was 153 MPa in the casting without addition, increased to 236 MPa in the casting with a maximum of 0.1% Er addition. It was determined that the elongation values reached 4.56 levels as a result of Er addition from 3.04% elongation. It was observed that the structure changed as a result of microstructure examinations of Er addition.

Keywords: Etial 160, fluidity, mechanical tests, microstructure, permanent mold casting.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER	VII
TABLOLAR	IX
ŞEKİLLER	X
KISALTMALAR	XI
SİMGELER	XI
GİRİŞ	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Terim ve Tanımları	2
BİRİNCİ BÖLÜM	3
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	3
1.1. ALÜMİNYUM.....	3
1.2. ALÜMİNYUMUN TARİHÇESİ	4
1.3. ALÜMİNYUM ELEMENTİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	4
1.4. ALÜMİNYUMUN ELEMENTİNİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	5
1.5. ALÜMİNYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	6
1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	6
1.6.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması	7
1.6.1.1. Dövme alüminyum	7
1.6.1.2. Döküm alüminyum	8
1.6.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri	9
1.6.2.1. Yüksek mukavemet ve hafifliği.....	9
1.6.2.2. İmalat ve şekillenme kolaylığı.....	9
1.6.2.3. Korozyon direnci	9
1.6.2.4. Yüksek elektriksel iletkenliği	10
1.6.2.5. Yüksek termal iletkenliği	10
1.6.2.6. Yansıtma özelliği.....	11
1.6.2.7. Toksikite olmaması ve geri dönüşüm özelliği	11
1.6.3. Alaşım Elementlerinin Alaşıma Etkisi	11
1.6.4. Alüminyum Alaşımlarında Akıcılık	13
1.6.5. Alüminyum Alaşımlarının Çekme Özellikleri	14
1.7. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME.....	15
1.8. ERBİYUM.....	16
İKİNCİ BÖLÜM	18
2. YÖNTEM	18

2.1. DÖKÜM DENEYLERİNE HAZIRLIK İŞLEMLERİ	19
2.2. ERGİTME VE DÖKÜM İŞLEMLERİ	19
2.3. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ.....	20
2.3.1. RPT Numunelerinin Analizi.....	20
2.3.2. K-Mold Numunelerinin Analizi	22
2.3.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin Analizi	23
2.3.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin Analizi.....	24
2.3.5. Mekanik Test Kalıp Numunelerinin Analizi	25
2.3.6. Mikroyapı Analizleri	28
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	29
3. BULGULAR	29
3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ	29
3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ	29
3.3. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI.....	33
3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI.....	37
3.4.1. Çekme Test Sonuçları.....	37
3.4.2. Sertlik Test Sonuçları	41
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI.....	42
SONUÇ	46
KAYNAKÇA.....	48
ÖZ GEÇMİŞ	50

TABLÖLAR

Tablo 1: Alüminyumun Elementine Ait Kritik Mekanik Özellikler	4
Tablo 2: Alüminyum Elementi İçin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	5
Tablo 3: Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri	7
Tablo 4: Dövme Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması	8
Tablo 5: Dökme Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması	8
Tablo 6: Alüminyumun Elektriksel İletkenliğini Azaltan Alaşım Elementler	10
Tablo 7: Döküm Alaşımının Hacimsel Çekme Yüzdeleri	14
Tablo 8: Erbiyum Elementine Ait Özellikler	17
Tablo 9: Deney Parametreleri.....	18
Tablo 10: Döküm Deneyleri Kimyasal Bileşim Sonuçları (% Ag).....	29
Tablo 11: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Verileri.....	31
Tablo 12: K- mold İnküzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri.....	33
Tablo 13: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri	34
Tablo 14: Sertlik Ölçüm Verileri.....	41

ŞEKİLLER

Şekil 1: Tane İncelticinin Etkileşimi a) Tane İnceltici İlavesiz b) Tane İnceltici İlaveli	16
Şekil 2: Deneysel Çalışmalar Sırasında Süreç Aşamaları.....	19
Şekil 3: Isıtıcı Tablaya Ait Görsel.....	19
Şekil 4: a) Elektrik Direnç Ocağı, b) Döküm, c) Döküm Sonrası Kalıp Açılmadan Görseller	20
Şekil 5: Azaltılmış Basınç Deneysel Cihazı (RPT) Cihazı.....	21
Şekil 6: a) Yoğunluk Ölçüm Deneyi Gösterimi, b) Cihaz Görseli	21
Şekil 7: RPT Numunelerinin Gözenek Tespit Aşamaları	22
Şekil 8: a) K-Mold Test Kalıbı Dış, b) K-Mold Test Kalıbı İç, c) Katı Model Görüntüsü	23
Şekil 9: a) 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı, b) Numune Ölçüleri	24
Şekil 10: Sıvı Metal İlerleme Mesafe Tespiti Gösterimi	24
Şekil 11: a) Spiral Akıcılık Kalıbı Görseli, b) Spiral Akıcılık Kalıbı Katı Model Görseli.....	25
Şekil 12: Mekanik Test Kalıbı Görseli.....	25
Şekil 13: Isıl İşlem Uygulama Şeması	26
Şekil 14: Çekme Deneyi Numunesi	26
Şekil 15: Çekme Deneyi Cihazı	27
Şekil 16: a) Sertlik Deneyi Cihazı Yan Görünüş, b) Sertlik Deney Cihazı Ön Görünüş.....	27
Şekil 17: a) Zımparalama ve Parlatma Cihazı, b) Optik Mikroskop Cihazı	28
Şekil 18: RPT Test Numune Görüntüleri.....	30
Şekil 19: RPT Numune Kesit Fotoğrafları.....	30
Şekil 20: K-mold Kalıbına Uygulanan Döküm Örnekleri Görselleri	32
Şekil 21: K- mold Numuneleri Kırık Yüzey Örnekleri Görselleri.....	32
Şekil 22: Döküm Sıcaklığına Bağlı Akıcılık Döküm Örnekleri	34
Şekil 23: Spiral Akıcılık Kalıbıyla Oluşturulan Sıvı Metal İlerleme Mesafesi	35
Şekil 24: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbıyla Oluşturulan Sıvı Metal İlerleme Mesafesi.....	36
Şekil 25: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numune Örnek Görüntüsü.....	37
Şekil 26: Döküm Deneylerine Ait Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafikleri.....	38
Şekil 27: Etial 160 Alaşımı Er İlavesi Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi.....	39
Şekil 28: Etial 160 Alaşımı Er İlavesinin % Uzama Değerleri Değişimi	39
Şekil 29: Etial 160 Alaşımı Er İlavesine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi.....	40
Şekil 30: Er İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Deneyi Sonuçlarının Grafik Gösterimi.....	42
Şekil 31: Takviyesiz Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri	43
Şekil 32: %0,03 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri	43
Şekil 33: %0,05 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri ...	44
Şekil 34: %0,05 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri ...	44

KISALTMALAR

CE	: Karbon Eşdeğeri (Carbon Equivalent)
VAK	: Vakum Altında Katılaştırma
SiC	: Silisyum Karbür (Silisyum Carbide)
ETİAL	: ETİ Alüminyum
HRB	: Rockwell B Sertliği (Rockwell B Hardness)
RPT	: Reduced Pressure Test (Düşürülmüş Basınç Testi)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
HB	: Brinel Sertlik (Hardness Brinell)

SİMGELER

Kgf	: Kilogramkuvvet
kW	: Kilowatt
kN	: Kilonewton
kW	: Kilowatt
Å	: Angstrom
J	: Jolue
KgK	: Kilogramkelvin
MJ	: Megajolue
°C	: Santigrad Derece
°F	: Fahrenheit
K	: Kelvin
α	: Alfa
MPa	: Megapascal
Zn	: Çinko
Cu	: Bakır
Mn	: Mangan
Fe	: Demir
Si	: Silisyum
Er	: Erbiyum
HF	: Hidrojen Florür
HCl	: Hidroklorik Asit
HNO₃	: Nitrik Asit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
NH₂O	: Amonyum Peroksit
AlB₂	: Alüminyum Borür
TiB₂	: Titanyum Borür
TiAl₃	: Titanyum Alüminyum Triklorür
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
dk	: Dakika

Mg : Magnezyum
mbar : Milibar



GİRİŞ

Alüminyum döküm alaşımları, ülkemizin ve dünyanın öncelikli alanları arasında yer alan ağırlık azaltımı, enerji verimliliği, geri kazanım ve çevresel duyarlılık konuları göz önünde bulundurulduğunda, endüstrinin önde gelen alaşım gruplarını oluşturmaktadır. Günümüzde, özellikle otomotiv sektöründe, uzay ve hava yolu endüstrilerinde tercih oranının yükselişiyle birlikte, alüminyum alaşımlarının mukavemeti, sertliği, kırılma dayanıklılığı, yorulma ömrü gibi özelliklerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Alüminyum döküm sanayisindeki teknolojik değişimler, devrin malzeme gelişimine paralel olarak artmakta olup, ürün ve sektör çeşitliliğini genişletmekte, ancak alaşımların sahip olduğu özellikleri sınırlamaktadır. Bu doğrultuda, akademik ve endüstriyel düzeyde birçok çalışma yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum alaşımlarının üstün fiziksel ve mekanik özellikleri, içerdikleri alaşım elementinin çeşidine ve oranına bağlıdır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında Etial 160 alaşımına kokil kalıba dökümde farklı oranlarda erbiyum ilavesinin etkisi incelenmiştir. Deneyle, farklı erbiyum oranlarıyla Etial 160 alaşımına yapılacak katkının sıvı metal temizliği üzerindeki etkisini belirlemek için K-mold kalıbı ve RPT numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akıcılık etkisini değerlendirmek amacıyla farklı kesit kalınlıkları olan 4 kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbına dökümler yapılarak incelenmiştir. Akıcılık deney numunelerinden oluşturulan mikroyapı incelemelerinin yanı sıra, mekanik test kalıbına dökülen numunelere çekme ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

Araştırmanın Amacı

Literatürde, alüminyum alaşımlarına farklı alaşım elementlerinin katkısıyla fiziksel ve mekanik özelliklerin artırılmasıyla ilgili bilgiler bulunmaktadır. Bu çalışmanın genel amacı, alüminyum alaşımlarının dökümünde erbiyum alaşım elementinin kullanımıyla mekanik özelliklerin artırılmasıdır. Bu araştırma ile erbiyum ilavesinin etkisi ve erbiyum oranının akıcılık, sıvı metal temizliği ve mekanik özelliklere etkisi sayısal verilerle sunulmuştur. Böylece, erbiyum ilavesinin dökümdeki sıvı metal temizliği, sıvı metal ilerleme mesafesi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi tayin edilmiştir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Erbiyum tesiriyle birlikte ilave oranının nicel olarak tespiti, çalışmanın önemini ortaya çıkarmaktır. Alüminyum döküm endüstrisindeki teknolojik ilerlemeler ve özellikle otomotiv, havacılık, uçak ve uzay endüstrilerindeki kullanım alanlarının artması, alüminyumun yaygın bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan alüminyumun akıcılık ve mekanik özelliklerini artırmak için Etial 160 alaşımına farklı oranlarda erbiyum ilavesinin etkisini araştırılmıştır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Literatürde, Etial 160 alaşımına çeşitli elementlerin katkısının incelendiğinde erbiyum ilavesinin etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir.

Terim ve Tanımları

Döküm: Ergimiş sıvı metalin veya alaşımın istenilen parçanın kalıbına dökülerek, sıvı metalin katılaşmasıyla parçanın oluşturulduğu bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, sıvı metal kalıba dökülür ve katılaşarak istenilen parça elde edilmektedir.

Kokil Kalıp: Birden fazla döküm yapılabilen çelik veya dökme demirden yapılan kalıplar.

Alüminyum: 13 numaralı atom, gümüş renkli ve sünek bir metal.

Erbiyum: Erbiyum elementi Er simgesi ile gösterilip lantanitler grubunda yer almaktadır. Elementler arasında 44. sırada bulunan erbiyum saf olarak bulunmaz ve diğer nadir toprak elementleri ile aynı özelliklerine sahiptir.

Mekanik Özellik: Malzemenin, zorlamalara karşı gösterdiği dayanıklılık özellikleri.

Akışkanlık: Maddenin sıvı, gaz veya plazma halindeki akıcılığı altında malzemenin gösterdiği mukavemete denir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM

Alüminyum elementi, yer kürede tahmini % 8 miktarında bulunan bir bileşiktir. Dünya genelinde, demir ve çelik sanayisinden sonra en çok kullanım alanına sahip metal alüminyumdur. Alüminyumun günümüzde ikinci sırada yer almasının ana sebebi, bir malzemeden beklenen birçok özelliği bünyesinde barındırmasıdır. Çelikten sonra dünyada en fazla üretilen metal olan alüminyum, üstün korozyon direnci, dökülebilirlik, işlenebilirlik, ısı ve elektrik iletkenliği, hafiflik ve yaşlanma işlemi ile dayanım artışı gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler nedeniyle, alüminyum elektrik-elektronik, tarım, inşaat, gıda, otomotiv ve havacılık gibi kapsamlı sanayi alanında yaygın bir yere sahiptir (Bolton, 1993; Sharma vd., 2005).

Alüminyum doğada, dünya yüzeyine yakın, kırmızımsı ve kil benzeri boksit birikintilerinde, oksijen ve diğer elementlerle birleşmiş halde bulunur. Doğada bulunan 92 element arasında, alüminyum %8'lik oranıyla en bol bulunan üçüncü elementtir. Alüminyum, kimyasal olarak aşırı reaksiyona girebilme özelliğine sahip olduğundan, 270'ten fazla farklı formda mevcut olabilir (Shakhashiri, 2000).

Alüminyum, periyodik cetvelde 3A grubunda olup atom numarası 13'tür. Atom ağırlığı ise 26,981538 g/mol'dür. Atom ve iyon çapı sırasıyla 1,43 Å ve 0,86'dır. Kristal yapısı yüzey merkezli kübik (YMK) olan alüminyumun erime sıcaklığı 658 °C'ye kadar kararlıdır. Bu koşullar altında yapısal bir değişiklik meydana gelmez (Sarsılmaz, 2008).

Yapılan deneyler, alüminyum elementinin saflık derecesinin artmasıyla çekme dayanımında azalma olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kopma anında meydana gelen kesit daralmasının en yüksek saflıkta alüminyum elementinde %99,9 ve üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, alaşım içeriğindeki alüminyum oranının sünekle doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. Yüksek saflık derecesine sahip alüminyum elementi, soğuk haddeleme işleminden sonrasında çekme dayanımı 110-130 MPa değerlerine ulaşırken, tavlanma işlemi sonrasında tabii çekme dayanımı 35-60 MPa değerlerine sahip olmaktadır. Bu durum, tavlanma işlemi sonrası çekme dayanımının azaldığını göstermektedir. Uzama miktarı verileri ise %5,5 ve %40-%50 arasında değişebilmektedir (Sarsılmaz, 2008).

1.2. ALÜMİNYUMUN TARİHÇESİ

Alüminyum, saf halde doğada bulunmadığı için keşfi gecikmiştir; çünkü alüminyum, boksit mineralinde (Al_2O_3 , NH_2O) yer almaktadır. Alüminyumun keşfi 1825'te gerçekleşmesine rağmen, düzenli bir üretim prosesi keşfi ardından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Totten ve MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

1886'da Oberlin Koleji öğrenim gören Charles Hall ve Fransız mühendis Paul Heroult, habersiz bir şekilde aynı dönemde benzer temel prensiplere dayanan ve alüminyum eldesinde kullanılan birincil alüminyum üretimi için ucuz bir ergimiş tuz elektrolizi geliştirmişlerdir. Günümüzde hala kullanılan Hall-Heroult yöntemi, iki bilim insanının aynı zamanda geliştirdiği bir elektroliz prosesi olarak tanımlanmaktadır (Totten ve MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

1887 yılında Avusturyalı mühendis Karl Josef Bayer, boksit mineralinden alümina oluşturmak adına bir kimyevi proses geliştirmiştir. Boksit mineralinden alümina (Al_2O_3) temini amacıyla Bayer prosesi yöntemi kullanıldıktan sonra, saf alüminyum üretimi için Hall-Heroult işlemi uygulanmaktadır (Totten ve MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

Adolf Hitler'in liderliği vaktinde Almanya, alüminyum üretmekte dünya lideriyken, 1942'de Amerika Birleşik Devletleri'nde hidroelektrik santrallerine yönelik yeni projelerin plana alınmasıyla ABD, yer kürede alüminyum üretiminde birinciliğe ilerlemiştir (Matweb, 2021; Binczewski, 1995; Demirci, 2012).

1.3. ALÜMİNYUM ELEMENTİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Alüminyum elementinin elastisite modülü, çeliğin elastisite modülünden üç kat daha küçüktür. Bu özellik, mühendislik proje hesaplamalarında büyük salınımlı yüklerle karşı büyük faydalar sağlar. Alüminyum, çelikle karşılaştırıldığında büyük salınımlı yükler altında uygun bir sönümleme sağlamaktadır (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

Alüminyumun avantajları içerisinde, kolayca şekillendirilebilme ve işlenebilme özelliği bulunmaktadır. Saf halde bulunan alüminyum elementi, yumuşaklığı ve tel formuna kolayca dönüşebilme yeteneğiyle dikkat çekmektedir. Bu özellik, presleme, bükme, çekme ve kalıplama gibi işlemlerin basitçe gerçekleştirilmesini sağlar. Alüminyumun kritik mekanik özellikleri Tablo 1'de detaylı olarak gösterilmiştir (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

Tablo 1: Alüminyumun Elementine Ait Kritik Mekanik Özellikler (Al-Saadi ve Tunay, 2017)

MEKANİK ÖZELLİKLER	ALÜMİNYUM
Gerilmede elastikiyet modül (kg/cm^2) $\times 10^3$	703

Çekme dayanımı (kg/cm ²)	914
Akma dayanımı (kg/cm ²)	356
Uzama (5 cm de) (%)	40
Alan küçülmesi (%)	38
Sertlik (HB)	23
Büzülme dayanımı (100 saatte %1 uzama) (kg/cm ²) 705 °C	200

Alüminyum elementi yüksek mukavemete sahip bir malzemedir. Dinamik mukavemeti, statik mukavemetine kıyasla genellikle 0,4 ila 0,45 kat daha yüksektir. Soğuk şekillendirme yöntemiyle üretilen alüminyum parçaları kaynak işlemine tabi tutulduğunda, geçiş bölgesindeki mukavemet değerlerinde bir azalma gözlenir. Ancak, alüminyum tavlama gibi ısı işlemlere maruz bırakılarak bu düşen mukavemet yeniden elde edilebilir (Kaufman ve Rooy, 2004).

1.4. ALÜMİNYUMUN ELEMENTİNİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Alüminyumun korozyona karşı dayanıklılığı hayli yüksektir. Alüminyum, oksijenle temasta bulunduğu kendisini korumak için Al₂O₃ adı verilen bir tabaka oluşturur. Bu tabaka, alüminyumun korozyona karşı direncini artırır ve metalin korunmasına yardımcı olur. Ayrıca, alüminyumun saflık derecesi yükseldikçe iletkenliği ve korozyon direnci de çoğalır (Vargel, 2004). Alüminyumun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Alüminyum Elementi İçin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Yapıcı, 2012)

Fiziksel ve kimyasal özellikleri	Alüminyum
Atom numarası	13
Element serisi	Metaller
Grup, periyot, blok	3A, 3, p
Görünüş	Gümüşümsü
Atom ağırlığı	26,9815386(8) g/mol
Elektron dizilimi	[Ne] 3s ² 3p ¹
Enerji seviyesi başına elektronlar	2, 8, 3
Genel faz hali	Katı
Yoğunluk (katı)	2,70 g/cm ³
Sıvı haldeki yoğunluğu	2,375 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	660,32 °C
Kaynama noktası	2519 °C
Ergime ısısı	10,71 kJ/mol
Buharlaştırma ısısı	294,0 kJ/mol
Isı kapasitesi	24,2 (25 °C) J/(mol·K)
Kafes yapısı	Yüzey merkezli kübik
Yükseltgenme seviyeleri	(3+)(amfoter oksit)

Elektronegatifliği	1,61 Pauling ölçeği
İyonlaşma enerjisi	577,5 kJ/mol
Atom yarıçapı	125 pm
Atom yarıçapı (hes.)	118 pm
Kovalent yarıçapı	118 pm
Elektriksel öz direnci	26,50 $\Omega \cdot m$ (20 °C'de)
Isıl iletkenlik	237 W/(m·K)
Isıl genişleme	23,1 $\mu m/(m \cdot K)$ (25 °C'de)
Ses alüminyumda yayılma hızı	5000 m/s(20 °C'de)

1.5. ALÜMİNYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Alüminyum, yerkürede metalik formda bulunmaz; bunun yerine alümina adı verilen bir oksit bileşiminden türetilmektedir. Bu oksit, boksit cevherinde doğal olarak bulunur. Boksit cevheri, genellikle böhmit (%85 alümina içeren), gibbsit (%65,4 alümina içeren), diasporit (farklı kristal yapılarına sahip böhmit) ve korundum (Al_2O_3) minerallerini içerir. Bu minerallerin yanı sıra boksit içerisinde silisyum, titanyum ve demir gibi farklı mineraller bulunabilir (Çetin, 2017).

Alüminyum üretimi, birincil (cevherden) ve ikincil (geri dönüşüm) olmak üzere iki temel kategoride analiz edilmektedir. Birincil üretimde, çeşitli teknikler kullanılarak cevherden alüminyum elde edilirken, ikincil üretimde genellikle hurda malzemeler kullanılarak alüminyum üretilir. İkincil üretim, yeniden kullanım prensibini esas aldığı için çevre faydalı metod olarak kabul görür. Ayrıca, ikincil alüminyum üretimiyle hurda malzemeler yeniden kullanılmasından dolayı ham madde ve enerji sarfiyatı büyük seviyede düşmektedir (Car, 2010).

1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alaşım, metalik karakteristik sergileyen iki veya ikiden çok maddenin belirlenmiş miktarlarda birleştirilmesiyle meydana gelen maddeler şeklinde ifade edilmektedir. Bu maddeler, metale bir veya birden çok element takviye edilerek veya birden fazla elementin bileşiminin ergitilmesi yoluyla açığa saf durumdaki maddelere üstün özellikler kazandırmaktadır. Saf metaller, belirli özelliklere sahip olsa da bu özellikler genellikle sınırlıdır. Dolayısıyla, metallerin karakteristiklerini değiştirmesi, gelişmesi ve daha mükemmel karakteristikler sağlamak amacıyla elde edilirler (Alım, 2017).

Tablo 3: Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri (Yalıtımlı, 2022)

Alaşım elementleri	Alüminyuma etkileri
Çinko (Zn)	Alaşımaya dayanım özelliği katar.
Bakır (Cu)	Isıl işlem yetisi, dayanım kazandırır. Korozyon direnci özelliğine etkide bulunur.
Mangan (Mn)	Akma ve gerilme dayanımını yükseltir. Korozyon direnci özelliğine etkide bulunur.
Silisyum (Si)	Magnezyum takviyesinde ısıl işlem yetisinde kazanım sağlar. Korozyon direncini özelliğine etkide bulunur.
Magnezyum (Mg)	Mukavemet kazandırır. Korozyon direncini ve kaynak özelliğine etkide bulunur.

1.6.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, imalat metoduna göre dövme alaşımları ve döküm alaşımları olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Her iki grup da bileşimleri bakımından benzerlik göstermektedir. Alüminyum alaşımlarının istenilen karakteristik eldesi için ve sertleşmesi, çeşitli alaşım elementlerinin takviyesi ve farklı ısıl işlemlerin uygulanmasıyla sağlanabilir. Ancak deformasyon sertleşmesi, döküm karakteristiğine kritik ölçüde tesir göstermediğinden, alaşım elementlerinin takviyesi döküm ve dövme alaşımları arasında çeşitliliğe yol açar (Kaufman ve Rooy, 2004).

1.6.1.1. Dövme alüminyum

Dövme alaşımlar, şekil değiştirme yetenekleriyle öne çıkar ve kolayca şekillendirilebilirler. Genellikle sürekli döküm yöntemi kullanılarak kütleler halinde çeşit çeşit alaşımları barındıran alüminyum bloklar homojenleştirme işlemine tabi tutulması ardından ekstrüzyon veya haddeleme vasıtasıyla şekillendirilirler. Isıl işlem tatbik yeteneğine göre gruplandırılırlar. Dövme alaşımları Tablo 4'te gösterilen dört basamaklı bir sistemle numaralandırılır, burada ilk basamak ana alaşım elementini belirtmektedir. İkinci basamak, alaşımın modifikasyonunu belirtir ve sıfır ise alaşımın orijinal anlamına geldiğini göstermektedir. Kullanılan rakamlar 1 ile 9 arasında değişir ve alaşımdaki farklılıkları belirtmektedir. Son iki rakam ise grup içinde farklı alüminyum alaşımlarını göstermektedir (Al-Saadi ve Tunay 2017).

Tablo 4: Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (Savaş, 2005)

Alaşım	Açıklama
1xxx	Saf alüminyum
2xxx	Ana alaşım elementi bakırdır ve magnezyum gibi farklı elementlerde yer alabilir.
3xxx	Ana alaşım elementi olarak mangan mevcut alüminyum alaşımları
4xxx	Ana alaşım elementi olarak silisyum mevcut alüminyum alaşımları
5xxx	Ana alaşım elementi olarak magnezyum mevcut alüminyum alaşımları
6xxx	Ana alaşım elementleri olarak magnezyum ve silisyum mevcut alüminyum alaşımları
7xxx	Ana alaşım olarak elementi çinko mevcut alüminyum alaşımları, ancak bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler de yer alabilir.
8xxx	Kalay ve bir miktar lityum mevcut alüminyum alaşımları
9xxx	Gelecekte kullanılmak üzere belirlenmiştir.

1.6.1.2. Döküm alüminyum

Döküm, hedeflenen tasarımın kalıp desteğiyle meydana getirilip, meydana getirilen kalıbın hacmine dolmuş durumda bulunup sıvının katılarak kalıp hacmindeki modelin şekline sahip olması işlemlerini tanımlar. Metalurjide döküm, ticari bir değer taşıyan metal ve alaşımların eritilerek kum kalıp, alçı kalıp, kokil kalıp, basınçlı döküm, hassas döküm ve buna benzer çeşitli metodlarla teminini belirtmektedir. Alüminyum ve alaşımların döküm sınıflandırmasında ise, üç basamaklı bir kodlama sistemi kullanılır ve bu kodlamanın sonunda ondalık noktayı barındıran dört rakam bulunur (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

Tablo 5: Dökme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (Al-Saadi ve Tunay, 2017)

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xx.x	Saf Alüminyum (%99 dan fazla Al barındıran alaşımlar)
2xx.x	Bakır (Ana alaşım elementi)
3xx.x	Silisyum, bakır ve /veya magnezyumla birlikte.
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay

9xx.x	Diğer Elementler
6xx.x	Kullanılmayan seri

1.6.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

1.6.2.1. Yüksek mukavemet ve hafifliği

Alüminyum, 26,98 atomik ağırlığa ve 2,70 gr/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bu değerler, alüminyumun magnezyumdan sonraki en hafif metal olmasını sağlar ve yaygın olarak kullanılan çelik yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Sıcaklığın artmasıyla alüminyumun yoğunluğu diğer metaller gibi düşer. Alüminyum, diğer metallerle alaşımlandığında yoğunluğu daha da azalır. Metalin yoğunluğunu ve mevcut ağırlığını azaltmak aynı zamanda enerji, nakliye ve maliyet açısından tasarruf sağlamaktadır (Davis, 1993).

Mühendislikte kullanılan malzemenin ilk olarak değerlendirilen özelliklerinden biri gerilime dayanıklılığıdır. Alüminyum alaşımları, yüksek gerilimli çelikler ve diğer metaller sınıfında en fazla mukavemet özelliği mevcuttur. Alüminyum alaşımlarının mukavemeti 700 MPa'ya kadar çıkabilir (Kissell, 1996). Bu yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri, alüminyumu gemiler, vagonlar, uçaklar, kamyonlar ve otomobiller gibi vasıtalar haricinde merdivenler ve iskeleler gibi taşınabilir yapılar da yaygın olarak kullanıma müsaade etmektedir (European Aluminium Association, 1994).

1.6.2.2. İmalat ve şekillenme kolaylığı

Saf alüminyum, yumuşak ve tel formunu alması rahatlıkla olduğundan, presleme ve kalıplama gibi bilinen metotlarla basitçe şekil alabilir. Alüminyumun soğuk şekillendirilmesi sırasında, pekleşme katkı elemanlarına bağlı olarak kesiti daraldıkça, gerçek gerilmelerde yavaş yükselir (Ahlatçı, 1994).

Ekstrüzyon için alüminyum en uygun metallerden biridir. Bu yöntem, karmaşık kesitlere sahip parçaların tek bir işlemde üretilmesini sağladığı için özellikle faydalıdır. Örneğin, pencere ve kapı parçaları gibi alüminyum doğrama ürünlerin imalatında kullanılır (Çakanyıldırım ve Gürü, 2021).

1.6.2.3. Korozyon direnci

Alüminyum, kimyasal reaksiyonlara eğilimli bir metaldir. Oksijenle temas ettiğinde hızlı bir şekilde tepkimeye girer ve ince kaplı sıkı bir alüminyum oksit tabakası oluşturur. Bu sert oksit tabakası, metalin daha fazla oksidasyonunu önlemektedir. Alüminyumun sahip

olduğu bu ince oksit tabakası, diğer metallerinkinden daha incedir ve yaklaşık olarak 0,2 mikron kalınlığındadır. Elektron mikroskopunda, bu tabakanın sıkı ve gözeneksiz olduğu gözlemlenir. Bu ince, dayanıklı ve renksiz oksit tabakası, alüminyum yüzeyine sıkıca bağlanır ve hasar gördüğünde hızla yeniden oluşur. Bu nedenle, bu tabaka, metali oksidasyon durumuna karşı muhafaza eder ve kuvvetli bir korozyon direnci sağlar (Karakışlak, 1978).

Alüminyum alaşımlarının korozyona karşı direnci oldukça yüksektir. Bu sebeple, genellikle alüminyum herhangi bir koruyucu kaplama olmadan kullanılır. Alüminyumun saflığı arttıkça, korozyona karşı olan dayanıklılığı da artar. Korozyon direnci, metalin soğuk işlemlerle işlenmesiyle önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca, alüminyum ve alaşımlarının kimyasal maddelere karşı dayanıklı olması, kimya endüstrisi, petrol sektörü ve gemi yapımında kullanımını yaygınlaştırmaktadır (Ahlatçı, 1994; Kissell, 1996).

1.6.2.4. Yüksek elektriksel iletkenliği

Alüminyumun elektrik iletkenliği, tavllanmış bakırın iki katı kadar etkilidir. Düşük yoğunluğu sayesinde saf alüminyum, diğer metallerle kıyaslandığında daha iyi elektrik iletkenliği sağlamaktadır. Alüminyumun elektriksel performansı, saflığıyla doğrudan ilişkilidir. Araştırmalar, alüminyumun iletkenliğini azaltan alaşım elementlerinin üç gruba ayrıldığını göstermiş ve bu gruplar Tablo 6'da gösterilmiştir. Alüminyumun üstün elektriksel karakteristikleri, elektrik endüstrisinde, hava iletim hatlarında, trafolarında ve güç dağıtımında net bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır. Alüminyum tel sarkmaları, galvanizli çelik telle güçlendirildiğinde, kullanım alanı daha yaygın hale gelmektedir. Bu ürün, hala kullanılmaktadır, ancak yüksek mukavemetli tamamen alüminyum çok telli kablolar artık çoğu tesisatlarda tercih edilmez hale gelmiştir, çünkü yüksek mukavemet gerektiren alanlarda bazı kısıtlamalar söz konusu olabilir (European Aluminium Association, 1994).

Tablo 6: Alüminyumun Elektriksel İletkenliğini Azaltan Alaşım Elementler (Beljajew vd., 1974)

1.GRUP Altın, berilyum, nikel, silisyum, demir ve çinko	İletkenliği az düşürür.
2.GRUP Bakır, gümüş ve magnezyum	İletkenliği kuvvetli düşürür.
3.GRUP Titanyum, vanadyum, mangan ve krom	İletkenliği çok kuvvetli düşürür.

1.6.2.5. Yüksek termal iletkenliği

Alüminyum alaşımları, ısıyı etkili bir şekilde ileten alaşımlardır. Otomotiv endüstrisinde pistonlar, piston başlıkları ve otomobil radyatörleri gibi hızlı ısı transferi

gerektiren uygulamalarda tercih edilerek hem ısıtma hem de soğutma işlemlerine katkı sağlarlar. Alüminyumun saflık derecesi arttıkça, ısı ileten özelliği de artar. Alüminyum alaşımlarındaki ek elementler, kullanım alanlarına bağlı olarak önem kazanır. Örneğin, mangan ilavesiyle elektrik iletkenliği azalan alüminyum alaşımları özel uygulamalarda tercih edilmektedir (Karakışlak, 1978).

1.6.2.6. Yansıtma özelliği

Alüminyum, ışığın mükemmel bir yansıtıcısıdır. Üstüne gelen ışığın %75'ini ve ısı ile radyasyonun %90'ını yansıtır. Bu özellik, alüminyumun düşük emisyon özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Emisyon, malzeme yüzeylerinin radyasyon ve enerji yayma yeteneğini ifade eder. Alüminyumun yüksek yansıtma ve düşük emisyon yeteneği, reflektör ve yalıtım malzemesi şeklinde faydalanılmasına imkân sunmaktadır (European Aluminium Association, 1994).

1.6.2.7. Toksikite olmaması ve geri dönüşüm özelliği

Alüminyum geri dönüştürülebilirliği iyi bir metaldir. Geri dönüştürülen alüminyum, boksitten elde edilen alüminyuma göre yalnızca enerjinin %5'ini gerektirmektedir. Geri dönüşüme duyulan arzu, artış gösteren enerji masrafları ve çevreye duyulan hassasiyetle birlikte yükselişe geçmektedir. Alüminyumun geri dönüşümü; hurda biriktirme, hurdaya bölme ve parçalama, ergitme, alaşımlama, metal rafinasyonu, döküm, cüruf arındırma ve cüruf analizi gibi aşamaları içeren bir dizi prosesle gerçekleştirilmektedir (Car, 2019). İstenilen sonucun elde edilmesi, bu proseslerin en iyi verimle kullanılmasıyla sağlanır. Alüminyumun toksik olmaması nedeniyle, ambalaj endüstrisinde yiyecek ve içeceklerin dışında pişirmede kullanılan kaplar ve gıda işlemede kullanılan boru ve kaplar da yaygın olarak tercih edilir (Çakanyıldırım ve Gürü, 2021).

1.6.3. Alaşım Elementlerinin Alaşıma Etkisi

Berilyum elementi, magnezyum içeren alüminyum alaşımlarındaki oksidasyon kayıplarının azaltılmasına ve ilgili inklüzyonların en aza indirilmesine katkı sağlar. Alüminyum alaşımına %0,04'ten fazla oranda berilyum eklenmesi, demir barındıran intermetaliklerin tasarımını ve bileşimine etkide bulunur. Bu, mukavemetin ve sünekliğin önemli ölçüde artmasına olumlu yönde etki eder. Ayrıca, berilyum elementi, magnezyum elementinin Al-Fe-Si bileşiğinden uzaklaşmasına yardımcı olarak bileşime etki eder. Sertleşmenin istendiği durumlarda da alüminyum alaşımlarına berilyum ilavesi yapılır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Bor elementi, diğ er metall erle birleşerek boritlerin oluşumuna neden olur, örneğ in AlB_2 ve TiB_2 gibi. Ayrıca, tane inceltme amacıyla titanyum borid gibi alaşımlarda, aktif bir tane inceltme fazı olan $TiAl_3$ ile etkileşir. Bu, stabil bir çekirdek oluşturarak tane inceltmeyi sağlar. Metalik boritlerin işleme uygulamalarında olumsuz etkileri vardır, çünkü takım ömrünü azaltabilirler ve süneklik açısından olumsuz etkileri olan büyük inklüzyonları ortaya çıkarabilirler. Ayrıca, boritler çamurlaşmaya ve intermetallik fazların fırınlarda sıvı çökelti içinde çökmesine katkıda bulunabilirler (Kaufman ve Rooy, 2004).

Kadmiyum elementinin alüminyum alaşımlarına eklenmesi, hazırlanan alaşımların ağırlıkça %0,1'den fazla miktarlarda işlenebilirlik kabiliyetini artırmaktadır. Kadmiyum elementi, 1413 °F (767 °C) sıcaklık şartlarında uçuculuk özellikleri gösterir. Bu durumla ilgili önlemler alınmalıdır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Kalsiyum elementi, alüminyum alaşımına silisyum elementi eklenerek oluşturulan alaşımların zayıf bir ötektik değıştiricisidir. Kalsiyum elementinin ilavesi, hidrojen çözünürlüğünü artırır. Bu alaşımın içinde bulunan kalsiyum elementi genellikle ağırlıkça %0,005'ten fazla miktarda bulunur. Bununla birlikte, alüminyum ve magnezyum alaşımlarında, süneklığı olumsuz etkileyebilir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Genellikle krom elementinin alüminyum alaşımına takviye edilerek az miktarda olan konsantrasyonlarda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Bu proses, genellikle termal açıdan dengesiz olan bileşimlerde tercih edilir. Bu işlem, yaşlanma ve tane büyümesinin önlenmesini amaçlar. Krom elementi, sınırlı katı hal çözünürlüğü oluşturur ve bu sayede tane büyümesine olan eğilimi azaltmaktadır. Krom elementi genellikle korozyon direncini artırır. Ancak, bazı alaşımlarda çok konsantrasyonlarda, su verme duyarlılığına katkıda bulunabilir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Bakır elementi, sıvı alüminyum alaşımlarında ve ısı işleme durumuna maruz kalmış koşullarda mukavemeti ve sertliği artırmaktadır. Alüminyum alaşımına bakır eklenmesiyle elde edilen alaşımlar, genellikle ağırlıkça %4-%5,5 oranında bakır içerir ve ısı işleme şartlarına doğru formda cevap verir. Bu durum, genellikle geliştirilmiş sıvı alüminyum döküm karakteristiğı sağlar. Bakır elementi, genellikle korozyona karşı direncinin artmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak, özgün bileşimler ve malzeme şartlarında gerilme korozyonu özelliğine karşı hassasiyete katkı sağlayacaktır. Bazı durumlarda, alaşımlarda bakır oranının az olması istenir. Özellikle alüminyum ve çinko alaşımlarında, bakır elementinin konsantrasyonunu düşük tutarak stres korozyonunu engellemek amaçlanır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Demir elementinin alüminyum alaşımlarına eklenmesi, sıcak yırtılma direncini artırır ve lehikleme eğilimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu artışla birlikte, alaşımdaki demir oranının artması, esnekliği önemli ölçüde azaltır. Demir elementi, özellikle $FeAl_3$, $FeMnAl_6$, ve $AlFeSi$ gibi bazı alaşımlarla intermetalik faz oluşturarak reaksiyona girer. Çözünmeyen faz grubu, alüminyum alaşımının mikro yapısında kritik bir rol almaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında mikro yapıda gevreklenmeyi teşvik eder. Alaşım içindeki çözünmeyen faz grubunun oranı, artan demir miktarıyla birlikte döküm sırasında besleme ve akışkanlığı olumsuzluğa yönlendirir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Kurşun elementi, alüminyum alaşımlarının işlenebilirliğini artırma durumunda kritik görev almaktadır. Alüminyum alaşımına kurşun eklenerek istenen işlenebilirliğe ulaşılır ve genellikle bileşimde ağırlıkça %1'den fazla kurşun kullanılmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Magnezyum elementi, ısıtılma maruz bırakılmış alüminyum ve silisyum alaşımlarının dayanımını ve sertliğini kritik seviyede tesir eder. Bunun yanı sıra, bakır, nikel gibi farklı elementlerle birleştirilmiş daha karmaşık alaşımlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Üst seviyede mukavemete sahip alüminyum ve silisyum alaşımlarında genellikle %0,40 - %0,070 arasında magnezyum bulunmaktadır (Kaufman & Rooy, 2004).

Magnezyum ilavesiyle elde edilen alüminyum alaşımları, parlak yüzey kaplaması istenen işlerde tercih edilir. Ayrıca, korozyon direnci yüksek ve süneklik istenen uygulamalarda sıkça kullanılır. Genellikle, bileşimlerde ağırlıkça %4 ila %10 arasında magnezyum bulunur. %7'yi geçen magnezyum barındıran bileşimler genellikle ısıtılma tabii tutulur (Kaufman ve Rooy, 2004).

1.6.4. Alüminyum Alaşımlarında Akıcılık

Ergiyeğin kalıbın tamamına nüfuz etmesi, akıcılık olarak tanımlanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının bu özelliği nispeten zayıftır. Alaşımlama, alüminyuma daha iyi bir akıcılık kazandırmaktadır. Ötektik bileşimler genellikle en yüksek akıcılık değerlerine sahiptir. Akıcılığı etkileyen faktörlerde sıcaklık önemli bir yer tutmaktadır. $679^{\circ}C$ ile $760^{\circ}C$ arasında, kimyasal bileşimin içerik farketmeksizin sıcaklık arttıkça akıcılık özelliği artış sağlayacaktır (Metals Handbook, 1978).

Alaşım içinde bulunan cürufklar ve yabancı maddeler akıcılık yetisine dezavantaj sağlamaktadır. Alaşım içindeki alüminyum, sıvı metalin yüzey kısmında zarımsı bir yapı oluşturur. Bu yapı, sıvının akıcılık yetisini düşürür. Bu durum, sıvı yüzeyi artışıyla yükseliş göstermektedir. Alaşımlar tekrar ergitildiğinde, alüminyum arttıkça, akıcılık yetisi düşebilir. Bu

durum aynı zamanda alaşımın dokusunu kabalaştırır ve mekanik karakteristiği azaltır. Akıcılığı etkileyen bir diğer faktör ise viskozitedir. Viskozite, bir sıvının yüzey gerilimi ya da akıcılığa karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

Üniversal olarak kabul gören bir deney metodu yöntemi olmasa da birçok akıcılık testi yapılmaktadır. Bu testler arasında, şerit akıcılık test kalıbı veya spiral akıcılık test kalıbı gibi çeşitli test kalıpları bulunmaktadır. En yaygın olanı oda sıcaklığında spiral şeklindeki bir akış kanalı içerisine sıvı metalin dökülmesidir. Sıvı metalin bu kanal içinde katılaşmasına kadar alabildiği yol, akıcılık değerini gösterir. Bu testler yaygın olarak kullanılmalarına rağmen çeşitli yorumlara maruz kalmaktadır. En kritik eleştiri noktalarından biri, testin yeniden yapılabilirliğinin durumunun azlığıdır. Metallerin akıcılığı, metal değişkenleri (kimyasal bileşim ve katılma skalası), kalıp ve kalıp/metal değişkenleri (kaplama ve termal iletkenlik) ve deney varyantları (süper ısı, oksit içeriği) gibi çokça faktörün tesirine girer. Bundan dolayı, bu parametrelerin tümünü denetim altına almak çeşitli deneylerde zorlaşmaktadır (Balaban vd., 2020).

1.6.5. Alüminyum Alaşımlarının Çekme Özellikleri

Alüminyum alaşımların sıvı fazdan katı faza geçişi sırasında, kimyasal bileşimde %3,5'ten %8,5'e kadar hacimsel bir azalma meydana gelir. Hacimdeki azalış öbür alaşımlardakiyle aynı şekilde meydana gelir, ancak alüminyumda daha belirgindir. Alüminyum alaşımlarında hacim küçülme azalsa da birçok alaşıma göre hala yüksektir. Bu nedenle, hacim küçülmesi çeşitli hatalara (çarpılma, çatlama, çökme vb.) yol açabilir. Ayrıca, düşük özgül ağırlık, besleme zorluklarını artırır. Dolayısıyla, dökümde bu özellikler göz önünde bulundurulmalıdır (Sigworth, 1983).

Hücrelerin merkezindeki çekinti boşlukları, dentrit kolları arasında küçük boşluklar ve dağılmış gözenekler şeklinde, uzantılı bir biçimde oluşabilir. Çekinti boşluklarını azaltmak için, tane inceltme ve modifikasyon prosedürleri ile birlikte eriyiğin temizlenmesi gerekmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan araştırmalarda, çekme porozitesinin şeklinin düzensiz ve salkımlı olduğu görülmüştür (Anson ve Gruzleski, 1999).

Tablo 7: Döküm Alaşımlarının Hacimsel Çekme Yüzdeleri (Brown, 2000)

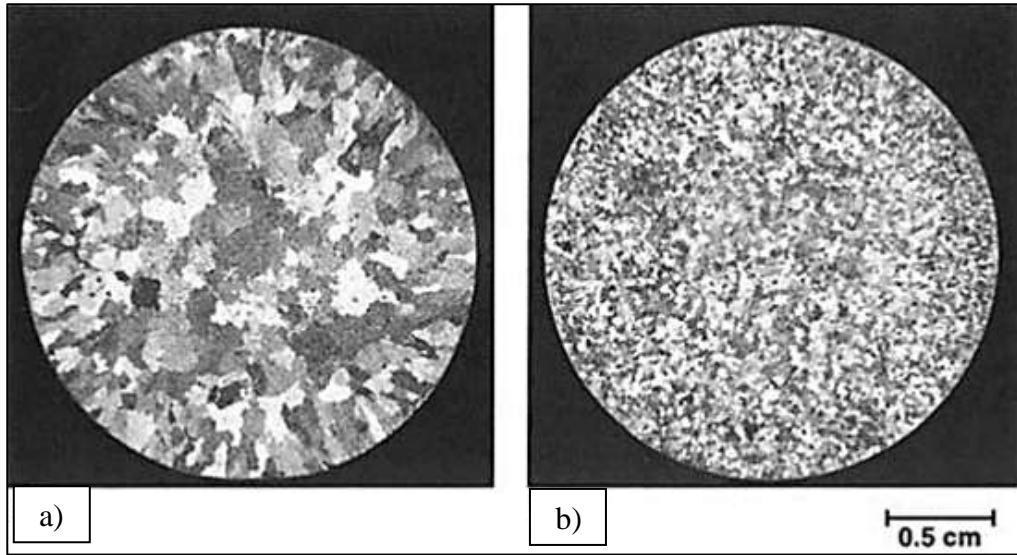
Döküm Alaşımı	Hacimsel Çekme (%)
Çelik	6
Bronz	7,5
Dövülebilir dökme demir	5

Pirinç	6,5
Alüminyum	8
Al-Si12	3,5
Al-Cu4Ni2Mg	5,3
Al-Si10	5
Al-Si5Cu2Mg	4,2
Al-Mg5Si	6,7
Al-Si9Mg	3,4
Al-Si7NiMg	4,5
Al-Cu5	6

1.7. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Tane inceltme, tane-sınır bileşenlerini daha iyi dağıtarak yüzey alanını maksimize etmektedir. Bu işlem sırasında elde edilen tane boyutu, tane inceltici tipi ve miktarı, döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Tane inceltme, mukavemeti, sünekliği, homojenliği ve katılaşma sırasında beslemeyi geliştirmek için kullanılır. Çok yüksek dayanım ve esnek özelliğine sahip olmak amacıyla ince ve eş eksenli tane meydana getirilmek hedeflenir. Az miktarda alaşım barındıran bileşimlerde yüksek termal gradyanın tesiriyle meydana gelen iri taneli yapı, mekanik karakteristiklere olumsuz etkide bulunur. Meydana gelen tanelerin türü ve büyüklüğü, alaşım kompozisyonu, katılaşma miktarı ve tane çekirdeklenme alanlarının konsantrasyonuna bağlı olur (Kaufman ve Rooy, 2004).

Ergiyik içerisinde çeşitli element takviyeleri ile tane sayısı özelliklerini iyileştirmek hedeflenir. En çok tercih edilen tane inceltici alaşımlar titanyum ve bordan oluşmaktadır. Bilhassa bor ile birleştiğinde, titanyum güçlü yapıda çekirdeklenme oluşturur ve buna sebep en çok tercih gören inceltici elementtir. Alüminyum-titanyum bileşimlerinde çoğunlukla ağırlıkça %3 ila %10 arasında titanyum vardır. Titanyum tek başına ağırlıkça %0,02 ila %0,15 arasında takviyede bulunabilir ve tesiri 40 dakika içinde yitirir. Bor elementine titanyum takviyesi neticesinde yüksek seviyede ince tane meydana gelmektedir. Titanyum ve bor, alaşım olarak veya ergimiş durumda takviyede bulunulabilir. Tane incelticinin tesiri Şekil 1'de gösterilmiştir (Brown, 1999; Kaufman ve Rooy, 2004).



Şekil 1: Tane İncelticinin Etkileşimi a) Tane İnceltici İlavessiz b) Tane İnceltici İlaveli (Kaufman ve Rooy, 2004)

1.8. ERBİYUM

Erbiyum, toprak elementlerinden biridir ve Carl Gustaf Mosander vasıtasıyla 1843 yılında ortaya çıkmıştır. Erbiyum elementinin keşfi, gadolinit adı verilen bir mineralin bulunmasıyla gerçekleşmiştir. 1787 yılında İsveç'in Ytterby kasabasındaki bir taş ocağında siyah bir mineral keşfeden kimyager Carl Axel Arrhenius'tur. Gadolinit minerali diğer kimyagerler tarafından incelendiğinde 16 farklı yeni element ortaya çıkmıştır. Mosander, yoğun çalışmalarının sonucunda gadolinitü üç parçaya ayırmıştır: yttria (beyaz itriyum oksit), terbia (gül renkli erbiyum oksit) ve erbia (sarı terbiyum oksit). Erbiyum oksidi "terbia" adını almıştır. 1934 yılında ise Wilhelm Klemm ve Heinrich Bommer, erbiyum klorürünü potasyumla ısıtarak saf erbiyum metalini elde etmişlerdir (Makaleler, 2021).

Erbiyum, periyodik tabloda Er sembolüyle temsil edilen ve lantanitler grubunda yer alan bir elementtir. Periyodik tabloda 44. sırada yer almasına rağmen saf olarak bulunmaz; başka nadir toprak elementleriyle benzer özelliklere sahiptir. Ancak, diğer nadir toprak elementlerine nazaran yüksek korozyon direnci özelliği bulundurmaktadır. Erbiyum orta derecede reaktiftir ve hekzagonal kristal yapıya sahiptir. Katı haldeki saf erbiyum metalinin şekillendirilmesi kolaydır, yumuşaktır ve diğer lantanitlerden farklı olarak havada kararlıdır, yani hızla oksitlenmez. Ayrıca, diğer nadir toprak elementlerine göre nazaran ekonomiktir. Erbiyumun sahip olduğu bazı özellikler Tablo 8'de verilmiştir (Makaleler, 2021).

Tablo 8: Erbiyum Elementine Ait Özellikler (Wikipedia, 2022)

Atomik Özellikleri	
Atom Numarası	68
Atom Kütlesi ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	167,259
Atom Yarıçapı (pm)	175
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Oksidasyon Düzeyleri	3
Elektron Alınanlığı	1,24
Fiziksel Özellikleri	
Erime Noktası	1802 K, 1529 C, 2784 F
Kaynama Noktası	3141 K, 2868 C, 5194 F
Buharlaştırma Isısı ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	280
Katı Haldeki Yoğunluk ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	9,066
Sıvı Haldeki Yoğunluk ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	8,86
Isı Kapasitesi ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	28,12
Çeşitli Özellikleri	
Elektriksel Özdirenci ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)	0,860
Isısal İletkenliği ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	14,5
Isısal Genleşmesi ($\mu\Omega \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	12,2
Brinell sertlik (HB)	814

Erbiyumun en önemli uygulama alanları lazer teknolojisi ve fiber optik iletişim hatlarıdır. Metalik formda kullanımı ise sınırlıdır, zira metalin havada oksitlenme ve suyla tepkimeye girme eğilimi vardır. Ancak, erbiyum bazı alaşımlarda farklı özelliklere sahip olabilir. Örneğin, nikel ile alaşımlandığında yüksek manyetik özellikler kazanmaktadır. Alüminyumla alaşımlandığında ise tane boyutu küçülür ve mukavemeti artar. Bu özellikler erbiyumu güneş gözlükleri, cam endüstrisi ve kaynak gözlüklerinin yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir kılar (Makaleler, 2021).

İKİNCİ BÖLÜM

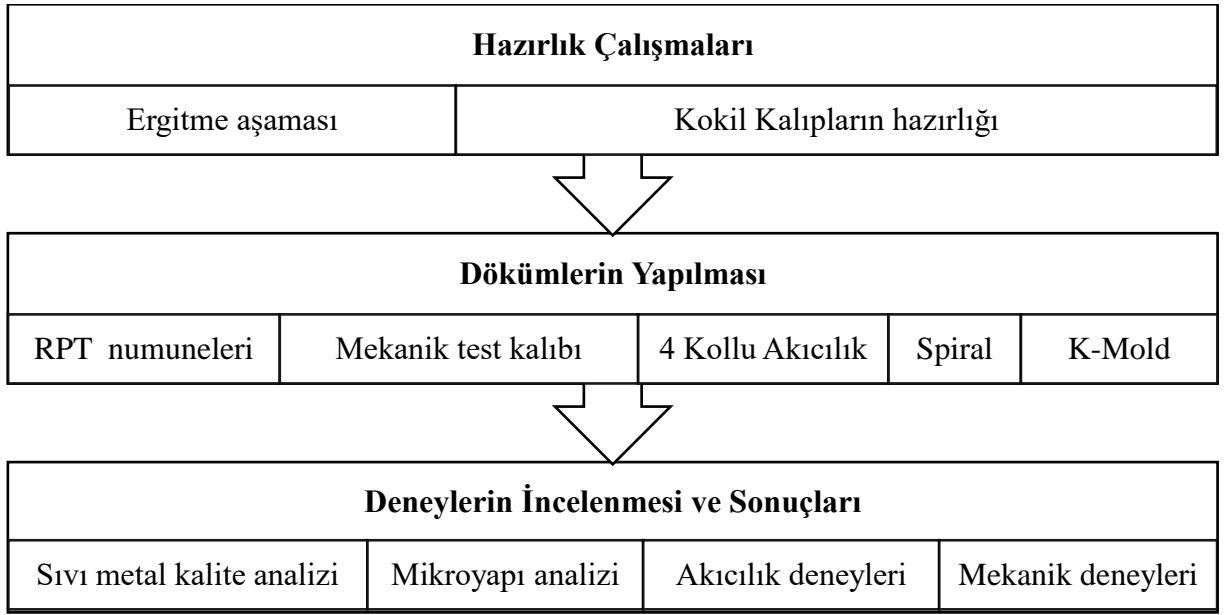
2. YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sunumu amaçlanmaktadır. Araştırmada, Etial 160 standardı alüminyum alaşımına farklı oranlarda Erbiyum (Er) elementi takviyesinin alaşımın karakteristiğiyle etkileşimi analiz edilecektir. Bu kapsamda, Er takviye miktarı %0,03, %0,05 ve %0,1 durumda şekilde belirlenmiş ve farkın belirlenmesi için referans numuneler kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Er ilavesinin etkisinin değişen oranlarda belirlenmesi amacıyla, öncelikle vakum altında katılaştırma (RPT), K-mold kalıbı, mekanik test kalıbı, farklı kesit kalınlıkları mevcut 4 kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbı kullanılmıştır. Dökümler için kalıpların ön ısıtma sırasında sıcaklık değeri 250 °C ve döküm anında sıcaklık değeri 720 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneysel parametreleri ve dökülen kalıpların detayları Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9: Deneysel Parametreleri

Etial 160	Döküm Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	RPT	K-Mold	Spiral Akıcılık	4 Kanallı Akıcılık	Mekanik Test Kalıbı
İlavesiz	720°C	250°C	+	+	+	+	+
%0,03 Er	720°C	250°C	+	+	+	+	+
%0,05 Er	720°C	250°C	+	+	+	+	+
%0,1 Er	720°C	250°C	+	+	+	+	+

Sıvı metal temizliğinin etkileşimini değerlendirmek için K-mold kalıbı ve RPT numuneleri üretilmiştir. Akıcılık etkileşimini analizi amacıyla, özel olarak tasarımı yapılmış değişik kesitler bulduran 4 kanala sahip akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıplarına döküm prosesi uygulanmıştır. Mikroyapı analizi için örnekler akıcılık test örneklerinden temini sağlanmıştır. Mekanik deney kalıbına uygulanan döküm prosesinden temin edilen örneklere ısıtma işlemi sonrasında çekme ve sertlik deneyleri yapılmıştır. Yapılan hazırlıklar ve süreç, Şekil 2'de ifade edilmiştir.



Şekil 2: Deneysel Çalışmalar Sırasında Süreç Aşamaları

2.1. DÖKÜM DENEYLERİNE HAZIRLIK İŞLEMLERİ

Döküm başlamadan kalıpların ulaşması gereken ön sıcaklık işlemi Şekil 3'te verilen 40x60 cm ölçülerinde ve 50°C ila 300°C'ye kadar ısı denetimi bulunduran Elektromag M 4060 markaya sahip ısıtıcı tabla vasıtasıyla yapılmıştır. Döküme başlamadan kalıplar ısıtıcı tabladan yardım alınarak 300°C olacak şekilde ısıtılıp döküm için ön koşul sağlanmaya çalışılmıştır. Fakat döküm işlemi başlamadan hemen önce kalıp sıcaklığı 250°C ölçülmüştür.

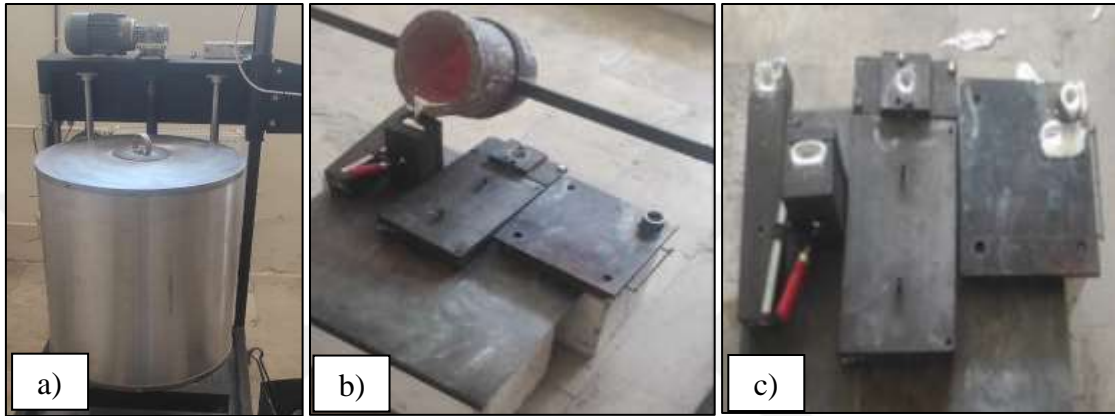


Şekil 3: Isıtıcı Tablaya Ait Görsel

2.2. ERGİTME VE DÖKÜM İŞLEMLERİ

Ergitme süreçleri, 8 kg sıvı alüminyum kapasitesi olan ve 10 kW gücü mevcut elektrik direnç ocağında, SiC pota içerisinde sonuçlandırılmıştır. Ergitme işlemi sırasında birincil Etial 160 kütleye sırayla %0,03, %0,05 ve %0,1 Er ilavesi yapılmış ve ilavesiz dökümler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Er ilavesi için AlEr3 master alaşımı kullanılmıştır. Şarj malzemesinin ağırlığı, ergitme işlemi boyunca sürekli olarak 4000g olarak hazır hale

getirilmiştir. Fırında, şarj malzemesi dilim halindeki kütlelerin 720°C şeklinde ergitme işlemi ardından, hassas terazi vasıtasıyla tartılan AlEr3 alaşımları ocak içerisine ilave edilmiştir. %0,03 Er ilaveli deneyde 46 gr, %0,05 Er ilaveli deneyde 93 gr ve %0,1 Er ilaveli deneyde 120 gr master alaşımı ilavesi gerçekleştirilmiştir. Er takviyesi ardından ergiyik sıcaklığı 720°C ölçümü ardından, pota döküm prosesini meydana getirmek için dışarı alınmıştır. Döküm ardından kokil kalıplardan numunelerin kolay bir şekilde çıkarılması için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı olarak bor nitür tatkik edilmiştir. Şekil 4'te ergitme gerçekleştirilen ocak, döküm esnasından ver döküm sonrası kalıplara ait örnek resimler verilmiştir.



Şekil 4: a) Elektrik Direnç Ocağı, b) Döküm, c) Döküm Sonrası Kalıp Açılmadan Görşeller

2.3. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ

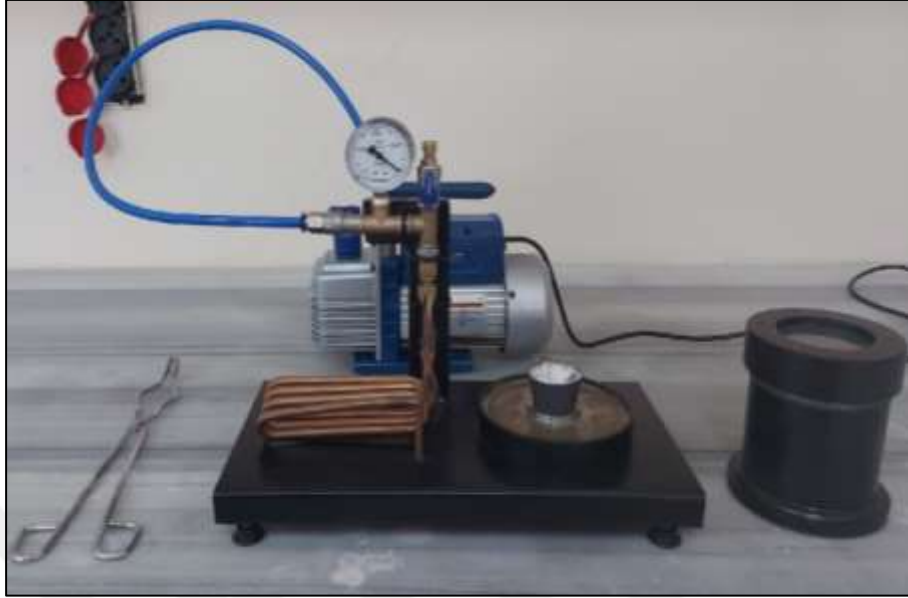
İncelemeye başlarken kalıplardan örnekler temin edildi. RPT, K-mold, dört kanallı akıcılık kalıbı, spiral akıcılık kalıbı ve mekanik deney amacıyla örnekler kalıplardan çıkarıldı. Numuneleri analizleri, açıklamaları ve fotoğrafları ilgili kısımlarda sunulmuştur.

2.3.1. RPT Numunelerinin Analizi

RPT "Reduced Pressure Test" (Azaltılmış Basınç Testi) için bir kısaltma olarak kullanılır. RPT cihazı, çalışma prensibi olarak, ergitilmiş metali bir kepçe ile cihazdaki krozeye döküp, düşük basınç altında katılaştırma işlemini gerçekleştirilmesiyle meydana gelir. Sıvı metal kalitesinin belirlenmesi için indirgenmiş basınç testi önemli bir adımdır ve endüstride sıvı metal kalitesini ölçmek için tercih edilir.

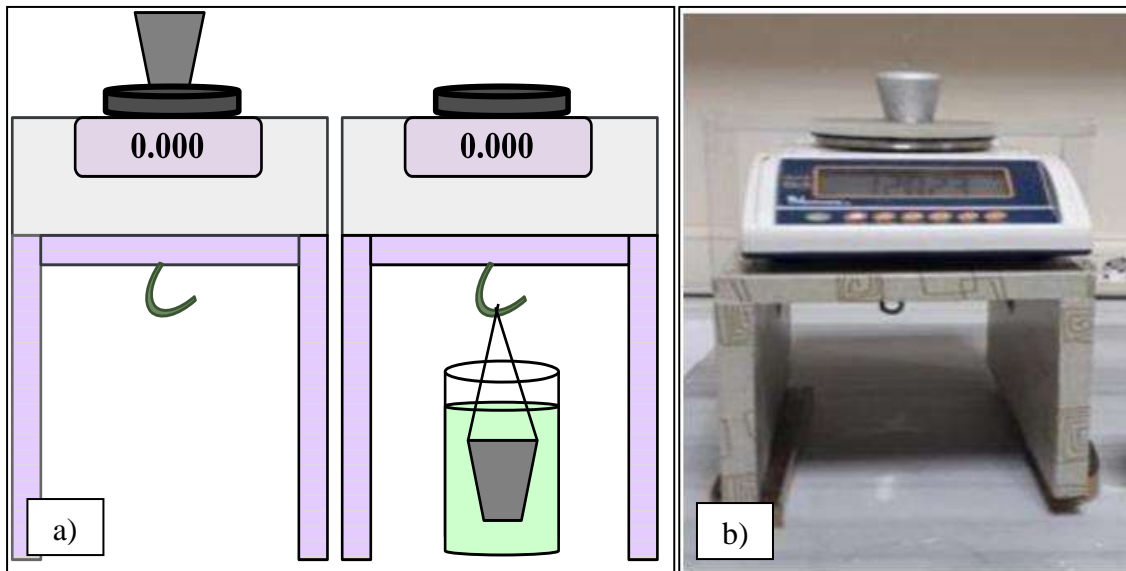
Azaltılmış basınç testi, dökümhanelerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir çünkü basit, ucuz, kolay tekrarlanabilir ve hızlı sonuçlar sağlar. Bu teknik, sıvı alüminyumun indirgenmiş basınç altında katılaştırılması esnasında gaz gözeneklerinin meydana gelmesidir. Gözeneklerin oluşumuna katkıda bulunan gaz ve inklüzyonların büyümesini kolaylaştırmak amacıyla, yaklaşık 125 gram sıvı metal, Şekil 5'te görseli olan deney cihazı içerisine tatkik

edilir, bu da katılaşıma sırasında basıncı azaltır. Alüminyum alaşımının temizlenmesinden önce ve sonra, RPT deney cihazında basınç 80 mbar'a azaltılır ve ergiyiğin tamamen katılaşması beklenir.



Şekil 5: Azaltılmış Basınç Deney (RPT) Cihazı

RPT cihazından meydana getirilen örneklerin yoğunluk ölçümü Arşimet metodu esas alınarak uygulanmıştır. Bu metoda göre, her bir numunenin ilk havada daha sonra sıcaklığı 20°C olarak ölçülen ve yoğunluğu $d_s=0,99821 \text{ g/cm}^3$ olarak alınan saf suda ağırlıkları ölçülmüştür. Tartım faaliyeti, hassas terazi ile Şekil 6'da gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6: a) Yoğunluk Ölçüm Deneyi Gösterimi, b) Cihaz Görseli

Ulaşılan ağırlık verilerine Eşitlik 1'deki formüle dayanılarak hesaplama yapılmıştır. Burada d_n döküm numunenin yoğunluğu, m_h numunenin havadaki ağırlığı, m_s numunenin saf

sudaki ağırlığı, d_s oda sıcaklığında suyun yoğunluğunu belirtmektedir. Numunelere ait % gözenek değerleri ise Eşitlik 2’de verilen formülle tespit edilmiştir.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times d_s \quad (\text{Eşitlik 1})$$

d_n -döküm numunelerin yoğunluğu,

m_s - numunelerin saf sudaki ağırlığı,

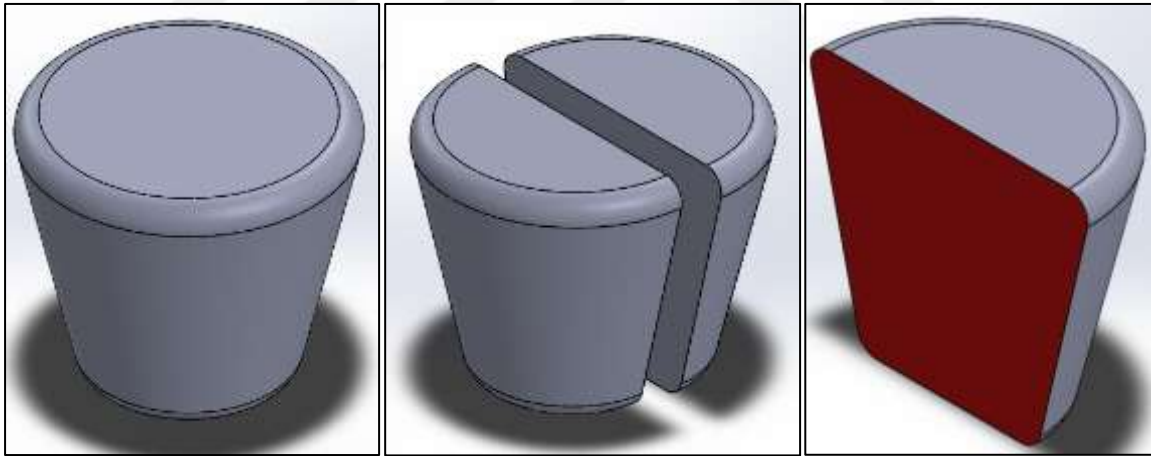
d_s - oda sıcaklığında suyun yoğunluğu

m_h -numunelerin havadaki ağırlığı

Gözenek miktar hesabı Eşitlik 2’deki formül ile analiz edilmiştir.

$$\% \text{ Gözenek} = [(Teorikyoğ. - Deneyselyoğ.) / Teorikyoğ.] * 100 \quad (\text{Eşitlik 2})$$

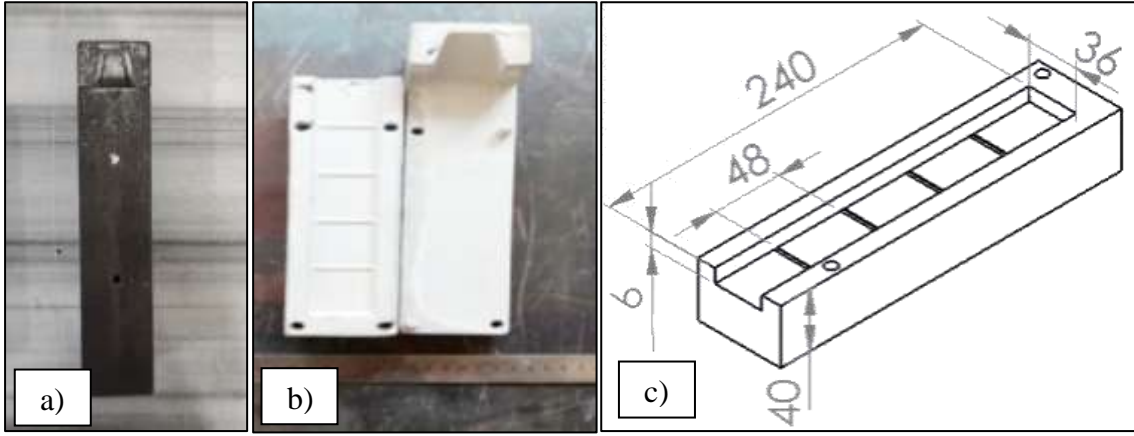
RPT numunelerinin sahip olduğu gözeneklerin tespiti için elde edilen parçalar Şekil 7’de anlatıldığı üzere dikey şekilde 2 eşit parçaya bölünmüş ve yüzeyler zımparalama aşamasından sonra taranıp tespit edilmiştir.



Şekil 7: RPT Numunelerinin Gözenek Tespit Aşamaları

2.3.2. K-Mold Numunelerinin Analizi

K-mold kalıbıyla yapılan deneylerde, sıvı metalin temizlik düzeyi ölçülmüştür. Deneylerde yaklaşık 400 gram sıvı metal, Şekil 8’de görülen K-mold kalıbına dökülmüştür. Bu kalıplardan, her biri 240x36x6 mm boyutlarında ve dört eşit kesit kalınlığı mevcut olan deney numuneleri oluşturulması sağlanmıştır. Katılama işlemi bitmesi ardından kesitler kırılarak yüzeylerde olan kirlilik miktarı belirlenmiştir.



Şekil 8: a) K-Mold Test Kalıbı Dış, b) K-Mold Test Kalıbı İç, c) Katı Model Görüntüsü

Ergiyiğin temizliğini kontrolü için K mold kalıbında K değeri Eşitlik 3'te görüldüğü gibi belirtilir. Elde edilen veri, ergiyik temizlik analizi sebebiyle deney kısımları yüzeyinin gözle analizine ve yüzeydeki tamamlamaların sayısına dayanır. Eşitlikteki K; kırık yüzeyinde bir örneğin bir parçasında yer alan inklüzyon sayısını (s), küçük probunun parçasında mevcut olan toplam kapanım sayısını (n) ve incelenen örnek sayısını ifade eder.

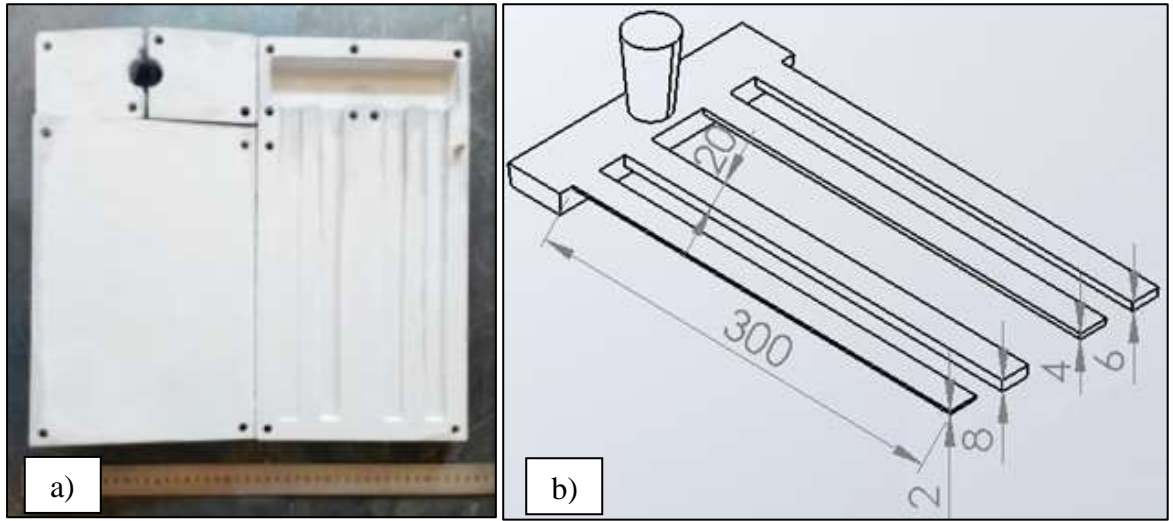
$$K=s/n$$

(Eşitlik 3)

Eğer eşitlik kullanılarak belirlenen K değeri 0,5'in altındaysa, sıvı metalin temiz olduğu kabul edilir; 0,5 ile 1 arasındaysa, kabul edilebilir düzeyde temiz olduğunu gösterir. Ancak K değeri 1'in üstündeyse, sıvı metalin temizliğe ihtiyacı olduğunu ortaya çıkarır (Balaban ve ark).

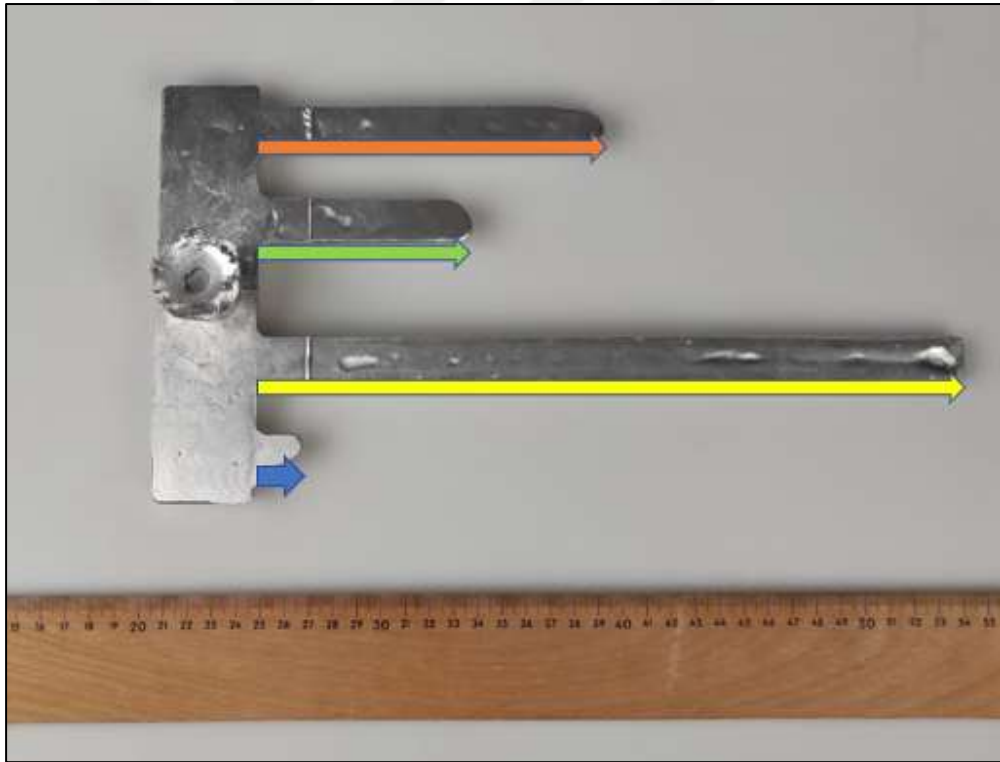
2.3.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin Analizi

Farklı kesit kalınlıklarında sıvı metalin ilerleme mesafesini ölçmek için uygun koşullarda bir model tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım, alaşımların akıcılık özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Akıcılık kalıbının görseli ve numune ölçütleri Şekil 9'da sunulmuştur. Sıvı metal kanal uzunluğu, tüm kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlememesi için 300 mm olarak belirlenmiştir, böylece sıvı metalin ilerleme mesafesi ölçülebilir hale gelmiştir. Ayrıca, farklı kesit kalınlıklarıyla ilgili olarak, ilgili döküm koşullarında hangi kalınlıkta dökümlerin yapılabileceğini belirlemek mümkün olacaktır.



Şekil 9: a) 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı, b) Numune Ölçüleri

Döküm işlemi ardından değişken ölçütlerde (2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm) sıvı metal ilerleme mesafe ölçümü Şekil 10'da görsel ifade edilmiştir. Daha sonrasında kesitlerin en uç noktasından elde edilen parçaların mikroyapı analizi değerlendirilmeye alınmıştır.

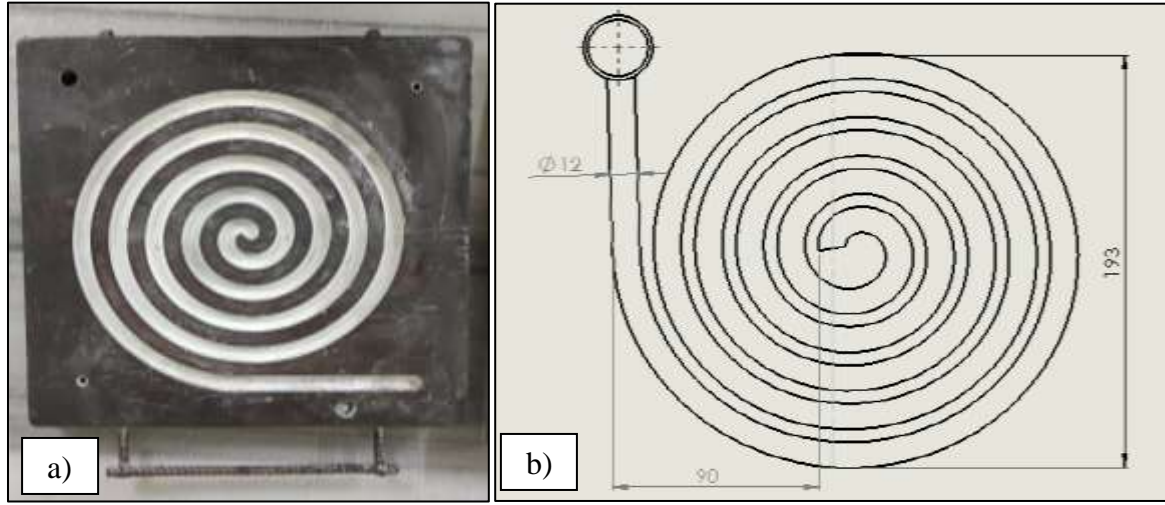


Şekil 10: Sıvı Metal İlerleme Mesafe Tespiti Gösterimi

2.3.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin Analizi

Akıcılık değerlendirilmelerinde, önemini koruyan ve Şekil 11'de gösterilen spiral akıcılık test modeli tercih edilmiştir. Tasarlanan kalıbın kokil kalıba imalatı gerçekleştirilmiş ve değişen sıvı metal kalitelerine ait sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçülmüş ve mikroyapı

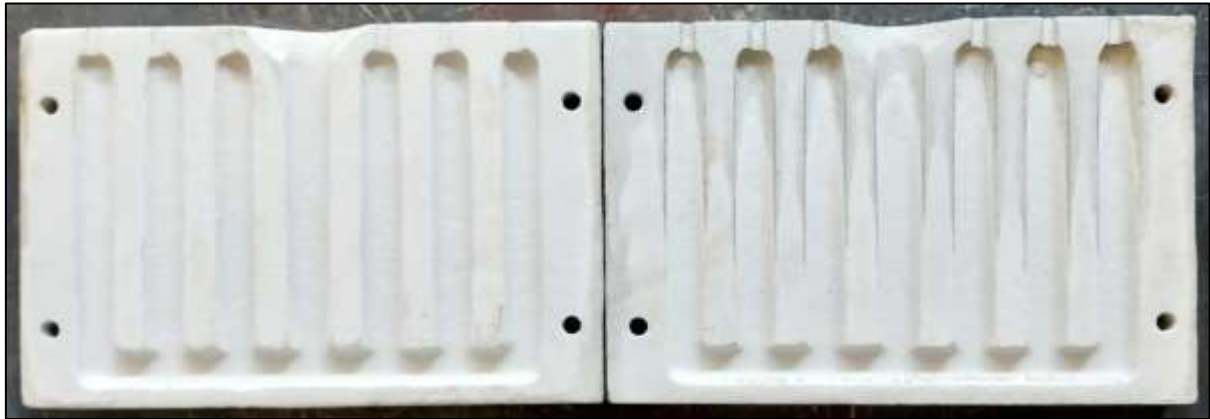
numuneleri temin edilmiştir. Numunelere ait sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü imaj analiz tekniği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11: a) Spiral Akıcılık Kalıbı Görseli, b) Spiral Akıcılık Kalıbı Katı Model Görseli

2.3.5. Mekanik Test Kalıp Numunelerinin Analizi

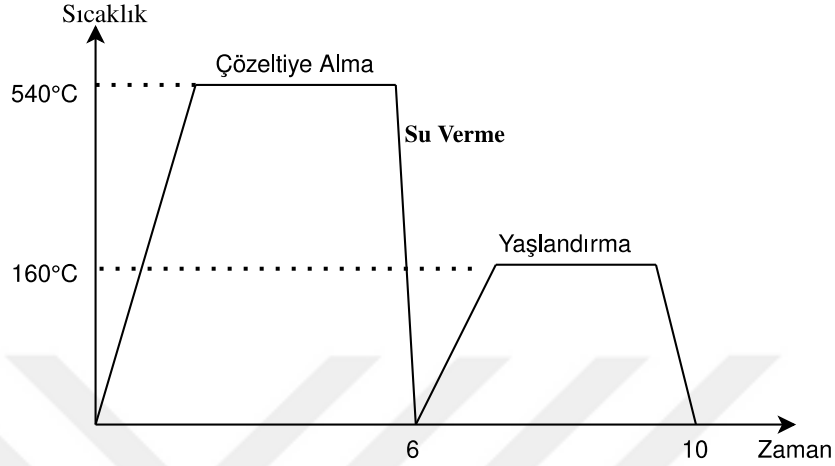
Etial 160 alaşımına yapılan Er takviyesi mekanik özellikler üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla dört farklı kimyasal kompozisyonda (ilavesiz, %0,03, %0,05 ve %0,1 Er ilaveli) çekme çubuğu numuneleri dökülmüştür. Mekanik testler için kullanılan altı çubuklu mekanik test kalıbı Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12: Mekanik Test Kalıbı Görseli

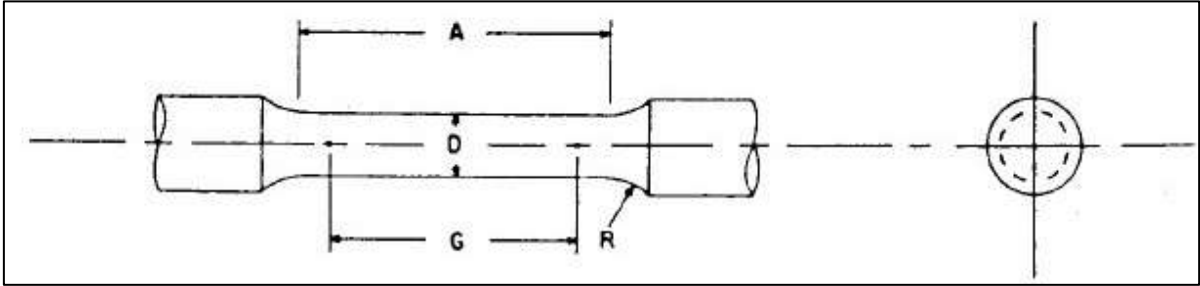
Farklı oranlarda Er ilave edilen numunelerden çekme çubukları temini yolluklardan ayrılarak sağlanmıştır. Çubuklar, testlere geçmeden önce T6 ısıl işleme maruz bırakılmıştır. Bu yöntem, yumuşak ve esnek bir matris içinde ince ve sert bir çökeltinin düzenli bir şekilde dağılmasını sağlayarak mukavemeti artırmak için kullanılan bir prosestir. Yaşlandırma prosesi, çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarından oluşur. Numuneler, ısıl işlem fırınında önce 540 °C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 6 saat boyunca beklemeye alınmıştır. Daha sonra

fırından çıkarılarak 80 °C'lik suya konulmuştur. Numuneler, su verme işleminden sonra yaşlandırma için 160 °C'de 4 saat bekletilmiştir. Yaşlandırma işleminden sonra numuneler, fırından alınarak havada soğumaya işlemi için beklenmiştir. Isıl işleme ilişkin aşamalar, Şekil 13'te ifade edilmiştir.



Şekil 13: Isıl İşlem Uygulama Şeması

Isıl işlem tamamlandıktan sonra, numuneler çekme testleri için E8/E8M-13a standardına göre işlenmiştir. Şekil 14'te görsel olarak ifade edilen deney çubuğu A: 62 mm uzunlukta D: 9mm çapında R: 8mm çapında ve G: 54 mm ölçülerindedir.



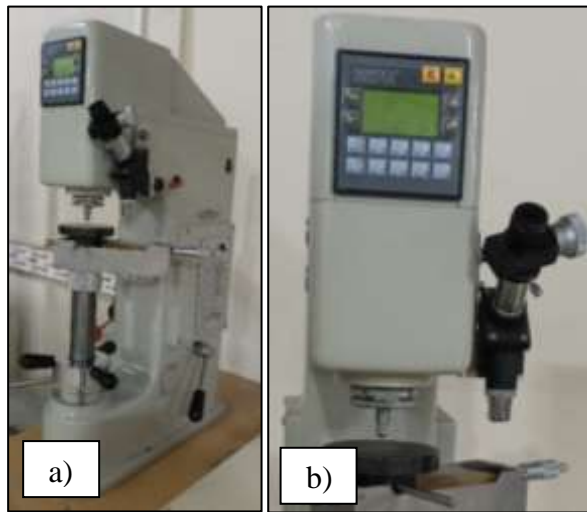
Şekil 14: Çekme Deneyi Numunesi

Çekme deneyi için numuneler, standarda göre işlenerek Şekil 16'da gösterilen ve 100 kN kapasiteli MTS Hydraulic Wedge Grip marka ve 370.10 modele sahip cihaz vasıtasıyla 1 mm/dk hızında çekilmeye maruz bırakılmıştır. Testler, Şekil 15'de gösterilen çekme deneyi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyiyle, akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi değerleri belirlenmiştir.



Şekil 15: Çekme Deneyi Cihazı

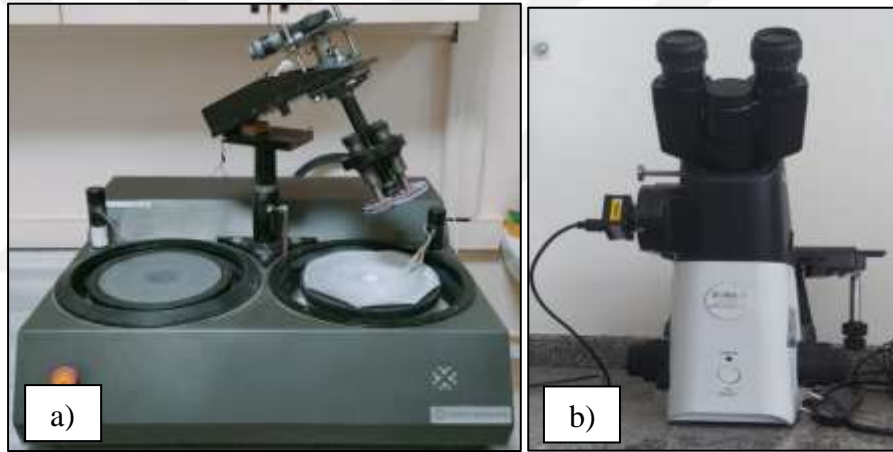
Numunelerin sertlik ölçümü Brinell yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümler, oda sıcaklığında BMS markalı DIGIROCK-RBOV modeli sertlik deneyi cihazında gerçekleştirilmiştir, HB test metodu kullanılmış olup, 1,6 mm çapında bir bilyenin yardımıyla 2,5 kgf ön yük ve 62,5 kgf toplam yük tesirinde her örnekten en az 10 adet değer alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Sertlik test cihazı Şekil 16'da sunulmaktadır.



Şekil 16: a) Sertlik Deneyi Cihazı Yan Görünüş, b) Sertlik Deney Cihazı Ön Görünüş

2.3.6. Mikroyapı Analizleri

Mikroyapı analizleri amacıyla, spiral akıcılık döküm numunesi ve dört kollu akıcılık döküm numunesinin uç bölgelerinden numuneler temin edilmiştir. Numuneler, proses sürecini kolaylaştırmak ve daha fazla numunenin tek seferde hazırlanmasını sağlamak amacıyla bakalit kullanılarak kalıplanmıştır. Bakalite alınan parçalar öncelikle 180, 400, 800, 1200 ve 2500 numaraya sahip zımparalar yardımıyla zımparalama işlemine maruz bırakılmıştır. Numunelere tatbik edilen zımparalama işlemi sonrasında $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ alümina süspansiyonu ve finalde $0,05\mu\text{m}$ 'lik kolodial silika ile parlama işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi ardından numuneler Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCl , 1,0 ml HF) ile dağlama prosesine tabi tutulmuştur. Tatbik edilen dağlama süreci ardından NMM-800/820 serisine sahip metalürjik optik mikroskop desteğiyle mikroyapı analizi yapılmıştır. Şekil 17'de metalografik hazırlık ve inceleme sürecinde kullanılan zımparalama-parlatma cihazı ve kameralı mikroskop görselleri verilmiştir.



Şekil 17: a) Zımparalama ve Parlatma Cihazı, b) Optik Mikroskop Cihazı

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu kısımda, deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen verilerin sonuçları ve değerlendirmeleri sunulacaktır. İlk olarak, Etial 160 alüminyum alaşımı ilavesiz olarak dökülmüş ve ardından farklı miktarlarda Er takviyesiyle kokil kalıplara döküm prosesi uygulanmıştır. Çalışmalarda, RPT ve K-mold kokil kalıplara uygulanan dökümler incelenmiş ve sıvı metal kalitesi değerlendirilmiştir. Ayrıca, spiral ve 4 kanallı akıcılık kalıplarında sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçülmüş, mikroyapı analizleri yapılmış ve mekanik testler için çekme ve sertlik deneyleri tercih edilmiştir.

3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ

Döküm proseslerinde tercih edilen alaşım ve alaşıma eklenen Er takviye oranlarının doğruluğu denetimi için kullanılan numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10: Döküm Deneyleri Kimyasal Bileşim Sonuçları (% Ag.)

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Er	Al
İlavesiz	0,245	8,46	3,70	0,121	0,182	0,0089	0,087	0,0135	-	Kalan
%0,03 Er ilaveli	0,201	8,66	3,21	0,107	0,143	0,0090	0,007	0,0135	-	Kalan
%0,06 Er ilaveli	0,197	8,57	3,22	0,102	0,134	0,0077	0,008	0,0136	-	Kalan
%0,1 Er ilaveli	0,283	8,65	3,12	0,121	0,137	0,0316	0,024	0,0343	-	Kalan

Tablo 10'daki Etial 160 alaşımların standart bileşim aralığında yer aldığı gözükmemektedir. Kimyasal analiz cihazında Er ilavesi kontrolü yapılmış ancak ilgili cihazda Er elementi analizi ile ilgili değerler tespit edilememiştir.

3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ

Tez bünyesinde, farklı miktarlarda Er takviyesinin alaşım karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir. Bu nedenle, sıvı metal temizliğinden kaynaklanabilecek hataların etkilerini önlemek amacıyla sıvı metal dökümü öncesinde azotla temizleme işlemine başvurulmuştur. Temizleme işlemi sonrasında, sıvı metal kalitesini kontrol etmek için sıvı metale RPT cihazında vakum etkisinde katılaşma çalışması tatbik edilmiştir. Döküm çalışmalarından üretilen RPT örneklerine ait fotoğraf görselleri Şekil 18'de sunulmuştur.



İlavesiz

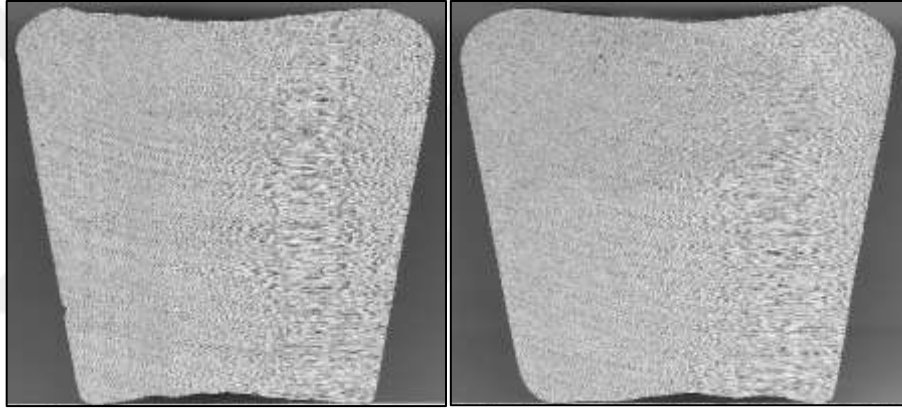
% 0,03Er İlaveli

% 0,05Er İlaveli

% 0,1 Er İlaveli

Şekil 18: RPT Test Numune Görüntüleri

Şekil 18'deki fotoğraf görüntülerinden anlaşıldığı üzere, numunelerin üst kısmında çöküntüler bulunmaktadır. Bu durum, sıvı metal temizliğinin doğru yapıldığını gösteren bir işarettir. RPT numuneleri kesilip zımparalandı ve kesit yüzeylerindeki gözenek durumları incelendi. Numune kesit yüzeylerinin görüntüleri Şekil 19'da sunulmuştur.



Takviyesiz

% 0,03 Er Takviyeli



%0,05 Er Takviyeli

% 0,1 Er Takviyeli

Şekil 19: RPT Numune Kesit Fotoğrafları

Şekil 19'daki kesit yüzey görüntülerinin incelenmesiyle, dökümlerde sıvı metal temizliğinin uygun seviyelerde olduğu görülmektedir. RPT örnekleri yoğunluk ölçümü işlemi uygulanarak gözenek değeri tespit edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri, Arşimet metoduna dayalı

olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 11'de, yoğunluk ölçüm sonuçlarıyla birlikte hesaplaması yapılan gözenek sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 11: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Verileri

Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Referans Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
Takviyesiz	132,63	84,76	2,754	2,76	0,212
%0,03 Er Takviyeli	130,45	83,13	2,752	2,76	0,296
%0,05 Er Takviyeli	129,47	82,49	2,751	2,76	0,329
%0,1 Er Takviyeli	133,13	84,82	2,750	2,76	0,333

Tablo 11'de, RPT döküm numunelerinden elde edilen yoğunluk ölçüm sonuçlarının incelenmesiyle, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk arasındaki ilişkiye dayalı olarak gözenek değerleri hesaplanmıştır. Teorik yoğunluk değeri, alaşımın kimyasal bileşimi ve standart veriler dahilinde hesaplanmıştır. Tüm deney örneklerinde hesaplanan gözenek sonuçları, Tablo 11'de de görüldüğü gibi %0,5'in altında ve kabul edilebilir seviyelerdedir. Bu veriler, numune kesit yüzeyi analizi sonucunda RPT testinin sıvı metal kalitesinin uygun olduğunu doğrulamasıyla ilişkilendirilmiştir.

Tez kapsamında sıvı metal temizliğinin denetimi amacıyla tercih edilen başka bir deney metodu, K mold kalıba döküm örnekleridir. Şekil 20'de, K-mold döküm numunelerinin fotoğraf görselleri sunulmuştur.



İlavesiz



%0,03 Er Takviyeli



%0,05 Er Takviyeli



%0,1 Er Takviyeli

Şekil 20: K-mold Kalıbına Uygulanan Döküm Örnekleri Görselleri

Numuneler, çentikli bölgelerden kırılarak kırık yüzeylerin görselleri temin edilmiştir. Şekil 21’de, K-mold numune kırık yüzeylerinin görselleri sunulmaktadır.



İlavesiz



%0,03 Er Takviyeli



%0,05 Er Takviyeli



%0,1 Er Takviyeli

Şekil 21: K- mold Numuneleri Kırık Yüzey Örnekleri Görselleri

K-mold döküm örneklerinin hızla katılaşmaya başlaması sonucunda çok ince bir matris oluşur, bu da kırık yüzeyinde inklüzyonların belirgin olarak görülmesine sebep olur. Şekil 21'de, Er elementinin oranlarını değiştirerek K-mold parçalarından en uç kademesinden başlayarak sıralı bir şekilde çekilen resimler gözlemlenmektedir. K-mold numunelerinin kırılan kesitlerinde tespit edilen inklüzyon sayıları Tablo 12'de kaydedilmiş ve ilgili değerler sunulmuştur.



Tablo 12: K- mold İnküzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri

Numune adı	İnküzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
İlavesiz (Etial 160)	3	5	0,6
%0,03 Er ilaveli	1	5	0,2
%0,06 Er ilaveli	3	5	0,6
%0,1 Er ilaveli	2	5	0,4

Şekil 21'deki K-Mold kırık yüzey görselleri ile Tablo 12'deki K-Mold analiz verilerine dayanarak yapılan değerlendirmede, yapılan bütün döküm testlerinde ortaya çıkan K değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. K mold verileri ve RPT sonuçları, sıvı metal temizliğinin döküm içinde gaz kaynaklı gözenek meydana gelmesini önlemek için yeterli düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, dökümlerde olası gözeneklerin genellikle gaz kaynaklı olmadığını ve eğer varsa, yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözeneklerinin neden olabileceği düşüncesini desteklemektedir.

3.3. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI

Etial 160 alüminyum alaşımına Er takviyesinde akıcılık üzerindeki etkileşimi araştırmak amacıyla tatbik edilen deneylerde spiral akıcılık ve dört kanallı akıcılık kalıbına yapılan dökümlerden elde edilen numune resimleri Şekil 22'de sunulmuştur.

	4 Kanallı Akıcılık Kalıbı	Spiral Akıcılık Kalıbı
Etial 160 İlavesiz		



Şekil 22: Döküm Sıcaklığına Bağlı Akıcılık Döküm Örnekleri

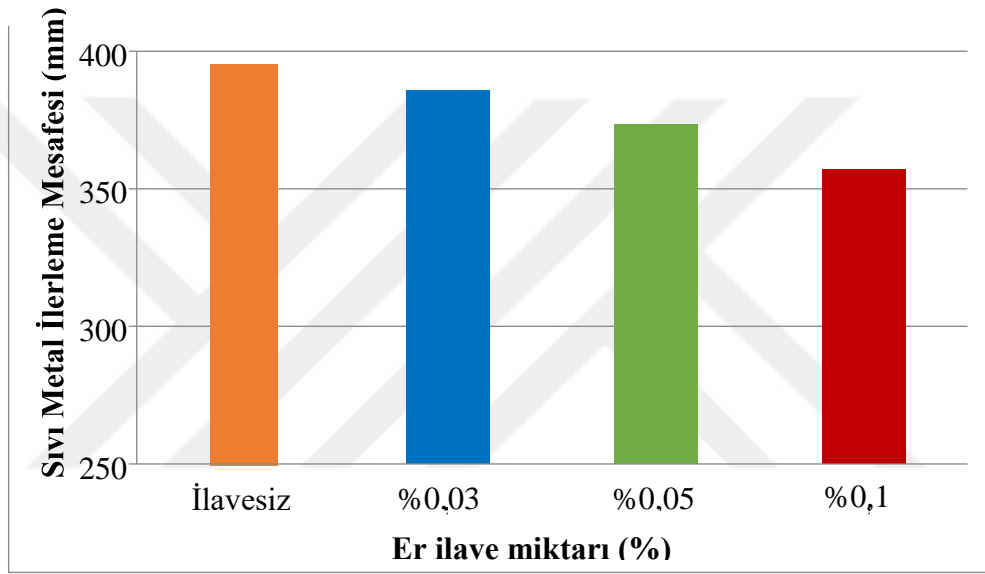
Şekil 22'deki resimlerde görüldüğü gibi, Etial 160 alaşımına Er ilavesi yapıldığında akıcılık özelliklerinde değişiklikler olduğu belirlenmiştir. Deney örneklerinin sıvı metal ilerleme mesafe verilerine ilişkin değerler Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri

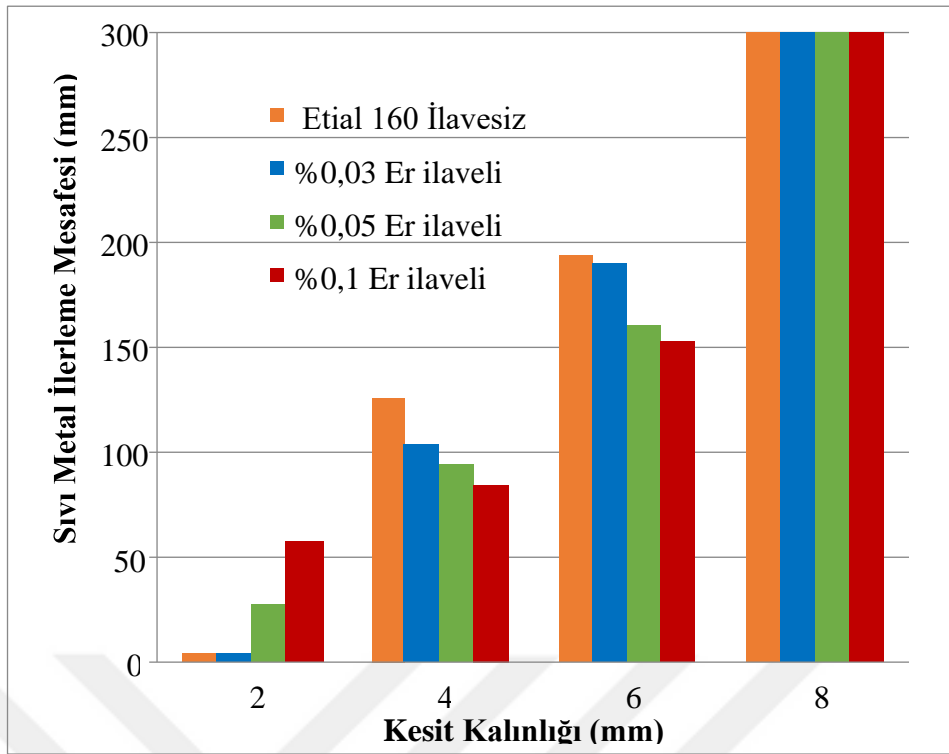
Döküm No	Alaşım İlavesi	Döküm Sıcaklığı (°C)	4 Kanallı (2 mm)	4 Kanallı (8 mm)	4 Kanallı (4 mm)	4 Kanallı (6 mm)	Spiral (mm)
1	İlavesiz	720	2	300	130	192	390
2	%0,03 Er İlaveli	720	2	300	103	190	385
3	%0,05 Er ilaveli	720	21	300	93	153	376
4	%0,1 Er ilaveli	720	59	300	89	138	357

Tablo 13'teki sonuçların incelenmesiyle, değişen döküm koşullarının akıcılık üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, Er ilavesiyle birlikte alaşımın

akıcılık özelliklerinde azalma gözlemlenmiştir. Spiral akıcılık kalıbındaki, sıvı metal ilerleme mesafe verileri %0,03 Er ilavesi miktarıyla birlikte 390 mm'den 385 mm'ye kadar azalmıştır. Daha sonra %0,05 Er ilavesi ile 376 mm'ye ve %0,1 Er ilavesi ile 357 mm'ye azalmıştır. Dört kanallı akıcılık kalıbında, farklı kesitlerde değişken olan sıvı metal ilerleme mesafesi gözlemlenmektedir. En ince kesitli 2mm kalınlığındaki kanallarda ilerleme mesafesi 2 mm ile 59 mm skalasında değişirken, 8 mm kesitli kanalda yapılan çalışmalarda kanal tamamen dolmuştur. Şekil 23'te spiral kalıp vasıtasıyla dökümlerden meydana gelen sıvı metal ilerleme mesafeleri, Şekil 24'te ise dört kanallı akıcılık kalıbından meydana gelen verilerden oluşturulan grafikler sunulmuştur.



Şekil 23: Spiral Akıcılık Kalıbıyla Oluşturulan Sıvı Metal İlerleme Mesafesi



Şekil 24: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbıyla Oluşturulan Sıvı Metal İlerleme Mesafesi

Sıvı metal ilerleme mesafeleri, döküm numunesi sonuçlarının incelenmesiyle ortaya çıkan bir husustur, bu mesafelerin Er ilavesine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir.

Kesit kalınlığındaki artış, sıvı metal ilerleme mesafelerinde tüm deney şartlarında artışa sebep olduğu gözlenmiştir. Er ilavesi ile akıcılık özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Tüm deneylerde 8 mm kalınlığa sahip kanal tam olarak dolduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, Etial 160 alaşımının takviyesiz dökümde 2 mm kesitli kanalda sıvı metal ilerleme mesafesi 2 mm, %0,03 Er takviyesinde 2 mm, %0,05 Er takviyeli dökümde 21 mm ve %0,1 Er takviyeli dökümde 59 mm olarak tespit edilmiştir. Er ilavesi diğer kesit kalınlıklarında olumsuz etki ortaya çıkarırken 2 mm kalınlığa sahip kesitte durum değişkenlik göstermiştir. Bu durum döküm esnasında sıvı metalin basıncına ve sıvı metal hareketi yönüne bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. 4 mm kesitli kanalda ilk ilave oranında azalma olduğu sonrasında ilave oranı arttıkça azalmanın devam ettiği görülmüştür. Bu kanalın kesit kalınlığı 4 mm olduğunda ilerleme mesafeleri sırasıyla 130 mm, 103 mm, 93 mm ve 89 mm olarak ölçülmüştür. 6 mm kesitli kanalda, elde edilen veriler 192 mm, 190 mm, 153 mm ve 138 mm olarak ölçümü yapılmıştır. 8 mm kesitli kanalda, tüm dökümlerde kanalın tamamen dolduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Etial 160 alüminyum alaşımı için 8 mm ve daha kalın kesitlerde, akıcılık açısından bir sorun olmadan kalıbın dolduğunu düşündürmektedir. Tespit edilen verilen, literatürdeki bulgularla uyumludur. Alüminyum alaşımlarının akıcılığı, birçok faktörün etkisi altında olan

karmaşık bir olgudur (Timelli ve Bonollo, 2007). Genel olarak, yapılan çalışmalar alüminyum döküm alaşımlarının akışkanlığının sıcaklık değişimlerinden önemli ölçüde etkilendiğini ve farklı alaşımların farklı tepkiler gösterdiğini göstermektedir. Alaşım içinde bulunan takviye parçacıkları, alüminyum döküm alaşımlarının akışkanlığını etkileyebilir. Bu takviye parçacıkları, farklı elementlerin varlığında, sıvı metalin akışkanlığını azaltabilir ve katılaşma oranını etkileyebilir (Behera vd., 2012).

3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI

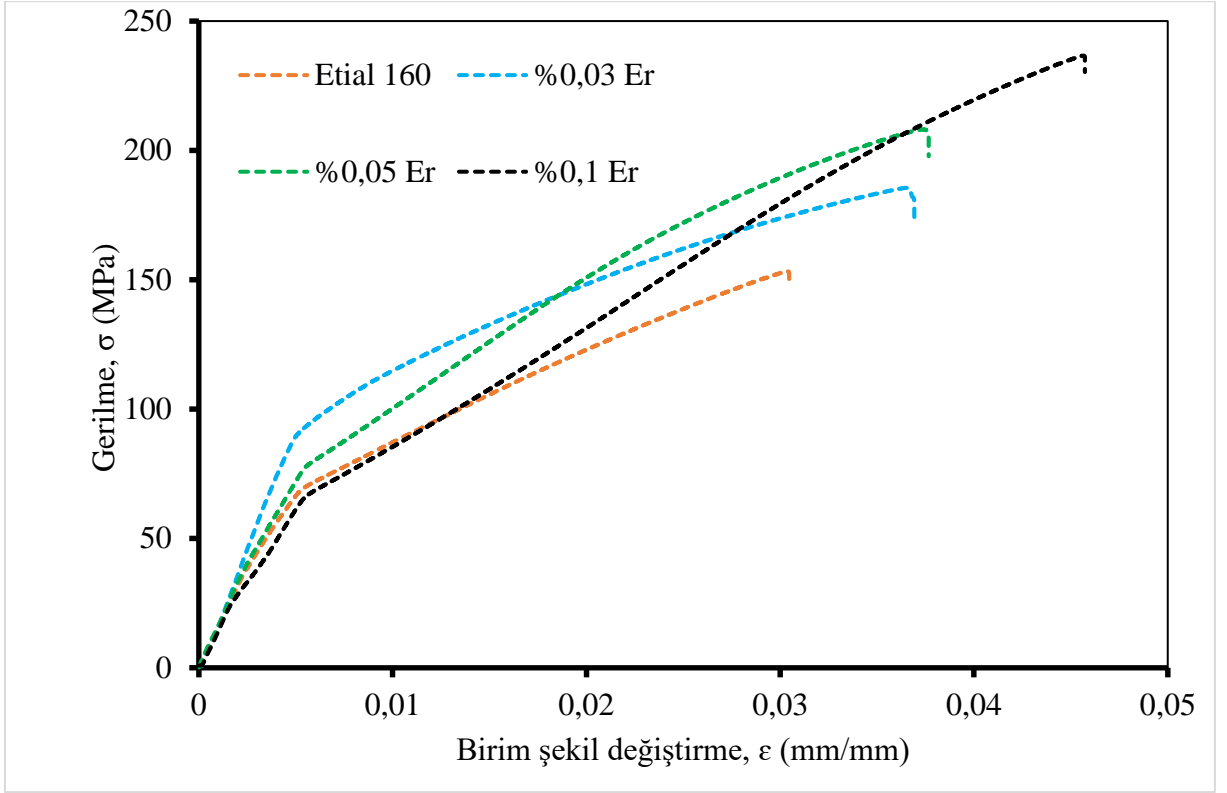
3.4.1. Çekme Test Sonuçları

Mekanik testler için, Etial 160 alaşımının farklı oranlarda % Er takviyesiyle hazırlanan dökümlerinden numuneler temin edilmiştir. Numuneler, çekme testi ve sertlik sonuçlarının incelenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Şekil 25'te çekme testi kalıbı dökümünden örnek bir deney numunesi resmi verilmiştir.



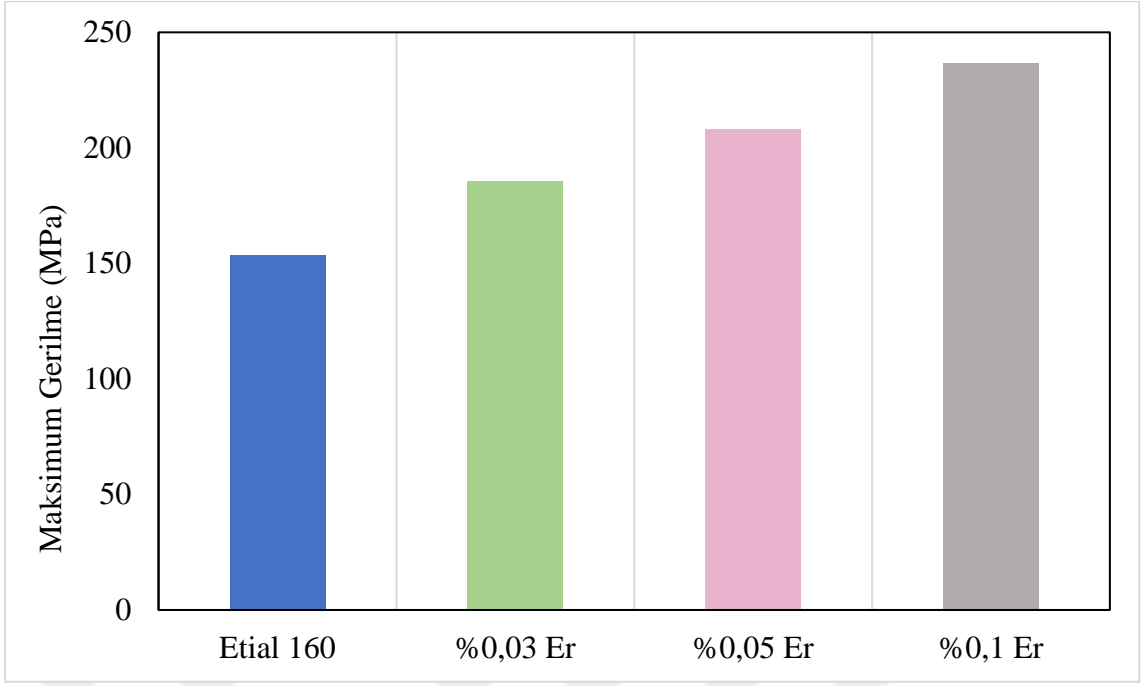
Şekil 25: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numune Örnek Görüntüsü

Deneysel çalışmanın sonuçlarına ilişkin olarak, çekme testi sonuçları Şekil 26'da grafik olarak verilmiştir. Her bir döküm için en az üç numune üzerinde testler yapılmıştır. Grafikte yer alan değerler, her bir döküm için elde edilen ortalama çekme testi sonuçlarını ifade etmektedir.

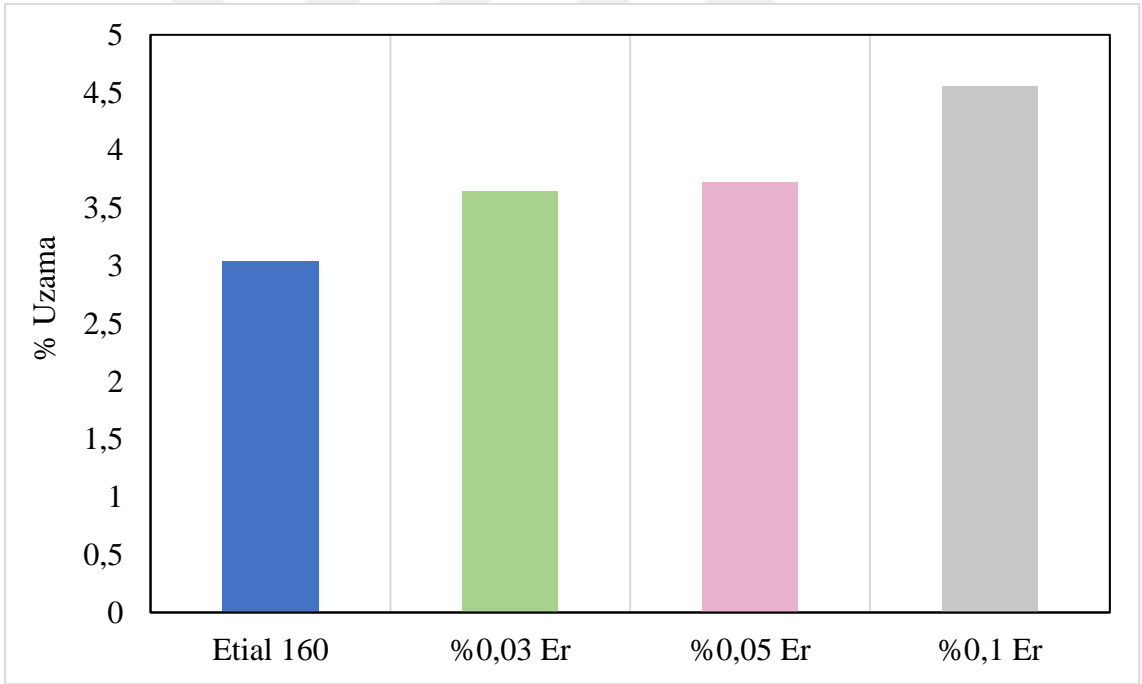


Şekil 26: Döküm Deneylerine Ait Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafikleri

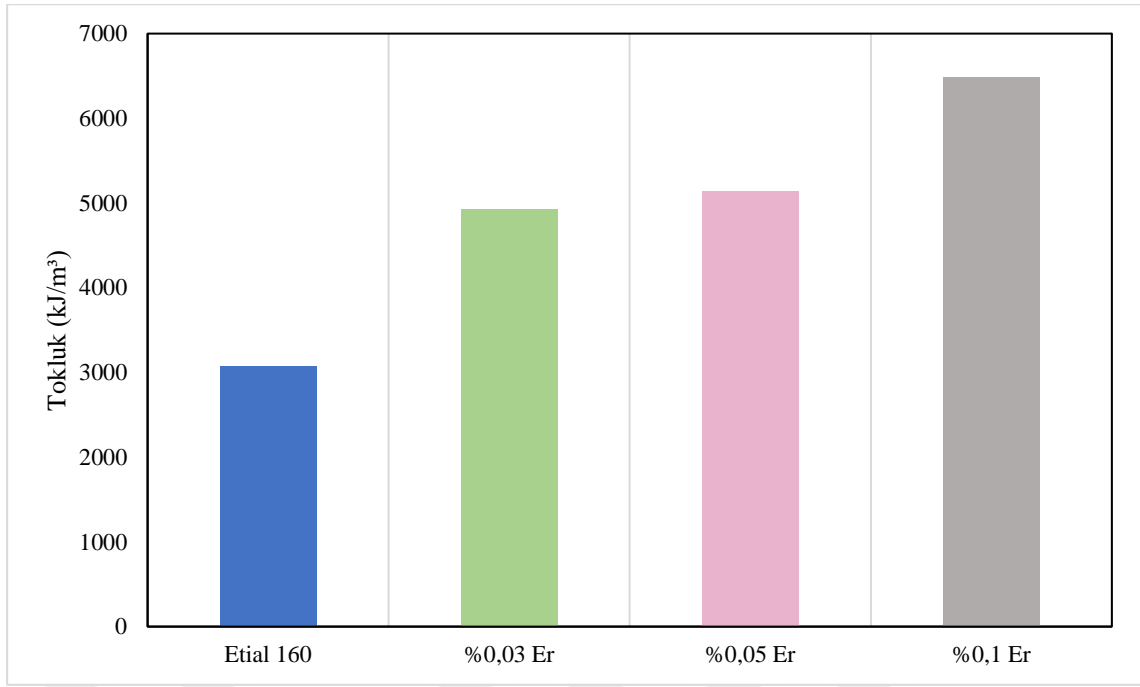
Şekil 26’da yer alan grafik incelendiğinde, Er ilavesinin gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki belirgin etkileri açıkça görülmektedir. Etial 160 alüminyum alaşımına Er elementi ilavesi, tüm örneklerde çekme dayanımını artırmıştır. En yüksek çekme dayanımı, en yüksek Er ilave oranına sahip dökümlerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Er ilavesinin Etial 160 alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve çekme gerilmesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 27’de çekme testlerinden elde edilen maksimum gerilme değerleri, Şekil 28’de % uzama ve Şekil 29’de tokluk değerlerinin Er ilavesi ile nasıl değiştiği grafiklerle detaylandırılmıştır. Bu veriler, Er ilavesinin alaşımın genel performansını nasıl etkilediğini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 27: Etial 160 Alaşımı Er İlavesi Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi



Şekil 28: Etial 160 Alaşımı Er İlavesinin % Uzama Değerleri Değişimi



Şekil 29: Etial 160 Alaşımı Er İlaveseine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi

Őekillerde sunulan veriler, maksimum çekme gerilmesi, yüzde uzama ve tokluk değerlerini kapsamaktadır. İncelemeler, çekme gerilmesinin ilavesiz dökümlerde 153,239 MPa olduğunu, %0,03 Er ilavesiyle 185,571 MPa'ya, %0,05 Er ilavesiyle 208,110 MPa'ya ve %0,1 Er ilaveli dökümlerde 236,615 MPa'ya yükseldiğini göstermektedir. İlavesiz dökümlerde %3,04 olan yüzde uzama, %0,03 Er ilavesiyle %3,65'e, %0,05 Er ilavesiyle %3,73'e ve %0,1 Er ilavesiyle %4,56'ya yükselmiştir. Tokluk değerleri aşıısından da Er ilavesinin alaşıma pozitif katkı sağladığı belirlenmiştir. İlavesiz Etial 160 alaşımında 3079,8 kJ/m³ olan tokluk değeri, %0,1 Er ilavesiyle 6483,9 kJ/m³'e kadar artmıştır. Mekanik özellikleri geliştirmek için Etial 160 alüminyum döküme çeşitli alaşım elementi ilavelerinin eklendiği bilinmektedir. Er ilavesinin alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri konusunda yapılan araştırmalar, elde edilen sonuçların literatürdeki verilerle tutarlı olduğunu göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalara göre, Er ilavesi alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirebilmektedir. Özellikle düşük oranlarda Er ilavesi, alaşımın dayanımını artırmakta ve malzemenin sünekliliğini geliştirmektedir. Bununla birlikte, yüksek miktarlarda Er ilavesinin mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği de belirtilmektedir. Bu bulgular, Er ilavesinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini ve uygun miktarların kullanılmasıyla Al-Si-Mg alaşımlarının performansının önemli ölçüde artırılabilceğini göstermektedir (Colombo vd., 2017).

Wen ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda, Er elementinin Al-Mg-Mn-Zr alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle

%0,2 ağırlık oranında Er eklenmesi, ikincil Al₃Er çökeltilerinin oluşumunu teşvik ederek alaşımın çekme mukavemetini %50 oranında artırmakta ve yeniden kristalleşme sıcaklığını 25°C kadar yükseltmektedir. Bu çökeltiler, yüksek sıcaklıklarda dahi mukavemet sağlayarak malzemenin performansını iyileştirmektedir. Bununla birlikte, Er miktarının artması, birincil Al₃Er oluşumuna neden olarak tane sınırlarında istenmeyen yapılar oluşturmakta ve bu da mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle, optimum Er oranının belirlenmesi, alaşımların mekanik performansını maksimize etmek için kritik bir öneme sahiptir (Wen vd., 2009).

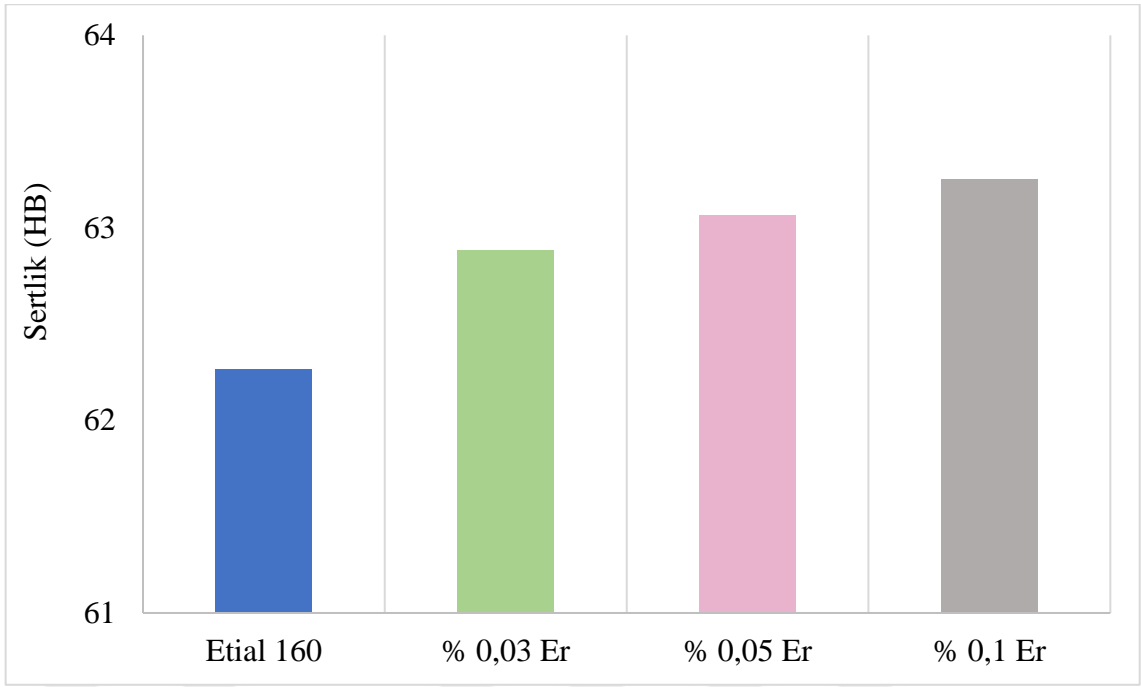
3.4.2. Sertlik Test Sonuçları

Takviyesiz ve farklı miktarlarda Er takviyeli olarak hazırlanan sıvı metal dökümlerden oluşturulan numunelere ait sertlik deneyinde oda sıcaklığı esas alınarak Brinell metodu kullanılmıştır. HB deney yöntemiyle, 1,6 mm çapında bir bilye kullanılarak, 2,5 kgf ön yük ve 62,5 kgf toplam yük altında her bir numuneden en az 6 adet ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin sertlik değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Tablo 14'te döküm deneylerinin örneklerinden temin edilen ölçüm sonuçları sunulmuştur. Ölçüm yapılırken azami ve asgari değerler hesaplara dahil edilmemiştir.

Tablo 14: Sertlik Ölçüm Verileri

Numune ismi	Sertlik ölçüm değerleri (HB)						Ortalama
İlavesiz	62,8	61,4	63,4	63,6	61,6	60,8	62,26
% 0,03 Er ilaveli	65,6	61,6	63,2	64,3	62,2	60,4	62,88
% 0,05 Er ilaveli	64,3	62,6	64,1	62,5	64,2	60,7	63,06
% 0,1 Er ilaveli	62,1	62,7	60,5	64,5	65,4	64,3	63,25

Tablo 14'teki veriler, ilgili alaşım için belirlenen değer sınırları içinde olduğunu göstermektedir. Er ilavesiyle elde edilen sonuçlarda, sertlik değerlerinde az miktarda artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak, alaşımın sertlik karakteristiklerinde kritik bir farklılık gözlenmemiştir. Şekil 30'da değişen Er oranlarına bağlı ortaya çıkan veri sonuçlarının grafik ifadesi bulunmaktadır.

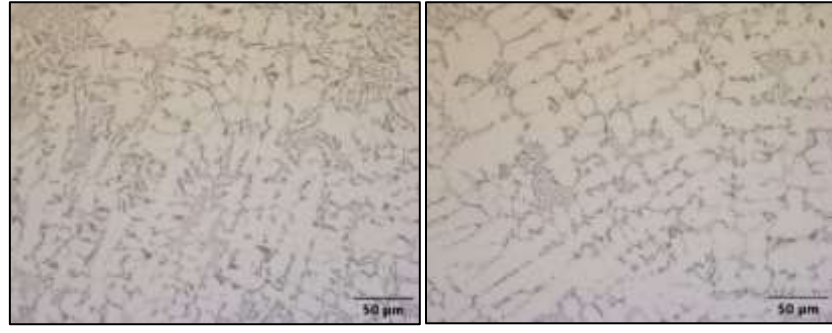


Şekil 30: Er İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Deneyi Sonuçlarının Grafik Gösterimi

Şekil 30'daki verilere göre, ilavesiz dökümde ortalama sertlik 62,26 HB iken, %0,03 Er ilaveli dökümde 62,88 HB, %0,05 Er ilaveli dökümde 63,06 HB ve %0,1 Er ilaveli dökümde 63,25 HB olarak belirlenmiştir. Bulgular, Er ilavesinin sertlik üstünde hafif bir yükselişe sebep olduğu tespit edilmiştir.

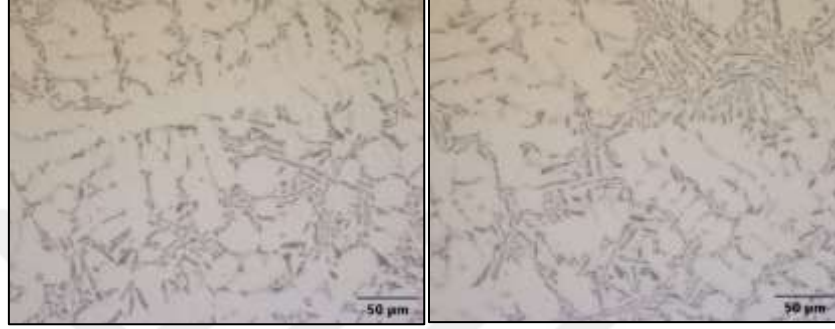
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI

Etial 160 ve çeşitli oranlarda % Er ilavesi yapılan dökümlerin mikro yapısını incelemek amacıyla dört kanallı akıcılık dökümlerinden örnekler alınmıştır. Mikroyapı analizlerinde, farklı kesit kalınlıklarında iç yapının incelenmesi yapılmış ve alaşım ilavesinin etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 31'de ETİAL 160'a ait, Şekil 32'de %0,03 Er ilavesi yapılmış, Şekil 33'te %0,05 Er ilavesi içeren ve Şekil 34'te %0,1 Er ilavesi bulunan döküm numunelerinin çeşitli kesitlerinden 50X büyütme ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafları gösterilmektedir.



2 mm

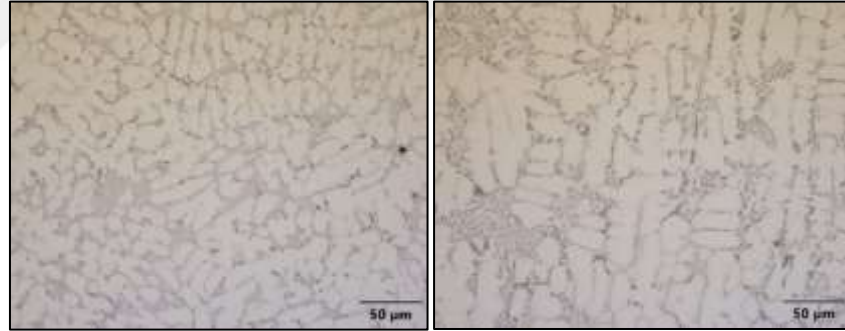
4 mm



6 mm

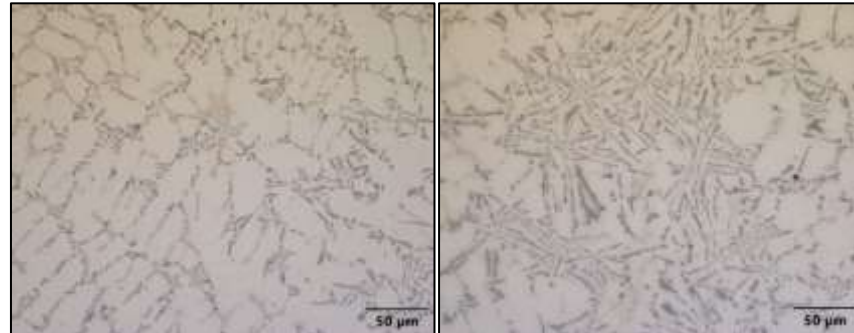
8 mm

Şekil 31: Takviyesiz Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri



2 mm

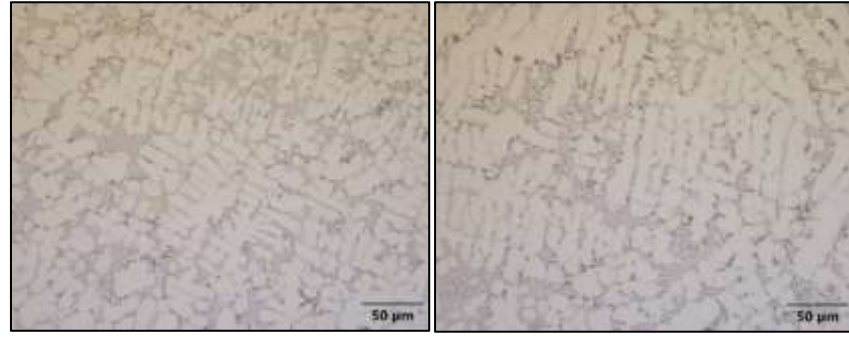
4 mm



6 mm

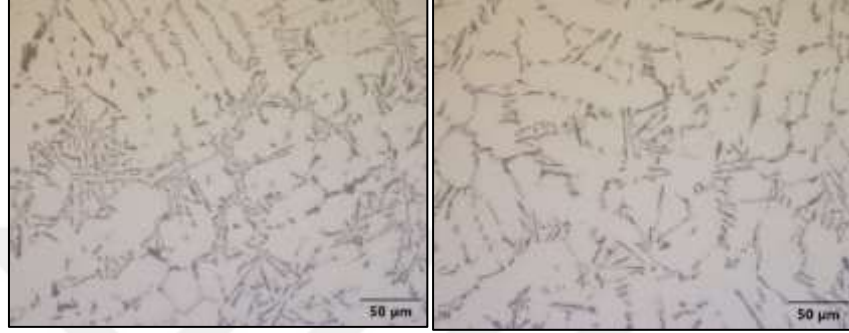
8 mm

Şekil 32: %0,03 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri



2 mm

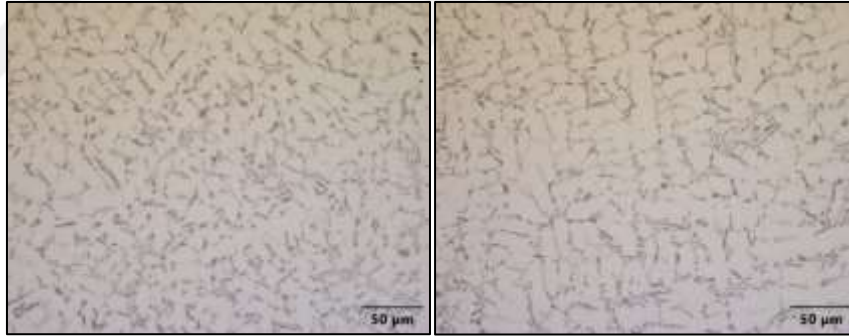
4 mm



6 mm

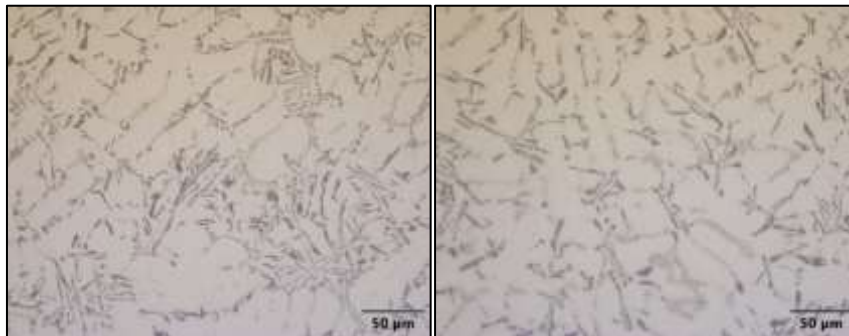
8 mm

Şekil 33: %0,05 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri



2 mm

4 mm



6 mm

8 mm

Şekil 34: %0,05 Takviyeli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri

Yapılan dökümlerden alınan numunelerin mikro yapı resimleri incelendiğinde alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak yapıda α -Al ve ötektik Si kristalleri olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı resimlerine bakıldığında, kesit kalınlığının artmasıyla birlikte tane yapılarının ve Si kristallerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Kalınlık arttıkça, mikroyapıdaki tanelerin soğuma durumu etkisiyle büyüme sağladığı ve farklı miktarlarda Er ilavesiyle mikroyapının ufaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Er takviyesi nedeniyle yapıda farklılıklar belirlenmiştir. Yapıda kalınlık arttıkça katılma zamanına bağlı olarak tanelerin büyüdüğü gözlenmiştir.



SONUÇ

Bu çalışmada, Etial 160 alüminyum alaşımının kokil kalıba dökümünde Er ilavesinin etkisi incelenmiştir. Döküm deneyleri, farklı oranlarda (%0,03-%0,05-%0,1) Er ilavesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Er ilavesinin akıcılık, mikroyapı ve mekanik özellikler üstündeki tesiri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ortaya çıkan bulgular, aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Dökümlerde Er ilavesinin etkisini incelemeyi amaçlayan bu çalışmada, muhtemel gaz sebepli kusurların en aza indirgenmesi için sıvı metal kalitesi RPT ve Kmold kalıplarıyla deneye tabi tutulmuştur. Deney alaşımlarının temin edilen, RPT örneklerinin yoğunluk analizinde %0,5'in altında gözenek ve K-mold kalıbında 1'den az K değeri belirlenmiştir. Mevcut sonuçlar, azot gazı yardımıyla 5 dakika boyunca gerçekleştirilen sıvı metal temizliği işlemlerinin gaz kaynaklı hataların giderilmesine yönelik etkinliğini göstermektedir.

Er ilavesinin akıcılık üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılan döküm verileri analiz edildiğinde spiral ve dört kanallı mevcut akıcılık kalıplarında farklı sıvı metal ilerleme mesafelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Kesit kalınlığının değişimin ve Er ilave oranının akıcılık değerlerini etkilediği ve kesit kalınlığı 8 mm iken tüm kanalın dolduğu fakat 4 mm ve 6 mm kanalda ilave oranı arttıkça akıcılığın azaldığı belirlenmiştir.

Er ilavesi diğer kesit kalınlıklarında olumsuz etki ortaya çıkarırken 2 mm kalınlığa sahip kesitte farklı davranış göstermiştir. Bu durum döküm esnasında sıvı metalin basıncına ve sıvı metal hareket yönüne bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Spiral kalıplara yapılan dökümlerde, sıvı metal ilerleme mesafeleri incelendiğinde, takviyesiz dökümde 390 mm, %0,03 Er takviyeli dökümde 385 mm, %0,05 Er takviyeli dökümde 376 mm ve %0,1 Er takviyeli dökümde ise 357 mm ölçümü tespit edilmiştir.

Farklı kesit kalınlıklarına ve değişen Er ilavelerine sahip bölgelerden oluşan Etial 160 alüminyum alaşımının mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı resimlerine bakıldığında, kesit kalınlığının artmasıyla birlikte tane yapılarının ve Si kristallerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Kalınlık arttıkça, mikroyapıdaki tanelerin soğuma durumu etkisiyle büyüme sağladığı ve farklı miktarlarda Er ilavesiyle mikroyapının ufaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Er takviyesi nedeniyle yapıda farklılıklar belirlenmiştir.

Numunelerin mekanik karakteristikleri tespiti amacıyla çekme testi verilerine bakılarak çekme gerilmesi sonuçlarının takviyesiz dökümlerde 153,24 MPa, %0,03 Er takviyesinde 185,57 MPa, %0,05 Er takviyesinde 208,11 MPa ve %0,1 Er takviyeli dökümlerde de 236,62 MPa değerlerine kadar yükseldiği belirlenmiştir.

Çekme deneyinden ortaya çıkan verilere göre, Er ilavesinin alaşımın uzama değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür. İlavesiz dökümde % 3,04 olan uzama miktarı, artan Er miktarıyla birlikte artmış ve %1 Er ilavesinde maksimum %4,56'ya kadar ulaşmıştır.

Tokluk değerlerinin analizi sonucunda, Etial 160 alaşımında Er ilavesinin faydalı bir etkileşimi olduğunun tespiti yapılmıştır. İlavesiz Etial 160 alaşımı dökümlerinde tokluk değeri 3079,8 kJ/m³ iken, Er ilavesiyle birlikte artmış ve %0,3 Er ilavesinde 4929,5 kJ/m³, %0,05 Er ilavesinde 5135,7 kJ/m³ ve %0,1 Er ilaveli dökümde ise 6483,9 kJ/m³ değerine kadar yükseldiği belirlenmiştir.

İlavesiz dökümde ortalama sertlik 62,26 HB iken, %0,03 Er ilaveli dökümde 62,88 HB, %0,05 Er ilaveli dökümde 63,06 HB ve %0,1 Er ilaveli dökümde 63,25 HB olarak belirlenmiştir. Bulgular, Er ilavesinin sertlik üzerinde hafif bir yükseliş sağladığı, fakat ortaya çıkan artışın anlamlı bir alaşım elementi ilavesiyle ilişkili olmadığı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahlatçı, H. (1994). *Al-Cu-Mg-Si Alaşımlarının Deformasyonu ve Yaşlandırılması* (Lisans Bitirme Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Alım, B. (2017). *Tavlama sıcaklığı, basınç ve dış manyetik alanın şekil hafızalı nanoalaşımların x-ışını şiddet oranları ve valens elektron yapıları üzerine etkilerinin incelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 498409)
- Al-Saadi, H. I. A., ve Tunay, R. F. (2017). Suni yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525–532.
- Anson, J. P., Gruzleski, J. E. (1999). Effect of hydrogen content on relative shrinkage and gas porosity in al-7% si casting. *AFS Transactions*, 135-140.
- Aran, A. (1999). *Metal Döküm Teknolojisi* ve İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G. ve Güler, K. A. (2020). 380 alaşımının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane inceltmenin etkisi. İstanbul.
- Beljajew, A. I., Fgrsanowa, L. A. ve Rapaport, M. B. (1974). Alüminyumun metalürjisi, *T.M.M.O.B Makine Mühendisleri Odası*, yayın no: 99.
- Binczewski, B. S. ve George. J. (1995). The point of a monument: A history of the aluminum cap of the Washington Monument. *JOM*, 47(11), 20-25.
- Brown, J. R. (2000). Foseco Non-Ferrous Foundryman's. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, /11, 28–38.
- Car, E. (2019). Birincil alüminyum üretimine genel bir bakış. *Metalurji Dergisi*, 156, 34-48.
- Colombo, M., Gariboldi, E., ve Morri, A. (2017). Er addition to al-si-mg-based casting alloy: effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 1234-1244.
- Çakanyıldırım, Ç. ve Gürü, M. (2021). Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, 57 çevreye etkisi ve uygulama alanları, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 585-592.
- Çetin, A. (2017). *Alüminyum Döküm Alaşımları*, [e-kitap sürümü]. <https://dokumhane.net/ek-kaynaklar/dokumcunun-el-kitabi/>
- Çolak, M. (2009). *Etial 160 alaşımının dökümünde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 245168)
- Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. *ASM international*.
- Demirci, K. M. (2012). Dünya alüminyum ticaretinde Türkiye'nin yeri. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalürji Mühendisleri Odası*, 17-29.
- European Aluminium Association TALAT Lecture 1501, (1994). Aluminum: Physical properties, Characteristics and Alloys, Ron Cobden, Banbury.
- Karakışlak, M. (1978). *Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemi*, (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60 s.
- Kaufman, J. G., ve Rooy, E. L. (2004). Aluminum alloy properties, processes and applications. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications* (ss. 1–65).

- Kissell, J. R. (1996). Aluminum and its Alloys. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 6-53.
- Matweb, (Mart, 2021). Alüminyumun Tarihçesi <https://www.matweb.com/> adresinden edinilmiştir.
- Makaleler, (Mayıs, 2021). Erbiyum Elementine Ait Özellikler ve Erbiyum Tarihçesi <https://www.makaleler.com/erbiyum-nedir/> adresinden edinilmiştir.
- Behera, R., Chatterjee, D., & Sutradhar, G. (2012), *American Journal of Materials Science*, 2(3), 53-61.
- Sarsılmaz, F. (2008). *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222104)
- Shakhashiri, B. Z. (2000). Chemical of the week aluminium. *General Chemistry*, 2(1), 2–3.
- Sharma, R., ve Dwivedi, D. K. (2005). Influence of silicon (wt.%) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast al–si–mg alloys. *Materials Science and Engineering A*, 408(1-2), 274-280.
- Sigworth, G.K. (1983), Theoretical and practical aspects of the modification of aluminium silicon alloys. *AFS Transactions*, 91, 7-16.
- Smith, W. F. (2001). *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri* (2. Baskı), (M. Erdoğan, çev. ed.), 339-392, Ankara: Nobel Yayınevi.
- Totten, G. E., ve MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes* (Vol. 1). CRC press.
- Timelli, G., ve Bonollo, F. (2007), *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 20, Issue 6.
- Vargel, C. (2004). *Corrosion of Aluminium*. Corrosion of Aluminium (ss. 85–81). Elsevier.
- Yalıtımlı Alüminyum, (Mart, 2022). Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri <https://yalitimli-aluminyum.com/aluminyum-alasimlar/> adresinden edinilmiştir.
- Yıldırım, H., (2006), *Alüminyum malzemenin otomotiv sektöründeki uygulamaları*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 172165)
- Wikipedia, (Nisan, 2022). Erbiyum Elementine Ait Atomik ve Fiziksel Özellikler Tablosu <https://tr.wikipedia.org/wiki/Erbiyum/> adresinden edinilmiştir.
- Wen, S. P., Xing, Z. B., Huang, H., Li, B. L., Wang, W., ve Nie, Z. R. (2009). The effect of erbium on the microstructure and mechanical properties of al–mg–mn–zr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 516(1-2), 42-49.

ÖZ GEÇMİŞ

Çağrı GÜLTEKİN,’de’da doğdu. İlk öğretimini Ortaokulu’nda, lise eğitimini ise’nde tamamladı. Lisans eğitimini ise 2020 yılında Bayburt Üniversitesi’nde tamamladı. 2021 yılında Makine Mühendisliği bölümünde Doç. Dr. Murat ÇOLAK ve Dr. Öğr. Üyesi Yasemin TABAK danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı. Şu an da makine mühendisi olarak çalışmaktadır.

