

## A356 alüminyum alaşımının dökümünde katılaşma zamanı ve Nb ilavesinin mikroyapıya etkisinin incelenmesi

*Investigation of the effect of solidification time and Nb addition on the microstructure of A356 aluminum alloy castings*

Önder YALÇIN\*<sup>1</sup>, Mehmet TOKATLI<sup>2</sup>, Ahmet TIĞLI\*<sup>3</sup>, Murat ÇOLAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, 69000, Bayburt, Türkiye

<sup>2</sup>Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 69000, Bayburt, Türkiye

<sup>3</sup>Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 57000, Sinop, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 03.08.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 05.02.2024

### Öz

Alüminyum alaşımları hafiflik, korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması yüksek dayanım, sünek olması gibi özelliklerinde dolayı oldukça önemli bir mühendislik malzemesidir. Bu sebeple; otomotiv, havacılık, savunma, uzay endüstrisi, makine imalat, gıda endüstrisi gibi birçok alanda yaygınca kullanım bulmaktadır. Özellikle otomotiv sanayi ve yüksek teknoloji gereksinimi olan birçok sektörde kullanımı artmakla birlikte kalite gereksinimleri de artmaktadır. Alüminyum döküm alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılması ve üretimde yeni teknoloji kullanımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada A356 alüminyum döküm alaşımına %0.03, %0.06 ve %0.1 Niyobyum ilavesinin değişen kesitler içeren kokil kalıba dökümünde mikroyapı üzerindeki etkileri incelenecektir. Çalışmada ergitme, sıvı metal temizleme, kokil kalıba döküm, metalografik numune hazırlama, mikroyapı inceleme ve imaj analiz teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde katılaşma zamanına ve Nb ilave miktarına bağlı olarak döküm mikro yapılarında değişimler olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** A356 alüminyum döküm, Katılaşma zamanı, Mikroyapı, Nb ilavesi

### Abstract

Aluminum alloys are very important engineering materials due to their lightness, corrosion resistance, high electrical and thermal conductivity, high strength, and ductility. Therefore; It is widely used in many areas such as automotive, aviation, defense, space industry, machinery manufacturing, and food industry. The demand for high-quality aluminum products is also growing as their applications increase. This study aims to explore the influence of adding 0.03%, 0.06%, and 0.1% niobium to the A356 aluminum casting alloy on the resulting microstructure. The investigation focused on permanent step mold casting with different cross-sectional profiles. In the study, melting, liquid metal cleaning (lance degassing), permanent mold casting, metallographic sample preparation, microstructure examination, and image analysis techniques were used. It was observed that SDAS and SDAL of A356 increased with decreasing cooling rate. With the addition of 0.1% Nb, the dimensions of SDAS demonstrated a reduction when contrasted with the as-received A356 castings.

**Keywords:** A356 aluminum casting, Solidification time, Microstructure, Nb addition

\*Ahmet TIĞLI; atigli@sinop.edu.tr

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Hafif alaşımlar, otomotiv, havacılık gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Alüminyum ve alaşımları da endüstride en çok kullanılan hafif alaşımlardan biridir. Alüminyum alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon direnci, dökülebilirlik gibi çeşitli üstün özelliklere sahiptir (Ridvan vd., 2018). Endüstride yaygın bir şekilde kullanılan alüminyum alaşımlarından biri olan A356 (Al7Si0.3Mg) alaşımı, özellikle iyi dökülebilirlik, yüksek dayanım, kaynaklanabilirlik, korozyon direnci ve işlenebilirlik gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır (Erzi vd., 2019).

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri inklüzyon, safsızlık, alaşım elementi, tane boyutu ve morfolojisi gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Tokatlı vd., 2022). Mekanik özellikleri zayıflatan veya güvenilirliğini azaltan en önemli kusurlardan birisi ise döküm içinde karşılaşılan porozitelerdir. (Tigli vd., 2023). Alüminyum alaşımların mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktör ise tane boyunu ve morfolojidir. Alüminyum tane boyunu düşürerek mekanik özellikleri artırmak mümkündür (Jeong vd., 2015). Yajjala vd. (2020) A356 alaşımın kum ve Fe-Cr cürufuna gerçekleştirmiştir. Yaptıkları dökümlerin hem mekanik özelliklerine hem de mikro yapılarını incelemiştir. Kum kalıba yapılan dökümde 144 ve 42 µm tane ve SDAS (İkincil Dendrit Kol Aralığı) boyutuna ölçmüşlerdir. Diğer taraftan Fe-Cr cürufunu kalıp malzemesi olarak kullandıkları dökümde ise 72 ve 17 µm tane ve SDAS boyutu bulmuşlardır. Bununla beraber sertlik, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri 63 HV, 115 MPa, ve % 10.94 e den 71 HV, 130 MPa ve % 12.41' e yükselmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi mekanik özellikler tane boyutundaki inceleme ile iyileştirilebilir.

Alüminyum alaşımlarda tane inceltmenin birkaç yöntemi vardır bunlar: titreşim ve karıştırma, katılaştırma (soğuma) hızını artırarak, tane inceltici ekleyerek ve plastik deformasyon yaparak tane inceltmedir (Çolak & Kayıkçı, 2009; Guan & Tie, 2017; Uslu vd., 2023; Uslu & Yetgin, 2021). Birol (2013) Al-5Ti-1B ve Al-3B master alaşımlarının A356 alüminyum alaşımı üzerindeki tane inceltici etkisini incelemiştir. Tane inceltici kullanılmayan dökümlerdeki ortalama tane boyutu 1450±145 µm Al-5Ti-1B kullanılan dökümlerde tane boyutu 465±102 µm ve Al-3B kullanılan dökümlerde tane boyutu 156±29 µm olarak ölçülmüştür. Fakat tane boyutundaki incelemeyle SDAS boyutları 30±5 µm ile büyük bir değişim göstermemektedir. SDAS boyutundaki değişimin mekanik özellikler üzerinde etkisinin tane boyutuyla kıyaslanırsa daha belirgin olduğuna değinilmiştir.

Diğer tane inceltme yöntemlerinden bir tanesi Ti ve B içeren tane inceltici kullanılmasıdır (Birol, 2009; Çolak & Arslan, 2022; Çolak & Kayıkçı, 2009; Quested, 2004). Tamuly vd. (2022) Al-Ti-B ve Sr kullanarak sıkıştırılmalı A356 dökümünde tane boyutu ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Sıkıştırılmalı döküm sayesinde tane boyutu 45 and 26 ±2 µm düşmüştür. Tane incelticiler sayesinde SDAS boyutları 20 (±3) µm kadar düşmüştür. Fakat mekanik özelliklerde tane incelticinin sönümlenmesi ve pota tabanında bor ve bor kompozisyonlarının çökmesinden dolayı azalma gözlenmiştir.

Son zamanlarda Er (Erbiyum) ve Nb (Niyobyum) gibi nadir toprak elementleride tane inceltici olarak kullanılmaktadır (Aydogan vd., 2022a; Aydogan vd., 2022b; Emam vd., 2022; Sahin & Dispınar, 2023). Narducci vd. (Narducci Jr vd., 2021) Nb ilavesinin Al(7-9-12) ağ % Si ve 1 ağ % Fe alaşımının mikroyapı boyutu ve morfolojisi üzerindeki etkisini 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 yaklaşık olarak 190 µm den 250-300 µm'a kadar artış gözlenmiştir. Buna ek olarak Si tane kabalaştırıcı soğuma zamanının artması (katılaştırma hızının azalması) ile beraber artmaktadır. Bolzoni ve Babu (2015) 96Al-2Nb-2B master alaşımının A356 alaşımının üzerindeki tane inceltici etkisini incelemiştir. Tane boyutu Master alaşımı ilavesiz dökümler 1000 µm ile ilaveli dökümlerde 250-330 µm civarındadır. Buna ek olarak soğuma hızı arttıkça tane inceltmesi gözlemlenmiştir.

Diğer bir tane inceltici yöntem ise soğuma hızının artırılmasıdır (Zhang vd., 2008). Soğuma hızını etkileyen faktörlerden bir tanesi döküm parçasının yüzey alanı/hacmi oranının değiştirilebilmesidir (Xu vd., 2020). Diğer bir parametre ise döküm yapılan kalıp malzemesini ısı iletkenliğini yüksek malzemeler ile değiştirmek (kum kalıp yerine metal kalıp kullanmak). Pulivarti ve Birru (2018) döküm sıcaklığının ve kalıp kaplamasının A206 alaşımının akışkanlığa ve mikro yapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Alaşımın tane boyunun hem döküm

sıcaklığı hem de kalıbın kaplanmasından etkilenmektedir. 700, 750 ve 780 °C döküm sıcaklıklarında, kaplamasız kalıpta sırasıyla 164, 151 ve 155 µm, grafen kaplı kalıpta 147, 103 ve 121 µm, sabuntaşı kaplı kalıpta ise 95, 64 ve 82 µm tane boyutları gözlemlenmiştir. Tang vd. (2019) Al-5Mg-3Zn-1Cu alaşımını basamak kalıba dökümünü gerçekleştirmiştir. 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.

Bu çalışma, A356 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapısal özelliklerine çeşitli oranlarda Nb (niyobyum) ilavesinin etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. A356 alaşımı, ilavesiz olarak, %0.03 Nb, %0.06 Nb ve %0.1 Nb oranlarında ilaveli olarak kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Sıvı metalin temizliğini gözlemlenmek için vakum altında katılaşma (PRT) testi uygulanmıştır. A356 alaşımının mikroyapısı üzerinde katılaşma hızının etkisini araştırmak amacıyla kokil basamak kalıp kullanılarak dökümler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, katılaşma süresinin ve Nb ilavesinin mikroyapı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde çalışmada analiz edilmiştir.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

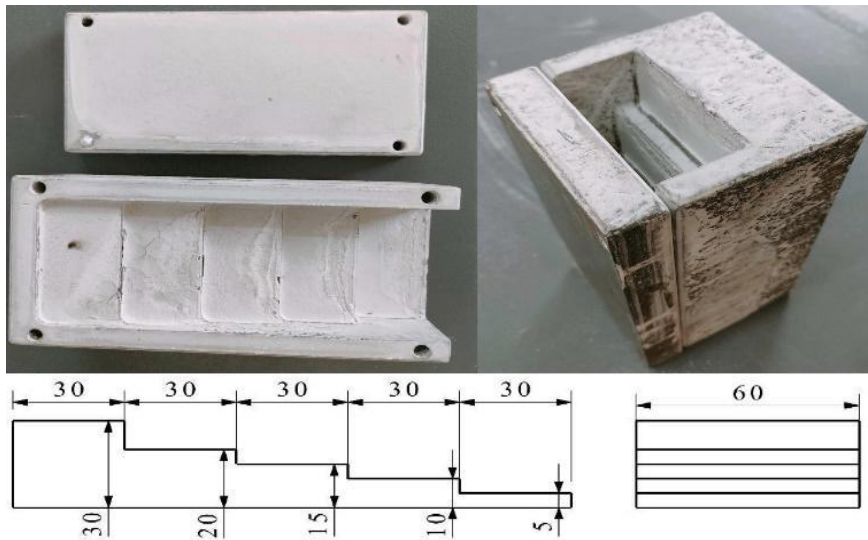
Döküm deneylerinde, A356 alaşımının ilavesiz, %0.03, %0.06 ve %0.1 oranlarında ağırlıkça Nb ilavesi olacak şekilde döküm parametreleri belirlenmiştir. 700 °C'de eritme ocağında eritilen sıvı metal, 200 °C ön ısıtma uygulanan kokil kalıplara dökülmüştür. Nb ilave oranı, yapılan literatür araştırmalarına bağlı olarak etkisi ve ticari kullanılabilirlik şartlarına göre belirlenmiştir (Aydoğan vd., 2022a; Aydoğan vd., 2022b). Dökümler sıvı metal temizliği yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Deneylerde A356 alaşımı ve Nb ilavesi için kullanılan master alaşımına ait kimyasal bileşim içerikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** A356 alaşımının ve Nb elementin kimyasal analizleri (Seydisehiraluminyum, t.y.)

**Table 1.** Chemical analysis of A356 alloy and Nb element

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	-	-	Kala n
Nb	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	0.5	96.0

Deneylerde kullanılan kalıp görüntüsü ve numune ölçüleri milimetre (mm) cinsinden Şekil 1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Modelde değişen kesit kalınlığı (kademeler) mevcuttur. Dökülen numunenin kesit kalınlığına bağlı olarak katılaşma hızı ve mikroyapı etkilenmektedir.



**Şekil 1.** Döküm deneylerinde kullanılan basamak kalıbı ve numune boyutları (birim: mm)

**Figure 1.** The dimensions of the step mold and samples used in casting experiments (in mm)

## 2.1. Ergitme ve döküm işlemleri

### 2.1. Melting and casting processes

Ergitme işlemi, çan tipi 8 kg sıvı alüminyum ergitme kapasitesine ve 10 kW gücünde elektrik direnç ocağı içerisinde bulunan SiC potada gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de gösterilen elektrik direnç ocağı, K tip termokupl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü yüksek termal izolasyon özelliğine sahip dökme astar malzemelerle yapılmıştır. Ocak üstünde azotla sıvı metal temizleme işlemlerinin yapılabilmesi için grafit lansın gireceği genişlikte bir delik mevcuttur.



**Şekil 2.** Ergitme işlemlerinin yapıldığı çan tipi elektrik direnç ocağı  
**Figure 2.** Bell-type electric resistance furnace

Ergitme işlemleri için ilk olarak birincil A356 külçe ocak içerisinde 5 kg yüklenmiştir. Ergitme yapıldıktan sonra deney parametrelerine uygun olarak Nb ilavesi yapılmıştır. 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 ergimiş metal ile dolu SiC pota ocaktan alınır. Ardından sıvı metalin yüzeyindeki cüruf tabakası sıyırma yöntemi ile temizlenir. Bunun ardından kepçe yardımıyla potadan alınan ergimiş metal ile Azaltılmış Basınç Test (RPT) numunesi dökümü gerçekleştirilir. Sonrasında pota çift kol yardımıyla kaldırılarak kokil kalıplara dökümler yapılır.

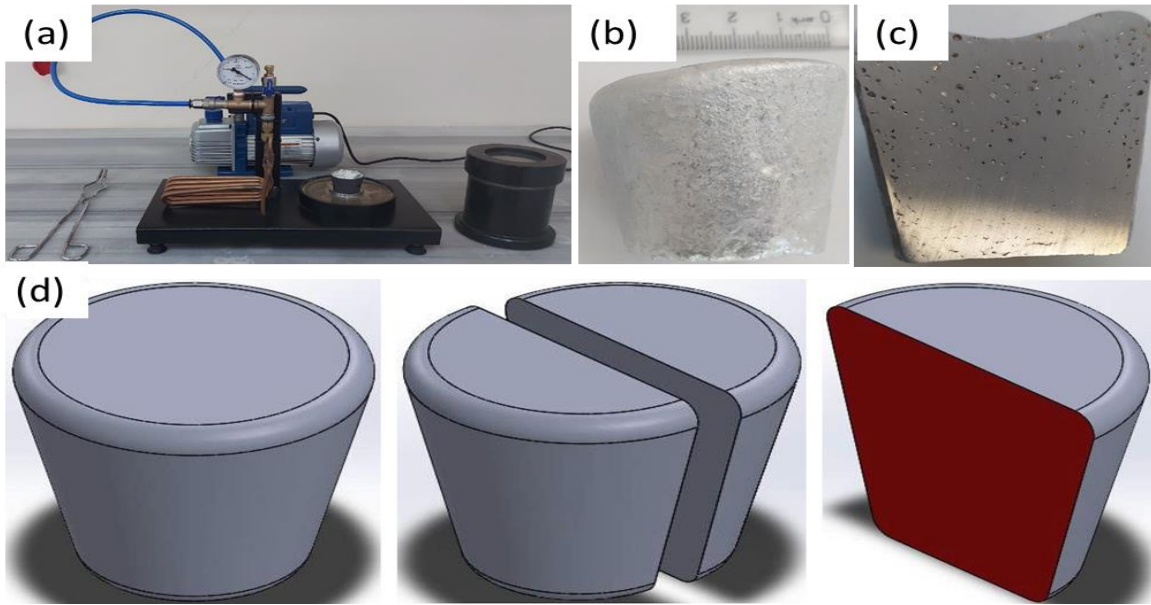
## 2.2. Sıvı metal temizleme işlemleri

### 2.2. Liquid metal cleaning processes

Temizleme işlemi ergitilmiş sıvı metal içerisinde çözünmüş halde bulunan hidrojen gazlarını gidermek için, azot gazı ile yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıvı metalin temizleme işlemi döner tip şaft kolun sıvı metal içine daldırılarak, azot gazının sıvı içinde çok sayıda küçük gaz baloncuklar oluşturulması prensibiyle gerçekleştirilmiştir. Lansın özel tasarlanmış olup başlık kısmıyla ve dönme etkisiyle oluşan girdap sayesinde azot gazı sıvı metalin her tarafına dağılarak dışarıya atılmıştır. Azot gazının etkisiyle oluşan kabarcıklarla birlikte sıvı metaldeki inklüzyonlar flotasyon mantığı ile sıvı metalin yüzeyine çıkartılarak metal içerisinde çözünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisinde difüz ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır. Sıvı metal temizleme işlemlerinde gaz debisi ve çark hızı sabitlenmiş olup sırası ile 5 lt/dk ve 300 rpm olarak ve 5 dakika boyunca gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kokil kalıplara dökümler yapılmadan önce, ilk olarak azot gazı ile gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, sıvı metalin gazlılık (kirlilik) seviyesini kontrol etmek amacıyla RPT numuneleri dökülmüştür. Şekil 3-a’da RPT cihazına ait görsel verilmiştir.

RPT numunesi alınması sırasında, 90-100 gram ağırlığındaki ergimiş A356 alaşımı metal bir krozede, RPT test cihazında basınç 80 mbar'a düşürülerek, ergimiş alüminyum alaşımı tamamen katılaşıncaya kadar bekletilmiştir. RPT numunelerindeki gözenekleri görmek için numuneler şekil 3-b-d’de gösterildiği gibi dikey olarak ortadan ikiye kesilmiştir. Kesilen yüzeyler zımparalama işlemine tabi tutulup, tarayıcıda kesit yüzey görüntüleri elde edilmiştir.



**Şekil 3.** (a)Azaltılmış basınç test (RPT) cihazı (b-d) RPT numunelerinin dikey olarak kesilmesi  
**Figure 3.** (a) Reduced pressure test (RPT) device (b-d) Vertical cutting of RPT samples

### 2.3. Kalıpların hazırlanması ve döküm deneyleri

#### 2.3. Preparation of molds and casting experiments

Döküm öncesi kalıplarda olası nemin atılması ve sıvı metalin kalıpta daha iyi ilerlemesi için ön ısıtma işlemi Elektromag M 4060 marka ısıtıcı tabla ile yapılmıştır. Dökümler, 700 °C sıcaklığındaki sıvı metalin, 200 °C sıcaklığındaki Kokil basamak kalıplarına dökülmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Katılaşmanın tamamlanmasının ardından basamak kalıplarının açılmasıyla test numuneleri çıkarılmıştır.

### 2.4. Yoğunluk ölçümleri

#### 2.4. Density measurements

Katılaşma sonrasında, döküm numuneleri kalıplardan çıkarılmış ve yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu prensibe göre, her bir numunenin ilk dört kademesi (5, 10, 15 ve 20 mm) ayrılmadan ağırlıkları önce havada daha sonra saf suda (sıcaklığı  $T_s=20$  °C ve yoğunluğu  $d_s=0.99821$  g/cm<sup>3</sup>) tartılmıştır. Tartım işlemi 0.02 g hassasiyete sahip elektronik teraziye kurulan arşimet düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. A356 alaşımının yoğunluk değerleri, Denklem 1'deki formüle göre hesaplanmıştır.

$$d_n = \frac{m_h}{m_h - m_s} * d_s \quad (1)$$

Burada  $d_n$  döküm numunenin yoğunluğu,  $m_h$  numunenin havadaki ağırlığı,  $m_s$  numunenin saf sudaki ağırlığı,  $d_s$  oda sıcaklığında suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

### 2.5. Metalografik hazırlık aşamaları

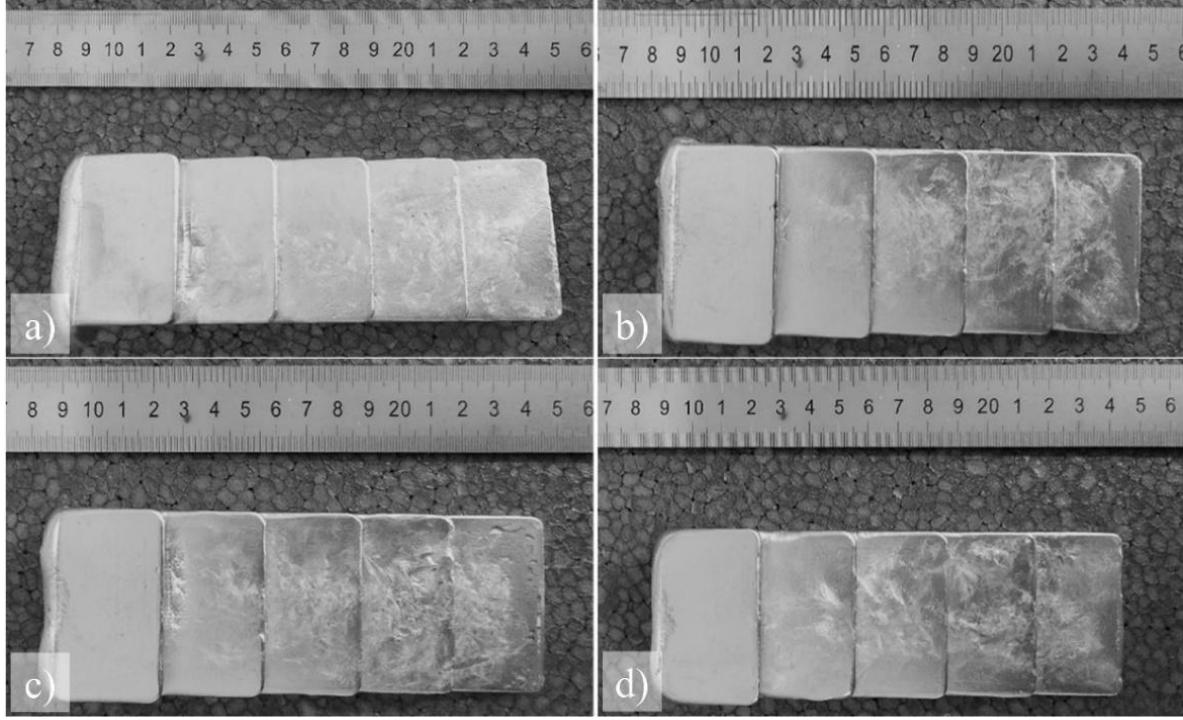
#### 2.5. Metallographic preparation stages

Mikroyapı incelemeleri için basamak kalıbının her bir kademesinden numuneler alınmıştır. Numuneler sırasıyla 180, 400, 800, 1200 ve 2500 numaralı zımpara ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Uygulanan zımpara işleminin ardından 3µm, 1µm alümina süspansiyonu ve son olarak 0.05 µm'lik koloidal silika ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası numuneler Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2.5 ml HNO<sub>3</sub>, 1.5 ml HCl, 1.0 ml HF) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri Nikon marka metalürjik optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf çekimleri de mikroskoba bağlı çalışan Nikon MA100N dijital kamera ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deneysel sonuçlar ve değerlendirilmesi

#### 3. Experimental results and evaluation

Döküm deneylerinde katılaşma ve soğuma sonrası numuneler kalıptan çıkarılarak incelemelere tabi tutulmuştur. Şekil 4'te dökümlerden elde edilen numune resimleri verilmiştir. Döküm numuneler mikroyapı testleri için her bir kademedan (5, 10, 15 ve 20 mm) kesilerek incelenmiştir. 25 mm kalınlığındaki 5. Basamak besleyici olarak kullanıldığında incelemelerde kullanılmamıştır.

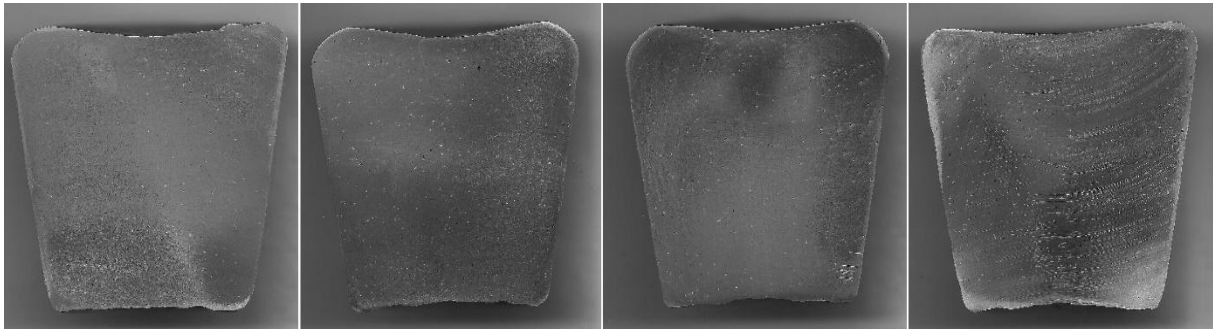


**Şekil 4.** Döküm numune görüntüleri (a) ilavesiz, (b) 0.03 % Nb , (c) 0.06 % Nb ve (d) 0.1 % Nb ilaveli  
**Figure 4.** Sample images of the pour (a) without addition, (b) with 0.03 % Nb, (c) with 0.06 % Nb and (d) with 0.1 % Nb addition

### 3.1. Sıvı metal temizliğinin uygunluğunun kontrolü

#### 3.1. Checking the suitability of liquid metal cleaning

Döküm deneylerinde sıvı metal kalitesinin döküm sonuçlarına etki etmemesi adına sıvı metal temizliği işlemleri gerçekleştirilmiş ve uygunluğun kontrolü için RPT numuneleri kesit yüzeyleri incelenmiştir. Şekil 5'te RPT numune kesit görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 5.** RPT numune kesit yüzey görüntüleri, a) ilavesiz, b) %0.03 Nb ilaveli, c) %0.06 Nb ilaveli, d) %0.1 Nb ilaveli  
**Figure 5.** RPT sample cross-sectional images, a) no added, b) 0.03% Nb added, c) 0.06% Nb added, d) 0.1% Nb added

Şekil 5'te görüldüğü gibi tüm dökümlerin sıvı metal kalitesi açısından uygun olduğu, yüzeylerinde çöküntü ve kesitlerinde gözeneklerin minimum seviyelerde olduğu tespit edilmektedir. Sıvı metal temizliği açısından uygulanan yöntemler, elde edilen sonuçlar açısından değerlendirildiğinde kesit yüzeylerine bağlı olarak sıvı

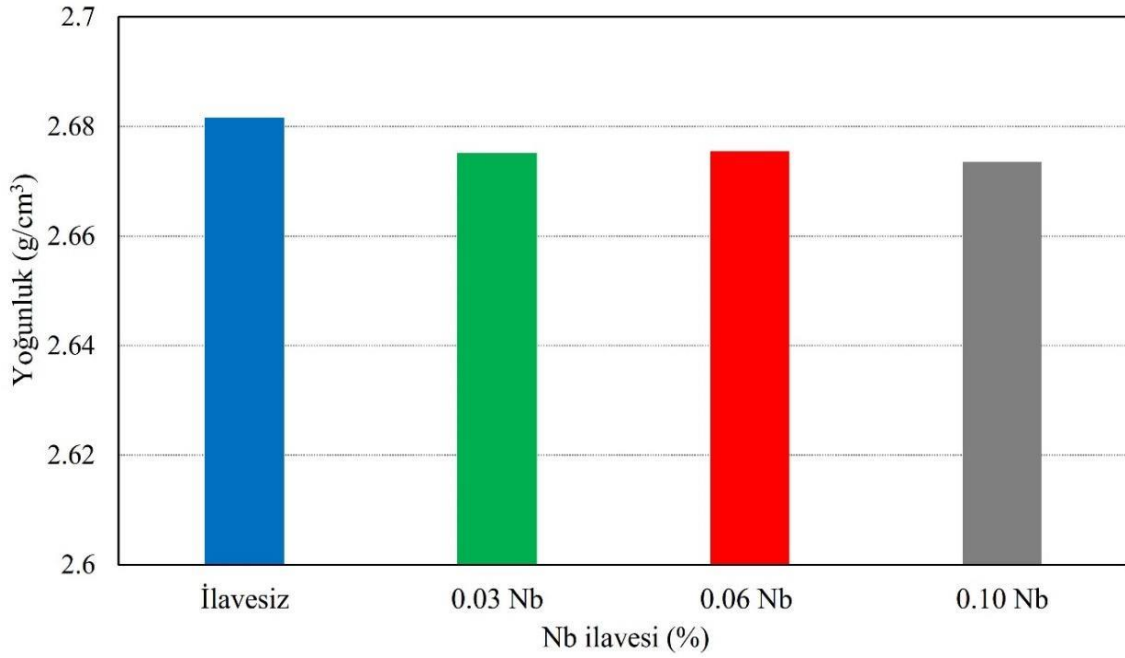
metalini uygun olduğu anlaşılmaktadır. Sıvı metal temizlemede kullanılan gaz, uygulama süresi ve debinin de sonuçlar itibari ile literatür açısından uygun olduğu tespit edilmiştir (Çolak vd., 2016; Erzi vd., 2019; Tan vd., 2011; Tokatlı vd., 2022).

### 3.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

#### 3.3. Density Measurement Results

Döküm modeli değişen katılma zamanına bağlı olarak her bir kademedeki numuneler alınarak yoğunluk testlerine tabi tutulmuştur. Yoğunluk testi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6'da verilen sonuçlar incelendiğinde her bir dökümde yoğunluk değerlerinin  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin alaşıma ait değerlerde olduğu ve sonuçların parçada gözenek oluşumunun minimum seviyede olduğunun bir göstergesi şeklinde yorumlanmıştır.



**Şekil 6.** İlavesiz, 0.03, 0.06 ve 0.1 ilavesi ile dökülen A356 basamağın (ilk 4 basamak) yoğunluk ölçüm sonuçları

**Figure 6.** Density measurement results of A356 steps (first 4 steps) poured without addition and with the addition of 0.03, 0.06 and 0.1

### 3.3. Mikroyapı inceleme sonuçları

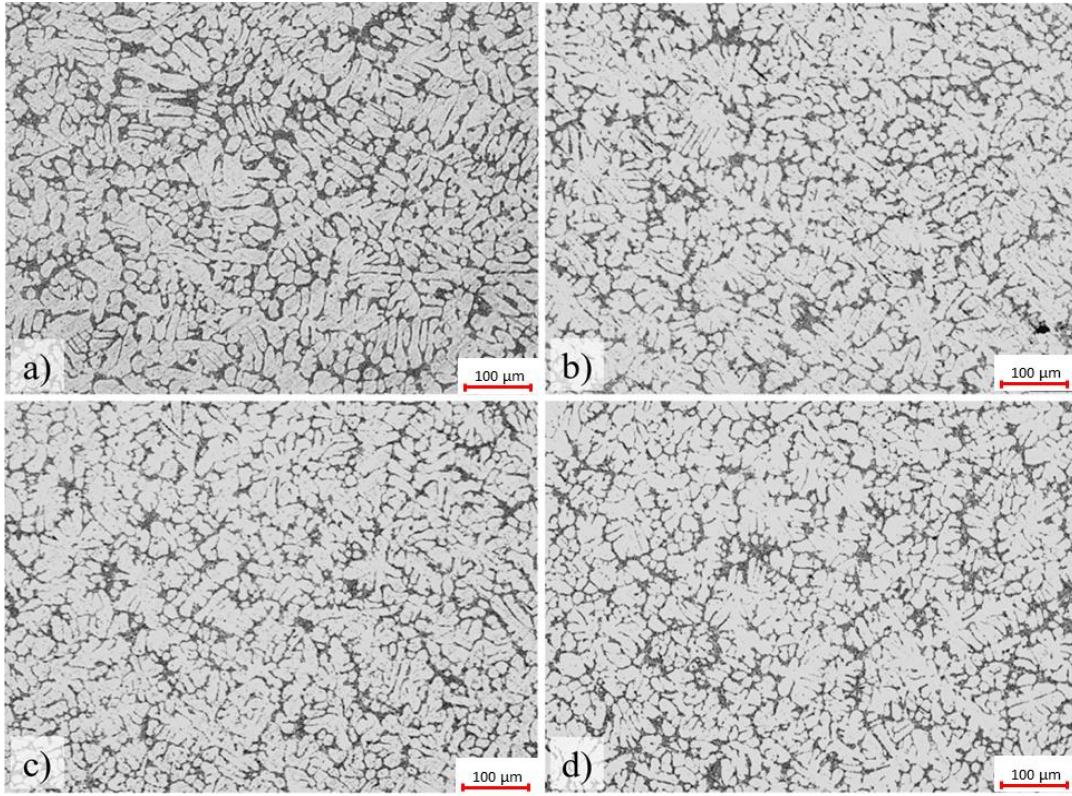
#### 3.3. Microstructure examination results

A356 alüminyum alaşımının mikroyapı incelemeleri, iki farklı başlık altında gerçekleştirilmiştir. İlk başlık olan (i) ilave edilen Nb oranına göre mikroyapı incelemeleri, Nb (niyobyum) elementinin alaşıma ilave edilmesinin mikroyapı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. İkinci başlık olan (ii) basamak kalınlığına (5, 10, 15 ve 20 mm) göre mikroyapı incelemeleri ise, alaşımın farklı basamak kalınlıklarına sahip numuneleri üzerinde mikroyapının incelenmesini içermektedir. Mikroyapı incelemelerine ilişkin görseller Şekil 7'de 5 mm kesitli, Şekil 8'de 10 mm kesitli, Şekil 9'da 15 mm kesitli ve Şekil 10'da 20 mm kesitli bölgelerden alınan 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı fotoğraflarını içermektedir. Bu görseller, A356 alüminyum alaşımının farklı kesit kalınlıklarına sahip bölgelerinden elde edilen mikroyapısal detayları göstermektedir. Bu resimler kullanılarak, SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing, ikincil dendrit kol aralığı) ve SDAL (Secondary Dendrite Arm Length, ikincil dendrit kol uzunluğu) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7'de, A356 alüminyum alaşımının 5 mm kalınlığındaki ilavesiz ve farklı oranlarda Nb (niyobyum) ilavesiyle dökülen basamak numunelerinin mikroyapıları gösterilmektedir. Şekil 7-a, ilavesiz A356 alaşımının mikroyapı fotoğrafını gösterir. İlavesiz 5 mm kalınlığındaki basamağın SDAS ve SDAL değerleri sırasıyla  $11.54 \mu\text{m}$  ve  $47.8 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 0.03% Nb ilaveli 5 mm kalınlığındaki numunenin SDAS ve SDAL

değerleri sırasıyla 13.24  $\mu\text{m}$  ve 47  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 0.06% Nb katkılı numunenin SDAS ve SDAL değerleri ise sırasıyla 14.5  $\mu\text{m}$  ve 43  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  ve 53.6  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Burada yapılan gözlemler, daha önceki çalışmalar ve literatürle uyum içindedir. [Bolzoni vd. \(2015\)](#) çalışmalarında, A380 ve A356 alüminyum alaşımlarına (<45  $\mu\text{m}$  boyutunda) %0.1 ağırlıkça Nb-B tozu ilavesi ile dökümler gerçekleştirmişlerdir. Nb-B ilavesinin etkisi sonucunda, A380 alaşımının tane boyutunda yaklaşık olarak  $18 \pm 4$ 'lük bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca, bu tane inceltme oranı A356 alaşımı için  $48 \pm 6$ 'ya kadar ulaştığını göstermişlerdir. [De Albuquerque Sousa vd. \(2022\)](#), NbB tane inceltme etkisini 6201 alüminyum alaşımı üzerinde incelemişlerdir. 1 K/saniye soğuma hızında, 6201 alaşımının SDAS değeri, NbB tane inceltme etkisi ile 35  $\mu\text{m}$  den 25  $\mu\text{m}$ 'ye kadar düştüğünü göstermişlerdir. Ancak, soğuma hızının artmasıyla birlikte NbB ilavesinin SDAS değerleri üzerindeki etkisi azaldığını göstermişlerdir.

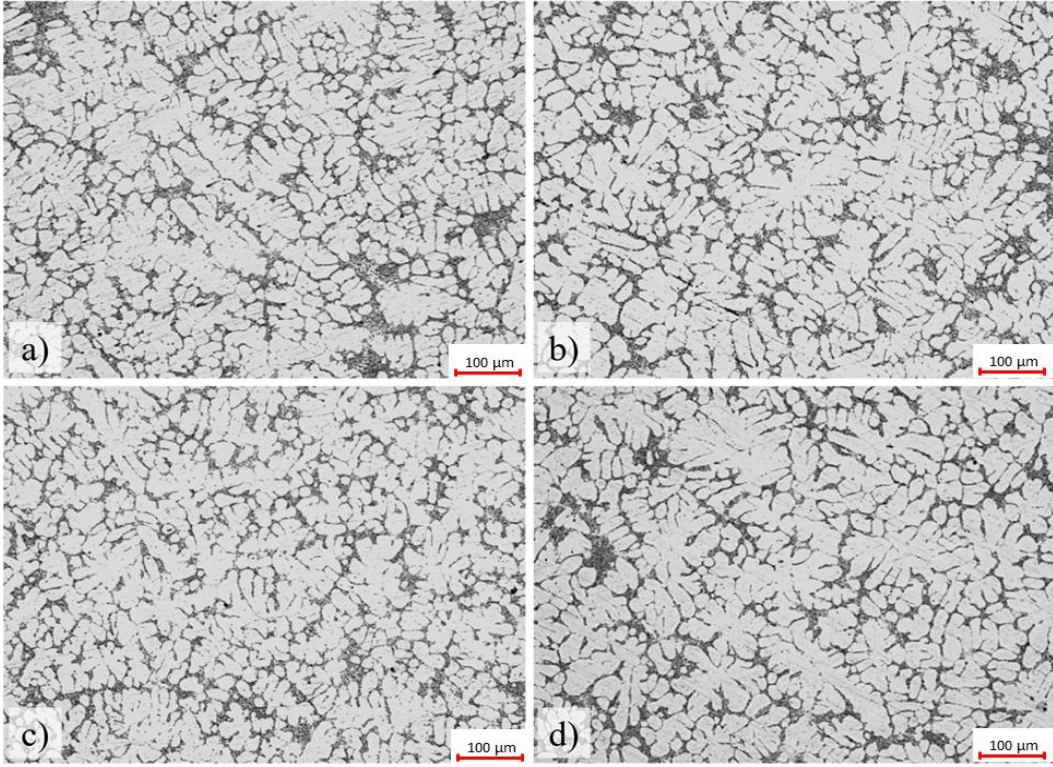
Şekil 8a-d'de verilen fotoğraflarda, 10 mm kalınlığındaki A356 basamağının farklı Nb ilave oranlarına sahip mikroyapıları gösterilmiştir. İlavesiz, %0.03, %0.06 ve %0.1 Nb katkısı olan 10 mm kalınlığındaki basamağın SDAL değerleri sırasıyla 17.51  $\mu\text{m}$ , 18  $\mu\text{m}$ , 17.63  $\mu\text{m}$  ve 15.53  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Diğer yandan SDAL değerleri ise sırasıyla 58.4  $\mu\text{m}$ , 61.6  $\mu\text{m}$ , 58.6  $\mu\text{m}$  ve 65.8  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 10 mm kalınlığındaki numunede, en büyük SDAS değeri 18  $\mu\text{m}$  ile 0.03 Nb ilaveli mikroyapıda ölçülmüş olup, SDAL değerleri arasında herhangi bir belirgin trend gözlenmemiştir.



**Şekil 7.** Basamak kalıplarındaki 5 mm kalınlıktaki basamağa ait mikroyapı görüntüleri: (a) ilavesiz, (b) 0.03 % Nb ilaveli, (c) 0.06 % Nb ilaveli ve (d) 0.1 % Nb ilaveli

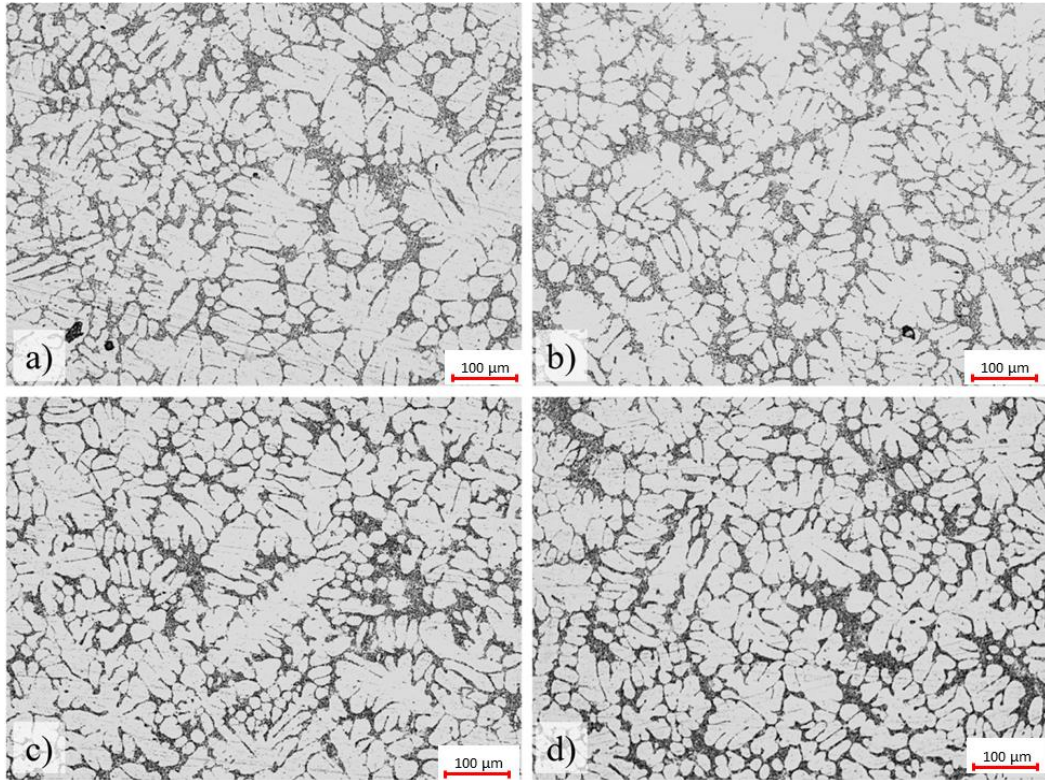
**Figure 7.** Microstructure images of the 5 mm thick step in the step molds: (a) no addition, (b) 0.03 % Nb addition, (c) 0.06 % Nb addition and (d) 0.1 % Nb addition





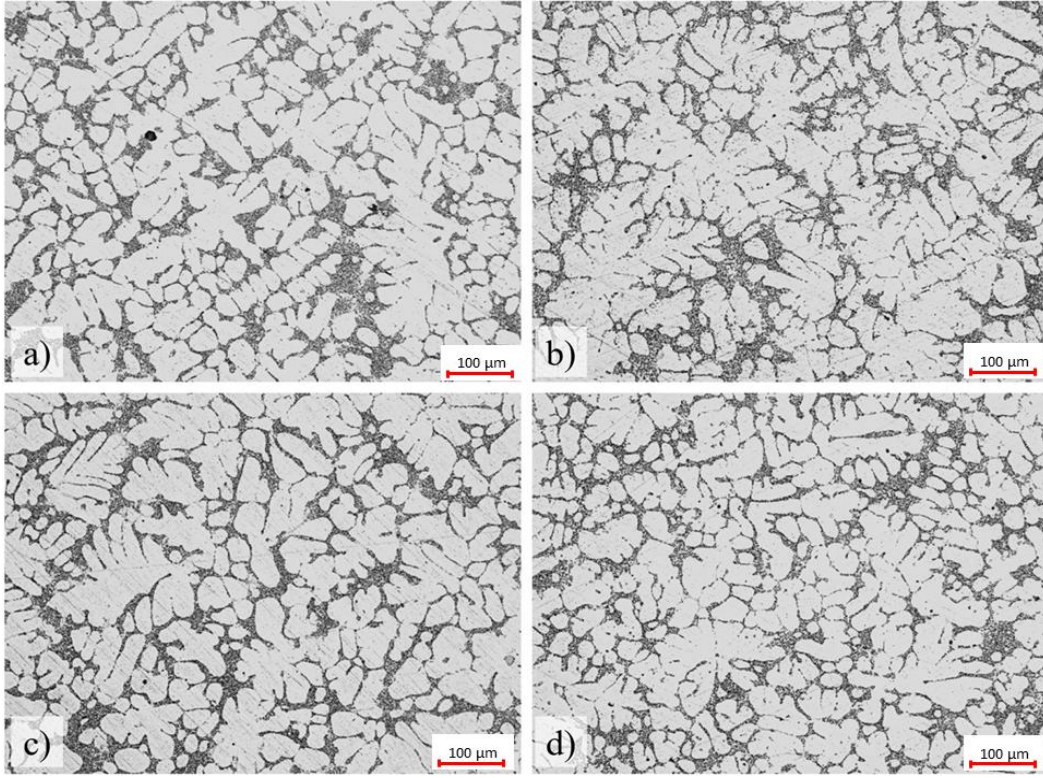
**Şekil 8.** Basamak kalıplarındaki 10 mm kalınlıktaki basamağa ait mikroyapı görüntüleri: (a) ilavesiz, (b) 0.03 % Nb ilaveli, (c) 0.06 % Nb ilaveli ve (d) 0.1 % Nb ilaveli

**Figure 8.** Microstructure images of 10 mm thick step in step molds: (a) no addition, (b) 0.03 % Nb addition, (c) 0.06 % Nb addition and (d) 0.1 % Nb addition



**Şekil 9.** Basamak kalıplarındaki 15 mm kalınlıktaki basamağa ait mikroyapı görüntüleri: (a) ilavesiz, (b) 0.03 % Nb ilaveli, (c) 0.06 % Nb ilaveli ve (d) 0.1 % Nb ilaveli

**Figure 9.** Microstructure images of 15 mm thick step in the step molds: (a) no addition, (b) 0.03 % Nb addition, (c) 0.06 % Nb addition and (d) 0.1 % Nb addition



**Şekil 10.** Basamak kalıplarındaki 20 mm kalınlıktaki basamağa ait mikroyapı görüntüleri: (a) ilavesiz, (b) 0.03 % Nb ilaveli, (c) 0.06 % Nb ilaveli ve (d) 0.1 % Nb ilaveli

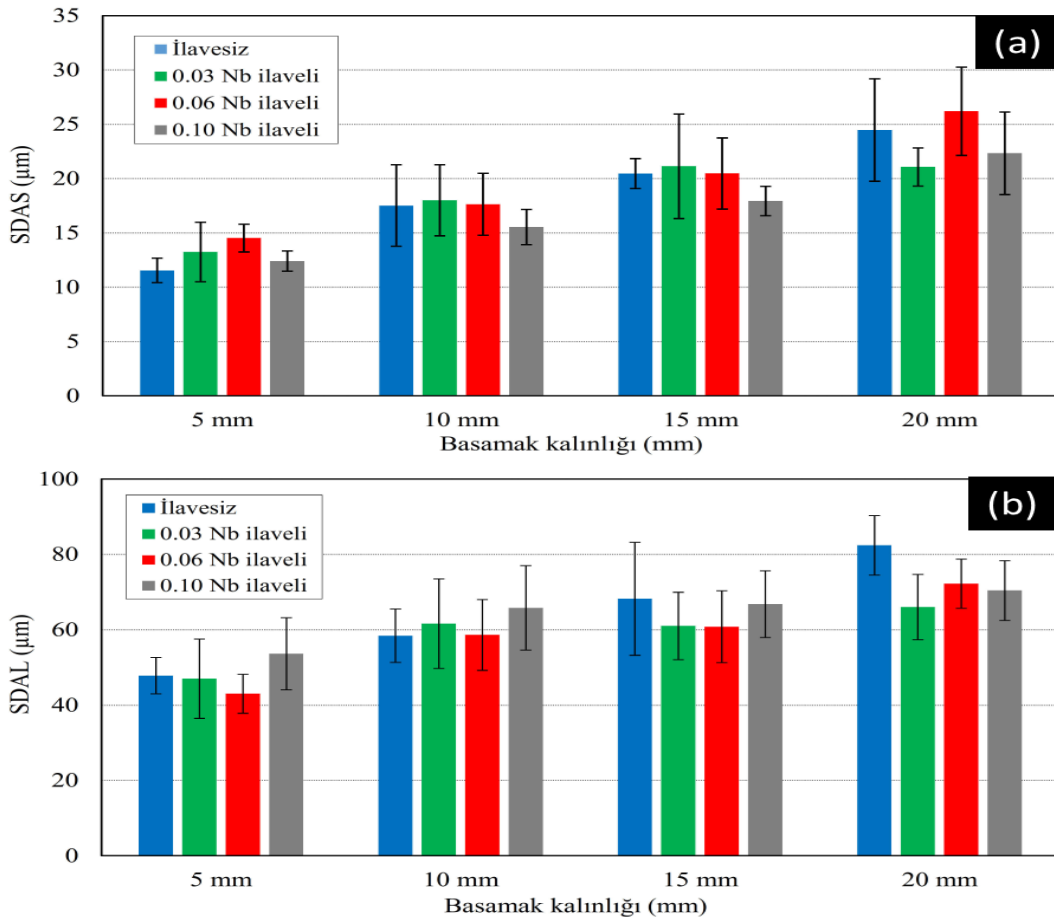
**Figure 10.** Microstructure images of 20 mm thick step in step molds: (a) no addition, (b) 0.03 % Nb addition, (c) 0.06 % Nb addition and (d) 0.1 % Nb addition

Şekil 9’da, 15 mm kalınlığındaki A356 basamağının Nb ilave oranlarına bağlı olarak mikroyapısındaki (dentrit 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 10’da, 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, SDAS değerleri sırasıyla 24.47 µm, 21.06 µm, 26.2 µm ve 22.33 µm olarak ölçülmüştür.

Yukarıda yer verilen bulgular daha önce yapılan A356 ve farklı alüminyum alaşımları kullanılarak yapılan döküm çalışmaları ile uyum içindedir. [Aydoğan vd. \(2022a\)](#) Al11Si alaşımı 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 NbB<sub>2</sub> ve Al<sub>3</sub>Nb fazlar α-Al heterojen çekirdeklenmesi için en uygun yerleri oluşturur. [Aydoğan vd. \(2022a\)](#) 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 30 mm 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 oluşturması 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. 5 mm kalınlıktaki basamakta soğuma ve katılaşma hızı yüksek, diğer taraftan 20 mm kalınlıkta soğuma hızının daha düşük olması beklenir.

Şekil 11-a'da, basamak kalınlığına bağlı olarak SDAS değerlerinin değişimi gösterilmektedir. İlavesiz A356 alaşımı için basamak kalınlığının 5 mm' den 20 mm' ye çıkmasıyla birlikte SDAS değerleri sırasıyla 11.54  $\mu\text{m}$ , 17.51  $\mu\text{m}$ , 20.45  $\mu\text{m}$  ve 24.45  $\mu\text{m}$  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. Şekil 11-b'de, basamak kalınlığına bağlı olarak SDAL değerlerinde bir azalma olduğu gözlemlenmektedir, bu durum soğuma hızının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Elde edilen sonuçlar, önceden yapılan soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkisine yönelik çalışmalarla uyumludur. Jeon ve Bae, (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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  olarak azalmıştır. Çolak vd. (2015), A356 alaşımının akışkanlığını ve mikroyapısını incelemişlerdir. Bu çalışmanın dökümlerini, 1 mm'den 8 mm'e kadar değişen kesit kalınlıklarına sahip ahtapot tipi model kullanarak üretilen kum kalıba yapmışlardır. Akışkanlık test çubuğunun kesit kalınlığı arttıkça, SDAS değerleri 11  $\mu\text{m}$ 'den 45  $\mu\text{m}$ 'e kadar artmıştır.



**Şekil 11.** Ölçülen SDAS ve SDAL değerlerinin basamak kalınlığı ve Nb oranına göre değişimi  
**Figure 11.** Variation of measured SDAS and SDAL values according to step thickness and Nb ratio

Şekil 11'de, basamak 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  $\mu\text{m}$ , 58  $\mu\text{m}$ , 68  $\mu\text{m}$  ve 82  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Soğuma hızının artması (basamak kalınlığının azalması) ile beraber SDAL değerlerinde azalma olmuştur.

## 4. Genel sonuçlar

### 4. Conclusion

Bu çalışmada, A356 standart alüminyum döküm alaşımına ilavesiz, %0.03, %0.06 ve %0.1 oranlarında ağırlıkça AlNbB3.5/0.5 master alaşımı eklenerek kokil basamak kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Basamak kalınlığının ve Nb ilavesinin numunen mikroyapısı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanabilir:

- Basamak kalınlığının 5 mm den 20 mm ye artması ile beraber soğuma hızı azalmıştır. Soğuma hızının azalmasına bağlı olarak, SDAS ve SDAL boyutlarında sırası ile %110 ve %72 varan oranlarda artış gözlenmiştir.
- %0.03 ve 0.06 oranında Nb ilavesi SDAS boyutlarında artış gözlenmiştir.
- % 0.1 oranında Nb ilavesi ile SDAS boyutları ilavesiz, %0.03 ve 0.06 oranında Nb ilaveli A356 dökümlerine kıyasla incelmıştır.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

Birinci yazar araştırma çalışmasının planlanması, literatür taraması, deneysel çalışmaların yapılması; ikinci yazar deneysel çalışmaların yapılması, sonuçların incelenmesi; üçüncü yazar deneysel çalışmaların yapılması, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve makalenin kontrolü; dördüncü yazar konusunun seçiminde, deneysel çalışmaların yapılması, sonuçların incelenmesi ve makalenin son yazım aşamalarında katkı sunmuştur.

### Etik beyanı

#### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### Çıkar çatışması beyanı

#### Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### Kaynaklar

#### References

- Aydoğan, F., Dizdar, K. C., Sahin, H., Mentese, E., & Dispınar, D. (2022a). Mechanical property comparison of Al11Si wheels grain refined by Ti, Nb and MTS. *Archives of Foundry Engineering*, 22.
- Aydoğan, F., Dizdar, K. C., Sahin, H., Mentese, E., & Dispınar, D. (2022b). Weibull analysis evaluation of Ti, B, Nb and MTS grain refined Al11Si alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 287, 126264.
- Bırol, Y. (2009). A novel Al-Ti-B alloy for grain refining Al-Si foundry alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 486(1-2), 219-222.
- Bırol, Y. (2013). Impact of grain size on mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 394-400.
- Bolzoni, L., & Babu, N. H. (2015). Refinement of the grain size of the LM25 alloy (A356) by 96Al-2Nb-2B master alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 219-223.
- Bolzoni, L., Nowak, M., & Babu, N. H. (2015). Grain refinement of Al-Si alloys by Nb-B inoculation. Part II: Application to commercial alloys. *Materials & Design* (1980-2015), 66, 376-383.
- Çolak, M., Kayıkci, R., & Dispınar, D. (2015). Influence of different cross sections on fluidity characteristics of A356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68, 275-281.

- Çolak, M., & Arslan, İ. (2022). Investigation of the effect of the addition of grain refiner and modifier addition on wear properties in sand and permanent mould casting of A357 and A380 aluminium alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 1-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13640461.2022.2069912>
- Çolak, M., Kayıkci, R., & Dispınar, D. (2016). Melt cleanliness comparison of chlorine fluxing and argon degassing of secondary Al-4Cu. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(5), 2705-2709.
- Çolak, M., & Kayıkçı, R. (2009). Alüminyum dökümlerinde tane inceltme. *Sakarya University Journal of Science*, 13(1), 11-17.
- De Albuquerque Sousa, S. M., Saldanha, F. E., de Gouveia, G. L., Garcia, A., & Spinelli, J. E. (2022). NbB refining capability: Effects of slow and rapid solidification on dendritic spacings and grain sizes of a 6201 alloy. *Materials Letters*, 315, 131960.
- Ernam, O., Sekban, T., Tugan, O., Dizdar, K., Sahin, H., & Dispınar, D. (2022). Effect of heat treatment on mechanical properties of Er-, Dy-, and Eu-modified A356 alloy. In *Light Metals 2022* (pp. 785-789). Springer.
- Erzi, E., Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Colak, M., & Dispınar, D. (2019). Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: supplier's quality index (SQI). *Metals*, 9(9), 957.
- Guan, R.-G., & Tie, D. (2017). A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30, 409-432.
- Jeon, J., & Bae, D. (2019). Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 808, 151756.
- Jeong, G., Park, J., Nam, S., Shin, S.-E., Shin, J., Bae, D., & Choi, H. (2015). The effect of grain size on the mechanical properties of aluminum. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60.
- Khakzadshahandashti, A., Varahram, N., Davami, P., & Pirmohammadi, M. (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).
- Narducci Jr, C., Brollo, G. L., de Siqueira, R. H. M., Antunes, A. S., & Abdalla, A. J. (2021). Effect of Nb addition on the size and morphology of the  $\beta$ -Fe precipitates in recycled Al-Si alloys. *Scientific reports*, 11(1), 1-14.
- Pulivarti, S. R., & Birru, A. K. (2018). Effect of mould coatings and pouring temperature on the fluidity of different thin cross-sections of A206 alloy by sand casting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(7), 1735-1745.
- Quested, T. (2004). Understanding mechanisms of grain refinement of aluminium alloys by inoculation. *Materials Science and Technology*, 20(11), 1357-1369.
- Ridvan, G., Serhat, A., Kisasoz, A., GULER, K. A., & Karaaslan, A. (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. [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)
- 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*, 1-10.
- Seydisehiraluminyum. (t.y.). Alüminyum külçe kimyasal bileşim. <https://seydisehiraluminyum.com.tr/aluminyum-kulce>
- Shabani, M., Mazahery, A., Bahmani, A., Davami, P., & Varahram, N. (2011). Solidification of A356 Al alloy: experimental study and modeling. *Kovove Material*, 49, 253-258.
- Sheykh-Jaberi, F., Cockcroft, S., Maijer, D., & Phillion, A. (2019). Comparison of the semi-solid constitutive behaviour of A356 and B206 aluminum foundry alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 37-45.
- Tamuly, R., Behl, A., & Borkar, H. (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), 2395-2408.

- Tan, E., Tarakçılar, A., Dispınar, D., Colak, M., & Kayıkci, R. (2011). Reproducibility of reduced pressure test results in testing of liquid aluminum gas levels. *16*, 18.
- Tang, H.-P., Wang, Q.-D., Lei, C., Ye, B., Wang, K., Jiang, H.-Y., . . . Zhang, J.-B. (2019). Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of an Al-5.0 Mg-3.0 Zn-1.0 Cu cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *801*, 596-608.
- Tigli, A., Tokatlı, M., Uslu, E., Colak, M., & Dispınar, D. (2023). Correlation between k-value, density index and bifilm index in determination of liquid al cleanliness. *Archives of Foundry Engineering*.
- Tokatlı, M., Saydam, F., Murat, H., Koşatepe, A., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygınca kullanılan sıvı metal temizleme yöntemlerinin incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *12*(1), 423-434.
- Uslu, E., Tigli, A., & Çolak, M. (2023). The effect of cooling plate, mechanical vibration, and grain refinement on the microstructure and hardness of A380 produced by sand mold. *International Journal of Cast Metals Research*, 1-9.
- Uslu, E., & Yetgin, S. H. (2021). A360 Alüminyum döküm alaşımının kum kalına dökümünde mekanik titreşim, eğimli, soğutma plakası ve tane incelticinin etkisinin incelenmesi. *TURAN: Stratejik Arastirmalar Merkezi*, *13*(52), 228-234.
- Xu, Z., Wang, S., Wang, H., Song, H., Li, S., & Chen, X. (2020). Effect of cooling rate on Microstructure and properties of twin-roll casting 6061 aluminum alloy sheet. *Metals*, *10*(9), 1168.
- Yajjala, R. K., Inampudi, N. M., & Jinugu, B. R. (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), 6257-6267.
- Zhang, L., Jiang, Y., Ma, Z., Shan, S., Jia, Y., Fan, C., & Wang, W. (2008). Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, *207*(1-3), 107-111.