



**ETİAL 160 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KOKİL
KALIBA DÖKÜMÜNDE NİYOBYUM ALAŞIM
ELEMENTİNİN İLAVESİNİN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Hüseyin Emre TOPRAK

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Murat ÇOLAK

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
NİYOBYUM ALAŞIM ELEMENTİNİN İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin Emre TOPRAK

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

BAYBURT – 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında, Hüseyin Emre TOPRAK tarafından hazırlanan “Etial 160 Alüminyum Alaşımının Kokil Kalıba Dökümünde Niyobyum Alaşım Elementinin İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 24.12.2024 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 Selçuk ŞİRİN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

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

Prof. 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 Dökümünde Niyobyum Alaşım Elementinin İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.12.2024

Hüseyin Emre TOPRAK



ÖN SÖZ

Lisans dönemimde, yüksek lisans dönemimin her anında bilgi ve birikimlerini bana aktaran, her koşulda beni yönlendiren, meslek sevgisini bana aktaran tez danışmanım Doç. Dr. Murat ÇOLAK'a,

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatımda mesleki açıdan bilgilerini aktaran ve yüksek lisans deneysel çalışmalarımnda bana katkı sağlayan değerli Bayburt Üniversitesi hocalarıma,

Bu yolda beni ben yapan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen gerek maddi gerek manevi anlamda her anımda yanımda olan sevgili babama, anneme ve kardeşlerime,

Tez dönemim boyunca gece gündüz demeden benimle birlikte yürüyen sevgili eşim Nalan'a ve kızım Zeynep Bade'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Hüseyin Emre TOPRAK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ETİAL160 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE NİYOBYUM ALAŞIM ELEMENTİNİN İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hüseyin Emre TOPRAK

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Sayfa: 54

Alüminyum döküm alaşımları, mukavemeti, dayanımı, iletkenliği vb. özelliklerden dolayı otomotiv, havacılık ve farklı sektörlerde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Her geçen gün kullanımı arttıkça yapılan dökümlerin kalitesindeki artış beklenmektedir. Bu sebeple alüminyum dökümlerin kalitesi sürekli gelişen teknoloji ile doğru orantılı olmalıdır. Alüminyum döküm alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılması ve üretimde yeni teknoloji kullanımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada Etial160 alüminyum alaşımı ilavesiz, %0,03 niyobyum ilaveli, %0,05 niyobyum ilaveli ve %0,1 niyobyum elementi ilavesi olmak üzere 4 farklı döküm kokil kalıpta gerçekleştirilmiştir. Deneyin incelenmesi esnasında sıvı metal kalitesi, akıcılık, mikroyapı ve mekanik özellikleri esas alınıp değerlendirme yapılmıştır.

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

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF NIOBIUM ALLOY ELEMENT ON DIE CASTING OF ETIAL 160 ALUMINUM ALLOY

Hüseyin Emre TOPRAK

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Pages: 54

Aluminum casting alloys are observed to be used in automotive, aviation and different sectors due to their properties such as strength, durability, conductivity etc. As their use increases day by day, an increase in the quality of the castings is expected. For this reason, the quality of aluminum castings should be directly proportional to the constantly developing technology. Depending on the increase in quality expectations from aluminum casting alloys, studies are continuing on making castings with different alloy element additions and using new technologies in production.

In this study, Etial160 aluminum alloy was cast in 4 different permanent molds, namely without addition, with 0.03% niobium addition, with 0.05% niobium addition and with 0.1% niobium element addition. During the examination of the experiment, liquid metal quality, fluidity, microstructure and mechanical properties were taken into consideration and evaluated.

Keywords: Etial 160, niobium, 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	XII
SİMGELER	XII
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. ALÜMİNYUM ELEMENTİNİN MEKANİK, FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	3
1.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	5
1.3.1. Alüminyum Alaşımların Atom Yapısı ve Kristal Kafesi	6
1.3.2. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması	6
1.3.3. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri.....	7
1.3.3.1. Yoğunluk.....	7
1.3.3.2. Yüksek mukavemet ve hafifliği	8
1.3.3.4. Mekanik özellikleri.....	9
1.3.3.5. Kimyasal özellikleri.....	9
1.3.3.7. İmalat ve şekillendirilebilme özelliği	10
1.3.4. Alüminyum Alaşımlarında Akıcılık	10
1.3.5. Alüminyum Alaşımlarının Çekme Özellikleri.....	10
1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME.....	11
1.5. NİYOBYUM.....	12
1.5.1. Niyobyum Elementinin Kullanım Alanları.....	13
1.5.2. Niyobyum Elementi Özellikleri	14
1.5.3. Niyobyum Elementi Mekanik Özellikleri	14
1.5.4. Niyobyum Elementi Atomik ve Fiziksel Özellikleri.....	14
1.5.5. Niyobyum Elementi Kimyasal Özellikleri	15
1.6. NB-AL İKİLİ ALAŞIMLARI	15
İKİNCİ BÖLÜM	18
2. YÖNTEM	18
2.1. DENEYLERE HAZIRLIK İŞLEMLERİ	19
2.2. ERGİTME İŞLEMLERİ.....	20

2.3. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ	22
2.3.1. RPT Numunelerinin İncelenmesi	23
2.3.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi.....	25
2.3.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi	25
2.3.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi.....	26
2.3.5. Mekanik Test Kalıp Numunelerinin İncelenmesi	27
2.3.6. Mikroyapı İnceleme Çalışmaları.....	30
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	32
3. BULGULAR.....	32
3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ	32
3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ	32
3.3. AKICILIK TEST SONUÇLARI	36
3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI	38
3.4.1. Çekme Test Sonuçları.....	38
3.4.2. Sertlik Test Sonuçları	42
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI	42
SONUÇ.....	49
KAYNAKÇA.....	51
ÖZ GEÇMİŞ	54

TABLÖLAR

Tablo 1: Alüminyumun Elementinin Mekanik Özellikleri.....	4
Tablo 2: Alüminyum Elementi İçin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	4
Tablo 3: Alüminyuma Takviye Edilen En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri.....	6
Tablo 4: Alüminyum Döküm Alaşımının Sınıflandırılması	7
Tablo 5: Alüminyum Dövme Alaşımının Sınıflandırılması	7
Tablo 6: Metalik Elementlerin Alüminyuma Göre Yoğunlukları.....	8
Tablo 7: Alüminyumun Elektriksel İletkenliğini Azaltan Alaşım Elementler	10
Tablo 8: Döküm Alaşımının Hacimsel Çekme Yüzdeleri.....	11
Tablo 9: Nb Elementi Özellikleri.....	15
Tablo 10: Dökümde Kullanılan Kokil Kalıplar ve Nb ilave Oranları.....	18
Tablo 11: Etial 160 Al'un ve Nb'un Kimyasal Analizleri. (% Ağ.)	19
Tablo 12: Kimyasal Bileşim Sonuçları (% Ağ.)	32
Tablo 13: RPT Numunelerinde Yoğunluk ve Gözenek Değerleri.....	33
Tablo 14: K- Mold Numunelerine Ait Ölçüm Değerleri.....	35
Tablo 15: İlerleme Mesafeleri.....	37
Tablo 16: Sertlik Ölçüm Verileri	42

ŞEKİLLER

Şekil 1: Tane İncelticinin Etkileşimi a) Tane İnceltisiz Döküm b) Tane İncelticili Döküm ...	12
Şekil 2: Niyobyum Elementi (Nb).....	13
Şekil 3: Nb-Al İkili Denge Diyagramı	16
Şekil 4: Gerçekleştirilen Çalışmalar ve İşlem Sırası	19
Şekil 5: Döküm Öncesi Kalıpların Isıtıldığı Tabla.....	20
Şekil 6: Elektrik Direnç Ocağı	21
Şekil 7: a)Döküm Öncesi Kokil Kalıplar, b)Döküm Esnasında Alınan Görüntü	22
Şekil 8: Azaltılmış Basınç Testi (RPT) Cihazı	23
Şekil 9: Arşimet Prensibine Göre Yoğunluk Ölçümü Yapılan Hassas Terazî.....	24
Şekil 10: K-Mold Kalıp Fotoğrafi Ve Numuneye Ait Ölçüler Ve Katı Model Görüntüsü	25
Şekil 11: 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı Ve Numune Ölçüleri.....	26
Şekil 12: Spiral Akıcılık Kalıbı.....	27
Şekil 13: Mekanik Test Kalıbı	27
Şekil 14: Isıl İşlem Uygulama Şeması.....	28
Şekil 15: Çekme Testi Numunesi Şematik Gösterimi	28
Şekil 16: Çekme Testi Cihazı, Test Numuneleri, Test Sonrası Numune Görüntüsü	29
Şekil 17: Sertlik Ölçüm Test Cihazı.....	30
Şekil 18: Mikroyapı İncelemelerinde Kullanılan Zımparalama Cihazı.....	31
Şekil 19: RPT Numuneleri Fotoğraf Görüntüleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli	33
Şekil 20: RPT Numune Kesit Fotoğrafları a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli	33
Şekil 21: K-mold Kalıbına Uygulanan Döküm Numune Görüntüleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli	34
Şekil 22: K- Mold Numuneleri Kırık Yüzey Görselleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli	35
Şekil 23: Akıcılık Kalıbı Deney Numuneleri.....	36
Şekil 24: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numune Görüntüsü	38
Şekil 25: Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafiği.....	39
Şekil 26: Etial 160 Alaşımına Nb İlavesi Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi	40
Şekil 27: Etial 160 Alaşımına Nb İlavesinin % Uzama Değerleri Değişimi	40
Şekil 28: Etial 160 Alaşımına Nb İlavesinin Statik Tokluk Değişimi.....	41
Şekil 29: İlavesiz Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm.....	43
Şekil 30: %0,03 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm.....	43
Şekil 31: %0,05 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm	44
Şekil 32: %0,1 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm	45

- Şekil 33:** Spiral Akıcılık Numunelerinden Alınan 50X Büyütmede Çekilen Mikroyapı Resimleri a) İlavesiz Etial 160, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli..... **47**
- Şekil 34:** Nb İçeriğinin İncelenmesine Yönelik 200X Büyütmeden Çekilen Mikroyapı Resimleri A) İlavesiz Etial 160, B) %0,03 Nb İlaveli, C) %0,05 Nb İlaveli, D) %0,1 Nb İlaveli..... **48**



KISALTMALAR

CNC	: Computer Numerical Control
SiC	: Silisyum Karbür
ETİAL	: ETİ Alüminyum
HRB	: Rockwell B Sertliği
RPT	: Reduced Pressure Test (Azaltılmış Basınç Testi)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
HB	: Brinel Sertlik
AKB	: Atomik Kütle Birimi
NbC	: Niyobyum Karbür

SİMGELER

Kgf	: Kilogramkuvvet
kW	: Kilowatt
kN	: Kilonewton
kW	: Kilowatt
Å	: Angstrom
J	: Jolue
KgK	: Kilogramkelvin
MJ	: Megajolue
°C	: Santigrat Derece
Kg	: Kilogram
Cm	: Santimetre
Kj	: Kilojoule
K	: Kelvin
α	: Alfa
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
Zn	: Çinko
Cr	: Krom
Sn	: Kalay
Mg	: Magnezyum
Li	: Lityum
Ti	: Titanyum
Ag	: Gümüş
Pb	: Kurşun
O₂	: Oksijen
Au	: Altın
Os	: Osmiyum
Cu	: Bakır
Mn	: Mangan
Fe	: Demir
Si	: Silisyum

Nb	: Niyobyum
Cb	: Colombium
V	: Vanadyum
Ta	: Tantalum
E ε	: Epsilon
HF	: Hidrojen Florür
HCl	: Hidroklorik Asit
HNO₃	: Nitrik Asit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
NH₂O	: Amonyum Peroksit
TiAl₃	: Titanyum Alüminyum Triklorür
Mm	: Mikrometre
Mm	: Milimetre
dk	: Dakika
Mg	: Magnezyum
Zr	: Zirkonyum
mbar	: Milibar
BN	: Bor Nitrür
G	: Gram

GİRİŞ

Alüminyum hafiflik, mukavemet, yoğunluk, işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi muazzam özelliklere sahiptir. Bu sebeple alüminyum kullanımı git gide artarak, demir-çelik sektöründen sonra yaygın olarak kullanılan malzeme haline gelmiştir. Al ve Al alaşımları döküme elverişli, yüksek elektrik iletkenliği ve korozyonlara karşı kuvvetli olması sayesinde endüstrinin önde gelen sektörlerinde sürekli kullanılan önemli bir mühendislik ürünüdür. 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 alaşımlarındaki kalite artışındaki beklentilere cevap vermek için alaşım elementi ilavesi en başta gelen araştırma konularındandır.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum döküm alaşımlarına çeşitli elementler ilave edilerek özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada; farklı oranlardaki niyobyum (Nb) ilavesi içeren Etial 160 alüminyum alaşımının çeşitli döküm kalıplarına dökümünden çıkan numuneler incelenerek, niyobyumun Etial 160 alüminyum alaşımına etkileri üzerine olacaktır. Yapılan deneyler, farklı Nb ilavesi ile Etial 160 alaşımına yapılacak katkının sıvı metal temizliği üzerindeki etkisini belirlemek için K-mold kalıbı ve RPT numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Akıcılık etkisi ise farklı kesit kalınlıkları olan dört kanallı kalıp ve spiral kalıbına dökümler yapılarak incelenmiştir. Akıcılık deney numunelerinden oluşturulan mikroyapı incelemeleri ile birlikte mekanik testler için çekme ve sertlik deneylerine tabi tutulmuştur.

Araştırmanın Amacı

Literatürün detaylı incelenmesi sonucunda, Al-Nb alaşımlarının birden fazla özelliği sayesinde endüstride git gide kullanım alanına sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmadaki genel amaç, alüminyum alaşımlarının dökümünde niyobyum alaşım elementinin kullanımıyla mekanik özelliklerin artırılmasıdır. Bu araştırma ile birlikte niyobyum elementi ilavesinin etkisi ve Nb oranını arttıkça sıvı metalin akıcılık mesafesi, temizliği ve mekanik özelliklerdeki tesiri sunulmuştur. Böylelikle, alaşıma farklı oranlarda Nb ilavesi ile birlikte dökümdeki sıvı metalin temizliği, sıvı metalin ilerleme mesafesi ve mekanik özelliklerindeki Nb ilavesinin tesiri incelenmiştir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Alüminyum döküm endüstrisindeki teknolojik ilerlemeler ve özellikle otomotiv, havacılık, uçak ve uzay endüstrilerindeki kullanım alanlarının artması, alüminyumun yaygın bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Alüminyum, döküm sektöründe gün geçtikçe teknoloji anlamında yükselişe geçen bir mühendislik malzemesidir. Kullanımı sıklıkla artan alüminyumun özelliklerindeki iyileştirme önem taşımaktadır. Bu çalışmada, alüminyumun akıcılık ve mekanik özelliklerini artırmak için Etial 160 alaşımına farklı oranlarda niyobyum ilavesinin nasıl katkı sağladığını yapılan çalışmalar ile meydana çıkarılması hedeflenmiş olup etkisi araştırılmıştır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Literatürde yapılan araştırmalarda Nb elementinin alüminyum alaşımlara etkisi araştırılan çeşitli çalışmalar olduğu ve olumlu etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak çalışmalar daha çok A356 alaşımı üzerine odaklanmakla birlikte akıcılık özellikleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda Etial 160 alaşımına Nb ilavesinin etkilerinin incelendiği çok az çalışma olmasından dolayı kapsamlı deneyler ile araştırma yapılması gereği görülmüştür.

Terim ve Tanımları

Kokil kalıp, Çelik ya da dökme demirden imal edilen ve birden fazla döküm işlemi yapılan kalıcı kalıplar.

Döküm, Bir metalin belirli sıcaklıklar altında sıvı hali elde edildikten sonra istenilen parçanın kalıbına dökülerek, sıvı metalin katılaşması ile birlikte parçanın oluşturulduğu bir üretim yöntemidir.

Niyobyum, Niyobyum elementi Nb simgesi ile gösterilip atom numarası 41'dir. Oda sıcaklıklarında katı halde bulunur ve rengi metalik gridir. D blok elementidir.

Mekanik Özellik, Malzemeye uygulanan zorlamalara karşı malzemede meydana gelen şekil değişimi olarak tabir edilir.

Akışkanlık, Ergimiş sıvı metalin döküldüğü kabın şeklini alması ile belirlenir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM

Alüminyum, doğada en fazla bulunan metal olarak bilinmektedir. Ayrıca avantajları sayesinde demir-çelikten sonra en fazla kullanılan metaldir. II. Dünya Savaşı sonrasında artan enerji, hafif ve dayanımı kuvvetli olan malzemeler, imalat kolaylığı ve geri dönüşüme gerek duyulması, alüminyumu endüstriyel alanda ön plana çıkarmıştır (Yağcı vd., 2021).

Alüminyum, periyodik cetvelde 3A grubunda bulunan bir elementtir. 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).

Alüminyum alaşımları, mukavemeti, korozyon direnci, iletkenlik, işlenebilirliği yüksek olması ve birçok özelliği ile endüstriyel alanlarda en çok tercih edilen malzemeler arasındadır. Üretilen alüminyum parçaları ağırlıklarının az olması sebebiyle ortaya çıkan enerjiden dolayı diğer parçalara göre avantaj sağlamaktadır. 19.yy. sonlarına doğru endüstriyel sektör yolculuğuna başlayan Al; boru imalatı, havacılık sektörü ve köprü yapımında kendisine kullanım yeri bulmasının ardından, 20.yy'da motor blokları, jant, doğalgaz üniteleri, zırh plakları üretiminde kullanılması sebebi ile git gide kullanılmaya devam etmiştir (Yağcı vd., 2021).

Alüminyum hafifliği, mukavemeti, yoğunluğu, işlenebilirliği ve korozyon direnci gibi muazzam özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sebebi ile mühendislik, otomotiv, havacılık endüstrisinde ciddi oranda kullanımı artmıştır. Bu sebeple alüminyum kullanımı git gide artarak, demir-çelik sektöründen sonra en yaygın olarak kullanılan malzeme haline gelmiştir (Epstein vd., 1994).

Alüminyum kimyasal özelliği ve oksijene olan uyumu sebebiyle, her zaman diğer elementlerle bileşikler halde bulunur (Kissell, 1996).

1.2. ALÜMİNYUM ELEMENTİNİN MEKANİK, FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Alüminyum elementinin kolayca şekillendirilebilme ve işlenebilme özelliği bulunmaktadır. Doğada saf halde bulunan alüminyum elementi yumuşaklığı ile ilgili dikkat çekmektedir. Alüminyum elementinin elastisite modülü, çeliğin elastisite modülünden üç kat daha küçüktür. Bu sebeple, pres, büküm, çekme ve kalıp oluşturma gibi işlemlerin

gerçekleştirilmesini sağlar. Bu özellik, mühendislik proje hesaplamalarında büyük yüklerle karşı fayda gösterdiği ortaya çıkmıştır. Tablo 1’de alüminyumun mekanik özellikleri detay verilerek gösterilmiştir (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

Tablo 1: Alüminyumun Elementinin Mekanik Özellikleri (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

MEKANİK ÖZELLİKLER	ALÜMİNYUM
Elastik Modülü	703 (kg/cm ²) x103
Çekme dayanımı	914 (kg/cm ²)
Akma dayanımı	356 (kg/cm ²)
Uzama	% 40 (5 cm de)
Alan küçülmesi	% 38
Sertlik	23 HB
Büzülme dayanımı	200 (kg/cm ²)

Alüminyum elementi ağırlığına oranla yüksek mukavemete sahip olması ile bilinen bir malzemedir. Alüminyum parçalarına kaynak prosesi uygulandığında, geçiş bölgesinde ortaya çıkan mukavemet değerlerindeki düşüş kaçınılmaz olmuştur. Fakat, alüminyum tekrardan ısıtılma işlemine maruz bırakıldığında mukavemetinin yeniden yükseldiği gözlemlenir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Alüminyum elementinin korozyona karşı dayanıklılığı diğer elementlere nazaran yüksektir. Alüminyum, oksijenle temasta bulunduğu kendisini korumak için Al₂O₃ ismi ile adlandırılan tabaka oluşturur. Bu tabaka, alüminyum elementinin korozyona karşı direncini artırır ve bu sayede metalin korunmasına destek verir. Bu durum ile birlikte, alüminyumun saflık derecesine bağlı olarak iletkenliği ve korozyon direnci de artar (Vargel, 2004). Tablo 2’de Al elementine ait özellikler verilmiştir.

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

FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	ALÜMİNYUM
Atom numarası	13
Element serisi	Metaller
Grup, periyot, blok	3A, 3, p
Görünüş	Gümüşi
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
Buharlaşma 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 Ω·m(20 °C'de)
Isıl iletkenlik	237 W/(m·K)
Isıl genleşme	23,1 µm/(m·K)(25 °C'de)
Ses alüminyumda yayılma hızı	5000 m/s(20 °C'de)

1.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum döküm alaşımları, korozyon dayanımı, işlenebilirlik, iletkenlik, mukavemet vb. özelliklere sahiptir. Bu özellikler sebebi ile otomotiv sektöründe önemli bir yeri olmasına karşı diğer alanlarda da tercih edilir. Alüminyum ve alaşımlarına gösterilen ilgi sayesinde kalitesinin artması ve maliyetinin düşmesi beklenir. Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve diğer özelliklerinin geliştirilmesi gerekir. Alüminyum dökümlerinin nihai özellikleri arasında katılaşma en önemli yeri almaktadır. Alüminyum dökümlerde katılaşma işlemi çekirdeklenme ve büyüme sayesinde başlar. Amaç yapılan dökümün iç yapısının ince taneli bir yapı keşfetmektir (Arslan vd., 2019).

Alaşım, en az iki metalin metal ve ametal ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen metal maddelere denir. Bu maddeler, birden fazla elementin bileşiminin ergitilmesi yoluyla açığa saf durumdaki maddelere üstün özellikler kazandırmaktadır. Saf metaller, belirli özelliklere sahip olsada bu özellikler genellikle sınırlıdır. Bu nedenle özelliklerini değiştirip iyileştirmek için, belirli özelliklerini daha da iyileştirme yapmak için alaşım oluşturulur. Alüminyum döküm alaşımlarının fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri eklenen alaşım elementlerine göre değişiklik gösterir. Alüminyum genelde saf olarak kullanılmaz. Alüminyum ile birleştirilen en önemli alaşım elementleri çinko bakır, manganez, silisyum ve magnezyumdur. Alüminyuma takviye edilen en önemli alaşım elementlerinin etkileri aşağıda verilen Tablo 3'te gösterilmektedir (Alım, 2017).

Tablo 3: Alüminyuma Takviye Edilen En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri (Yalıtımlı Alüminyum, 2022).

Alaşım elementleri	Alüminyuma etkileri
(Zn)	Sağlamlık ve sertlik
(Cu)	Isıl işlem görebilme, sağlamlık, korozyon direnci
(Mn)	Akma ve gerilme mukavemeti, korozyon direnci
(Si)	Mg ile birlikte ısıl işlem görebilme özelliği, korozyon direnci
(Mg)	Sertlik, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti

1.3.1. Alüminyum Alaşımların Atom Yapısı ve Kristal Kafesi

Alüminyumun periyodik cetveldeki yeri 3A grubudur ve 13 atom numarasına sahip bir elementtir. 1.43 Å atom çapı, 0.86 Å iyon çapı ve 26,97 g/mol ağırlığa sahiptir. Alüminyum YMK (yüzey merkezli kübik) yapıya sahiptir ve 12 koordinasyon sayısına sahiptir. Saflık oranı %99,97 olan bir metalde elementel küpünün kafes parametresi 4.046(+0.004) Å ve %99.996'lık metalde 4.0413Å' dur. Elementel küpte iki iyon arasındaki mesafe 2.86Å'dur (Beljajev vd., 1974).

1.3.2. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının üretim yöntemini iki grupta adlandırırız. Bunlar dövme ve döküm alaşımları olmak üzere adlandırılır. Bu alaşımlar bileşenleri bakımından birbirleri ile benzerlik gösterir. Alüminyum alaşımlarının sertleşmesi için öncelikle özelliklere bakılıp sonrasında ısıl işlem uygulanarak sağlanabilir. Döküm özelliklerine deformasyon sertleşmesi önemli ölçüde etki etmesi sebebi ile eklenecek olan alaşım elementlerinin döküm alaşımlarına ve dövme alaşımlarına göre farklılık gösterdiği vurgulanmıştır (Kaufman ve Rooy 2004).

Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması, 3 basamak ve virgüli takip eden bir basamak olacak şekilde yapılır: Örnek olarak, 356.1 diyebiliriz. Bu nedenle bu yaklaşım sadece döküm alaşımları için geçerlidir. Dövme alaşımları için farklı sınıflandırma sistemi tercih edilir. Tablo 4'te alüminyumun sınıflandırılması için ilk rakam, alaşımı oluşturan element ile ilgili detay verir.(Url-2)

Tablo 4. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması

SERİ	ÖZELLİK
100 SERİSİ	Minimum %99 Al içeren alaşımlar.
200 SERİSİ	Al-Cu alaşımları.
300 SERİSİ	Al ve Si ek olarak, Cu-Mg eklenir.
400 SERİSİ	Al-Si alaşımları.
500 SERİSİ	Al-Mg alaşımları.
600 SERİSİ	Kullanımda değil.
700 SERİSİ	Al-Zn alaşımları.
800 SERİSİ	Al-Sn alaşımları.
900 SERİSİ	Diğer Al döküm alaşımları

Dövme alaşımlarına, plastik deformeleri iyi olması sebebi ile kolay şekil verilir. Genel olarak farklı alaşımları içeren alüminyum alaşımlarına blok homojenleştirme tavı işlemi uygulandıktan sonra ekstrüzyon ya da haddeleme işlemi ile biçimlendirilebilir. Tablo 5'te gösterilen dövme alaşımları dört aşamalı bir sistem ile numaralandırılır. İlk rakam temel alaşım elementini verir. İkinci sıradaki rakam ise, alaşım modifikasyonunu belirtir. Rakam sıfır ise alaşım orijinal olduğu anlaşılır. 1 ile 9 arasında rakamlar alaşımdaki değişikliği ifade etmekle birlikte son iki rakam ise farklı Al alaşımlarının olduğunu belirtir (Al-Saadi ve Tunay 2017).

Tablo 5: Alüminyum Dövme Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alaşım	Açıklama
1xxx	Saf alüminyum
2xxx	Bakır ile birlikte magnezyum içeren alüminyum
3xxx	Mangan içeren alüminyum alaşımları
4xxx	Silisyum içeren alüminyum alaşımları
5xxx	Magnezyum içeren alüminyum alaşımları
6xxx	Magnezyum ve silisyum birlikte içeren alüminyum alaşımları
7xxx	Çinko içeren alüminyum alaşımları, fakat bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler bulunabilir.
8xxx	Kalay ve biraz lityum içeren alüminyum alaşımları
9xxx	Alaşım elementi belli olmamakla birlikte gelecekte kullanılmak üzere belirlenmiştir.

1.3.3. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

1.3.3.1. Yoğunluk

Alüminyum, elde edilmek istenen özelliği nedeniyle sıklıkla tercih edilen endüstriyel malzemelerden biridir. Bu özellikler arasında yoğunluk mevcuttur. Alüminyum kendisi

dışındaki malzemelere göre ağırlığı bakımından daha hafif bir malzeme olduğu bilinir ve yoğunluğu, çeliğin yoğunluğunun üçte birine tekabül eder. Al malzemesi yüksek ağırlık oranına sahip olduğu için yapısı gereği hafif olmasına rağmen önemli bir güç sağlamaktadır. Bu özellikler, işlenmesi oldukça basit, fakat dayanıklı ve farklı endüstriyel sektörlerde dayanım gösteren bir malzemeye dönüşmektedir. Yani alüminyum, hafif ve sünek bir malzeme olduğu için otomotiv sektörü ve havacılık sektörlerinden spor ekipmanlarına kadar birçok sektörde ön plana çıkmaktadır. Alüminyumun yoğunluğu düşüktür. Saf Al'un katı haldeki yoğunluğu 2,699 kg/m³'tür. Sıvı haldeki Saf alüminyumun yoğunluğu ise 2.375 kg/m³'tür (Url-1).

Tablo 6: Metalik Elementlerin Alüminyuma Göre Yoğunlukları

ELEMENT	SEMBOL	YOĞUNLUK (g/cm ³)	ALÜMİNYUMA GÖRE YOĞUNLUK (%)
Lityum	Li	0,53	20
Magnezyum	Mg	1,74	64
Alüminyum	Al	2,70	100
Titanyum	Ti	4,51	167
Çinko	Zn	7,13	264
Kalay	Sn	7,28	270
Demir	Fe	7,87	292
Bakır	Cu	8,93	331
Gümüş	Ag	10,53	389
Kurşun	Pb	11,34	420
Altın	Au	19,28	715
Osmiyum	Os	22,58	837

1.3.3.2. Yüksek mukavemet ve hafifliği

Alüminyum alaşımları yüksek gerilim bakımından çelikler ve metaller içerisinde en fazla dayanıma sahip bir malzeme olması ile tanınır. Alüminyum alaşımlarının mukavemeti 700 MPa' a yaklaşabilir. Belirli bir ağırlık için mevcut mukavemet/çekme mukavemet işlemi yapılırsa oldukça farklı bir durum oluşmaktadır, yani 7075 Al alaşımı mukavemeti yüksek olması ile bilinen çelik ve titanyum elementlerinin ardından yüksek mukavemete sahip ilk elementtir (Kissell, 1996).

Bu yüksek mukavemet ve hafiflik, alüminyumun kullanım alanı olarak günümüzde tercih ettiğimiz ulaşım araçlarının yanı sıra merdivenler ve iskeleler gibi taşınabilir yapılar için de uygun hale getirildiği bilinmektedir (European Aluminium Association, 1994).

1.3.3.3. Korozyon direnci

Alüminyum oksijen ile bir anda reaksiyona girmesi özelliğine sahiptir. Bu nedenle ince yapısı ile çok sıkı Al₂O₃ tabakası ile kaplanır. Bu sert oksit kabuğunun oluşumu, metalin daha fazla oksidasyonunu önler. Alüminyumun sahip olduğu bu oksit film farklı metallere göre daha

inedir. Bu koruyucu tabaka yaklaşık 0,2 mikron kalınlığındadır. Elektron mikroskopunda bu durum incelendiğinde örtünün gözeneksiz olduğu gözlemlenmektedir. Al_2O_3 tabakasında oluşan oksit film, hasar gördüğünde hızla yeniden oluşur. Bu sebepten dolayı örtü, metal oksitlenmesinin devam etmesine karşı korumaktadır ve bu örtüye yüksek bir korozyon mukavemeti sağlamaktadır (Karakışlak, 1992).

1.3.3.4. Mekanik özellikleri

Mekanik özellikleri saflık derecesine bağlıdır. Yüksek saflıktaki Al teknik saflıktaki metale göre plastiktir. Mekanik mukavemeti düşük olduğu görülür. Metale %99,25 Al ilave edilerek elastik modülünün 7100 kg/mm^2 olduğu belirlenmiştir. Çok saf Al'un ise ancak 6700 kg/mm^2 'dir. Tavlanmış %99,2'lik alüminyum brinel sertlik değeri 24 civarında olmaktadır. %99,9'luk Al'un 15 kg/mm^2 'dir. %99,996 saflıktaki soğuk haddeleme işlemi görmüş alüminyum %75'lik bir incelemesinden sonra yaklaşık 27, yumuşatılmış hali ise $12-15 \text{ kg/mm}^2$ brinel sertliğe sahip olmaktadır. Çok sayıda araştırmalar Al'un çekme mukavemetinin artan safiyetin azaldığını göstermiş bulunmaktadır. Kopma zamanında kesit yüzeyinin ufalması yüksek saflıktaki alüminyumda en fazladır. Bu halde metalin %95 civarında şekil değiştirmesine kadar sabit kalmaktadır. Saf Al için çekme dayanımı soğuk haddelenmiş $11-13 \text{ kg/mm}^2$, tavlanmış $3.5-6 \text{ kg/mm}^2$ 'dir. Basınç dayanımı 10,8 ve $1,2 \text{ kg/mm}^2$, uzama %5,5 ve %40-50 kadardır (Beljajew vd., 1974).

1.3.3.5. Kimyasal özellikleri

Alüminyum yüksek kimyasal aktiviteyle bağdaştığı bilinir. Al havada sıkı bir Al_2O_3 tabakasıyla kaplanmaktadır. Elektron mikroskopunda bakıldığı zaman bu örtü sıkı ve gözeneksizdir. Bu örtü, metalin oksitlenme işlemine devam etmesinde korur ve korozyon mukavemeti sağlamaktadır. Al_2O_3 tabakası yaklaşık 0.2 mikron kalınlığındadır. Al, havada ergime noktasına (660°C) kadar ısıtılırsa oksitlenme işlemi devam eder. Bu durum oksidasyon, sıcaklık, parça bütünlüğü ve diğer metallere gelen safsızlıklar ile orantılıdır. Al'un oksijen ile tepkimesi kuvvetlidir ve birçok metalin oksitlenmesinde ısı verir (Beljajew vd., 1974).

1.3.3.6. İletkenlik

Al elementinin elektrik iletkenliği, bakırın elektrik iletkenliğine oranla iki kat daha fazladır. Düşük özkütlesi sayesinde saf alüminyum diğer metallere karşılaştırıldığında elektrik iletkenliği bakımından önde gelir. Alüminyumun elektriksel özelliği, saflığı ile doğrudan orantılıdır. Tablo 7'de araştırmalar sonucunda alüminyumun iletkenliğini azaltan alaşım elementleri 3 gruba ayrıldığı gösterilmiştir.

Tablo 7: Alüminyumun Elektriksel İletkenliğini Azaltan Alaşım Elementler.

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, manganez ve krom	İletkenliği çok kuvvetli düşürür.

1.3.3.7. İmalat ve şekillendirilebilme özelliği

Alüminyum farklı işleme tekniklerinde kullanılan elementtir. Alüminyum yumuşak ve tel halinde kolayca işlenebildiği için, pres işlemi, kalıplama işlemi vb. bilinen yöntemlerle kolayca şekil verilebilmektedir. Alüminyumun soğuk şekillenme sırasında pekleşme içerdiği için katkı elemanlarından farklı olarak kesiti daraldıkça, gerçek gerilmelerde yavaş yavaş yükseldiği görülmektedir (Ahlatçı, 1994).

1.3.4. Alüminyum Alaşımlarında Akıcılık

Sıvı metalin döküldüğü kalıbın tamamını doldurması, akıcılık olarak adlandırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarda bu özellik diğer özelliklere göre zayıftır. Alaşım özelliği, alüminyuma daha iyi bir akıcılık kazandırmaktadır. Akıcılık değeri bakımından ötektik bileşimler genellikle en yüksek değerlere sahiptir. Sıcaklık, akıcılık prosesini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. 679°C ile 760°C sıcaklık arasında kimyasal bileşimde sıcaklık değeri akıcılık değeri ile birlikte artış göstermiştir (Metals Handbook, 1990).

Akıcılık üniversal olarak kabul gören bir deney yöntemi dışında olsa da birçok akıcılık testi yapılmaktadır. Bu testlerden bazıları, 4 kollu şerit akıcılık kalıbı veya spiral akıcılık kalıbı gibi çeşitli kalıpları da bulunmaktadır. Bu kalıplardan en yaygını spiral kalıba sıvı metalin dökülmesidir. Kalıbın içerisine dökülen sıvı metalin bu kanal içinde katılaşmasına kadar gittiği mesafe bizlere akıcılık değerini gösterir. Bu yöntem yaygın olarak kullanılmalarına rağmen çeşitli eleştiriler almaktadır. En önemli eleştiriler, testin yeniden yapılabilirliği durumunun az olmasıdır. Metallerin akıcılığı, metalin kimyasal bileşim ve katılaşma skalası, kalıp değişkenleri ve deney varyantları gibi birden fazla faktörü kapsar (Balaban vd., 2020).

1.3.5. Alüminyum Alaşımlarının Çekme Özellikleri

Alüminyum alaşımların sıvı halden katı hale 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

alaşımalarında 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 ufak boşluklar ve birbirinden ayrılan 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 gözeneklerinin şeklinin düzensiz ve salkımlı olduğu görülmüştür (Anson ve Gruzleski, 1999).

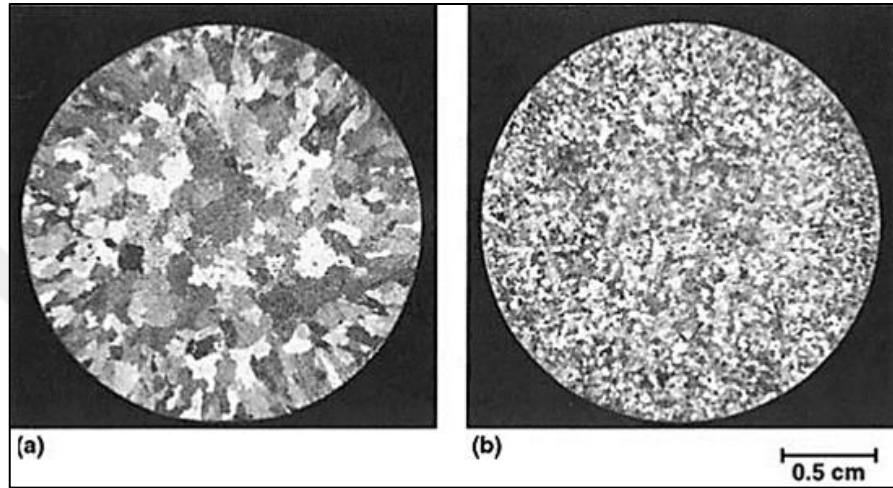
Tablo 8: Döküm Alaşımlarının Hacimsel Çekme Yüzdeleri (Brown, 2000).

DÖKÜM ALAŞIMI	HACİMSEL 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

1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Al alaşımlarında tane inceltme etkisi, daha iyi tane sınır dağılımına sebep olmaktadır. Eş ve eksen taneli yapılardaki mukavemet ve süneklilik ince taneli yapılarda da beklenmektedir. Düşük alaşım özelliği olan bileşiklerde yüksek termal etkisinden sonra oluşan büyük tanelerin, alaşımın mekanik özelliğini negatif yönde etkilediği görülmektedir. Sıvı metalin içindeki tanelerin büyüklüğü ve tanelerin türü, alaşımının katılaşma oranına ve çekirdeklenme bölgesindeki konsantrasyonun meydana gelmesine bağlıdır. Katılaşma oranı artması ile birlikte tane yapısında küçülme meydana gelmektedir. Bu duruma karşı olarak farklı döküm numunelerindeki katılaşma oranında değişiklik olabilmektedir. Hidrojen, sıvı metale tane inceltici olarak takviye edilir. Çekirdeklenme işlemi akabinde meydana gelen döküm numunelerinin, metal kalıba dökümü gerçekleştirildikten sonra meydana gelen yapısı daha da ince taneli olmaktadır.

Ergimiş sıvı metal içerisinde çeşitli element takviyeleri ile tane sayısı özelliklerini iyileştirmek hedeflenir. En çok tercih edilen tane inceltici alaşımlar titanyum ve bordan oluşmaktadır. Özellikle bor ile birleştiğinde, titanyum kuvvetli yapıda çekirdeklenme oluşturur. Buna bağlı olarak sürekli tercih gören inceltici elementtir. Alüminyum-titanyum bileşimlerinde çoğunlukla ağırlık olarak %3 ila %10 arasında titanyum vardır. Titanyum tek başına ağırlık olarak %0,02 ila %0,15 arasında takviyede bulunabilir. Etkisini 40 dakika içinde kaybeder. Bor elementine titanyum ilavesi neticesinde yüksek seviyede ince tane meydana gelmektedir. Tane incelticinin tesiri Şekil 1'de gösterilmiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).



Şekil 1: Tane İncelticinin Etkileşimi a) Tane İnceltisiz Döküm b) Tane İncelticili Döküm (Kaufman ve Rooy, 2004).

1.5. NİYOBYUM

Niyobyum adı Yunan mitolojisinde yer alan Tantalus'un kızı Niobe'den gelir. Tantalum elementine olan kimyasal benzemesi sebebi ile "Niyobyum" adı verilmiştir. Niyobyum elementinin kökeni Colombiya'dan gelen kimyacı Charles Hatchett tarafından 19.yy.'ın başlarında keşfedilmiştir ve bu sebeple "Columbium (Cb)" ismini almıştır. Nb elementi aynı zamanda başka bir kimyacı Heinrich Rose tarafından 19.yy.'ın ortalarında başka bir element olarak farkedilmiş ve Niyobyum adını buradan almaktadır. 20.yy.'ın ortalarına gelince ortak kararlar yukarıda belirtilen iki elementin aynı olduğu ve "Niyobyum" isminin verilmesi kararlaştırılmıştır (Şengül, 2019).

Niyobyum Blomstrand tarafından 1864 yılında metal olarak keşfedilmiştir. Nb elementi hidrojen ortamda ısı verilerek klorür yapısı elde edilir. 1949 yılında milletlerarası kimya anlaşmasında ismi niyobyum olarak belirlenmiş olup sembolü Nb olarak kararlaştırılmıştır (Metals Handbook, 1990).

Nb periyodik tabloda 5B grubunda bulunur. Niobit mineralinin içerisinde katı halinde gri renk bulunmaktadır. Kolayca şekil alabilir ve parlak bir metaldir. Yüksek sıcaklıkta bulunan karbon, azot, sülfür, oksijen, halojen ve öteki ametaller ile tepkimeye girer. Niyobyum gaz soğurma özelliğine sahip olmasından dolayı vakum tüplerinin yapımında kullanılmaktadır. Yüksek ısılarda pas oluşumunu önler. Niyobyum elementi paslanmaz çelik yapımında kullanılmaktadır (Şengül, 2019).

Niyobyum elementinin atom ağırlığı 92,90638 g/moldür. Yoğunluğu ise 8,57 g/cm³ olup alüminyumdan daha ağırdır. Oda koşullarında metal gri rengine sahiptir. Oda koşullarında katı halde bulunmaktadır. D-blok elementidir ve Nb elementi bir metaldir.

		Group																			
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII		
Period	1	1 H																	2 He		
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
	6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
	7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og		
	8	119 Uun																			
		* Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		** Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			
		Alkali metals		Alkaline earth metals		Lanthanides		Actinides		Transition metals		Poor metals		Metalloids		Nonmetals		Halogens		Noble gases	

Şekil 2: Niyobyum Elementi (Nb)

1.5.1. Niyobyum Elementinin Kullanım Alanları

Niyobyum elementi genel olarak mermi yatağında, roket içerisinde, uçak motorlarının içerisinde kullanılmaktadır. Yapılan araştırmada niyobyum elementinin yüksek sıcaklıkların uygulandığı yerlerde, alüminid veya silisit kaplamalarda kullanıldığını vurgulamaktadır. Ayrıca Nb alaşımlarının üç farklı grupta kullanıldığını belirtmektedir. Bu gruplar:

- Nükleer uygulamalı gruplarda orta dereceli mukavemetli alaşımlar kullanılır.
- Uzay uygulamalı gruplarda yüksek mukavemetli alaşımlar kullanılır.
- Elektronik uygulamalı gruplarda süper iletken alaşımlar kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1990).

1.5.2. Niyobyum Elementi Özellikleri

Nb elementi, parlaklığı, yumuşaklığı ve sünekliği ile bilinen bir metaldir. Rengi gri veya gümüş beyazdır. Atom ağırlığı 92,90638 g/mol'dür. Atom numarası 41'dir. 12 adet radyoaktif izotopu mevcuttur. Radyoaktif olmayan niyobyum elementinin atom ağırlığı 93 g/mol'dür. 12 adet izotopun atom ağırlıkları 89 ila 101 akb arasında değişir. Yoğunluğu 8,4 g/cm³'tür. Ergime noktası 1950°C olup kaynama noktası 2900°C'dir. Niyobyum elementi sert ve parlak bir metal olup dövülebilir bir metaldir. Çok fazla zaman havada oksitlenir ise mavimsi bir renge dönüşmektedir. Hava ile 200°C reaksiyona girer ve oksitlenme işlemi başlar. 200°C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta olacak ise atmosferin koruyucu olması gerekmektedir. Özellikle havacılık sanayisi ve uzay sanayisinde çok fazla miktarda kullanılır. Nb elementi süper iletken özellik gösterirler. Süper iletken mıknatıslar Nb-Zr tellerinden yapılmaktadır (Ferro ve Saccone, 2008).

Niyobyum elementi en etkili mikroalaşım elementidir. Nb elementi nitür ve karbür'den meydana gelir. NbC'nin oluşması için sıcaklığın en fazla 1000°C olması gerekir ve östenit yapının kristalleşmesine mani olarak küçük ferrit tanelerinin oluşmasına sebep olur. NbC ısıtma sıcaklığında çözelti içinde olur ise etkili olabilir. Bu şekilde ince parçacıklar halinde çökerek akma sınırının artışına neden olurlar. NbC çözeltiye girebilmesi için tekrardan sıcaklığın en fazla 1300°C ve uzun süreli olması gereklidir. Östenitte çökelmeyen niyobyum elementi, ferrit yapıya dönüşürken çökeler ve bu sebeple dayanımın artmasına neden olur (Uygur vd., 2017).

1.5.3. Niyobyum Elementi Mekanik Özellikleri

Niyobyum 5. Grup elementidir ve bu sebeple grubun içinde bulunan elementler ile benzerliği mevcuttur. Bu grubun içinde V, Ta ve Nb beraber bulunan elementlerdir. Niyobyum ve Tantalyum her zaman birlikte bulunurlar. Birbirlerinden solvent ekstrüzyon yöntemi kullanılarak ayrıştırılır. Refrakter metaller; Tantalyum, Niyobyum, Molibden, Renyum ve Tungsten metallerini içerir (Metals Handbook, 1990).

1.5.4. Niyobyum Elementi Atomik ve Fiziksel Özellikleri

Niyobyum, vanadyum ve tantalyum sadece Hacim Merkezli Kübik yapılarında olmaktadır. Bu metallerin yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçta polimorfozları yoktur. Yumuşak ve sünek yapıya sahiptirler. Fakat impürütelere çoğunlukla mukavemet artırma ve gevreklik katma özellikleri mevcuttur. Literatürde niyobyum ve tantalyumun hacimleri birbirine yakındır. Yoğunluklarındaki durum aynı olduğu belirtilmemiştir (Metals Handbook, 1990).

Tablo 9: Nb Elementi Özellikleri

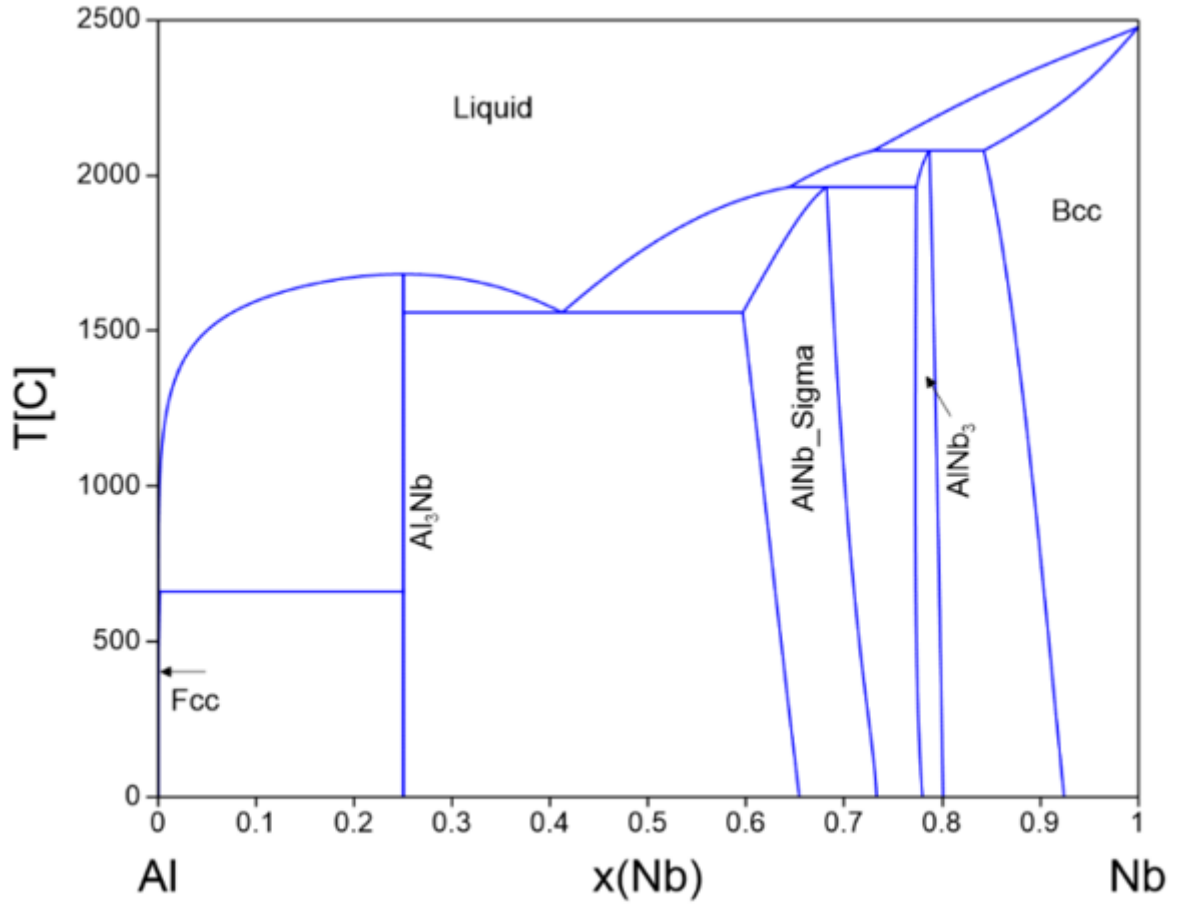
NİYOBYUM ELEMENTİ ÖZELLİKLERİ	NİYOBYUM ELEMENTİ DEĞERLERİ
Sembol	Nb
Atom Numarası	41
Kristal Yapısı	HMK
Atom Ağırlığı	92,90638 g/mol
Radyoaktif Olmayan Atom Ağırlığı	93 g/mol
İzotopun Atom Ağırlıkları	89-101 akb
Yoğunluğu	8,4 g/cm ³
Erime Noktası	2468°C
Kaynama Noktası	3410°C
Elastik Modülü	103 Gpa

1.5.5. Niyobyum Elementi Kimyasal Özellikleri

Niyobyum elementi 4. Grupta bulunan elementler ile benzerlik gösterir. Bu elementler yüksek sıcaklıklarda en fazla metal olmayan elementler ile tepkimeye girerler. Bu malzemeler genellikle korozyona karşı mukavemet gösterirler. Niyobyum ve Tantalyum; Zr ve Hf gibi kimyasal olarak birbirlerine benzerlik gösterir. Sadece HF konsantresi veya daha iyi bir karışım olan HF-HNO₃ karışımını asitlere karşı tepki gösterirler. Yüksek sıcaklıkta hava ortamında oksitlenirler (Ferro ve Saccone, 2008).

1.6. NB-AL İKİLİ ALAŞIMLARI

Günümüzde niyobyum alüminidlerin gelişmesinde süneklik veya tokluk, mukavemet ve oksidasyon direnci konularından bahsedilmiştir. 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda niyobyum alüminidler yüksek mukavemettedirler. Nb katı eriyiği ile birleştirilen niyobyum alüminidlerin mekanik özelliklerini alaşım konsantrasyonunu ve mikroyapının kontrolü ile geliştirilir. Oksidasyon direnci NbAl₃ için Si, Y, Cr veya Ti ile alaşımlandırma yaparak geliştirilir. Nb katı eriyiği için titanyum, Al ya da Cr elementleri ile alaşımlandırma yapılarak oksidasyon direnci geliştirilir (Semboshg vd., 1997). Şekil 3'te Nb-Al ikili denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 3: Nb-Al İkili Denge Diyagramı (Url-3).

Al-Nb çalışmalarından bahsetmek gerekirse Niyobyum (Nb) elementinin alüminyum alaşımlarının dökümündeki etkileri, özellikle mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki iyileştirmeler açısından önem taşımaktadır. Niyobyum, alüminyum alaşımlarına ilave edildiğinde, alaşımın mekanik dayanımını artırmakta ve döküm kalitesini iyileştirmektedir. Yapılan çalışmalar, A356 alüminyum alaşımına %0,03, %0,06 ve %0,1 oranında Niyobyum ilavesinin mikroyapı üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir (Yalçın vd., 2024).

Niyobyumun döküm sürecindeki etkileri, sıvı metal kalitesinin artırılması ve döküm sırasında oluşabilecek kusurların azaltılması ile de ilişkilidir. Alüminyum alaşımında Niyobyum ilavesi, sıvı metalin temizliğini artırarak, döküm sırasında oluşabilecek gaz boşlukları ve diğer kusurların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, Niyobyumun katılaşma sürecindeki etkisi, alaşımın soğuma hızını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini de olumlu yönde etkilemektedir (Yalçın vd., 2024; Tokatlı vd., 2022).

Niyobyumun alüminyum alaşımına katkısı, alaşımın korozyon direncini artırma potansiyeli ile de ilişkilidir. Alüminyum alaşımlarının genel olarak yüksek korozyon direncine sahip olduğu bilinmektedir, ancak Niyobyum ilavesi ile bu özelliklerin daha da

iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Bu durum, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, hafif ve dayanıklı malzemelere olan talebin arttığı günümüzde büyük bir avantaj sağlamaktadır (Yağcı vd., 2021).

Niyobyumun alüminyum alaşımlarına dahil edilmesi, mekanik özelliklerini, mikro yapılarını ve genel performanslarını önemli ölçüde etkiler. Nb, katılma sırasında mikro yapının rafine edilmesine yardımcı olan yüksek erime noktası nedeniyle güçlü bir alaşım elementi görevi görür. Bu arıtma, daha küçük tane boyutlarına yol açtığı için çok önemlidir ve bu da alaşımın akma dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerini geliştirir. Çalışmalar, niyobyum ilavesinin, katılma sırasında niyobyum ve niyobyum karbür çökeltilerinin oluşumuna atfedilen tane boyutunda kayda değer bir azalmaya yol açtığını göstermiştir (Baligidad vd., 2005; Coutinho vd., 2019).

Ayrıca, niyobyumun alüminyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmadaki rolü önemlidir. Niyobyumun varlığı, çeşitli aşındırıcı ortamlara karşı geliştirilmiş dirençle ilişkilendirilmiştir, bu da bu alaşımları deniz ve oksitleyici atmosferlerdeki uygulamalar için uygun hale getirir (Coutinho vd., 2019; Tussolini vd., 2015). Niyobyumun kararlı oksitler oluşturma yeteneği, alaşımın koruyucu özelliklerine daha fazla katkıda bulunur ve böylece zorlu koşullarda hizmet ömrünü uzatır (Tussolini vd., 2015).

Mekanik ve korozyon özelliklerine ek olarak, niyobyum ayrıca alüminyum alaşımlarının termal özelliklerini de etkiler. Niyobyumun yüksek ergime noktası, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında faydalı olan daha iyi termal stabilite sağlar (Hoffmann, 2023). Bu özellik, malzemelerin genellikle aşırı termal koşullara maruz kaldığı havacılık ve otomotiv gibi endüstriler için çok önemlidir. Ayrıca, niyobyumun alüminyum ve silisyum ile kombinasyonunun oksidasyon direncini arttırdığı ve böylece alaşımın termal stres altında dayanıklılığını artırdığı gösterilmiştir (Matsuura vd., 2003).

Niyobyum ve alüminyum arasındaki sinerji, alaşımın sünekliğine ve tokluğuna da uzanır. Araştırmalar, niyobyumun kırılma olmadan deformasyon gerektiren işlemler için hayati önem taşıyan alüminyum alaşımlarının sünekliğini iyileştirebileceğini gösteriyor. Bu geliştirme, şekillendirme ve soğutma sırasında mekanik streslere dayanma yeteneğinin kritik olduğu döküm işlemlerinde özellikle önemlidir (Teixeira vd., 2020).

Sonuç olarak, Niyobyum elementinin alüminyum alaşımlarının dökümünde kullanımı, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, mikroyapının homojenleşmesi ve korozyon direncinin artırılması gibi önemli faydalar sağlamaktadır. Bu nedenle, Niyobyum ilavesi, alüminyum alaşımlarının performansını artırmak için dikkate alınması gereken bir yöntemdir.

İKİNCİ BÖLÜM

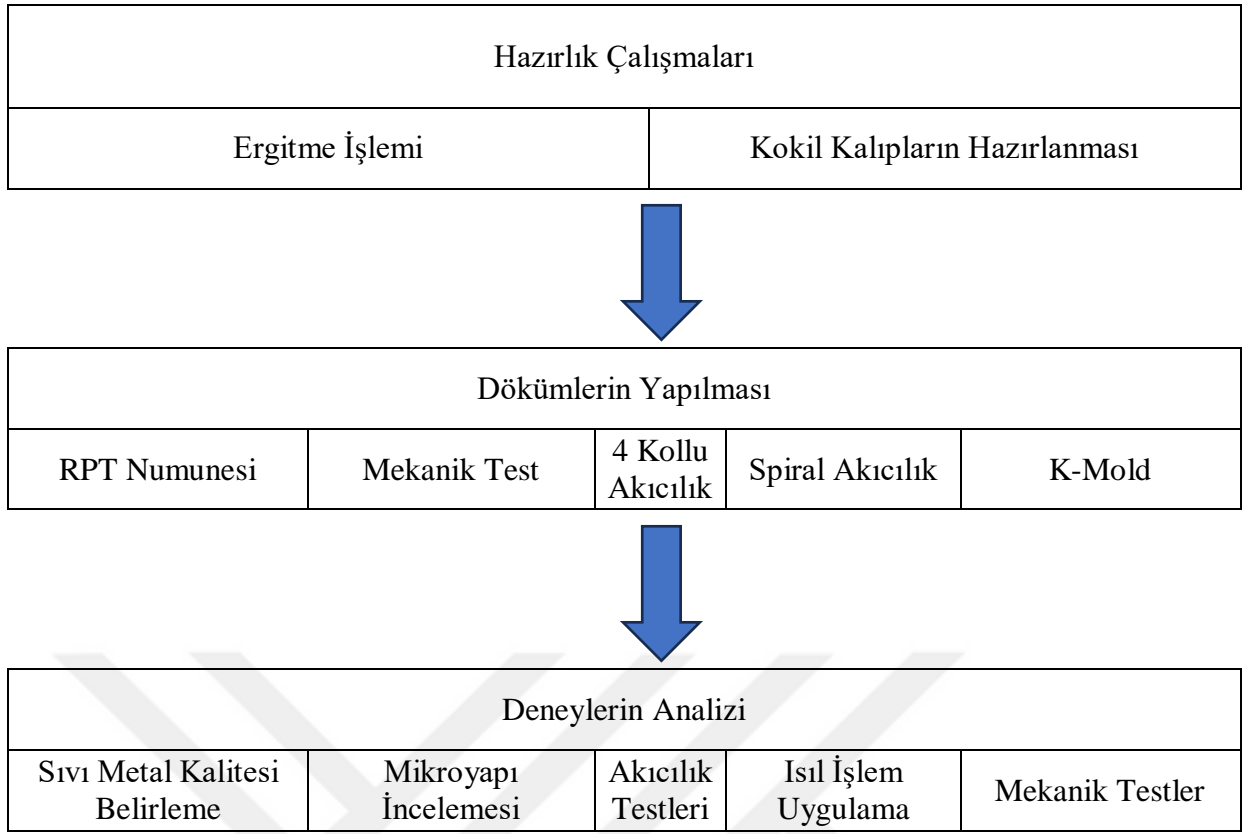
2. YÖNTEM

Bu kısımda tez bünyesinde yapılan deneyler ile ilgili çalışmalar anlatılacaktır. Deneylerde Etial 160 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Nb elementi ilave edilerek alaşımda belirlenen özelliklerin ortaya çıkaracağı etkiler incelenecektir. Çalışmalarda 4 farklı döküm gerçekleştirilmiştir. 1.dökümde Etial 160 Al alaşımı ilavesiz olarak dökülmüştür. Nb elementi sırasıyla 2. Dökümde %0,03 3.dökümde %0,05 ve 4. Dökümde %0,1 Nb ilave edilmiştir. Döküm deneyleri kokil kalıp içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kalıplar her döküm öncesindeki sıcaklığı 250°C ısıya getirilmiştir. Döküm sıcaklığı 730°C olacak şekilde dökülmüştür. Dökümlerde Nb elementinin etkisinin incelenmesi amacıyla 5 farklı kalıpta döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 10'de verilen dökümde kullanılan kokil kalıplar ve Nb ilave oranları gösterilmiştir.

Tablo 10: Dökümde Kullanılan Kokil Kalıplar ve Nb ilave Oranları

BİLEŞENLER	Döküm Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	RPT Kalıbı	K-Mold Kalıbı	Spiral Akıcılık Kalıbı	Dört Kollu Akıcılık Kalıbı	Mekanik Test Kalıbı
Etial 160	730 °C	250°C	✓	✓	✓	✓	✓
Etial 160+%0,03Nb	730 °C	250°C	✓	✓	✓	✓	✓
Etial 160+%0,05Nb	730 °C	250°C	✓	✓	✓	✓	✓
Etial 160+%0,1Nb	730 °C	250°C	✓	✓	✓	✓	✓

Sıvı metal temizliğinin etkisini K-mold kalıbı ve RPT numuneleri ile elde edilmiştir. Akıcılık etkisi 2 farklı kalıpta incelenmiştir. Bunlardan birisi farklı kalınlıklara sahip 4 kollu akıcılık kalıbında incelenmiş olup diğeri ise spiral akıcılık kalıplarına döküm yapılarak incelenmiştir. Akıcılık kalıbından sıvı metalin ilerleme mesafesini tespit edilmiştir. Ayrıca mikroyapı incelemeleri için akıcılık kalıbından numuneler kullanılmıştır. Mekanik test kalıbına yapılan dökümlerde ise ortaya çıkan numunelere ısıl işlem prosesi uygulanmış olup malzemelere çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Şekil 4'te gerçekleştirilen çalışmalar ve işlem sırası şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4: Gerçekleştirilen Çalışmalar ve İşlem Sırası

2.1. DENEYLERE HAZIRLIK İŞLEMLERİ

Deneilerde Etial 160 alüminyum döküm alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşımda Nb elementi ilavesi (Al5Nb master alaşımı) kullanılmıştır. Tablo 11’de Etial 160 alüminyum alaşımının ve Nb elementinin kimyasal analizleri verilmiştir.

Tablo 11: Etial 160 Al’un ve Nb’un Kimyasal Analizleri. (% Ağ.) (Url-4).

ALAŞIMLAR	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn	Nb	B	Al
Etial 160	1	7,5-9	3-4	0,5	0,3	1	0,2	0,2	0,1	0,1	-	-	Kalan
Al5Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	3,5	96

Yapılan döküm öncesi kalıplara Şekil 5’te verilen ölçüleri 40x60 cm olan Elektromag M 4060 (Hotplate) markasına sahip ısıtıcı tabla yardımı ile 250°C ısı verilerek kalıbın sıcaklık seviyesi artırılmıştır.



Şekil 5: Döküm Öncesi Kalıpların Isıtıldığı Tabla

2.2. ERGİTME İŞLEMLERİ

Alüminyumun ergimesi elektrik direnç ocağı içerisinde SiC potasında gerçekleştirilmiştir. Bu direnç ocağının özelliği 8 kg kapasiteye sahip olması ve 10 kW güce sahip olmasıdır. İlk olarak ergitme işlemi ilavesiz Etial 160 Al külçesi ile gerçekleştirilmiştir. Sonraki dökümlerde sırasıyla %0,03, %0,05 ve %0,1 Nb etki edecek şekilde dökümler yapılmıştır. Ergitme işlemi esnasında döküm ocağına girecek malzemenin ağırlığı her döküm başlangıcında 4 kg olacak şekilde hazırlanmıştır. Ergitme işlemi döküm ocağının sıcaklığı 730°C'ye gelmesi ile gerçekleşir. Sonra sırasıyla belirtilen oranlarda Nb ilave edilmiştir. Nb ilavesi sonrasında döküm ocağının sıcaklığı 730°C'ye geldiğinde pota döküm ocağından çıkartılarak kalıplara döküm işlemi yapılmıştır. Şekil 6'da elektrik direnç ocağı resmi verilmiştir.



Şekil 6: Elektrik Direnç Ocağı

Döküm yapıldıktan sonraki en önemli husus kalıplardan çıkarılan numunelerin zarar görmemesidir. Aksi takdirde kalıptan çıkarılacak malzemeye uygulanan güç hem parçaya hem de kalıpta zarar meydana gelecektir. Bu sebeple hem kalıp ömrü ve numunenin yüzey kalitesi için kalıpların yüzeylerine BN (bor nitrür) ile boyanarak kaplanmıştır. Şekil 7’de döküm öncesi, dökümün yapıldığı esnada ve döküm sonrasında kalıpların görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7: a) Döküm Öncesi Kokil Kalıplar, b) Döküm Esnasında Alınan Görüntü

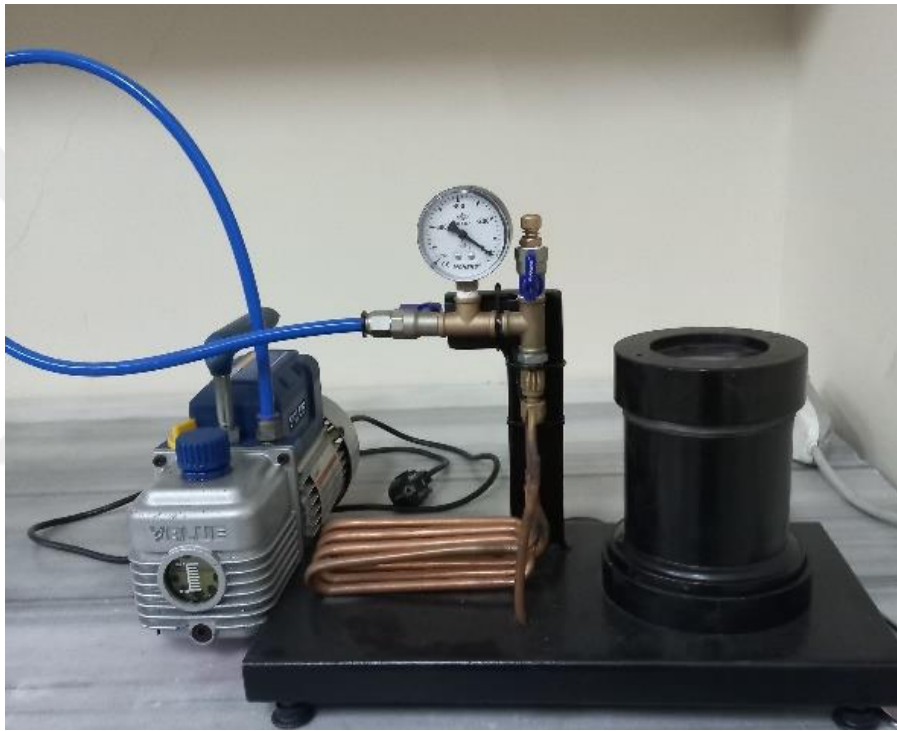
2.3. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ

Döküm sonrası belirli bir süre sonra katılaşma ve soğuma gerçekleştiği için kalıplar açılarak döküm numunelerini alınmıştır. Yapılan deneylerde toplamda 5 olmak üzere kokil

kalıptan numune alınmıştır. Yapılan dökümlerden sonra ilk olarak numunelerin resmi çekilmiş olup incelemeye alınmıştır.

2.3.1. RPT Numunelerinin İncelenmesi

Bu yöntemin amacı ergiyen alüminyumun belirli bir basınç altında katılaştırılması esnasında azaltılmış basınç ile birlikte gaz gözenekliliği oluşumuna dayanmaktadır. Gaz ve inklüzyonların gözeneklere yol açmasıyla birlikte katılaşma sırasında gözeneklerin kolay büyümesine destek olmaktadır. Bu amaçla sıvı metal vakum altında katılaştırmak üzere Şekil 8’de verilen test cihazının kalıbına ergimiş sıvı metal dökülmüştür. Sonrasında test cihazındaki basınç ile birlikte katılaşma meydana gelene kadar tutulmuştur.



Şekil 8: Azaltılmış Basınç Testi (RPT) Cihazı

Döküm numunelerinin yoğunluk ölçümleri RPT test cihazında sıvı metalin katılaşma işlemi gerçekleştikten sonra Arşimet prensibine göre hesaplanır. Arşimet prensibine göre döküm numunesinin ağırlığı ilk olarak havada ikinci olarak saf suda ölçülüp kayıt altına alınır. Saf suyun sıcaklığı 20°C ve suyun yoğunluğu $d_s=0,99821 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Ölçüm yapılan cihazın hassasiyeti 0,02 g’dır. Şekil 9’da yoğunluk ölçüm test cihazı verilmiştir.



Şekil 9: Arşimet Prensibine Göre Yoğunluk Ölçümü Yapılan Hassas Terazi

Elde edilen ağırlık değerleri Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır. Burada d_n numunesinin yoğunluğu, m_h havadaki ağırlığı, m_s sudaki ağırlığı, d_s suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

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

d_n - numunenin yoğunluğu,

m_s - sudaki ağırlığı,

d_s - suyun yoğunluğu

m_h –havadaki ağırlığı

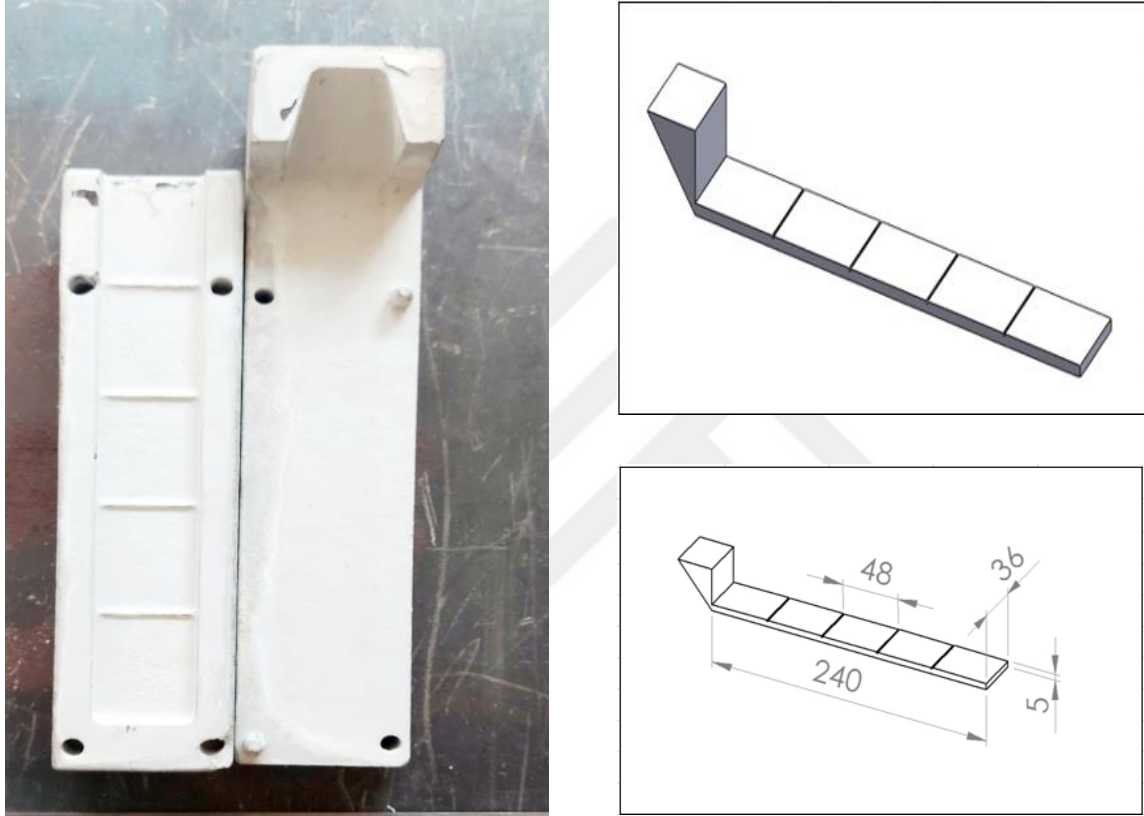
Döküm numunelerin içerisinde bulunan % gözenek miktarı da Eşitlik 2'de verilen formül ile hesaplanmıştır.

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

RPT numunelerindeki gözenekleri kolay bir şekilde görmek amacıyla döküm numunesini dikey olarak ortadan ikiye kesilip ve kesilen yüzeyler zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Akabinde zımparalaması yapılan numuneler tarayıcıda taranarak görüntüler elde edilmiştir.

2.3.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi

Sıvı metal temizliği K-mold kalıbı kullanılarak tespit edilmiştir. K-mold kalıbına uygulanan deney dökümlerinde yaklaşık olarak 400 g ergitilmiş alüminyum dökülmüştür. K-mold kalıplarından 240x36x5mm ölçülerine sahip test numuneleri oluşturulmuştur. Katılaşma tamamlanıp numune kalıptan çıkarıldıktan sonra kesitler kırılarak kesit yüzeylerindeki inklüzyon sayıları sayılmıştır. Şekil 10'da K-Mold test kalıbı ve katı model görüntüsü verilmiştir.



Şekil 10: K-Mold Kalıp Fotoğrafı ve Numuneye Ait Ölçüler Ve Katı Model Görüntüsü

Sıvı metalin temizliği K değeri Eşitlik 3'te verilen formül ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte verilen K; inklüzyon sayısını, s; toplam kapanım sayısını, n; incelenen örnek sayısı ile ifade edilir.

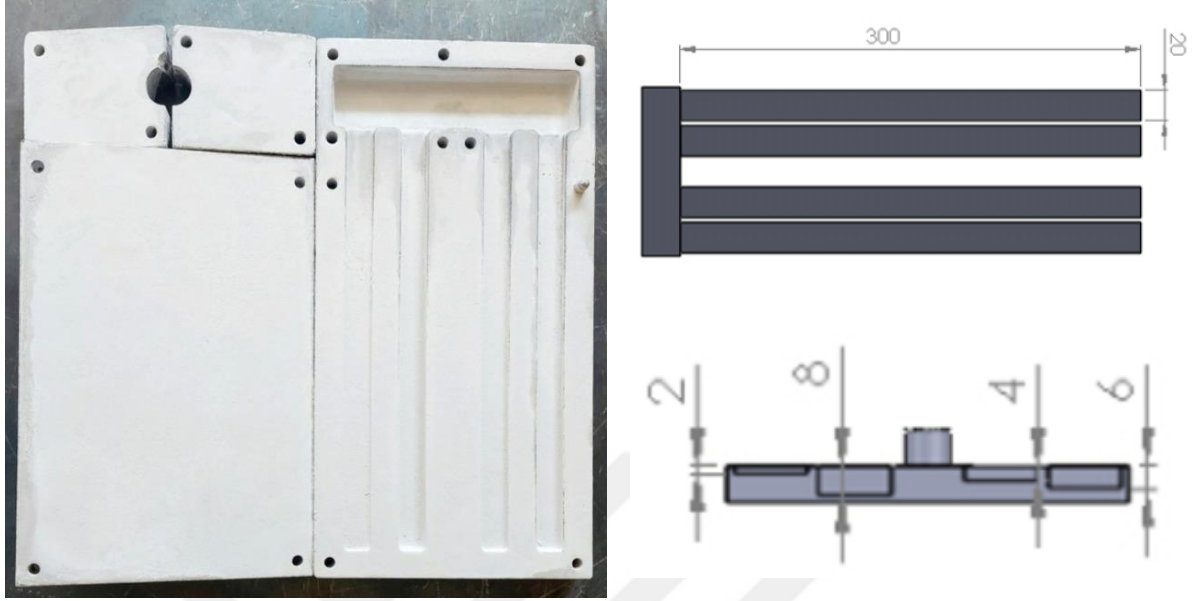
$$K=s/n$$

(Eşitlik 3)

2.3.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi

Alüminyum alaşımlarının akıcılık özellikleri için kesit kalınlıkları farklı olan kanallarda sıvı metalin ilerleme mesafesinin ölçülmesi için model tasarımı yapılmıştır. Kanal uzunluğu bütün kanallarda sıvı metalin tam olarak yürümemesi için 300 mm olarak uzun tutulmuş ve ilerleme mesafesi ölçülmesi amaçlanmıştır. Akıcılık mesafesi ölçümü yapıldıktan sonra

numunelerden mikroyapı incelemeleri yapılmak suretiyle en uç kısımlarından parçalar alınmıştır. Şekil 11’de dört kanallı akıcılık kalıbı görüntüsü, kalıp ölçüleri ve numune resmi verilmiştir.,



Şekil 11: 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı ve Numune Ölçüleri

2.3.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

Akıcılık testlerinde spiral akıcılık test kalıbı kullanılmıştır. Kalıbın tasarım şekli verilen resme göre kokil kalıba imalatı gerçekleştirilecek olup daha sonra sıvı metalin kalitesi göz önünde bulundurularak sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü yapılacaktır. Sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü yapılan malzemelerin ucundan mikroyapı incelemeleri için parçalar alınmıştır. Şekil 12’de spiral akıcılık kalıbı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 12: Spiral Akıcılık Kalıbı

2.3.5. Mekanik Test Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

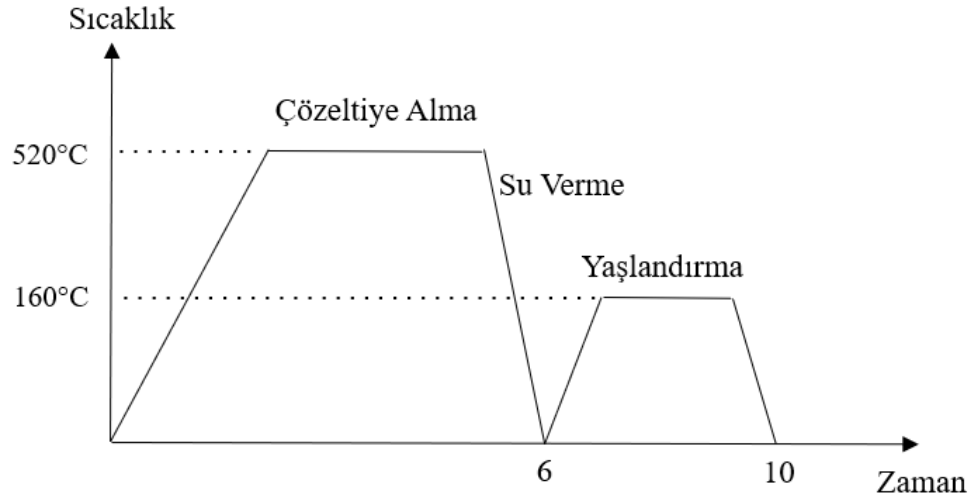
Etial 160 alüminyum alaşımına Nb elementi ilavesinin mekanik özelliklerdeki değişiminin incelenmesi hedefi ile 4 farklı şekilde toplamda 24 adet olan 6 kollu çekme çubuğu dökümü yapılmıştır. Mekanik test kalıbı Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13: Mekanik Test Kalıbı

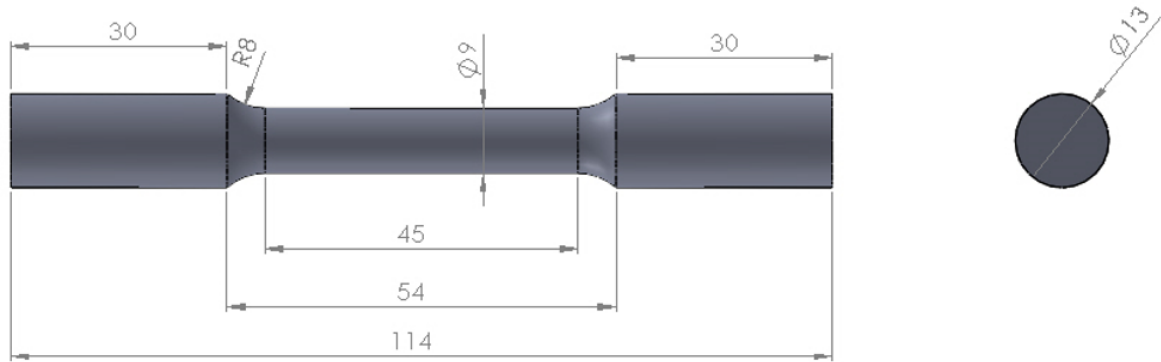
Farklı oranlardaki Nb elementi ilaveli numuneler yolluklarından ayrılıp çekme işlemine geçmeden önce T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Burada ısıl işlem prosesindeki amacımız yumuşak ve esnek bir yapı içinde ince ve sert bir çözeltinin düzenli bir şekilde dağılmasını sağlayıp mukavemeti arttırmaktır. Yaşlandırma prosesi 3 aşamadan oluşur. Bu aşamalar: çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma işlemleridir. Mekanik test kalıbından aldığımız parçalar, ısıl işlem fırınında ilk olarak 520°C'ye kadar ısıtılıp ve bu sıcaklıkta 6 saat kadar beklemeye alınmıştır. Akabinde 80°C su içerisinde bırakılmıştır. Su içine bırakılan parçalara su

verme işlemi gerçekleştirildikten sonra yaşlandırma işlemi için 160°C içinde 4 saat bekletilmiştir. Bu süre bitmesi ile birlikte parçalar soğuması için bekletilmiştir. Şekil 14'te ısı işlem ile ilgili aşamalar verilmiştir.



Şekil 14: Isıl İşlem Uygulama Şeması

Isıl işlemden sonra döküm numuneleri Computer Numerical Control (CNC) torna tezgahında işlenip çekme testinde kullanılabilir hale getirilmek için hazırlanmıştır. Şekil 15'te çekme testi için numunenin şematik gösterimi ve test çubuğunun ölçüleri verilmiştir.



Şekil 15: Çekme Testi Numunesi Şematik Gösterimi

Test örnekleri Şekil 15'te gösterilen ölçüde hazırlanarak çekme hızı 1 mm/dk altında 100 kN'luk kapasiteli MTS Hydraulic Wedge Grip marka cihaz ve mekanik test kalıp numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Çekme test cihazı, numune test öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16: Çekme Testi Cihazı, Test Numuneleri, Test Sonrası Numune Görüntüsü

Sertlik testleri Brinell sertlik ölçümleri ile oda sıcaklığında DIGIROCK-RBOV marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümde HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye ile 2,5kgf ön yük ve 62,5kgf toplam yük altında HRB test yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her numuneden en az 10 adet olacak şekilde sertlik değerleri alınmıştır. Şekil 17’de sertlik test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 17: Sertlik Ölçüm Test Cihazı

2.3.6. Mikroyapı İnceleme Çalışmaları

Mikroyapı incelemeleri yapabilmek akıcılık kalıbı dökümlerinin en uç kısımlarından numuneler alınmıştır. Alınan numuneler bakalite alınarak kalıplanmış ve sonrasında zımparalama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından sırasıyla 3 μ m, 1 μ m alümina süspansiyonu parlatma yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler Keller ile dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra, NMM-800/820 serisi metalürjik optik mikroskop kullanılarak mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 18’de metalografik muayene için kullanılan zımparalama-parlatma cihazı gösterilmektedir.



Şekil 18: Mikroyapı İncelemelerinde Kullanılan Zımparalama Cihazı

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu bölümde deneysel sonuçlar ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir. Yapılan çalışmalarda, RPT ve K-mold kokil kalıplarında döküm işlemi gerçekleşmiş ve uygulanan dökümlerde sıvı metal kalitesi incelenerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, spiral ve 4 yollu akıcılık kalıplarında ise sıvı metal ilerleme mesafeleri ile birlikte mikroyapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca mekanik testleri elde edebilmek için numuneleri çekme ve sertlik deneylerine tabi tutulmuştur.

3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ

Döküm işleminde kullanılan alaşım ve alaşıma eklenen Nb elementi ilavesi oranlarının uygunluğu için döküm sonrası ortaya çıkan parçaların kimyasal bileşim sonuçları Tablo 12’te verilmiştir.

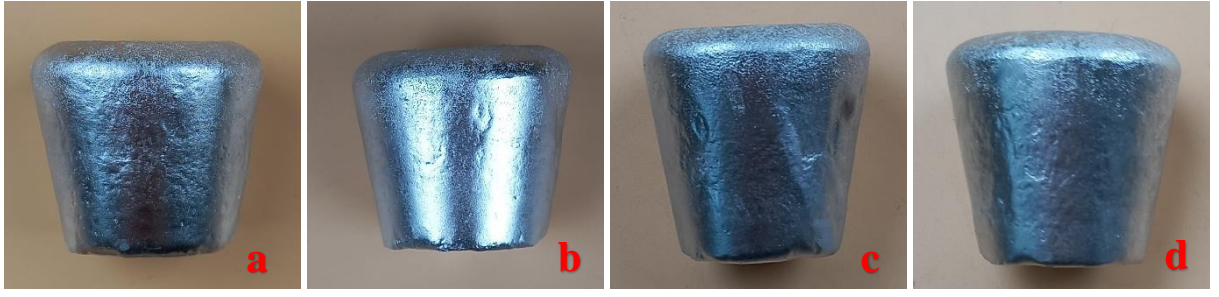
Tablo 12: Kimyasal Bileşim Sonuçları (% Ağ.)

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Nb	Al
İlavesiz	0,274	8,93	3,89	0,119	0,165	0,0175	0,0161	0,0179	-	Kalan
%0,03 Nb ilaveli	0,215	8,91	3,33	0,109	0,119	0,0104	0,0077	0,0128	-	Kalan
%0,05Nb laveli	0,246	8,49	3,85	0,106	0,125	0,0147	0,0103	0,0841	-	Kalan
%0,1 Nb ilaveli	0,237	8,72	3,53	0,113	0,110	0,0106	0,0082	0,0126	-	Kalan

Tablo 12’teki Etial 160 alaşımların standart bileşim aralığında yer aldığı gözükmemektedir. Kimyasal analiz cihazında Nb kalibresi olmadığından Nb ilave oranları tespit edilememiştir.

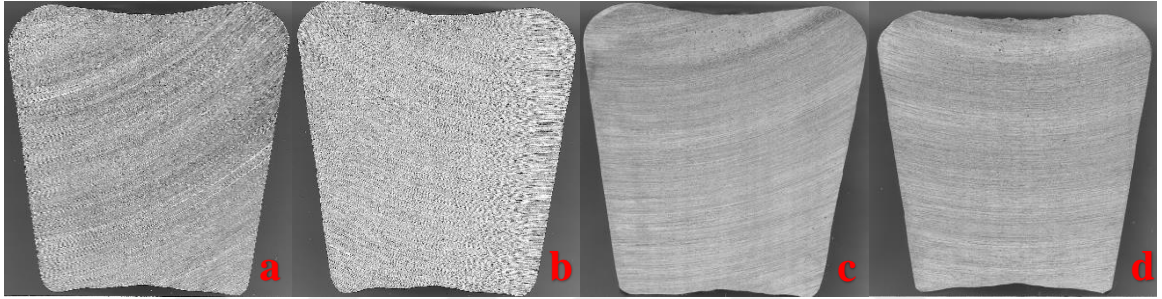
3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ

Tez çalışmasında sıvı metalin temizliği ile ilgili hataların ortaya çıkardığı etkilerin önüne geçmek amacıyla döküm öncesinde sıvı metal temizleme prosesinin uygunluğuna karar verilip gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal temizleme prosesi akabinde, sıvı metal kalitesini ölçmek amacıyla RPT cihazında vakum altında katılaşma numunesi elde edilmiştir. RPT numunelerine ait örnek görseller Şekil 19’da sunulmuştur.



Şekil 19: RPT Numuneleri Fotoğraf Görüntüleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İaveli, c) %0,05 Nb İaveli, d) %0,1 Nb İaveli

Şekil 19'daki görsellerden belli olduğu üzere, numunelerin üstünde meydana gelen çöküntüler sıvı metal temizliğinin yeterli düzeyde olduğuna bir işarettir. RPT numuneleri ortadan ikiye kesilerek zımparalama işlemi uygulanmış ve akabinde yüzeylerindeki gözenek durumları incelenmiştir. Numune kesit yüzeylerinin görüntüleri Şekil 20'de sunulmuştur.



Şekil 20: RPT Numune Kesit Fotoğrafları a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İaveli, c) %0,05 Nb İaveli, d) %0,1 Nb İaveli

Şekil 20'deki 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 13'te, yoğunluk ölçüm sonuçlarıyla birlikte hesaplaması yapılan gözenek sonuçları sunulmaktadır.

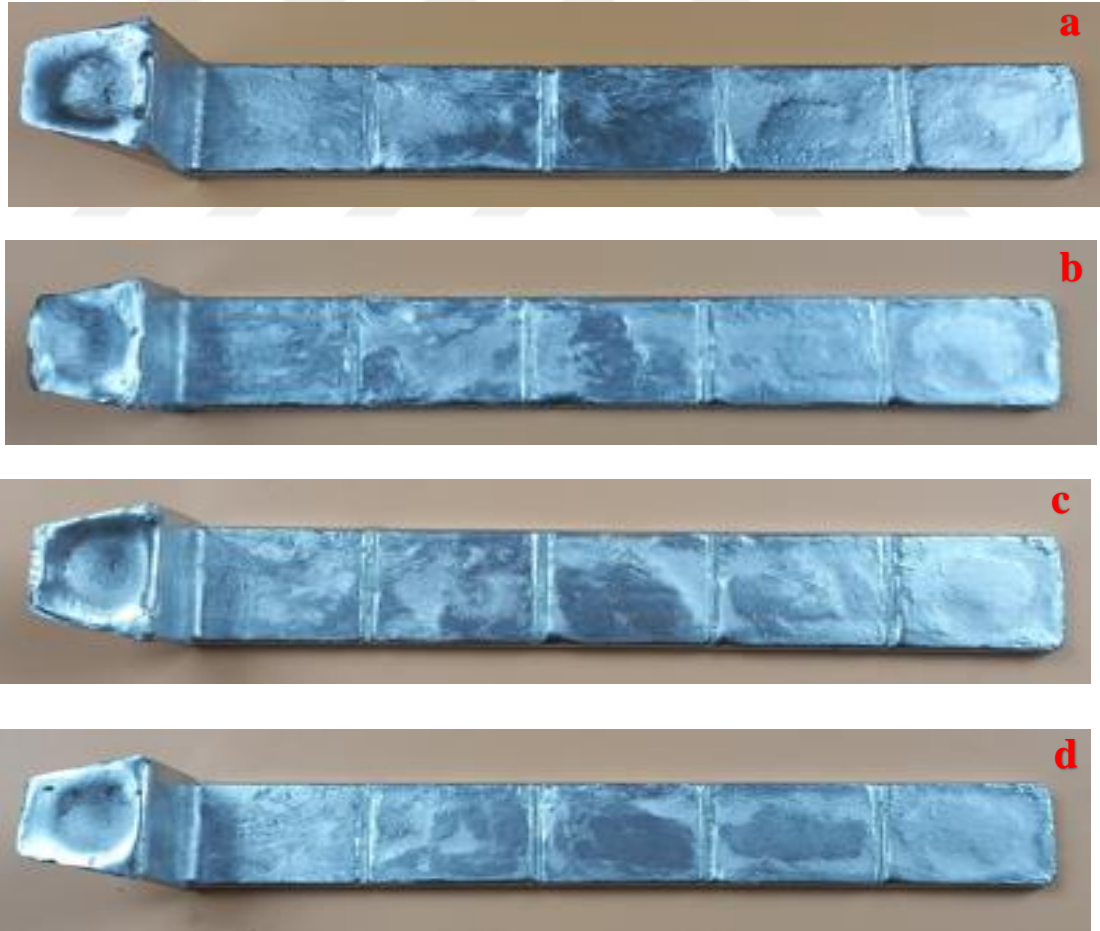
Tablo 13: RPT Numunelerinde Yoğunluk ve Gözenek Değerleri

Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Referans Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
Takviyesiz	118,12	75,23	2,749	2,76	0,395
%0,03 Nb Takviyeli	117,30	74,77	2,753	2,76	0,249
%0,05 Nb Takviyeli	124,11	79,12	2,754	2,76	0,229
%0,1 Nb Takviyeli	126,95	80,83	2,748	2,76	0,447

Tablo 13'te, RPT kalıbına yapılan döküm prosesinden elde edilen numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları incelenmiştir. Deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk arasındaki farka bağlı olarak gözenek değerleri hesaplanmıştır. Teorik yoğunluk değeri, döküm alaşımının kimyasal bileşimi ve standart verileri dahilinde hesaplanmıştır. Tüm deneylerde hesaplanan

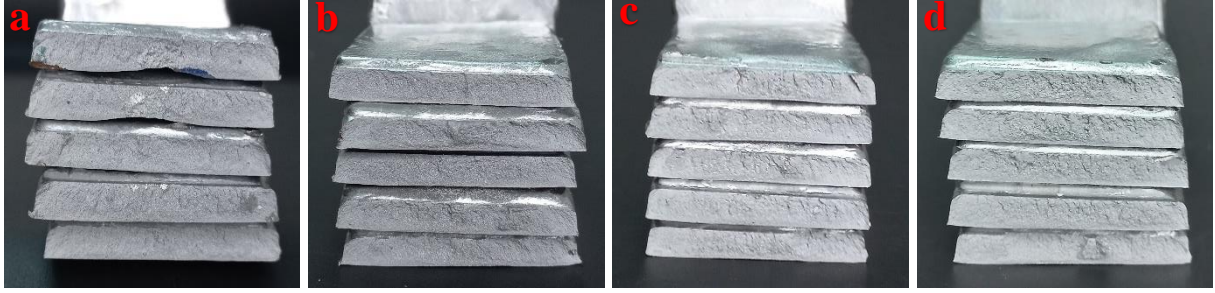
gözenek sonuçları, Tablo 13'te de görüldüğü gibi %0,5'in altında olması sebebiyle kabul edilebilir seviyededir. Bu veriler, numune kesit yüzeyi analizi sonucunda RPT testinin sıvı metal kalitesinin uygun olduğunu doğrulamasıyla ilişkilendirilmiştir. Tokatlı ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada endüstride önemli ekonomik değere sahip olan geri dönüştürülebilir alüminyumun kaliteli ürünler üretmesi için sıvı metal kalitesinin artması amaçlanmıştır. Sıvı metal kalitesinin artması için sıvı metal temizleme yöntemleri bahsedilmiştir. Bu yöntemler: flakslar, rotary gaz giderme, kontrollü katılaşma ile gaz giderme, elektromanyetik yönlü gaz giderme, sprey gaz giderme, ultrasonik gaz giderme, vakum gaz giderme ile adlandırılmıştır (Tokatlı vd., 2022). Dışpınar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada numune üzerinde çöküntülerin meydana gelmesi ve gözenek miktarının %0,5'in altında olması sıvı metal kalitesi açısından uygun olduğunu göstermektedir (Dışpınar vd., 2018).

Yapılan tez çalışmasında sıvı metal temizliğini başka bir deney metodu K mold kalıba döküm yaparak gözlemlenmiştir. Şekil 21'de, K-mold döküm numunelerinin fotoğraf görselleri sunulmuştur.



Şekil 21: K-mold Kalıbına Uygulanan Döküm Numune Görüntüleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli

Numuneler, belirlenen bölgelerden kırılarak kırık yüzeylerin görselleri temin edilmiştir. Şekil 22’de, K-mold numune kırık yüzeylerinin görselleri sunulmaktadır.



Şekil 22: K- Mold Numuneleri Kırık Yüzey Görselleri a) İlavesiz, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli

Şekil 22’de, K-mold parçalarının dış kademesinden başlayarak sıralı bir şekilde resimleri çekilmiştir. K-mold numunelerinin kırılan kesitlerinde tespit edilen inklüzyon sayıları ve hesaplanan K değerleri Tablo 14’te sunulmuştur.

Tablo 14: K- Mold Numunelerine Ait Ölçüm Değerleri

Numune adı	İnküzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
İlavesiz (Etial 160)	2	5	0,4
%0,03 Nb ilaveli	3	5	0,6
%0,05 Nb ilaveli	4	5	0,8
%0,1 Nb ilaveli	2	5	0,4









Tablo 14’teki K değeri verilerine dayanarak yapılan değerlendirme neticesinde, döküm deneylerinde ortaya çıkan K değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. K-mold ve RPT verileri, gaz kaynaklı gözenek oluşumunu önlemek için olumlu seviyede olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, dökümlerde olası gözeneklerin genellikle gaz kaynaklı olmadığını ve eğer varsa, yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözeneklerinin neden olabileceği düşüncesini desteklemektedir. Djurdjević ve arkadaşları yapmış olduğu araştırmada K-mold test yöntemi Japonya’da 1973 yılında Sanji Kitaoka tarafından uygulanan bir kırılma yöntemi olduğu vurgulanmıştır. Yapılan testteki amaç, Al alaşımlarının döküm öncesi metal temizliğini değerlendirmektir. K-mold yönteminin önemli özelliklerinden bazıları; kolay kullanımı, yaklaşık 10 dakika içerisinde hızlı sonuç vermesi, kolay numune alınması, taşınabilirliği, inklüzyonlara duyarlılığı ve maliyeti bakımından olumlu sonuç vermesidir (Djurdjevicvd., 2010).

Tokatlı ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında sıvı metal temizliği için K değerinin 0,5’in altında olması gerektiği belirtilmiştir. K değerinin 1’in altında olduğu durumlarda sıvı metalin temizliğinin kabul edilebilir seviyede olduğunu ancak 1’den büyük olduğu durumlarda

sıvı metalin temizlenmesi gerektiğini ifade etmiştir (Tokatlı vd., 2022). Buna bağlı olarak elde edilen sonuçlar ışığında sıvı metal kalitesi temizliğinin K-mold sonuçlarına göre uygun olduğu anlaşılmıştır.

3.3. AKICILIK TEST SONUÇLARI

Şekil 23'te spiral ve 4 kanallı akıcılık kalıbına yapılan dökümlerden elde edilen numunelere ait resimler sunulmuştur.

	4 Kanallı Akıcılık Kalıbı	Spiral Akıcılık Kalıbı
Etial 160 İlavessiz		
%0,03Nb ilaveli		
%0,05 Nb ilaveli		
%0,1Nb ilaveli		

Şekil 23: Akıcılık Kalıbı Deney Numuneleri

Şekil 23'teki resimlerde görüldüğü gibi, Etial 160 alaşımına Nb ilavesi yapıldığında akıcılık özelliklerindeki değişime bağlı olarak farklı sıvı metal ilerleme mesafeleri ortaya çıktığı belirlenmiştir. Deney numunelerinin sıvı metal ilerleme mesafe verilerine ilişkin değerler Tablo 15'te sunulmuştur.

Tablo 15: İlerleme Mesafeleri

Döküm No	Alaşım İlavesi	4 Kanallı (2 mm)	4 Kanallı (8 mm)	4 Kanallı (4 mm)	4 Kanallı (6 mm)	Spiral (mm)
1	İlavesiz	7	300	235	296	390
2	%0,03 Nb İlaveli	4	300	146	158	330
3	%0,05 Nb ilaveli	27	300	80	147	300
4	%0,1 Nb ilaveli	34	300	77	99	217

Tablo 15'teki sonuçların incelenmesi ile birlikte, değişkenlik gösteren döküm koşullarının sıvı metalin akıcılığı üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi, Nb ilavesiyle birlikte alaşımın akıcılık özelliklerinde azalma tespit edilmiştir. Spiral akıcılık kalıbındaki, sıvı metal ilerleme mesafe verileri %0,03 Nb ilavesi miktarıyla birlikte 390 mm'den 330 mm'ye kadar azalmıştır. Akabinde %0,05 Nb ilavesi ile 300 mm'ye ve %0,1 Nb ilavesi ile 217 mm'ye azaldığı görülmüştür.

Dört kanallı akıcılık kalıbında ise, farklı kesitlerde sıvı metal ilerleme mesafesinin değiştiği görülmektedir. Numunelere yapılan incelemeler kalıp kesit kalınlığının da sıvı metalin ilerleme mesafesini etkilediği anlaşılmaktadır. Kalıbın kesit kalınlığındaki artışı, sıvı metal ilerleme mesafelerinde tüm deney şartlarında artışa sebep olduğu görülmüştür. Sıvı metal ilerleme mesafesi 2 mm kesitli kanalda Etial 160 alaşımının ilavesiz dökümünde 7 mm, %0,03 Nb ilavesinde 4 mm, %0,05 Nb ilavesinde 27 mm, %0,1 Nb ilavesinde 34 mm olarak belirlenmiştir. 4 mm ve 6 mm kesitli kanallarda ilavesiz dökümde sıvı metal ilerleme mesafesi Nb ilavesi ile düşüşe geçmiş olup, Nb ilavesi arttıkça sıvı metal ilerleme mesafesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu kanalın kesit kalınlığı 4 mm olduğunda ilerleme mesafeleri sırasıyla 235 mm, 146 mm, 80 mm ve 77 mm olarak ölçülmüştür. 6 mm kesitli kanalda, elde edilen veriler 296 mm, 158 mm, 147 mm ve 99 mm olarak ölçümü yapılmıştır. 8 mm kesitli kanalın tüm döküm şartlarında kanalın tamamen doldurduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Etial 160 alüminyum alaşımı 8 mm ve daha kalın kesitlerde, sıvı metalin akıcılığı açısından herhangi bir sorun olmayacağını ve 8 mm kesitin kalıp dolusunda kritik bir kesit kalınlığı olmadığı belirlenmiştir.

Değişen kesit kalınlığı içeren akıcılık test kalıplarında karşılaştırma amaçlı olarak akıcılık indeksi yaklaşımı söz konusudur. Bu kapsamda her bir kesitin uzunluğunun ilgili kesit kalınlığına bölünmesi ile elde edilen sayıların toplamı ilgili döküm deneyi için akıcılık indeksi

değerini vermektedir [(Durmuş vd., 2024)]. Deneylerde elde edilen akıcılık indeksi değerleri sırasıyla ilavesiz dökümde 149,08 mm, 102,33 mm, 95,50 mm ve 90,25 mm olarak belirlenmiştir. Değişen kanallarda durumlar Nb ilavesi ile değişkenlik gösterse bile kalıp bütün olarak değerlendirildiğinde Nb ilavesi ile akıcılık özelliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Nb ilavesinin akıcılığı azaltmadaki etkisinin sebebi araştırıldığında alaşım elementinin ergime sıcaklığının etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda Nb elementi ergime derecesi 2477 C olarak bilinmektedir. Alüminyum alaşımı içerisinde Nb ilavesi ile yapıda ortaya çıkan Nb bileşiklerinin de ergime derecelerinin yüksek olmasından dolayı aynı döküm sıcaklığında yapılan deneylerde sıvı metal ilerlemesinin düşük çıktığı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda alaşımın bileşiminde akıcılığı etkileyen faktörler olarak, sıvı metalin sıcaklığı, sürtünme katsayısı, alaşımın yüzey gerilimi, yüzeyde oluşan oksit tabakası, sıvı metal yüzeyinde bulunan gaz tabakası, cüruf parçacıkları, kalıbın özellikleri belirlenmiştir. Bu faktörlerdeki değişkenlik sıvı metalin kalitesi ile doğru orantılıdır. Tokatlı ve arkadaşları yapılan deneyde numunelerin sıvı metalin farklı kalınlık ve uzunluk mesafelerindeki hareketi boyunca katılaşmasına dayandığını vurgulamışlardır. Yalçın'ın yapmış olduğu çalışmada A356 alüminyum alaşımına Nb ilavesi ile sıvı metalin ilerleme mesafelerinin değişkenliğini vurgulamıştır (Tokatlı vd., 2022, Yalçın, 2024).

3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI

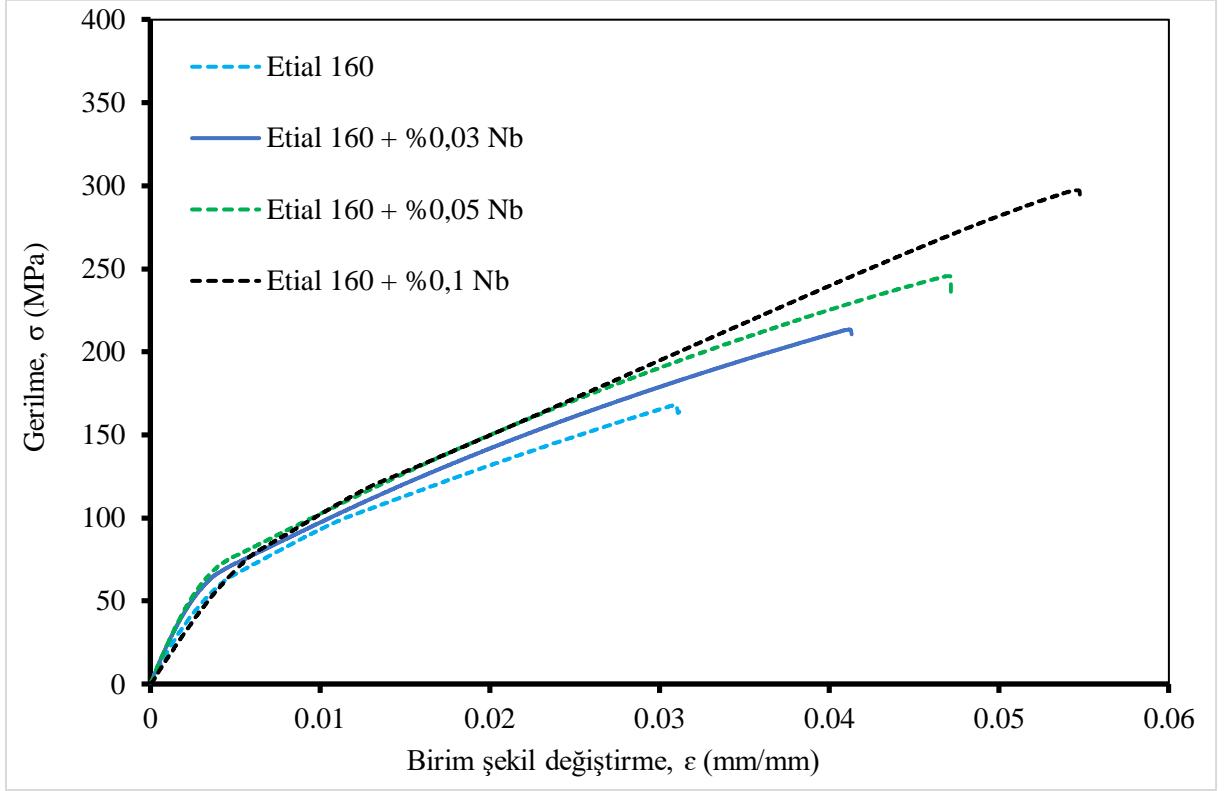
3.4.1. Çekme Test Sonuçları

Mekanik testler için yapılan döküm deneylerinden Şekil 24'de görüldüğü gibi deney numuneleri elde edilmiştir. Numuneler öncelikle ısıl işleme tabi tutulmuş, yollukların kesilmesi sonrası çekme çubuğu formunda işlenerek çekme ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur.



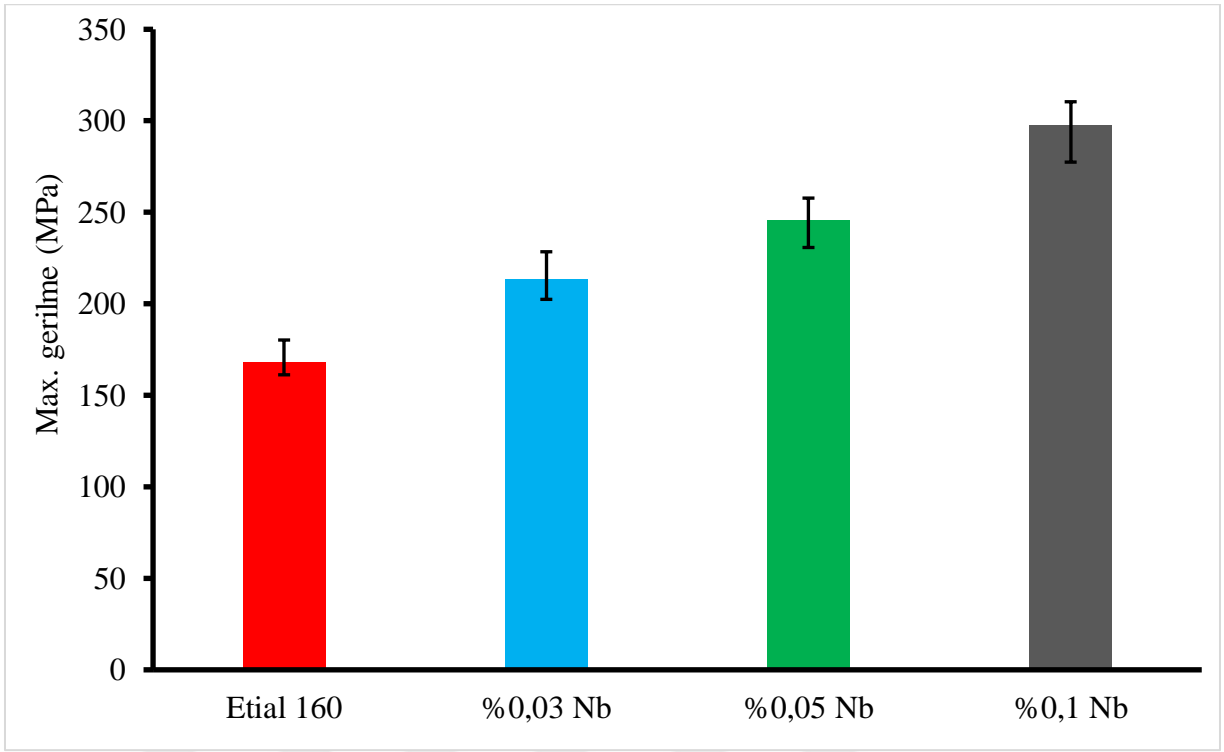
Şekil 24: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numune Görüntüsü

Çekme testi sonuçları Şekil 25'te grafik olarak verilmiştir. Testler yapılan dört döküm için her birinden en az üç numune kullanılarak yapılmıştır. Grafikte yer alan değerler, yapılan testler için ortalama çekme test değerlerini ifade etmektedir.

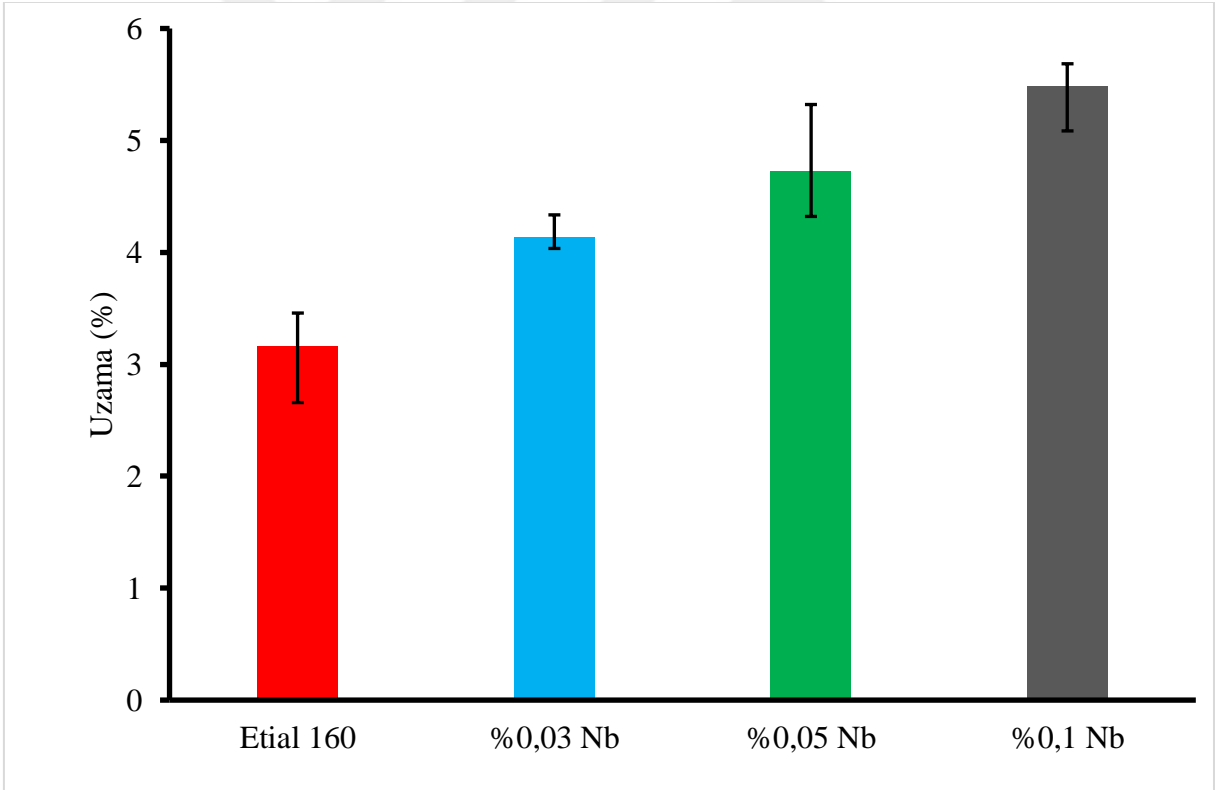


Şekil 25: Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği

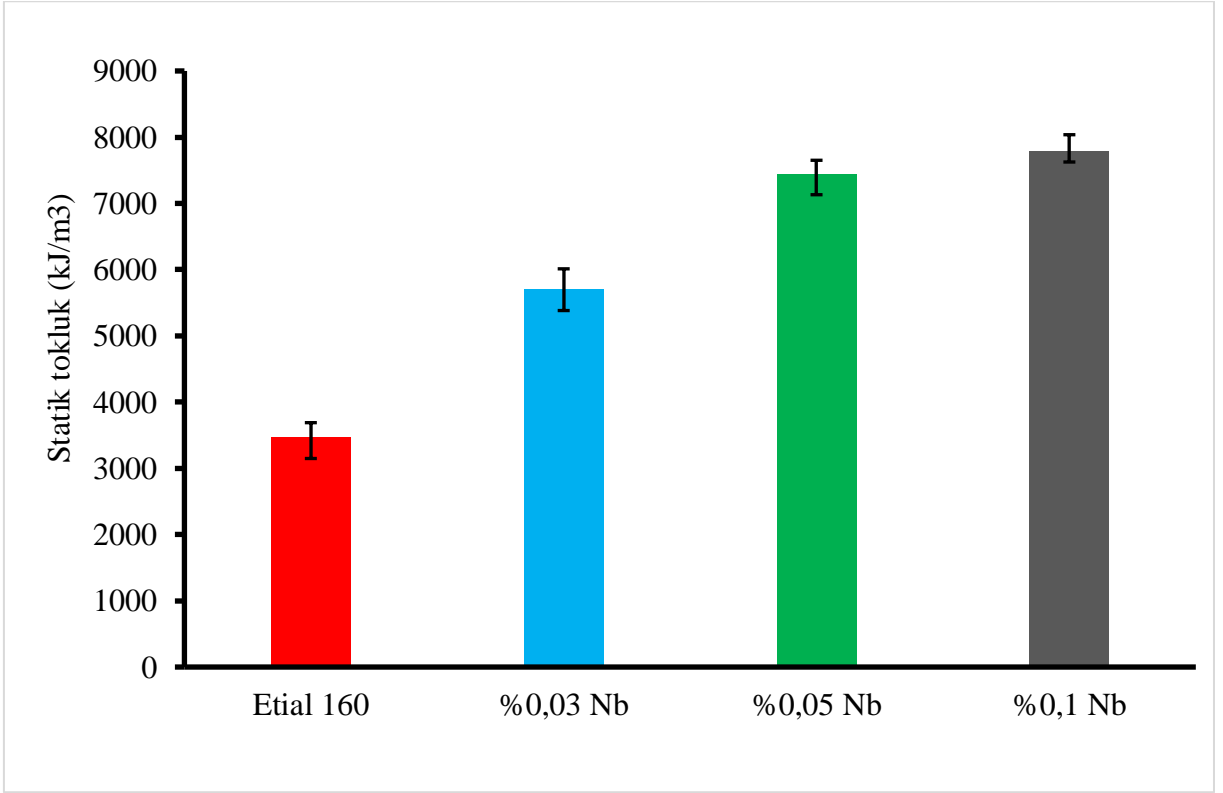
Şekil 25'te yer alan grafik incelendiğinde, Nb ilavesinin gerilme birim şekil değiştirmesinin etkileri görülmektedir. Çekme değerleri Nb ilaveli tüm dökümlerde ilavesiz olarak yapılan Etial 160 dökümüne göre artış sağladığı gözlemlenmiştir. Nb ilave oranının artması ile birlikte değerlerin ilavesiz olarak yapılan döküme göre artışı ortadadır. Ortaya çıkan sonuçlar Etial 160 alüminyum döküm alaşımında Nb elementi ilavesinin çekme gerilmesine olumlu yönde katkı sağladığını göstermiştir. Ek olarak Şekil 26'da çekme testlerinden elde edilen maksimum gerilme değeri, Şekil 27'de % uzama ve Şekil 28'de tokluk değerlerinin Nb ilavesi sonrası nasıl değiştiği grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 26: Etial 160 Alaşımına Nb İlavesi Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi



Şekil 27: Etial 160 Alaşımına Nb İlavесinin % Uzama Değerleri Değişimi



Şekil 28: Etial 160 Alaşımına Nb İlavesinin Statik Tokluk Değişimi

Şekillerde verilen değerler, maksimum çekme gerilmesi, % uzama ve tokluk değerlerini göstermektedir. Maksimum çekme gerilmesi ortalama değerleri ilavesiz dökümlerde 168,22 MPa olduğu, %0,03 Nb ilavesiyle 213,44 MPa'a, %0,05 Nb ilavesiyle 245,77 MPa'a ve %0,1 Nb ilaveli dökümlerde 297,42 MPa'a çıktığı görülmektedir. İlavesiz dökümlerde %3,16 olan yüzde uzama, %0,03 Nb ilavesiyle %4,14'ya, %0,05 Nb ilavesiyle %4,72'e ve %0,1 Nb ilavesiyle %5,49'a çıkmıştır. Tokluk değerlerinde de Nb takviyesinin olumlu yönde katkı sağladığı belirlenmiştir. İlavesiz Etial 160 alaşımında 3463,42 kJ/m³ olan tokluk değeri, %0,1 Nb ilavesi ile birlikte 7787,23 kJ/m³'e kadar yükseliş göstermiştir.

Malzemelerde mekanik özellikleri geliştirmek adına Etial 160 alüminyum alaşımına farklı alaşımların ilave edildiği bilinmektedir. Niyobyum ve alüminyum arasındaki sinerji, alaşımın sünekliği ve tokluğuna da uzanır. Araştırmalar, niyobyumun kırılma olmadan deformasyon gerektiren işlemler için hayati önem taşıyan alüminyum alaşımlarının sünekliğini artırabileceğini göstermektedir (Teixeira vd., 2021). Bu iyileştirme, şekillendirme ve soğutma sırasında mekanik gerilimlere dayanma yeteneğinin kritik olduğu döküm işlemlerinde özellikle önemlidir. Mekanik özelliklerini üzerine elde edilen sonuçlar ortaya çıkarılıp değerlendirildiğinde alaşıma niyobyum takviyesinin tane inceltici bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu duruma ek olarak katılaşıma hızındaki artış oranı ile birlikte mekanik özelliklerinde de artış olduğunu belirtmiştir (Şahin ve Dışpınar, 2023).

3.4.2. Sertlik Test Sonuçları

Sertlik testleri oda sıcaklığında Brinell sertlik metodu ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 16’de alınan numunelerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

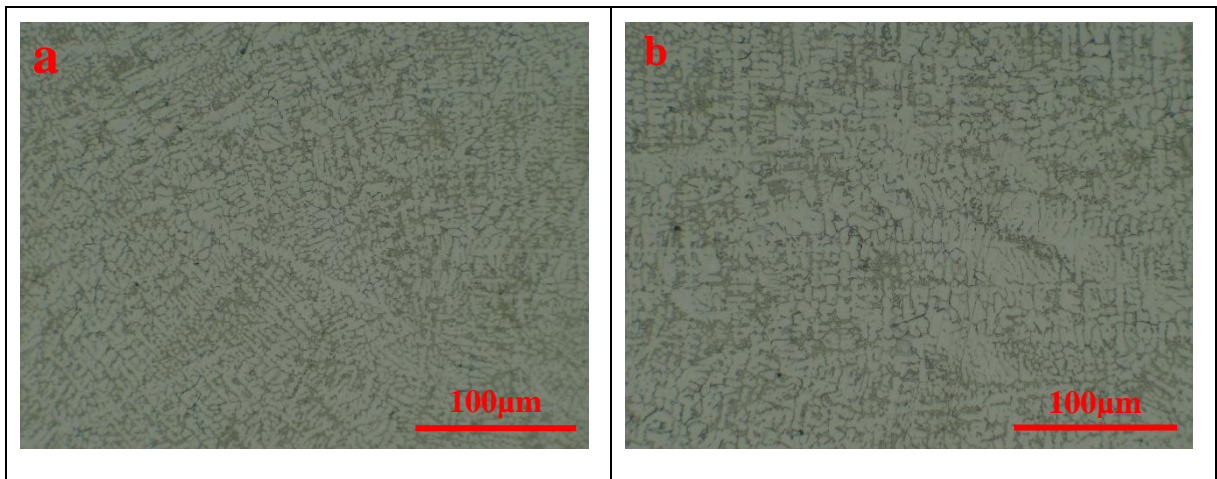
Tablo 16: Sertlik Ölçüm Verileri

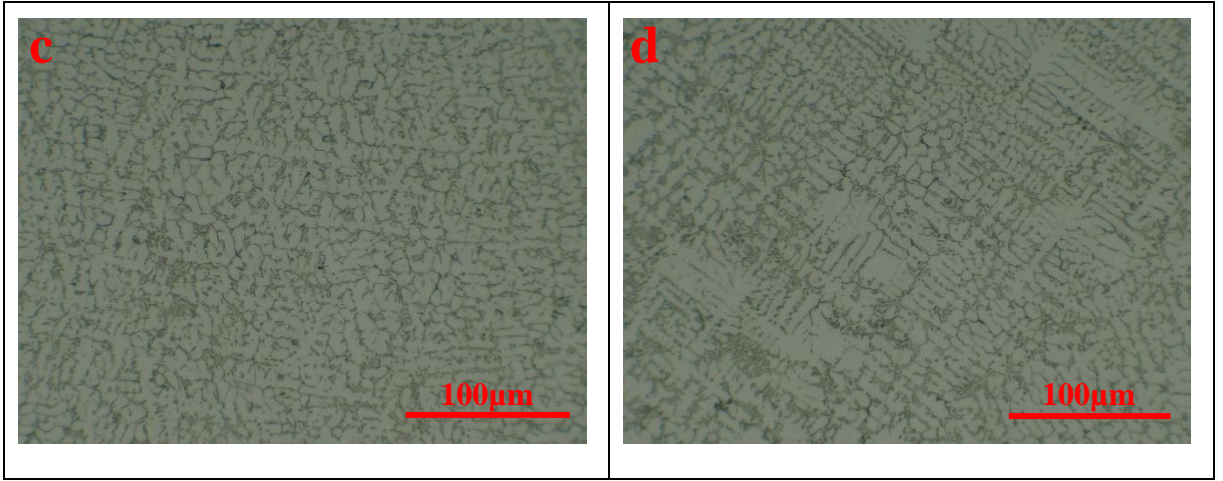
Numune ismi	Sertlik ölçüm değerleri (HB)						Ortalama
İlavesiz	67,6	66,6	64,6	69,1	67,4	70,1	67,57
% 0,03 Nb ilaveli	67,8	65,8	67,6	68,3	65,4	67,2	67,02
% 0,05 Nb ilaveli	66,4	69,1	64,8	68,5	65,8	67,2	66,97
% 0,1 Nb ilaveli	54,7	66,4	66,6	74,5	69,1	66,2	66,25

Tablo 16’deki veriler, ilgili alaşım için limit değerleri aralığında olduğu ve sonuçların birbirine yakın değerler olduğu belirlenmiştir. Nb ilavesi ile alaşımın sertlik özelliklerinde önemli oranda bir fark gözlenmemiştir. Bu sonuçlara göre, Etial 160 alüminyum ilavesiz dökümünde ortalama sertlik 67,57 HB iken, %0,03 Nb ilaveli dökümde 67,02 HB, %0,05 Nb ilaveli dökümde 66,97 HB ve %0,1 Nb ilaveli dökümde 66,25 HB olarak belirlenmiştir. Sonuçlar ortalama 66-68 HB arasında değişkenlik gösterdiği için Nb ilavesinin sertlik üzerinde somut bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

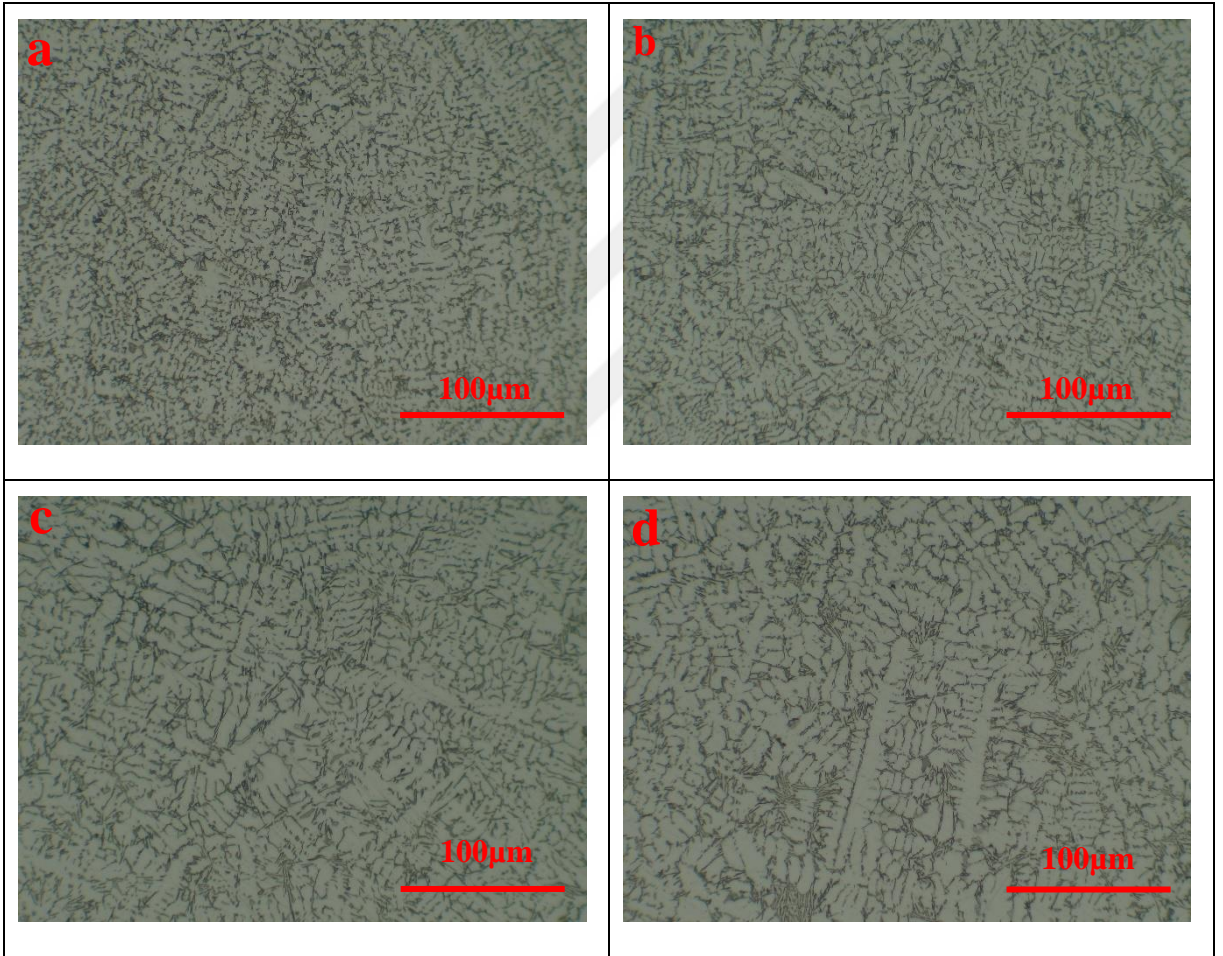
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI

Mikroyapı analizlerinde, farklı kesit kalınlıklarında iç yapının incelenmesi yapılmış ve alaşım ilavesinin etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 29 Etial 160’a ait, Şekil 30, %0,03 Nb ilaveli numuneye ait, Şekil 31 %0,05 Nb ilaveli numuneye ait ve Şekil 32 %0,1 Nb ilaveli döküm numunelerinin çeşitli kesitlerinden 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafları gösterilmektedir.

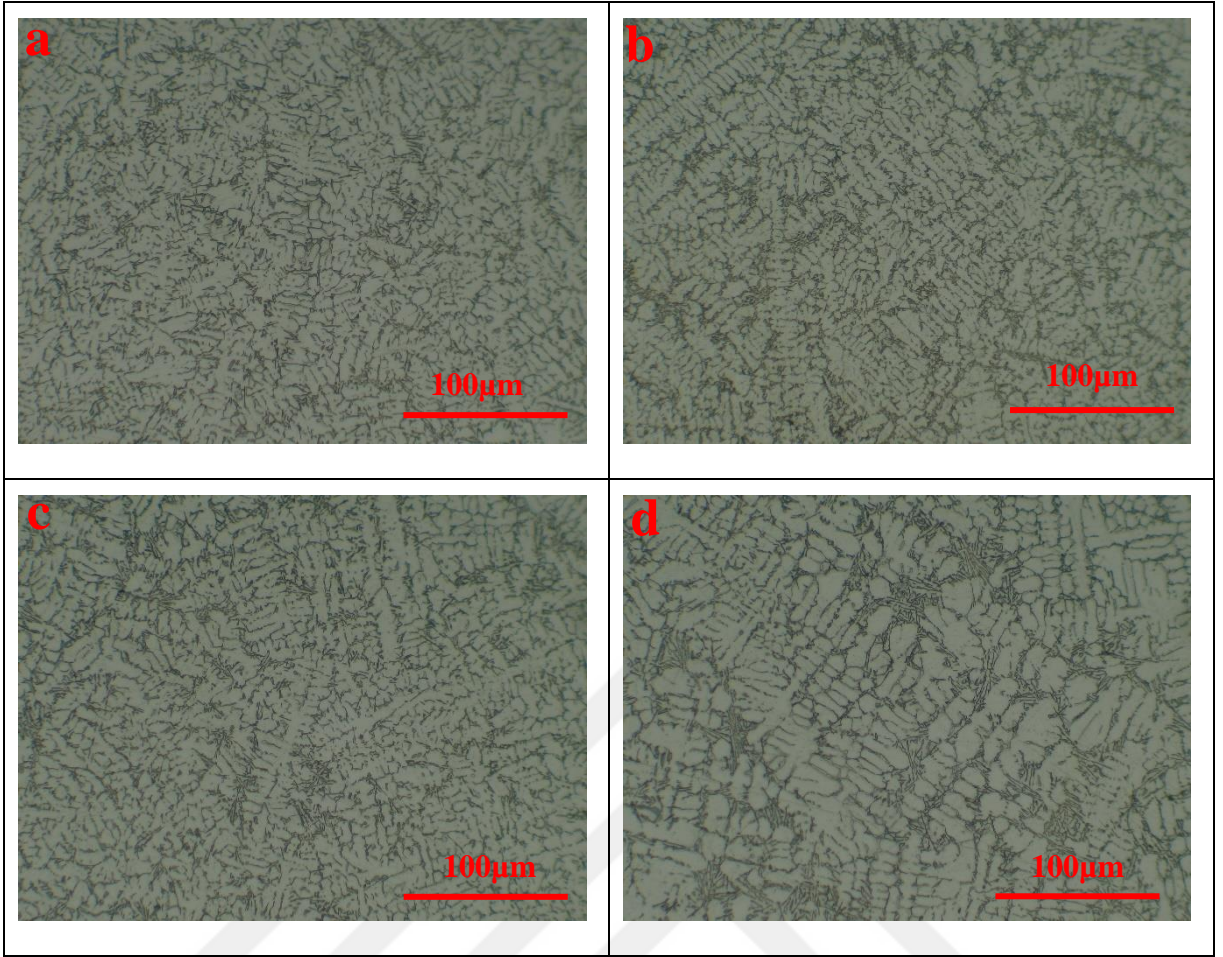




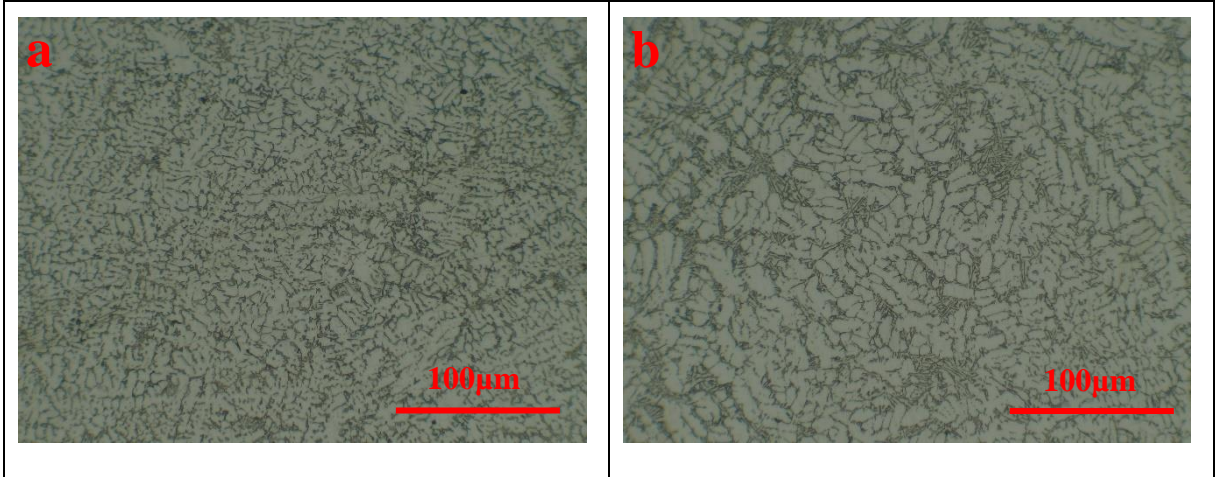
Şekil 29: İlavesiz Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm

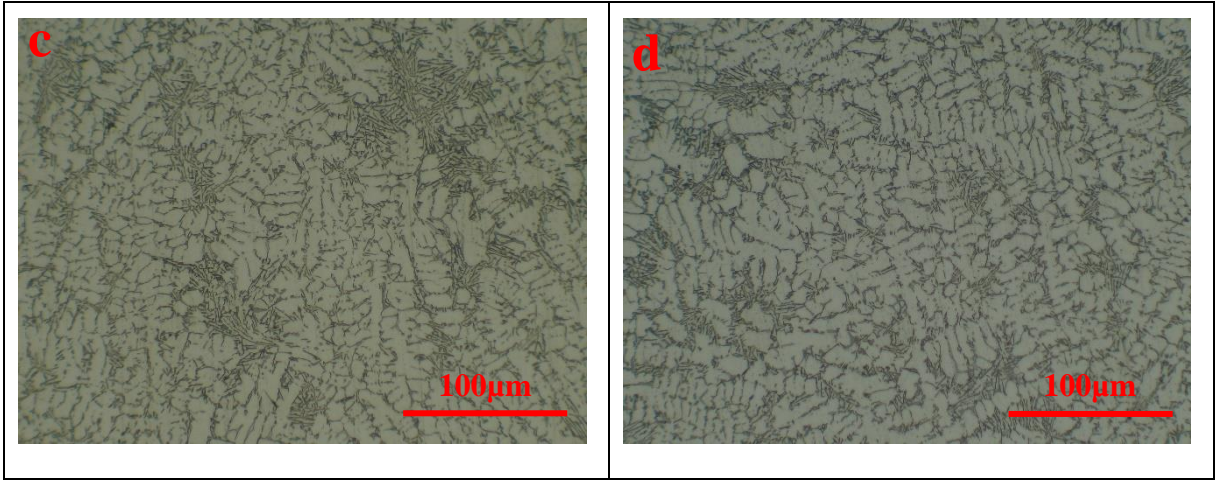


Şekil 30: %0,03 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm



Şekil 31: %0,05 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri
a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm





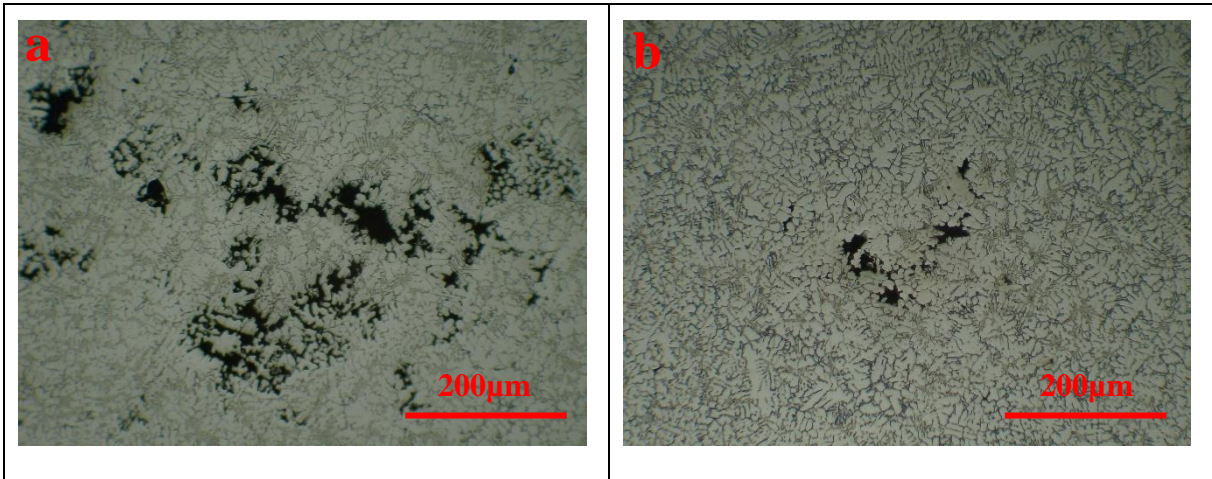
Şekil 32: %0,1 Nb İlaveli Etial 160 Dört Kanallı Akıcılık Kalıbına Mikroyapı Görselleri a)2mm, b)4mm, c)6mm, d)8mm

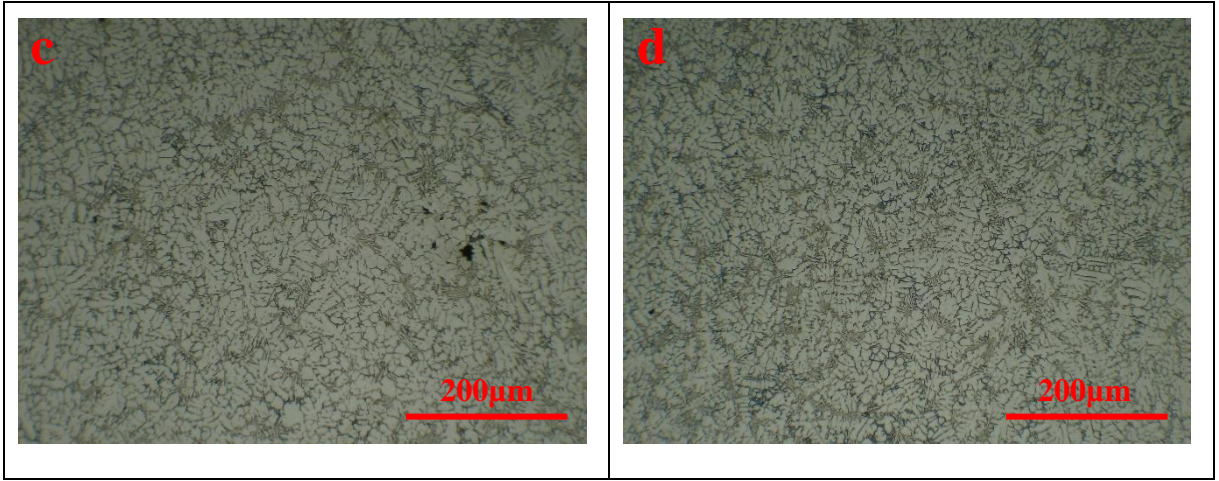
Şekillerde verilen resimlerde her bir döküm deneyi için değişen kesit kalınlıklarındaki mikroyapı resimleri verilmiştir. Numunelere ait mikroyapı resimlerinden görüleceği gibi değişen döküm şartları ve kesit kalınlıklarında yapıda ortaya çıkan fazlarda değişiklikler mevcuttur. Kesit kalınlık değişimi değerlendirildiğinde tüm deney şartlarında kesit kalınlık artışı ile birlikte yapıdaki α alüminyum fazının daha kaba ve dentiritik şekilde oluştuğu gözlenmektedir. Ötektik Si fazları dağılımı ve yapısı da benzer şekilde kesit kalınlık artışı ile birlikte daha kaba ve lamelli şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Kesit inceldikçe ötektik Si fazları lamelli yapıdan az da olsa fiber yapıya kademeli bir şekilde azalma eğiliminde olduğu tespit gözlenmiştir. Kesit kalınlık değişimine bağlı olarak alaşımların katılaşma zamanı değişiklik göstermekte ve buna bağlı olarak yapıda ortaya çıkan faz yapısı ve boyutları değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Bu durum sadece alüminyum alaşımlarında değil döküm alaşımlarının birçoğunda mevcuttur. Gri dökme demir alaşımlarında katılaşma zamanı ve aşılama ilavesi etkisi incelenen bir çalışmada katılaşma zamanının yapıda görülen lamellerin boyut ve dağılımında etkili olduğu belirtilmiştir (Çolak vd., 2022). A380 alaşımının dökümünde döküm yöntemi ve değişen katılaşma zamanı içeren kalıplara yapılan dökümlerde mikroyapıda değişiklik olduğu vurgulanmıştır. Isı iletim katsayısı ve katılaşma zamanının A380 alaşımını yapısını ve alaşım özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir (Uslu vd., 2024). Benzer şekilde Al4Cu alaşımının kum kalıba dökümünde katılaşma zamanı ve tane inceltici ilavesinin etkisinin incelendiği çalışmada da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Çolak vd., 2015).

Şekillerde verilen mikroyapı resimlerini Nb ilavesi açısından incelediğimizde alaşım elementi ilavesinin de yapı değişiminde etkili olduğu gözlenmektedir. Şekilleri her bir kesit kalınlığı için birbiri ile karşılaştırdığımızda Nb ilavesinin yapıda ortaya çıkan fazların boyut ve dağılımında etkili olduğu anlaşılmıştır. Nb ilavesi ile hem dentiritik yapının bozularak daha

düzenli bir eşksenel bir yapı ortaya çıkmaya başladığı hem de ötektik Si lamellerinin lamelli yapıya dönüşmeye başladığı tespit edilmiştir. Nb ilavesinin katılma zamanı gibi etki gösterme eğiliminde olduğu bu durumda Nb ilavesi ile Al alaşımlarının oluşturduğu bileşiklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nb esaslı bileşiklerin yapıda katılma için çekirdek merkezleri oluşturduğu ve tane inceltici gibi görev yaptığı düşünülmektedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalardan birinde A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Nb ilavesinin etkisi incelenmiş ve Nb ilavesi ile yapının ince taneli olduğu rapor edilmiştir (Yalçın vd., 2024). Ayrıca Nb ilavesinin tane inceltici etki göstererek katılma hızındaki artış oranı ile birlikte mekanik özelliklerinde de artış olduğunu belirtmiştir. (Şahin ve Dışpınar, 2023) Narducci ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada Nb ilavesinin tane inceltici olarak kullanılabileceği bahsedilmiştir. Bu çalışmada Nb ilavesiyle ortaya çıkan bileşiklerin tane sınırlarında çökme meydana geldiğini ve bu sebeple mekanik özellikleri için olumlu yönde sonuç verdiği vurgulanmıştır (Narducci, 2021). Ayrıca alüminyum alaşımlarına Nb ilavesi üzerine yapılan çalışmalarda; Niyobyumun kararlı oksitler oluşturma yeteneği, alaşımın koruyucu özelliklerine daha fazla katkıda bulunduğu ve böylece zorlu koşullarda hizmet ömrünü uzattığı belirlenmiştir (Tussolini vd., 2015). Niyobyumun yüksek ergime noktasına sahip olmasından dolayı özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek termal stabilite sağladığı açıklanmıştır (Matsuura vd., 2003).

Spiral akıcılık kalıbının uç kısımlarından alınan numunelerin mikroyapı incelemelerinde yapıdaki gözenek durumu dikkat çekmiştir. Şekil 33'te 50X büyütmede çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.

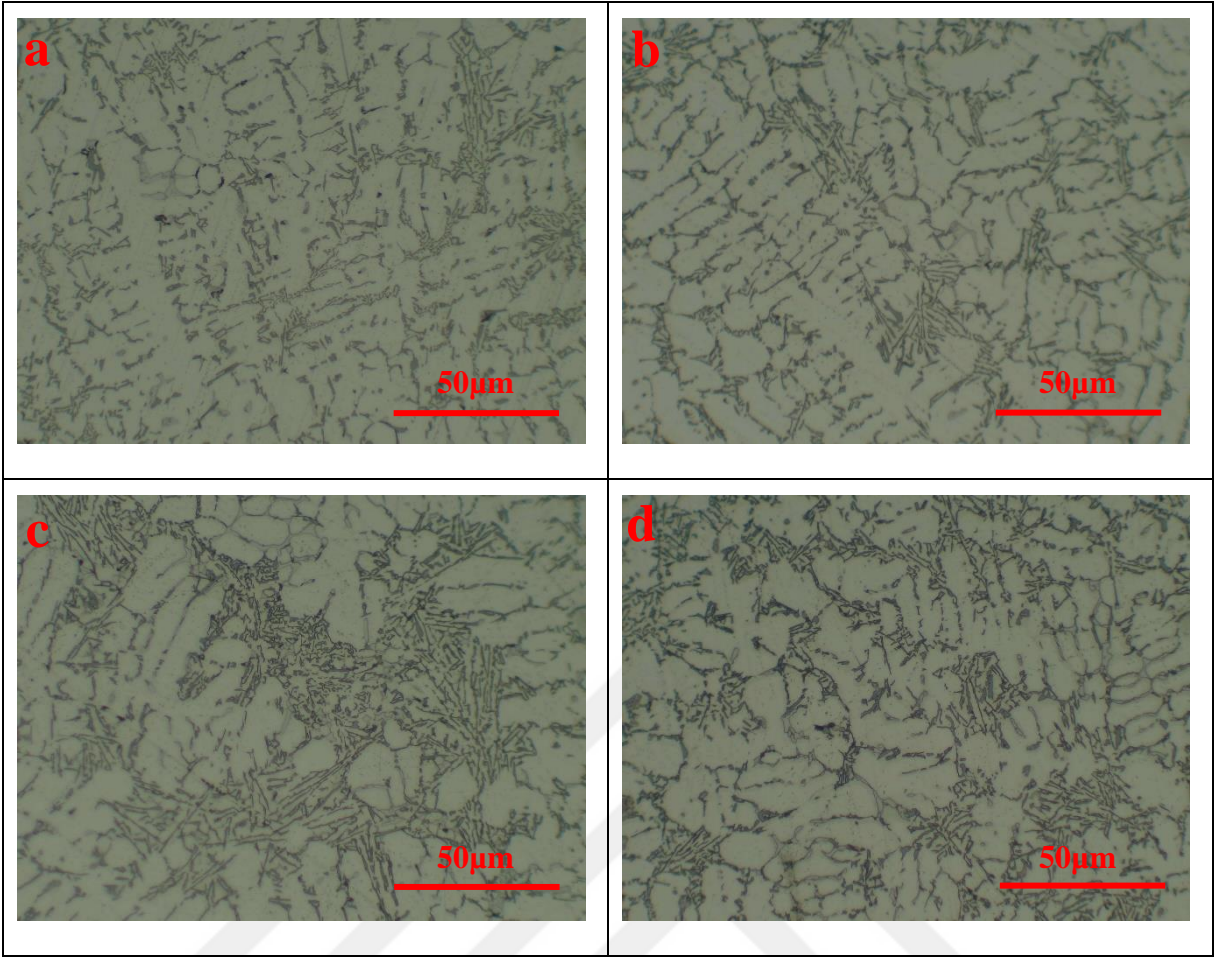




Şekil 33: Spiral Akıcılık Numunelerinden Alınan 50X Büyütmeye Çekilen Mikroyapı Resimleri a) İlavesiz Etial 160, b) %0,03 Nb İlaveli, c) %0,05 Nb İlaveli, d) %0,1 Nb İlaveli

Şekil 33'te verilen resimlerde görüleceği gibi ilavesiz dökümde ortaya çıkan gözeneklerin, Nb ilavesi ile oldukça azaldığı ve %0,1 Nb ilavesinde neredeyse hiç gözenek olmadığı belirlenmiştir. Numune alınan yerler spiral akıcılık deney numunesinin en uç kısmı olduğundan ilgili bölgede yetersiz beslemeden kaynaklanan gözenek oluşum olduğu düşünülmektedir. Nb ilavesi ile gözeneklerin azalmasının tane inceltme etkisinden olduğu düşünülmektedir. Gözenek biçimlerinin düzensiz oluşundan dolayı gazdan kaynaklı değil yetersiz besleme kaynaklı olduğu ve bu durumun sıvı metal temizliğini uygun olduğuna bir delil olabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca konu ile ilgili yapılan çalışmalarda tane boyutu azalmasının beslenebilirlik açısından olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Konu ile ilgili çeşitli alüminyum alaşımlarının dökümünde tane inceltici ilavesi, sıvı metal temizliği ve kalıp malzemesine bağlı ısı iletim katsayısının beslenebilirlik üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir (Kanlıca vd., 2023, Tokatlı vd., 2022, Kayıkçı ve Çolak, 2009).

Deney numunelerine Nb ilavesinin kontrolü için yapılan spektrometre analizi sonuçlarında Tablo 12'de görüldüğü gibi Nb oranı belirlenememiştir. Bu durum ilgili cihazın Nb kalibresi olmadığı ve cihazın Nb okuma modülü olmamasından kaynaklandığı bilinmektedir. Ancak deney numunelerine yapılan test sonuçlarına bağlı olarak deney numunelerinin değişen oranlarda Nb içerdiği düşünülmektedir. Bu kapsamda Şekil 34'te 200X büyütmeye çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.



Şekil 34: Nb İçeriğinin İncelenmesine Yönelik 200X Büyütmeden Çekilen Mikroyapı Resimleri
A) İlavesiz Etial 160, B) %0,03 Nb İvelili, C) %0,05 Nb İvelili, D) %0,1 Nb İvelili

Şekil 33'te görüldüğü gibi yapıda Nb ilavesi ile birlikte yapıda farklı fazlar tespit edilmiştir. Artan Nb ilavesi ile birlikte ortaya çıkan fazların arttığı belirlenmiştir. Bu durum Nb ilavesinin değişen oranlarda eklendiğini kanıtlar niteliktedir.

SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Dökümlerde azot gazı yardımı ile gazdan kaynaklı hataları en az seviyeye indirmek amacıyla 5 dk dakika süreyle 300 rpm devir ve 5lt/dk debide sıvı metal temizliği gerçekleştirilmiştir. RPT numune yoğunluk ölçümlerde hesaplanan gözenek değeri %0,5 değerinin altında olduğu belirlenmiştir. RPT numune yüzeylerinde çöküntü oluşması, kesit yüzey incelemeleri ve gözenek hesaplamalarına göre temizleme işleminin sıvı metal kalitesi bakımından uygun olduğu belirlenmiştir.

Sıvı metal temizliğinin uygunluğunu tespit etmek amacıyla K-mold kalıbı numunelerinde kırık yüzeyler tespit edilip ortaya çıkan K değeri sonuçlarının 1 değerinin altında olması sebebiyle uygunluğu teyit edilmiştir.

Etial 160 alaşımına farklı oranlarda Nb ilavesinin akıcılık üzerindeki etkisini incelemek adına spiral ve dört kanallı kalıplarda sıvı metal ilerlemelerinin değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Değişen kesit kalınlığı içeren akıcılık test kalıplarında karşılaştırma amaçlı olarak akıcılık indeksi yaklaşımı söz konusudur. Bu kapsamda her bir kesitin uzunluğunun ilgili kesit kalınlığına bölünmesi ile elde edilen sayıların toplamı ilgili döküm deneyi için akıcılık indeksi değerini vermektedir. Deneylerde elde edilen akıcılık indeksi değerleri sırasıyla ilavesiz dökümde 149,08 mm, 102,33 mm, 95,50 mm ve 90,25 mm olarak belirlenmiştir. Değişen kanallarda durumlar Nb ilavesi ile değişkenlik gösterse bile kalıp bütün olarak değerlendirildiğinde Nb ilavesi ile akıcılık özelliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Nb ilavesinin akıcılığı azaltmadaki etkisinin sebebi araştırıldığında alaşım elementinin ergime sıcaklığının etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda Nb elementi ergime derecesi 2477 °C olarak bilinmektedir. Alüminyum alaşımı içerisinde Nb ilavesi ile yapıda ortaya çıkan Nb bileşiklerinin de ergime derecelerinin yüksek olmasından dolayı aynı döküm sıcaklığında yapılan deneylerde sıvı metal ilerlemesinin düşük çıktığı düşünülmektedir.

Spiral kalıba yapılan dökümlerde, ilerleme mesafeleri incelendiğinde, ilavesiz dökümde ortaya çıkan sonucun Nb ilavesi ile birlikte yaklaşık %44 oranında azaldığı ölçülmüştür. Spiral kalıpta Nb ilave oranı arttıkça sıvı metal ilerleme mesafesinin düştüğü tespit edilmiştir.

Akıcılık testi neticesinde Nb ilave oranı arttıkça sıvı metal ilerleme mesafelerinde düşüş meydana geldiği ve akıcılıkta olumsuz yönde etki ettiği görülmüştür.

Çekme gerilmesinin ilavesiz dökümdeki sonucu ile birlikte %0,1 Nb ilaveli dökümdeki sonuca göre yaklaşık %77 değerinde artış sağladığı görülmüştür. Bu sebeple Nb ilavesinin artması ile birlikte çekme gerilmesinin artış gösterdiği belirlenmiştir.

Çekme deneyinde ortaya çıkan sonuçlara göre % uzama değerlerinde Nb ilavesi ile birlikte yaklaşık %74 oranında artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çekme deneyine göre ortaya çıkan tokluk değerleri, ilavesiz dökümde çıkan sonuçların Nb ilavesi ile birlikte yaklaşık %125 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

Sertlik deneyine göre ortaya çıkan sonuçlarda, ilavesiz dökümde 67,57 HB, %0,03 Nb ilavesinde 67,02 HB, %0,05 Nb ilavesinde 66,97 HB, %0,1 Nb ilavesinde 66,25 HB olduğu görülmektedir. Sonuçlar ortalama 66-68 HB arasında değişkenlik gösterdiği için Nb ilavesinin yapılan test üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Etial 160 alaşımının farklı kesit kalınlıklarına ve değişken oranlarda Nb ilavelerine sahip bölgelerden numune alınarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı resimleri üzerinde inceleme yapıldığında, kesit kalınlığındaki artış ile birlikte tane yapılarının ve Si kristallerindeki büyüklüğün arttığı gözlemlenmiştir. Kesit kalınlığı arttıkça, mikroyapıdaki tanelerin soğuma durumu göz önünde bulundurularak büyüdüğü ve değişken oranlarda Nb ilavesiyle mikroyapılardaki küçülme tespit edilmiştir. Ayrıyeten yapıdaki Nb ilave oranının değişmesiyle birlikte yapıdaki farklılıklar ortaya çıkmıştır.

KAYNAKÇA

- ASM, (1990), *Metals Park*, Ohio 10th Ed. Vol. 2,
- Anson, J. P. & Gruzleski, J. E. (1999). Effect of Hydrogen Content on Relative Shrinkage and Gas Microporosity in Al-7% Si Casting (99-26). *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 107, 135-142.
- Ahlatçı, H. (1994). Al-Cu-Mg-Si Alaşımlarının Deformasyonu ve Yaşlandırılması (Lisans Bitirme Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
- Alim, B. Tavlama Sıcaklığı, Basınç ve Dış Manyetik Alanın Şekil Hafızalı Nanoalaşımların X-İşını Şiddet Oranları ve Valens Elektron Yapıları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.
- Arslan, İ., Gavgalı, E. & Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve Al10Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal Of Engineering And Science*, 7(2), 237-244.
- Al-Saadı, H. I. A. & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532.
- Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G. & Güler, K. A. (2020). 380 Alaşımının Soğuma Eğrisinde Ve Akışkanlığında Tane İnceltmenin Etkisi.
- Baligheid, R. G., Dutta, A. & Rao, A. S. (2005). Effect Of Niobium And Carbon On Microstructure And Compressive Yield Strength Of As Cast ESR Fe-8. 5Al Alloy. *Materials Science And Technology*, 21(3), 269-273.
- Brown, J. (Ed.). (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. /11, 28-38. Butterworth-Heinemann.
- Beljajew A. I., Fğrsanowa L. A., & Rapoport M. B., (1974) Alüminyumun Metalürjisi, T.M.M.O.B Makine Mühendisleri Odası Yayın NO: 99,
- Çolak, M., Uslu, E., Teke, Ç., Şafak, F., Erol, Ö., Erol, Y., ... & Yavuz, M. (2022). Investigation of the Effect of Solidification Time and Addition Amount of Inoculation on Microstructure and Hardness İn Lamellar Graphite Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 24-33.
- Çolak, M., Sirin, S., Kocaman, E., & Kayıkcı, R. (2015, March). Investigation And Modelling Of The Effects Of Solidification Time And Grain Refinement On The Grain Size Of A Sand-Cast Al4Cu Alloy. İn *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1653, No. 1). AIP Publishing.
- Durmuş, M., Dispinar, D., Gavgalı, M., Uslu, E., & Çolak, M. (2024). Evaluation of Fe Content on the Fluidity of A356 Aluminum Alloy By New Fluidity Index. *International Journal of Metalcasting*, 1-15.
- Djurđjević, M. B., Odanović, Z., & Pavlović-Krstić, J. (2010). Melt Quality Control At Aluminum Casting Plants. *Metallurgical & Materials Engineering*, 16(1), 63-76.
- Epstein, S. G., Kaufman, J. G., & Pollak, P. (1994). *Aluminum And Its Alloys*. Washington, DC: Aluminum Association.
- Cobden, R., & Banbury, A. (1994). Aluminium Physical Properties, Characteristics And Alloys. *Training İn Aluminium Application Technologies*. Alcan. Banbury: European Aluminium Association, 60, 60.

- Ferro, R., & Saccone, A., (2008). *İntermetalik Chermistry*, Elsevier Pergamon Materials Series,
- Hoffmann, E. (2023). Primary İnterphase Dendritic Growth Via Unsteady-State Horizontal Solidification Of An Al-Cu-Nb Alloy.. <https://doi.org/10.56238/Alookdevelopv1-173>
- Url-1 , <https://celik.photo.blog/aluminyumun-yogunlugu-neden-onemlidir/> adresinden edinilmiştir.
- Url-2,<https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-dokum-alasimlarinin-siniflandirilmesi/> adresinden edinilmiştir.
- Url-3, <https://compu therm.com/al-nb> adresinden edinilmiştir.
- Url-4, Eti Alüminyum, (2023). <http://www.etialuminyum.com/>, adresinden edinilmiştir.
- Kanlıca, M. M., Taş, Z., & Çolak, M. (2023). The Effect Of Grain Refiner And Mechanical Vibration On Feedability İn Sand And Plaster Mold Casting Of Etial 177 Aluminum Alloy. *Eastern Anatolian Journal Of Science*, 9(2), 1-9.
- Karakışlak, M. (1992). Alüminyum Alaşımaları Ve Isıl İşlemleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Kayıkçı, R., & Çolak, M. (2009). Kuma Dökülen Etial160 Alüminyum Alaşımında Tane İnceltmenin Beslenebilirlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 5th. In *International Advanced Technologies Symposium, May* (Pp. 13-15).
- Kissell, J. R. (1996). Aluminum And İts Alloys. *Marks' Standard Handbook For Mechanical Engineers*, 6-53.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, And Applications*. Asm International.
- Matsuura, K., Koyanagi, T., Ohmi, T., & Kudoh, M. (2003). Aluminide Coating On Niobium By Arc Surface Alloying. *Materials Transactions*, 44(5), 861-865.
- Moreira Coutinho, M., Saraiva Silva, J. I., Primo Sousa, T., & Monteiro Rosa, D. (2019). Upward Unsteady-State Solidification Of Dilute Al-Nb Alloys: Microstructure Characterization, Microhardness, Dynamic Modulus Of Elasticity, Damping, And XRD Analyses. *Metals*, 9(6), 713.
- Tokatlı, M., Uslu, E., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum Alaşımalarına Uygulanan Sıvı Metal Temizliği Kontrol Yöntemlerinin İncelenmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 235-247.
- Narducci, C. J., Brollo, G. L., De Siqueira, R. H. M., Antunes, A. S., & Abdalla, A. J. (2021). Effect Of Nb Addition On The Size And Morphology Of The B-Fe Precipitates İn Recycled Al-Si Alloys. *Scientific Reports*, 11(1), 9613.
- Yalçın Ö., (2024), 'Alüminyum Alaşımalarının Dökümünde Niyobyum Alaşım Elementi İlavesinin Etkisinin İncelenmesi'. Bayburt Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Yalçın, Ö., Tokatlı, M., Tigli, A., & Çolak, M. (2024). A356 Alüminyum Alaşımının Dökümünde Katılma Zamanı Ve Nb İlavesinin Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 479-492.
- Semboshi, S., Tabaru, T., Hosoda, H., & Hanada, S. (1998). Effect Of Microstructure On Hydrogen Pulverization Of Nb₃AlNb Two Phase Alloys. *Intermetallics*, 6(1), 61-69.
- Sahin, H., & Dispinar, D. (2023). Effect Of Rare Earth Elements Erbium And Europium Addition On Microstructure And Mechanical Properties Of A356 (Al-7Si-0.3 Mg) Alloy. *International Journal Of Metalcasting*, 17(4), 2612-2621.

- Sigworth, G. K. (1983). Theoretical And Practical Aspects Of The Modification Of Al-Si Alloys. *AFS Trans*, 91(715.2).
- Sarsilmaz, F. (2008). Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması.
- Şengül, Y. *Niyobyumun Mor Ötesi Bölgede Spektral Çizgilerinin Sınıflandırılması Ve Aşırı İnce Yapısının İncelenmesi* (Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Teixeira, R. L. P., De Lacerda, J. C., Conceição, I. C., Da Silva, S. N., Siqueira, G. O., & Moura Filho, F. (2021). The Effects Of Niobium On The Bioactivity Of Ni-Ti-Al-Nb Shape Memory Alloys. *Archives Of Metallurgy And Materials*, 66(2).
- Tussolini, M., Ichikawa, T., Gallina, A. L., Banczek, E. D. P., & Rodrigues, P. R. P. (2015, July). Electrochemical Study Of Ceramics Based On Niobium Oxide Over Aluminum Alloy AA 3003. In *Materials Science Forum* (Vol. 820, Pp. 225-230). Trans Tech Publications Ltd.
- Tokatlı, M., Uslu, E., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Investigation Of The Effect Of Liquid Metal Quality On Feedability İn Casting Of A356 Aluminum Alloys. *Turkish Journal Of Electromechanics And Energy*, 7(3).
- Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yaygınca Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin İncelenmesi. *Journal Of The Institute Of Science And Technology*, 12(1), 423-434.
- Uludağ, M., Cetin, R., Dispinar, D., & Tiryakioğlu, M. (2018). The Effects Of Degassing, Grain Refinement & Sr-Addition On Melt Quality-Hot Tear Sensitivity Relationships İn Cast A380 Aluminum Alloy. *Engineering Failure Analysis*, 90, 90-102.
- Uslu, E., Tiğli, A., & Çolak, M. (2024). The Effect Of Cooling Plate, Mechanical Vibration, And Grain Refinement On The Microstructure And Hardness Of A380 Produced By Sand Mold. *International Journal Of Cast Metals Research*, 37(2), 108-116.
- Uygur, İ., Gerengi, H., Erden, M. A., & Yıldız, M. (2017). Toz Metalurjisi İle Elde Edilen Düşük Karbon Çeliğinin% 3.5 Nacl Ortamındaki Korozyonuna Niyobyum Ve Vanadyumun Etkisi. *Technological Applied Sciences*, 12(3), 73-86.
- Wikipedia, (Aralık, 2024). Periyodik Tablo https://tr.wikipedia.org/wiki/Periyodik_Tablo Adresinden Edinilmiştir.
- Vargel, C. (2004). *Corrosion Of Aluminium* (Ss. 85–81). Elsevier.
- Yapıcı, C. (2012). Alti5b1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Yalıtımlı Alüminyum, (2022). Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri <https://yalitimli-aluminyum.com/aluminyum-alasimlar/> Adresinden Edinilmiştir.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik Ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış Ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210.

ÖZ GEÇMİŞ

Hüseyin Emre TOPRAK, ... yılında ██████████ İlk öğretimini Yıldırım Beyazıt Ortaokulu'nda, lise eğitimini ise Açık Öğretim lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini ise 2019 yılında Bayburt Üniversitesi'nde tamamladı. 2022 yılı Şubat ayında Makine Mühendisliği bölümünde Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı. Şuan da makine mühendisi olarak KOYUNCU TİCARET A.Ş'nde çalışmaktadır.

