



**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE
NİYOBYUM ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Önder YALÇIN

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

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE NİYOBYUM ALAŞIM
ELEMENTİ İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Önder YALÇIN

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

BAYBURT - 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında, Önder YALÇIN tarafından hazırlanan “Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Niyobyum Alaşım Elementi İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 18.04.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Salih Hakan YETKİN

Üye : Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU

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

Doç. Dr. Murat KUL
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

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

18.04.2024

Önder YALÇIN



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasına başlama imkânı veren ve tüm aşamaların yürütülmesi süresince maddi, manevi ve akademik desteğini esirgemeyen, her türlü koşulda yanımda olan ve bilgi birikimlerinden faydalandığım, saygı değer hocam Sayın Doç. Dr. Murat ÇOLAK' a sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda özellikle teknik açıdan laboratuvar imkânlarını sunan ve katkı sağlayan Bayburt Üniversitesi öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU hocama, akademik bilgilerini esirgemeyen Bayburt Üniversitesi Öğr. Gör. Mehmet TOKATLI, Sinop Üniversitesi Öğr. Gör. Ahmet TIĞLI hocalarıma ayrıca İsdemir Demir Çelik Fabrikasına ve çalışma arkadaşlarıma, tez yazmamda en çok her türlü desteği sağlayan Kadir ÇINAR'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca üzerimden manevi dualarını ve maddi desteklerini hiç esirgemeyen anneme, babama, abim, ablalarıma ve oğlum Ertuğrul'a şükranlarımı sunuyorum.

Önder YALÇIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE NİYOBYUM ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Önder YALÇIN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Sayfa: 75

Alüminyum ve alaşımları, korozyon direnci, döküm dayanımları, elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması ve sünek olması gibi özelliklerinden dolayı oldukça önemli bir mühendislik malzemesidir. Bu sebepten dolayı savunma sanayi, endüstriyel üretimler ve makine sanayisinde kullanımı oldukça yaygındır. Özellikle otomotiv sanayi ve yüksek teknoloji gereksinimi olan birçok sektörde kullanımı artmakla birlikte kalite gereksinimleri de giderek artmaktadır. Alüminyum döküm alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılmaktadır. Bu kapsamda bu tez çalışmasında A356 alüminyum döküm alaşımına % 0,03, % 0,05 ve % 0,1 Niyobyum (Nb) ilavesinin döküm özelliklerine etkisi deneysel teknikler ile araştırılmıştır. Döküm özelliklerinin incelenmesi kapsamında: akıcılık, beslenebilirlik, mikroyapı özellikleri ve mekanik özelliklerinde Nb ilavesinin etkisi değerlendirilmiştir. Döküm deneylerinde kokil kalıplama metodu kullanılmıştır. İlk olarak ilavesiz A356 alüminyum döküm alaşımının dökümü yapılmıştır. Daha sonra AlNbB3,5/0,5 olan Nb elementi ilavesi ile A356 alüminyum döküm alaşımına %0,03, %0,06 ve %0,1 gibi değişen oranlarda Nb ilave edilerek dökümleri yapılmıştır. Sıvı metal 720 °C'deki sıvı metalin vakum altında katılaştırma arşimet test numuneleri alınmıştır. Kokil kalıplar ise, K-mold, ördek ayağı, akıcılık, çekme çubuğu, spiral ve basamak kokil kalıplarına sırasıyla dökümler gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, döküm çalışmaları uygulandıktan sonra arşimet numunesi testinde gözeneklerin azaldığı, çekme testinde numunenin mukavemetinin arttığı, K-mold test numunesinde inklüzyonların azaldığı, akıcılığın giderek azaldığı, ördek ayağı dökümünde çekinti miktarının azaldığı ve basamak test numunesinden içyapı incelemesinde inklüzyonların ve gözeneklerin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum A356, beslenebilirlik, Nb ilavesi, RPT Arşimet, K-mold, döküm, ördek ayağı döküm, akıcılık.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NIOBIUM ALLOY ADDITION IN CASTING ALUMINUM ALLOYS

Önder YALÇIN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Pages: 75

Aluminum and its alloys are very important engineering materials due to their properties such as corrosion resistance, casting strength, high electrical and thermal conductivity and ductility. For this reason, its use is quite common in the defense industry, industrial production and machinery industry. While its use is increasing, especially in the automotive industry and many sectors requiring high technology, quality requirements are also increasing. Depending on the increase in quality expectations from aluminum casting alloys, castings are made with the addition of different alloying elements. In this context, in this thesis study, the effect of 0,03 %, 0,06 % and 0.1 % Niobium (Nb) addition on the casting properties of A356 aluminum casting alloy was investigated with experimental techniques. Within the scope of examining the casting properties, the effect of Nb addition on flowability, feedability, microstructural properties and mechanical properties was evaluated. The permanent molding method was used in the casting experiments. First, the A356 aluminum casting alloy without additions was cast. Then, with the addition of the Nb element, which is AlNbB3,5/0,5 Nb was added to the A356 aluminum casting alloy in varying amounts such as 0,03 %, 0,06 % and 0,1 %, and castings were made. Liquid metal Archimedes test samples were taken for the solidification of liquid metal at 720°C under vacuum. As for colic moulds, castings were made in K-mold, duck foot, flow, draw rod, spiral and step permanent molds respectively.

As a result, after the casting studies were applied, it was observed that the pores decreased in the Archimedes sample test, the strength of the sample increased in the tensile test, the inclusions decreased in the K-mold test sample, the fluidity gradually decreased, the amount of shrinkage decreased in the duck foot casting, and the inclusions and pores decreased in the internal structure examination of the step test sample.

Keywords: Aluminum A356, Feedability, Nb addition., RPT ersiment, K-mold, casting, duck foot casting, flowability.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Terim ve Tanımları	2
BİRİNCİ BÖLÜM.....	3
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	3
1.1. ALÜMİNYUM.....	3
1.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ	6
1.2.1. A356 Alüminyum Alaşımın Özellikleri	6
1.2.2. Alüminyum Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	7
1.3. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI	9
1.3.1. Alüminyum Döküm.....	10
1.3.2. Alüminyum İşleme	10
1.4. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI.....	11
1.5. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME	12
1.5.1. Titanyum İlavesi Tane İnceltme	13
1.5.2. Titanyum ve Bor İkili ilavesinin Tane İnceltme.....	14
1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMININ ERGİTME VE KATILAŞMASI.....	15
1.6.1. Çekirdeklenmenin Oluşması	16
1.6.2. Homojen Çekirdeklenme Oluşumu	18
1.6.3. Heterojen Çekirdeklenme Oluşumu	19
1.7. ALÜMİNYUM DÖKÜM KALİTESİNİN ETKİLERİ.....	20
1.7.1. Gazların Oluşması	21
1.7.2. Hidrojen Gazı Oluşması	21
1.7.3. Sıvı Metale Hidrojen Girişi Oluşumlar	22
1.7.4. İnklüzyon Oluşması.....	23
1.7.5. Oksit Filmi Tabakası Oluşması	23
1.7.6. Gözeneklilik Oluşması	25
1.8. ALÜMİNYUMA İLAVE EDİLEN ALAŞIM ELEMENTLERİ.....	25
1.8.1. Al - Cu İkili Faz Alaşımları.....	26
1.8.2. Al-Si İkili Faz Alaşımları	28
1.8.3. Al - Ti İkili Faz Alaşımları	28
1.9. NİYOBYUM	29
1.10. NİYOBYUM KULLANIM ALANLARI	29

1.11. NİYOBYUM ÖZELLİKLERİ	29
1.11.1. Niyobyum Elementin Mekanik Özellikleri	30
1.11.2. Niyobyum Elementin Fiziksel Özellikleri	31
1.11.3. Niyobyum Elementin Kimyasal Özellikleri	31
İKİNCİ BÖLÜM	32
2. YÖNTEM	32
2.1. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE HAZIRLIK ÇALIŞMALARI	32
2.2. ERGİTME İŞLEMİ	33
2.3. SIVI METAL TEMİZLİĞİ İŞLEMLERİ.....	34
2.4. KALIPLARIN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM ÇALIŞMALARI.....	35
2.5. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ.....	37
2.5.1. RPT Numunelerinin İncelenmesi	37
2.5.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi.....	38
2.5.3. Dört Kollu Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi	39
2.5.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi	40
2.5.5. Ördek Ayağı Kokil Kalıp Numunelerinin İncelenmesi.....	41
2.5.6. Basamak Kokil Kalıp Numunelerinin İncelenmesi	42
2.5.7. Mikroyapı İncelemeleri	42
2.5.8. Mekanik Test Döküm Numunelerinin İncelenmesi.....	43
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	46
3. BULGULAR	46
3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN KONTROLÜ	46
3.2. SIVI METALİN KALİTESİNİN TESPİTİ.....	46
3.3. DÖRT KOLLU AKICILIK VE SİRAL TESTİ SONUÇLARI	50
3.4. MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI	52
3.5. MEKANİK TEST SONUÇLARI.....	58
3.5.1. Çekme Test Sonuçları.....	59
3.5.2. Sertlik Test Sonuçları	62
3.6. ÖRDEK AYAĞI KALIBI % ÇEKİNTİ SONUÇLARI.....	63
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKÇA.....	71
ÖZ GEÇMİŞ	75

TABLÖLAR

Tablo 1: Alüminyumun Alaşımının Mekanik Özellikleri	8
Tablo 2: Alüminyum Alaşımının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	9
Tablo 3: Alüminyum Döküm Alaşımları 4 Rakamlı Numarası ve Ana Alaşım Elementi	10
Tablo 4 : Alüminyum Dövme Alaşımları 4 Rakamlı Numarası ve Ana Alaşım Elementi	11
Tablo 5: Alüminyum Alaşımına Tane İnceltici İçin İlave Edilen Elementler.....	13
Tablo 6 : İnküzyonların Sınıflandırılması, Bileşik Türleri ve Potansiyel Kaynakları	23
Tablo 7: Niyobyum Elementin Özellikleri ve Değerleri	30
Tablo 8: Döküm Parametreleri ve Kullanılan Kalıplar.....	32
Tablo 9: A356 Alaşımının ve Nb Elementin Kimyasal Analizleri	32
Tablo 10: Döküm Deneyleri Kimyasal Bileşim Sonuçları (% Ağ.)	46
Tablo 11: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları	48
Tablo 12: K- Mold İnküzyon Parça Sayıları ve K Değerleri.....	49
Tablo 13: 4 Kollu ve Spiral Akıcılık Kalıbı Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Sonuçları	52
Tablo 14: Çekme Test Deneyi Sonuçları.....	60
Tablo 15: Sertlik Ölçüm Sonuçları	63
Tablo 16: Ördek Ayağı Numuneleri % Çekinti Miktarı İmaj Analiz Sonuçları.....	66

ŞEKİLLER

Şekil 1: A356 Ait Optik Mikroyapısının Görüntüsü.....	7
Şekil 2: Alüminyum Alaşımının Diğer Elementler İle Birleşim Sınıflandırılması Gösterimi.....	10
Şekil 3: Tane İncelticinin İlaveli ve İlavesiz Etkisi	12
Şekil 4: Al-Ti Faz Diyagramının ve Ağırlık Oranı	14
Şekil 5: Alüminyum Peritektik Teorisi a-Al ‘Nin Çekirdeklenmesi.....	14
Şekil 6: Saf Al Alaşımın Serbest Enerjinin Sıcaklık Katılma Durumu	17
Şekil 7: Sıvı-Katı Arayüzeyin Oluşturduğu Parçacıklar	17
Şekil 8: Embriyonun Serbest Enerjisindeki Katı-Sıvı Boyutu İle Değişimi	18
Şekil 9: Çekirdek Sayısı (K), Büyüme Hızı (W) ve Aşırı Soğumu (ΔT) Birim Zamandaki Oluşumu	19
Şekil 10: Heterojen Çekirdeklenme Oluşumundaki Kritik Yarıçapı	20
Şekil 11: Saf Al, A356 ve A319 Alaşımlarının Sıvı Metalin Sıcaklığa Bağlı Olarak Hidrojen Çözünürlüğü.	22
Şekil 12: Sıvı Al Metal Yüzeyinde Oluşan Oksit Film Tabaka Görüntüsü	24
Şekil 13: Al-Cu İkili Faz Denge Diyagramı	27
Şekil 14: Al - Si İkili Fazın Denge Diyagramı.....	28
Şekil 15: Deneysel Çalışmalar İşlem Sürecinin Şematik Gösterimi.....	33
Şekil 16: Çan Tipi Ocağın Ergitme İşleminin Yapılması	33
Şekil 17: a) Sıvı Metal Gaz Giderme İşlemi, b) Pota İçerisinde Gaz Giderme Süreci Şematik Görüntüsü	34
Şekil 18: Azaltılmış Basınç Test (RPT) Cihazı	35
Şekil 19: Isıtıcı Tabla ve Kalıpların Isıtılmasına Ait Örnek Bir Görüntü.	36
Şekil 20: Sıvı Metalin Kokil Kalıplara Dökümü ve Elde Edilen Numuneler	36
Şekil 21: Yoğunluk Ölçüm Test Cihazı	37
Şekil 22: RPT Numunelerinin Dikey Olarak Kesilmesi	38
Şekil 23: K- Mold Test Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri.....	38
Şekil 24: 4 Kollu Akıcılık Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri	39
Şekil 25: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Numunesinin Ölçülmesi	40
Şekil 26: Spiral Akıcılık Kokil Kalıbı.....	40
Şekil 27: Spiral Akıcılık Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri.....	40
Şekil 28: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Numunesi Ölçülmesi	41
Şekil 29: Ördek Ayağı Döküm Kokil Kalıbı Görüntüsü ve Ölçüleri.....	41
Şekil 30: Ördek Ayağı Test Kalıbı Numunelerinin Kesilen Bölgelerin Gösterilmesi	41
Şekil 31: Basamak Döküm Kokil Kalıbı - Basamak Döküm Numunesi Ölçüleri	42
Şekil 32: Zımparalama ve Parlatma Mikroskobu	43
Şekil 33: Mekanik Test Kokil Kalıbı Fotoğrafı ve Ölçüleri	44
Şekil 34: Çekme Testi İçin Döküm Numunesinin Şematik Gösterimi	44
Şekil 35: Çekme Testi Cihazı ve Çekme Çubuğu Numuneleri.....	45
Şekil 36: Sertlik Ölçüm Test Cihazı.....	45
Şekil 37: RPT Test Numune Görüntüleri.....	47
Şekil 38: RPT Numune Kesit Görüntüleri	47
Şekil 39: K-Mold Kalıbına Yapılan Döküm Numune Görüntüleri.....	48
Şekil 40: K- Mold Numuneleri Kırık Yüzey Numune Görüntüleri	49

Şekil 41: 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri	50
Şekil 42: Spiral Akıcılık Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri	51
Şekil 43: 4 Kollu ve Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Sonuçları	51
Şekil 44: Basamak Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri	52
Şekil 45: Basamak Kalıplarındaki 5 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri	53
Şekil 46: Basamak Kalıplarındaki 10 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri	54
Şekil 47: Basamak Kalıplarındaki 15 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri	54
Şekil 48: Basamak Kalıplarındaki 20 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri	55
Şekil 49: Ölçülen SDAS Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Nb Oranına Göre Değişimi	56
Şekil 50: Ölçülen SDAL Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Nb Oranına Göre Değişimi	56
Şekil 51: Çekme Kalıbı Döküm Numuneleri Görüntüleri	59
Şekil 52: Döküm Numunelere Gerilme-Birim Şekil Değişimi Grafikleri	60
Şekil 53: Nb İlavesine Bağlı Olarak Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi	61
Şekil 54: Nb İlavesine Bağlı Olarak % Uzama Değerleri Değişimi	61
Şekil 55: Nb İlavesine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi	62
Şekil 56: Nb İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Testi Sonuçlarının Grafik Gösterimi	63
Şekil 57: Ördek Ayağı Kokil Kalıba Döküm Numunesi Örnek Görüntü	64
Şekil 58: Ördek Ayağı Numunesinin A) 15 mm Çekinti Boşluğu, B) 25 mm Çekinti Boşluğu	64
Şekil 59: Ördek Ayağı Döküm Numunesinin 15 mm ile 25 mm Çekinti Boşluğu	65

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Ayırımı Spektroskopisi)
Nb	: Niyobyum
RPT	: Reduced Pressure Test (Düşürülmüş Basınç Testi)
VAK	: Vakum Altında Katılaştırma
SiC	: Silisyum Karbür
ETİAL	: ETİ Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
Fe	: Demir
Cr	: Krom
Ti	: Titanyum
B	: Bor
Mg	: Magnezyum
Zn	: Çinko

ANOVA	: Varyans Analizi
ATO	: African Timber Organization
Cl	: Klor
Si	: Silisyum
Er	: Erilyum
Cm	: Santimetre
Kg	: Klogram
M	: Metre
M²	: Metrekare
M³	: Metreküp
Mm	: Milimetre
Mpa	: Megapaskal
H₂O	: Su
µm	: Mikrometre
Sr	: Sitokiyometrik

GİRİŞ

Alüminyum alaşımları hafiflik ve korozyon direncinin yanı sıra iyi bir mukavemet özelliklerinden dolayı çok geniş kullanım alanına sahip olmaktadır. Alüminyum metali, bir veya birden fazla alaşım elementleri ilaveleriyle farklı özellikler kazanabilmektedir. Alüminyum ve alaşımları iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğu için döküm, otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma, A356 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapısal özelliklerine Nb (Niyobyum) ilavesinin etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. A356 alaşımı ilavesiz, %0,03, %0,06 ve %0,1 oranlarında Nb ilaveli olarak kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Sıvı metalin temizliğini gözlemlemek için vakum altında katılaşma (VAK) testi uygulanmıştır. A356 alaşımının mikroyapısı üzerinde katılaşma hızının etkisini araştırmak amacıyla basamak kalıp kullanılarak dökümler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, katılaşma süresinin ve Nb ilavesinin mikroyapı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde çalışmada analiz edilmiştir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum alaşımlarına tane inceltme özelliğine sahip çeşitli alaşım elementleri ilave edilerek alaşım özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu elementlerden olan Nb alaşım elementinin ilavesi ile alüminyum alaşımının dökümünde akıcılık, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenecektir. Literatür incelendiğinde, Al alaşımlarına Nb ilave edilerek yapılan çalışmalar sonrasında, Nb ilavesinin alaşım özelliklerinde akıcılık, mikroyapı, beslenebilirlik ve mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda yapılan tez çalışması kapsamında alaşıma değişen oranlarda Nb ilavesi ile alaşıma etkisi değerlendirilecektir. Nb ilavesini alaşımın dökümünde mikroyapıyı geliştirerek tokluğu, şekillendirilebilirliğini ve mukavemet dayanımı artırmasını beklenmektedir. Deneylerden elde edilecek numunelerde akıcılık, mikroyapı, beslenebilirlik ve mekanik özelliklerde değişim değerlendirilecektir. Ayrıca Nb elementinin tane inceltici olarak kullanılabilirliği test edilecektir.

Araştırmanın Amacı

Gelişen endüstriyel sanayide Alüminyum-Niyobyum ikili alaşımlarının birçok avantajlı özelliği sayesinde endüstrisinde her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu sebeple kullanım alanı da genişlemekte ve Al-Nb alaşımlarının dökümündeki çeliğin özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın amacı alüminyum alaşımlarına Nb ilavesinin alaşım özelliklerine etkisini detaylı bir şekilde incelenecektir.

Alüminyum alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi kullanılarak, alaşıma Nb etkisinin kimyasal analizi, mikro yapı, mekanik testlere tabi tutularak çalışmalar yapılacaktır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Literatür incelendiğinde; alüminyum alaşımlarının dökümünde tane inceltici olarak ağırlıklı Ti ve B elementi içeren master alaşımları kullanıldığı gözlenmektedir. Tane inceltme işlemi ile akışkanlığın artacağı, tane boyutundaki azalma ile mekanik özelliklerde olumlu avantajlar sağlanacağı bilinmektedir. Ancak yapılacak çalışma ile Ti ve B elementlerine alternatif olarak Nb elementinin A356 alüminyum döküm alaşımında tane inceltici olarak kullanılabilirliği ve döküm özelliklerin ne derece etki ettiği nicel olarak ortaya konulması hedeflenmektedir. Ayrıca akıcılığa etkisi değerlendirilecektir. Böylece istenilen bir kesit kalınlığında, beklenen sıvı metal ilerlemesi için hangi şartlarda döküm yapılması gerektiği tez kapsamında belirlenebilecektir. Çalışma sonucunda otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinde, döküm özellikleri geliştirilmiş parçaların dökümü için A356 alaşımına Nb ilavesinin optimum değerinin belirlenmesi mümkün olacaktır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Literatürde var olan çeşitli çalışmalarda farklı elementlerin A356 alaşımına ilaveleri araştırılmış olup, Nb sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Nb ilavesinin A356 alaşımına etkisi detaylı olarak araştırılıp A356 alaşımında Nb'nin alaşım üzerinde etkileri incelenecektir.

Terim ve Tanımları

SDAS: (Secondary Dendritic Arm Spacing) Alüminyum alaşımın içindeki atomlardaki ikinci dendrit kolları arası mesafeye verilen adlandırmadır.

SDAL: (Secondary Dendrite Arm Length) Alüminyum alaşımın içindeki atomlardaki ikinci dendrit kolları uzunluğu verilen adlandırmadır.

Kokik Kalıp: Malzemesi çelik ya da dökme demir olan ve içine döküm yapılabilen kalıplara denilmektedir.

Akışkanlık: Sıvıları, gazları, plazmaları ve bazı durumlarda plastik katıları (ergiyik) kapsayan, maddenin hallerinin bir alt kümesidir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM

Alüminyum alaşımları, dünyada ilk olarak 1800'lü yıllarda Fransa'nın Les Bauz'ta şehrinde kırmızı renkli alüminyum alaşımının hammadde cevheri olarak bulunmuştur. Bu hammadenin ismini bulunduğu yerleşim yeri olan "BAUXITE – boksit" olarak adlandırılmıştır. Daha sonra Friedrich WÖHLER potasyumla su içermeyen alüminyum klorürü tepkimeye sokarak toz alüminyum olarak Almanya'da üretilmiştir. Çalışmalarını devam ettirerek alüminyum yoğunluğunu $2,7 \text{ kg/cm}^3$ olarak bulmuştur. Alüminyum üretimi 18 yy'ının ortalarında H. SAİNTE ve C. DEVİLLE Fransa'da ilk ticari olarak üretilmiştir. Alüminyumun dünya genelinde tanıtımı yapılması, Paris'te gerçekleştirilen "Paris Dünya Sergisi" gerçekleştirilmiştir. 18 yy'ının son yıllarında, Paul HEROULT ve Charles HALL iki farklı çalışmalarında elektroliz yönteminin tespiti ve Heroult ile Hall tekniği olarak adlandırılmıştır. Yapılan çalışmalar ise alüminyum üretiminin temelini oluşturmaktadır. Ayrıca alüminyumun ilk endüstri tesis temelleri Fransa, İsviçre ve Amerika'da atılmıştır. F. BAYER Avusturya'da, üretim çalışmaları sonrasında bayer işlemini bularak boksit madeni alüminyuma dönüştürülmüştür (Metals Handbook, 1989).

Çolak ve Kayıkçı yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımlarına titanyum (Ti) ve Bor (B) elementlerin % 0,01 gibi ilavesinde tane inceltme etkisinin ve tane inceltmenin beslenebilirlik üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deney çalışması sonucu olarak Ti ve B elementi katılma sonrası TiB_2 'nin iyi bir çekirdeklenmesi olduğunu ve TiB_2 partiküllerinin sıvı alüminyum içerisinde çözünme olmadığını ve düşük ilave oranlarında bile mükemmel tane inceltme sağladığını gözlemlemişlerdir.

Alüminyum alaşımlarında tane inceltmenin birkaç yöntemi vardır. Bunlar: Titreşim ve karıştırma, katılma (soğuma) hızını arttırarak, tane inceltici ekleyerek ve plastik deformasyon yaparak tane inceltmedir (Çolak, & Kayıkçı, 2009; Guan, & Tie, 2017; Yajjala, vd., 2020; Uslu, & Yetgin, 2021). Bu kapsamda, en yaygın uygulama bulan tane inceltme yöntemi Al-5Ti-1B alaşım ilavesi ile gerçekleştirilmektedir. A356 alaşımına Al-5Ti-1B ve Al-3B alaşımını kullanarak tane inceltici etkisinin incelendiği bir çalışmada, ortalama tane boyutu $1450 \pm 145 \mu\text{m}$ iken Al-5Ti-1B ilavesi ile $465 \pm 102 \mu\text{m}$ ve Al-3B ilavesi ile $156 \pm 29 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür (Birol, 2013). Tane inceltme için en yaygın kullanılan alaşım elementi Ti ve B içeren tane incelticilerdir (Birol, 2009; Quested, 2004; Çolak, & Arslan, 2022). Buna karşın alternatif malzemeler ile tane inceltme çalışmaları da mevcuttur. Bunlar arasında sitransiyum (Sr)

ilavesinin etkisinin incelendiği bir çalışmada, tane boyutu düştüğü ancak buna karşın mekanik özelliklerde tane incelticinin sönümlenmesi ve pota tabanında bor ve bor kompozisyonlarının çökmesinden dolayı zayıflama olduğu gözlenmiştir (Tamuly, 2022). Bu kapsamda son günlerde özellikle nadir toprak elementlerinin alaşımlara ilavesi sonucu tane inceltme ve buna bağlı olarak alaşım özelliklerine etkileri araştırılmaya devam edilmektedir. Bunlar içerisinde Erilyum (Er) ve Nb gibi elementler özellikle dikkat çeken elementler arasındadır (Aydogan, vd., 2022; Ernam vd., 2022; Dispınar & Sahin 2023). Narducci vd., Nb ilavesinin Al (7-9-12) ağı % Si ve 1 ağı % Fe alaşımının mikroyapı boyutu ve morfolojisi üzerindeki etkisinin incelemesi yapılmıştır. % 0,02 Nb ilavesi ile tane boyutu ortalama olarak 1000 µm den 200 µm kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca bu element ilaveleri tane boyutu dışında alaşımın farklı özelliklerine etkileri de dikkat çeken araştırma konuları arasındadır (Narducci Jr., vd., 2021). Yajjala, vd., tarafından yapılan bir çalışmada farklı ısı iletim katsayılarına sahip kalıp malzemelerine döküm sonucu A356 alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri tane boyutundaki küçülme ile iyileştirildiği gözlenmiştir (Yajjala, 2020).

Alüminyum alaşımlarındaki ve kompozit malzemelerin akışkanlığının malzemenin dökülebilme üzerinde olmadığı göstermek ve döküm özellikleri üzerinden doğrudan etkilendiği ve akışkanlık, ergimiş metal ve kalıbın özelliğinden, dökme koşullarından, takviye özelliklerinden ve katılaşma mekanizmasından etkilenen karmaşık bir parametre olduğunu araştırılarak alüminyum alaşımlarının ve kompozit malzemelerin akışkanlığını etkileyen etkenler hakkında çeşitli çalışmalar yapmışlardır (Ravi, Pillai, Amaranathan, Pai, & Chakraborty, 2008).

A356 alüminyum alaşımının akıcılık üretimini elverişli seviyeye çıkarmak için, Şensoy ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, yerçekimi döküm yöntemi kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak, döküm sıcaklığı, ön ısıtma sıcaklığı ve kesit kalınlığının göz önünde bulundurulduğu çalışmada; duyarlılık analizi sonucunda akıcılığa en çok neden olan parametrenin kalınlık olduğu çıkarımı yapmışlardır (Şensoy vd., 2020).

Akışkanlık, dökümde belirli bir ısıda döküm yapıldığında bir metalin katılaşma olmadan önce belirli bir test kalıbında sıvı metalin ilerleme mesafesi, başka bir deyişle sıvı metalin kalıp boşluğunun içinde ilerleyerek tamamen doldurmasıdır. Yeterli akışkan olmayan sıvı metal, döküm kalıbının özellikle dökümün daha ince kesitli bölümlerinde ilerleme olmadığı için yetersiz döküme neden olmaktadır (Campbell, 2003).

Akışkanlık, ergimiş sıvı metalin katılaşana kadar ilerleme mesafesine verilen isimdir. Akışkanlık, sıvı metali dökmek için önemli bir özelliğinin olduğunu ifade etmektedir. Yüksek sıcaklığa sahip, tüm metallerin ve alaşımların sıvı metal ilerlemesini arttırırken, dökümdeki

metalik olmayan yabancı elementler akışkanlığı azaltır ve kalıp içindeki sıvı akışı engellemesine neden olmaktadır (Kharkiv, 2013; Vignesh, 2016).

Akışkanlık, metalürjik ve kalıp-döküm değişkenlerine ayrılabilen birçok nedenlerden etkilenir. Metalürjik faktörler ise; vizkozite, bileşimler, aşırı sıcaklık, gizli ısı, oksit film tabakası, özgül ağırlık, sıvı metal yüzey gerilimi, ergime noktası ve katılaşma oluşma durumu. Kalıp-döküm faktörleri ise; ara yüzde ısı transfer katsayısı, kalıp sıcaklığı ve kalıp iletkenliğidir (Sabatino., 2011; Saxena vd., 2017).

Alüminyum alaşımlarının dökümünde metalinin içyapısında oluşan gaz ve çekintilerden kaynaklanan döküm kusurları oluşmaktadır. Yaptıkları çalışmada A356 alaşımı kullanılarak mevcut durumlarda kullanılan iyileştirme uygulamalarına alternatif takipçi işlem adımı olarak Sıcak İzostatik Pres uygulaması yapılmış olup açık atmosfer döküm ile elde edilen numunelere üretim aşamalarının farklı noktalarında HIP prosesi uygulanmıştır. Uygulanan döküm numunelerin mekanik ve metalürjik özelliklerindeki değişimlerini incelemişlerdir (Aybarç, Çubuklusu, Çe, & Kara, 2017)

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktör ise tane boyutu ve morfolojidir. Alüminyum tane boyutunu düşürerek mekanik özellikleri artırmak mümkün olmaktadır. (Yajjala vd., 2020) A356 alaşımın kum kalıba döküm sonrasında Fe - Cr cüruf gerçekleştirmiştir. Yaptıkları dökümlerin hem mekanik özelliklerini hemde mikro yapılarını incelemişlerdir. Kum kalıba yapılan dökümde 144 ve 42 μm tane ve SDAS boyutu ölçmüşlerdir. Diğer taraftan Fe-Cr cürufunu kalıp malzemesi olarak kullandıkları dökümde ise 72 ve 17 μm tane ve SDAS boyutu bulmuşlardır. Bununla beraber sertlik, UTS ve % 'de değerleri 63 HV, 115 MPa, ve % 10.94'e den 71 HV, 130 MPa ve % 12.41'e yükselmiştir. Burdan da anlaşılabileceği gibi mekanik özellikler tane boyutunun incilmesi ile iyileştirilebilir.

Son günlerde, erilyum (Er) ve niyobyum (Nb) gibi nadir toprak elementleride tane inceltici olarak kullanılmaktadır (Narducci vd., 2021). Nb ilavesinin Al (7-9-12) ağırlık % Si ve 1 ağırlık % Fe alaşımının mikroyapı boyutu ve morfolojisi üzerindeki etkisi incelemiştir. % 0,02 Nb ilavesi ile tane boyutu ortalama olarak 1000 μm den 200 μm kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Diğer yandan, eklenen Nb miktarının artması ile beraber, tane boyunun hafif bir artış gözlemlenmiştir. Diğer yandan, Al-Si alaşımı içindeki Si miktarını artması Nb-B ilave edilen dökümlerdeki tane boyutunda hafif bir artış gözlenmiştir (yaklaşık olarak 190 μm den 250- 300 μm kadar artış gözlenmiştir). Ayrıca, silisyum (Si) tane yapısında büyüme sonrasında, soğuma zamanının artması (katılaşma hızının azalması) ile beraber artmaktadır. Bolzoni ve Babu 96 Al-2Nb-2B master alaşımın A356 alaşımının üzerindeki tane inceltici etkisi incelemiştir. Tane

boyutu master alaşımı ilavesiz dökümler 1000 µm ile ilaveli dökümlerde 250-330 µm arasında ve soğuma hızı arttıkça tane incelmesini gözlemlemişlerdir.

Diğeri bir tane inceltici yöntem ise soğuma hızının arttırılması. Soğuma hızının değıştirilebilmesi için döküm parçasının yüzey alanı/hacmi arttırılması veya döküm yapılan kalıp malzemesini ısı iletkenliğini yüksek malzemeler ile değıştirmek (kum kalıbı metal kalıp ile değıştirmek). Pulivarti ve Birru döküm sıcaklığının ve kalıp kaplamasının A206 alaşımın akışkanlığa ve mikro yapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Alaşımın tane boyutunun hem döküm sıcaklığı hemde kalıbın kaplanmasından etkilenmektedir. 700, 750 ve 780 °C döküm sıcaklıklarında 164, 151 ve 155 µm (kaplamasız kalıp) 147, 103 ve 121 µm (grafen kaplı numune) ve 95, 64 ve 82 µm (sabuntaşı-kaplı kalıp). Tang vd. Al-5Mg-3Zn-1Cu alüminyum alaşımını basamak kalıba dökümünü gerçekleştirmişlerdir. Basamak kalıpta yapılan ölçümlerde, basamak kalınlığının 50, 25, 10 ve 5 mm düşmesi ile beraber ölçülen soğuma hızı 2,3, 3,4, 9,8 ve 24,1 K/saniye artmıştır. Soğuma hızının artması ile beraber SDAS değerleri sırasıyla 43, 34, 22 ve 14 µm ve tane boyutu 550, 420, 320 ve 240 µm olarak tespit edilmiştir.

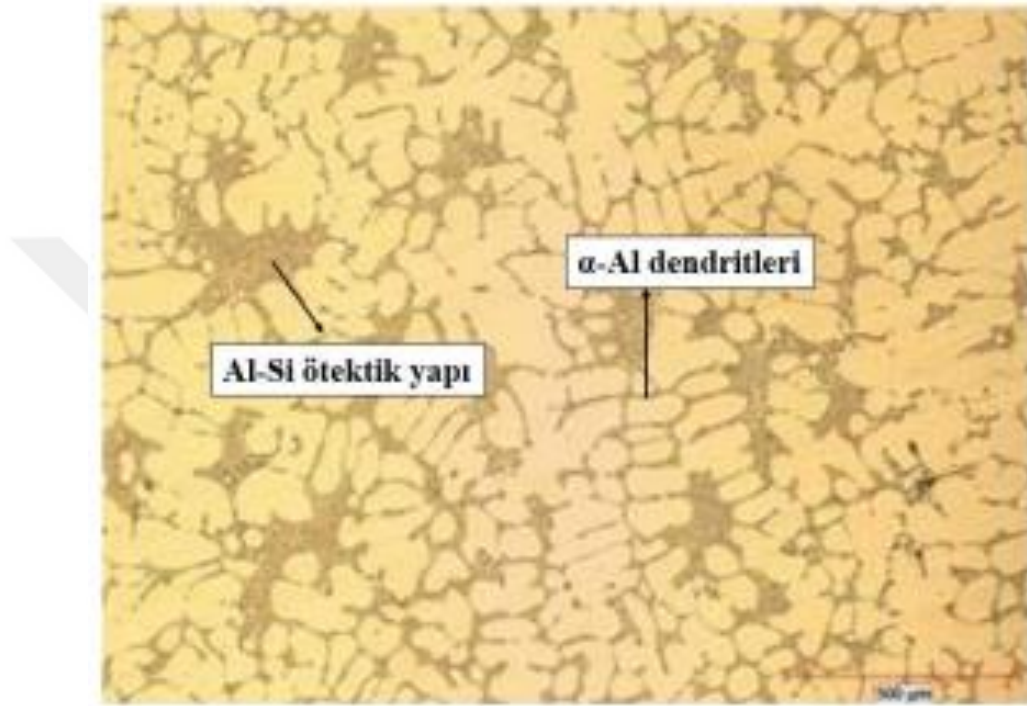
1.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Alüminyum alaşımı periyodik cetvelde 3A grubunda bulunur. Demir çelikten sonra yer kabuğunda % 8 bulunan bir metal olarak bilinmektedir. Çelik metale göre alüminyum alaşımı 7,8 gr/cm³ gibi 3 kat daha düşük ağırlığı sahip olup, çeliğe göre kayda değer mukavemet değerine sahip olmaktadır. Ayrıca alüminyum 660 °C düşük ergime noktası sahip metal alaşımıdır. Bu sebeple üretim maliyetleri çeliklere göre daha düşük olmaktadır. Farklı döküm prosesi ile karmaşık yapıların üretiminin dökümleri daha kolay yapılmaktadır. Alüminyum alaşımları kolayca şekillenebilir ve işlenebilmektedir. Alüminyum yüzeyinde doğal ince bir Al₂O₃ tabakası oluşmasından dolayı iyi bir korozyon direncine sahip olmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı kullanım alanı çok geniş olmaktadır. Bu alanlar otomotiv havacılık, inşaat gibi endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Çolak, & Kayıkçı, 2009).

1.2.1. A356 Alüminyum Alaşımın Özellikleri

A356 alüminyum alaşımı kolayca şekillenebilir, işlenebilir, döküm yapılabilir ve haddelebilir olmasından dolayı uzay, havacılık ve otomotiv sektörleri gibi endüstri alanlarda yaygın olarak kullanılan bir döküm alaşımıdır. A356 alaşımına Mg ilave edilmesi sonrasında Mg₂Si fazı oluşturarak mukavemetini etkiler. A356 alaşımı ısı iletkenliği yüksek bir alaşım olduğundan, bu olumsuz durum ısı iletkenlik uygulamaları optimize edilebilir. Mikroyapısı birincil alüminyum fazından (α-Al) katın çözeltisi ve Al-Si ikili faz yani ötektik yapı fazından oluşmaktadır. Sıvı halden katılaşma sırasında (α-Al) fazı dentirik şekilde katılaşmaktadır.

Uzama ve çekme mukavemet değerlerini kontrol etmek için eklenen master alaşımının kimyasal bileşenlerinde Fe bulunmasından dolayı, alaşım yapısında demir intermetalikleri oluşturmaktadır. Mekanik özellikleri katılaşma hızı, tane boyutu dağılımı Fe konsantrasyonu ve dentritler arası mesafe kontrolü ile iyileştirilir. Isıl işlemin sonunda da mikroyapı morfolojisi ve dengelenen mesafe önemli ölçüde değişmektedir. Şekil 1’de açık renkli olan bölgeleri matris yapılı olan birincil alüminyum dendritleri, koyu renkli olan bölgeler silisyum ötektiği göstermektedir (5x) (Ak, 2022)



Şekil 1: A356 Ait Optik Mikroyapısının Görüntüsü

1.2.2. Alüminyum Alaşımların Mekanik Özellikleri

Alüminyumun mekanik özellikleri saflıktaki yüzde derecesine bağlıdır. % 99,9 saflığında alüminyum metali mekanik özellik olarak esnek ve yumuşak özellik göstermektedir. Ayrıca mekanik mukavemeti değeri ise çok düşük olup bu saflıktaki metalin elastisite modülü 6700 MPa iken, saflık oranı % 99,2 olan alüminyum metalin elastisite modülü 7000 MPa çıkmaktadır. Dövülmüş ve tavllanmış ve saflık oranı % 99 Al alaşımının Brinell sertlik değeri 25 HRB seviyelerinde olurken, bu değer saflık oranı % 99,9 Al alaşımında 16 HRB seviyelerinde olduğu görülmektedir. Al alaşımı % 99,9 iken soğuk haddelenme işlemi uygulandığında alüminyumda % 75’lik bir incelme olduktan sonra sertlik değeri 27 HRB, aynı alaşıma dövme işlemi sonrası yumuşama yapılmıca sertlik değeri 13 HRB olarak ölçülmektedir (Karakışlak, 1992)

Alüminyum alaşımları çeliklere göre 7,8 gr/cm³ gibi 3 kat daha düşük elastik modülüne sahip olduğundan, mühendislik tasarım hesapları için büyük öneme sahip olmaktadır. Salınlı yük altında çalışan çeliğe göre daha iyi sönümlene özelliğine sahiptir. Alüminyum önemli mekanik özellikleri şekillenebilir ve işlenebilir olup, yumuşak ve plastik olmasından dolayı kolayca haddesi yapılabilir. Bundan dolayı kolayca tel çekme, presleme, bükme, çekme ve kalıplama gibi bilinen yöntemlerle kolayca işlem yapılabilir. Tablo 2’de alüminyumun mekanik özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. (Saadi, & Tunay, 2017).

Tablo 1: Alüminyumun Alaşımının Mekanik Özellikleri

Al Özellikleri	Al Değerleri
Çekme Dayanımı (kg/cm ²)	914
Akma Dayanımı (kg/cm ²)	356
Uzama Miktarı (%)	40
Alan Küçülmesi (%)	38
Katılma Esnasında Çekme Miktarı	%6,7
Sertlik (Vickers)	20 HBV

1.2.3. Alüminyum Alaşımının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

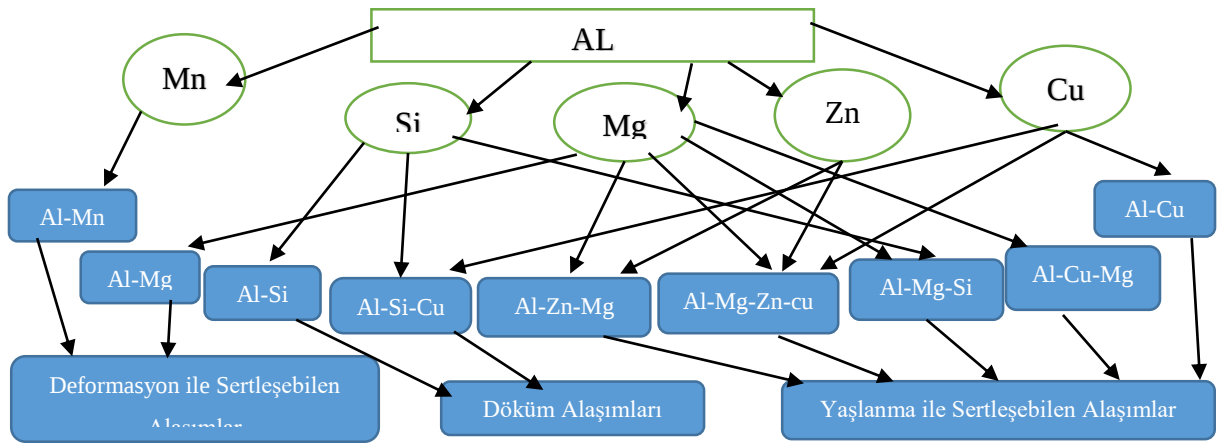
Alüminyum alaşımı kimyasal ve fiziksel özellikleri olarak, çok iyi bir aktivasyon özelliğine sahip metaldir. Al alaşımı oksijen halojen, kükürt ve karbon ilavesi ile bileşikler sonrası yüksek enerjiye sahip olmaktadır. Alüminyum hava ile temas ettiğinde ince sıkı bir oksit tabakası oluşturarak metal yüzeyinde kaplama oluşturmaktadır (Vargel, 2004). Elektron mikroskobu ile yapılan çalışmalar sonrasında örtünün sık ve gözeneksiz olduğu görülmektedir. Oluşan bu örtü metal oksitlenme oluşumuna karşı koruyarak, yüksek bir korozyon direncine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu tabakanın görünümü ise, metalik parlak olup, yüzey tabakasının kalınlığı ise takriben 0.2 mm görülmektedir. Alüminyum havada, ergime sıcaklığının altında ısıtılması ile oksitlenme başlar ve ergime noktasının üzerindeki sıcaklıklara çıkartıldığında daha hızlı oksitlenme oluşmaktadır. Alüminyum alaşımının mevcudiyet oksidasyon Mg, Ca, Ma, Si ve Cu gibi elementler ile eğilimleri kuvvetli oluşmaktadır. Alüminyum alaşımının oksijen reaksiyonun sonrası ekzotermik ısı oluşmaktadır. Bu oluşumun oksitlenmesi fazla ısı vermesinden kaynaklanmaktadır. 100 °C üzerindeki sıcaklıklarda oluşan Cl ile 161.4 kcal/g.mol sonrası oluşan yapı, AlCl₂ fazı oluşmaktadır. Alüminyum alaşımı hidrojenle reaksiyona girerek indirgenmiş alüminyum çözünürlüğü görülmektedir. Bu oluşum 1000 °C 1 cm³ için 0.2 mm değerine sahip oluşmaktadır. Alüminyum alaşımın, fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir (Çolak, & Kayıkçı, 2009).

Tablo 2: Alüminyum Alaşımının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Al Özellikleri	Al Değerleri
Grubu	3A
Sembolü	Al
Atom Numara	13
Atom Ağırlığı	27 g/mol
Kristalin Yapısı	YMK
Ergime sıcaklığı	660 °C
Kaynama Noktası	2520 °C
Sıvıdaki Yoğunluğu	2,38 g/cm ³
Katıdaki Yoğunluk	2,7 g/cm ³
Buharlaşma Sıcaklığı	2450 °C
Özgül Isısı	0,22 kal/g (100 °C)
İlk Erime Isısı	94 kal/g
Kopma Uzaması	30-40 (%)
Çentik Darbe Enerjisi	100 J/cm ²
Elektron Dizilişi	[Ne] 3S ² 3P ¹
Isı Kapasitesi	24,2 J(K-mol) oda sıcaklığında
İyonlaşma Enerjisi	577,5 kJ/mol
Isıl İletkenlik	237 W/(m/K)
Isıl Genleşme	23,1 µm /(m/K) oda sıcaklığında
Atom Yarıçapı	125 pm
Atom Yarıçapı	118 pm
Kovalent Yarıçapı	118 pm
Elektronegatifliği	1,61 Pauling Ölçeği
Yükseltgenme Seviyesi	(3+) atmosfer oksit
Ses Yayılma Hızı	5000 m/s oda sıcaklığında
Elektriksel Öz direnç	26,5 Ω·m oda sıcaklığında

1.3. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum döküm alaşımları iki kısımda sınıflandırma yapılmaktadır. Birinci kısımdaki özelliği ıslah edilen özellikler, yani yalnızca alaşımlandırma neticesi ile elde edilmiş dökümler olarak bilinmektedir. İkinci kısımda ise özelliklerin daha fazla ıslah edilmesi için ıslah işlemlere taktik edilmiş dökümler olarak bilinmektedir. Şekil 2’de Al alaşımın birleşimleri verilmiştir (Öksüz, 1996; Sönmez, 2016).



Şekil 2: Alüminyum Alaşımının Diğer Elementler İle Birleşim Sınıflandırılması Gösterimi

1.3.1. Alüminyum Döküm

Alüminyum döküm alaşımlarında genellikle kullanılan alaşım elementleri; çinko, bakır, silisyum ve magnezyum metalleridir. Bu elementler döküm alaşımına uygun miktarda ilave edildiğinde alüminyum mukavemeti ve sertliği büyük ölçüde artırarak süneklik azalmasına neden olmaktadır. Döküm alaşımları kum kalıplara ve metal (kokil) kalıplara püskürtme makineleriyle döküm yapılabilir. Metal kalıba dökülen katı metalin yüzeyi düz ve pürüzsüz oluşurken, kum kalıplara dökülen katı metalin yüzeyi pürüzlü oluşmaktadır. Ayrıca kokil kalıpla elde edilen dökümlerden boyutu toleransı, kum kalıplardakinden daha az olmaktadır. Bu sebeple kokil kalıplara dökümlerden üretilen parçaların işleme ve şekillendirme maliyetleri daha düşüktür (Sönmez, 2016). Tablo 3'te alüminyum döküm alaşımları dört rakamlı numarası ve ana alaşım elementi gösterilmiştir. (Saadi, & Tunay, 2017).

Tablo 3: Alüminyum Döküm Alaşımları 4 Rakamlı Numarası ve Ana Alaşım Elementi

4 Rakamlı Alaşım	Ana Alaşımlar
1xxx	Saf metal alaşımı Maks. % 99,9'luk
2xxx	Cu (Bakır),
3xxx	Mn (Magnezyum) veya Cu (Bakır), Si (Silisyum)
4xxx	Si (Silisyum)
5xxx	Mn (Magnezyum)
6xxx	Kullanım dışı
7xxx	Zn (Çinko)
8xxx	Sn (Kalay)
9xxx	Diğer Elementlerdir.

1.3.2 Alüminyum İşleme

Alüminyum işleme ise; dövme alüminyum alaşımlarının dört basamaklı sayı ile adını tanımlanmaktadır. Alüminyum işleminde ilave edilen metallere göre dört rakamı ile oluşan sıra kullanılmaktadır. Bu sıradaki birinci rakamın anlamı ise, alüminyum ilave edilen esas metal

ilavesini göstermektedir. Buna örnek verecek olursak 2xxx serisindeki bakır metalin ilavesi veya 7xxx serisindeki çinko metalin ilavesi gibi ana alaşımlarına verilebilmektedir. Oluşan her grup en büyük alaşım elementi ile adlandırılmaktadır. Alüminyum işlemi alaşımları üretim yöntemiyle ingot (kütük) olarak döküm parçaları üretilmektedir. Bu parçalarıda plastik şekil verme yöntemiyle ürün haline getirmektedir. Ayrıca bu şekilde işlenebilirliği ve şekillebilir olmasının yanı sıra alüminyum döküm alaşımları kaynaklanma özelliğine sahip olmaktadır (Sönmez, 2016). Tablo 4’te alüminyum dövme alaşımları dört rakamlı numarası ve ana alaşım elementi verilmiştir (Yapıcı, 2012; Saadi, & Tunay, 2017).

Tablo 4 : Alüminyum Dövme Alaşımları 4 Rakamlı Numarası ve Ana Alaşım Elementi

4 Rakamlı Alaşım	Ana Alaşımlar Elementleri
1xxx	Saf Alüminyum Alaşımıdır.
2xxx	Bakır olan alaşımıdır. Magnezyum gibi farklı elementlerde bulunur.
3xxx	Mangan olan alaşımıdır.
4xxx	Silisyum olan alaşımıdır
5xxx	Magnezyum olan alaşımıdır.
6xxx	Magnezyum ve Silisyum olan alaşımlardır
7xxx	Çinko olan alaşımıdır. Bakır, Krom, Zirkonyum ve Magnezyum gibi farklı elementler olabilir
8xxx	Kalay olan alaşım elementidir. Az miktarda lityum olabilir.
9xxx	İlerleyen yıllarda kullanılmak için verilmiştir.

1.4. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI

Alüminyum alaşımlarının, döküm hazırlığı sırasında sıvı halde oksijen ile temas ettiğinde etkileşim oluşturmaktadır. Bu nedenle katılaşma sırasında Al_2O_3 fazı oluşmaktadır. Bu faz sıvı metal üzerinde oksit adı verilen bir cüruf tabakası oluşturmaktadır. Bu oksit tabakası sıvı metalin atmosferle etkileşimini engeller dökümü yapılan parça içinde hata oluşmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı oksit film tabakasının döküm yapılmadan önce temizlenmesi gereklidir. Bu oksit tabakasının oluşumu ve kalınlığı, kullanılan metallerin oksitlenmiş veya korozyona uğramasından kaynaklanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının dökümünde temiz ve homojen bir sıvı metal elde etmek için, döküm yapılmadan önce sıvı metale birtakım ilaveler eklenerek bu işlemler sağlanabilmektedir (Çolak, 2015). Sıvı metale yapılan bu ilavelerin amacı sıvı metalin atmosfer ile temasını kesmek ve sıvı metali temizlemektir. Oluşan cürufu temizlemek ve içerisinde bulunan gazlardan arındırma işlemlerinin döküm sonrasında parçanın sağlamlığı bakımından gerekli olduğu görülmektedir. Sıvı metal içinde gaz oluşumuna neden olan gazları önlemek ve metaldeki istenmeyen inklüzyonları absorbe etmek için sıvı metale gaz giderme ile temizleme işlemi uygulanır veya çeşitli element ilaveleri yapılarak bu durum ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Gaz giderilme

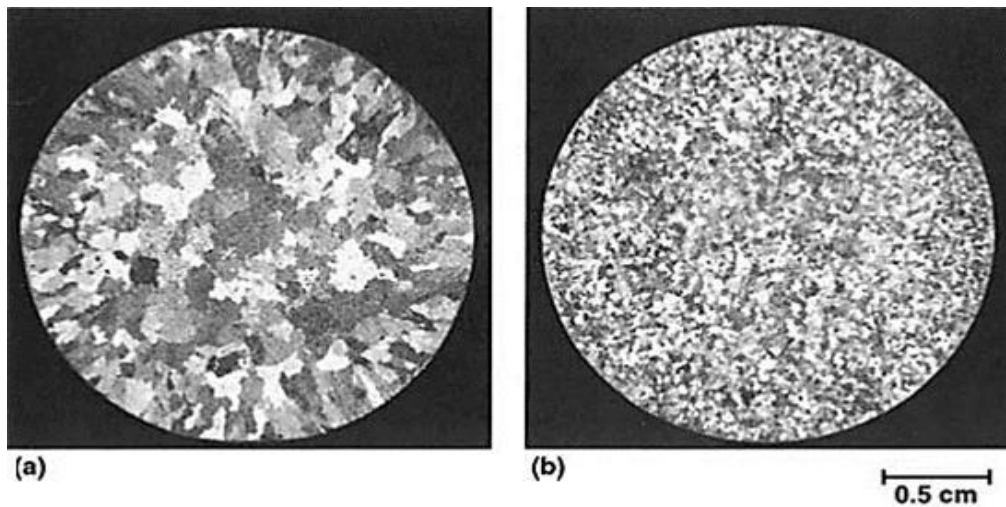
işlemi uygulanan metallerin fiziksel ve mekanik özellikleri gaz giderilmemiş metallere göre daha iyi özelliklere sahip olmaktadır (Çolak, 2015).

Sıvı alüminyum alaşımda problemin çözümünde en çok kullanılan gaz giderme işlemi ise; sıvı alüminyum alaşımda klor ve azot gazına kimyasal aktivite ederek istenmeyen metalleri uzaklaştırmak için yapılan işlemdir. Bu gazların uygulanması ise; eriğin içine mekanik olarak düşük basınçlı kabarcık şeklinde azot uygulayarak metal olmayan kalıntıları yüzeye çıkartarak ortamdaki uzaklaştırır. Döküm kalitesini artırması için gaz giderme işleminin yapılmasına bağlı bir işlemin sonucu olmuştur (Çolak, 2015).

1.5. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Alüminyum döküm alaşımların tane incelticinin etkisi, sıvı yüzey alanına etki etmesi sonrası daha iyi tane sınır dağılımına neden olmaktadır. İnce tanelilerin mukavemet ve sünekliliği için eş ve eksen taneli olması istenmektedir. Düşük alaşım özelliği olan birleşikler, yüksek termal grandyan etkisi sonrası oluşan büyük tanelerin, mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıvı içindeki tanenin büyüklüğü ve türü alaşımının kompozisyona katılma oranına ve tane çekirdeklenme alanındaki konsantrasyon oluşumuna bağlı olmaktadır.

Katılma oranı artması ile tane yapısında küçülme olmaktadır. Fakat karmaşık döküm parçalarındaki katılma oranında değişiklik olabilmektedir. Sıvı metale tane inceltici takviye edilen hidrojen çekirdeklenme sonrası elde edilmiş dökümlerin, pratik olarak metal kalıba döküldükten sonra elde edilen ince tane yapısına daha iyi olmaktadır. Şekil 3'te tane incelticinin ilaveli ve ilavesiz olarak etkisi mikroskop görüntüsü verilmiştir (Kaufman, & Rooy, 2004).



Şekil 3: Tane incelticinin ilaveli ve ilavesiz Etkisi

a-) Mikroskoptaki tane inceltici ilavesiz görüntüsü b-) Mikroskoptaki tane inceltici ilaveli görüntüsü

Ergimiş sıvı alüminyumun alaşımların tane sayısını arttırmak, taneyi inceltmek için bazı elementler ilave edilmektedir. Bu elementlerin en başında Ti ve Ti-B ikili elementler, en çok kullanılan tane inceltici olarak bilinmektedir. Ti-B ikilisinin bileşimlerde güçlü bir çekirdeklenme ve tane inceltme etkisinin olduğundan, Al alaşımlarına ilavesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum içine Ti ilavesi ağırlıkça % 3 ile % 10 arasında ilave edilmektedir. Ti elementi alüminyum içinde 40 dk kadar etkili olup daha fazla bekletildiğinde inceltme etkisi kaybolmaktadır. Ti-B ikili alaşımın sıvı alüminyuma daha ince tane yapısı oluşturmaktadır. Ti-B ikili alaşımı ergitildikten sonra Al ilave edilmektedir Tablo 5'te alüminyum alaşımına tane inceltici için ilave edilen elementler verilmiştir (Kaufman, & Rooy, 2004; Öksüzoğlu, 2018)

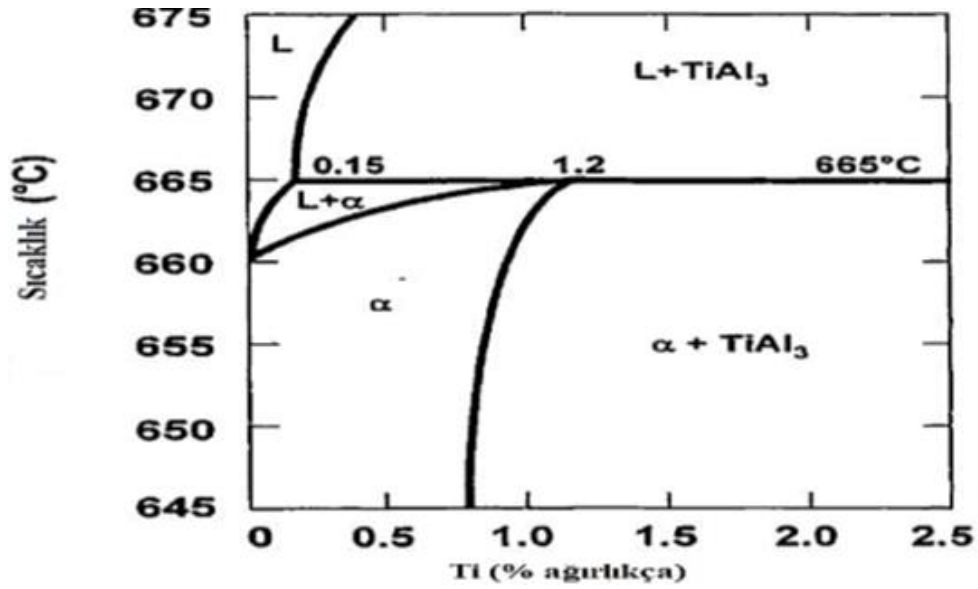
Tablo 5: Alüminyum Alaşımına Tane İnceltici İçin İlave Edilen Elementler

Tane İnceltici İlaveli Alaşımlar		
Al – Ti - B 5/1	Al % 5 Ti	% 1 B
Al – Ti - B 5/0,6	Al % 5 Ti	% 0,6 B
Al – Ti - B 5/0,2	Al % 5 Ti	% 0,2 B
Al – Ti - B 3/1	Al % 3 Ti	% 1 B
Al - Ti 6	Al % 6 Ti	
Al - Ti 10	Al % 10 Ti	

1.5.1 Titanyum İlavesi Tane İnceltme

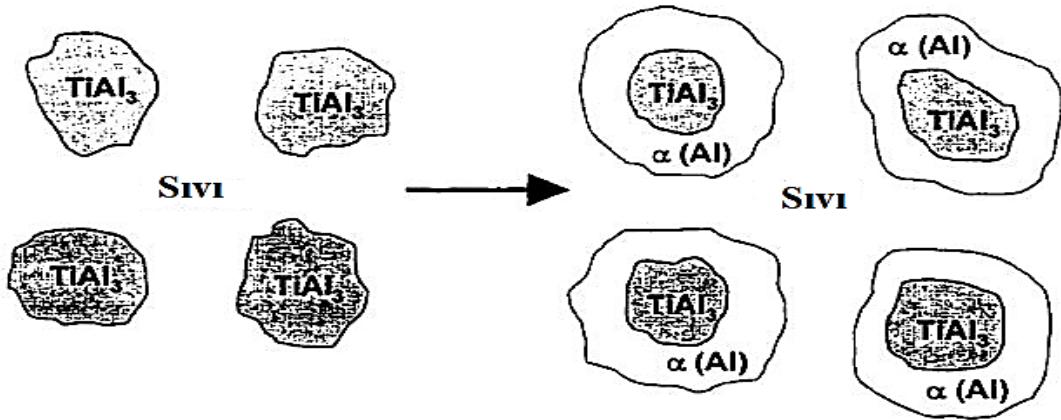
Alüminyum alaşımın titanyumun ilavesi tek başına tercih edilen bir yöntem olmamaktadır. Al alaşımına Ti ilavesi sonrası $TiAl_3$ faz ile çekirdekçik oluşumuna neden olmaktadır. Bu oluşum 700 °C sıcaklıklarda kısa bir süre içerisinde çözünüp yok olmaktadır. Al alaşımına Ti tek başına ilave edildiğinde Al metalinde kırılgan olmasına neden olmaktadır (Balasubramanian, Ramachandran, & Sharma, 2008).

Mondolful ve Crassley'inin Teorisi; Ti elementinin Al alaşımına tane incelticisi olarak alaşımlandırma yaptığı en önemli Peritektik Teorisi olmuştur. Şekil 4'de verilen denge diyagramında görüldüğü üzere Al ağırlık % 2 oranında olup Ti bileşimi 665 °C de peritektik reaksiyonuna neden olmaktadır (Balasubramanian, Ramachandran, & Sharma, 2008).



Şekil 4: Al-Ti Faz Diyagramının ve Ağırlık Oranı

Al metalde birincil α -Al'nin ilk kristallerinin oluşum nedeni ise Şekil 4'te gösterildiği gibi Ti (> % 0,15) ilavesi varsa $TiAl_3$ çekirdekcik sıvı metalde oluşmaktadır. Reaksiyon oluşması ekstra bir ilave olmadığı zaman, genelde peritektik sıcaklığın altında oluşmaktadır. Mondolful ve Crassley'inin Teorisi alüminyum tane inceltilmesi ve kimyasal denklemi Eşitlik 1'de verilmiştir (Balasubramanian, Ramachandran, & Sharma, 2008).



Şekil 5: Alüminyum Peritektik Teorisi α -Al 'Nin Çekirdeklenmesi

2.5.2 Titanyum ve Bor İkili ilavesinin Tane İnceltme

Al-Si ikili döküm alaşımına tane inceltici olarak Al-Ti-B ilavesi sonrasında sıvı çeliğe dahi iyi sonuç vermektedir. Burada Al-Ti-B ilavesi tane inceltici etkisi içerisindeki Ti elementinin miktarının neden olduğu bilinmektedir. Al-Ti ikili alaşımın birleşimlerinde yüksek oranda Si elementi ilavesi sonrasında tane inceltici etkisi daha yüksek olmaktadır. Si içerikli Al

döküm alaşımlarında Eşitlik 2’de verilen denkleme göre yeni Al-Ti-Si faz haline geçerek peritektik bir sistem haline dönüşmektedir (Balasubramanian, Ramachandran & Sharma 2008).



Al-Ti-B master alaşımları büyük avantajlara sahip olmaktadır. Sıvı Al alaşımlarının $TiAl_3$ oluşması esnasında çekirdekleyicinin önüne geçerek, TiB_2 ’nin oluşmasına sebep olur, bu durum da partiküllerin toplaşmasını ve tane büyümesini minimize etmektir. Çözünürlüğü yüksek olan mikroskoplarda $TiAl_3$ çekirdekleyicisinin büyüklüğü 30 ile 40 μm arasında görülmektedir. Çözünürlüğü düşük olan mikroskoplarda TiB_2 çekirdekleyicisinin büyüklüğü 1 ile 2 μm arasında görülmektedir. $TiAl_3$ ile TiB_2 iki farklı çekirdekleyicisinin boyutlarının farklı olması ve davranışlarının farklı olması nedeniyle daha çok çekirdeklenme teorisi ortaya çıkmaktadır (Balasubramanian, Ramachandran, & Sharma, 2008).

1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMININ ERGİTME VE KATILAŞMASI

Metal alaşımları gibi birçok malzemeler üretim aşamasında, ergime oluşarak kalıplara döküldükten sonra katılaştırılarak üretim yapılmaktadır. Bu işlemlere metal, seramik, polimerler de dâhil edilmektedir. Ergime işlemleri yapıldıktan sonra katılma ısısının altında sıvı metalde katılma oluşmaktadır. Bu parçalara katılaştıktan sonra ısı işlem ve mekanik işlemler uygulanabilmektedir. Sıvı metal katılaştıktan sonra ortaya çıkan yapı mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca istenilen yapıları elde etmek için başka işlemler yapılabilmektedir. Örneğin, ısı işlem gibi bu uygulama ile tane boyutunu kontrol altında tutulabilmektedir. Dökümler yapıldıktan sonra soğutma işlemi sırasında oluşan birincil kristalleşmenin (katılma) iyi araştırılması gerekmektedir. Ergimiş metali, soğuma başladıktan sonra katılma sırasında oluşan yapı birincil içyapısı (katılma içyapısı) ismini almıştır. Katılma olduktan sonra birincil içyapı parçanın kullanım ömrü boyunca hiç değişmeyecektir. Bunun için döküm yapıldıktan sonra katılma oluşmasını iyi bir şekilde kontrol edilmelidir (Aran, 1999).

Metal atomlarının oluşturdukları kristal kafes içindeki 0 °C Kelvin sıcaklığında hareketsiz olmaktadır. Metali sıcaklığının arttırılmasıyla kafes içindeki oldukları yerde artan oranla salınım olmaya başlamaktadır. Daha sonra atomların birbirine yaklaşarak kuvvetli bir itme oluşturmaktadır. Kafes sisteminin genişlemesi salınımların ve atomların uzaklığındaki denge durumundan kaynaklanmaktadır. Isının arttırılmasının sonrasında hareket enerjisi oluşturarak sıcaklığa ve hacimsel büyümeye neden olmaktadır (Aran, 1999).

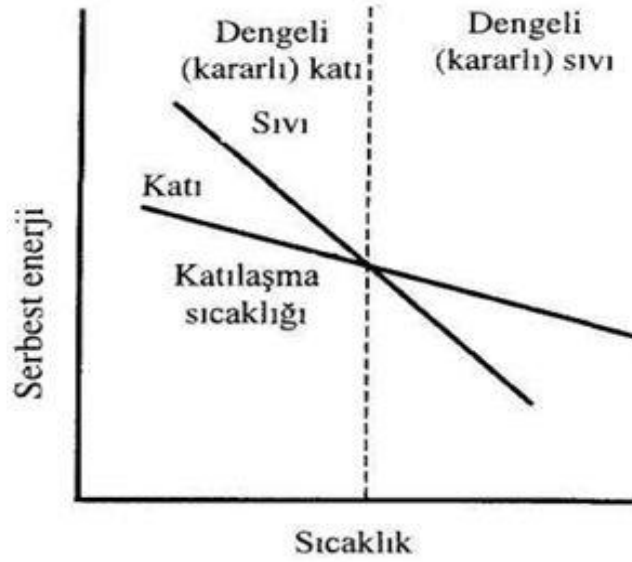
Alüminyum alaşımların ergime sıcaklığına 660 °C ulaşması ile metalin ısısında yükselme olmadan biraz durmaktadır. Ergime oluşması sonrasında atomların, düzenli kafes yapılarının

bozulmasından dolayı kafes yapısı düzensiz atomların neden olmaktadır. Bundan dolayı salınım değişerek belirgin olmayan atomların hareket ettiği görülmektedir. Katı metalin ergime yapılabilmesi için harcanan ısıya metalin ergime ısısı olarak adlandırılmaktadır. Bu ısının, parçanın içindeki sıcaklığını yükseltmediği için gizli (dönüşüm) ısı olarak adlandırılmaktadır. Özgül hacim oluşumunu sıcaklığa bağlı olarak incelersek, eriyen metalin hacminde şiddetli bir genleşme oluşmaktadır. Metalin ergime ve katılaşma sırasında, ısı (zaman ve sıcaklık) eğrisinde duraklamalar görülmektedir. Sıvı metalde katılaşma olurken ergime tam tersi davranış göstermektedir. Katılaşma sonrasında atomların bozulan kafes yapıları ve salınımları yeniden düzenli kafes yapısına ve salınımına dönüşmektedir. Burada oluşan dönüşüm ısısı katılaşma ısı olarak adlandırılmaktadır (Aran, 1999).

Katılaşmanın oluşması, çekirdekçik adını almış en ufak olan taneler ile başlamaktadır. Tanelerin büyümesi veya küçülmesi çekirdeklerin etrafında oluşmaktadır. Ergimiş metalin içinde var olan veya isteyerek daha sonra ilave edilen yabancı atom molekülleri çekirdekçik olarak oluşabilmektedir. Örnek sıvı oluşurken kendisinin Al_2O_3 film yapının oluşması veya daha sonra ilave edilen Ti-Si ve Cu elementleri çekirdek görevini üstlenmektedirler. Saf Al alaşımların sıvılarında bile çekirdekçik oluşmaktadır. Kristal kafes yapısının oluşumunda, soğuma sırasında katılaşma oluşurken atomların hareketine bağlı kalmaktadır. Soğumanın yavaş olması sonrasında atomlar bir araya gelerek kafes yapısını oluşturmaktadır. İnklizyon (Kirlatici) atomları soğuma sırasında kafes yapısının içinde bir araya gelerek birbirlerini iterek tane yapısını oluşturmaktadırlar. İnklizyonun varlığından dolayı oluşan çekirdekçik yapısında düzensiz atom yapısı meydana gelmektedir (Aran, 1999).

1.6.1. Çekirdeklenmenin Oluşması

Çekirdeklenme oluşmasında katılaşma sırasındaki soğumanın etkisi büyük olmaktadır. Sıvının soğumadaki atomların düzeni, kısa mesafeli düzeni, uzun mesafe düzeni veya kristal yapıya kadar değişmektedir. Katılaşmada çekirdeklenme ve büyüme olarak iki aşamada oluşur. Katının çekirdeklenmesi, minimum kritik çapına gelerek en küçük katı atomların sıvıda embriyolaşması sonrası oluşmaktadır. Katının büyümesi, sıvıdaki atomların ısı verilmesi sonrası çekirdeklenmeye geçerek katının büyümesine neden olmaktadır. Büyüme katı oluşumuna kadar devam etmektedir (Erdogan, & Smith, 2001).

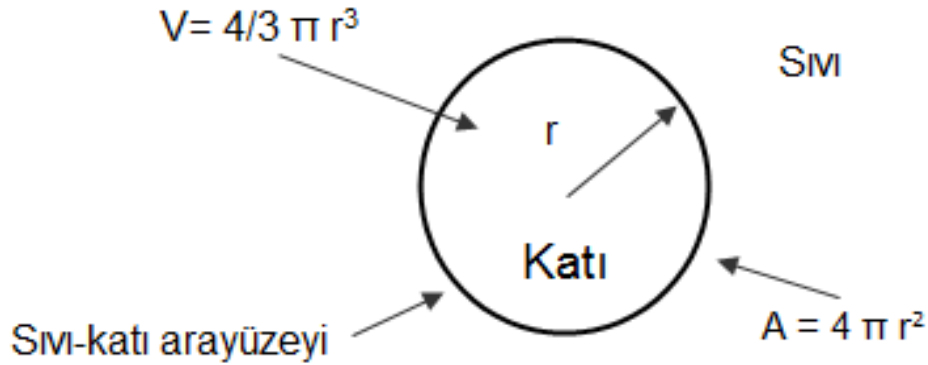


Şekil 6: Saf Al Alaşımının Serbest Enerjisinin Sıcaklık Katılaşma Durumu

Ergimiş bir metalin katılaşma sıcaklığının altına kadar soğutulduğunda malzemede katılaşma oluşmaktadır. Sıvı metaldeki sıcaklık katılaşma sıcaklığının altına geldiği zaman katıda oluşan kristal yapı daha kararlı hale gelerek katılaşma meydana gelmektedir. Şekil 6’da saf Al alaşımının serbest enerjisinin sıcaklık katılaşma durumu gösterilmiştir. Serbest enerji hacmi oluşumu ise sıvı katı sıvı arasındaki enerjiden kaynaklanmaktadır (Erdogan, & Smith, 2001).

Şekil 7’de verilen sıvı-katı arayüzeyindeki $A = 4 \pi r^2$ embriyonun yüzey alan olduğunu göstermektedir. $V = 4/3 \pi r^3$ yarıçapı r olan küresel embriyonun hacmi verilmiştir. σ serbest yüzey enerjisi verilmiştir. F_v negatif değişen hacim serbest enerjisi verilmiştir (Erdogan, & Smith, 2001).

$$\Delta F = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta F_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad (3)$$

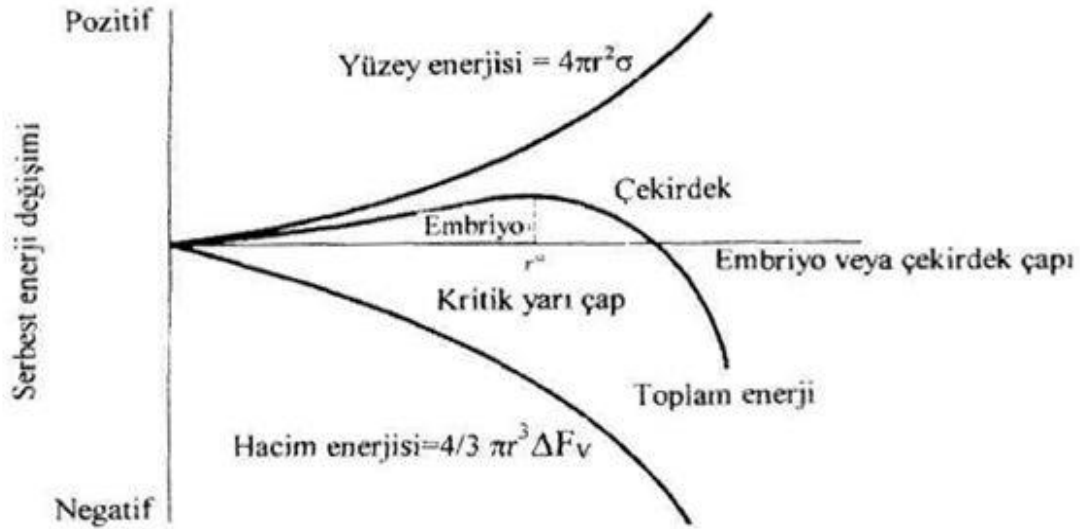


Şekil 7: Sıvı-Katı Arayüzeyin Oluşturduğu Parçacıklar

Şekil 7’de görüldüğü gibi, sıvı ile katı oluşumunda bir ara yüzey var olduğu görülmüştür. Bu ara yüzey ile serbest enerjinin birleştiği görülmektedir. Yüzey serbest enerjisini artırmak için geniş yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. Embriyo oluşması için sıvı metal katı sıcaklığına kadar

soğutulduğunda atomlar sıvı içindeki kümeleşme meydana gelene kadar bir bölge oluşturmaktadır. Embriyo oluşan bu bölgeye verilen adlandırma değildir. Embriyonun yüzey serbest enerjisinde artma görülürken, hacimsel serbest enerjisinde azalmalar olmaktadır. Eşitlik 3'te toplama serbest enerjinin formülü verilmiştir (Erdogan, & Smith, 2001).

Embriyonun büyük veya küçük olması serbest enerjinin hareketine bağlıdır. En küçük embriyolar serbest enerjinin büyümesine sebep olabilmektedir. Şekil 8'de embriyonun ve serbest enerji katı-sıvıdaki boyutundaki hareketleri gösterilmiştir.



Şekil 8: Embriyonun Serbest Enerjisindeki Katı-Sıvı Boyutu İle Değişimi

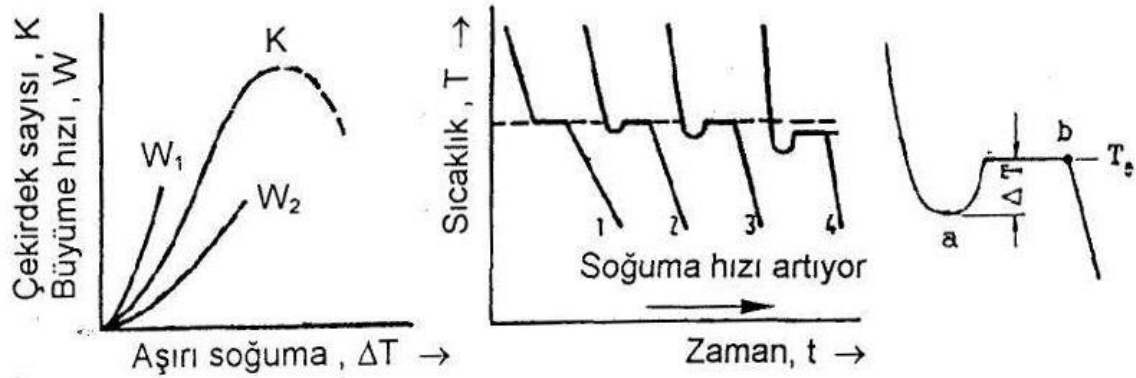
Metal yüzeyin sıvı kalması sonrasında embriyoların erimesi ile yüzey serbest enerjisinde azalma olmaktadır. Serbest enerji, metal sıvı halden katıya dönüştüğünde ve sonraki katılaşma altındaki sıcaklığa verilen adlandırılır. Burada çekirdeklenme oluşması olmaz ve metalde büyüme oluşmaz. Embriyonun çekirdek yarıçapını (r^*) olarak gösterilmektedir. Embriyonun çapı arttığında oluşan toplam enerjide azalmaktadır. Buradaki yapının kararlı bir çekirdeklenme sonrasında katı oluşmaktadır. Çekirdeklenme oluşması ile parçanın büyümesi başlamaktadır. Burada atomların katı hale dönüşmesi için kümeleştiğinde, katının çapı kritik çaptan büyümesi sonrası, toplam enerjisinin üzerine çıkarak maksimum noktaya ulaşmaktadır. Şekil 8'de embriyonun serbest enerjisindeki katı-sıvı boyutu ile değişimi gösterilmektedir (Erdogan, & Smith, 2001).

1.6.2. Homojen Çekirdeklenme Oluşumu

Homojen çekirdeklenme, metali katılaşma sıcaklığının altında soğutulduğunda atomların kümeleşmesi sonrasında embriyonun kritik boyunu geçmesiyle oluşan homojen

çekirdeklenmeye verilen adlandırmadır. Metal sıvısının içinde homojen çekirdeklenmesinin oluşumunu sağlayan katı birleşiklere örnek; karbür, oksit, nitrür ve diğer katılar olmaktadır.

Homojen çekirdek oluşumundaki ΔT 'yi iyi soğutmalıdır. Sıvı metal katılaşma sonrasında T_e ergime sıcaklığının altına düştüğü için $T = T_e - \Delta T$ meydana gelmektedir. Sıcaklığın aşırı soğuması sonrasında ΔT artmaktadır. Bunun yanında K oluşan çekirdek sayısını da artırmaktadır. Şekil 9'da görüldüğü gibi sıcaklığın azalması sonrası atom hareketlerinin güçleştiği görülür ve K değerinde düşmeye neden olmaktadır (Aran, 1999).



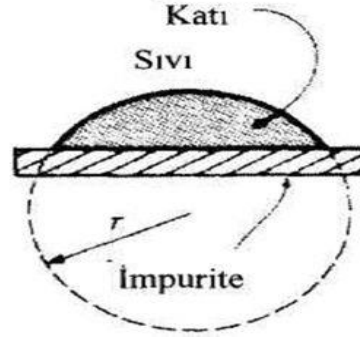
Şekil 9: Çekirdek Sayısı (K), Büyüme Hızı (W) ve Aşırı Soğumu (ΔT) Birim Zamandaki Oluşumu

a) Aşırı soğumanın (ΔT), birim zamanda oluşan çekirdek sayısı (K) ve büyüme hızına (W) etkisi b) Metallerde soğuma hızının birim zamandaki çekirdeklenmenin sıcaklığa etkisi (Aran, 1999).

Sıvı metal dökümlerinde aşırı (hızlı) soğumanın kontrolünü sağlayarak, içyapıdaki tanelerin büyüklüklerini istenilen boyutlara getirilebilir. Bir kokil kalıba döküm yapıldıktan sonra sıvı metal aşırı soğutulduğunda çekirdek sayısında artma gözlenmektedir. Aynı kokil kalıba soğuma hızı daha yavaş olduğunda ise çekirdek sayısında azalma gözlenmektedir. Aynı kalıp parçasının iki farklı soğuma hızına bağlı olarak farklı oranlarda çekirdeklenme sayısı oluşmaktadır (Aran, 1999).

1.6.3. Heterojen Çekirdeklenme Oluşumu

Sıvı metalin ısıtılması sonrasında malzemede heterojen çekirdeklenme oluşmaktadır. Bu ısıtılma sonrasında sıvı metal ile birlikte katılaşma olmaktadır. Kararlı bir çekirdeklenmenin oluşması için, daha düşük homojen çekirdeklenme olması gerekmektedir. Bu durum yüzey enerjisine ve homojen çekirdeklenmenin düşük olmasına neden olmaktadır (Aran, 1999).



Şekil 10: Heterojen Çekirdeklenme Oluşumundaki Kritik Yarıçapı

Heterojen çekirdeklenme oluşumunda açığa çıkan yüzey enerjisi düşük olmuştur. Çekirdeklenmenin kararlı olması için, kritik yarıçap ile toplam serbest enerjisinin düşük olması gerekmektedir. Bu yüzden daha düşük alt soğumaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı-katı arasında oluşan yüzey alanının kritik yarıçaptan büyük olan kavis yarıçapına ulaşmasına neden olmaktadır. Şekil 10'da heterojen çekirdeklenme oluşumundaki kritik yarıçapı verilmiştir. Kavis yarıçapı ise; sıvıyı katılaştırmak için birkaç atomun beraber kümeleşmesi sonrasında oluşmaktadır. Çekirdeklenmenin kolay oluşabilmesi için, atomlar kritik boylara geldiğinde sıvı alüminyum soğuma hızı daha yavaş soğuma sağlayarak, çekirdeklenmenin oluşumu daha kolay olmaktadır. Heterojen çekirdeklenme oluşumu ise; impürütelerin üzerindeki oluşan çekirdeklenmelerdir. Birçok metalde katılaşma sırasında heterojen çekirdeklenme oluşmaktadır. Heterojen çekirdeklenme kristalinin oluşumunda yabancı yüzeyler için örnek verecek olursak;

- Dökümlerde kullanılan kokil kalıbın yan duvarları. Yani sıvının katılaşma sırasında duvarların ıslak olması
- Metallerin ergime sıcaklığının üzerine çıkarak burada oluşan birleşikler ve ergime sıcaklığının altında olan katılaşmamış olan birleşiklerdir. Örnek: Karbür, oksit ve nitrür birleşikleridir.
- Benzer veya benzer olmayan, yabancı çekirdeklerin sıvı metale ilave edilmesi ile sonrasında katılaşmasıyla oluşmasıdır (Aran, 1999; Erdogan, & Smith, 2001).

1.7. ALÜMİNYUM DÖKÜM KALİTESİNİN ETKİLERİ

Alüminyum döküm kalitesine etki eden birtakım oluşumlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu oluşumlar tüm döküm alaşımların kalitesine etki etmektedir. Böylece alüminyum döküm alaşımlarının kalitesinde etkilemektedir. Bu oluşum birtakım gazlardan ve inklüzyonlardan meydana gelmektedir. Bunlar Al alaşımların sıvı metal kalitesi etkilediği gibi katılaşma sonrasında parçanın mekanik özelliklerini de etkilemektedir (Campbell, 2003).

Sıvı alüminyum alaşımının kalitesine etki eden en önemlilerinden biri inklüzyon olarak bilinmektedir. İnkilizyon sıvı metale çok etki etmektedir. İnküzyon oluşumu ise; sıvı metal içerisindeki ergime derecesi farklı metaller veya metal dışı elementler olmaktadır.

Al döküm kalitesine etki eden hatalara neden olanlar gazlar ve inklüzyonlardır. Bunlar ise;

- Gazların oluşması
- Hidrojen gaz oluşması
- Sıvı metale hidrojen girişi oluşumlar
- İnküzyon oluşması
- Oksit filmi tabakası oluşması
- Gözeneklilik oluşması (Campbell, 2003).

1.7.1. Gazların Oluşması

Sıvı alüminyum içinde, ergime esnasında birtakım gazlar oluşmaktadır. Bu gazları sıvı metalden uzaklaştırılmaz ise, döküm sonrasında parçanın özelliğini etkileyerek hatalar meydana gelmektedir. Gazlı olan sıvı alüminyumun kokil kalıba döküm sonrasında mekaniksel ve fiziksel özelliğini etkilediği görülmektedir. Ayrıca alüminyum metalin sünekliğini ve yorulma dayanımını etkileyerek malzemenin daha erken yorulmasına neden olmaktadır.

Sıvı metalin oluşmasındaki önemli gazların sınıflandırılması;

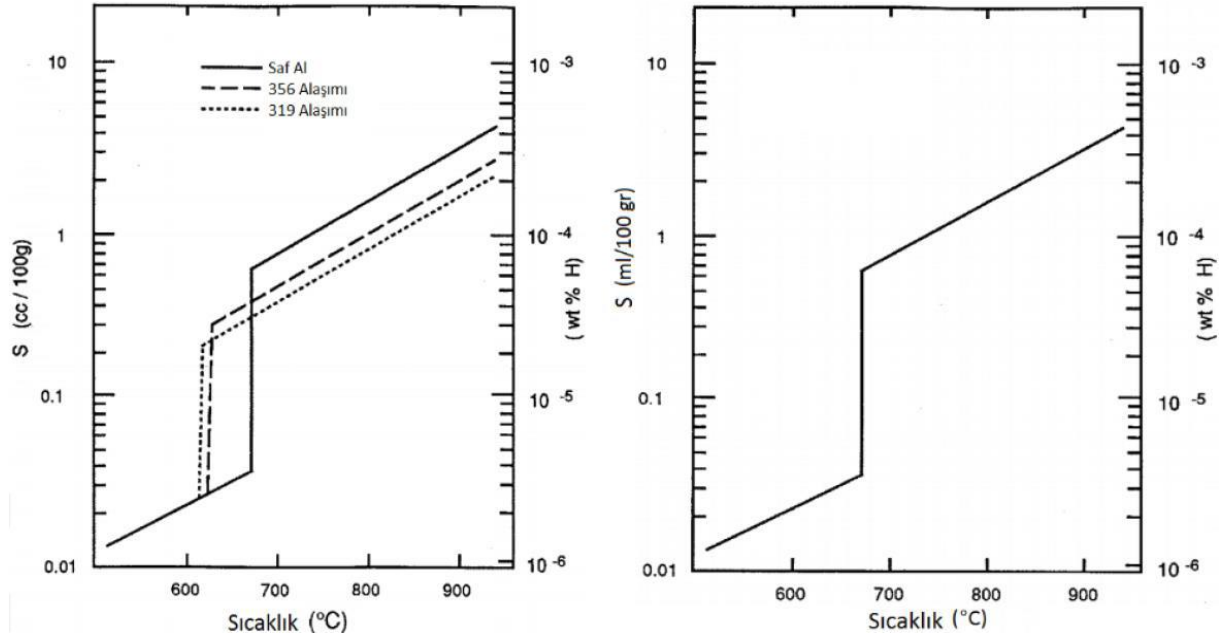
- Tek atomlu gazlar ise; Ar ve He tepkimez gazlardır
- Çift atomlu gazlar ise; O₂, N₂ ve H₂ basit gazlardır
- Karmaşık gazlar ise; NH₃, CO, CO₂, H₂S, H₂O, SO₂,

Alüminyum sıvı metal içindeki tek atomlu olan gazların çözünmeleri oluşmamaktadır. Sebebi ise tepkime olmadığından sıvı çözünme yapmamaktadır. Çift atomlu olan gazlar Al sıvı metal içindeki çözünme yapmaktadır. Bunun nedeni basit atom olduğundan ve hidrojen çözünürlüğü olduğundan çözünme yapmaktadır. Katılaşmış olan parçaların hidrojen çözünürlüğü az olmaktadır. Karmaşık olan gazlar ise, döküm işlemi sırasında ve sonrasında tepkimeye girerek oluşan gazlardır (Campbell, 2003).

1.7.2. Hidrojen Gazı Oluşması

Sıvı alüminyum döküm alaşımının içindeki hidrojen gazı çözünebilir tek gaz olarak bilinmektedir. Döküm sıvısının içindeki hidrojen gazının ölçümü yapılabilmektedir. Bu ölçümler sonrasında ise katı metalin içerisindeki hidrojen varlığı hakkında bilgi vermektedir. Bu gazın istenilenden fazla olduğundan sıvı metalden atılması gerekebilmektedir (Gruzleski, & Closset, 1990)

Sıvı alüminyumun içindeki hidrojen varlığının en temel sebebi sıcaklıktır. Sıcaklık yükselmesi ile orantılı olarak, sıvı içindeki farklı alaşımlarında hidrojen yükselmektedir. Şekil 11’de Saf Al, A356 ve A319 alaşımlarının sıvı metalin sıcaklığa bağlı olarak hidrojen çözünürlüğü ve katılaştırılması verilmiştir. Sıvı Al alaşımın katılaşıma olurken soğuma olurken bununla birlikte hidrojenin çözünürlüğünde düşmektedir. Buna bağlı olarak katı malzemenin içinde boşluklar (gözenek) oluşmaktadır. Sıvı metal alaşımın döküm yapılınca kadar hidrojen gazının kontrolünü yaparak gözenek oluşumu engellemiş olmaktadır (Gruzleski, & Closset, 1990).



Şekil 11: Saf Al, A356 ve A319 Alaşımlarının Sıvı Metalin Sıcaklığa Bağlı Olarak Hidrojen Çözünürlüğü.

1.7.3. Sıvı Metale Hidrojen Girişi Oluşumlar

Sıvı alüminyum metale hidrojen girişi oluşumu ise; havada oluşan nemi indirgemesi sonrasında oluşmaktadır. Sıvı alüminyum alaşımın dökümlerden önce oksijenle olan afinetisinin oluşması sonrasında nemi indirgenmesi sonrasında hidrojen girişi oluşmaktadır. Sıvı alüminyum alaşımın içine hidrojen miktarı ise alaşım elementlerinin farklılığına ve miktarına bağlı olmuştur. İndirgenme oluşumun Eşitlik 4’de verilmiştir (Dispinar, 2006).



Sıvı alüminyum alaşımda çözünmüş hidrojen atomların geneli reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonrasında yüzeyindeki su buharının ayrışmasından sonrası sıvı metale gelmektedir. Genel olarak dökümde ergitme yapmak için kullanılan ekipmanlar kalıp veya pota olarak bilinmektedir. Hem metal ve hem de havadan gelen nem ile birlikte alüminyum içine nüfuz ederek hidrojen girişi oluşmaktadır. Yüksek ergime sıcaklıklarında sıvı metal transfer

edilmektedir. Daha sonra ortamdaki nem ile nüfuz ederek hidrojen ayrıışmaktadır (Dai, Morita, Ma, Ren, Wei, & Yu, 2014).

Sıvı metalde atom yapısı küçük olan hidrojenin, eriyik metal içinde daha hızlı yayılmaktadır. Dökümü yapılan parçanın katılaşması oluşurken sıvı metal içerisinde hapsolmuş hidrojen atomları vardır. Buna bağlı olarak atom sayısı kadar döküm parçasında gözenekler oluşmaktadır.

1.7.4. İnküzyon Oluşması

Sıvı alüminyum içerisindeki inküzyon oluşumu iki şekilde meydana gelmektedir. Bunlar dışsal inküzyonlar ve içsel inküzyonlar olarak bilinmektedir. Dışsal inküzyon; aşınma ve fırın malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Bu malzemelere ise; refrakter malzemeleri, Si oksit, Al oksit ve Si karbürlerden inküzyon oluşmaktadır. İçsel inküzyon; sıvı alüminyumun hazırlama aşamasındaki kimyasallardan kaynaklanmaktadır. Bu kimyasallar ise; bilinçli bir şekilde sıvı metali temizlemek için atılan flaks ilavesi sonrasında ve tane inceltme için ilave alaşımların bulunması nedeniyle oluşmaktadır (Güler, 2017).

Sıvı alüminyum alaşımının içinde çeşitli inküzyonlar oluşmaktadır. Örnek verecek olursak Al_2O_3 - MgO gibi oksit oluşumları, SrO - Al_2O_3 , MgO - Al_2O_3 gibi spinel oluşumları, TiB_2 - VB_2 - ZrB_2 gibi borür oluşumları, Al_3C_4 - TiC gibi karbür oluşumları $MnAl_3$ - $FeAl_3$ - $AlSiFeMn$ fazları gibi intermetalik oluşumları ve AlN gibi nitrür oluşumlarıdır. Oluşan bu inküzyonlar yüksek ısılarda sıvı kalıntılar olarak örneklendirme yapılabilmektedir. Tablo 6’da bazı inküzyonların sınıflandırılması, birleşik türleri ve potansiyel kaynakların hakkında özet bilgi bulunmaktadır (Kaufman, & Rooy, 2004).

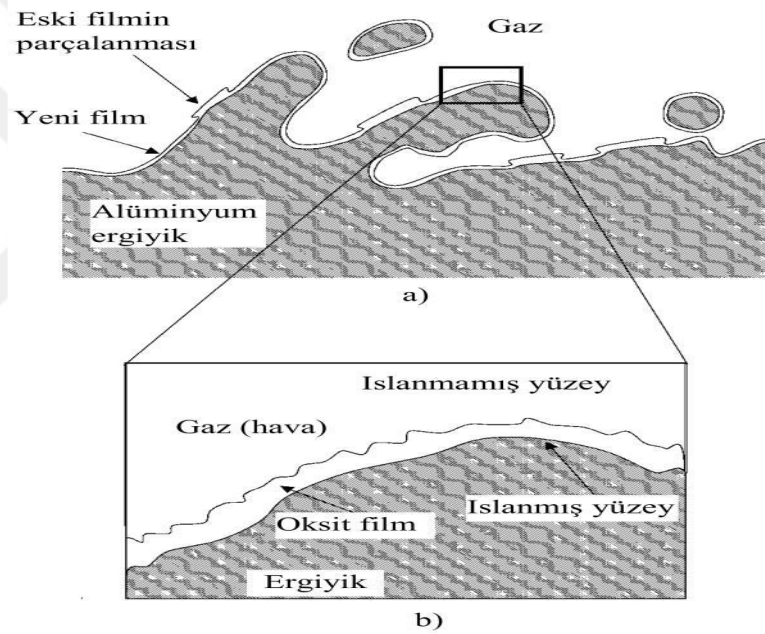
Tablo 6 : İnküzyonların Sınıflandırılması, Bileşik Türleri ve Potansiyel Kaynakları

Sınıflandırma	Birleşik Türler	Potansiyel Kaynakları
Metalik olmayan dış etkenli	Çeşitli refrakter partikülleri, Al_4C_3 vb.	Refrakter degradasyonu, refrakter/metal reaksiyonları
Metalik olmayan	MgO, Al_2O_3 film ve kümeleri $MgAl_2O_4$ film ve kümeleri	ergitme, alaşımlama, metal transferi sırasında oluşan türbülans
Flaks tuzları	$MgCl_2, NaCl, CaCl_2$ vb.	Flaks tuzlarının reaksiyonu sonucu zayıf ayrıştırma, klor gazıyla oluşan tuz, magnezyum ihtiva eden alaşımlar, filtre

1.7.5. Oksit Filmi Tabakası Oluşması

Alüminyum alaşımların sıvı metaldeki en önemi sorunlardan bir tanesi oksit filmin (inküzyon) oluşmasıdır. İnküzyon alüminyum alaşımının sıvı oluşması için yüksek ısı verilerek

ergitilmesi yapılmasından kaynaklı oksijene karşı afinitesinden kaynaklanmaktadır. Sıvı alüminyum oksijenle reaksiyon oluşturarak sıvının yüzeyde oksit film tabakasını oluşturmaktadır. Oksit film tabakası sıvı metalin üstünde oluşarak atmosferden gelebilecek yabancı gazları koruması için oluşan bir tabaka olarak adlandırılmaktadır. Bu oksit film tabakasında gazlar olduğu için sıvı metalin içine girdiğinde sıvı metalde istenmeyen gazlar olabilmektedir. Alüminyum oksit film tabakası ergime esnasında meydana gelmektedir. Sıvı metalin döküm esnasında da bu tabaka oluşabilmektedir. Oksit film tabakası iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bunlar eski oksit film tabakası ve yeni oksit film tabakası olmaktadır. Eski oksit film tabakası ise, sıvı metalin ergime esnasında oluşan tabaka görüntüsüdür. Yeni oksit film tabakası ise, sıvı metali olduktan sonra eski oksit film tabakası temizlenip döküm yapılırken tekrardan oluşan tabaka görüntüsüdür. Şekil 3'te resimde alüminyum alaşımın sıvı metal yüzeyinde oluşan oksit film tabaka görünümü verilmiştir (Divandari, & Campbell, 2004).



Şekil 12: Sıvı Al Metal Yüzeyinde Oluşan Oksit Film Tabaka Görüntüsü

a) Sıvı Al metal yüzeyinde oluşan oksit filmi tabakasının görüntüsüdür. Döküm yapılırken tekrardan oluşan tabakasını (aniden yeniden olur) göstermektedir.

b) Sıvı Al metalin hava veya gaz ara yüzeyde karşılaştığında oluşan oksit filmin tabaka göstermektedir (Yüksel, 2016).

Bu oksit tabakasını temizlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan rotary (döner tip) gaz yöntemidir. Sıvı metal içine azot gazı ilave edilmesi ile sıvı metalin döndürerek istenmeyen gazları sıvı metal içinden atmosfere atılmasını sağlamaktır. Bu yöntem oksit film tabakasını ve sıvı metal temizlemek için en çok kullanılan yöntem olmaktadır.

1.7.6. Gözeneklilik Oluşması

Gözeneklilik oluşması diğer metallerin dökümünde olduğu gibi alüminyum alaşımın dökümünde oluşan önemli bir kusur olmaktadır. Al alaşımında gözenek oluşmasında, katılaştıran parçanın mekanik özellikleri (çekme, eğme) korozyona karşı direnci zayıflamasına neden olmaktadır. Dökümlerdeki gözenekliliğin oluşması katılaşma sırasında istenmeyen gazların sıvı metal içinde kalarak veya katılaşma esnasında fazla hacimsel büzülmenin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Hacimsel büzülme interaktif bölgelerden beslenme olmamasındandır. İnteraktif bölge ise; çekme boşluklarının olduğu bölgeler olmuştur. Gözeneklilik oluşması çekirdeklenme oluşumunu etkilemektedir. Yani gözeneklilik oluşmasının çekirdeklenme oluşum adımlarından meydana geldiği gözlemlenmiştir (Meek, Han, Xu, & Jian, 2004). Hidrojen gazı, Al alaşımının dökümlerinde en çok gözeneklilik oluşumuna etki eden gazlardan bir tanesi olmuştur. Ayrıca azot gazı sıvı Al alaşımın içinde büyük ölçüde çözünmektedir. Oluştan bu gaz döküm parçalarının kalitesini etkilemektedir. Gaz giderme yöntemiyle hidrojen gazını yani gözenek oluşumunu sıvı metal içinden yok edilebilmektedir (Beech, & Tiwari, 1978).

Al alaşımının mekanik özelliklerini etkileyen faktörleri üç grupta inceleyebiliriz. Bunlar, çözünmüş hidrojen gazının oluşması, metalik olmayan oksitler kalıntıları ve diğer bazı safsız olan elementlerdir. Örnek olarak Cl ile Fe verilebilir. Sıvı metal içinde metal olmayan oksitler ve hidrojen, alüminyumun mikroyapısına ve mekanik özelliğine büyük etkiye neden olmaktadır. Ayrıca sıvı metalin kalıba dökülmesini, akışkanlığını kaybetmesine ve küçük gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Katılaşmış metallerde çeşitli kusurlara neden olmaktadır. Bunlar, çatlak oluşmasına veya mikro gözenek oluşmasına neden olmakta ve metalde sert noktalar oluşmaktadır. Bu nedenlerden dolayı katı metalin işlenebilir olmasında, yüzey düzgün olmasında ve dökümlerin mekanik özelliklerinde (tokluk ile yorulma dayanımının) kötü sonuçlar alınmaktadır (Beech, & Tiwari, 1978).

1.8. ALÜMİNYUMA İLAVE EDİLEN ALAŞIM ELEMENTLERİ

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri iki grupta incelenmektedir. Birinci grup, sıvı metal alaşıma ıslah edilenler olarak yani alaşımlandırma sırasında oluşturulmuş gruptur. İkinci grup, sıvı metal alaşımın özelliklerini daha fazla ıslah edilmesi neticesinde daha fazla sıcaklığın artırılmasıdır. Sıvı alüminyuma ilave olarak bakır, silisyum, çinko ve magnezyum metalleri alaşımlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu metalleri sıvı alüminyumun içine uygun miktarda ilave edilmesi sonrasında katılaştıran metal malzemede mukavemetin artırılmasının yanı sıra sertliğini arttırdığı ve sürekliliğini azalttığı görülmektedir. Sıvı alüminyum alaşımına birçok yöntemle dökümler yapılmaktadır. Bunlar, kokik kalıplara, kum kalıplara, basınçlı

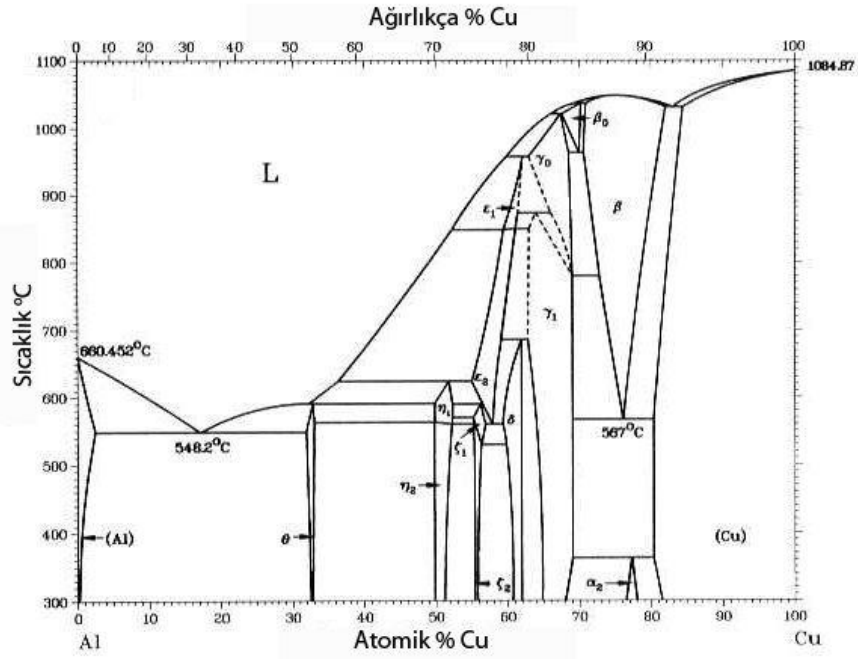
kalıplara ve püskürtme yöntemi ile dökümler yapılmaktadır. Yalnız kum kalıplara döküm yüzeyleri pürüzlü olurken, kokil kalıplara döküm yüzeyleri düz ve boyut toleransı daha az olmaktadır. Bu sebepten kokil kalıplara dökümlerin işleme ve şekillendirilmedeki maliyeti daha az çıkmaktadır (Inampudi, Jinugu, & Yajjala, 2020).

1.8.1. Al - Cu İkili Faz Alaşımları

Alüminyum alaşımına en eski ilave elementi bakır olarak bilinmektedir. Alüminyuma ilave olarak ilk kullanıldığı yıllarda % 8 Cu miktarı içeren Al-Cu ikili alaşımı olarak kullanılmaktaydı. Bu şekilde Al dökümleri Cu ilavesi sonrasında akışkanlığının zor olsa da uzun yıllar kullanılmaktadır. İlerleyen yıllarda bakırın miktarı % 6,5 düşürülmesi ile bakırın miktarı % 1,5 civarına olmuştur. Buna ek olarak Al alaşım metaline silisyum ilave edilmektedir. Bu silisyum ilavesi ile sıvı metalin akışkanlığını artırarak kolay dökülebilir hale gelmektedir. Katılaşmış metale ısıtılarak işlem uygulayarak, metallerin daha fazla sertleşmesine neden olarak daha yoğun kullanım alanına sahip olmaktadır (Inampudi, Jinugu, & Yajjala, 2020).

Bakır, alaşımlara sertlik kazandıran başlıca alaşım elementidir ve % 3-12 oranında kullanılmaktadır. Bu parçalara ısıtılarak işlem uygulanmış veya uygulanmamış olması halinde, malzemenin kopma mukavemetinde dahi artma göstermektedir. Dövme Al alaşımlarına % 3-5 arasında ilave edilmektedir. Alaşıma % 5'in üstünde ilave edilirse mekanik sertliğinin yükselmesine işleme güçlüğüne neden olmaktadır. Diğer bir etkisi elektrik iletkenliği ile birlikte korozyona karşı direncinin düşmesine neden olmaktadır (Metals Handbook, 1989).

Bakırın çözünürlüğü 25 °C (oda sıcaklığı) % 0,5 olmakta, daha sonra 548 °C'ye çıkarıldığında ise % 5,65 çözünürlüğü yükselmektedir. Oluşan çözünürlük sınırlarında alüminyum katı eriyik yaparak bakır % 54 oranında olduğunda kimyasal bileşik olarak CuAl_2 (Bakır-alüminat)'yapmaktadır (Çolak, 2015). Şekil 13'te Al-Cu İkili Faz Denge Diyagramı görünümü verilmiştir (Metals Handbook, 1989)



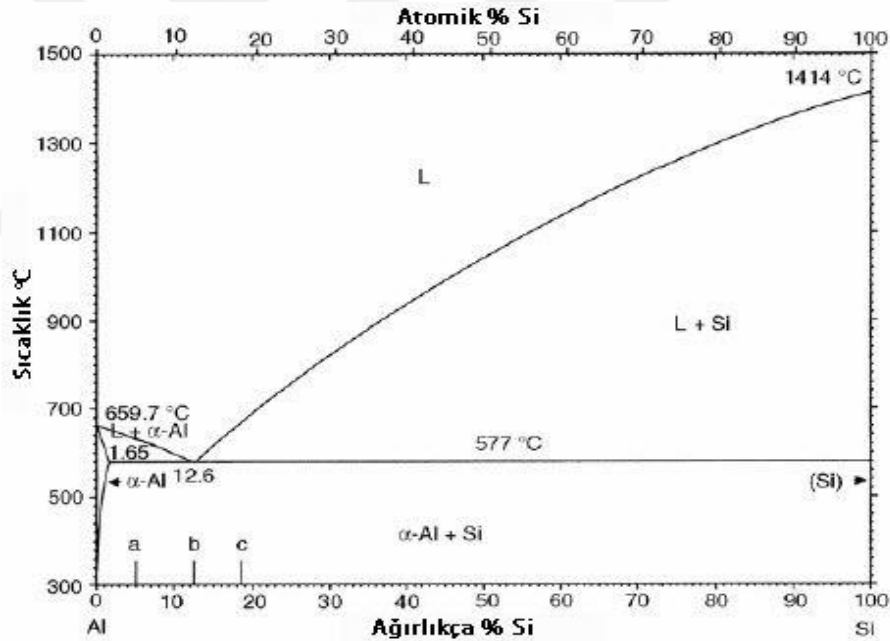
Şekil 13: Al-Cu İkili Faz Denge Diyagramı

Alüminyumun içine % 4,7 Cu elementinin ilave edilerek ve daha sonra % 0,3 Mg elementini ilave ederek bunlara ek olarak da az miktarda gümüş ilavesi sonrasında yaşlanma sertleşmesini arttırdığı görülmektedir. Al Döküm alaşımının içine % 10 Cu kullanılabilir. Bunun üzerine çıkıldığında malzemede sertleşerek gevrek yapı oluşmaktadır. Katılaşmış Al alaşımının metalin içinde sırası ile % 10 Cu ve % 12 Cu olduğunda, metallerin çekme mukavemetlerinin sırası ile 9,1 kg/mm² ve 14 kg/mm² oluşmaktadır. Alüminyum içinde bakırın çözünürlüğü artan sıcaklıkla birlikte artarak, çökeltme sertleşmesine neden olmaktadır. Çökeltme sertleşmesi için gerekli olan zaman, alaşımın birleşimine ve sıcaklığına bağlı olmaktadır. Çökeltme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına etki etmektedir (Çolak, 2015).

Yarı kararlı B fazını oluşturmak için hızlı su vermesi sonrasında oluşmaktadır. Oluşan bu faz bakır şeklinde CuAl₂ olarak kalmakta, bu fazlı metaller kırılgan olmakta ve çok sert bileşik oluşturmaktadır. Metallerin gevrekleşmesine yol açtığı için, döküm tekniği bakımından ötektik birleşimine yakın olması gerekli olmaktadır. Bundan dolayı Al - Cu ikili alaşımlarının gerçek hayatta kullanılması sınırlı kalmaktadır. Bakır Ötektik sıcaklığının altında alüminyum kafesindeki çözünürlüğü azalmakta ve çökeltme sertleşmesi için gerekli ön koşulu sağlamış olmaktadır. Dayanım artışını sağlayan çökeltme sertleşmesi uygulanması için, malzemeye gevrekleştirme olmadan uygulanmalıdır. Mg ilavesi ile çökeltmesi hız kazanmaktadır. Çökeltme bittikten sonraki Al - Cu ikili alaşımlarının korozyon dayanımı az olmaktadır (Çolak, 2015).

1.8.2. Al-Si İkili Faz Alaşımları

Sıvı alüminyum alaşımına silisyum ilavesi ile sıvı metal akışkanlığı artmaktadır. Daha sonra sıvı metale Cu, Ni ve Mg gibi farklı fazlar ilave edilmektedir. Oluşan alaşım katılaştırıldığında ise metalde yaşlanma ile sertleştirilebilir alaşım oluşmaktadır. Karıştırılan bu alaşımlar düşük çekme mukavemetlere sahip olmaktadır. Takriben 13,6 ila 15,4 kg/mm² arasında değişmektedir. Katılaştırılmış metalde mukavemet artışı içindeki silisyum oranına bağlı kalmaktadır. Alüminyuma silisyum ilavesi etkisi ise, akışkanlık ve kaynaklanma olabilmektedir. Tane küçültme ile modifikasyon işlemleri yapılarak katı metallerin de işlenebilmesi sağlanarak daha sonrasında sıcak yırtılmalar oluşmaktadır. Silisyum ilaveli fazın şekli ve dağılımına bağlı olarak mekanik özelliklerde etkili olmaktadır. Küçük ve yuvarlak primer (ötektik) fazı yüksek mukavemet ve süneklik oluşmaktadır. İğnemi yapıli silisyum fazlı metal çekme mukavemetinde artırma yaparak, süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürmektedir. Şekil 14’de Al - Si ikili faz denge diyagramı görünümü verilmiştir (Metals Handbook 1989; Inampudi, Jinugu, & Yajjala, 2020).



Şekil 14: Al - Si İkili Fazın Denge Diyagramı

1.8.3. Al - Ti İkili Faz Alaşımları

Alüminyum alaşıma titanyum ilavesi sonrasında mikroyapıda tane küçülme olmaktadır. Bu mikroyapı sonrasında Al alaşımının mekanik özelliklerinde artma olmaktadır. Bunlar çekme mukavemetini ve sünekliği artırırken, ısı iletkenliğinin düşmesine neden olmaktadır. Döküm yapılacak sıvının içinde % 0,05 ila % 0,02 arasında ilave edilmesi istenmektedir. Alüminyum içinde en fazla % 20 olabilmektedir. Titanyumu ile birlikte kullanıldığı zaman Al alaşımında en iyi etkiyi vermektedir (Çolak, 2015).

1.9. NİYOBYUM

Niobyum (Nb [Kr]4d45s1) şeklinde sembolü olarak gösterilmektedir. Niobyum adının verilmesi ise Yunan mitolojisinde Tantalusun kızının “Niobe” adından gelmektedir. Niobium elementi ilk defa 18 yy. ilk yıllarında İngiliz kimyacısı Charles Hatchett tarafından keşfedilmiş daha sonra kolombiyum ismi verilmiştir. Ayrıca 1864 yılında Blomstrand tarafından ilk defa metal olarak keşfedilmiştir. Klorür yapısında olan niobyum elementini hidrojen ortamında ısıtarak redüklenmesinden sonra oluşturulmaktadır. 1949 yılında milletlerarası kimya anlaşmasına göre, “The International Union of Pur and Applied Chemistry” tarafından kolombiyum ismini niobyum ve sembol olarak da Nb kabul edilmiştir (Metals Handbook, 1990; Ferro, & Saccone, 2008).

Niobyum elementi niobit (kolombit), niobit-tantalit, paraklor ve öksenit içerisinde bulunmaktadır. Önemli minerali ise piroklor ($\text{NaCaNb}_2\text{O}_6\text{F}$) ve çeşitli metalik oranları ile kolumbit-tantalit serisi olmaktadır. Niobyum büyük miktarlarda bulunması karbonatitler olarak (karbon-silikat kayaları) ve paraklorürler halinde, tantalyumla birlikte bulunmaktadır. Daha sonra çeşitli yollarla üretilmektedir. (Metals Handbook, 1990).

1.10. NİYOBYUM KULLANIM ALANLARI

Niobyum ilaveli alaşımlar genel kullanım alanı olarak mermilerin yatağında, roketin içindeki radyasyon eteklerinde, uçak motor içlerinde, motorsuz uçan araçlarda (uzaydan atmosfere geçişindeki glide araçlarında) rehberlik edici yapılarda kullanılmaktadır. Niobyum önemli olarak, yüksek sıcaklık uygulama yapılan yerlerde, alüminid veya silisit kaplamalarında kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1990).

Nb alaşımları mukavemet ve sertlik alaşım olarak üç ana grupta kullanım alanlarında kullanılmaktadır. Bunlar ise,

1. Orta derecede mukavemetli alaşımlar nükleer uygulamalar için kullanılmaktır.
2. Yüksek mukavemetli alaşımlar uzay uygulamalarında kullanılmaktadır.
3. Süper iletken alaşımlar elektronik uygulamalarında kullanılmaktadır (Metals Handbook, 1990).

1.11. NİYOBYUM ÖZELLİKLERİ

Niobyum elementi parlak, yumuşak ve sünek bir malzeme özelliğine sahip elementtir. Rengi gri veya gümüşü beyaz şeklindedir. On iki tane radyoaktif izotopu ve on iki izotopun atom ağırlığına sahip olmaktadır. Ayrıca niobyum yüksek sıcaklıklarda, oksijen, karbon, halojen, azot, kükürt ve diğer ametaller ile birlikte reaksiyona girmektedir. Süper iletken özelliği sergilemektedir. Çözünümü ise, nitrik ve hidroflorik asit karışması sonrası

oluşmaktadır. Niyobyumun en önemli özelliği tane inceltici ve karbür yapıcı etkiye sahip olmaktadır. Metallerde akma sınırının yükselmesi ile birlikte sertliğin artmasını sağlamaktadır. Niyobyum sert ve cilalı olmakta birlikte dövülebilir bir metal olmaktadır (Metals Handbook 1990; Ferro, & Saccone, 2008).

Niyobyum elementin 200 °C’de havada oksitlenmeye başlamaktadır. Bu sıcaklığın üzerinde çalışacak olunursa koruyucu atmosfer gerekmektedir. Kullanım alanları olarak ise; kaynak ark elektrotların yapımında, havacılık ve uzay sanayisinde çok fazla kullanılmaktadır. Tablo 7’de niyobyum elementi özellikleri ve değerleri verilmiştir (Metals Handbook, 1990).

Tablo 7: Niyobyum Elementin Özellikleri ve Değerleri

Niyobyum Özellikleri	Niyobyum Değerleri
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 ila 101 akb
Yoğunluğu	8,4 g/cm ³
Erime Noktası	2468 °C
Kaynama Noktası	3410 °C
Elastik Modülü, Gpa	103
Kaynama Noktası	4927 °C

1.11.1. Niyobyum Elementin Mekanik Özellikleri

Niyobyum elementi iyi bir mekanik özelliğe sahip olmaktadır. İşlenebilmesi, tavlatabilmesi gibi mekanik özellikleri olduğu için Nb elementi çok yönlü bir malzeme haline gelmiştir (Metals Handbook, 1990). 300 °C ile 500 °C arasında metalin nispeten düşük sıcaklıkta veya soğuk şekil değiştirmeden sonra süneklik ile birlikte dayanımının arttırdığı oluşum özelliği göstermektedir. Katı metallerde düşük yoğunluğun yanı sıra düşük termal nötron özelliği göstererek, atom reaktörlerinde kullanımı için öngörülebilir. 200 °C ve altındaki sıcaklıklarda birçok gazlar dirençli olmaktadır. 350 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda gazlarda oksitlenme olmaktadır. 300 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda N ile reaksiyona girmektedir. 250 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda hidrojen kırılabilirliği hassasiyeti oluşmaktadır. Florür ve HF gazları oda sıcaklığında reaksiyona girmektedir. Yüksek sıcaklıklarda oksijenle reaksiyona girerek afinitesi yükselmektedir. Oluşan oksit metali yalıtkan yapmaktadır. Alaşımsız niyobyum elementi ise; ergimiş Ca, Na, K, Ca, Li, Ce, Bi ve Pb 1000 °C üzerinde olduğunda dirençli olduğu görülmektedir (Metals Handbook, 1990).

Niyobyum elementi 2468°C- 3410 °C gibi çok yüksek ergime nokta sıcaklığına sahip olmaktadır. Yüksek sıcaklığa (1000 °C’nin üstü) ulaştığında, metallerde mükemmel bir

mukavemet sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklar sonrasında katılaşılan metallerde çekme mukavemetinin iki katı artışı görülmektedir. Ayrıca çok yüksek korozyon direncine sahip olmaktadır. Aşınmaya dayanıklı mükemmel özelliğinin oluşması nedeniyle aşınmaya (abrasiv) direnç göstermektedir. Yüksek ergime sıcaklığı ve düşük termal genleşme özelliğinin oluşması nedeniyle yüksek termal şok direnci görülmektedir. İyi bir elektrik ve iyi bir ısı iletim özellikleri göstermektedir (Metals Handbook, 1990).

1.11.2. Niyobyum Elementin Fiziksel Özellikleri

Niyobyum elementin fiziksel özelliği olarak yapısı HMK kristal yapısı ve W-tipi yapısına sahip olmaktadır. Nb elementin ayrıca yüksek sıcaklık ile birlikte, yüksek basınçta polimorfozların olmadığı tespit edilmiştir. Bu metal nispeten yumuşak olması ile birlikte sünek özelliğine sahip olmaktadır. Katı metalde olan impürütelerin genellikle mukavemet artmasına ve gevrek oluşmasına neden olmaktadır (Ferro, & Saccone, 2008).

1.11.3. Niyobyum Elementin Kimyasal Özellikleri

Niyobyum elementleri 4. grup elementlerindeki özelliğine benzerlik göstermektedir. Gruptaki elementler yüksek sıcaklığa geldiğinde sitokiyometrik olmadığı için, interstisyel türevlerde oluşmuştur. Bundan dolayı Nb metal olmayan elementlerle reaksiyona girme göstermektedir. Bu malzemeler genel olarak yüzeylerinde oluşmuş olan oksit film tabakası nedeniyle korozyona karşı mukavemetli oluşmuştur (Ferro, & Saccone, 2008).

Niyobyum elementi diğer reaktif metal elementlerinde de olduğu gibi korozyona neden olan ortamlarda, metalin korozyona dayanma sırasında yüzeyinde pasif film tabakası oluşmaktadır. Niyobyumun korozyona karşı dayanımda tantalya'ya benzemektedir. Yalnız yüksek konsantrasyona sahip asidik minaraller ihtiva ederek, etkili ortamlarda tantala göre daha az dayanmaktadır (Pazarlı, 2006).

İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar yöntem kısmında anlatılacaktır. Deneylerde Etial 177 muadili A356 alüminyum alaşımına değişen oranlarda Nb elementi ilavesiyle kokil kalıba dökümler yapılmıştır. Döküm çalışmalarında A356 alaşımını ilavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb ilaveli dökümler gerçekleştirilmiştir. Dökümlerde değişen oranlarda Nb ilavesinin etkisinin belirlenmesi için, test numunelere ilk olarak vakum altında katılaştırma test kalıbı (RPT), K-mold kalıbı, mekanik test kalıbı, değişen kesit kalınlığına sahip 4 kanallı akıcılık kalıbı, spiral akıcılık kalıbı, ördek ayağı kalıbı ve basamak testi kalıbı kullanılmıştır. Döküm sonrası RPT ve K-mold numunelerden sıvı metal kalitesi testleri, 4 kanallı akıcılık ve spiral akıcılık numunelerinden sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümleri, basamak kalıbından mikro yapı incelemeleri, mekanik test kalıbından çekme ve sertlik testleri, ördek ayağı kalıbı numunelerinden beslenebilirlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE HAZIRLIK ÇALIŞMALARI

Döküm deneylerinde farklı oranlarda Nb ilavesinin döküm özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda 200 °C ön ısıtma sıcaklığı uygulanmış kokil kalıplara dökümler yapılmıştır. Alaşım döküm sıcaklığı 700 °C olarak belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Nb ilave oranı, yapılan literatür araştırmalarına bağlı olarak etkisi ve ticari kullanılabilirlik şartlarına göre belirlenmiştir. Parametreleri ve kullanılan kalıplar verilmiştir.

Tablo 8: Döküm Parametreleri ve Kullanılan Kalıplar

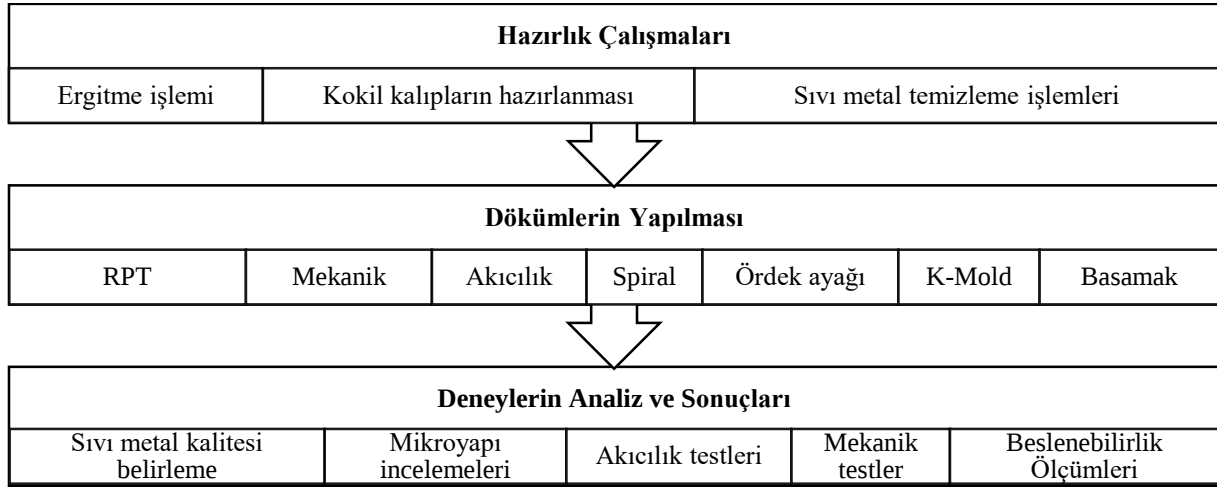
Alaşım	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp sıcaklığı (°C)	RPT kalıbı	Mekanik Test kalıbı	4 kanallı Akıcılık kalıbı	Spiral Akıcılık kalıbı	Ördek Ayağı Kalıbı	K-Mold Kalıbı	Basamak Kalıbı
İlavesiz	700	200	*	*	*	*	*	*	*
%0,03	700	200	*	*	*	*	*	*	*
%0,06	700	200	*	*	*	*	*	*	*
%0,1	700	200	*	*	*	*	*	*	*

Dökümler sıvı metal temizliği yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Deneylerde A356 alaşımı ve Nb ilavesi için kullanılan master alaşımına ait kimyasal bileşim içerikleri Tablo 9’da A356 alaşımının ve Nb elementin kimyasal analizlerin sonuçları verilmiştir (% Ağı.) (Eti Alüminyum, 2023).

Tablo 9: A356 Alaşımının ve Nb Elementin Kimyasal Analizleri.

Alaşım	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Nb	B	Al
A356	0,20	6,60-7,40	0,02	0,03	0,03-0,45	0,04	0,02	0,08-0,14	-	-	Kalan
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	0,5	96,0

Tez kapsamında malzeme temini sonrası hazırlık işlemleri gerçekleştirilmiş, sonrasında kokil kalıplara dökümler yapılmış ve inceleme aşamasına geçilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ve işlem basamakları Şekil 15’te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 15: Deneysel Çalışmalar İşlem Sürecinin Şematik Gösterimi.

2.2. ERGİTME İŞLEMİ

Ergitme işlemi, Şekil 16’da verilen çan tipi 8 kg sıvı alüminyum ergitme kapasitesine sahip olan ve 10 kW gücünde elektrik direnç ocağı içinde bulunan SiC potada gerçekleştirilmiştir.

Şekil 16’daki elektrik direnç ocağı, K tipi termokupl ve elektronik kontaktör termostat donanımı sayesinde ocak sıcaklığı kontrol altına alınabilmektedir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü yüksek termal izolasyon özelliğine sahip olan dökme astar malzemeleri ile üretilmiştir. Ocağın üstünde azotla sıvı metal temizleme işleminin yapılabilmesi için orta kısmında grafit lansın girebileceği boşluk bulunmaktadır.

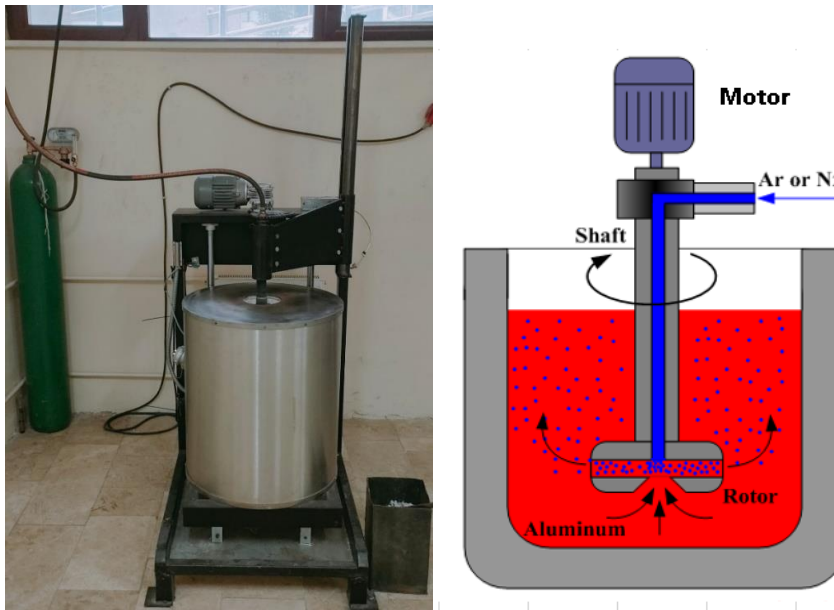


Şekil 16: Çan Tipi Ocağın Ergitme İşlemin Yapılması

Ergitme işlemleri için ilk olarak birincil A356 külçe ocak içerisinde 5 kg yüklenmiştir. Ergitme yapıldıktan sonrası deney şartlarına göre ve deney parametrelerine uygun olarak Nb ilavesi yapıldı. Alaşıma Nb ilavesi için AlNbB3,5/0,5 master alaşımı kullanılmıştır. Ergitme ve alaşım elementi ilavesi sonrası sıvı metal temizleme işlemine tabi tutulduktan sonra sıvı metal 700 °C sıcaklıkta döküm işlemlerine geçilmiştir. Döküm işleminde ilk olarak ocak yüzeyinde cüruf tabakası sıyırma yöntemi ile temizlenmiş sonrasında ilk olarak kepçe yardımıyla ocaktan alınan sıvı metal RPT test numunesi dökümü yapılmıştır. Akabinde pota çift kol yardımıyla kaldırılarak kokil kalıplara dökümler yapılmıştır.

2.3. SIVI METAL TEMİZLİĞİ İŞLEMLERİ

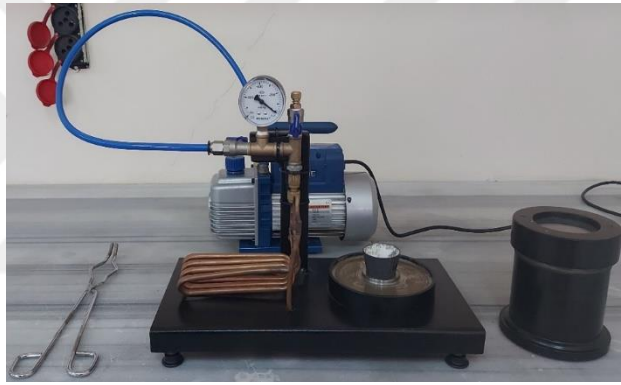
Sıvı metal temizliği, döküm alaşımında döküm kalitesini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir. Bu yöntemlerin içerisinde gaz alma tableti kullanımı ve sıvı azot ile temizleme işlemi yaygın kullanım bulmaktadır. Temizleme işlemi ergitilmiş sıvı metal içerisine çözünmüş halde bulunan hidrojen gazlarını gidermek için, azot gazı ile yıkama işlemi sürecini kapsamaktadır. Tez çalışmasında sıvı metalin temizleme işlemi Şekil 3'teki gibi döner tip şaft kolun sıvı metal içine daldırılarak, azot gazının sıvı içinde çok sayıda küçük gaz baloncuklar oluşturulması prensibiyle gerçekleştirilmiştir. Lans özel tasarlanmış olup başlık bölgesinde dönme etkisi sonrası oluşan girdap sayesinde azot gazı sıvı metalin her tarafına dağılmaktadır. Azot gazının etkisinden oluşan kabarcıklar sıvı metal içindeki inklüzyonlar flotasyon mantığı ile ergiyik metalin yüzeyine çıkartılır ve metal içerisinde çözünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine difüze edilmesi sonrasında baloncuklarla beraber ergiyik metalden atmosfere atılmaktadır.



Şekil 17: a) Sıvı Metal Gaz Giderme İşlemi, b) Pota İçerisinde Gaz Giderme Süreci Şematik Görüntüsü

Şekil 17’de resimde görüldüğü gibi kabarcıkların oluşmasıyla sıvı içerisinde baloncukların taşıyıcı görevini görmesi için çok sayıda kaynağı meydana çıkarmaktadır. Gazın ortamdan atmosfere atılma süresi uzun olması durumunda, kabarcıkların sıvı içinde daha fazla artacağı tahmin edilmektedir. Bunun için gaz giderme süresinin tespit edilmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bunun içinde gaz giderme işlemi belirli bir süre yapıldıktan sonra durumu kontrol altına alınmakta ve daha fazla sürelerde yapıldığında, enerji ve malzeme kayıplarının oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle literatürdeki araştırmalar esas alınarak yapılan ön deneme ile sıvı metal temizleme işlemi gaz debisi ve çark hızı sabitlenmiş olup 300 rpm hızla ve 5 lt/dk süresi boyunca gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kokil kalıplara dökümler yapılmadan önce ilk olarak azot gazı ile temizleme yapılmasının ardından sıvı metalin gazlılık durumunu test etmek için RPT (Düşürülmüş Basınç Testi-Reduced Pressure Test) numunesine döküm yapılmaktadır. Şekil 18’de RPT cihazın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 18: Azaltılmış Basınç Test (RPT) Cihazı

RPT testin döküm parçası olarak yaklaşık 90 ila 110 gram ağırlığında bir sıvı metalin, kroze içinde RPT test cihazın oluşturduğu basınç 80 mbar olarak sıvı metal tamamen katılaşma olana kadar bekletilmektedir. Katılaşma olduktan sonra test numunesi kalıplardan çıkartılıp yoğunluğunun ölçümleri yapılmaktadır. Daha sonra RPT numunelerindeki kesit yüzey incelemeleri yapmak için numuneler ortadan dikey olarak kesilerek incelemesi yapılmaktadır.

2.4. KALIPLARIN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM ÇALIŞMALARI

Döküm kalıpların hazır olduktan sonra kokil kalıplarda katılaşan numunelerin kolaylıkla ve zarar uğramadan çıkartılması gerekmektedir. Bunun aksi gerçekleşmesi halinde, kalıptan çıkarılmak istenirken dökümde katılaşan parçaya uygulanacak darbeler sonrası hem kalıba hem de elde edilen döküm parçasına darbeden zarar görebilmektedir. Döküm sıvı alüminyum metalin katılaşma olurken, kalıba yapışmadan kalıbın ve istenilen şeklini almasını sağlamak için kokil kalıplara ön ısıtma işleminin yapılması gerekmektedir. En önemlisi kokil

kalıpların yüzeyinde oluşan nemin atılmasını sağlamak ve sıvı metalin kalıp içerisinde ilerleyebilmesi için bu işlem yapılmaktadır. Kokil metal kalıpların ısıtmanın yapılması Şekil 19'da görüldüğü gibi 40 cm x 60 cm ebatına sahip olup, 50 °C'den 300 °C'ye kadar kalıpları ısıtabilen Elektromag M 4060 marka ısıtıcı tablası ile ısıtılması yapılmaktadır. Döküm yapılmadan önce kokil kalıplar ısıtıcı tabla ile 250 °C'ye kadar ısıtılmış, daha sonra kalıpların tabladan alınıp döküm yapılınca kadar geçen sürede sıcaklığın 200 °C'ye düştüğü ölçülmüş olup, döküme hazır hale geldiği tespit edilmiştir. Şekil 19'da tabla üzerinde kalıpların ısıtılması verilmiştir.



Şekil 19: Isıtıcı Tabla ve Kalıpların Isıtılmasına Ait Örnek Bir Görüntü.

Tez kapsamında kokil kalıplara yapılan dökümler için sıvı metal sıcaklığı 700 °C'de ve kalıpların sıcaklığı ise 200 °C olacak şekilde belirlenmiştir. Dökümler çekme, 4 kanallı akıcılık, spiral, ördek ayağı, K-Mold ve basamak kalıplarına gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kalıplar açılarak test numuneleri çıkarılmıştır. Şekil 20'de sıvı metalin kokil kalıplara dökümü ve elde edilen numunelerin görüntüsü verilmiştir



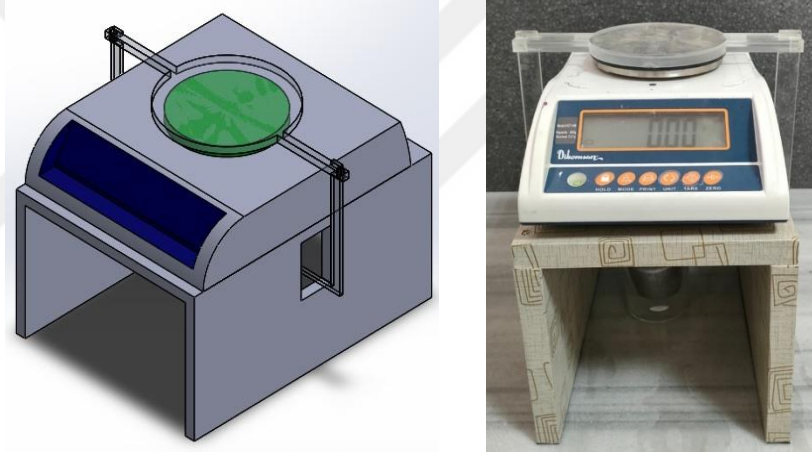
Şekil 20: Sıvı Metalin Kokil Kalıplara Dökümü ve Elde Edilen Numuneler

2.5. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ

Döküm sonrası katılaşma ve soğuma gerçekleştirildikten sonra kalıplar açılarak deney numuneleri alınmıştır. Deneylerde RPT, K-mold, dört kollu akıcılık kalıbı, spiral akıcılık kalıbı, ördek ayağı kalıbı, basamak kalıbı ve mekanik test numuneleri elde edilmiştir. Döküm numuneler ilk olarak makro incelemeye tabi tutulmuş ve fotoğrafları çekilmiştir. Akabinde her bir kalıptan elde edilen numuneler için farklı inceleme yöntemleri uygulanmıştır.

2.5.1. RPT Numunelerinin İncelenmesi

RPT test cihazında katılaştıran test numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılması Arşimet prensibine göre gerçekleştirilmektedir. Bu prensibe göre her bir test numunesinin ilk önce havadaki ağırlıkları ölçümü yapılmıştır. Daha sonra sıcaklığı 20 °C olan saf suda ölçümü ağırlık ölçümü yapılmış ve saf su yoğunluğu $d_s = 0,99821 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Tartım yapılan cihaz Şekil 21’de resimde gösterilen 0,02 gr hassasiyete sahip olan, elektronik teraziye kurulumu yapılan arşimet düzeneği ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21: Yoğunluk Ölçüm Test Cihazı

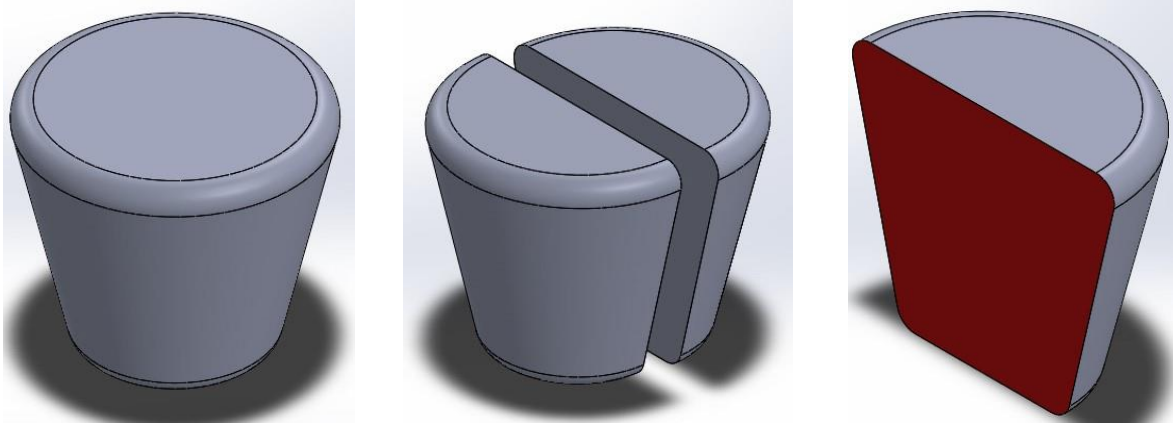
Elde edilen ağırlık ölçüm sonuçları eşitlik 5’te verilen formüle göre hesaplamaları yapılmıştır. d_n = döküm test numunenin yoğunluğunu, m_h = döküm test numunenin havadaki ağırlığını, m_s = döküm test numunenin saf sudaki ağırlığını, d_s = döküm test numunesinin oda sıcaklığındaki suyun yoğunluğunu ifade etmektedir. Numunelere ait % gözenek değerleri ise Eşitlik 5’deki formül kullanılarak hesaplamaları yapılmaktadır.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times d_s \quad (5)$$

Ayrıca numunelerin içerisinde bulunan gözenek miktarı da Eşitlik 6’de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözenek} = [(Teorikyoğ. - Deneyselyoğ.) / Teorikyoğ.] \times 100 \quad (6)$$

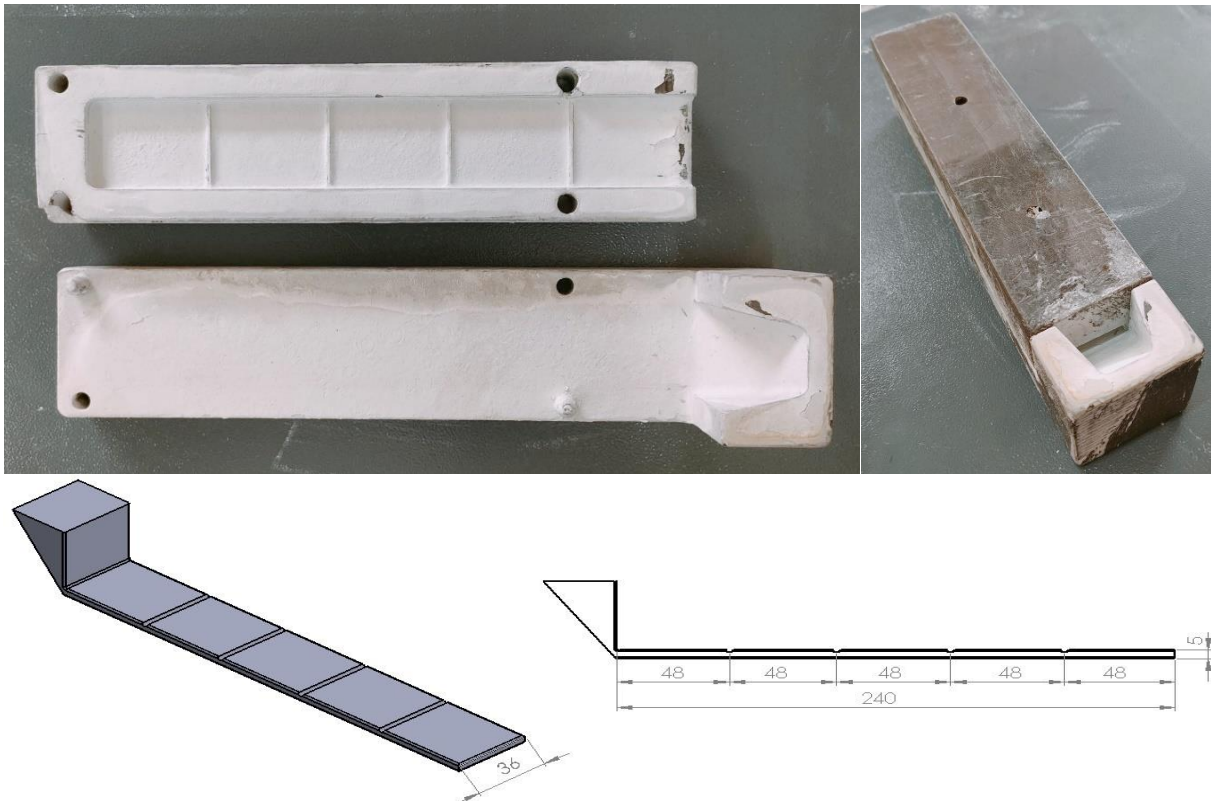
Ayrıca RPT numunelerindeki gözenekleri görmek için numune Şekil 22’de gösterildiği gibi dikey olarak ortadan ikiye kesilmiştir. Kesilen yüzeyler zımparalama işlemine tabi tutulup, tarayıcıda görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 22: RPT Numunelerinin Dikey Olarak Kesilmesi

2.5.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi

Şekil 23’te gösterilen K-mold kokil kalıbında sıvı metalin katılaşma sonrası temizlik miktarı tespiti yapılmaktadır. K-mold test kokil kalıpların dökümlerinde ağırlık olarak takriben 400 g sıvı metal kalıba dökülmektedir. K-mold kalıplarından 240 mm x 36 mm x 6 mm boyutlarına ve kalınlığına sahip olup ve beş eşit parça test numunelerinin üretimleri yapılmıştır. Sıvı metal katılaşma tamamladıktan sonra kesitler kırılarak yüzeylerdeki oksit kalıntısı (kirlilik) kaç adet oldukları sayılması ile tespiti yapılmıştır.



Şekil 23: K- Mold Test Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri

K-Mold sıvı metal temizliği değeri eşitlik 7’de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

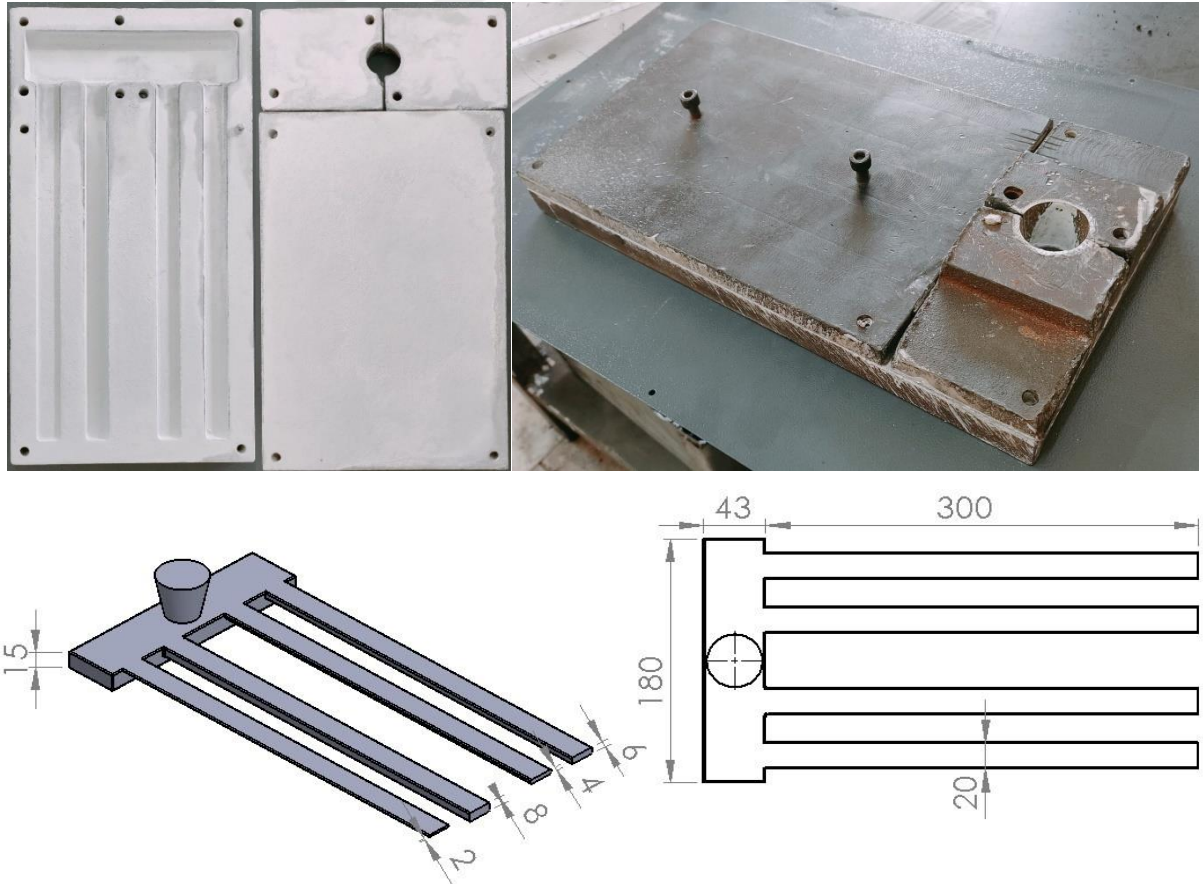
$$K = S \setminus N \quad (7)$$

Bu değer, sıvı metal temizliğinin değerlendirilmesi için test parçalarını görsel olarak yüzeyini inceledikten sonra, yüzeydeki inklüzyonların sayısıdır.

Eşitlikteki K; kırık yüzeydeki bir numunenin bir parçasında bulunan inklüzyonların sayıları, S; küçük probun n parçasında bulunan toplam kapanım sayıları, N; incelenen örnek sayısını göstermektedir.

2.5.3. Dört Kollu Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi

Alüminyum alaşımların akıcılık özelliklerinin belirlemesini yapmak için farklı kesit kalınlıklarına sahip, sıvı metalin ilerleme mesafesini ölçebilecek şartlarda kokil kalıba model tasarlanmıştır. Bu nedenle akıcılık için kullanılacak kokil kalıbı görüntüsü ve ölçüleri şekil 24’te verilmiştir. Sıvı metal ilerleme uzunluğu, tüm kanallarda sıvı metalin tam olarak yürümenin ilerlememesi için bilinçli olarak 300 mm olacak şekilde gereğinden uzun tutulmuştur. Böylece sıvı metalin ilerleme mesafesinin ölçülebilmesi amaçlanmıştır. Kalıpta kesit kalınlıklarının farklı olması nedeniyle ilgili döküm şartlarında hangi kalınlıkta dökümler yapılabileceği tespit edilecektir.



Şekil 24: 4 Kollu Akıcılık Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri

Dökümler sonrası değişen kesitlerde sıvı metal ilerleme mesafesi Şekil 25'te görüldüğü gibi ölçülerek belirlenmiştir. Ayrıca kesitlerin en uç kısımlarından alına numunelerden mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 25: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerin Numunesinin Ölçülmesi

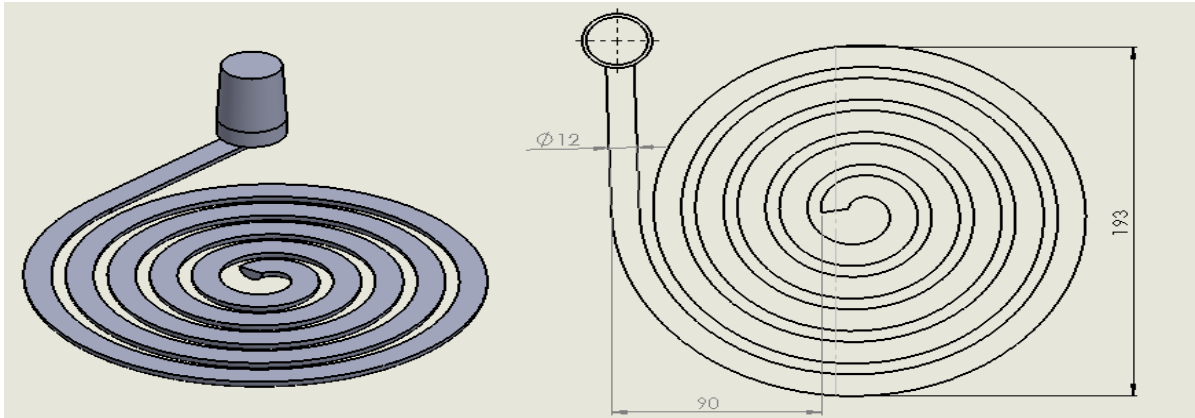
2.5.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

Akıcılık testlerinde ayrıca literatür de genişçe yer alan Şekil 26 ve 27'de görüntüsü ve teknik resmi verilen spiral akıcılık test modeli kullanılmıştır. Tasarımı verilen kalıbın kokil kalıba imalatı gerçekleştirilecek ve değişen sıvı metal kalitesine ait sıvı metal ilerleme mesafelerinin ölçümü ve mikroyapı numunesi alınmıştır.

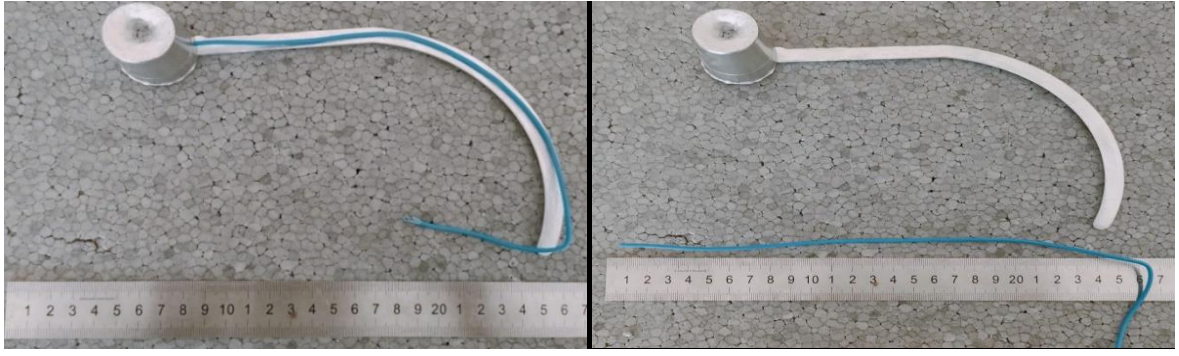


Şekil 26: Spiral Akıcılık Kokil Kalıbı

Spiral akıcılık kalıbı, 4 kollu akıcılık kalıbına benzer şekilde de sıvı metal ilerleme mesafesi



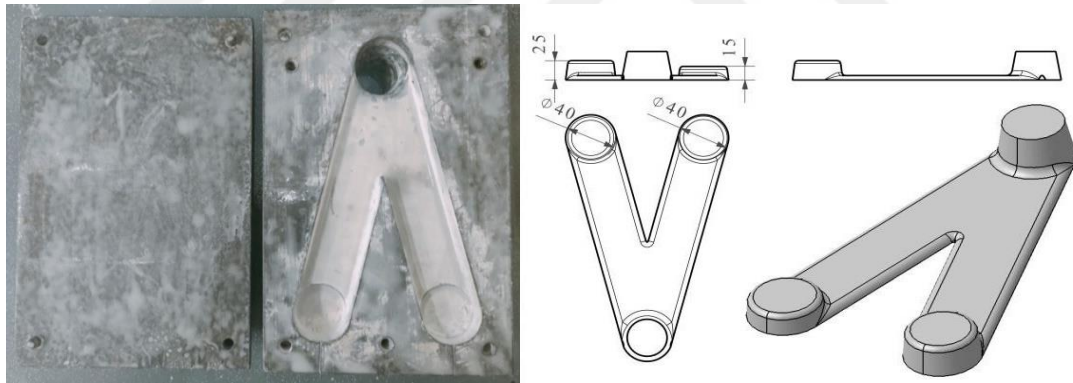
Şekil 27: Spiral Akıcılık Kokil Kalıbı ve Numune Ölçüleri



Şekil 28: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Numunesi Ölçülmesi

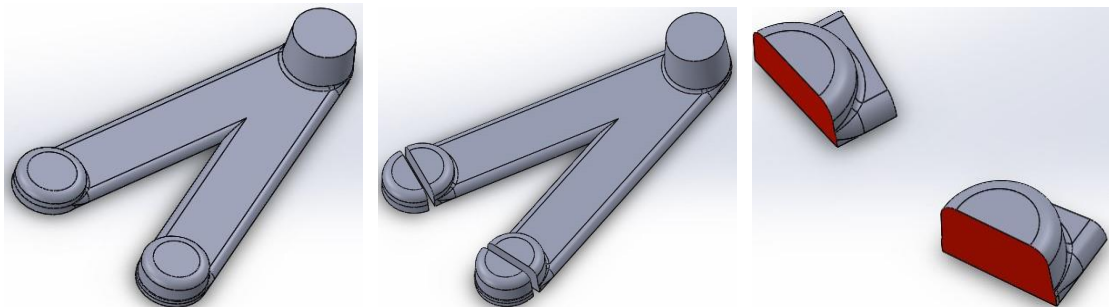
2.5.5. Ördek Ayağı Kokil Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

Ördek ayağı test kalıbında Şekil 29'da resimde görüldüğü gibi iki farklı kesit kalınlıklara olan ve % çekinti kokil kalıbı kullanılarak değişik oranlarda % Nb ilavesi ile çekinti arasında farklılıklar incelenmiştir. Kalıpta yer alan farklı kesit kalınlıklarına ve modül değerlerine sahip bölümler değişen katılma oranları ile çekinti arasında durum değerlendirilmiştir. Resimdeki kokil kalıp kullanılarak 15 mm ve 25 mm kesit kalınlığına sahip kokil kalıp boşluklarında oluşan % çekinti miktarının katılma zamanı ile ilişkisini de gözlemleri yapılmıştır. Bundan dolayı katılma süresinin % çekinti etkisinin incelenmesi yapılmıştır.



Şekil 29: Ördek Ayağı Döküm Kokil Kalıbı Görüntüsü ve Ölçüleri

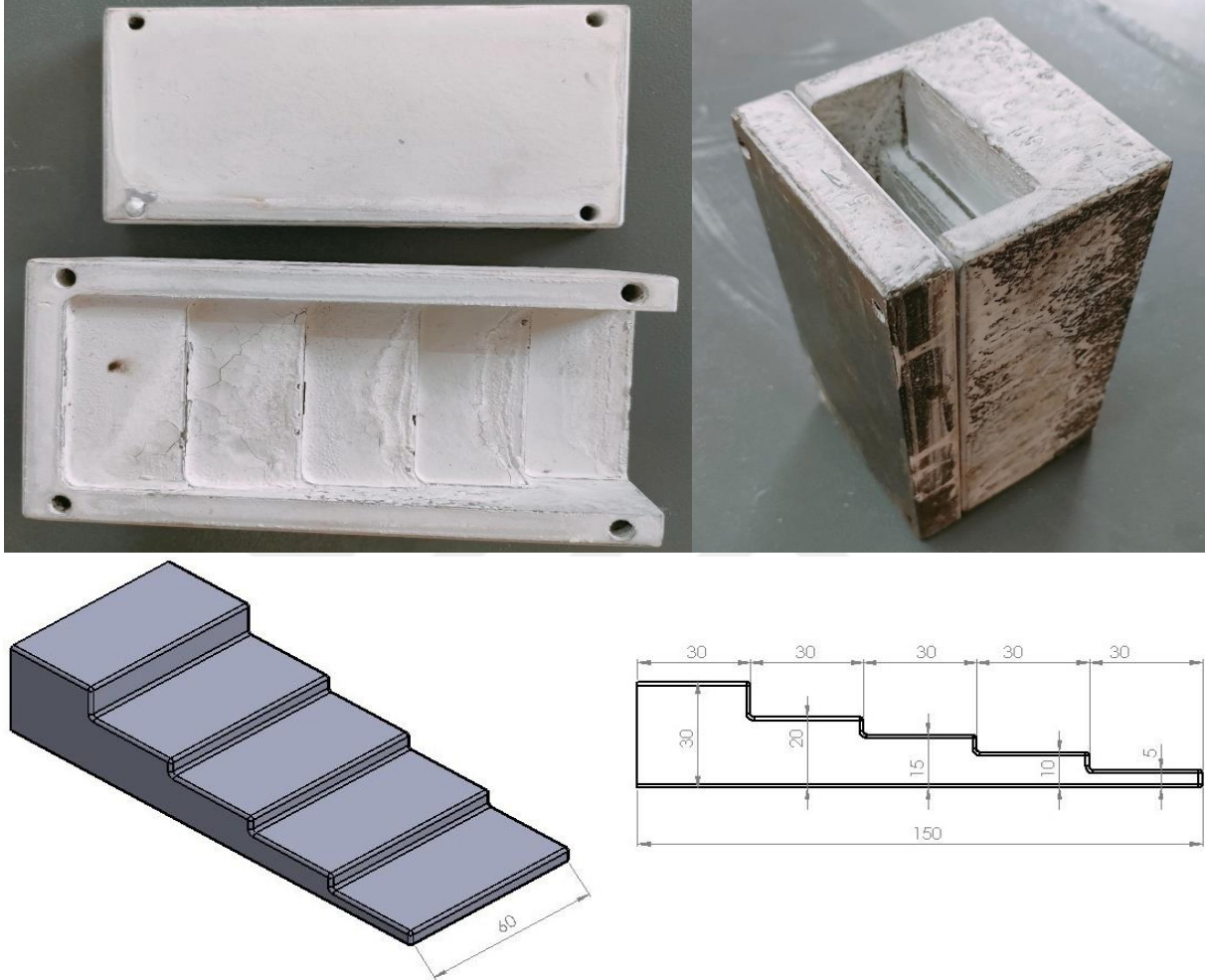
Döküm numuneler uç kısımlarından kesilerek yüzeyi zımparalanmış ve akabinde tarayıcıda taranarak çekinti miktarları değerlendirilmiştir. Şekil 30'da numunenin kesilen kısımları gösterilmiştir.



Şekil 30: Ördek Ayağı Test Kalıbı Numunelerinin Kesilen Bölgelerin Gösterilmesi

2.5.6. Basamak Kokil Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

Basamak kalıbından elde edilen numunelerden değişen kesit kalınlık ve katılaşma zamanında mikro yapı üzerinde değişimi incelemek için numuneler alınmıştır. Bu kapsamda kullanılan kalıp görüntüsü ve kalıp ölçüleri Şekil 31’de verilmiştir. Mikro yapı için her bir kesit kalınlığından numuneler alınarak içyapı incelemelerine tabi tutulmuştur.



Şekil 31: Basamak Döküm Kokil Kalıbı - Basamak Döküm Numunesi Ölçüleri

2.5.7. Mikroyapı İncelemeleri

Mikro yapı incelemeleri basamak kalıbının her bir kademesinden numuneler alınmıştır. Numuneler hazırlık süreçlerinde kolaylık olması açısından ve tek seferde daha fazla sayıda numunenin hazırlanabilmesi açısından bakalite alınmak suretiyle kalıplanmıştır. Bakalite alınmış numuneler sırasıyla 180, 400, 800, 1200 ve 2500 μm 'lik numarası olan zımpara kâğıtlarını kullanılarak zımparalama işlemleri yapılmıştır. Uygulanan zımpara işleminin ardından 3 μm , 1 μm alümina süspansiyonu ve son olarak 0,05 μm 'lik kolodial silika ile parlatma yapılmıştır. Parlatma sonrası numuneler keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 32’de metalografik hazırlık süreçlerinde kullanılan zımparalama parlatma makinesine ait bir resim verilmiştir.



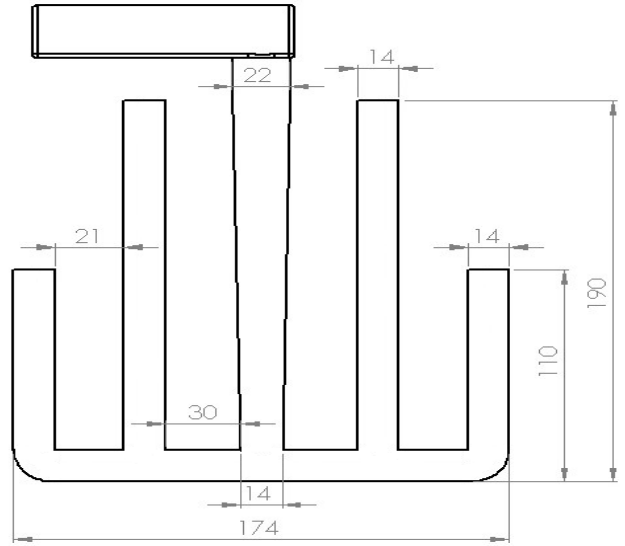
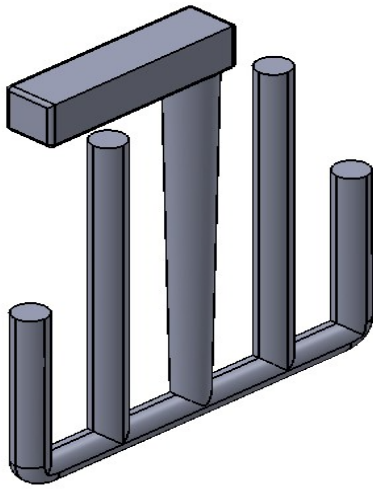
Şekil 32: Zımparalama ve Parlatma Mikroskobu

Mikro yapı incelemeleri Via taglioferri B21056 INDUNO OLONA (VA) serisi AFFRI marka metalürjik optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı çekimleri mikroskoba bağlı olarak çalışan, Şekil 32'deki Nikon MA100N dijital kamera ile yapılmıştır. Şekil 32'de resimde görülen metalografik muayenede kullanılan kameralı mikroskop verilmiştir.

2.5.8. Mekanik Test Döküm Numunelerinin İncelenmesi

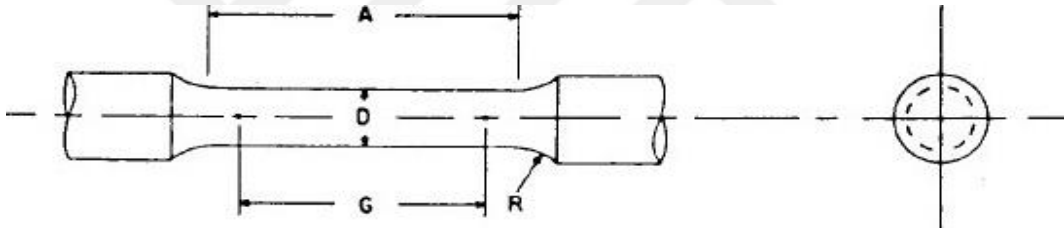
A356 alaşımına Nb ilavelerinin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi amacıyla 4 farklı (ilavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb ilaveli) kimyasal kompozisyonda toplam 16 adet çekme çubuğu numunesi dökümü yapılmıştır. Mekanik testlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan 2 çubuklu mekanik test kalıbı ve teknik resmi şekil 33'te verilmiştir.





Şekil 33: Mekanik Test Kokil Kalıbı Fotoğrafi ve Ölçüleri

Çalışma kapsamında numuneler çekme testleri için işlemeye tabi tutulmuştur. Şekil 34'te E8/E8M-13'a standardına göre hazırlanan çekme test çubuğu ölçüleri verilmiştir. Şekil 34'te görüldüğü gibi A: 62 mm uzunlukta D: 9 mm çapında R: 8 mm çapında ve G: 54 mm ölçülerine göre çekme çubukları imal edilmiştir.



Şekil 34: Çekme Testi İçin Döküm Numunesinin Şematik Gösterimi

Çekme test numuneleri Şekil 34'te gösterilen formda hazırlanarak 1 mm/dk'lık çekme hızı altında 100 kN'luk kapasiteli Şekil 35'te gösterilen MTS Hydraulic Wedge Grip marka 370.10 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için hazırlanmış numune ve test sonrası alınan örnek bir görüntüsü verilmiştir. Çekme testiyle akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri tesbit edilmiştir.



Şekil 35: Çekme Testi Cihazı ve Çekme Çubuğu Numuneleri

Alüminyum alaşımın dökümlerinden yapılan numunelerin mekanik özelliklerin en önemli parametresi olan sertlik ölçümleri ise Rockwell sertlik ölçümleri ile yapılmıştır, Şekil 36’da görülen BMS makinesinde AFFRI marka cihazda testleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Ölçümde HRB test metodu 1,6mm çaplı bir bilye kullanılarak 1 kgf ön yük sonrası 10 kgf toplam yük altında sertlik testleri yapılmıştır. Her bir test numunesinden 6’şar adet ölçümler yapılmış olup, bu sertlik değerleri ortalaması alınmıştır.



Şekil 36: Sertlik Ölçüm Test Cihazı

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen bulguların sonuçları değerlendirme sonuçları verilecektir. A356 alüminyum alaşımını ilk olarak ilavesiz, daha sonra değişen oranlarda Nb ilavesi ile kokil kalıplara döküm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde; RPT ve K-mold kalıba yapılan dökümlerden sıvı metal kalitesi, spiral ve 4 kanallı akıcılık kalıbında sıvı metal ilerleme mesafeleri, basamak kalıbında mikroyapı incelemeleri, ördek ayağı kalıbında beslenebilirlik ve mekanik test kalıbı numunelerinden çekme ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN KONTROLÜ

Döküm işlemlerinde kullanılan alaşım ve alaşıma katılan Nb ilave seviyelerinin uygunluğunun kontrolü için alınan numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

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

Alaşımlar	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Nb	B	Al
	0,20	6,60-7,40	0,02	0,03	0,03-0,45	0,04	0,02	0,08-0,14	-		Kalan
A356	0,212	6,72	0,241	0,0158	0,326	0,0276	0,0367	0,116	-	0,019	Kalan
İlavesiz											
% 0,03	0,224	6,81	0,222	0,0156	0,317	0,0295	0,0354	0,109	-	0,421	Kalan
Nb ilaveli											
% 0,06	0,176	6,83	0,214	0,0271	0,412	0,0286	0,0292	0,112	-	0,435	Kalan
Nb ilaveli											
%0,1	0,193	6,75	0,248	0,0273	0,379	0,0273	0,0295	0,123	-	0,481	Kalan
Nb ilaveli											

Tablo 10'daki A356 alaşımların standart bileşim aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Tez kapsamında yapılan Nb ilavesi uygunluğunun kontrolünde; kimyasal analiz yapılan cihazın Nb elementine yönelik kalibresinin olmamasından dolayı ilgili değerler tespit edilememiştir.

3.2. SIVI METALİN KALİTESİNİN TESPİTİ

Alüminyum dökümlerinde oluşan gözenek ve inklüzyonlar, döküm kalitesine etki eden en önemli parametrelerinden bir tanesidir. Tez çalışmasında döküm numune incelemelerinde gözenek oluşması sonuçları olumsuz yönde etkileyecektir. Bundan dolayı çözünmüş gazlar sebebiyle oluşacak gözenek ve inklüzyonların önlenmesi için sıvı metal döküm öncesi azotla temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Değişen oranlarda alaşım elementi ilavesi ile yapılan dökümlerde sıvı metal kalitesine bağlı olarak sonuçların etkilenmemesi için deneysel çalışmalar bölümünde detaylı bir şekilde açıklandığı gibi döküm öncesi sıvı metal temizleme işlemi yapılmaktadır. Gözenekliliğe neden olan gazlar ve inklüzyonların katılma sırasında daha kolay büyümesine etki etmek amacıyla sıvı metal indirgenmiş basınç altında katılması

gerçekleştirilmiştir. Bu işlem RPT test cihazından numuneleri elde edilmiş olup ergimiş metal kalitesi kontrolü sağlanmıştır. Döküm deneylerinden elde edilen RPT numunelerine ait fotoğraf görüntüleri Şekil 37’de verilmiştir.



İlavesiz

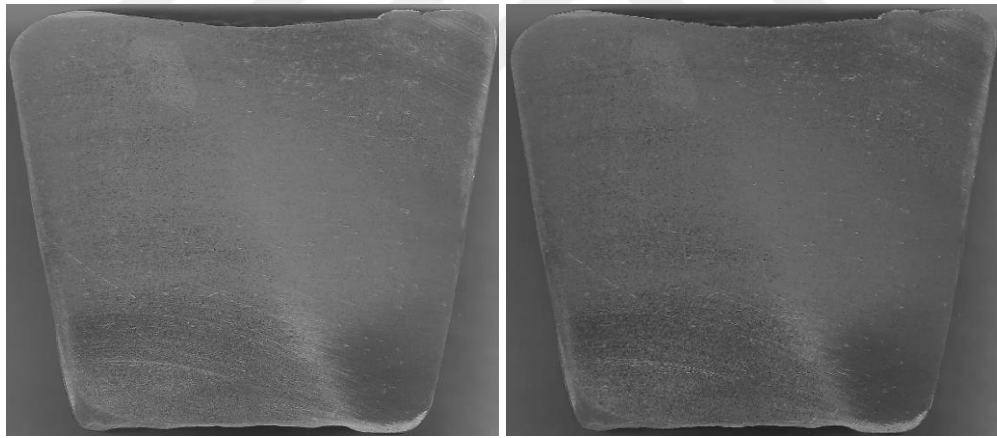
% 0,03 Nb İlaveli

% 0,06 Nb İlaveli

% 0,1 Nb İlaveli

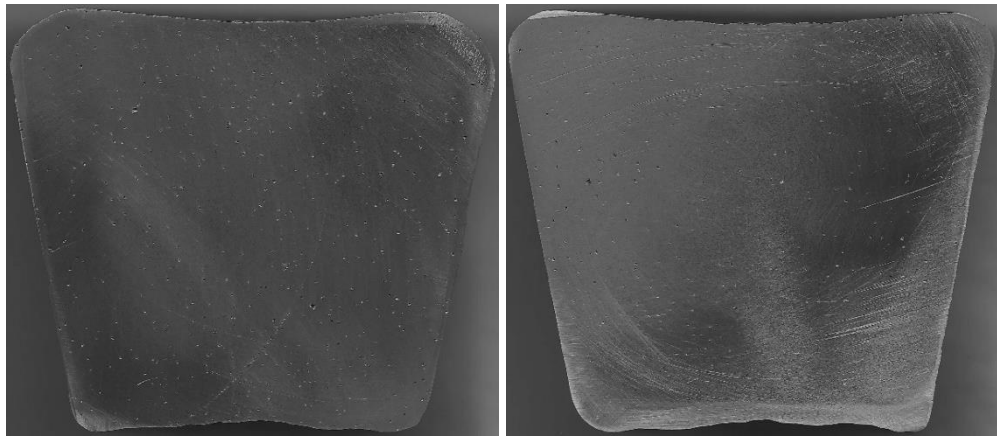
Şekil 37: RPT Test Numune Görüntüleri

Şekil 37’de verilen fotoğraf görüntülerinde de görüldüğü gibi numunelerin üst kısmında çöküntü olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sıvı metal temizliğinin uygun olduğuna bir işaret olarak bilinmektedir. RPT numuneleri kesilerek zımparalanmış ve kesit yüzeyleri taranarak gözenek durumları incelenmiştir. Şekil 38’de RPT numune kesit yüzey görüntüleri verilmiştir.



İlavesiz

% 0,03 Nb İlaveli



% 0,06 Nb İlaveli

% 0,1 Nb İlaveli

Şekil 38: RPT Numune Kesit Görüntüleri

Şekil 38’de verilen kesit yüzey görüntüleri incelendiğinde her bir dökümde kabul edilebilir seviyede sıvı metal temizliğine ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Numune yüzey çöküntüsü ve yüzeyde gözeneklerin minimum seviyede olması bu durumu göstermektedir. Dispınar ve arkadaşları yaptığı çalışmada RPT numune yüzey çöküntüleri oluşması ve kesit yüzeylerinde gözenek olmamasının sıvı metal temizliği açısından uygun olduğunu ifade etmiştir (Dispınar, Çetin, Uludağ, & Tiryakioğlu, 2018).

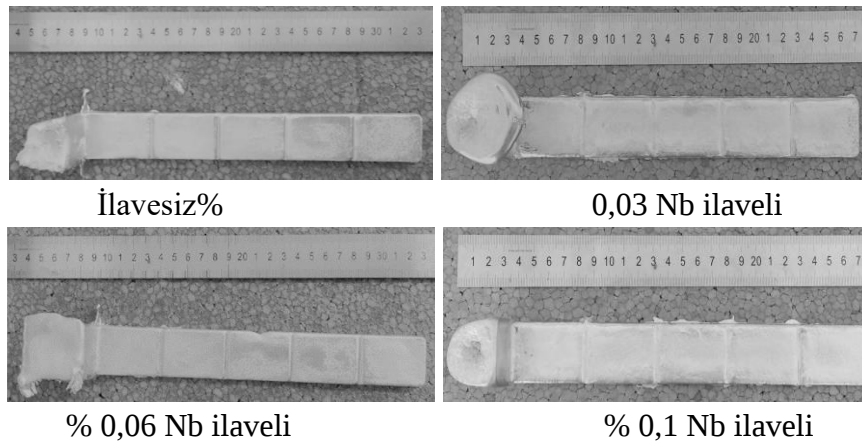
RPT numuneleri ayrıca yoğunluk ölçümlerine tabi tutularak gözenek durumları belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Tablo 11’de yoğunluk ölçüm sonuçları ve hesaplanan gözenek değerleri verilmiştir.

Tablo 11: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları

Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	DeneySEL Yoğunluk (g/cm ³)	Referans Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek (%)
İlavesiz	110,07	68,78	2,661	2.67	0,337
%0,03 Nb İlaveli	116,57	72,81	2,659	2.67	0,412
%0,06 Nb İlaveli	118,70	74,16	2,660	2.67	0,375
%0,1 Nb ilaveli	115,33	71,02	2,658	2.67	0,449

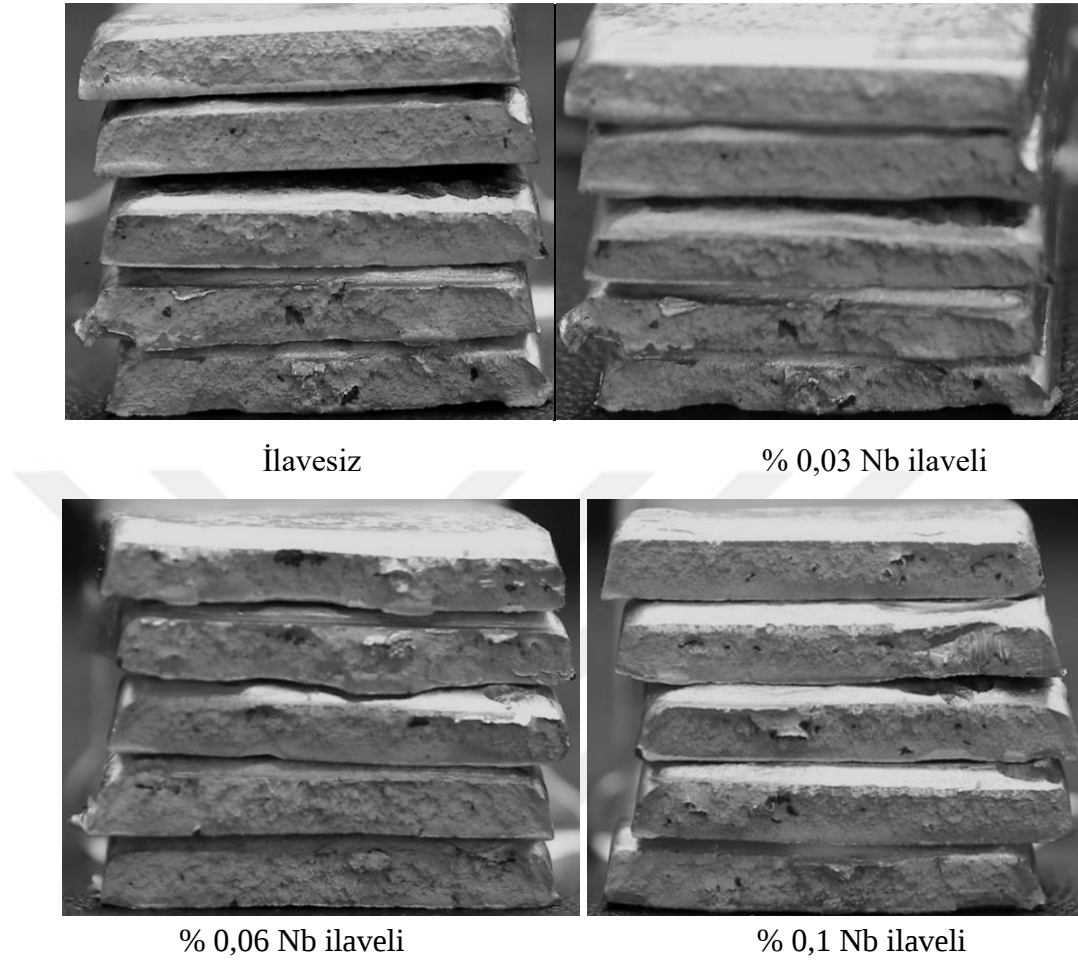
Tablo 11’de RPT döküm numunelerden verilen yoğunluk ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde elde edilen deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluğa bağlı gözenek değer hesaplamaları verilmiştir. Teorik yoğunluk değerinin belirlenmesinde alaşımın kimyasal bileşimi ve standart değerler göz önüne alınmıştır. Tüm deney numunelerinde hesaplanan gözenek değerleri Tablo 10’da da görüldüğü gibi % 0,5’in altında olduğu görülmektedir. İlgili değerler numune kesit yüzey incelemeleri sonucu RPT testine göre sıvı metal kalitesinin uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tez kapsamında sıvı metal temizliğinin kontrolü açısından bir diğer test yöntemimiz K-mold kalıba döküm numuneleridir. Şekil 39’da K-mold döküm numune fotoğraf görüntüleri verilmiştir.



Şekil 39: K-Mold Kalıbına Yapılan Döküm Numune Görüntüleri

K-Mold kalıbına döküm sonucu elde edilen numunelerin kırık yüzeyleri incelenmiştir. Numuneler çentikli kısımlardan kırılarak kırık yüzey resimleri elde edilmiştir. Şekil 40'da K-mold numune kırık yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 40: K- Mold Numuneleri Kırık Yüzey Numune Görüntüleri

K-mold döküm sonrası numunelerde hızlı katılaşma olduğundan ince bir matris oluşmaktadır. Bu nedenle kırık yüzeyinde inklüzyonlar açıkça tespit edilebilmektedir. Şekil 40'ta değişen oranlarında % Nb elementi ilavesi ile K-mold parçalarından en uç kademesinden başlayarak sıralı bir şekilde dizilerek resimde görülmektedir. K-mold numune kırık yüzeylerinde görülen inklüzyon sayıları sayılarak Tablo 12'de gözlem sonrasında inklüzyon sayıları verilmiştir.

Tablo 12: K- Mold Inklüzyon Parça Sayıları ve K Değerleri

Numune adı	Inklüzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
İlavesiz (A356)	3	5	0,6
% 0,03 Nb ilaveli	4	5	0,8
% 0,06 Nb ilaveli	4	5	0,8
% 0,1 Nb ilaveli	4	5	0,8

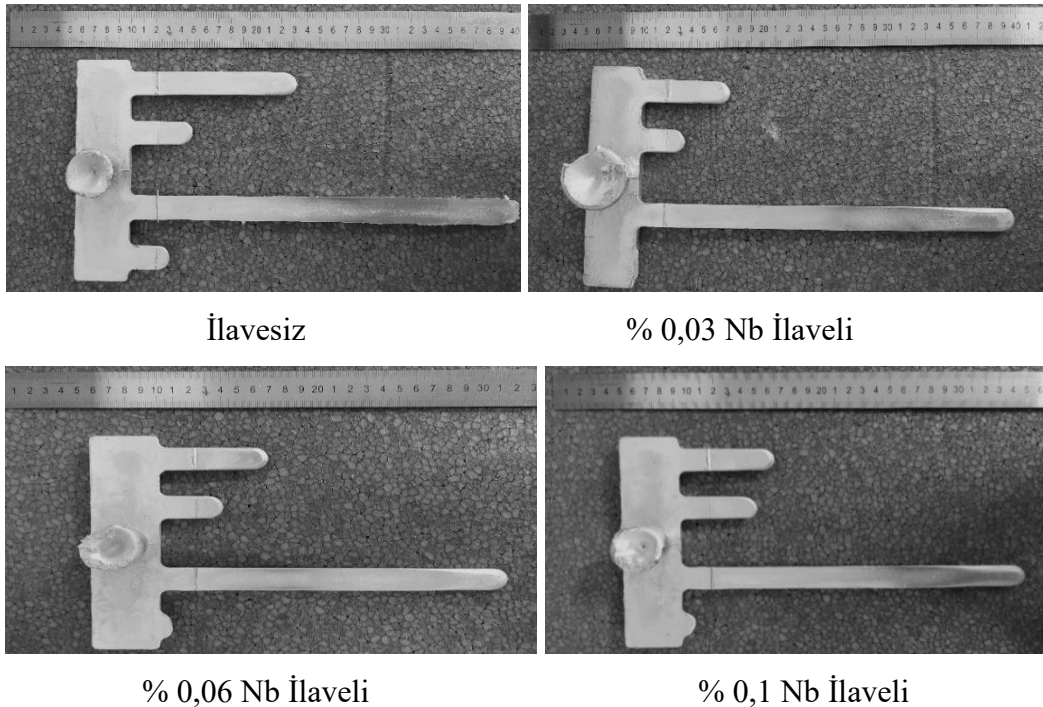
Şekil 40'ta verilen K-Mold kırık yüzey görüntüleri ve Tablo 12'de verilen K-Mold ölçüm sonuçlarına bağlı olarak K değerleri incelendiğinde tüm döküm deneylerinde elde edilen K değerleri birbirine yakın ve 1 değerinin altında olduğu görülmektedir.

Balaban ve ark. yaptıkları çalışmada K-Mold değeri $< 0,5$ olduğunda sıvı metalin temiz olduğu anlaşılmakta, $0,5 < K\text{-değeri} < 1,0$ aralığında kabul edilebilir değerlerde olduğunu ve K-değeri $> 1,0$ üzerinde olduğunda kesinlikle sıvı metalin temizlenmesi yapılmalıdır. Elde edilen K değerleri incelemesi yapıldığında tüm deneylerde 1,0'ın altındaki değerlerde olduğu ve sıvı metal kalitesinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu ve bu durum temizleme işleminin uygun olduğunun teyiti yapılmaktadır (Balaban, Şen, Özer, & Güler,)

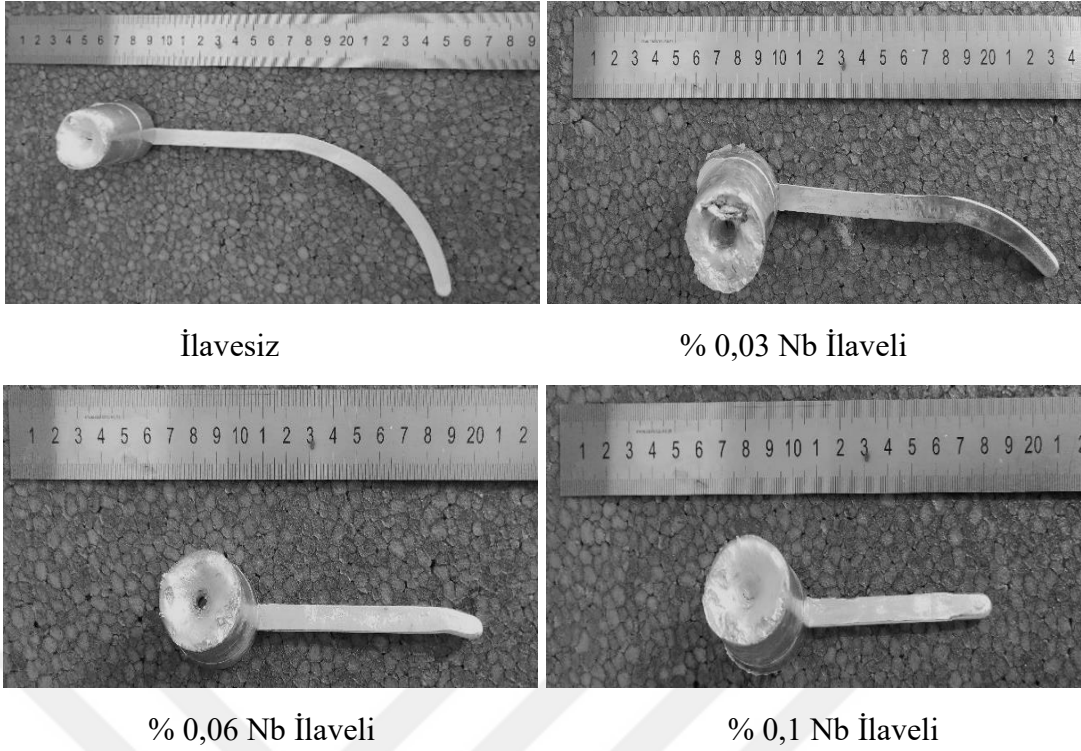
Sıvı metal temizliğine yönelik K-mold değerleri ve RPT sonuçları incelemesi yapıldığında, döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşmasını engellemek ve sıvı metal temizleme işleminin yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle dökümlerde oluşması muhtemel inklüzyonlar gaz kaynaklı olmayacaktır. Oluşan inklüzyonlar yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözenekleşmesi nedeni ile olabileceği düşünülmektedir.

3.3. DÖRT KOLLU AKICILIK VE SİRAL TESTİ SONUÇLARI

Döküm deneylerinde Nb ilavesinin akıcılık üzerinde etkisinin incelenmesi için değişen kesit kalınlıklarına sahip 4 kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıpları kullanılmıştır. Şekil 41'de 4 kanallı akıcılık kalıbından elde edilen Şekil 42'de spiral akıcılık kalıbından elde edilen döküm numunelere ait fotoğraf görüntüleri verilmiştir.



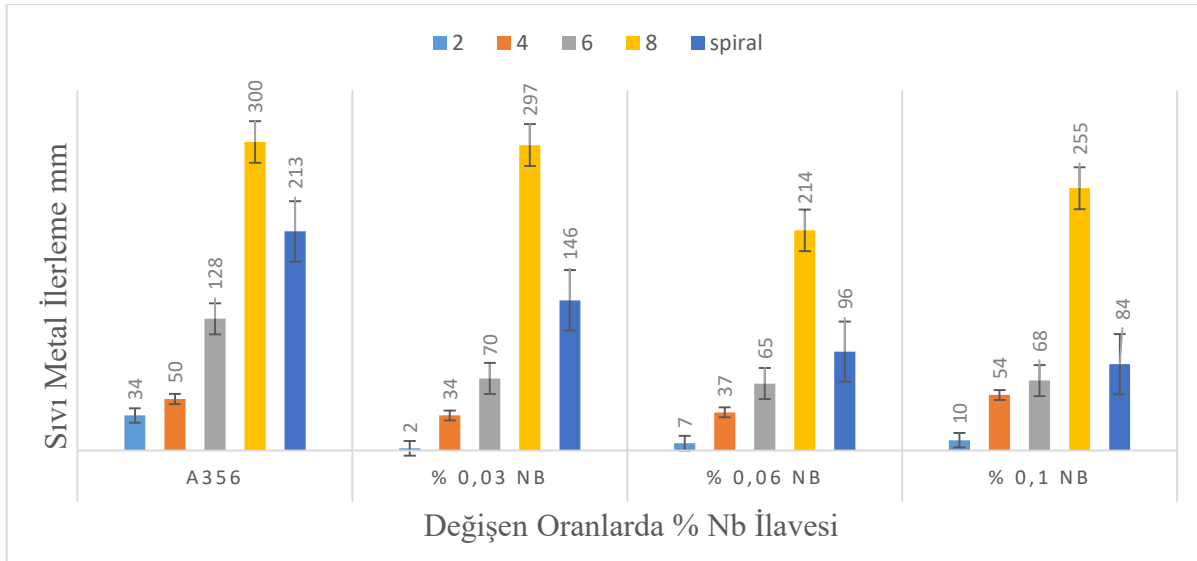
Şekil 41: 4 Kanallı Akıcılık Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri



Şekil 42: Spiral Akıcılık Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri

Akıcılık döküm numune sonuçları incelendiğinde Nb ilavesine bağlı olarak değişen sıvı metal ilerleme mesafeleri ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 42’de kesit kalınlığının aynı döküm şartlarında da akıcılık sonuçlarını etkilediği tespit edilmiştir. Tablo 10’de değişen kesitler ve spiral kalıbında sıvı metal ilerleme mesafesi sonuçları verilmiştir.

Tablo 13’te 4 kollu ve spiral akıcılık kalıbı sıvı metal ilerleme mesafesi, Şekil 43’te 4 kollu ve spiral akıcılık sıvı metal ilerleme sonuçlarını grafik sonuçları ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 43: 4 Kollu ve Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Sonuçları

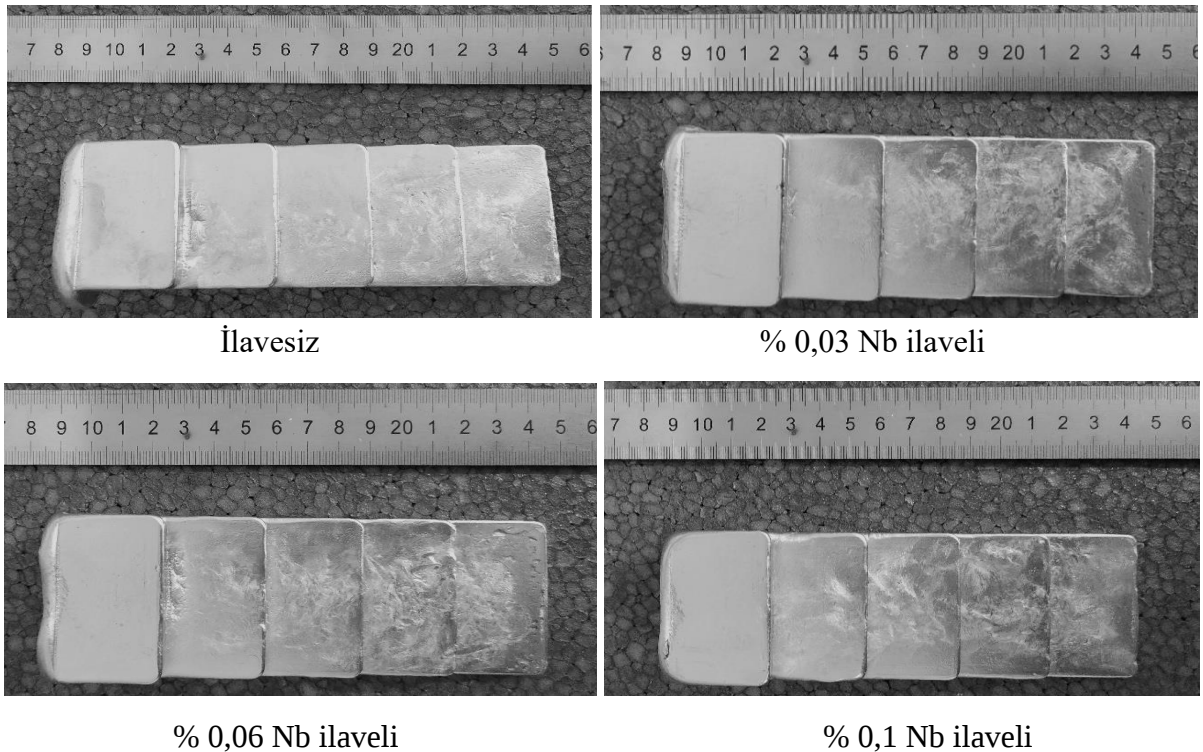
Tablo 13: 4 Kollu ve Spiral Akıcılık Kalıbı Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Sonuçları

Kalıp	Kalınlık (mm)	A356	% 0,03 Nb ilaveli	% 0,06 Nb ilaveli	% 0,1 Nb ilaveli
4 Kanallı Akıcılık	2 mm	34	2	7	10
	4 mm	50	35	37	54
	6 mm	128	70	65	68
	8 mm	300	297	214	255
Spiral Akıcılık	-	213	146	96	84

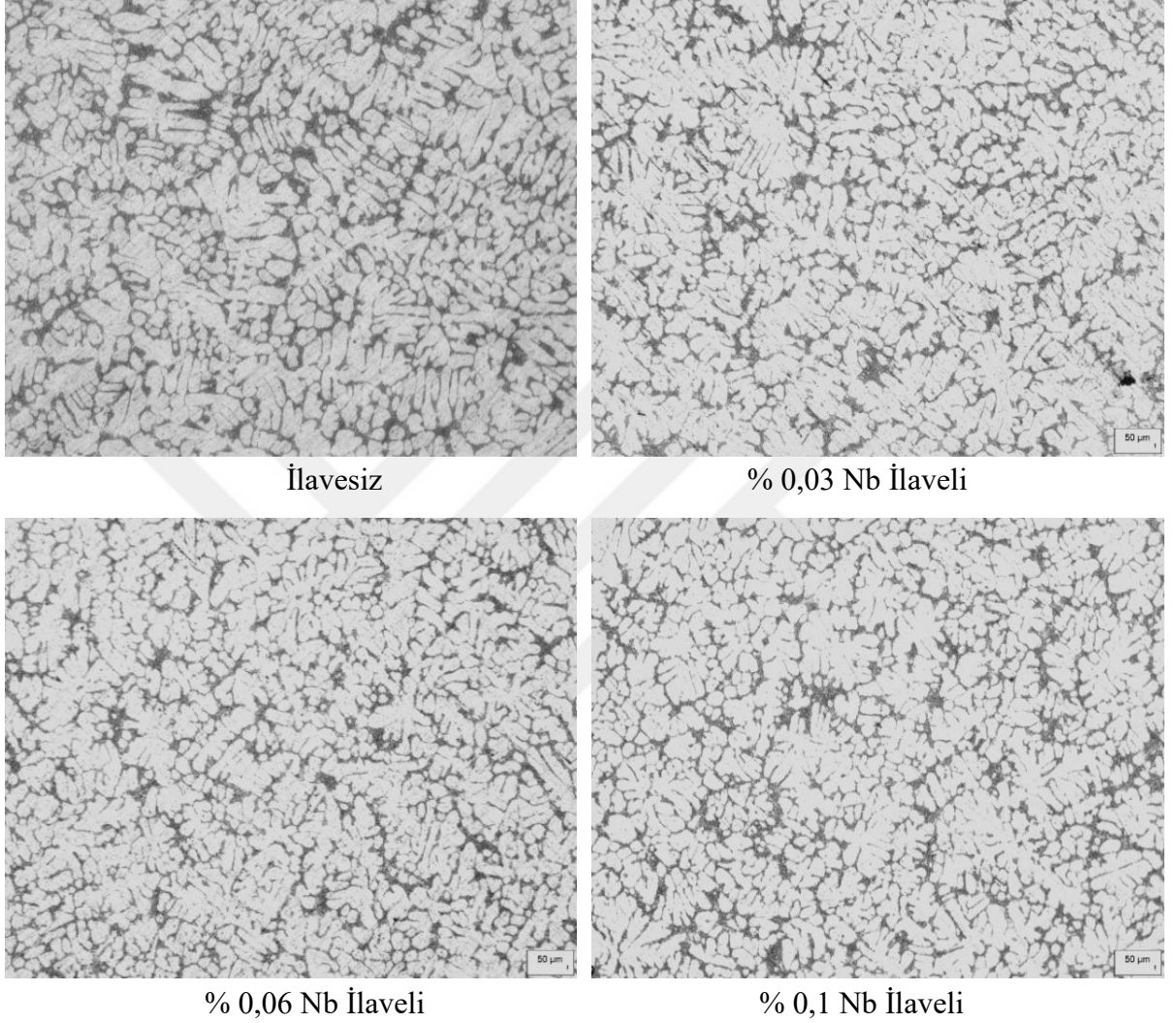
Tablo 13’de verilen değerler incelendiğinde ilavesiz A356 alaşımı dökümünde 2 mm kalınlığındaki kanal 34 mm, 4 mm kanalda 50 mm, 6 mm kanalda 128 mm, 8 mm kanalda sıvı metal kalıp boşluğu kadar ilerleyerek 300mm dolum ölçülmüştür. % 0,03 Nb ilaveli dökümde sırasıyla 2 mm, 35 mm, 70 mm ve 297 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir. % 0,06 Nb ilaveli dökümde elde edilen değerler ise 7 mm, 37 mm, 65 mm ve 214 mm olarak ölçülmüştür. % 0,1 Nb ilaveli döküm deneyinde ise 10 mm, 54 mm, 68 mm ve 255 mm olduğu ölçülmüştür. Spiral kalıba dökümde sıvı metal ilerleme mesafeleri incelendiğinde ilavesiz dökümde 255mm, % 0,03 Nb ilaveli dökümde 146 mm, % 0,06 Nb ilaveli dökümde 96 mm ve % 0,1 Nb ilaveli dökümde 84mm olduğu tespit edilmiştir.

3.4. MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI

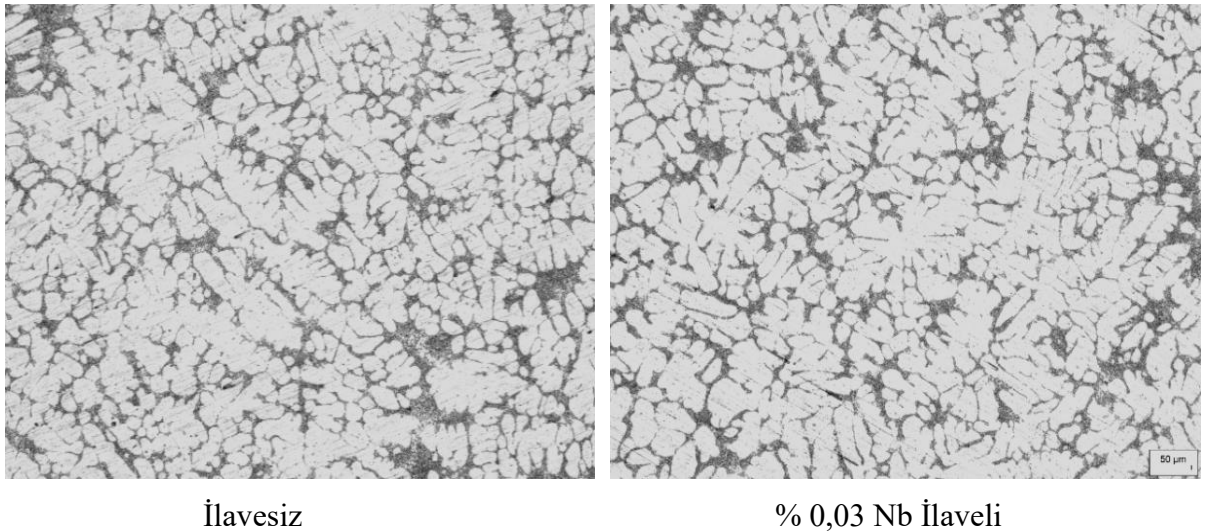
A356 ilavesiz ve değişen oranlarda Nb ilavesi ile yapılan basamak kalıbı dökümlerinden mikroyapı incelemeleri için numuneler alınmıştır. Şekil 44’te basamak kalıbı döküm resimleri verilmiştir.

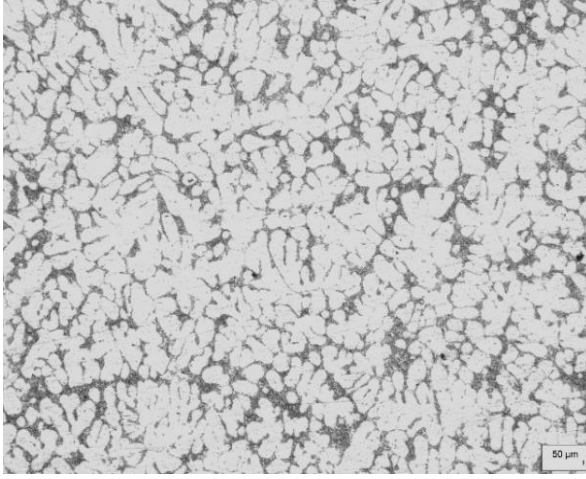
**Şekil 44: Basamak Kalıbı Döküm Numune Görüntüleri**

Mikroyapı incelemelerinde farklı kesit ve modül de katılaşma farkının değerlendirilebilmesi için basamak kalıbının her bir kesitinden numuneler alınarak fotoğraflar farklı büyütmelerde çekilmiştir. Şekil 45’de 5 mm kesitli, Şekil 46’da 10 mm kesitli, Şekil 47’de 15 mm kesitli ve Şekil 48’de 20 mm kesitli bölgeden alınan 50 X büyütmeden çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.

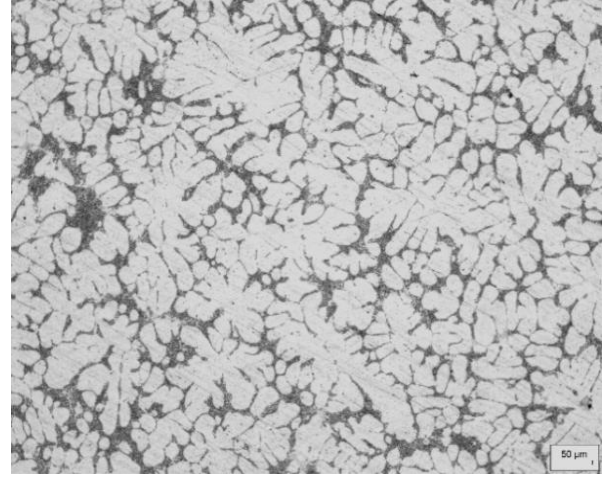


Şekil 45: Basamak Kalıplarındaki 5 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri



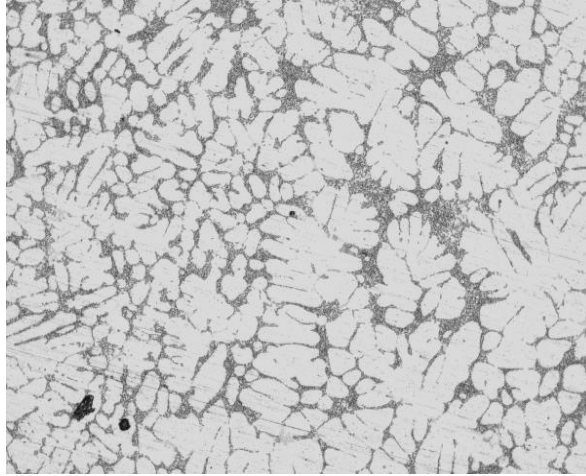


% 0,06 Nb İlaveli

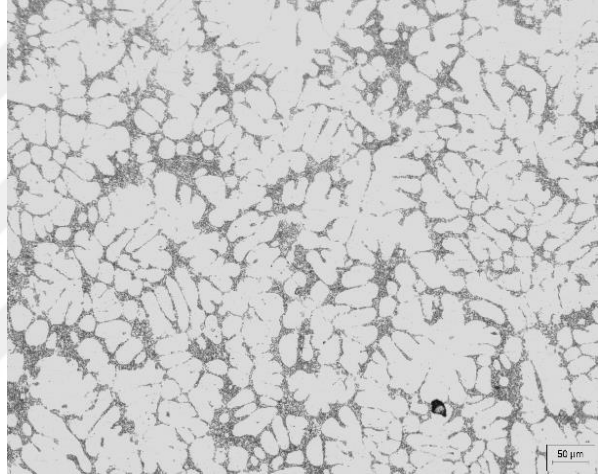


% 0,1 Nb İlaveli

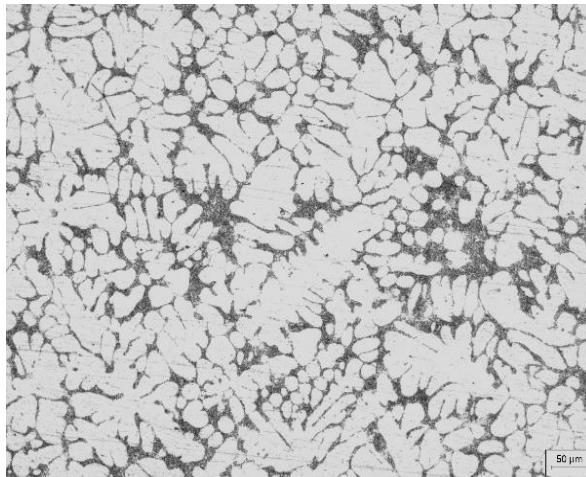
Şekil 46: Basamak Kalıplarındaki 10 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri



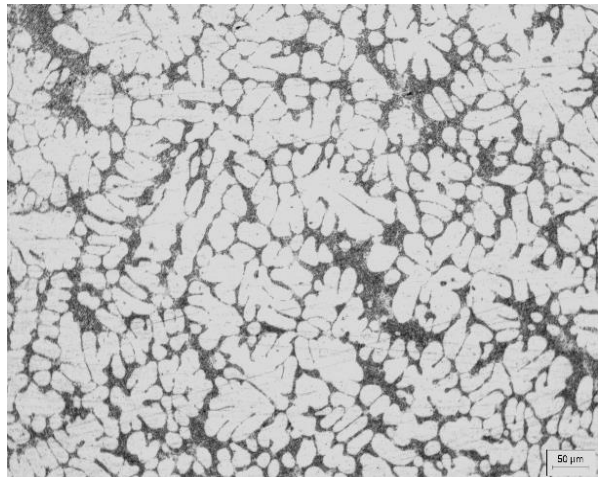
İlavesiz



% 0,03 Nb İlaveli

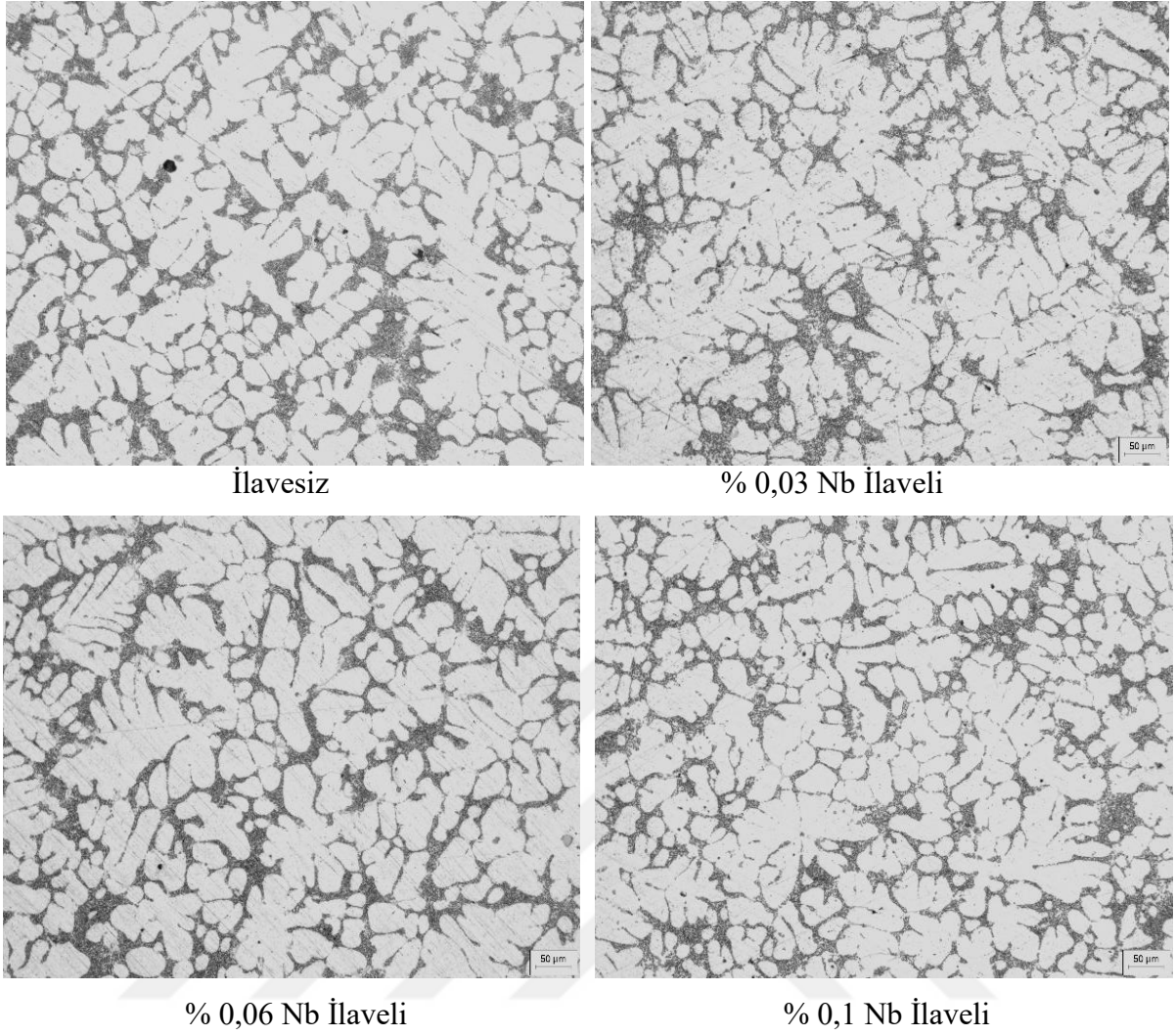


% 0,06 Nb İlaveli



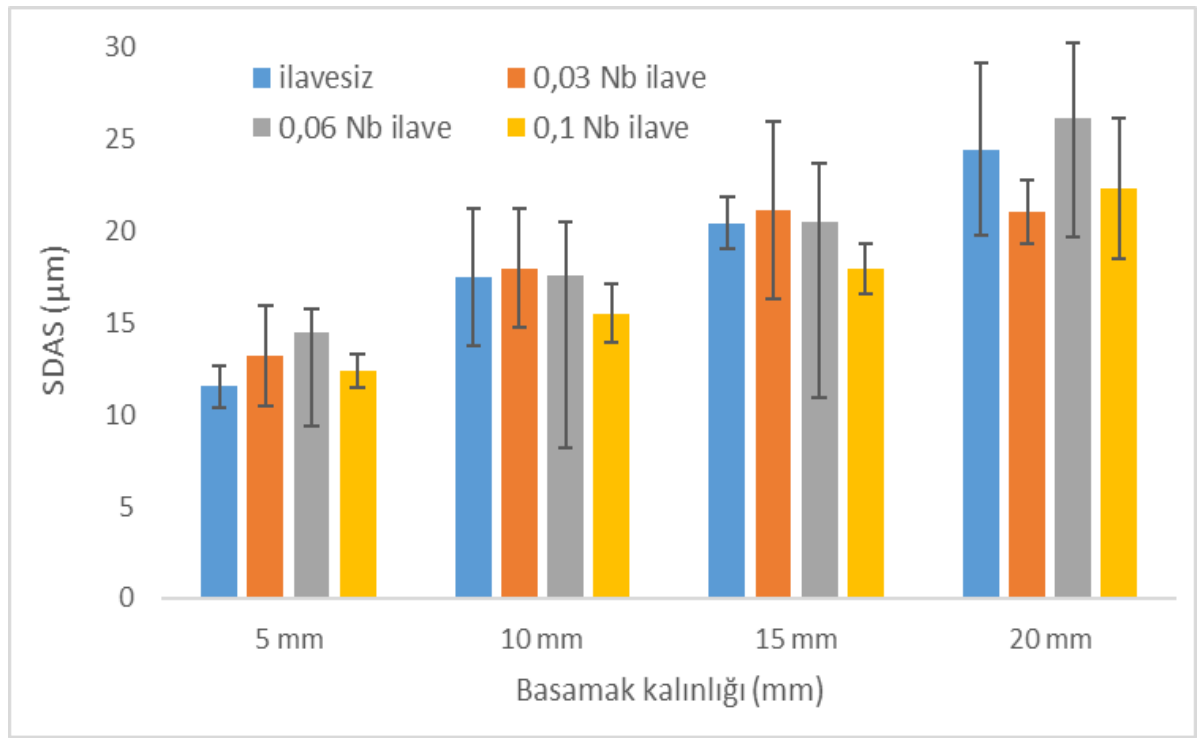
% 0,1 Nb İlaveli

Şekil 47: Basamak Kalıplarındaki 15 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri

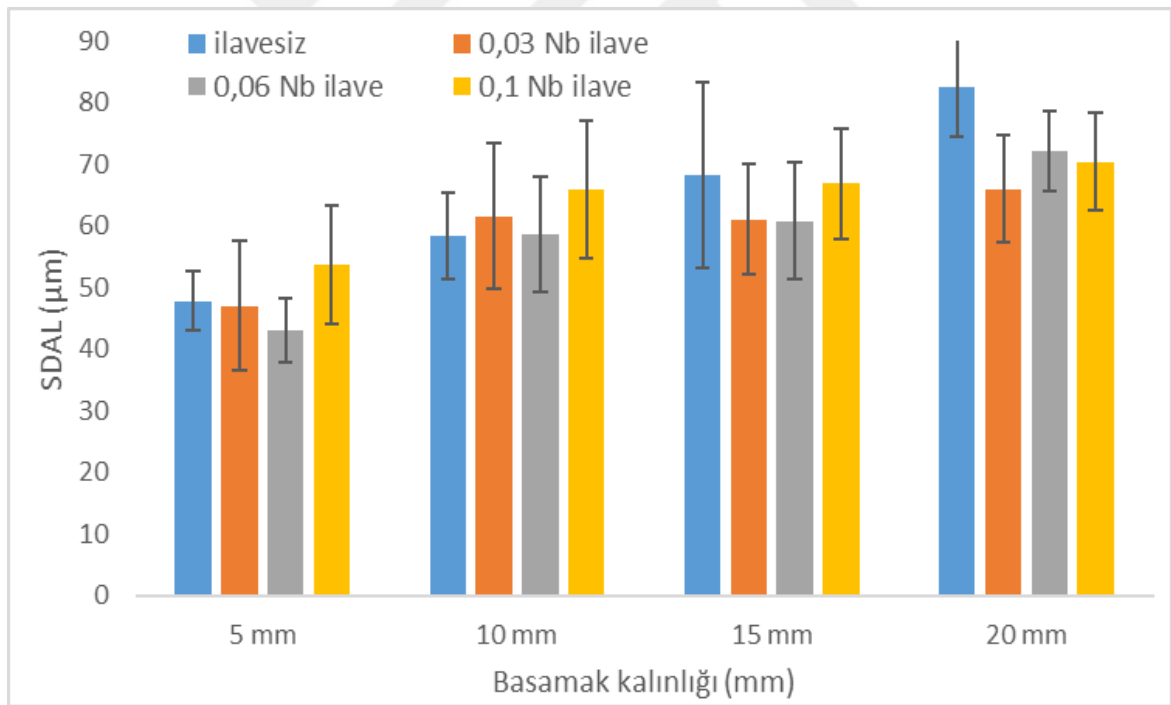


Şekil 48: Basamak Kalıplarındaki 20 mm Kalınlıktaki Basamağa Ait Mikroyapı Görüntüleri

Mikroyapı görüntülerinde verildiği şekilde A356 alüminyum alaşımının farklı kesit kalınlıklarına sahip bölgelerinden ve değişen Nb ilavelerine göre elde edilen mikroyapısal detayları gösterilmektedir. Şekildeki verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde kesit kalınlığının artmasına bağlı olarak tane yapılarının ve yapıda ortaya çıkan Si kristallerinin daha da büyük olduğu gözlenmektedir. Yapıda kalınlık arttıkça mikro yapıdaki soğumaya bağlı olarak tanelerin büyüdüğü ve değişen oranlarda % Nb ilavesi ile mikro yapıların küçüldüğü gözlenmiştir. İlgili durum tüm dökümler için tespit edilmiştir. Ayrıca yapıda Nb ilavesine bağlı olarak yapıda değişimler tespit edilmiştir. Nb miktarının artmasına bağlı olarak yapıda değişimlerde artış olduğu gözlenmiştir. Mikroyapı resimlerini kullanarak SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing, ikincil dendrit kol aralığı) ve SDAL (Secondary Dendrite Arm Length, ikincil dendrit kol uzunluğu) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 49’da değişen Nb oranı ve kesit kalınlık bölgesine göre SDAS değerleri, Şekil 50’de SDAL değerleri grafik olarak verilmiştir.



Şekil 49: Ölçülen SDAS Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Nb Oranına Göre Değişimi



Şekil 50: Ölçülen SDAL Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Nb Oranına Göre Değişimi

Şekil 46’da, A356 alüminyum alaşımının 5 mm kalınlığındaki ilavesiz ve farklı oranlarda Nb (niobyum) ilavesiyle dökülen basamak numunelerinin mikroyapıları gösterilmektedir. Şekil 45’de, ilavesiz A356 alaşımının mikroyapı fotoğrafını gösterir. İlavesiz 5 mm kalınlığındaki basamağın SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 11,54 μm ve 47,8 μm olarak ölçülmüştür. % 0,03 Nb ilaveli 5 mm kalınlığındaki numunenin SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 13,24 μm

ve 47 μm olarak ölçülmüştür. % 0,06 Nb katkılı numunenin SDAS ve SDAL değerleri ise sırasıyla 14,5 μm ve 43 μm olarak ölçülmüştür. Nb oranının % 0,06'ya kadar arttırıldığı numunelerde SDAS değerlerinde artış, SDAL değerlerinde ise azalma gözlemlenmiştir. Diğer taraftan % 0,1 Nb içeren 5 mm kalınlığındaki basamağın SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 12,4 μm ve 53,6 μm olarak ölçülmüştür. Gözlemlenebileceği gibi, Nb oranının % 0,06'dan % 0,1 Nb'ye çıkmasıyla birlikte SDAS değerlerinde azalma ve SDAL değerlerinde artış meydana gelmiştir. Şekil 46'da sıralanan fotoğraflarda, 10 mm kalınlığındaki A356 basamağının farklı Nb ilave oranlarına sahip mikroyapıları gösterilmiştir. İlavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkısı olan 10 mm kalınlığındaki basamağın SDAL değerleri sırasıyla 17,51 μm , 18 μm , 17,63 μm ve 15,53 μm olarak ölçülmüştür. Diğer yandan SDAL değerleri ise sırasıyla 58,4 μm , 61,6 μm , 58,6 μm ve 65,8 μm olarak ölçülmüştür. 10 mm kalınlığındaki numunede, en büyük SDAS değeri 18 μm ile % 0,03 Nb ilaveli mikroyapıda ölçülmüş olup, SDAL değerleri arasında herhangi bir belirgin yönelim gözlenmemiştir. Şekil 47'de, 15 mm kalınlığındaki A356 basamağının Nb ilave oranlarına bağlı olarak mikroyapısındaki (dendrit yapıdaki) değişimler gösterilmiştir. 15 mm kalınlığındaki basamağın ilavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkı oranlarına sahip mikroyapıları için SDAS değerleri sırasıyla 20,46 μm , 21,13 μm , 20,46 μm ve 17,93 μm olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte diğer taraftan SDAL değerleri sırasıyla 68 μm , 61 μm , 60,8 μm ve 66,8 μm olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde 10 mm kalınlığındaki numunelere göre, % 0,03 Nb ilaveli numune en yüksek SDAS değeri olan 21,13 μm sergilemiştir. Ayrıca SDAL değerlerinde % Nb oranının artmasıyla azalma gözlenmiştir. Şekil 48'de, 20 mm kalınlığındaki basamak numunelerinin mikroyapısındaki değişimler gösterilmiştir. % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkı oranlarına sahip mikroyapılar için SDAL değerleri ise sırasıyla 82 μm , 66 μm , 72 μm ve 70 μm olarak belirlenmiştir; bununla birlikte, SDAL değerleri sırasıyla 24,47 μm , 21,06 μm , 26,2 μm ve 22,33 μm olarak ölçülmüştür.

Elde edilen bulgular daha önce yapılan A356 ve farklı alüminyum alaşımları kullanılarak yapılan döküm çalışmaları ile uyum içindedir (Aydogan vd., 2022). Al11Si alaşımını çeşitli tane incelticileri (MTS 1582, Al5Ti1B ve Al3Nb1B) ilavesi ile çalışmıştır. Nb master alaşımı ilavesi ile tane boyunu 260 μm kadar düşürebilmişlerdir. Katılaşma sırasında oluşan NbB₂ ve Al₃Nb gibi bileşikler α -Al heterojen çekirdeklenmesi için en uygun yerleri oluşturur (Aydogan vd., 2022). Diğer bir çalışmasında ağırlıkça 0,03, 0,06 ve 0,1 Al-3Nb-0,55B master alaşımı ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Mikroyapılarını incelemek için 5 mm den 30mm kadar değişen kalınlıklarda basamak kalıp kullanmışlardır. Mikroyapı incelemelerinde DAS (Dendrite Arm Spacing) değerleri 95 ile 120 μm arasında değişmektedir. Diğer yandan SDAS değerleri 15 ile 20 μm arasında değişmektedir. Mikroyapı oluşumunu belirleyen başka bir faktör ise sıvı metalin soğuma (katılaşma) hızıdır, zira

katılaşma hızının artması, mikroyapıda bir incelme oluşturmaları beklenir. Bu çalışmada, soğuma hızının etkisini inceleyebilmek amacıyla, ilavesiz ve farklı oranlarda Nb ilaveli A356 alaşımının dökümleri basamak kalıba gerçekleştirilmiştir. Basamak kalınlıkları 5 mm ile 20 mm arasında değişmektedir ve 5 mm kalınlıktaki basamakta soğuma ve katılaşma hızı yüksek, diğer taraftan 20 mm kalınlıkta soğuma hızının daha düşük olması beklenmektedir.

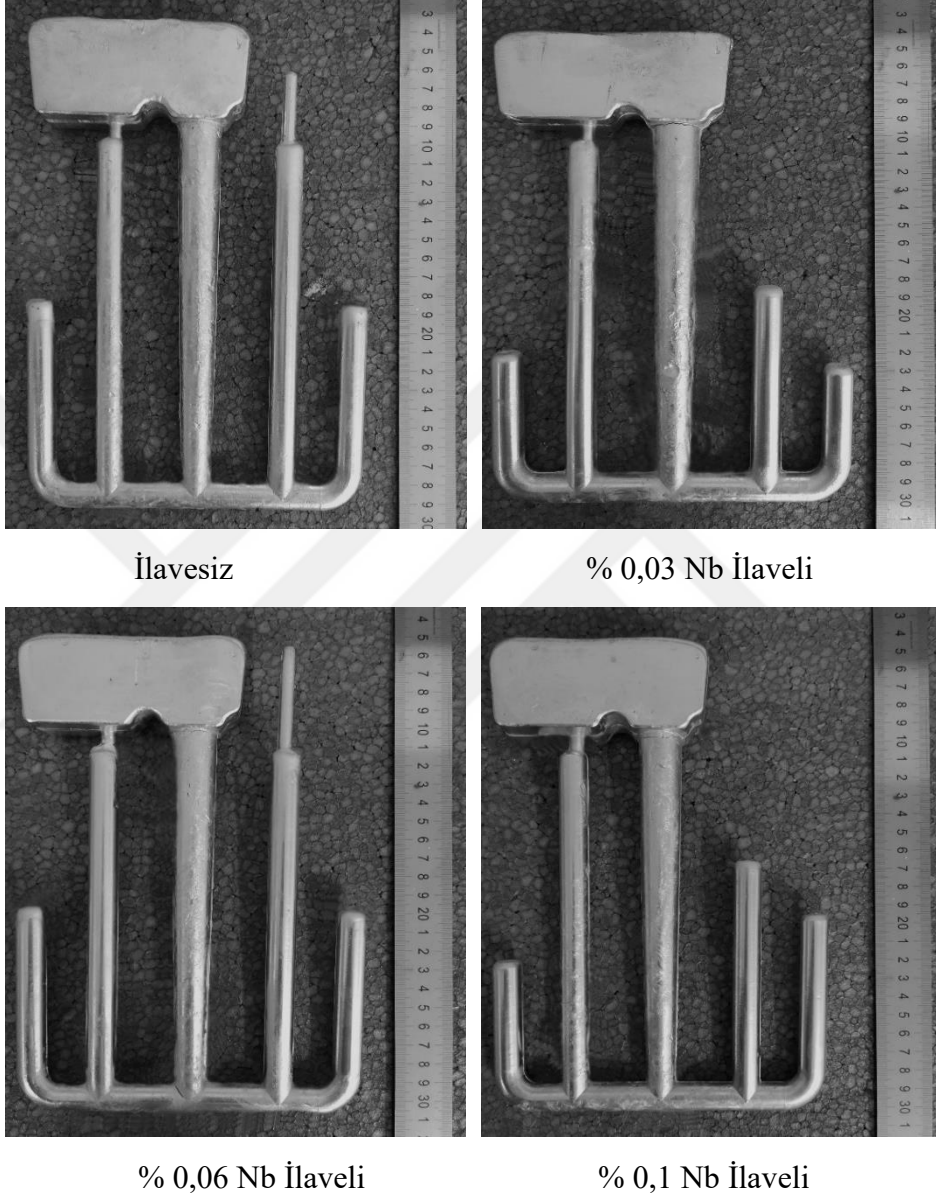
Şekil 49'da, basamak kalınlığına bağlı olarak SDAS değerlerinin nasıl değiştiği gösterilmektedir. İlavesiz A356 alaşımı için basamak kalınlığının 5 mm'den 20 mm'ye çıkmasıyla birlikte SDAS değerleri sırasıyla 11,54 μm , 17,51 μm , 20,45 μm ve 24,45 μm olarak artmıştır. Benzer bir artış trendi, % 0,03 Nb, % 0,06 Nb ve % 0,1 Nb ilaveli numunelerde de gözlemlenmiştir. Basamak kalınlığı 20 mm'den 5 mm'ye düştüğünde, soğuma hızının arttığı bilinmektedir (Shabani vd., 2011). A356 mikroyapısı üzerinde soğuma hızının etkisini incelemek amacıyla basamak kalıp kullanarak çalışmışlardır. 5, 10, 15 ve 20 mm kalınlığındaki basamaklar için elde edilen soğuma hızları sırasıyla 24, 13, 5 ve 4 K/saniye olarak belirlenmiştir. Şekil 49'da, basamak kalınlığına bağlı olarak SDAS değerlerinde bir azalma olduğu gözlemlenmektedir, bu durum soğuma hızının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Yukarıdaki bulgular, önceden yapılan soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkisine yönelik çalışmalarla uyumludur (Bae, & Jeon, 2019). 5, 10, 15 ve 20 mm kalınlıklarında döküm yapmak için kum kalıp kullanmışlardır ve böylelikle soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu kalınlıklara karşılık gelen soğuma hızları sırasıyla 1,9, 0,8, 0,5 ve 0,3 K/saniye olarak ölçülmüştür. Bu soğuma hızına karşılık gelen SDAS değerleri ise sırasıyla 30, 40, 55 ve 70 μm olarak belirlenmiştir (Sheykh-Jaberi vd., 2019). Soğuma hızının A356 mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırmıştır. Yaptıkları çalışmada, 1,8, 0,12 ve 0,08 K/saniye soğuma hızına karşılık gelen SDAS değerleri sırasıyla 43, 90 ve 124 μm olarak belirlenmiştir. (Khakzadshahandashti vd., 2019). 4 farklı kalınlığa sahip basamak kalıplara A356 dökümü gerçekleştirmişlerdir (basamak kalınlıkları 5,8 mm olarak artmaktadır). Basamak kalınlığının azalmasıyla birlikte SDAS değerleri sırasıyla 75, 55, 45 ve 33 μm olarak azalmaktadır.

Şekil 50'de, model kesit kalınlığına bağlı olarak SDAL değerlerindeki değişim gösterilmektedir. İlavesiz A356 alaşımı için 5, 10, 15 ve 20 mm kalınlıktaki basamaklara denk gelen SDAL değerleri sırasıyla 48 μm , 58 μm , 68 μm ve 82 μm olarak ölçülmüştür. Benzer bir artış trendi, % 0,03 Nb, % 0,06 Nb ve % 0,1 Nb ilaveli numunelerde de gözlemlenmiştir. Örneğin 0,1 Nb ilaveli basamak kalıbı dökümü için SDAL değerleri 54, 66, 67 ve 70 μm olarak ölçülmüştür. Soğuma hızının artması (basamak kalınlığının azalması) ile beraber SDAL değerlerinde azalma olmuştur.

3.5. MEKANİK TEST SONUÇLARI

3.5.1 Çekme Test Sonuçları

Mekanik kalıplara A356 ilavesiz ve değişen oranlarda % Nb ilave edilerek çekme test kalıba döküm yapılmıştır. Bu dökümlerinden çekme test ve sertlik sonuçlarını incelemeleri için numuneler alınmıştır. Şekil 51’de çekme kalıbı döküm görüntüsü verilmiştir.



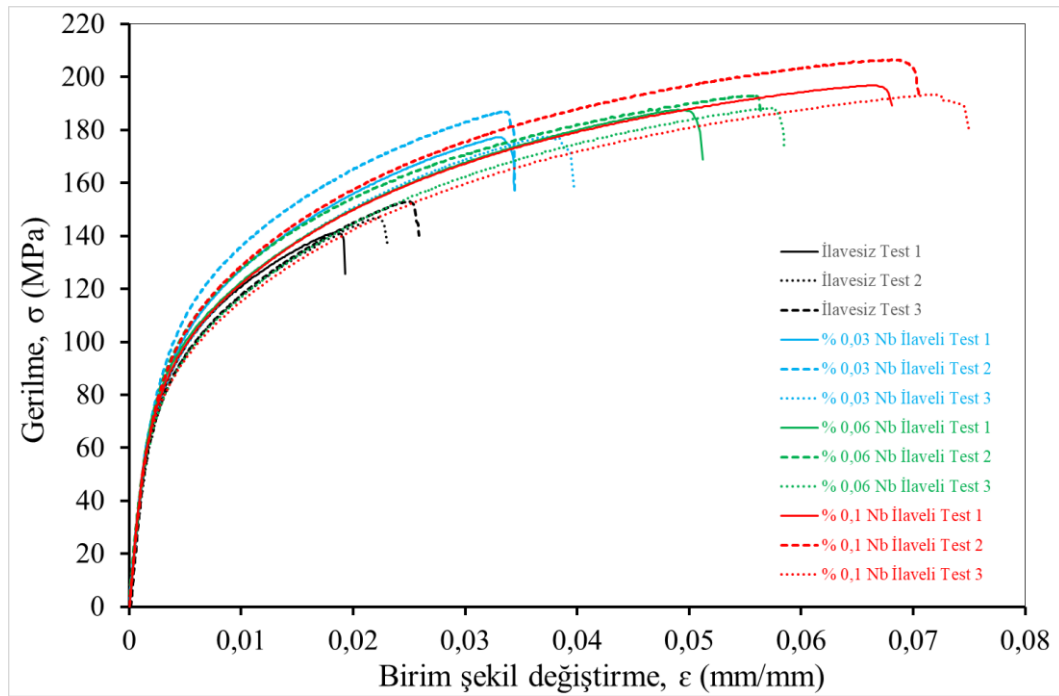
Şekil 51: Çekme Kalıbı Döküm Numuneleri Görüntüleri

Deney kapsamında döküm numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testleri ve sertlik testleri yapılmıştır. Deney numunelerine ait çekme test sonuç değerleri Tablo 14’de verilmiştir. Her bir döküm için en az 3 numune olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Tabloda verilen değerler ortalama değerlerdir.

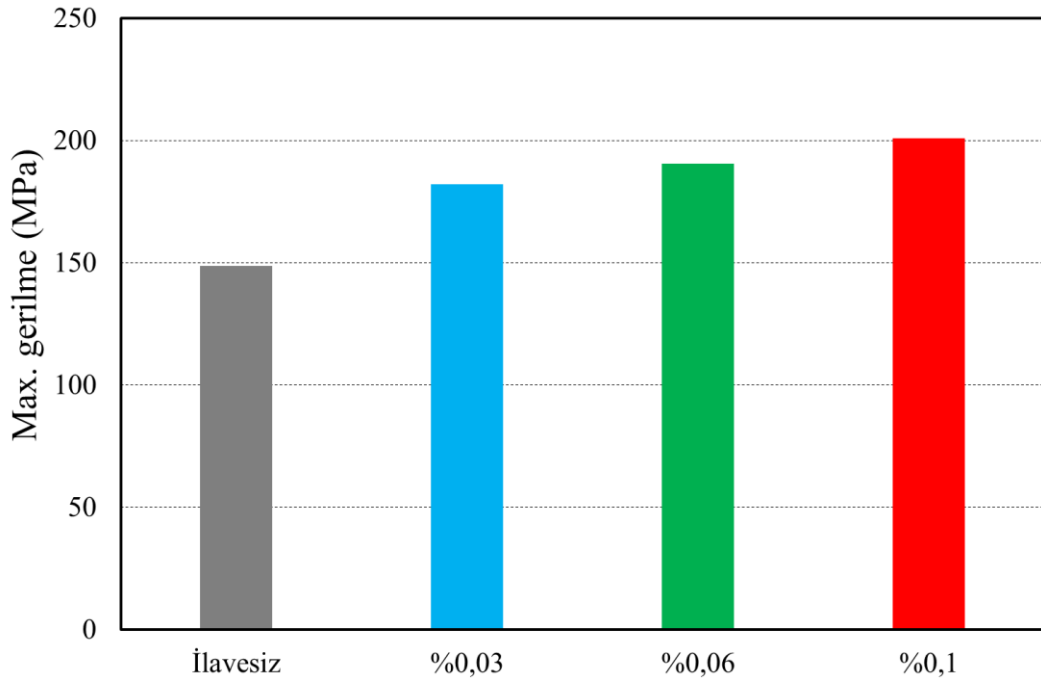
Tablo 14: Çekme Test Deneyi Sonuçları

Numune Adı	Maksimum gerilme (MPa)	Akma Mukameveti (MPa)	% uzama	Young Modülü (Gpa)	Tokluk (kJ/m ³)
İlavesiz	148,657	90,299	2,355	44,117	2713,831
%0,03 Nb ilaveli	182,206	98,778	3,707	43,506	5239,651
%0,06 Nb ilaveli	190,424	94,973	5,617	42,394	8537,535
%0,1 Nb ilaveli	200,937	93,417	7,215	44,650	11654,705

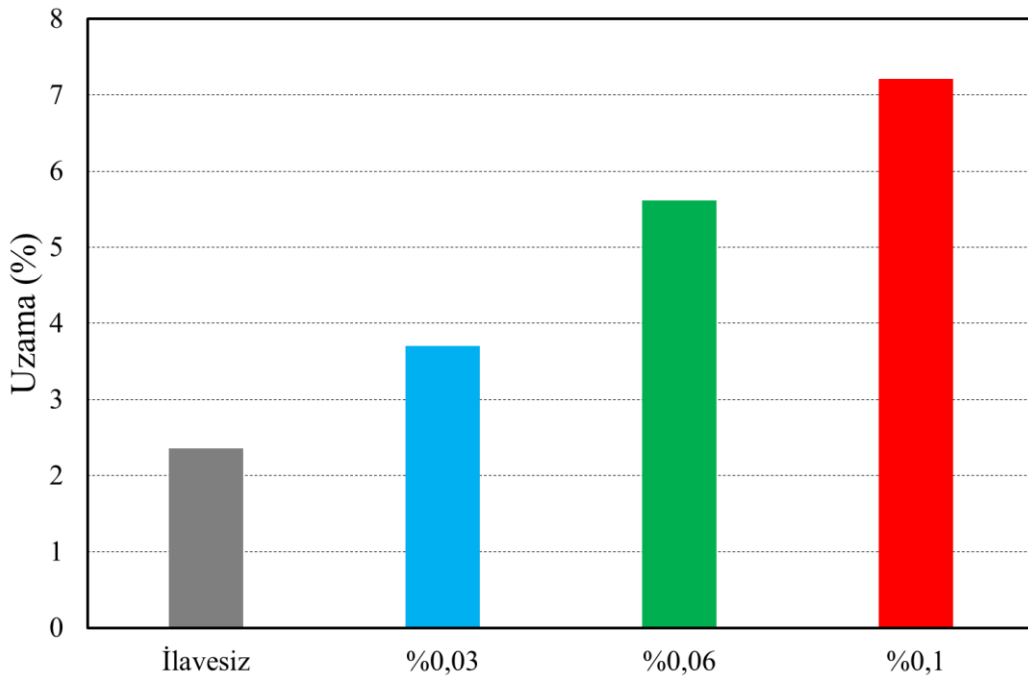
Tablo 14’de maksimum çekme gerilmesi, akma mukavemeti, % uzama, young modülü ve tokluk değerleri görülmektedir. Değerler incelendiğinde çekme gerilmesi değerlerinin ilavesiz dökümlerde 148 MPa, % 0,03 Nb ilavesinde 182 MPa, % 0,06 Nb ilavesinde 190 MPa ve % 0,1 Nb ilaveli dökümlerde de 200 MPa değerlerine kadar artış gösterdiği gözlenmiştir. Akma mukavemeti açısından sonuçlarda ilave ile doğrudan ilişkili bir durum tespit edilmemiş olup ortalama 90-98 MPa arasında değerler ölçülmüştür. % uzama değerleri incelemelerinde de Nb ilavesinin olumlu yönde etkisi gözlenmiştir. Sonuçlar ilavesiz dökümde % 2,355 iken Nb ilavesine bağlı olarak artış göstererek sırasıyla % 3,707, % 5,617 ve % 7,215 şeklindedir. Tokluk değerleri değerlendirildiğinde Nb ilavesinin alaşıma olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir. İlavesiz A356 alaşımı dökümlerinde tokluk değeri 2713 kJ/m³ iken Nb ilavesi ile artış göstererek % 0,1 Nb ilaveli dökümde 11654 kJ/m³ değerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Şekil 52’de gerilme birim şekil değişimine ait grafikler verilmiştir.

**Şekil 52:** Döküm Numunelere Gerilme-Birim Şekil Değişimi Grafikleri

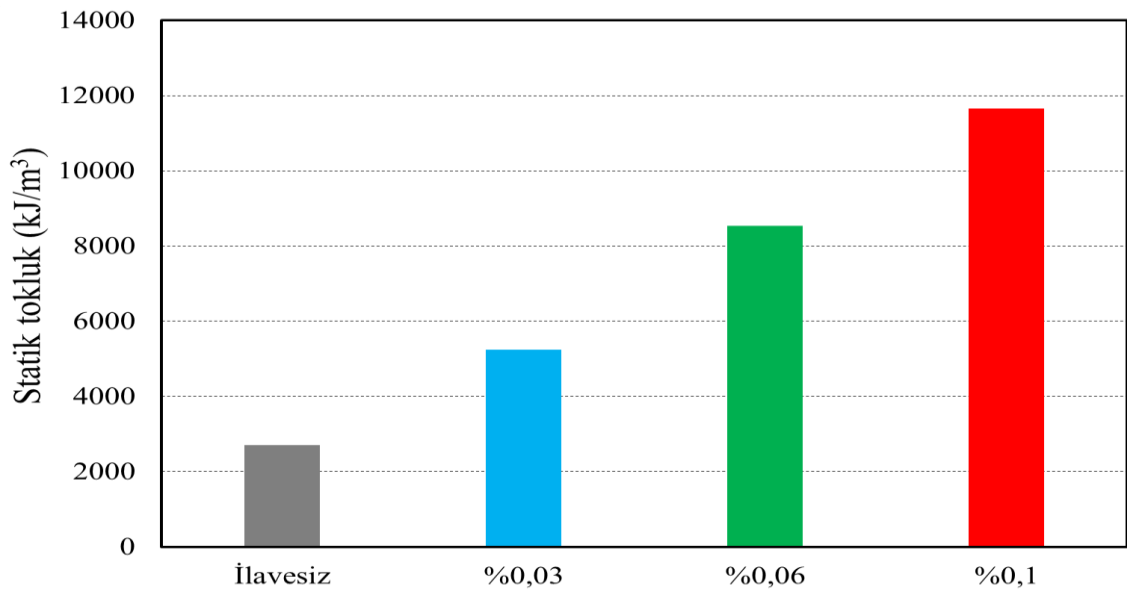
Şekil 52’de verilen grafik sonuçları incelendiğinde Nb ilavesi ile gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki etkiler bariz bir şekilde gözlenmektedir. Çekme dayanımı değerleri Nb ilaveli tüm dökümlerde ilavesiz olarak yapılan A356 döküme nazaran artış göstermiştir. Nb ilave oranının artması ile birlikte de yine değerlerin arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar A356 alüminyum döküm alaşımında Nb ilavesinin çekme gerilmesine olumlu yönde etki ettiğini göstermiştir. Şekil 50’de çekme testinden elde edilen maksimum gerilme, Şekil 54’de % uzama, Şekil 55’te tokluk değerlerinin Nb ilavesi ile değişimi grafik olarak verilmiştir.



Şekil 53: Nb İlavesine Bağlı Olarak Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi



Şekil 54: Nb İlavesine Bağlı Olarak % Uzama Değerleri Değişimi



Şekil 55: Nb İlavesine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi

Şekillerde verilen grafikler incelendiğinde Nb ilavesinin A356 alüminyum alaşımının dökümünde olumlu yönde etki ettiği anlaşılmaktadır. Nb ilave miktarında artışla birlikte sonuçlarında olumlu yönde değişime uğradığı anlaşılmaktadır (Aydogan vd 2022). Nb ilaveli çalışmalar incelendiğinde % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Al-3Nb-0,55B master alaşımı ilavesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Mekanik değerleri üzerine elde ettiği sonuçlar değerlendirildiğinde Nb ilavesinin tane inceltici bir etkiye sahip olduğu ve buna bağlı olarak katılaşma hızının artması ile birlikte mekanik değerlerde de artış olduğunu belirtmiştir (Dispınar, & Sahin, 2023). Yapmış oldukları çalışmada A356 alüminyum alaşımına Eu elementi ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda ilgili elementin ilavesi ile tane inceltici etki göstermesine bağlı olarak mekanik değerlerde artış olduğunu belirtmişlerdir (Narducci Jr. vd., 2021). Yapmış oldukları çalışmada Nb ilavesinin tane inceltici mekanizması açıklanmış ve tane inceltici olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır. İlgili çalışmada Nb ilavesi ile ortaya çıkan bileşiklerin tane sınırlarında çökeldiği ve bu sayede mekanik özelliklere de olumlu yönde etki ettiği ifade edilmiştir.

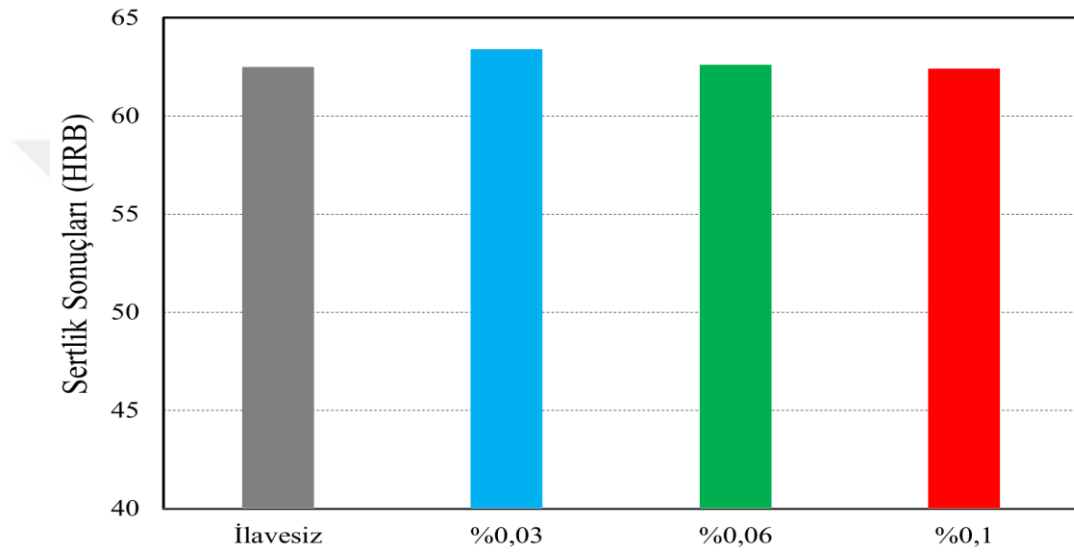
3.5.2. Sertlik Test Sonuçları

İlavesiz A356 ve değişen oranla Nb ilaveli olarak hazır olan sıvı metal dökümleri sonrası elde edilen test numunelere ait sertlik ölçümleri oda sıcaklığında Rockwell sertlik yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye kullanılmış olup 1 kgf ön yük ve 10 kgf toplam yük uygulayarak her bir test numuneden en az 10'er adet alınmış olup, bu ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Tablo 15'te döküm deney numunelerinden elde edilen sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 15: Sertlik Ölçüm Sonuçları

Numune adı	Sertlik (HRB) değerleri					
İlavesiz	62,5	62,1	65,2	56,3	65,2	63,8
% 0,03 Nb ilaveli	66,4	64,2	64,7	63,3	59,8	62,3
% 0,06 Nb ilaveli	58,6	61,5	66,2	63,4	66,9	59,4
% 0,1 Nb ilaveli	61,4	62,7	58,3	64,5	64,1	63,6

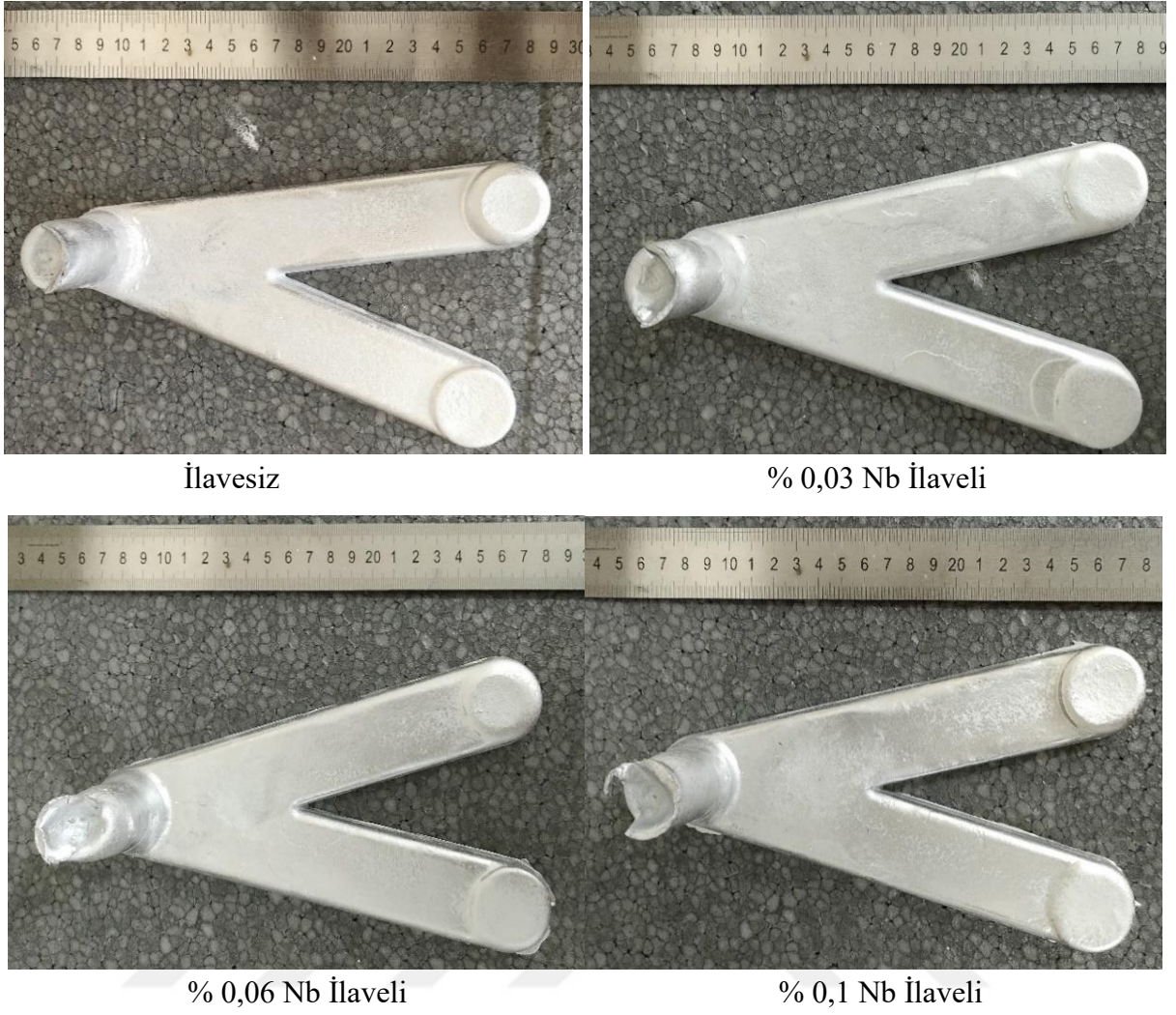
Tablo 15’te verilen değerler incelendiğinde elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu ve Nb ilavesine bağlı olarak anlamlı bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Nb ilavesinin sertlik sonuçlarına somut bir etkisi olmadığı ilgili sonuçlardan tespit edilmiştir. Şekil 56’da elde edilen sonuçların değişen Nb oranına bağlı olarak grafik gösterimi verilmiştir.

**Şekil 56: Nb İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Testi Sonuçlarının Grafik Gösterimi**

Şekil 56’da verilen sonuçlar incelendiğinde ortalama sertlik değerlerinin ilavesiz dökümde 62,5 HRB, % 0,03 Nb ilaveli dökümde 63,4 HRB, % 0,06 Nb ilaveli dökümde 62,6 HRB, % 0,1Nb ilaveli dökümde 62,4 HRB olduğu görülmektedir. Sonuçların ortalama 62-64 HRB arasında değiştiği ve Nb ilavesinin sertlik üzerinde etkin olmadığı görülmüştür.

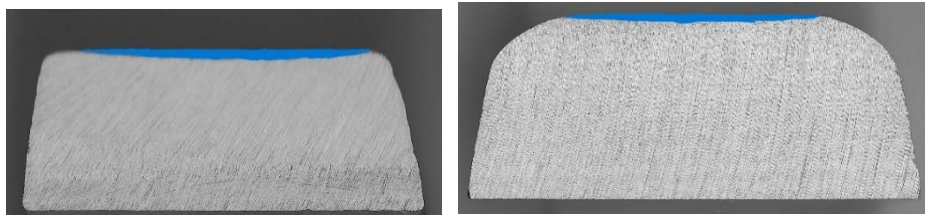
3.6. ÖRDEK AYAĞI KALIBI % ÇEKİNTİ SONUÇLARI

Bu başlıkta yapılan deneysel ördek ayağı döküm çalışmalarından elde edilen ördek ayağındaki % çekinti deney sonuçları değerlendirilecektir. Sıvı metal döküm deneyler için daha önceden hazırlanmış olan ördek ayağı kalıbına, deney parametrelerinde belirtilen döküm yöntemlerine göre ördek ayağı kalıbına yaklaşık olarak 350 gr eriyik alan ve 200 °C ısıtılmış kalıba döküm yapılmıştır. Şekil 57’de resimlerde ördek ayağı kalıbıyla yapılan dökümlerden elde edilen numune verilmiştir.



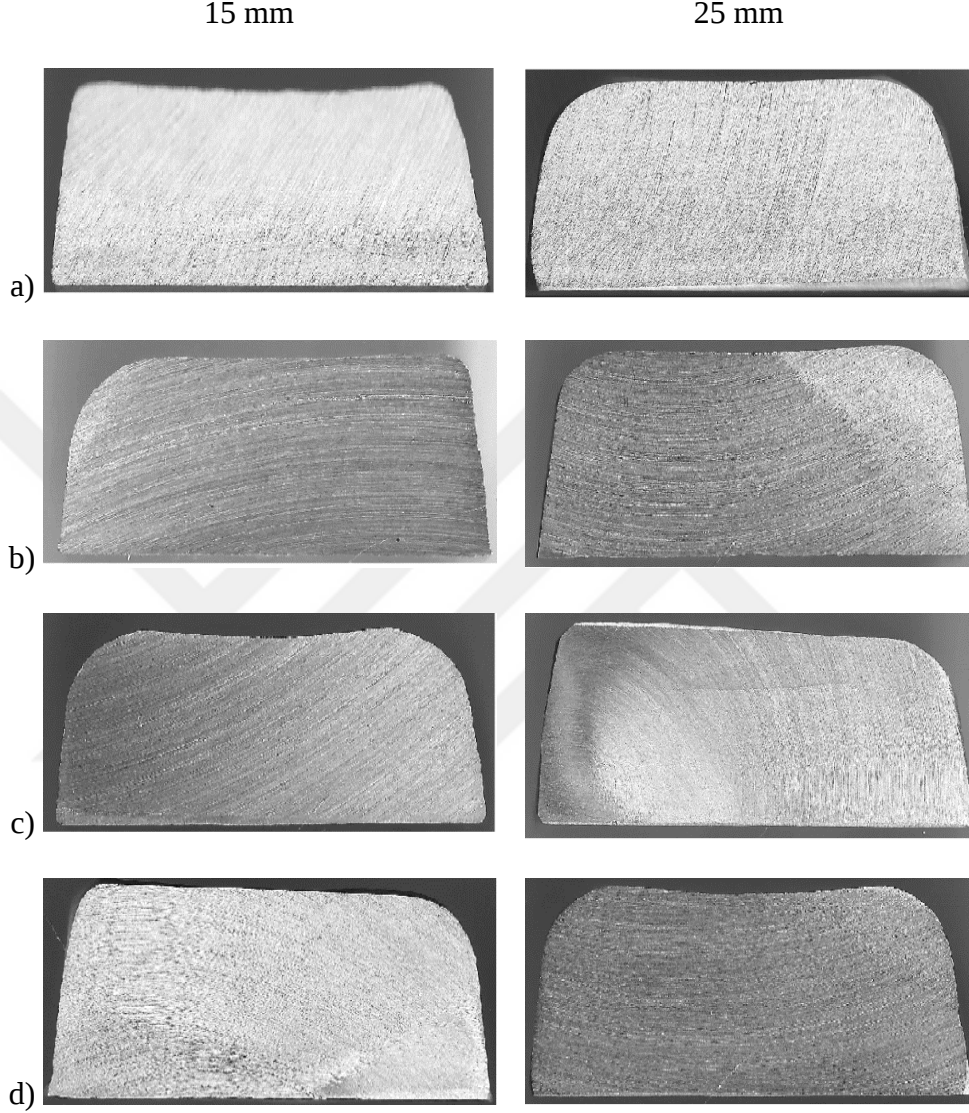
Şekil 57: Ördek Ayağı Kokil Kalıba Döküm Numunesi Örnek Görüntü

Ördek ayağı kokil kalıba döküm numunelerin uç kısımlarındaki çekinti bölgesinden ikiye kesilerek kesit görüntülerinden çekinti incelemelerine gerçekleştirilmiştir. Şekil 57’de verilen ördek ayağı numunesinin uç kısımlarında bulunan 15 mm ve 25 mm kesit kalınlığındaki yuvarlak kısımlardan % çekinti miktarını ölçümlerin tespitini yapmak için Şekil 58’de gösterildiği gibi kesit alınmıştır. Değişen oranlarda sıvı metal döküm deneylerinden elde edilen numune uçları kesilip metalografik işlemlerden sonra imaj analizi programı ile % çekintileri miktarı hesaplanmıştır. Şekil 58’de çekinti boşluğunun örnek bir görüntü verilmiştir. Resimde de görüldüğü çekinti olan kısım işlenerek toplam alan içerisindeki % çekinti miktarı belirlenmiştir.



Şekil 58: Ördek Ayağı Numunesinin A) 15 mm Çekinti Boşluğu, B) 25 mm Çekinti Boşluğu

İlavesiz ve değişen % oranlarda ilaveli dökümlerden elde edilen kesit görüntüleri Şekil 59'da verilmiştir. a) İlavesiz 15 mm ve 25 mm döküm sonuçları, b) % 0,03 Nb ilaveli 15 mm ve 25 mm döküm sonuçları, c) % 0,06 Nb ilaveli 15 mm ve 25 mm döküm sonuçları, d) % 0,1 Nb ilaveli 15 mm ve 25 mm döküm sonuçları numune kesit görüntüsünün sonuçları verilmiştir



Şekil 59: Ördek Ayağı Döküm Numunesinin 15 mm ile 25 mm Çekinti Boşluğu,

Şekil 59'da verilen görüntü incelendiğinde ilavesiz ve değişen Nb ilavesi ile yapılan dökümlerde çekinti miktarlarında benzer sonuçlar olduğu anlaşılmaktadır. Nb ilavesinin beslenebilirlik üzerinde olumlu etkisi olduğu düşünülmekte beraber ortaya çıkan çekinti miktarların da bariz farklar mevcut değildir. Beslenebilirlik üzerine yapılan çalışmalarda tane boyutu beslenebilirlik üzerinde en önemli etkinin sıvı metal temizliği olduğu düşünülmektedir. Daha sonra konu ile ilgili yapılan araştırmalarda sıvı metal temizliğini döküm parça içerisinde mikro porozite riskini azalttığını tespit edilmiş ve buna bağlı olarak yüzeyde çöküntünün fazla olduğu gözlemlenmiştir (Liu, & Samuel, 1998). Konuyla alakalı olarak yapılan diğer

Çalışmaların değerlendirilmesi yapıldığında ise, sıvı metal içerisinde ortaya çıkan safsızlıklara bağlı olarak temizleme olmadan yapılan dökümlerde numunede mikro porozitenin yapıda dağılmış bir şekilde olduğundan yüzeyde çekinti miktarının daha az olduğu tespit edilmektedir (Sabau & Viswanathan 2002). Ayrıca kesit görüntüleri incelemesi yapıldığında aynı döküm şartları sağlayan kalıpta meydana gelen küçük ve büyük numunelerdeki çekinti miktarlarının karşılaştırıldığında modülü büyük olan 25 mm yükseklikteki numunede daha fazla çöküntü karşımıza çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durumun ise, katılaşma zamanı ve modül kriteri ile ilgili olduğu düşünülmektedir (Arslan, & olak, 2018; Ayran, & Pekedis, 2019). Tablo16’da kesit görüntülerin imaj analizi yazılımı ile yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 16: rdek Ayağı Numuneleri % ekinti Miktarı İmaj Analiz Sonuçları

Alaşım İlave Oranı	İlavesiz (356)	% 0,03 Nb İlaveli	% 0,6 Nb İlaveli	% 0,1 Nb İlaveli
15 mm yükseklik numune	% 0,65	% 0,73	% 0,76	% 0,82
25 mm yükseklik numune	% 1,43	% 1,54	% 1,62	% 1,68

Tablo 16’da verilen ördek ayağı kalıbı imaj sonuçları incelendiğinde ilavesiz dökümlerde küçük numunede ise % 0,65 büyük numunede ise % 1,43 çekinti miktarı tespitleri yapılmıştır. % 0,03 Nb ilaveli dökümde küçük numunede ise % 0,73 ve büyük numunede ise % 1,54 çekinti miktarı ölçülmüştür. Sırasıyla % 0,06 Nb ilaveli dökümde değerleri ise % 0,76 ve % 1,62 olarak karşımıza çıkarken, Nb ilavesinin artması ile birlikte çekinti miktarları artış göstererek küçük numunede ise % 0,87 ve büyük numunede ise % 1,68 olarak ölçülmüştür. Tablo 16’da verilen çekinti sonuçlarında bariz olmamakla birlikte Nb ilavesine bağlı olarak çekinti miktarlarında Nb ilavesi ile artış görülmektedir. Bu durum Nb alaşım elementi ilavesinin tane inceltici etkisi ile ilişkilendirilmektedir. Tane inceltici ilavesi ile yapılan dökümlerde beslenebilirliğin arttığı literatürde oldukça kabul gören bir yaklaşım olarak bilinmektedir (olak, 2019; olak, & Kayıkcı, 2009; olak, & Kayıkcı, 2009).

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının sonuçlar kısmında, A356 alüminyum alaşımına ilavesiz ve değişen oranlarda % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb ilavesi sonrasında kokil kalıplara döküm yapılmıştır. Nb ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde etkisi değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1- Dökümlerde gazdan kaynaklı hataların ortadan kaldırılması amacıyla azot gazı ile lans yardımıyla 5 dk sıvı metal temizliği işlemleri uygulanmıştır. RPT deney numunelerinde elde edilen sonuçlar kapsamında numune yüzeylerinde çöküntü olduğu ve kesit yüzey incelemelerinde tüm deneylerde sıvı metal kalitesinin uygun olduğu tespit edilmiştir

2- RPT döküm numune yoğunluk ölçüm sonuçlarına bağlı olarak yapılan ölçümlerde tüm deney numunelerinde hesaplanan gözenek değerleri % 0,5'in altında olduğu tespit edilmiştir. İlgili değerler numune kesit yüzey incelemeleri sonucu RPT testine göre sıvı metal kalitesinin uygun olduğunu teyit etmektedir.

3- Sıvı metal temizliğine yönelik olarak yapılan K - mold kalıbı dökümlerinde numune kırık yüzey görüntüleri ve ölçümlere göre tüm döküm deneylerinde elde edilen K değerleri birbirine yakın ve 1 değerinin altında olduğu görülmüştür.

4- Sıvı metal temizliğine yönelik K mold değerleri ve RPT sonuçları incelendiğinde döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşumunu engellemek adına sıvı metal temizleme işleminin yeterli oranda sağlandığı anlaşılmaktadır. Böylece dökümlerde oluşması muhtemel gözeneklerin gaz kaynaklı olmayacağı ve olması halinde yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözenekleşmesi nedeni ile olabileceği anlaşılmıştır.

5- Nb ilavesinin akıcılık üzerine etkisinin tespit edilmesi için spiral kalıp ve kesit kalınlıkları değişen 4 kollu kalıba dökümler yapılmıştır. Akıcılık döküm numune sonuçları incelendiğinde her iki kalıp numunelerinde de Nb ilavesine bağlı olarak değişen sıvı metal ilerleme mesafeleri ortaya çıktığı görülmüştür. Kesit kalınlığı değişiminin akıcılık değerlerine etki ettiği ve kesit kalınlık artışı ile birlikte sıvı metal ilerleme mesafelerinin arttığı gözlenmiştir.

6- A356 alaşımı ilavesiz olarak yapılan dökümünde 2 mm kalınlığındaki kanal 34 mm, 4 mm kanalda 35 mm, 6 mm kanalda 128 mm, 8 mm kanalda sıvı metal kalıp boşluğu kadar ilerleyerek 300 mm ilerleme mesafesi ölçülmüştür. % 0,03 Nb ilaveli dökümde sırasıyla 2 mm, 50 mm, 70 mm ve 295 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir. % 0,06 Nb ilaveli dökümde elde edilen değerler ise 2 mm, 35 mm, 65 mm ve 215 mm olarak ölçülmüştür. % 0,1 Nb ilaveli döküm deneyinde ise 10 mm, 54 mm, 68 mm ve 255 mm olduğu ölçülmüştür.

7- Spiral kalıba dökümde sıvı metal ilerleme mesafeleri incelendiğinde ilavesiz dökümde 255 mm, % 0,03 Nb ilaveli dökümde 146 mm, % 0,06 Nb ilaveli dökümde 96 mm ve % 0,1 Nb ilaveli dökümde 84 mm olduğu tespit edilmiştir.

8- Akıcılık testine ait yapılan çalışmalar sonucunda Nb ilavesi ile sıvı metal ilerleme mesafelerinde düşüş ve akıcılıkta olumsuz yönde etki ettiği görülmüştür.

9- A356 alüminyum alaşımının farklı kesit kalınlıklarına sahip bölgelerinden ve değişen Nb ilavelerine göre mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı resimleri incelendiğinde kesit kalınlığının artmasına bağlı olarak tane yapılarının ve yapıda ortaya çıkan Si kristallerinin daha da büyük olduğu gözlenmektedir. Yapıda kalınlık arttıkça mikro yapıdaki soğumaya bağlı olarak tanelerin büyüdüğü ve değişen oranlarda % Nb ilavesi ile mikro yapıların küçüldüğü gözlenmiştir. Ayrıca yapıda Nb ilavesine bağlı olarak yapıda değişimler tespit edilmiştir.

10- A356 alüminyum alaşımının ilavesiz 5 mm kalınlığındaki basamağın SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 11,54 μm ve 47,8 μm olarak ölçülmüştür. % 0,03 Nb ilaveli 5 mm kalınlığındaki numunenin SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 13,24 μm ve 47 μm olarak ölçülmüştür. % 0,06 Nb katkılı numunenin SDAS ve SDAL değerleri ise sırasıyla 14,5 μm ve 43 μm olarak ölçülmüştür. Nb oranının % 0,06'ya kadar artırıldığı numunelerde SDAS değerlerinde artış, SDAL değerlerinde ise azalma gözlemlenmiştir. Diğer taraftan % 0,1 Nb içeren 5 mm kalınlığındaki basamağın SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla 12,4 μm ve 53,6 μm olarak ölçülmüştür. Gözlemlenebileceği gibi, Nb oranının % 0,06'dan % 0,1 Nb'ye çıkmasıyla birlikte SDAS değerlerinde azalma ve SDAL değerlerinde artış meydana gelmiştir.

11- İlavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkısı olan 10 mm kalınlığındaki basamağın SDAL değerleri sırasıyla 17,51 μm , 18 μm , 17,63 μm ve 15,53 μm olarak ölçülmüştür. Diğer yandan SDAL değerleri ise sırasıyla 58,4 μm , 61,6 μm , 58,6 μm ve 65,8 μm olarak ölçülmüştür. 10 mm kalınlığındaki numunede, en büyük SDAS değeri 18 μm ile % 0,03 Nb ilaveli mikroyapıda ölçülmüş olup, SDAL değerleri arasında herhangi bir belirgin yönelim gözlenmemiştir

12- 15 mm kalınlığındaki A356 basamağının Nb ilave oranlarına bağlı olarak mikroyapısındaki (dentrit yapıdaki) değişimler gözlenmiştir. 15 mm kalınlığındaki basamağın ilavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkı oranlarına sahip mikroyapıları için SDAS değerleri sırasıyla 20,46 μm , 21,13 μm , 20,46 μm ve 17,93 μm olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte diğer taraftan SDAL değerleri sırasıyla 68 μm , 61 μm , 60,8 μm ve 66,8 μm olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde 10 mm kalınlığındaki numunelere göre, % 0,03

Nb ilaveli numune en yüksek SDAS değeri olan 21,13 μm sergilemiştir. Ayrıca SDAL değerlerinde % Nb oranının artmasıyla azalma gözlenmiştir.

13- 20 mm kalınlığındaki basamak numunelerinde ilavesiz, % 0,03, % 0,06 ve % 0,1 Nb katkı oranlarına sahip mikroyapılar için SDAS değerleri ise sırasıyla 82 μm , 66 μm , 72 μm ve 70 μm olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, SDAL değerleri sırasıyla 24,47 μm , 21,06 μm , 26,2 μm ve 22,33 μm olarak ölçülmüştür.

14- Ördek ayağı döküm numunelerin uç kısımlarındaki çekinti bölgesinden ikiye kesilerek kesit görüntülerinden çekinti incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ilavesiz ve değişen Nb ilavesi ile yapılan dökümlerde çekinti miktarlarında benzer sonuçlar olduğu anlaşılmaktadır. Nb ilavesinin beslenebilirlik üzerinde olumlu etkisi olduğu düşünülmekte beraber ortaya çıkan çekinti miktarların da bariz farklar mevcut değildir. Beslenebilirlik üzerine yapılan çalışmalarda tane boyutu beslenebilirlik üzerinde en önemli etkinin sıvı metal temizliği olduğu düşünülmektedir. Kesit görüntüleri incelemesi yapıldığında aynı döküm şartlarına sahip kalıpta meydana gelen küçük ve büyük numunelerdeki çekinti miktarları karşılaştırılması yapıldığında modülü büyük olan 25 mm yükseklikteki numunede daha fazla çöküntü karşımıza çıktığı rastlanmaktadır. Bu durum katılaşma zamanı ve modül kriteri ile ilgili olduğu rastlanmaktadır.

15- Ördek ayağı kalıbında ilavesiz döküm larde küçük numunede % 0,65 büyük numunede % 1,43 çekinti miktarı tespit edilmiştir. % 0,03 Nb ilaveli dökümde küçük numunede % 0,73 ve büyük numunede % 1,54 çekinti miktarı ölçülmüştür. Sırasıyla % 0,06 Nb ilaveli dökümde değerler % 0,76 ve % 1,62 olarak karşımıza çıkarken, Nb ilavesinin artması ile birlikte çekinti miktarları artış göstererek küçük numunede % 0,87 ve büyük numunede % 1,68 olarak ölçülmüştür. Çekinti sonuçlarında bariz olmamakla birlikte Nb ilavesine bağlı olarak çekinti miktarlarında Nb ilavesi ile artış görülmektedir. Bu durum Nb alaşım elementi ilavesinin tane inceltici etkisi ile ilişkilendirilmektedir.

16- Döküm numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çekme testleri ve sertlik testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre çekme gerilmesi değerlerinin ilavesiz dökümlerde 148 Mpa, % 0,03 Nb ilavesinde 182 Mpa, %0,06 Nb ilavesinde 190 Mpa ve % 0,1 Nb ilaveli dökümlerde de 200 Mpa değerlerine kadar artış gösterdiği gözlenmiştir. Akma mukavemeti açısından sonuçlarda ilave ile doğrudan ilişkili bir durum tespit edilmemiş olup ortalama 90-98 Mpa arasında değerler ölçülmüştür. % uzama değerleri incelemelerinde de Nb ilavesinin olumlu yönde etkisi gözlenmiştir. Sonuçlar ilavesiz dökümde % 2,355 iken Nb ilavesine bağlı olarak artış göstererek sırasıyla % 3,707, % 5,617 ve % 7,215 şeklindedir. Tokluk değerleri değerlendirildiğinde Nb ilavesinin alaşıma olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir. İlavesiz A356 alaşımı dökümlerinde tokluk değeri 2713

kJ/m³ iken Nb ilavesi ile artış göstererek % 0,1 Nb ilaveli dökümde 11654 kJ/m³ değerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir.

17- Ortalama sertlik değerlerinin ilavesiz dökümde 62,5 HRB, % 0,03 Nb ilaveli dökümde 63,4 HRB, % 0,06 Nb ilaveli dökümde 62,6 HRB, % 0,1 Nb ilaveli dökümde 62,4 HRB olduğu görülmektedir. Sonuçların ortalama 62-64 HRB arasında değiştiği ve Nb ilavesinin sertlik üzerinde etkin olmadığı görülmüştür.



KAYNAKÇA

- Ak G., (2022). A356 alüminyum alaşımlarında kullanılan al-10sr-1ti-0.2b dörtlü master alaşımı, al-5ti-1b ve al-15sr master alaşımlarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi yüksek lisans tezi
- Al_Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5/3, 525–532.
- Anık, S., 1960, Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı, ITÜ Yayınları, İstanbul.
- Aran, A., (1999). Metal Döküm Teknolojisi, Birsen Yayınevi, İstanbul,
- Aybarç, U., Kara, A., Çubuklusu H. E., & Çe, Ö. B. (2017) Sıcak İzostatik Preslemenin A356 Alaşımının Metalürjik Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32:4 sf. 1327-1335
- Aydoğan, F., vd., (2022). Mechanical Property Comparison of Al11Si Wheels Grain Refined by Ti, Nb and MTS. Archives of Foundry Engineering, 22
- Aydoğan, F., vd., (2022). Weibull analysis evaluation of Ti, B, Nb and MTS grain refined Al11Si alloy. Materials Chemistry and Physics, 287: p. 126264.
- Ayran, E., & Pekedis, M., (2019). Alüminyum Alaşımlı Otomobil Jantlarında Deneysel Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11 (2), 663-670.
- Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G. & Güler, K.A., 380 alaşımlarının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane inceltmenin etkisi
- Birol, Y., (2013). *Impact of grain size on mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2013. 559: p. 394-400.
- Campbell J., (2003). Castings. Butterworth Heinemann
- Çolak M., & Arslan İ., (2018). Kokil Kalıp Dökümde Alüminyum Alaşımların Beslenmesi Üzerinde Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığının Etkisinin Araştırılması. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 131-140., Doi: 10.31466/kfbd.463100.
- Çolak M., & Kayıkçı, R., (2009). Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme, APJES, SA Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 13. Cilt, 1. Sayı, s. 11-17,
- Çolak, M. (2015). Alüminyum Döküm Alaşımlarının Katılaşması Sırasında Yarı- Katı Bölge Sıvı Geçirgenliğinin Modellenmesi. Sakarya Üniversitesi (Doktora Tezi).
- Çolak, M. (2019). Modification of eutectic Al–Si alloys by Sr and CuSn5. Materials Research Express, 6(10), 1065a2.
- Çolak, M., & Kayıkçı, R. (2009). AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Semp.(IATS'09), 13-15.
- Çolak, M., & Kayıkçı, R., (2009). A356 döküm alaşımında elektromanyetik karıştırmanın mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15, 3, 345-351.
- Dispınar, D., (2006) Determination of metal quality of aluminium and its alloys, University of Birmingham.
- Dispınar, D., Uludağ, M., Çetin, R., & Tiryakioğlu M., (2018). “The Effects of Degassing, Grain Refinement & Sr-Addition on Melt Quality-Hot Tear Sensitivity Relationships in

- Cast A380 Aluminum Alloy.” *Engineering Failure Analysis* 90(October 2017):90–102. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.025.
- Divandari, M. and Campbell, J., 2004. Oxide film characteristics of Al–7Si–Mg alloy in dynamic conditions in casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 17 (3), 182-187.
- E. Uslu, & S. H. Yetgin, (2021)“ A360 Alüminyum döküm alaşımasının kum kalına dökümünde mekanik titreşim, eğimli, soğutma plakası ve tane incelticinin etkisinin incelenmesi,” *TURAN: Stratejik Arastirmalar Merkezi*, 13(52), 228-234, 2021
- Erzi, E., vd., (2019). Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: supplier’s quality index (SQI). *Metals*, 9(9): p. 957.
- Eti Alüminyum. (2023). Dökümhane Ürünleri – Eti Alüminyum. Tarihinde 11,05,2023, adresinden erişildi <http://www.etialuminyum.com/urunler/hamaluminyum-urunler/dokumhane-urunleri/>
- Ferro, R., & Saccone, A., (2008). *intermetalik chermistry*, Elsevier Pergamon Materials Series,
- G. Ridvan, A. Serhat, A. Kisasoz, K. A. Guler, & A. Karaaslan, (2018) “Influence of T6 heat treatment on A356 and A380 aluminium alloys manufactured by thixoforging combined with low superheat casting,” *Transactions of nonferrous metals society of China*, 28(3), 385-392, 2018. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64672-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64672-2)
- Gruzleski, J.E. & Closset, B.M., (1990). The treatment of liquid aluminum-silicon alloys, American Foundrymen’s Society. Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 1-35
- Güler, M., 2017. Alüminyum alaşımlarında inklüzyon çeşitleri ve önleyici faaliyetler. *Metalurji*, 184 (07), 36-42.
- H. Sahinand & D. Dispinar, (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*, 1-10,
- Jeon, J. & D. Bae,(2019). Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 808: p. 151756.
- Jeong, G., vd., (2015) The effect of grain size on the mechanical properties of aluminum. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60.
- Karakışlak M., (1992) Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemleri, MMLT, İTÜ, Metalurji
- Kaufman, J.G. & Rooy, E.L., (2004). Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. Asm International.
- Khakzadshahandashti, A., vd., (2019). Evaluation of simultaneous effect of melt filtration and cooling rate on tensile properties of A356 cast alloy. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 16(3).
- Liu, L., & Samuel, F.H., (1998). Effect of inclusions on the tensile properties of Al–7% Si–0.35% Mg (A356.2) aluminium casting alloy. *Journal of Materials Science*, 33 (9), 2269-2281.
- Metals Handbook (1990). ASM, Metals Park, Ohio 10th Ed. Vol. 2, 1990
- Metals Handbook, (1989).Vol. 3, Alloy Phase Diagrams, Ed. ASM International Handbook Comittee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- Narducci Jr, C., vd., (2021). Effect of Nb addition on the size and morphology of the β -Fe precipitates in recycled Al-Si alloys. *Scientific Reports*, 11(1): p. 1-14.
- Narducci Jr, C., vd., (2021). Effect of Nb addition on the size and morphology of the β -Fe precipitates in recycled Al-Si alloys. *Scientific Reports*, 11(1): p. 1-14.

- Oguz,B., (1990), Demirdısı Metallerin Kaynagi Metalurji-Uygulama, Oerlikon Yayınları, _stanbul.
- Öksüz, C., (1996). Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Su verme Duyarlılığı. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi.
- Öksüzöğlu, S. (2018). Al-Si-Mg Alaşımlarında Tane İnceltme İşleminin Mekanik Özellik ve Mikro Yapı Üzerine Etkisi. Karabük Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Pazarlıoğlu, S.S., (2006) çeliklerin niobyum borür kaplanması ve özellikleri Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,
- Pazarlıoğlu, S.S., (2006) çeliklerin niobyum borür kaplanması ve özellikleri Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,
- Ramachandran, T. R., Sharma, P. K., & Balasubramanian, K., (2008). Grain Refinement of Light Alloys. 68th World Foundry Congress, 189–193.
- Ravi, K.R. Pillai, R.M., Amaranathan , K.R., Pai, B.C., & Chakraborty, M., (2008) Fluidity of aluminum alloys and composites, APJES, Journal of Alloys and Compounds 456 201–210
- Ren, Y., Ma, W., Wei, K., Yu, W., Dai, Y. & Morita, K., (2014). Degassing of aluminum alloys via the electromagnetic directional solidification. Vacuum, 109, 82-85.
- Sabau, A.S., & Viswanathan, S., (2002). Microporosity prediction in aluminum alloy castings. Metallurgical and Materials Transactions B, 33 (2), 243-255.
- Sahin, H., & Dispınar, 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, p. 1-10
- Shabani, M., vd., (2011). Solidification of A356 Al alloy: experimental study and modeling. Kovove Mater, 49: p. 253-258.
- Sheykh-Jaberi, F., vd., (2019). Comparison of the semi-solid constitutive behaviour of A356 and B206 aluminum foundry alloys. Journal of Materials Processing Technology, 266: p. 37-45.
- Smith, W. F., & Erdogan, M., (2001). Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 2, Nobel Yayın Dağıtım,(sf: 339 – 392), Ankara,
- Smith, W. F., & Erdogan, M., (2001). Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 2, Nobel Yayın Dağıtım,(sf: 339 – 392), Ankara,
- Sönmez, S. (2016). Alüminyum Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıkta Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Şensoy A. T., Çolak M., Kaymaz, İ., & Dispınar. D., (2020). “Investigating the Optimum Model Parameters for Casting Process of A356 Alloy: A Cross-Validation Using Response Surface Method and Particle Swarm Optimization.” Arabian Journal for Science and Engineering 45(11):9759–68. doi: 10.1007/s13369-020-04922
- Tamuly, R., A. Behl, & H. Borkar, (2022). Effect of addition of grain refiner and modifier on microstructural and mechanical properties of squeeze cast A356 alloy. Transactions of the Indian Institute of Metals,.75(9): p. 2395-2408.
- Tiwari, S. & Beech, J., (1978). Origin of gas bubbles in aluminium. Metal Science, 12 (8), 356-362.
- Vargel, C. (2004). *Corrosion of Aluminium*. Corrosion of Aluminium (ss. 85–81). Elsevier.
- Xu, H., Jian, X., Meek, T.T. & Han, Q., (2004). Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration. Materials Letters, 58 (29), 3669-3673.

- Yajjala, R.K., N.M. Inampudi, & B.R. Jinugu, (2020). Correlation between SDAS and mechanical properties of Al–Si alloy made in Sand and Slag moulds. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3): p. 6257-6267.
- Yapıcı B., (2012). Performance of AlTi5B1, AlTi3B3 and AlB3 master alloys in refining grain structure of aluminium foundry alloys. *Materials Science and Technology*, 28/4, 481-486.
- Yapıcı, C. (2012). AlTi5B1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).
- Yılmaz, C., (2003), Al-Si alaşımı dökümlerde kalıp türü ve basınç değişiminin mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yüksel, Ç., (2016). Alüminyum alaşımlarının sıvı metal kalitesinin artırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, , İstanbul, TÜRKİYE.

ÖZ GEÇMİŞ

[REDACTED] Merkezde doğmuştur. İlk ve orta eğitimini Isparta'da Şevket DEMİREL ilköğretim okulda tamamlamıştır. Lise ise 2002 yılında Isparta Endüstri Meslek Lisesi'nde iyi derecede tamamlamıştır. Isparta'da fabrikada 2005 Şubatta kadar çalışmıştır. 2005 Şubat İstanbul'da Hava savunma eri olarak askerliğe başlamış, 2006 Mayıs ayında Siirt'te Hava savunma onbaşı olarak askerliğini bitirmiştir. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği bölümde lisans eğitimine başlamıştır. 2013 Güz yarısında Sakarya Üniversitesini lisans öğrenimini bitirmiştir. 2014 yılında İsdemir AŞ şirketine vardiya amiri olarak işe başladı. 2019 yılında Bayburt üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümde lisans eğitimine başladı. 2020 Güz yarısında Makine Mühendisliği bölümde lisans eğitimini bitirdi. 2021 Güz yarısında Makine Mühendisliği bölümde Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında tekrar yüksek lisans eğitimine başladı.