



**Al12Si ALAŞIMININ KOKİL KALIBA
DÖKÜMÜNDE AKICILIĞA ETKİ EDEN
FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ**

Yunus Emre ASAN
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

Al₁₂Si ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE AKICILIĞA ETKİ EDEN
FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre ASAN

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt, 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında, Yunus Emre ASAN tarafından hazırlanan “Al12Si Alaşımlarının Kokil Kalıba Dökümünde Akıcılığa Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 25.01.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği / çokluğu ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Şükran EFE

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 “Al₁₂Si ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE AKICILIĞA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ” 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.

10.01.2024

Yunus Emre ASAN



ÖN SÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca değerli bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, büyük ilgi ve yardımlarını gördüğüm danışman hocam Sayın Doç. Dr. Murat ÇOLAK'a, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Döküm ve analiz çalışmalarım boyunca imkanlarından faydalandığım Bayburt Üniversitesi'ne, çalışmalarında teknik desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında desteğini esirgemeyen, her zaman beni cesaretlendiren ve önderlik eden Sevgili teyzem Doç. Dr. Ayla ARSLANER'e, Dedem Hacı Hüseyin ARSLANER'e ve eşim Rukiye ASAN'a teşekkürü borç bilirim.

Yunus Emre ASAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Al₁₂Si ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE AKICILIĞA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

Yunus Emre ASAN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Sayfa: 62

Alüminyum (Al) ve alaşımları birçok avantajlı özelliği sayesinde döküm endüstrisinde her geçen gün daha fazla kullanım bulmaktadır. Bu sebeple Al ve alaşımlarının kullanım alanı da genişlemekte ve bazı özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Al'nin döküm prosesini etkileyen en önemli parametre akıcılıktır. Bu çalışmada amaç; endüstriyel olarak yaygın kullanılan Al₁₂Si alaşımının dökümünde akıcılığa etki eden parametrelerin kapsamlı deneysel çalışmalar ve modelleme teknikleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Dökümlerde kokil kalıp kullanılmış olup, akıcılık üzerinde etki ettiği düşünülen döküş yüksekliği, döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizliği parametre olarak çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında, Etial-140 Al alaşımının kokil kalıba dökümünde mikro yapılarının ve akıcılık testlerinin incelenmesi için, tasarlanmış olan modellere dökümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan dökümlerden elde edilen numunelerin testleri sonucunda geri kazanımı sağlanan Etial-140 Al'nin tekrar dökülebilirliği ve optimum döküm şartları belirlenmiştir. Döküm sıcaklıkları; 660°C, 700°C ve 740°C ve döküş yükseklikleri; 50 mm, 100 mm ve 150 mm seçilmiştir. Seçilen tüm parametrelerin akıcılık üzerine önemli derecede etkili olduğu tespit edilmiştir. Birincil külçeden elde edilen bulgulara göre, 100 mm döküş yüksekliği, 8 mm kesit kalınlığında 740°C'de gerçekleştirilen dökümde sıvı metal ilerleme mesafesi 300 mm iken, 660°C'de 207 mm ölçülmüştür. Spiral akıcılık kalıbında aynı şartlarda 740 °C'de 352 mm, 660°C'de 191 mm sıvı metal ilerlemesi belirlenmiştir. Benzer şekilde döküş yüksekliğindeki artış akıcılığı artırmıştır. Sıvı metal temizleme işlemi de akıcılığı olumlu etkilemiştir. Mikro yapı incelemesi sonucunda en az gözenek ve istenmeyen faz oluşumu, 700°C ve 100 mm döküş yüksekliğinde gerçekleştirilen döküm sonucunda gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al₁₂Si döküm alaşımı, akıcılık, kokil kalıba döküm.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING FLUIDITY IN CAST MOLDING OF Al12Si ALLOY

Yunus Emre ASAN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2024, Pages: 62

Thanks to its many advantageous properties, aluminum (Al) and its alloys find more and more use in the casting industry. For this reason, the usage area is also expanding and some features need to be developed. In this context, the aim of our thesis will be on fluency, which is the first and most important stage of the casting process. The aim of this study is to comparatively examine the parameters affecting the fluidity in the casting of Al12Si alloy, which is widely used industrially, through comprehensive experimental studies and modeling techniques. A permanent mold was used in castings, and pouring height, casting temperature and liquid metal cleanliness, which are thought to affect fluidity, were studied as parameters. As a result of the tests of the obtained samples, the recastability of the recovered Etial-140 Al and the optimum casting conditions were determined. Casting temperatures; 660°C, 700°C and 740°C and pouring heights; 50 mm, 100 mm and 150 mm were selected. It was determined that all selected parameters had a significant effect on fluency. According to the findings obtained from the primary ingot, the liquid metal advancement distance in the casting performed at 740°C with a pouring height of 100 mm and a section thickness of 8 mm was 300 mm, while it was 207 mm at 660°C. Similarly, the increase in pour height increased the fluidity. The liquid metal cleaning process also positively affected the fluidity. As a result of microstructure analysis, the least porosity and undesirable phase formation was observed as a result of casting at 700 °C and 100 mm casting height.

Keywords: Al12Si casting alloy, fluidity, permanent mold casting.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT	VI
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	IX
KISALTMALAR	XII
SİMGELER.....	XII
GİRİŞ	1
Araştırmanın Konusu Ve Problemi.....	1
Araştırmanın Amacı.....	1
Araştırmanın Önemi Ve Gerekçesi.....	2
BİRİNCİ BÖLÜM	3
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	3
1.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	3
1.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÜRETİM TEKNİKLERİ	5
1.2.1. Birincil Alüminyum Üretimi	5
1.2.2. İkincil Alüminyum Üretimi	6
1.3. ALÜMİNYUM ALAŞIM ÖZELLİKLERİ.....	7
1.3.1. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri.....	7
1.3.2. Alüminyumun Mekanik Özellikleri	8
1.3.3. Alüminyumun Kimyasal Özellikleri	9
1.4. AKICILIK	9
1.4.1. Akıcılığı Etkileyen Faktörler	9
1.4.2. Alüminyum Döküm İşleminde Karşılaşılan Bazı Hatalar	11
1.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDA SIVI METAL TEMİZLEME	11
1.5.1. Rotary (Döner Tip) Gaz Giderme	13
1.6. ALÜMİNYUM SIVI METAL TEST YÖNTEMLERİ	14
1.6.1. Akıcılık Testi	15
1.6.2. Vakum Altında Katılaştırma (Vak) Testi	15
1.6.3. K-Mold	16
1.7. DÖKÜM KALIPLAMA TASARIMI	16
1.8. DÖKÜM SİMÜLASYON PROGRAMLARI	17
İKİNCİ BÖLÜM	19
2. MATERYAL VE YÖNTEM	19
2.1. MATERYAL	19

2.2. YÖNTEM	19
2.2.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	19
2.2.2. Tasarım Çalışmaları	20
2.2.3. Ergitme Ve Döküm Deneyleri	22
2.2.4. Dökümlerin İncelenmesi.....	24
2.2.4.1. VAK Testi Numunelerinin İncelenmesi	25
2.2.4.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi.....	26
2.2.4.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi	26
2.2.4.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi.....	27
2.2.5. Mikro Yapı İncelemeleri	28
2.2.6. Modelleme Çalışmaları	29
2.2.7. Sertlik Testleri.....	30
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	32
3. BULGULAR.....	32
3.1. SIVI METALİN KALİTESİNİN TESPİTİ.....	32
3.2. AKICILIK KALIPLARI DÖKÜM DENEY SONUÇLARI.....	37
3.3. MODELLEME SONUÇLARI	42
3.4. MİKRO YAPI İNCELEME SONUÇLARI	47
3.5. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI	52
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	54
KAYNAKÇA.....	56
ÖZ GEÇMİŞ	62

TABLÖLAR

Tablo 1: Alüminyum Metalinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	5
Tablo 2: Birincil ve İkincil Üretim İçin Tüketim ve Salınım Değerleri	7
Tablo 3: Al12Si Alaşımının Kimyasal Bileşim (%Ağırlık)	19
Tablo 4: Deneylerde Kullanılan Etial-140 Alaşımın Tipik Özellikleri	19
Tablo 5: Deney Parametreleri	20
Tablo 6: Simülasyonda Kullanılan Alaşımın Termofiziksel Özellikleri	29
Tablo 7: VAK Testi Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları	35
Tablo 8: K- Mold İnklüzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri	36
Tablo 9: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri	37
Tablo 10: Modelleme Sonuçları	43
Tablo 11: Sertlik Ölçüm Sonuçları	52



ŞEKİLLER

Şekil 1: İkincil Al Tipleri, a) Pres Yumuşak Hurda, b) Sert, Döküm Hurdası, c) Talaş, d) Al İçecek Kutusu	6
Şekil 2: Rotary Gaz Giderme Cihazının Şematik Gösterimi	14
Şekil 3: Kalıp Tasarım Aşamaları ve Dikkate Alınacak Noktalar	17
Şekil 4: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Ölçüleri ve Katı Model Görüntüsü	21
Şekil 5: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Döküş Yüksekliği Tasarım Görüntüsü. (a:50mm, b:100mm, c:150mm).....	21
Şekil 6: Spiral Akıcılık Kalıbı Döküş Yüksekliği Tasarım Görüntüsü	22
Şekil 7: Elektrik Direnç Ocağı	22
Şekil 8: a) Sıvı Metal Gaz Giderme İşlemi, b) Pota İçerisinde Gaz Giderme Süreci Şematik Görüntü	23
Şekil 9: VAK Testi Cihazı.....	24
Şekil 10: Sıvı Metalin Kokil Kalıplara Dökümü.....	24
Şekil 11: Arşimet Yoğunluk Ölçüm Düzeneği.....	25
Şekil 12: K- Mold Test Kalıbı ve Numuneler	26
Şekil 13: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Görüntüleri	27
Şekil 14: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Ölçülmesi	27
Şekil 15: Spiral Akıcılık Kalıbı ve Ölçüleri	28
Şekil 16: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Ölçülmesi	28
Şekil 17: Zımparalama ve Parlatma Mikro Yapı İnceleme Cihazı.....	29
Şekil 18: Flowcast Dolum Modellemesi Yazılımdan Alınan Örnek Görüntüler.....	30
Şekil 19: Sıvı Metal Mesafesinin Tespit Edilmesi	30
Şekil 20: Sertlik Ölçüm Test Cihazı	31
Şekil 21: VAK Test Numune Görüntüleri (a ve b: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmış; c ve d: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmamış).....	33
Şekil 22: VAK Test Numune Kesit Görüntüleri (A ve B: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmış; C ve D: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmamış).....	34
Şekil 23: K-Mold Kalıbına Yapılan Döküm Numune Görüntüleri.....	36
Şekil 24: K-Mold Numuneleri Kırık Yüzey Numune Görüntüleri	36
Şekil 25: Döküm Sıcaklığına Bağlı Akıcılık Döküm Numuneleri.....	38
Şekil 26: Döküş Yüksekliğine Bağlı Akıcılık Döküm Numuneleri.....	39
Şekil 27: Dört Kanallı Akıcılık Kalıp Numunelerinde Sıvı Metal Temizliğini Etkiler	41
Şekil 28: Sıvı Metal Temizliğinin Spiral Akıcılık Kalıp Numune Görüntüleri	42
Şekil 29: Akıcılık Üzerinde Modelleme Sonuçlarına Bağlı Olarak Parametrelerin Karşılaştırılması.....	44
Şekil 30: 660 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçlar	45
Şekil 31: 700 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçları....	45
Şekil 32: 740 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçları....	46
Şekil 33: Kesit Kalınlık Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri.....	48
Şekil 34: Döküm Sıcaklık Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri	49
Şekil 35: Döküş Yükseklik Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri	50
Şekil 36: Hurda Alaşımın Temizleme Uygulamadan Elde Edilen Numune Mikro Yapı Görüntüleri	51



KISALTMALAR

CLF	: Kritik sıvı fraksiyonu (Critical Liquid Fraction)
CTE	: Termal Genleşme Katsayısı (Coefficient of Termal Expansion)
CE	: Karbon Eşdeğeri (Carbon Equivalent)
VAK	: Vakum Altında Katılaştırma
SiC	: Silisyum Karbür (Silisyum Carbide)
ETİAL	: ETİ Alüminyum
STL	: Standart Üçgen Dili (Standard Triangle Language)
HBN	: Brinell Sertlik Değeri (Brinell Hardness Number)
HRB	: Rockwell B Sertliği (Rockwell B Hardness)

SİMGELER

Kgf	: Kilogramkuvvet
kW	: kilowatt
J	: Jolue
KgK	: Kilogramkelvin
GPa	: Gigapascal
MJ	: Megajolue
°C	: Santigrad Derece
MPa	: Megapascal
mbar	: Milibar

GİRİŞ

Alüminyum (Al) döküm, metalürjik bir işlem olan dökümde Al alaşımlarının eritilip bir kalıba dökülerek istenen şekli almasını sağlayan süreçtir. Ergitilmiş sıvı metalin hazırlanmış kalıp boşluğuna doldurulması ve takip eden katılaşma, soğuma işlemleri döküm yönteminin temelini oluşturmaktadır. Al, birçok önemli özelliklere sahip olan bir metaldir. Yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğundan kaynaklı hafifliği, doğal olarak oluşan oksit tabakası nedeniyle korozyona karşı dirençli oluşu, yüksek ısı iletkenliği ve iyi yüzey işlenebilirlik özellikleri nedeniyle döküm sanayinde en çok tercih edilen malzemedir. Ayrıca Al dökümün, yüksek üretim hızı, tasarım özgürlüğü, maliyet etkinliği gibi avantajları da mevcuttur. Al döküm işlemi genellikle yüksek miktarda üretim gerektiren parçaların üretiminde tercih edilir. Bu parçalar genellikle otomotiv, havacılık, elektronik, inşaat, gıda ve ambalaj gibi endüstrilerde kullanılır.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Sıvı metalin akıcılığı; alaşım özellikleri, kalıp özellikleri, döküş yüksekliği, döküm sıcaklığı, sıvı metal temizliği, sıvı içerisinde inklüzyon varlığı gibi döküm uygulaması şartlarına göre birçok faktörden etkilenmektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında farklı kesit kalınlıklarında hazırlanan kokil kalıplara farklı döküş yüksekliğinde, döküm sıcaklığında sıvı metal temizleme öncesi ve sonrası dökümler yapılarak ortaya çıkan sıvı metal ilerleme mesafesi deneysel olarak belirlenmiştir. Aynı döküm deneyleri bilgisayar destekli modelleme teknikleri ile de çalışmalar yapılarak gerçek deneysel veriler ile modelleme teknikleri karşılaştırılmıştır. Böylece çalışma kapsamında Al12Si alaşımı için değişen döküm şartlarında sıvı metalin akıcılığı ve ilerleme mesafesi tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen numunelerde sertlik testleri ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilerek malzeme kalitesi belirlenmeye çalışılmıştır.

Araştırmanın Amacı

Literatür incelendiğinde; sıcaklık artışı ile akışkanlığın artacağı, çeşitli alaşım ilavelerinin akıcılığa olumlu yönde etki ettiği, döküş yüksekliği, sıvı metal temizliği ve dolum hızının akıcılık üzerinde etkisi olduğu ile ilgili genel bilgiler mevcuttur. Ancak yapılan çalışma ile Al12Si alaşımında ilgili özelliklerin ne derece etki ettiği nicel olarak ortaya konulması hedeflenmiştir. Böylece istenilen bir kesit kalınlığında, beklenen sıvı metal ilerlemesi için hangi şartlarda döküm yapılması gerektiği tez kapsamında belirlenmiştir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Döküm için Al'nin akıcılığı önemlidir çünkü akışkanlık, erimiş metalin kompleks şekil ve boşluklara kolayca girmesini sağlar. Bu, dökme işleminden kaynaklanabilecek eksiklikleri önleyebilir ve istenilen son ürünün daha hassas bir şekilde üretilmesine yardımcı olabilir. Aynı zamanda, akıcı bir Al metal, dökme kalıplarında birikme veya dolanan gaz kabarcıklarının oluşmasını engeller. Yüksek akıcılık ayrıca daha büyük ve karmaşık şekillerin dökülmesini de mümkün kılar.

Al ve alaşımlarının sıvı metal kalitesi birçok faktörden etkilenebilir. Kullanılan ham malzemenin saflığı sıvı metalin kalitesini etkiler. Düşük saflıkta Al ve alaşımları daha fazla kirlenmeye açık olabilir. Al ve alaşımlarının sıvı hale getirilirken ve şekillendirilirken sıcaklık kontrolü önemlidir. Yanlış sıcaklık kontrolü, sıvı metalin kalitesini olumsuz etkileyebilir. Diğer alaşım maddeleriyle karıştırılması sırasında, karıştırma süresi ve hızı önemlidir. Yetersiz karıştırma, alaşım maddelerinin eşit şekilde dağılmamasına ve homojen olmayan bir sıvı metal oluşmasına neden olabilir. Al ve alaşımlarının sıvı haldeyken oksijenle temas etmesi durumunda oksitlenme oluşabilir. Bu nedenle deoksitasyon işlemi uygulanarak oksijenin uzaklaştırılması gerekmektedir. Sıvı metal kalitesini etkileyen faktörlerden biri de impuritelere dir. İmpuriteler sıvı metalin içinde bulunan istenmeyen maddelerdir ve kaliteyi düşürebilir. Al ve alaşımlarının sıvı halden katı hale geçişinde soğutma hızı önemlidir. Yanlış soğutma hızı alaşımın yapısını etkileyebilir ve istenmeyen özelliklere yol açabilir. Şekillendirme için kullanılan kalıp tasarımı, sıvı metalin akışı, dolgusu ve soğuması üzerinde etkilidir. Kalıp tasarımının doğru olmaması sıvı metalin kalitesini etkileyebilir. İşleme koşulları, sıvı metalin kalitesini etkileyen bir diğer faktördür. Örneğin, döküm sıcaklığı, basınç ve döküm hızı gibi faktörler sıvı metalin kalitesini etkileyebilir.

Bu çalışmada Al12Si alaşımının kokil kalıba dökümünde değişen döküş yüksekliği, döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizliğinin farklı kesitlerde akıcılık üzerinde etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 2 mm ile 8 mm kesit kalınlığı arasında dökümlerin değerlendirilebileceği dört kanallı bir kalıp tasarlanmıştır. Farklı döküş yüksekliği, döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizliği gibi değişen faktörlerin, sıvı metal akış özellikleri ve döküm numunelerinin kalitesine etkisi yapılan deneylerle belirlenmeye çalışılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum, simgesi Al olan üçüncü en yaygın elementtir. Al, hafif, dayanıklı, dökülebilir ve elektrik akımını iyi ileten bir metaldir. Bu özellikleri nedeniyle birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Al, doğada genellikle boksit (Al_2O_3) minerali halinde bulunur. Al endüstrisi boksitin işlenmesiyle başlar. Boksit, NaOH ve bir elektrolit kullanılarak elektroliz yöntemiyle rafine edilir. Bu işlem sonucunda saf Al elde edilir (Davis, 1993).

Ülkemizde Eti Alüminyum A.Ş. entegre Al fabrikasında (Seydişehir, Konya) cevherden Al elde edilmekte ve elde edilen alüminyumdan istenen nihai ürün elde edilebilmektedir. Etibank Alüminyum Tesisleri 1967 yılında kurulmuştur. Tesis yılda 500.000 ton boksit cevheri işleyerek 220.000 ton alümina ve 90.000 ton sıvı Al üretim kapasitesine sahiptir. Tesiste işlenen boksit cevheri Seydişehir ilçesinin, Mortaş, Doğankuzu, Değirmenlik ve Çatmakaya mevkiindeki maden ocaklarından sağlanmaktadır. Seydişehir ve Akseki bölgesinde tespit edilen toplam Al rezervinin 45 milyon ton olduğu ve 80 yıl süreyle tesisin çalışması için yeterli olacağı bildirilmiştir (MEVKA, 2019).

Al endüstrisinde, kullanım sonucu niteliğini kaybeden ve hurda olarak tabir edilen Al'nin ve alaşımlarının değerlendirildiği endüstri uygulamasına ikincil Al endüstrisi denilmektedir. Al, birkaç kez geri dönüştürülebildiği için döngüsel ekonominin kritik bir unsurudur. Üstelik Al geri dönüşümü, cevherlerden birincil Al üretiminden daha ekonomik ve çevre açısından daha verimli bir prosedürdür. İkincil Al alaşımları çoğunlukla döküm uygulamalarında kullanılır. Çünkü kimyasal bileşimlerini ikincil üretim süreçleriyle karşılamak mümkündür (Nunes vd., 2023). İkincil Al'nin tekrar kullanım için işlenmesi düşük enerji girdisi gerektirdiğinden bu üretim biçimine talep gün geçtikçe artmaktadır.

Alaşımlar, Al'nin özelliklerini iyileştirmek ve çeşitli uygulamalarda kullanımını artırmak için diğer metallerle birleştirilmiş halidir. Al alaşımlarının birçok avantajı vardır. Bunlar hafif, dayanıklı, oksidasyona dayanıklı ve genellikle iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca, mükemmel bir şekilde şekillendirilebilir ve dökülebilirler. Al alaşımlarının çeşitliliği ve kullanım alanları bu malzemeyi endüstrinin en önemli malzemelerinden biri haline getirmiştir. Al, hafif olması ve yüksek dayanıklılık sağlaması nedeniyle uçak gövdelerinde, kanatlarda, motorlarda ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılır. Havacılık endüstrisi hafif ve dayanıklı bir malzeme aradığı için Al alaşımları kullanır. Otomotiv endüstrisinde ise Al alaşımları yakıt verimliliğini artırmak için kullanılır (Liu vd. 2022; Wang vd. 2018).

Al kullanımı, araç ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak amacıyla otomotiv sektöründe giderek daha yaygın hale gelmektedir. Motor parçaları, şasisel bileşenler, dış kaplama ve iç aksam gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca hafifliği, dayanıklılığı ve korozyon direnci sayesinde birçok inşaat uygulamasında tercih edilmektedir. Havacılık endüstrisi hafif ve dayanıklı bir malzeme aradığı için Al alaşımları kullanır. Otomotiv endüstrisinde ise Al alaşımları yakıt verimliliğini artırmak için kullanılır (Liu vd. 2022; Wang vd. 2018).

Pencere ve kapı çerçeveleri, dış cephe kaplama, boru ve çatı sistemleri gibi alanlarda Al yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik cihazlarda kullanılan Al ve alaşımları, hafiflikleri ve termal iletkenlik özellikleri nedeniyle tercih edilir. Örneğin, bilgisayar kasaları, televizyonlar, cep telefonları ve tabletler gibi cihazların yapımında kullanılır. Al folyo, içerdiği özellikler nedeniyle gıda ve içecek ürünlerinin ambalajında yaygın olarak kullanılır. Bu alanda Al yüksek ısı yalıtımı, hava geçirmezlik ve uzun raf ömrü gibi özellikleri değerlidir. Al iyi bir iletken olması ve hafifliği, elektrik enerjisi iletim hatlarında kullanılmasını sağlar. Ayrıca elektrik kabloları, konnektörler ve transformatörler gibi birçok elektrik bileşeni Al bazlı alaşımlar içerir (Çakanyıldırım & Gürü, 2021).

Al ve alaşımları, gıda sektöründe mutfak eşyaları, tencereler, tavalarda kullanılır. Al'nin ısıyı hızla iletebilme özelliği, pişirme sürelerini kısaltmaya yardımcı olur. Bunlar sadece bazı örnekler olup, Al ve alaşımlarının kullanım alanları oldukça geniş ve çeşitlidir. Ayrıca, düşük bakım maliyetleri, renklendirilebilmesi ve teknolojik açıdan sınırsız mamül geliştirilebilmesi yukarıda bahsedilen kullanım alanlarını gün geçtikçe genişletmektedir (Çakanyıldırım & Gürü, 2021; Yağcı vd., 2021).

Al ürünleri ve üretim teknikleri şu şekilde sıralanabilir:

Ekstrüzyon ürünleri: Hammadde külçeden üretilen yarı ürünlerdir. Bu yöntemde, ısıyla yumuşatılan Al, bir ekstrüzyon presinden geçirilerek şekillendirilir. Bu yöntemle Al profiller, ızgaralar, kapı ve pencere çerçeveleri, tavan kaplamaları gibi birçok ürün üretilir.

Döküm ürünleri: Al eritilerek sıvı hale getirilir ve uygun kalıplara dökülerek istenen şekli alır. Döküm yöntemiyle motor blokları, kaplama malzemeleri, alaşımlı parçalar gibi birçok Al ürün üretilir.

Levha veya rulo sıcak ve soğuk haddeleme ürünleri: İnce levha veya rulolar halindeki Al, sıcak veya soğuk haddeleme yöntemiyle istenen kalınlığa ve şekle getirilir. Bu yöntemle Al levhalar, sac malzemeler, alaşımlı bantlar üretilir.

Kaynak ürünleri: Al, uygun kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilebilir. Bu yöntemle Al yapılar, kaplama malzemeleri, araç parçaları gibi birçok ürün üretilir.

Yüzey işleme ürünleri: Al ürünlerin yüzeyi, farklı işleme yöntemleri kullanılarak düzeltilbilir veya istenilen özellikleri kazandırılabilir. Bu işlemler arasında anodizasyon, elektrostatik boya, vernikleme, cilalama gibi yöntemler bulunur (Çakanyıldırım & Gürü, 2021).

Al metalinin bazı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (Eti Alüminyum, 2023).

Tablo 1: Alüminyum Metalinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Elastisite modülü	Ergime sıcaklığı	Çekme gerilmesi	Kaynama sıcaklığı	Özgül ağırlık	Yüzde uzama
70 G Pa	660 °C	40-90 MPa	2519 °C	2,70 g/cm ³	%30-40

1.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÜRETİM TEKNİKLERİ

1.2.1. Birincil Alüminyum Üretimi

Birincil Al üretiminin aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

Bauxit (boksit) madeninin çıkarılması: Boksit, Al ana bileşenidir ve dünya genelinde genellikle yer altında bulunur. Boksit madenleri açığa çıkarıldıktan sonra, cevherin saflaştırılması ve temizlenmesi için işleme tesislerine sevk edilir.

Bayer süreci: Boksit, Bayer süreci olarak bilinen kimyasal reaksiyona tabi tutulur. Bu süreçte boksit, sodyum hidroksit çözeltisi ile karıştırılır ve ısıtılır. Bu reaksiyon sonucunda Al hidroksit çökelir ve diğer mineraller dibe çöker.

Alüminyum hidroksitin ($Al(OH)_3$) işlenmesi: $Al(OH)_3$, kalsinasyon adı verilen bir süreçte ısıtılır. Bu süreçte $Al(OH)_3$ ’ün suyu buharlaşır ve alümina adı verilen saf alüminyum oksit (Al_2O_3)’e dönüşür.

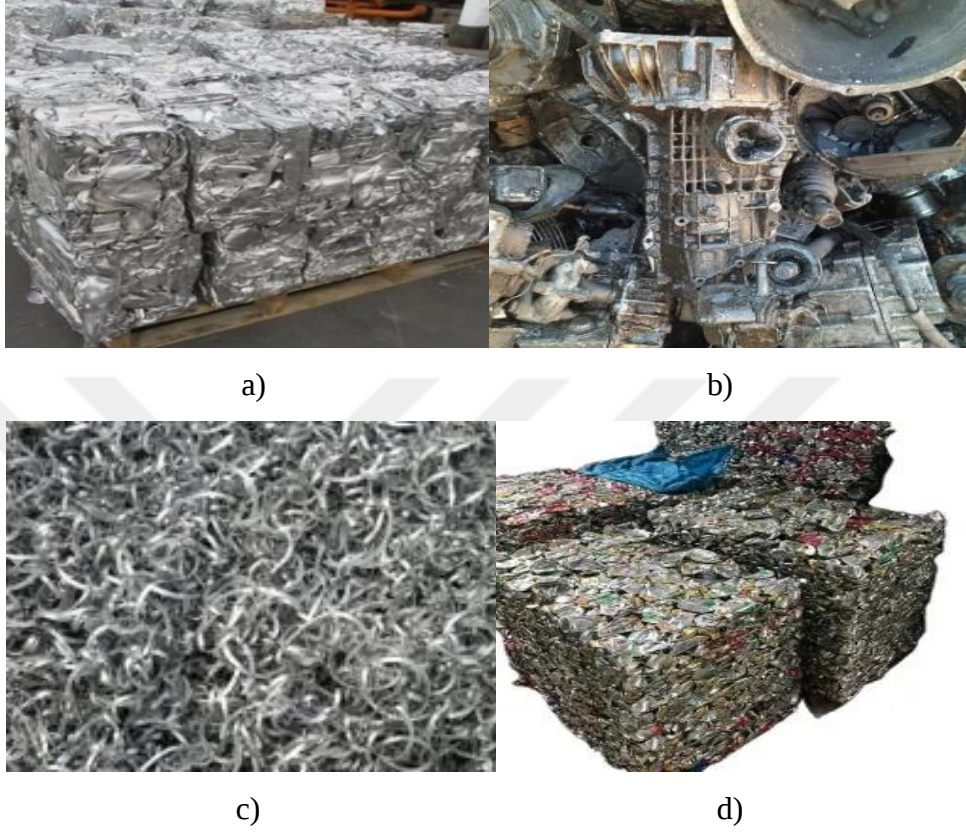
Hall-Héroult elektroliz yöntemi: Alümina, Hall-Héroult elektroliz yöntemiyle Al’ye dönüştürülür. Bu yöntemde, alümina eriyiği bir elektrik akımının etkisiyle ayrıştırılır ve Al metal elde edilir.

Al’nin alaşımlara dönüştürülmesi: Elde edilen saf Al, alaşım maddeleriyle karıştırılarak farklı Al alaşımları üretilir. Bu alaşım maddeleri genellikle magnezyum (Mg), silisyum (Si), bakır (Cu), çinko (Zn) ve diğer metallerdir. Bu alaşım süreci, istenen özelliklere sahip Al ürünleri elde etmek için yapılan önemli bir adımdır.

Mamul üretimi: Al ve alaşımları, farklı üretim tekniklerine ve uygulamalara göre farklı mamullere dönüştürülür. Bu mamuller arasında levhalar, plakalar, çubuklar, borular, profil ve döküm parçaları bulunur. Mamul üretimi, Al özelliklerine ve istenen ürünün kullanımına bağlı olarak farklı şekil verme, kesme, delme ve kaynak gibi işlemleri içerir (Car, 2011).

1.2.2. İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil Al üretimi, geri dönüşüm süreciyle elde edilen kullanılmış Al malzemelerin yeniden işlenerek yeni Al ürünlerinin oluşturulmasıdır. Şekil 1’de çeşitli Al hurda tipleri görülmektedir.



Şekil 1: İkincil Al Tipleri, a) Pres Yumuşak Hurda, b) Sert, Döküm Hurdası, c) Talaş, d) Al İçecek Kutusu

Birincil Al üretimine kıyasla daha az enerji gerektiren ikincil Al üretiminde, kullanılmış Al’nin toplanması ile başlayan süreç, ayıklanması, ergitilmesi, alaşımlandırılması, saflaştırılması, döküm, cüruf temizleme ve değerlendirme aşamaları için geri dönüşüme gönderilmesi ile gerçekleştirilir (Car, 2019).

İkincil Al endüstrisi sayesinde, Al’nin doğal kaynaklarının tüketimi azaltılarak ekonomik ve çevresel faydalar sağlanır. Tablo 2’de birincil ve ikincil Al üretimi için tüketim ve salınım değerleri görülmektedir (Car, 2011).

Tablo 2: Birincil ve İkincil Üretim İçin Tüketim ve Salınım Değerleri

Enerji tüketimi	1 ton birincil Al külçe üretimi	1 ton ikincil Al külçe üretimi
Toplam (MJ)	193,702	10,321
Yenilenebilir enerji (MJ)	57,352	452
Fosil yakıtlardan sağlanan enerji (MJ)	136,350	9,869
Kömür (MJ)	50,807	937
Petrol (MJ)	21,268	1,319
Doğalgaz (MJ)	36,335	7,151
Nükleer enerji (MJ)	8,282	419
Diğer enerji (MJ)	0	44
Boksit madenciliği + alümina üretimi (MJ)	19,657	0
Sera gazı salınımı		
CO ₂ (kg)	10,470	620
Perflorokarbon (kg)	0,30	0
PFC, CO ₂ eşdeğeri (kg)	2,227	0

1.3. ALÜMİNYUM ALAŞIM ÖZELLİKLERİ

1.3.1. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri

Mühendislik malzemelerini uygun şartlar ve metotlarla üretebilmek için fiziksel özelliklerini bilmek gerekir. Al'nin atom numarası 13'tür. Yerkürenin en sık rastlanan elementlerinden üçüncüsü olan Al kararsız yapısından dolayı kimyasal açıdan oldukça aktiftir. Katı halden akışkan hale geçerken kristal yapı oluşturur (Davis, 1993).

Atomik ağırlığı 26.98 gr/mol ve yoğunluğu 2.70 gr/cm³ olan Al hafif bir element olarak bilinir ve bu onun endüstride kullanımında en önemli tercih nedenlerinden biridir. Sıcaklık artışıyla yoğunluğu azalır. Aynı zamanda bazı elementlerin ilavesiyle üretilen alaşımlarının yoğunluğu Al'nin yoğunluğundan düşüktür. Bu nedenle Al alaşımları hem enerji hem de nakliye masraflarından tasarruf sağlar (Davis, 1993).

Yüksek mukavemetli-yüksek elektrik iletkenliğine sahip Al ve Al alaşımlı iletkenler güç iletimi alanında oldukça popülerdir. Temelde, tane özellikleri, kristalografik oryantasyon ve alaşım atomlarının durumu dahil olmak üzere çok ölçekli mikro yapılar, mukavemet-elektriksel iletkenlik ilişkisinde önemli bir rol oynamaktadır. (Hou vd., 2019).

Al ve alaşımlarının korozyona direnci oldukça yüksektir. Bunun nedeni korozif ortamlarda yüzeyinin bir oksit tabakası ile kaplanmasıdır. %99,5 saflığın üzerinde korozyona dirençten bahsedilir. (Karakışlak, 1978; Uchida, 1996).

Termal uzama ya da genleşme, sabit basınç altında sıcaklığı artırılan malzemenin hacmindeki artıştır. İçerdiği element çeşidi ve oranına bağlı olarak değişmekle birlikte

alaşımların termal uzama katsayısı pratikte 20°C-100°C arasında lineer kabul edilir. Bakır ve silikon ihtiva eden alaşımlarda uzama katsayısı düşerken, Mg'nin eklendiği bir alaşımda uzama katsayısının arttığı gözlenmiştir. Otomotiv endüstrisinde silikon oranı yüksek Al alaşımlar, içten yanmalı motor pistonu ve piston başlıkları imalatında kullanılır (Ashley, 1994).

Al alaşımları elektrik ve ısıyı ileten alaşımlardır. Bu nedenle hızlı ısı transferi gereken otomobil radyatörleri, piston ve piston başlıkları üretiminde tercih edilir. Al'nin saflığı arttıkça ısıl iletkenliği ve elektrik iletkenliğinin arttığı bilinmektedir. Kullanım amacına uygun olarak Al alaşımlandırılmaktadır. Örneğin Mangan (Mn)'nin eklendiği bir Al alaşımda elektrik iletkenliği azalmaktadır (Karakışlak, 1978).

1.3.2. Alüminyumun Mekanik Özellikleri

Malzemenin mekanik özelliği kullanım alanını belirleyen en önemli faktördür. Özellikle otomotiv endüstrisinde malzemenin mekanik özelliği büyük önem taşımaktadır. Al diğer metallerle alaşımlandırıldığında, her alaşım farklı bir endüstride tercih edilmektedir. Gerilme dayanıklılığı artırılmış Mg-Al alaşımlar denizcilik sektöründeki yapılarda ve kaynaklı konstrüksiyonlarda, Mg-Mn-silikon alaşımlar ise ticari yapılarda tercih edilir (Reza Kashyzadeh vd., 2023).

Yüksek mukavemet ya da aşınma direnci mühendislik malzemeleri için önemli bir mekanik niteliktir. Titanyum ve uçak Al alaşımları bu niteliği yüksek materyallerdir. Al'nin çeşitli alaşımlarının aşınma direnci oldukça yüksektir. Örneğin, uygun miktarda Mg ilavesi, grafit parçacıklarıyla güçlendirilmiş Al alaşım matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında, sert parçacıkların düzgün dağılımı ve sürtünme katsayısının azalması nedeniyle malzemelerin aşınma direncinin artırılmasında faydalıdır (Rana vd., 2012).

Al alaşımlarının elastik modülünün (E), diğer yapısal malzemelerden önemli ölçüde daha düşük olduğu ve yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda kullanımının sınırlandığı bildirilmiştir. Ancak, Al'nin uygun alaşımlarının üretilmesiyle elastik modülünün artırılabilceği ifade edilmiştir. Al'nin Si içeriğini arttırmak, kompozitlerin elastik modülünü, termal boyutsal stabilitesini ve termal iletkenliğini artırabilir ve kompozitlerin termal genleşme katsayısını (CTE) azaltabilir (Rana vd., 2012). Ayrıca, %5 alaşım elementi içeren (M: Cr, Si, Nb, Mo ve V), Al-5M alaşımlarının elastik modülü ve sertliği, ticari Al alaşımlarından önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur (Christudasjustus vd., 2022).

Al'nin başka bir özelliği, ekstrüzyon yoluyla çeşitli karmaşık yapısal şekillere dönüştürülebilmesidir. Yüksek saflıktaki Al yumuşak olduğundan presleme, bükme, çekme ve kalıplama yoluyla rahatlıkla tel haline getirilebilir ve şekillendirilebilir (Al_Saadi & Tunay,

2017). Al'nin sıcak ve soğuk şekillenebilme özelliği bulunmaktadır. Al alaşımlarının çok iyi özellikleri olup, $6,09 \times 10^{-3}$ mm kalınlığa kadar inceltilebilmektedir (Uchida, 1996).

1.3.3. Alüminyumun Kimyasal Özellikleri

Al atmosfer oksijeni ile temas ettiğinde yaklaşık 0,2 mm kalınlığında sık ve gözeneksiz bir oksit tabakası oluşturur. Bu oksit tabakası metalin üzerini kaplayarak Al'ye paslanmazlık yani korozyona dayanım özelliği kazandırır. Ergime sıcaklığının üstüne çıktıkça oksitlenme hızlanır. Al, Mg, Ca, Na, Si ve Cu gibi elementlerle alaşımlandırılarak oksidasyonu güçlendirilir. Oksidasyonun güçlü olduğu Al-Mg alaşımları ısıtılınca çok çabuk oksitlenir ve alaşımın yüzeyinde oksidasyon katmanı oluşur (Çolak, 2009).

Al_2O_3 oluşum reaksiyonu birçok metalin oksitlenme reaksiyonundan daha yüksek ısı açığa çıkaran ekzotermik bir reaksiyondur. $AlCl_3$ oluşur ve 161,4 kcal/g.mol ısı transfer edilir. Hidrojenle reaksiyona giren Al hidrojeni kolaylıkla çözer. Ergitilmiş Al'de hidrojenin çözünürlüğü 1000°C'de $0,2 \text{ cm}^3\text{H}/\text{cm}^3\text{Al}$ olarak belirlenmiştir (Karakışlak, 1978).

1.4. AKICILIK

Döküm teknolojisinde akıcılık, döküm malzemesinin düzgün ve homojen bir şekilde kalıba aktarılabilme yeteneğini ifade eder. Akışkan ergimiş metal, kalıp boşluğunda düzgün bir şekilde akarak tüm boşlukları doldurabilme özelliğine sahip olmalıdır.

1.4.1. Akıcılığı Etkileyen Faktörler

Akışkanlığı etkileyen faktörleri metalürjik ve kalıp/döküm değişkenlerine bağlı faktörler olarak sınıflandırmak mümkündür (Di Sabatino & Arnberg, 2004). Metalin viskozitesi metalin akışkanlığını doğrudan etkiler. Düşük viskoziteli metaller daha akışkan bir yapıya sahiptir, bu da döküm sürecini kolaylaştırır. Metalin döküm sıcaklığı, metalin akışkanlığını etkileyen diğer bir faktördür. Düşük sıcaklıklarda metal daha yoğun hale gelir ve akışkanlığı azalırken, yüksek sıcaklıklarda ise metal daha akışkan hale gelir. Metalin akıcılığı, ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda artmakla birlikte, sıcaklığın aşırı artışı birçok olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu açıdan optimum sıcaklığı belirlemek önemlidir. Döküm sıcaklığının ergime sıcaklığından 100-150°C üzerinde olması gerektiği bildirilmiştir. Bileşimin akıcılığa etkisi ise farklı olmaktadır. Metalin içerdiği alaşım elementleri, akışkanlığı etkileyebilir. Bazı alaşımlar daha akışkan bir yapıya sahipken, bazıları daha yoğun olabilir. Örneğin dökme demirlerde CE'yi (karbon eşdeğerini) artıran elementlerin katılması akıcılığı olumlu yönde etkilemektedir (Aslandoğan, 2009).

Yüzey gerilimi akışkanlığı etkileyen diğer bir faktördür (Di Sabatino & Arnberg, 2004).

Yüzey gerilimi, bir sıvının yüzeyindeki moleküllerin birbirlerine olan çekim kuvvetlerinden kaynaklanan bir kuvvettir. Sıvının serbest yüzeyindeki moleküller, sadece sıvının içine doğru çekilen diğer moleküller tarafından çekilebilir, dışa doğru ise çekilemezler. Bu durum, yüzeydeki moleküllerin içerideki moleküllere kuvvet uygulaması sonucu bir gerilme oluşmasına neden olur. Sıcaklıkla yüzey gerilimi arasında negatif bir bağlantı vardır. Yüzey gerilimi yüksek metallerin dökümünde, metalin dar bir kanala girmesi ve kanal boyunca akması için gereken basıncın artması gerekir (Aslandoğan, 2009).

Metalin döküş hızı, akışkanlığı etkileyen önemli bir faktördür. Metal döküm hızı, döküm sürecinde metalin akıcılığını etkiler. Dökme hızı arttıkça, metal daha hızlı akar ve daha fazla enerji ile dökülür. Bu, metalin döküm formunun daha az kesintili, daha homojen ve daha az iç yapısal deformasyonlu olmasını sağlar. Döküm hızının artması, metalin döküm kalıpları içerisinde daha düşük viskozite ile hareket etmesini sağlar. Bu da daha iyi dolgu sağlar ve ince yapıları daha iyi doldurur. Ayrıca, daha hızlı dökme işlemleri, soğuma süresini kısaltır ve daha hızlı yeniden kullanma süreçleri ile sonuçlanır. Ergiyik metalin döküm hızının, döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısını etkilediği bildirilmiştir (Kan vd. 2022; Ilkhchy, 2012). Ancak, döküm hızı arttıkça, özellikle büyük ve kompleks parçalar için daha fazla fırçalanma ve gaz sıkıştırma riski vardır. Ayrıca, metalin dökülme formunun kontrol edilememesi durumunda, kalite sorunları ve iç yapısal deformasyonlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, metal döküm hızı, döküm parçasının boyutu, şekli ve kompleksliği gibi faktörlere bağlı olarak dikkatlice ayarlanmalıdır. Uygun döküm hızı, istenilen kalite, dolgunluk ve yapının elde edilmesini sağlar. Döküm bütün döküm kalıplarında aynı hızda (yüksek hız tercih edilir) olmalıdır ve kalıp üstündeki dökme yüksekliği daima aynı olmalıdır (Aran, 1993).

Döküm şekli ve boyutu (kalıbın özellikleri) Al sıvı metal akıcılığına doğrudan etki eder (Aslandoğan, 2009). Özellikle döküm yöntemi, döküm şekli, kalıp tasarımı ve kalıp malzemesi gibi faktörler, Al sıvı metalin akış hızı, akış düzeni ve kesme etkisi gibi özellikleri üzerinde etkilidir. Kalıp tasarımı, Al sıvı metalin akışını ve doluluk oranını etkiler. Örneğin, doğru kanal tasarımı ve yeterli doluluk boşluğu, sıvının kalıp içinde homojen bir şekilde akmasını sağlar. Ayrıca, uygun soğutma kanalları ve kalıp sıcaklık kontrol sistemleri, sıvı metalin daha hızlı ve daha homojen soğutulmasını sağlar (Cortina vd., 2018). Yolluk sistemi, döküm havşasından dökülen sıvı metalin kalıp boşluğuna ulaşmasını sağlamaktadır. Sıvı metalin kalıp boşluğuna türbülanssız doldurulması ve parçanın kusursuz dolum hatasını sağlayan kalıp boşluklarının tamamına yolluk sistemi denilmektedir (Campbell, 2003). Yolluk sisteminin tasarımı istenilen özellikteki döküm parçaları üretimi için önemlidir.

Döküm yöntemi de akıcılığı etkiler. Basınçlı döküm gibi yöntemler, metalin daha hızlı

akmasını sağlar ve doluluk oranını artırır. Bu yöntemlerle, Al sıvı metal daha yüksek akış hızlarında dökülebilir, daha ince geometrili yapılar oluşturulabilir ve daha homojen bir mikroyapıya sahip olabilir. Döküm basıncı, metalin akışkanlığını etkileyen önemli bir faktördür. Daha yüksek bir döküm basıncı, metalin daha akışkan bir şekilde dökülmesini sağlar (Han & Zhang, 2020).

1.4.2. Alüminyum Döküm İşleminde Karşılaşılan Bazı Hatalar

İyi tasarlanmamış veya uygun malzeme kullanılmamış kalıplar, döküm parçalarında çatlaklara, atıklara veya yüzey kusurlarına neden olabilir. Al'nin kalıba düzgün bir şekilde ulaştığından emin olmak için dökme malzemenin tamamının kalıba dengeli bir şekilde dağıtılması gerekir. Dolgu hataları, eksik dolgular, soğuk bağlantılar veya gaz kapanması gibi sorunlara neden olabilir. Al döküm esnasında kalıpta hapsolmuş hava kabarcıkları oluşabilir. Bu kabarcıklar, döküm parçasının içinde boşluk ve porozite oluşturarak mekanik özelliklerini etkileyebilir. Al, oksijen ile daha hızlı tepkimeye girme eğilimindedir. Bu nedenle, döküm malzemesi oksijenle temas ettiğinde oksidasyon meydana gelebilir. Oksidasyon, malzemenin döküm sonucunda yüzeyinde pürüzler veya korozyon oluşmasına neden olabilir. Döküm parçasının hızlı veya yetersiz soğuması, iç gerilmeler ve çatlaklara neden olabilir. Kontrollü soğutma işlemi önemlidir çünkü hızlı soğuma, parçanın iç yapısını etkileyebilir. Al, katılaşma sürecinde genişleyen bir metaldir. Yanlış tasarlanmış kalıplar veya hızlı soğutma, bu genişlemeyi artırabilir ve döküm parçasında deformasyon veya çatlaklara neden olabilir. Döküm sonucunda parçada çarpıklık veya eksenel sapma oluşabilir. Bu hata, kalıp veya döküm sürecindeki bir sorundan kaynaklanabilir (Nikolić vd., 2023).

1.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDA SIVI METAL TEMİZLEME

Sanayide ekonomik değeri yüksek olan ve geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilen ikincil Al'den kaliteli ürünler elde edebilmek, sıvı metalin kalitesini artırmakla mümkündür. Bu amaçla hurdadan gelen gaz, inklüzyon ve kalıntı gibi kirlilikler sıvı metalden mümkün olduğunca uzaklaştırılmaya çalışılır (Tokatlı vd. 2022).

Al ve alaşımlarının sürekli dökümü sırasında en sık rastlanan sorunlardan biri nem ile ergiyik metalin reaksiyonu sonucu yüzeyde oksit oluşması ve açığa çıkan hidrojenin sıvı metalde çözülmesidir. Ergiyikteki artan hidrojen içeriğinin döküm parçada daha yüksek gözenekliliğe yol açtığı iyi bilinmektedir (Ludwig vd., 2012). Bileşenlerin mümkün olan en iyi mekanik performansını sağlayan, çevresel etki yaratmayan, bugün mevcut olanlardan daha verimli ve kontrolü daha kolay olan, yüksek düzeyde akıcılık ve mikroyapısal özelliklere yol açan sıvı eriyiğin arıtılmasına yönelik tekniklerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır (Puga vd.,

2014). Al alaşımlarda sıvı metal temizleme için kullanılan yöntemler; flakslama, ultrasonik gaz giderme, yeniden ergitme gaz giderme, elektromanyetik yönlü gaz giderme, spreyc gaz giderme, vakum gaz giderme ve döner tip (rotary) gaz giderme olarak sınıflandırılmaktadır (Tokatlı vd. 2022).

Sıvı metal içerisindeki inklüzyonları veya gaz halindeki safsızlıkları uzaklaştırmak için kullanılan inert veya reaktif gazlar *flaks* olarak tanımlanmaktadır (Tokatlı vd. 2022). İntert gazlar, sıvı metali oksidasyon veya diğer reaksiyonlara karşı korurken, reaktif gazlar ise inklüzyonları veya safsızlıkları kimyasal olarak uzaklaştırabilir. Uygulama kolaylığı ve maliyetinin düşük olması nedeniyle Cl ve F ihtiva eden karışımlar daha çok tercih edilir (Yüksel, 2016). Ancak hurda azot gazı kullanımı tablet uygulamasına göre daha çevreci bir uygulama olması nedeniyle önerilmektedir (Çolak vd., 2016; Tokatlı vd. 2022).

Sıvı bir metal, yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşimlere maruz bırakıldığında, kavitasyon eşiğinin üzerindeki alternatif basınç, sıvı metalde kütle transfer süreçlerini yoğunlaştıran ve hidrojenin eriyikten gelişen kabarcıklara difüzyonunu hızlandıran çok sayıda boşluk oluşturur. Akustik kavitasyon zamanla ilerledikçe, bitişik kabarcıklar birbirine dokunur ve birleşir, sıvının gazdan arındırılmasını teşvik eden yüzeye ulaşana kadar yerçekimine karşı sıvı içerisinde yükselmelerine izin verecek yeterli boyuta kadar büyür (Eskin, 1998). *Ultrasonik gaz gidermenin* temel avantajları, yüksek gaz giderme oranı ve prosesin çevreye olan etkisinin azalmasıdır. Ayrıca kavitasyon, metal olmayan kalıntıların eriyikten uzaklaştırılmasını teşvik eder ve yüksek sağlıklı dökümlerin elde edilmesinde önemli bir katkı sağlar (Puga vd., 2014).

Yeniden ergitme tekniği Al alaşımlarda sıvı metal temizleme yöntemlerinden bir diğeridir. Sıvı metalin yeniden ergitme esnasında kontrollü yönlü katılaşma ile sıvı metal temizliği gerçekleştirilebileceği bildirilmiştir (Tokatlı vd., 2022). Yeniden ergitme işleminde oksitler ve inklüzyonlar etkin bir şekilde uzaklaştırılabilmektedir (Lee & Hunt, 2001; Tokatlı vd., 2022).

Sıvı metal temizleme yöntemlerinden biri de *elektromanyetik yönlü gaz giderme* yöntemidir (Tokatlı vd., 2022). Bu metotta; ergiyik metal içindeki gazlar elektromanyetik alanın etkisiyle belirli bir yöne doğru itilebilir veya toplanabilir. Bu, ergiyik metalin içindeki gazların istenilen bir bölgeye yönlendirilmesini veya birikmesini sağlayarak, istenmeyen gazların uzaklaştırılmasına yardımcı olabilir. Elektromanyetik yönlü katılaşmanın gaz giderme fizibilitesinin araştırıldığı bir çalışmada; başlangıçta, katılaştırma elektromanyetik karıştırma koşulu altında gerçekleştirilmiş ve aşağı yönlü katılaşma sırasında, hidrojen büyüyen katı tarafından uzaklaştırılarak kalan sıvıya doğru yönlendirilmiştir. Sıvı akışının etkisi altında olan kabarcıklar, bir hidrojen taşıyıcı olarak numune boyunca aşağıdan yukarıya doğru hareket

ederek gaz giderme hızını büyük ölçüde artırmıştır. Daha sonra aşağı çekme ilavesi ile yönlü katılma meydana gelmiş, bu durum kabarcıkların sadece numunelerin üst kısmında dağılmasına neden olmuştur (Ren vd., 2014).

Sprey gaz giderme yöntemi ise, genellikle ergimiş metalin içine spreylene bir madde aracılığıyla gazları absorbe etme veya nötralize etme esasına dayanır (Tokatlı vd., 2022). Bu metotta dizayn edilen püskürtücüde, Al eriyiği damlacıklar halinde atomize edilir ve eriyik damlacıkları, yüksek basınçlı püskürtme gazı (yüksek saf nitrojen) aracılığıyla ortamdaki temizleme gazına püskürtülür. Daha sonra eriyik damlacıklarının gazı, bir rezistanslı ısıtıcı tarafından yüksek sıcaklıkta tutulan arıtma tankındaki temizleme gazı (argon) ile giderilir. İşlenen eriyik, bir eriyik çıkışı yoluyla arıtma tankından dışarı akıtılarak rezistans fırınında toplanır (Wu vd. 2007).

Sıvı metal temizleme yöntemlerinden bir diğeri de ergimiş metal içindeki veya yüzeyindeki gazların vakumla çekilerek ortamdan uzaklaştırılmasıdır (Tokatlı vd., 2022). *Vakumla gaz giderme* prosesinin amacı, erimiş metaldeki hidrojenin uzaklaştırılmasının yanı sıra, nötr gazların akışını kullanarak istenmeyen metalik olmayan kalıntıları ortadan kaldırmaktır (Riyahi Malayeri, 2023).

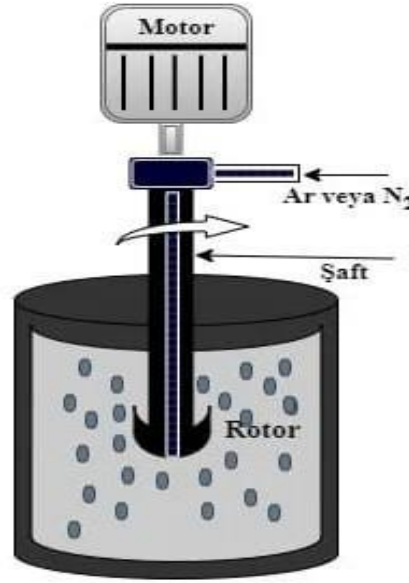
Bu tez çalışması kapsamında rotary (döner) tip gaz giderme yöntemi ile sıvı metal temizleme gerçekleştirilmiştir.

1.5.1. Rotary (Döner Tip) Gaz Giderme

Al dökümhaneleri için düşük maliyetle verimli çalışma sunan döner gaz gidericiler yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Azot ve argon gazı gibi maliyetçe oldukça ucuz olan inert gazın, sıvı metale zerk edilerek hidrojen gazının ergimiş Al'den boşaltılması sağlanır. Rotary gaz giderme yöntemi, Al alaşımlar veya diğer metallerin işlenmesi sırasında oluşan gazların giderilmesi için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, genellikle vakum odaklı bir sistemde döner bir mekanizma kullanarak gazları toplama ve uzaklaştırma prensibine dayanır (Tokatlı, 2022).

Bu sistemlerde, bir döner mekanizma veya türbin benzeri bir yapı, ergimiş metalin bulunduğu alanda döner ve gazları toplar. Bu döner mekanizma, vakum odaklı bir sistemle bağlantılıdır ve oluşan gazları toplar, ardından bir emme veya filtreleme işlemiyle işlenir veya bertaraf edilir (Şekil 2). Rotary gaz giderme sistemleri, genellikle endüstriyel Al ergitme tesislerinde veya diğer metal işleme tesislerinde kullanılır. Bu sistemler, Al alaşımların işlenmesi sırasında ortaya çıkan gazların kontrol altına alınmasını sağlar ve iş sağlığı ile çevresel etkiler açısından önemli bir rol oynar. Rotary gaz giderme, metale verilen azot veya argon gibi inert bir gazın yüzey alanını artırma prensibine göre çalışır. İnert gaz kabarcıklarının

boyutu ne kadar küçük yani yüzey alanı ne kadar büyükse gaz giderme o kadar hızlı gerçekleşecektir (Reddy & Nallusamy, 2021).



Şekil 2: Rotary Gaz Giderme Cihazının Şematik Gösterimi

Bu yöntemin etkinliği, döner mekanizmanın tasarımı, vakum sisteminin gücü, ergimiş metalin özellikleri ve işleme koşulları gibi faktörlere bağlı olabilir. Her bir uygulama için özel olarak tasarlanmış ve kurulmuş rotary gaz giderme sistemleri, Al alaşımların işlenmesi sırasında gazların etkili bir şekilde toplanması ve uzaklaştırılmasını sağlayabilir. Ancak, ergiyikte kontrolsüz bir girdap oluşmasıyla atmosferdeki oksijen, ergiyikle reaksiyona girecek ve yapıda alaşımın mekanik özelliklerini azaltabilen birçok gözenek ve boşluk görünmeye devam edecektir (Ni vd., 2003; Tokatlı vd., 2022).

1.6. ALÜMİNYUM SIVI METAL TEST YÖNTEMLERİ

Al döküm tesislerinde yaygın kullanılan ve son yıllarda geliştirilerek uygulaması yapılan sıvı metal test yöntemleri; Termal Analiz Yöntemi, X- Işını Yöntemi, Tatur Test, Akışkanlık Testi, Ultrasonik Test, PoDFA, Prefil Footprinter ve Qualiflash Test, Elektriksel Direnç Test (LİMCA), Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi, K-mold olarak sıralanabilir (Djurđjević vd., 2010).

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında kullanılan Akıcılık Testi (Dört kanallı ve Spiral akıcılık kalıpları ile), Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi ve K-mold yöntemlerinden bahsedilecektir.

1.6.1. Akıcılık Testi

Al sıvı metal, belirli bir kalıba dökülerek akıcılık testi yapılabilir. Bu testte, metalin akışkanlığı, kalıba ne kadar hızlı ve homojen şekilde yayıldığı gözlemlenir. Karmaşık dökümler üretme yeteneği büyük ölçüde eriyik akışkanlığına, yani eriyik metalin katılaşmadan önceki akış mesafesine bağlıdır. Döküm Al alaşımının akışkanlığının da mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi vardır (Niu vd., 2022).

Bu tez çalışması kapsamında akıcılık testlerinde, dört kanallı ve spiral akıcılık kalıpları kullanılmıştır. Dört kanallı akıcılık kalıbı, dört farklı kanaldan oluşur ve her bir kanalın boyutları, şekilleri veya açıları değiştirilebilir. Sıvı metal bu kanallardan geçirilerek, metalin akıcılığı ve viskozitesi hakkında bilgi sağlanır. Sıvı Al'nin akıcılığını ölçmek için kullanılan spiral akıcılık kalıbı, belirli bir geometriye sahip spiral bir kanaldan oluşur. Bu yöntemde, metalin spiral şekilli kalıp içinde aktığı uzunluk belirlenir (Di Sabatino & Arnberg, 2009). Sıvı Al'nin bu kalıba dökümü gerçekleştirildikten sonra, kalıp oda sıcaklığında kontrollü olarak soğumaya bırakılır. Kalıp içerisindeki numune çıkarılarak kalıpta ilerleme mesafesi tespit edilir.

1.6.2. Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi

Al alaşımlı eriyiklerin yüzey oksit tabakasının sürüklenmesi, dökümhane endüstrisindeki eriyik işleme ve işleme teknikleri sırasında çoğunlukla kaçınılmaz bir süreçtir. Sonuç olarak, çok sayıda çift oksit film (bifilm) genellikle eriyiklere dahil edilir ve bu bifilm, alaşımın katılaşması sırasında gözenek oluşumu için başlangıç bölgeleri olarak işlev görebilir (Gyarmati vd., 2019). Straube-Pfeiffer tekniği olarak da bilinen Vakum Altında Katılaştırma (VAK) Testi çözünmüş hidrojeni belirlemek için gözenekleri incelemek amacıyla dökümhanelerde sık kullanılır (Vinod Kumar, vd. 2013).

VAK, karmaşık ve pahalı testlere alternatif, hızlı sonuç veren ucuz bir test olarak kullanımı en yaygın sıvı metal test tekniklerinden biridir. Erimiş Al alaşımı normal basınç altında basınca dayanıklı bir odaya dökülür ve daha sonra vakum altında, genellikle 60 ila 130 mbar aralığında genleşmesine izin verilir (Vinod Kumar, vd. 2013). Eriyikten alınan bir numunenin düşük basınç (*100 mbar) altında katılaşmasına izin verildiği VAK'ta basınç farkından dolayı sıvı içinde çözünmüş hidrojen çözeltiden çıkar ve atmosfer basıncından yaklaşık on kat daha büyük gözeneklerin oluşmasına neden olur, ardından alaşım nihayet katılaşır. Numune daha sonra ikiye bölünür ve numune kesitinin görünümü gözeneklilik açısından incelenir ve yorumlanır (Uludağ vd., 2018). Temiz ergiyikte gözenek sayısı minimumdur. Diğer bir yaygın yöntem ise numunenin yoğunluğunu ölçmektir.

Eriyik kalitesi karakterizasyonunda VAK testi numunelerinin Bi film-İndeks ölçümü ve X-ışını bilgisayarlı tomografisi (CT) ile de incelenmesi mümkündür (Gyarmati vd., 2019).

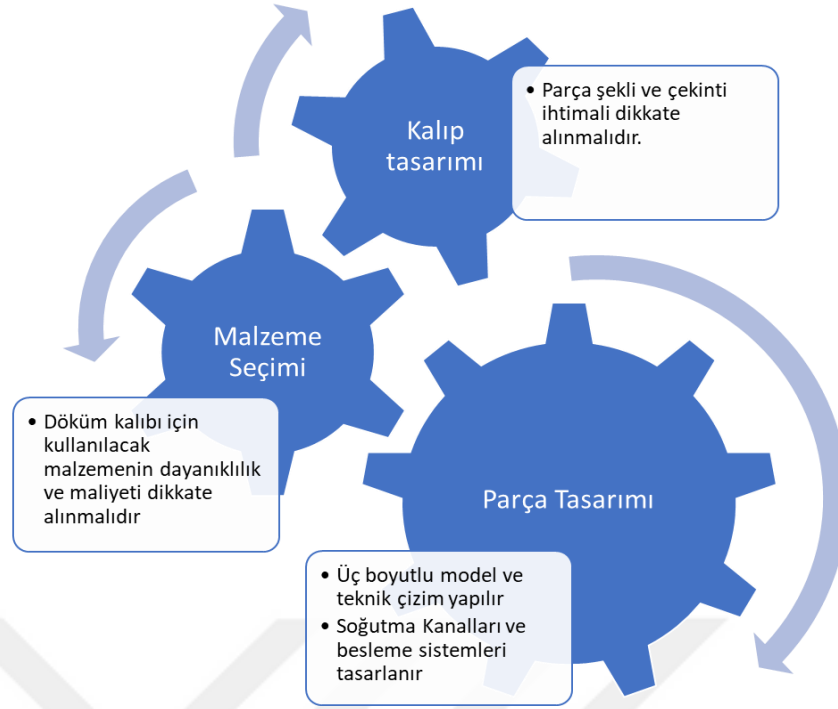
1.6.3. K-Mold

K-kalıp numunesinin kendisi, kırılma noktası görevi gören dört çentiğe sahip düz bir plakadır. Dökümden sonra elde edilen yassı çubuk numune bu çentiklerden uygun bir gereçle darbe uygulanarak kırılır. Numunelerin kırılma yüzeyi görsel inceleme veya mikroskopla incelenebilir. Kırılma yüzeylerinde bulunan inklüzyonların sayısına bağlı olarak, eriyik saflığının niceliksel karakterizasyonu için kullanılabilecek bir K değeri, $K = S / n$ denklemi kullanılarak belirlenebilir. Bu denklemde K, K-kalıp değeri (boyutsuz sayı), n: incelenen kırılma yüzeylerinin sayısı ve S: n parçada bulunan toplam inklüzyonların sayısıdır (Hudson & Apelian, 2016; Gyarmati vd., 2019).

1.7. DÖKÜM KALIPLAMA TASARIMI

Döküm kalıbı tasarımı, genellikle bir metal veya başka bir malzeme parçasının istenen şeklini döküm işlemiyle oluşturmak için kullanılan kalıp veya formun tasarımı sürecidir. Döküm işleminde kullanılan kalıp, üretilmek istenen parçanın geometrik şekline sahip boşlukları bulunan ve bu boşluklara eritilmiş metalin doldurulması ve soğuma sonunda döküm malzemesinin üretilmesine imkân sağlayan döküm gerecidir.

Döküm prosesi, üretilecek parçanın model tasarımı, üretimde kullanılacak alaşımın seçimi, kalıbın mükemmel dolumu ve katılaşma aşamalarını içeren bir süreçtir. Bu prosesin, parçanın sağlam biçimde üretimini ilgilendiren aşamalarından biri olan döküm kalıplama tasarımında, sıvı metalin yolluk ve besleyiciden geçerek kalıp boşluğunu istenen biçimde doldurması ve katılaşma yönlenmesini sağlayacak tasarım gerçekleştirilir (Çolak, 2020). Kaliteli ve istenen niteliklere sahip parça üretimi uygun döküm kalıbının tasarımı ile mümkündür. Sıvı Al alaşımları, katı hale geçiş esnasında hacimsel olarak %3,5-8,5 oranında büzülürler. Bu hacimsel daralma oranı alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir ve kalıplama tasarımında bu oran dikkate alınarak belirlenen boyutlarda besleyiciler gerekli noktalara eklenerek hacim tamamlanmalıdır (Çolak & Arslan, 2018).



Şekil 3: Kalıp Tasarım Aşamaları ve Dikkate Alınacak Noktalar

1.8. DÖKÜM SİMÜLASYON PROGRAMLARI

Döküm simülasyon programları, döküm endüstrisinde kullanılan ve döküm süreçlerini sanal ortamda modelleyen yazılım araçlarıdır. Bu programlar, metal veya alaşımın kalıplara dökülmesi, soğuması, katılaşması ve son ürünün özellikleri üzerindeki etkilerini simüle etmek için kullanılır. Döküm simülasyonları, gerçek dünya döküm süreçlerini anlamak, optimize etmek ve iyileştirmek için mühendislere ve endüstri uzmanlarına yardımcı olur (Aydoğan & Ertan, 2022). Döküm simülasyon programları genellikle aşağıdaki özellikleri içerir:

Kalıp doldurma analizi ile programlar, metalin kalıba nasıl dolduğunu, dolayısıyla döküm parçasının şeklini ve dolgusunu simüle eder. Bu, metalin akışkanlık özellikleri, dolma hızları, hava tuzakları ve diğer potansiyel problemler hakkında önemli bilgiler sağlar.

Soğuma analizi sayesinde, simülasyonlar, metalin kalıpta soğumasını ve katılaşmasını modelleyerek soğuma hızları, sıcaklık dağılımları ve son ürünün mikro yapısı üzerindeki etkilerini inceler.

Döküm parçasının soğuma ve katılaşma sürecinde oluşabilecek gerilme, deformasyon veya çatlama gibi mekanik sorunları belirlemek için gerilme ve şekil değiştirme analizi ile simülasyonlar yapılır.

Malzeme akış analizi, metalin kalıp içindeki akışını ve farklı malzemelerin birleşme noktalarını, bu birleşme noktalarında potansiyel olarak oluşabilecek hava tuzaklarını veya döküm kusurlarını gözlemlemek için kullanılır.

Döküm simülasyonları, kalıp tasarımı üzerinde de etkili olabilir. Kalıp tasarımlarını optimize etmek, dolayısıyla kalıp ömrünü artırmak veya döküm parçasının kalitesini artırmak için kullanılabilir (Çolak & Şirin, 2010; Çolak, 2020; Yağcı vd., 2021; Aydoğan & Ertan, 2022; Asan & Çolak, 2022).

Bu simülasyon programları, döküm endüstrisinde üretim verimliliğini artırmak, döküm kalitesini iyileştirmek ve maliyetleri azaltmak için önemli araçlar olarak kabul edilir (Aydoğan & Ertan, 2022). Gerçek dünya deneyimlerine dayanarak tasarım değişikliklerini test etme ve süreçleri iyileştirme imkânı sağlarlar. Ayrıca, malzeme kullanımını optimize ederek sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri azaltmaya da yardımcı olabilirler.

Döküm endüstrisinde ürünün istenen mekanik özellikleri ve performans kriterleri bakımından dökümün tüm aşamalarının kontrol altında tutulması önemlidir. Komplike şekilli parçaların imalatında ihtiyaç duyulan kalıpların tasarımı ve döküm prosesine göre optimizasyonu oldukça zordur. İşte bu zorlukların işlem parametrelerine göre tespiti ve ortadan kaldırılması, bilgisayar destekli döküm simülasyon yazılımları ile mümkün olmaktadır. Simülasyon analizleri sonucu elde edilen verilerle Al alaşımının kalıbı doldurma, katılaşma ve soğuma süreçleri analiz edilebilmektedir. Ayrıca, iş parçasındaki olası kalıntı gerilmeler, çarpılmalar, mikroyapısal ve mekanik özelliklerle ilgili sanal veriler de kapsamlı olarak değerlendirilmektedir (Yağcı vd., 2021). Simülasyon çalışmalarının, döküm esnasında oluşması muhtemel hatalı parçaların üretimi ve kusurlu kalıp tasarımının önüne geçilmesini sağladığı ve parça başına düşen üretim maliyetlerini azalttığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Özkan, 2023). Örneğin; döküm simülasyonu için sık kullanılan yazılımlardan biri olan ProCast, metal dökümü, yüksek basınçlı döküm, kumlama dökümü ve serbest kalıp dökümü gibi çeşitli döküm süreçlerini simüle etme yeteneğine sahiptir. Soğuma analizi, mekanik özelliklerin tahmini ve kalıp tasarımı optimizasyonu gibi özellikler sunar. Geniş bir uygulama yelpazesi olan FlowCast, sıvı akışı, katılaşma, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar ve malzeme şekillenmesi gibi farklı süreçleri simüle edebilir. Döküm endüstrisinde metal akışı ve katılaşma analizleri için kullanılabilir. FlowCast, akışkanlar dinamiği kriterlerine göre sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken yetersiz dolum, soğuk bağlantı, türbülans ve basınç gibi bazı faktörleri hesaplayabilir (Asan & Çolak, 2022).

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MATERYAL

Döküm deneylerinde Al12Si alaşımı muadili Etial-140 alaşımı birincil külçe ve hurda olarak kullanılmıştır. Kullanılan alaşıma ait kimyasal bileşim değerleri Tablo 3'te verilmiştir (Eti Alüminyum, 2023).

Tablo 3: Al12Si Alaşımının Kimyasal Bileşim (%Ağırlık)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
0,60	11,50- 13,50	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10	0,05

Al12Si alaşımı ötektik bileşime sahip olup, Al alaşımları içerisinde en yüksek akıcılığa sahip olduğu bilinen alaşım çeşididir. Alaşıma ait tipik özellikler Tablo 4'te verilmiştir (Eti Alüminyum, 2023).

Tablo 4: Deneylerde Kullanılan Etial-140 Alaşımlı Külçenin Tipik Özellikleri

Özgül Ağırlık	Ergime Sıcaklığı (°C)	Isısal İletkenlik (cal/cm.s°C)	Korozyon Dayanımı	Dökülebilirlik	İşlenebilme	Anodik Oksidasyon	Kullanım Verileri
2,66	575-585	0,37	Çok İyi	Mükemmel	Orta	Sadece Yüzey Korumada	İnce Kesit ve karışık dökümler

2.2. YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Çalışma kapsamında Al12Si döküm alaşımının akıcılığına; döküm sıcaklığı, döküş yüksekliği ve sıvı metal temizlemenin etkileri, döküm ve modelleme teknikleri ile karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Bu kapsamda model tasarım çalışmaları, döküm deneyleri, modelleme çalışmaları, test ve inceleme teknikleri sunulmuştur.

2.2.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında Al12Si alaşımının dökümünde akıcılık üzerine, sıvı metal kalitesi, döküm sıcaklığı ve döküş yüksekliğinin etkilerini belirlemek için Tablo 5'te görüldüğü gibi 12 adet deney planlanmıştır.

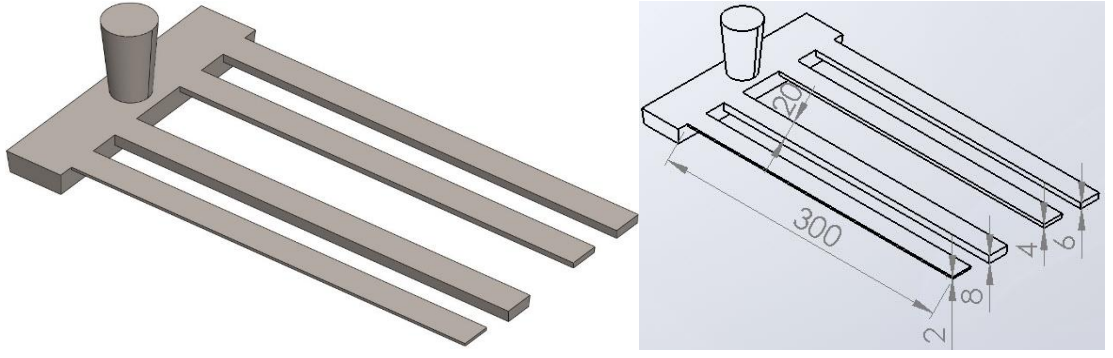
Tablo 5: Deney Parametreleri

Deney Numarası	Döküm Sıcaklığı (°C)	Döküş Yüksekliği (mm)	Sıvı Metal Temizliği	VAK testi Kalıbı	K-mold Kalıbı	Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı	Spiral Akıcılık Kalıbı
1	660	50	Var	+	+	+	+
2	700	50	Var	+	+	+	+
3	740	50	Var	+	+	+	+
4	660	100	Var	+	+	+	+
5	700	100	Var	+	+	+	+
6	740	100	Var	+	+	+	+
7	660	150	Var	+	+	+	+
8	700	150	Var	+	+	+	+
9	740	150	Var	+	+	+	+
10	660	50	Yok	+	+	+	+
11	700	100	Yok	+	+	+	+
12	740	150	Yok	+	+	+	+

Tablo 5’te görüldüğü gibi 3 farklı parametrenin akıcılığa etkisine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Döküm sıcaklığı olarak 660 °C, 700 °C, 740 °C sıcaklıklar belirlenmiştir. Sıcaklık belirlenirken alaşımın ergime derecesine bağlı olarak endüstriyel döküm sıcaklıkları göz önünde bulundurularak; ortalama altı ve ortalama üstü sayılabilecek değerler baz alınmıştır. Döküş yüksekliğine dair parametreler yine endüstriyel üretim koşullarına bağlı olarak belirlenmiş ve döküş yüksekliğinin artırılmasının etkisi incelenmiştir. Sıvı metal temizlemenin etkisini belirlemek için, birincil külçe kullanılan deneylerde temizleme yapılarak dökümler gerçekleştirilmiş; 10., 11. ve 12. deneylerde ise hurda alaşım ile ergitme sonrası temizleme olmaksızın deney parametrelerine uygun olarak dökümler yapılmıştır (Tablo 5). Deneylerde döküme hazır olan sıvı metaller VAK testi kalıbı, K-mold kalıbı, dört kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıplarına dökülmüştür.

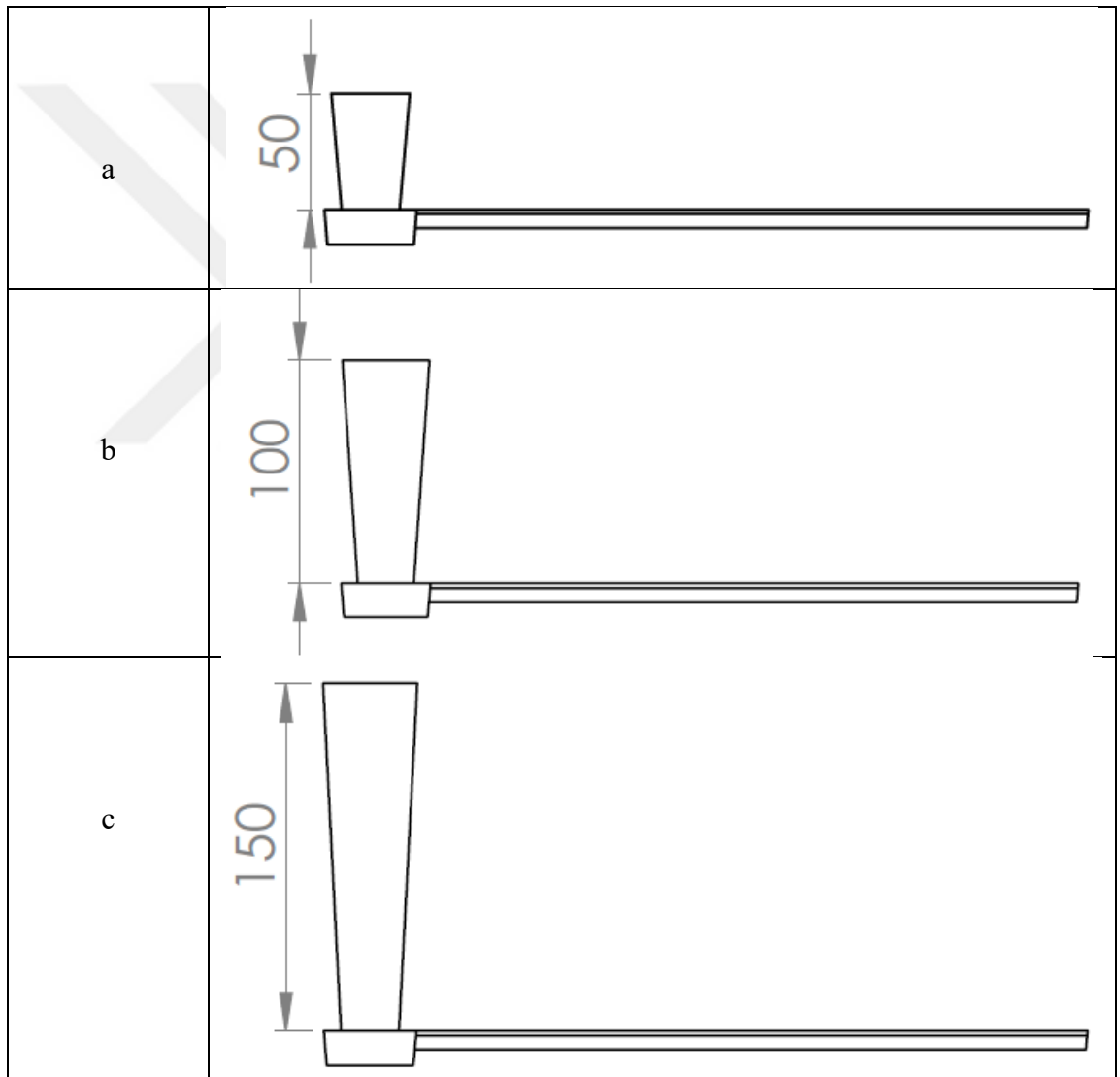
2.2.2. Tasarım Çalışmaları

Deneylerde değişen kesitlerde sıvı metal ilerlemesinin tespit edilmesi için dört kanallı akıcılık kalıbı kullanılmıştır. Kalıp içerisinde 2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm kesit kalınlığında 20 mm genişliğinde ve 300 mm uzunluğunda kanalları olan kalıp tasarımı yapılmıştır. Sıvı metalin ilerleme mesafesinin ölçülebilmesi amacıyla, sıvı metal kanal uzunluğu 300 mm şeklinde gereğinden uzun tutulmuştur. Ayrıca kesit kalınlıklarının farklı olması sayesinde ilgili döküm şartlarında hangi kalınlıkta dökümler yapılabileceği tespit edilmiştir. Tasarıma ait ölçüler ve katı model görüntüsü Şekil 4’te verilmiştir.



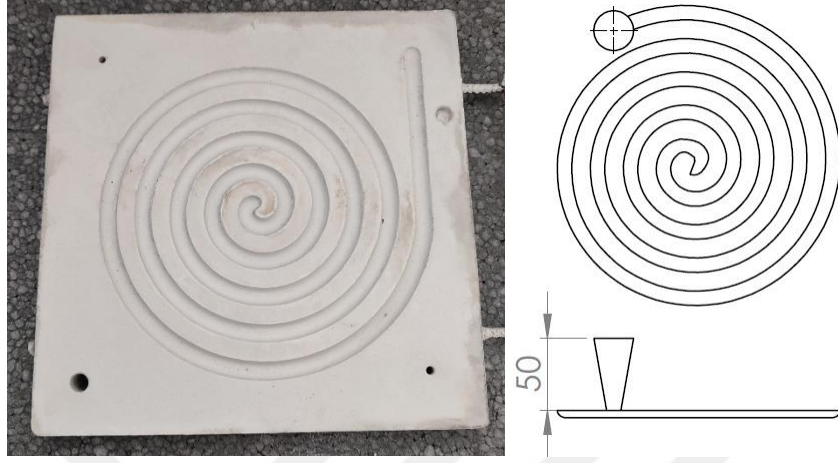
Şekil 4: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Ölçüleri ve Katı Model Görüntüsü

Döküş yüksekliğinin akıcılığa etkisini tespit etmek için seçilen yüksekliklere (50 mm, 100 mm ve 150 mm) ait tasarımlar Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Döküş Yüksekliği Tasarım Görüntüsü. (a:50mm, b:100mm, c:150mm)

Spiral akıcılık kalıbı için de dört kanallı akıcılık kalıbına benzer şekilde döküş yüksekliğinin ayarlanması için dikey gidici tasarım çalışmaları yapılmıştır. Şekil 6’da spiral akıcılık kalıbı tasarım görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6: Spiral Akıcılık Kalıbı Döküş Yüksekliği Tasarım Görüntüsü

2.2.3. Ergitme ve Döküm Deneyleri

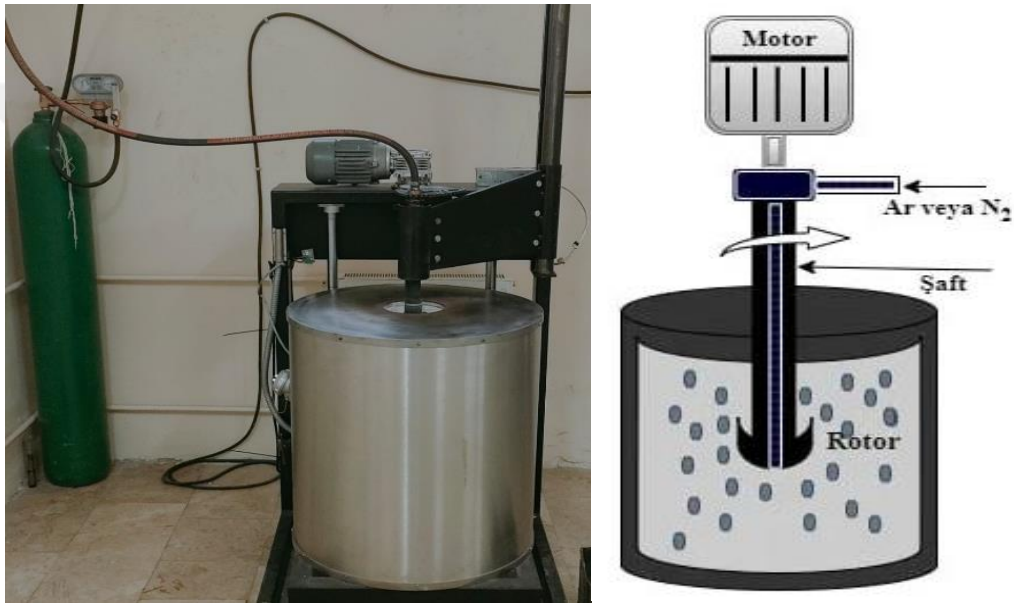
Ergitme işlemi, Şekil 7’de resmi verilen 8 kg sıvı Al ergitme kapasitesine ve 10 kW gücünde elektrik direnç ocağı içerisinde bulunan SiC potada gerçekleştirilmiştir. Elektrik direnç ocağı sıcaklık kontrolü K tip termokupl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Ocak üstünde azotla sıvı metal temizleme işlemlerinin yapılabilmesi için grafit lansın gireceği genişlikte bir delik mevcuttur.



Şekil 7: Elektrik Direnç Ocağı

Ergitme işleminde, ilk 9 deney için birincil külçe Al12Si alaşımı ocak içerisine 4 kg yüklenmiştir. Ergitme gerçekleştikten sonra, deney şartlarına göre ve deney parametrelerine

uygun belirlenen sıcaklığa ulaşmadan önce sıvı metal temizleme işlemi yapılarak döküm gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal 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 8'deki gibi döner tip şaft kolun sıvı metal içine daldırılarak, azot gazının sıvı içinde çok sayıda küçük gaz baloncuklar oluşturulması prensibiyle gerçekleştirilmiştir. Özel tasarlanmış grafit lansın başlık kısmıyla ve dönme etkisiyle oluşan girdap sayesinde azot gazı sıvı metalin her tarafına dağılarak dışarıya atılmaktadır. Azot gazı etkisiyle oluşan kabarcıklarla birlikte sıvı metaldeki inklüzyonlar flotasyon mantığı ile sıvı metalin yüzeyine çıkartılmakta ve metal içerisinde çözünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine difüz ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır.



Şekil 8: a) Sıvı Metal Gaz Giderme İşlemi, b) Pota İçerisinde Gaz Giderme Süreci Şematik Görüntü

Sıvı metal gaz giderme işlemi, 300 rpm çark hızı, 5 lt/dk gaz debisinde 5 dk. süreyle gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal temizliğinin etkisini incelemek için çalışma kapsamında ayrıca temizleme olmaksızın deneyler yapılması planlanmıştır. 10, 11 ve 12 numaralı deneylerde ergitme için hurda Al12Si alaşımı kullanılmıştır. Benzer şekilde alaşımın ocak içerisinde ergitilmesinden sonra, ilk olarak belirlenen deney parametrelerindeki sıcaklıkta ocaktan alınan sıvı metal yüzeyinde oluşan cüruf tabakası sıyırma yöntemi ile temizlenmiştir. Kokil kalıp yüzeyindeki nemin atılması için kalıplar 250 °C sıcaklıkta ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Isıtma işlemi Elektromag M 4060 marka ısıtıcı tabla ile gerçekleştirilmiştir. Azot gazı ile temizleme işleminin ardından Kokil kalıplara dökümler yapılmadan önce sıvı metalin gazlılık durumunu test etmek amacıyla VAK testi numuneleri dökülmüştür. Şekil 9'da VAK testi cihazının ve döküm işleminin fotoğraf görüntüsü verilmiştir.



Şekil 9: VAK Testi Cihazı

VAK testi, yaklaşık 90-100 gram ağırlığında sıvı metalin, metal bir kroze içinde -1 atmosferlik (yaklaşık -760 Hg/cm^2) basınç altında test cihazında basıncı 80 mbar'a düşürülerek eriyik tamamen katılaşıncaya kadar bekletilmesiyle gerçekleştirilir. VAK testi numunelerinin dökümünden sonra, pota çift kol yardımıyla kaldırılarak K-mold, dört kanallı akıcılık ve spiral akıcılık kalıplarına dökümler yapılmıştır. Daha sonra kalıplar açılarak test numuneleri çıkarılmıştır. Şekil 10'da döküm esnasında alınan görüntü verilmiştir.



Şekil 10: Sıvı Metalin Kokil Kalıplara Dökümü

2.2.4. Dökümlerin İncelenmesi

Döküm sonrası katılaşma ve soğuma gerçekleştirildikten sonra kalıplar açılarak deney numuneleri çıkarılmıştır. İnceleme için VAK, K-mold, dört kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbı numuneleri elde edilmiştir. Döküm numuneleri ilk olarak makro incelemeye tabi tutulmuş ve fotoğrafları çekilmiştir. Sonrasında, her bir kalıptan elde edilen numuneler için farklı inceleme yöntemleri uygulanmıştır.

2.2.4.1. VAK Testi Numunelerinin İncelenmesi

VAK cihazından elde edilen numuneler yoğunluk ölçümü ve kesit yüzey incelemelerine tabi tutulmuştur. VAK cihazından elde edilen Al numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Buna göre, her bir Al numunenin havada ağırlığı ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Daha sonra aynı numunelerin saf suda (20°C, $d_s = 0,99821 \text{ g/cm}^3$) ağırlıkları belirlenmiştir. Tartım işlemi Şekil 11’de verilen $\pm 0.02 \text{ g}$ hassasiyete sahip elektronik teraziye kurulan Arşimet düzeneği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11: Arşimet Yoğunluk Ölçüm Düzeneği

Elde edilen ağırlık ölçüm sonuçları kullanılarak, Eşitlik 1’deki formüle göre döküm numunesinin yoğunluğu hesaplanmıştır.

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

d_n : Döküm numunesinin yoğunluğu

m_h : Numunenin havadaki ağırlığı

m_s : Numunenin saf sudaki ağırlığı

d_s : 20 °C’deki suyun yoğunluğu

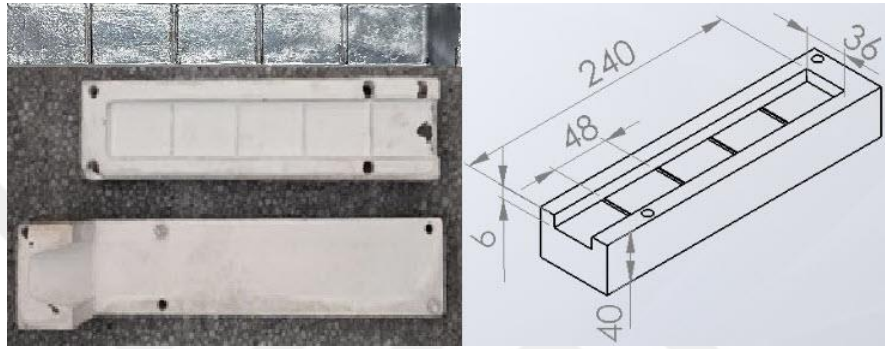
Ayrıca numunelerin içerisinde bulunan % gözenek değerleri Eşitlik 2’de verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözenek} = \left[\frac{d_{\text{Teorik}} - d_{\text{DeneySEL}}}{d_{\text{Teorik}}} \right] \times 100 \quad (\text{Eşitlik 2})$$

VAK testi numunelerindeki gözenekleri görmek için kesit yüzey incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda numuneler dikey olarak ortadan ikiye kesilmiş, kesilen yüzeyler zımparalama işlemine tabi tutulup, tarayıcıda görüntüler elde edilmiştir.

2.2.4.2. K-Mold Numunelerinin İncelenmesi

Önceden ısıtılmış K-mold test kalıbına yaklaşık 400 g sıvı metal dökülerek, 240x36x6mm boyutlarında dört eşit kesit kalınlığına sahip test numuneleri elde edilmiştir. Sıvı metal temizliğinin uygunluğunu test etmek amacıyla kullanılan K-mold kalıbı Şekil 12’de gösterilmektedir. Katılaşma tamamlandıktan sonra numune, kolay kırılma sağlamak amacıyla kalıp iç yüzeyinde yer alan eşit uzaklıkta çentikler sayesinde oluşmuş kırılma noktalarından parçalara ayrılmıştır. Üst üste yerleştirilen test numunelerinin kırık yüzeyleri görsel olarak incelenebileceği gibi çeşitli görüntü tarama metotları ile yüzeydeki inklüzyon ve gözenekler analiz edilebilir (Hudson and Apelian, 2016).



Şekil 12: K- Mold Test Kalıbı ve Numuneler

Deney numunelerinde sıvı metal kalitesini belirlemek için aşağıda verilen Eşitlik 3 kullanılmıştır (Gyarmati vd., 2019).

$$K = \frac{s}{n} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

K: K-mold değeri (boyutsuz sayı)

s: küçük parçanın n parçasında bulunan toplam inklüzyon sayısı,

n: incelenen örnek sayısıdır.

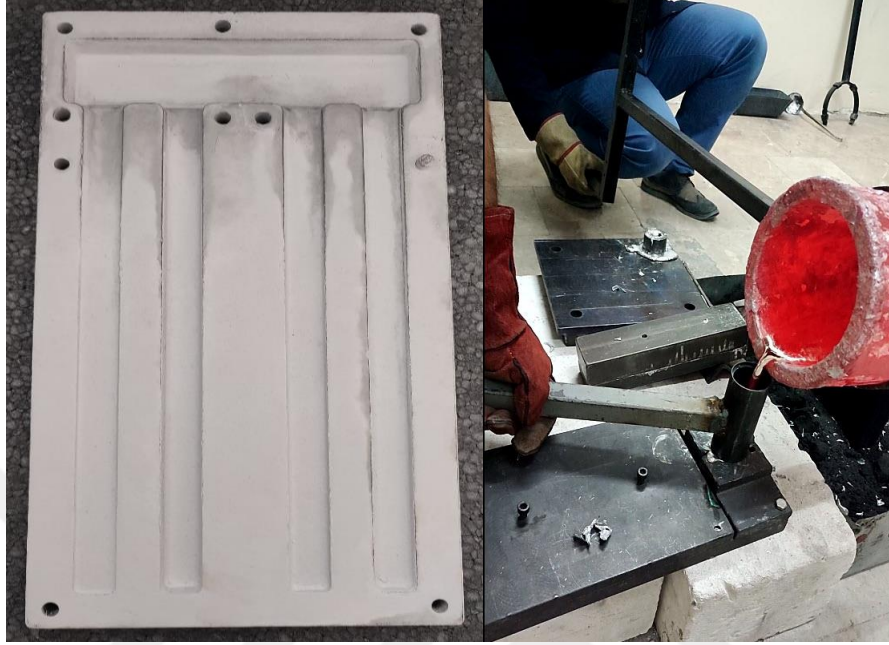
Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler aşağıdaki şartlara göre yorumlanmıştır:

- i. $K < 0,5$ ise sıvı metal temiz,
- ii. $0,5 < K < 1.0$ ise kabul edilebilir aralıkta ancak uygun bir yöntemle temizleme gerekli,
- iii. $K > 1,0$ ise sıvı metal mutlaka temizlenmelidir.

2.2.4.3. Dört Kanallı Akıcılık Numunelerinin İncelenmesi

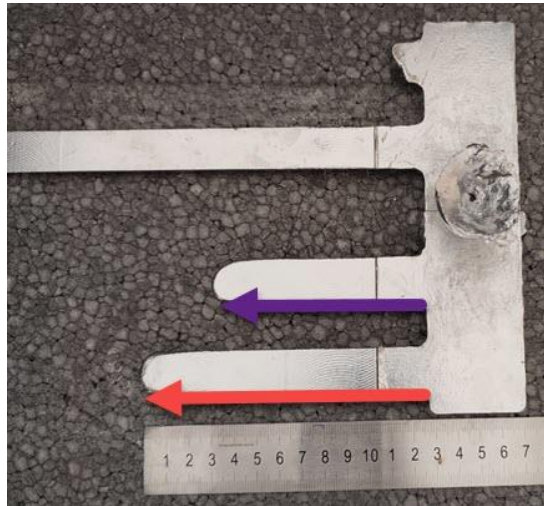
Alaşımların akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için farklı kesit kalınlıklarında sıvı metalin ilerleme mesafesini ölçebilecek şartlarda model tasarımı yapılmıştır. Ayrıca ilgili

modelde döküş yüksekliğinin sıvı metal ilerleme mesafesine etkisinin değerlendirilmesi için dikey gidiş, değiştirilebilir bir şekilde imal edilmiştir. Döküş yüksekliği deney parametrelerinde de belirtildiği gibi 50 mm, 100 mm ve 150 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 13'te tasarıma uygun olarak imalatı gerçekleştirilen ve deneylerde kullanılan kokil kalıp resmi verilmiştir.



Şekil 13: Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı Görüntüleri

Döküm sonrası sıvı metalin değişen kesit kalınlıklarında ilerleme mesafeleri ölçülmüştür. Şekil 14'te ölçümlerin nasıl yapıldığına dair görsel verilmiştir. Ölçüm sonrası numunelerin kesitlerinden alınan örneklerden mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

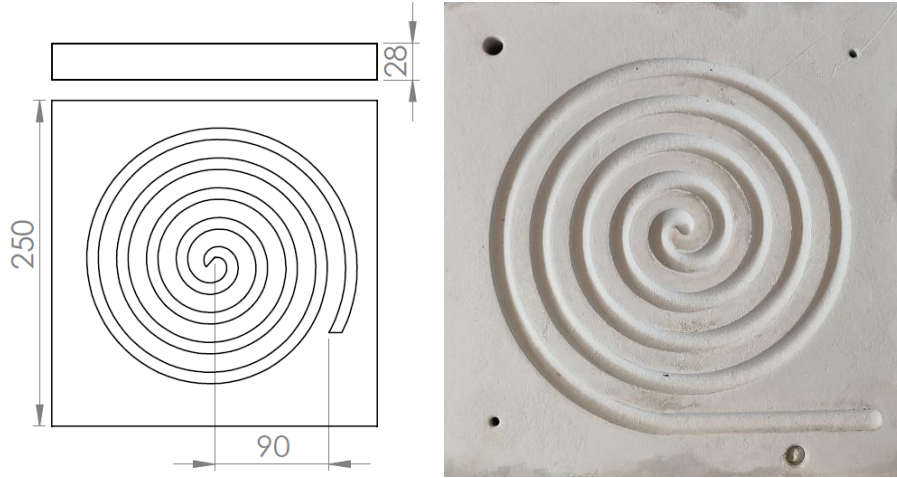


Şekil 14: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Ölçülmesi

2.2.4.4. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

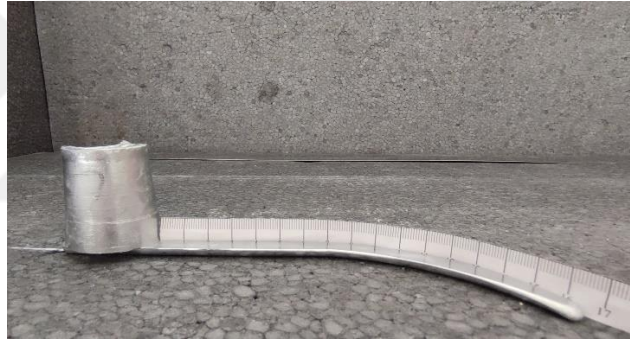
Akıcılık testlerinde, literatürde genişçe yer alan Şekil 15'te görüntüsü ve teknik resmi verilen spiral akıcılık test modeli kullanılmıştır. Tasarımı verilen kalıbın kokil kalıba imalatı

gerçekleştirilerek, değişen deney parametrelerine göre ortaya çıkan sıvı metal ilerleme mesafelerinin ölçümü yapılmıştır.



Şekil 15: Spiral Akıcılık Kalıbı ve Ölçüleri

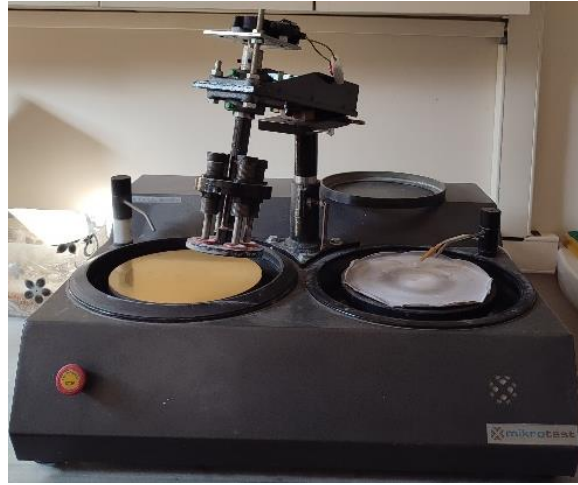
Spiral akıcılık kalıbında sıvı metal ilerleme mesafesi, 4 kollu akıcılık kalıbına benzer şekilde Şekil 16’da görüldüğü gibi ölçülerek belirlenmiştir.



Şekil 16: Sıvı Metal İlerleme Mesafelerinin Ölçülmesi

2.2.5. Mikro yapı İncelemeleri

Mikro yapı incelemeleri için değişen kesitlerde akıcılık döküm kalıbından numuneler alınmıştır. Hazırlık süreçlerinde kolaylık olması açısından ve tek seferde daha fazla sayıda numunenin hazırlanabilmesi açısından numuneler bakalite alınmak suretiyle kalıplanmıştır. Bakalite alınmış numunelere sırasıyla 180, 400, 800, 1200 ve 2500 numaralı zımpara ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Uygulanan zımpara işleminin ardından 3 μm , 1 μm alümina süspansiyonu ve son olarak 0,05 μm ’lik koloidal silika ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası numunelere Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCl , 1,0 ml HF) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Şekil 17’de metalografik hazırlık süreçlerinde kullanılan zımparalama parlatma makinesine ait görüntü verilmiştir.



Şekil 17: Zımparalama ve Parlatma Mikro Yapı İnceleme Cihazı

Mikro yapı incelemeleri NMM 800-TRF serisi Nikon marka metalürjik optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf çekimleri de mikroskoba bağlı çalışan Kameram marka dijital kamera ile yapılmıştır.

2.2.6. Modelleme Çalışmaları

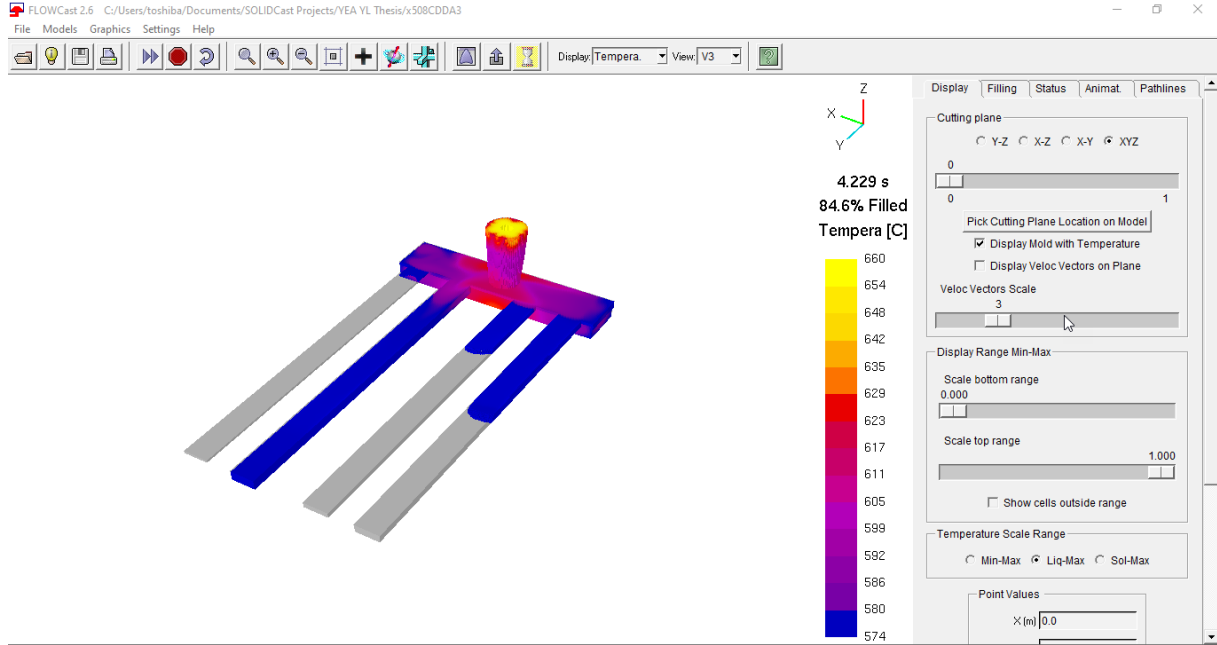
Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Bu programlar genellikle sonlu fark veya sonlu elamanlar teknikleri ile hesaplama yaparak verilen döküm geometrisini farklı döküm ve kalıp malzemeleri için kendi veri tabanlarında bulunan veya kullanıcı tarafından da girilebilen malzemenin termofiziksel özellikleri ve sınır şartları ile modelleyebilme yeteneğine sahiptirler. Modelleme çalışmaları Tablo 3'te belirlenen deney parametrelerine uygun olarak yapılmıştır. Modelin döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarılmıştır. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı, kalıp malzemesinin türü ve termofiziksel özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Döküm alaşımının termofiziksel değerleri simülasyon programının veri tabanında Al12Si alaşımına en yakın özelliklere sahip A413 alaşımı baz alınarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6: Simülasyonda Kullanılan Alaşımın Termofiziksel Özellikleri

Alaşım	Termal İletkenlik (W/m.K)	Spesifik Isı (J/kg.K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Döküm Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Donma Aralığı (°C)	Gizli Füzyon Isısı (J/kg)
A413	121,24	962,3	2657,3	690-720-750	557	17	388175,1

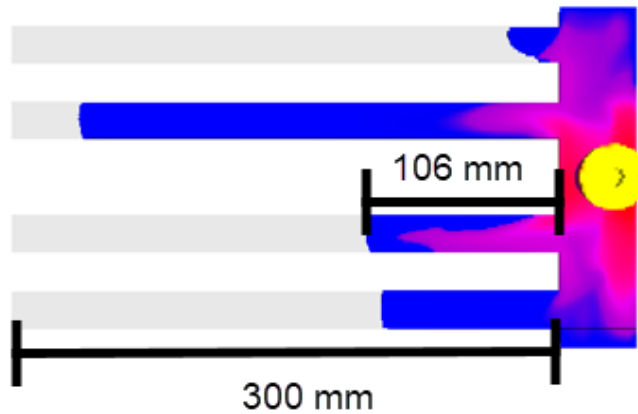
Malzeme özellikleri tanımlanarak programa aktarılan katı model geometrisinin tanelere ayırma ile girilen sınır şartlarının her bir elemanı için simülasyon programında çözümlenmesi sağlanmıştır. Dolum modelleme çalışmaları SolidCast döküm simülasyon yazılımına bağlı olarak çalışan FlowCast programı ile gerçekleştirilmiştir. FlowCast akışkanlar dinamiği

kıstaslarına göre sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken türbülans, eksik doldurma, soğuk birleşme ve basınç vb. gibi faktörleri de hesaplamaktadır. Dolum süresi 5 sn olacak şekilde modellemeler gerçekleştirilmiştir. Şekil 18’de FlowCast döküm dolum modellemeleri sonucu elde edilen örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 18: Flowcast Dolum Modellemesi Yazılımdan Alınan Örnek Görüntüler

Döküm modelleme sonuçlarından sıvı metal ilerleme mesafelerinin tespit edilmesi için incelemeler görüntü analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Programda üst görüntüler yüklenmiş ve kanal boyu 300 mm olarak tanımlanmıştır. Akabinde sıvı metal ilerleme mesafesi tespit edilmiştir. Programdan alınan örnek görüntü Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19: Sıvı Metal Mesafesinin Tespit Edilmesi

2.2.7. Sertlik Testleri

Al alaşımının dökümlerinden elde edilen numunelerin Brinell sertlik ölçümleri, oda sıcaklığında Şekil 20’de verilen BMS Makine DIGIROCK-RB marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçümde HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye ile 2,5 kgf ön yük ve 62,5

kgf toplam yük altında her bir numuneden en az 10'ar adet ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 20: Sertlik Ölçüm Test Cihazı

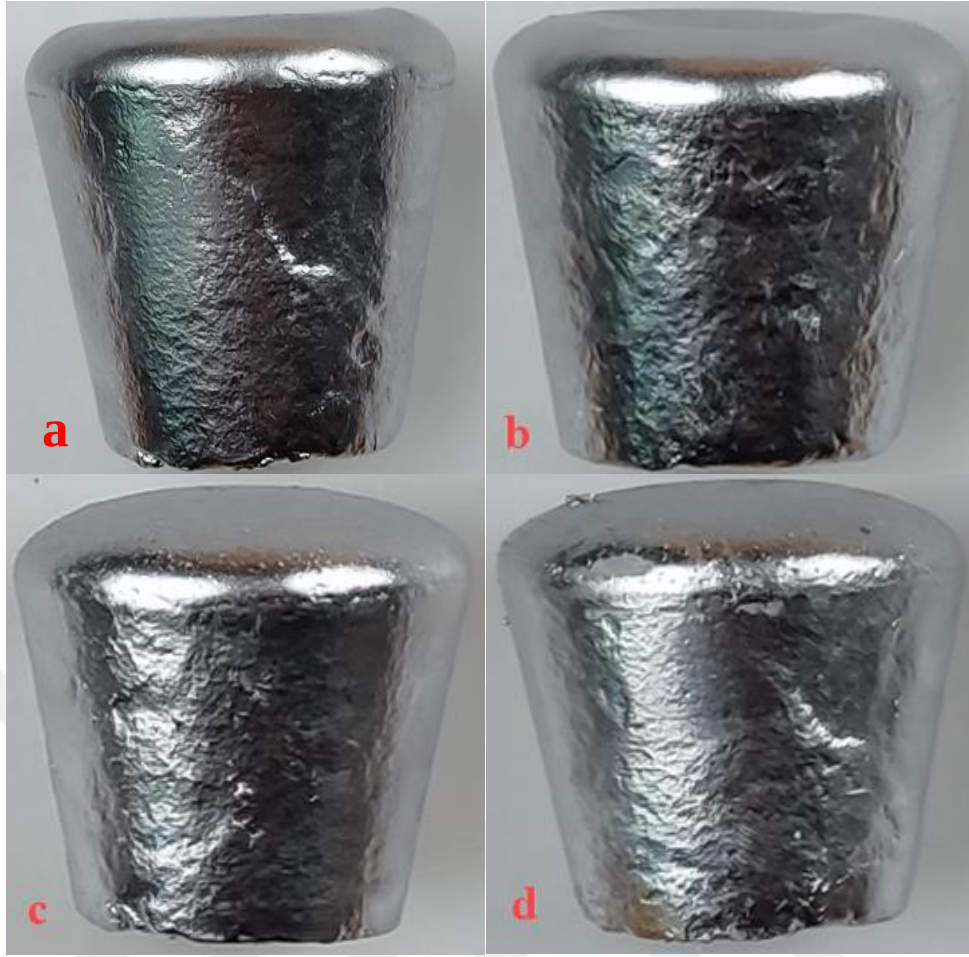
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen verilerin sonuçları sunularak değerlendirmeleri verilecektir. Materyal ve Yöntem bölümünde açıklandığı gibi sıvı metal temizliği, döküm sıcaklığı ve döküş yüksekliğinin etkisinin incelenmesi için 12 döküm deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca modelleme çalışmaları ile gerçek döküm sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneylerde; VAK ve K-mold kalıba yapılan dökümlerden sıvı metal kalitesi, spiral ve dört kanallı akıcılık kalıbında ise sıvı metal ilerleme mesafeleri değerlendirilmiştir. Ayrıca akıcılık kalıbından alınan numunelerden mikroyapı ve sertlik testi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek dökümler tamamlandıktan sonra elde edilen değerler FlowCast programı ile yapılan modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

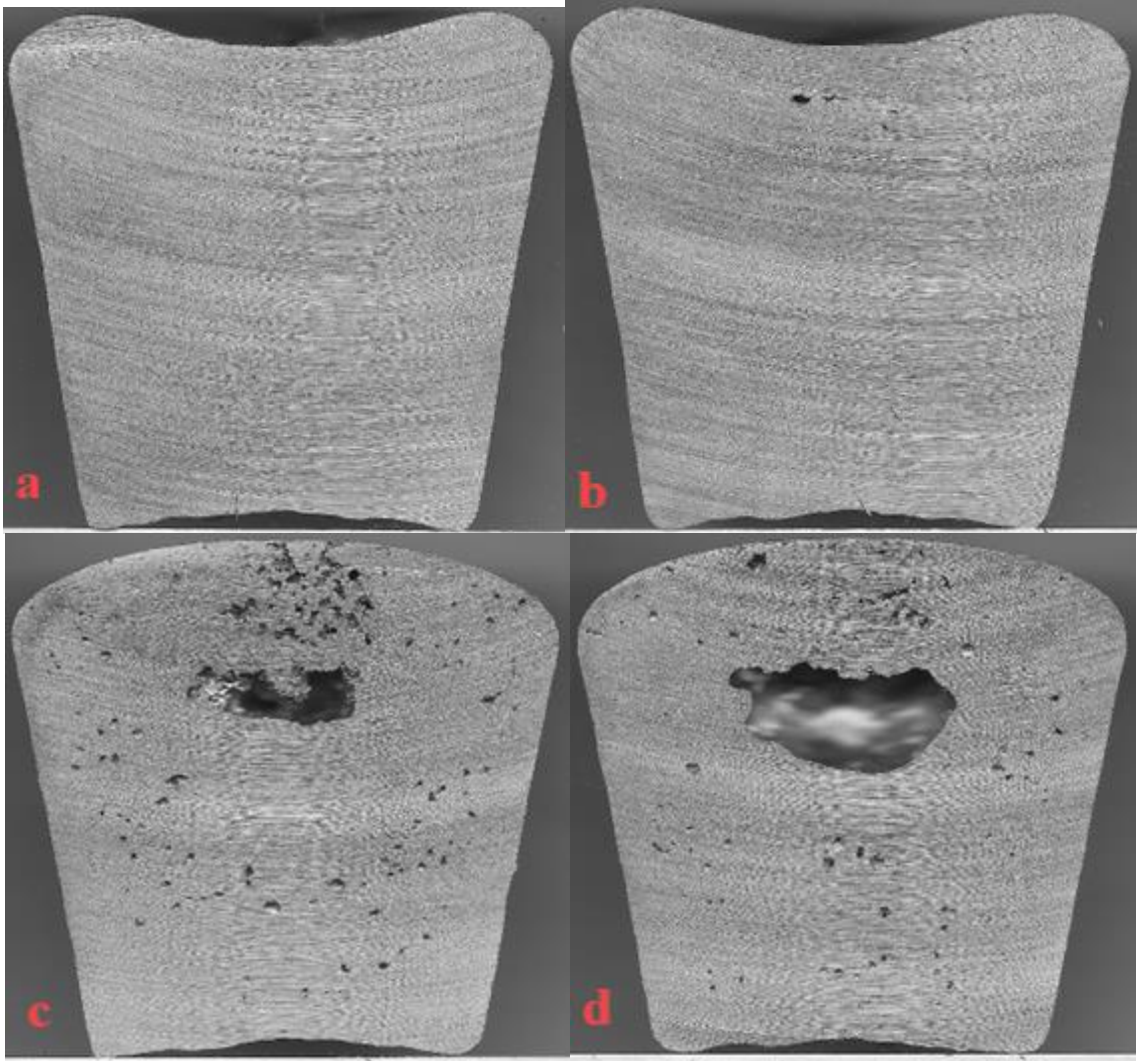
3.1. SIVI METALİN KALİTESİNİN TESPİTİ

Al12Si alaşımının dökümünde akıcılık özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, çözünmüş gazlar sebebiyle oluşacak gözenek ve inklüzyonların önlenmesi için sıvı metal, döküm öncesi azotla temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Gözenekliliğe sebep olan gaz ve inklüzyonların katılma sırasında daha kolay büyümesine yardımcı olmak amacıyla sıvı metale indirgenmiş basınç altında katılma uygulanmıştır. Bu işlem için VAK test cihazından numuneler elde edilerek ergimiş metal kalitesi kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde belirtildiği gibi ilk 9 deney birincil külçe kullanılarak sıvı metal temizliği işlemi uygulanmış deneylerdir. Ayrıca 3 deneyde hurda alaşım ile dökümler yapılmış ve farkın görülmesi açısından sıvı metal temizleme işlemi uygulanmamıştır. Tüm deneylerde yapılan dökümlerde sıvı metal kalitesi tespit edilmiş ve sıvı metal temizliğinin akıcılığa etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 21’de dökümlerden alınan VAK testi numunelerine ait fotoğraf görüntülerine örnek görseller verilmiştir.



Şekil 21: VAK Test Numune Görüntüleri (a ve b: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmış; c ve d: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmamış)

Şekil 21’de birincil külçe kullanılarak temizleme işlemi uygulanan döküm numuneler a ve b şekillerinde sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde a ve b’de verilen fotoğraf görüntülerinde numunelerin üst kısmında çöküntü olduğu görülmekte ve bu durum sıvı metal temizliğinin uygunluğunun bir göstergesi olarak bilinmektedir. Hurda ile ergitme sonrası temizleme işlemi uygulanmayan dökümlerde ise Şekil 21 c ve d resimlerinde görüldüğü gibi numunelerin yüzeylerinde kabarma meydana gelmiştir. Bu durumda sıvı metal içerisinde gazlılık olduğu ve mevcut gazlara bağlı numunenin vakum etkisi ile katılaşma esnasında kabarak yüzeyde şişkinlik oluşturduğu düşünülmektedir. Kesit yüzeylerinin incelenmesi için, numuneler kesilerek zımparalanmış ve taranarak gözenek durumları incelenmiştir. Şekil 22’de örnek olarak, bazı VAK testi numunelerine ait kesit yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 22: VAK Test Numune Kesit Görüntüleri (a ve b: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmış; c ve d: Sıvı Temizleme İşlemi Uygulanmamış)

Şekil 22, a ve b’de temizleme işlemi uygulanmış dökümlere ait numune kesit yüzey görüntüleri, c ve d’de hurda ile yapılan döküm numune görüntüleri verilmiştir. Resimlerde de görüldüğü gibi temizleme işlemi ile numune kesitinde herhangi bir gözeneklilik bulunmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 22 b’de 740 °C de yapılan döküm numunesinde sıcaklığın aşırı artışından ötürü olduğu düşünülen çok az bir gözeneklilik görülmüştür. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Al alaşımlarının sıcaklık artışı ile oksijene olan afinitesine bağlı gaz oluşturma potansiyeli olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda numunede sıcaklık artışına bağlı çok az gözenek görülmüştür, ancak bu durum sıvı metal kalitesi açısından kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca numune yüzey çöküntüsü ve yüzeyde gözeneklerin minimum seviyede olması bu durumu göstermektedir. Çeşitli araştırmacılar, VAK testi numune yüzey çöküntüleri oluşması ve kesit yüzeylerinde gözenek olmamasının sıvı metal temizliği açısından uygun olduğunu ifade etmişlerdir (Laslaz & Laty, 1991; Dışpınar, 2010; Yüksel, 2016).

Şekil 22 c ve d’de hurda ile yapılan döküm numune kesit yüzeylerinden de görüldüğü gibi sıvı metal içerisinde kirlilik ve gazlılık mevcuttur. Çalışma kapsamında sıvı metal kalitesinin akıcılığa etkisinin inceleneceği düşünüldüğünde bu durum değerlendirme açısından öngörüldüğü gibi gözlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Al alaşımlarının dökümünde kullanılan hammadde ve sıvı metal temizleme işleminin önemini de gözler önüne sermektedir. VAK testi numuneleri ayrıca yoğunluk ölçümlerine tabi tutularak gözenek durumları belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri, Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Tablo 7’de birincil külçe kullanılarak temizleme işlemi uygulanan dökümler ve hurda ile ergitme sonrası temizleme uygulanmadan yapılan döküm sonuçlarının ortalama yoğunluk ölçüm sonuçları ve hesaplanan gözenek değerleri verilmiştir.

Tablo 7: VAK Testi Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları

Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	DeneySEL Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
Birincil Külçe	132,87	82,77	2,6520	0,30
Hurda Alaşım	120,32	72,63	2,5229	5,15

Tablo 7’de verilen ortalama değerler incelendiğinde temizleme işleminin etkisi bariz bir şekilde görülmektedir. Tabloda verilen teorik yoğunluk değerinin belirlenmesinde alaşımın kimyasal bileşimi ve standart değerler göz önüne alınmıştır. Temizleme sonrası tüm deney numunelerinde hesaplanan gözenek değerleri %0,5’in altındadır. Ayrıca, VAK test numuneleri kesit yüzey incelemeleri sonucu da sıvı metal kalitesinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Hurda ile yapılan dökümlerde bu değerler %5 üzerinde çıkmış ve sıvı metal kalitesi açısından değerlendirilebilir sonuçlar sunmuştur.

Tez kapsamında sıvı metal temizliğinin kontrolü ayrıca K-mold kalıbına yapılan döküm numunelerinde de değerlendirilmiştir. Şekil 23’te K-mold kalıba döküm numunelerine ait örnek görseller verilmiştir.



Şekil 23: 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 24'te K-mold numune kırık yüzeylerine ait örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 24: K-Mold Numuneleri Kırık Yüzey Numune Görüntüleri

K-mold döküm numunelerinin hızlı katılaşması çok ince bir matris oluşturur ve bu nedenle kırık yüzeyinde inklüzyonlar açıkça tespit edilir. Şekil 24'te döküm deney numunelerinden örnek kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. K-mold numune kırık yüzeylerinde görülen inklüzyonlar sayılarak Tablo 8'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 8: K- Mold Inklüzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri

Numune adı	Inklüzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
Birincil Külçe	13	45	0,28
Hurda Alaşım	27	15	1,80

Tablo 8'de verilen sonuçlarda birincil külçe ve hurda alaşım şeklinde yapılan deneylerin değerleri toplu olarak değerlendirilmiştir. Tablo 8'de verilen değerler neticesinde birincil külçe kullanılan ve temizleme işlemi uygulanan numunelerde K değeri 0,3 olarak hesaplanmıştır. Tüm deneyler ayrı ayrı değerlendirildiğinde elde edilen K değerinin 0,5 değerinin altında

olduğu gözlenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda K-mold değeri $< 0,5$ olduğunda sıvı metalin temiz olduğunu, $0,5 < K\text{-değeri} < 1,0$ aralığında kabul edilebilir değerlerde olduğunu ve K-değeri $> 1,0$ üzerinde olduğunda mutlaka sıvı metalin temizlenmesi gerektiği belirtilmektedir (Gyarmati vd, 2019; Tokatlı, 2022; Tokatlı vd., 2022). Buna bağlı olarak sıvı metalin temizleme işlemi sonucu temiz olduğu tespit edilmiştir. Hurda alaşım ile yapılan ergitme sonucu temizleme olmadan yapılan dökümlerde K değerinin 1,8 olarak hesaplandığı ve sıvı metalin temizlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu sonuca bağlı olarak hem K-mold deney sonuçları, hem VAK testi sonuçlarının öngörüldüğü gibi sıvı metal temizlik değişkeninin akıcılık üzerine önemli derecede etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

3.2. AKICILIK KALIPLARI DÖKÜM DENEY SONUÇLARI

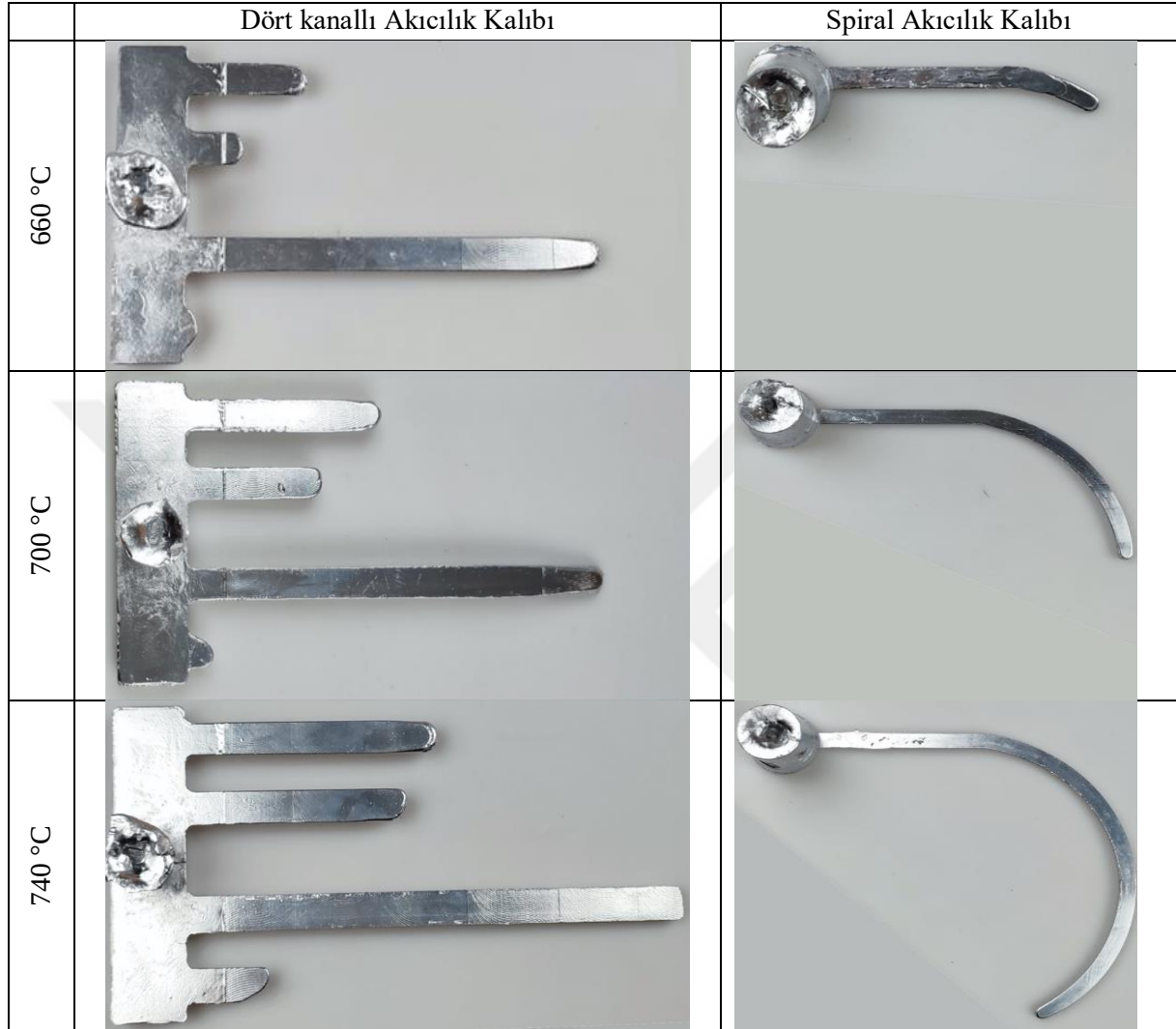
Değişen döküm şartlarının akıcılık özelliklerine etkisinin incelenmesi için dört kanallı ve spiral akıcılık kalıpları kullanılmıştır. Döküm sonrası deney numuneleri çıkarılarak sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçülmüştür. Tablo 9’da deneylerden elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi değerleri verilmiştir.

Tablo 9: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri

Döküm No	Sıcaklık(°C)	Yükseklik(mm)	Kanal Kesiti (mm)				Spiral (mm)
			2	8	4	6	
1	660	50	8	249	32	72	144
2	700	50	15	246	78	114	262
3	740	50	48	300	129	147	348
4	660	100	21	207	84	150	191
5	700	100	15	270	99	129	292
6	740	100	12	300	135	246	352
7	660	150	18	258	66	114	225
8	700	150	6	300	78	126	298
9	740	150	51	300	81	270	392
10	660	50	2	189	60	78	110
11	700	100	2	295	87	84	242
12	740	150	6	300	45	141	313

Tablo 9’da verilen sonuçlar incelendiğinde değişen döküm şartlarının akıcılık üzerinde etki ettiği tespit edilmiştir. Tabloda verilen değerlerde, spiral akıcılık kalıbı ve dört kanallı akıcılık kalıbından elde edilen değerlerin birbirine paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm deneyler değerlendirildiğinde en yüksek sıvı metal ilerleme mesafesinin her iki kalıp için de 9 numaralı 740 °C’de 150 mm döküş yüksekliği ve sıvı metal temizliği uygulanmış deneyde olduğu belirlenmiştir. En düşük akıcılık özelliklerinin de 660 °C döküm sıcaklığında hurda alaşım ile 50 mm döküş yüksekliğinde yapılan dökümlerde olduğu tespit edilmiştir. Sonuçları parametre bazlı inceleyecek olursak, tüm parametrelerin akıcılığa etki ettiği anlaşılmaktadır. Bu parametreler içerisinde en çok etki eden faktörün döküm sıcaklığı olduğu görülmektedir.

Diğer parametrelerin sabit tutularak döküm sıcaklığının artırılması ile sıvı metal ilerleme mesafesinin arttığı ve akıcılık üzerinde en etkili parametrenin döküm sıcaklığı olduğu anlaşılmıştır. Şekil 25'te 50 mm döküş yüksekliğinde 660 °C, 700 °C ve 740 °C'de yapılan döküm numunelerine ait resimler verilmiştir.

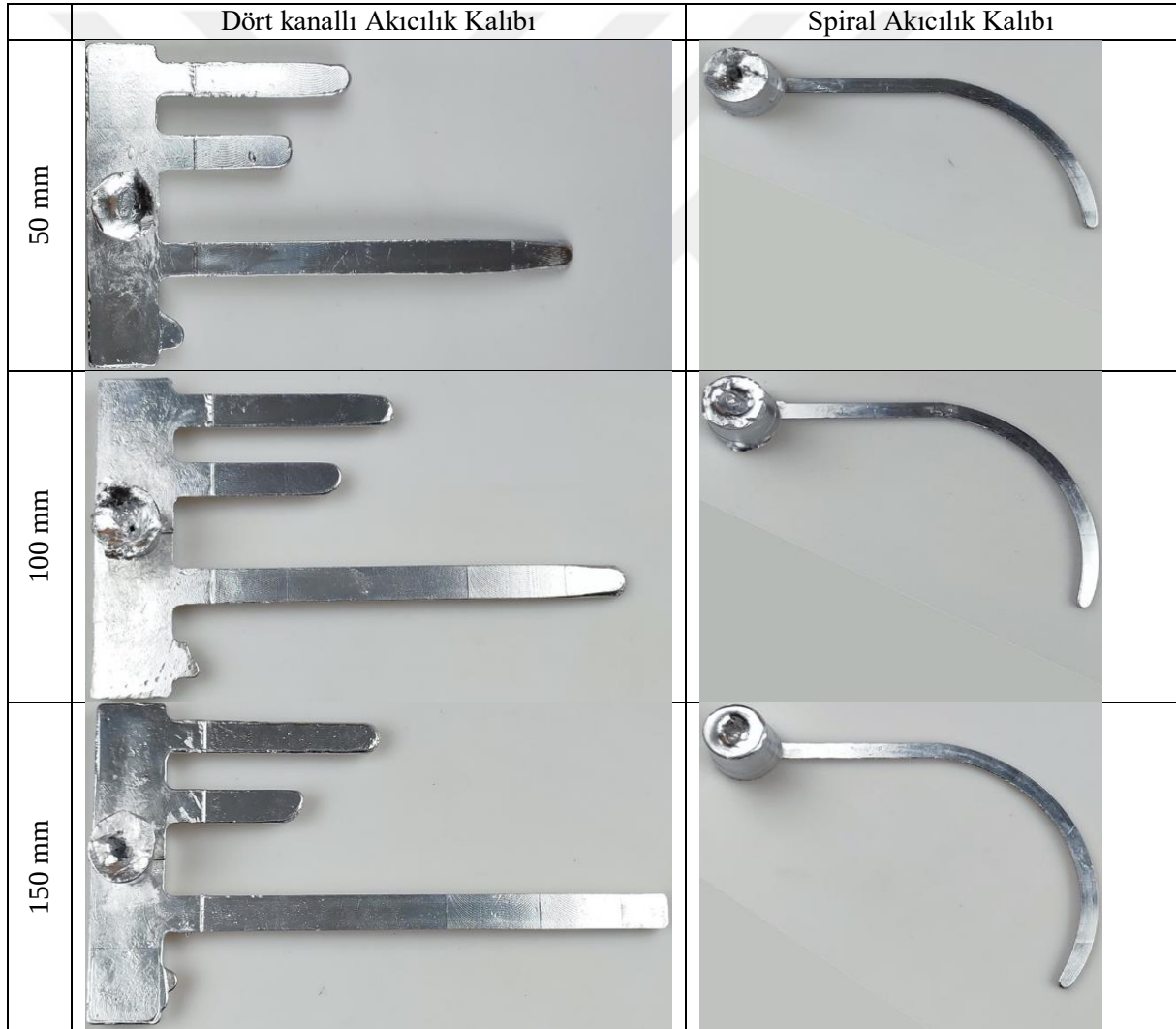


Şekil 25: Döküm Sıcaklığına Bağlı Akıcılık Döküm Numuneleri

Şekil 25'te görüldüğü gibi aynı şartlarda yapılan dökümlerde döküm sıcaklığının artması ile sıvı metal ilerleme mesafesi artış göstermektedir. Deney sonucuna göre dört kanallı akıcılık kalıbında 50 mm döküş yüksekliğinde 2 mm kesit kalınlığında 660 °C'de yapılan dökümlerde sıvı metal ilerleme mesafesi 8 mm iken, 700 °C'de 15 mm ve 740 °C 48 mm olarak ölçülmüştür. 4 mm kesit kalınlığında sıvı metal ilerleme mesafesi sırasıyla, 32 mm, 78 mm ve 129 mm olarak tespit edilmiştir. 6 mm kesit kalınlığında da yine sıcaklık artışı ile sıvı metal ilerleme mesafelerinde artış gözlemlenmiştir. Ölçülen değerler sırasıyla, 72 mm, 114 mm ve 147 mm'dir. 8 mm kesitli kanalda 740 °C sıcaklıkta sıvı metalin kanalı tam olarak doldurduğu görülmüştür. Diğer kanallarda yapılan ölçümlerde 246 mm ve 249 mm değerleri ölçülmüştür. Spiral kalıbı ile 660 °C'de yapılan dökümden 144 mm, 700 °C'de 262 mm ve 740 °C'de 348

mm sıvı metal ilerleme mesafesi ölçülmüştür. Spiral akıcılık kalıbında da sıvı metal ilerleme mesafesinin döküm sıcaklığı ile artış gösterdiği görülmüştür.

Tabloda verilen değerler diğer döküş yükseklikleri için de değerlendirildiğinde genel yönelimin döküm sıcaklığının artışı ile alaşım akıcılık özelliklerinin iyileşmesi ve sıvı metal ilerleme mesafesinin artması şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda döküm sıcaklığının artışının alaşımın akıcılığını artırdığı ve sıvı metal ilerleme mesafesinin arttığı bilinmektedir. Aslandoğan (2009), döküm tekniğinde sıcaklığın akıcılığı artırıcı en önemli etken olduğunu bildirmiştir. Han & Zhang (2020), araştırma bulgularından hareketle akışkanlığı arttırmanın bir yolunun alaşımın dökme sıcaklığını yükseltmek olduğunu bildirmişlerdir. Döküş yüksekliğinin etkisini deney numune üzerinde değerlendirmek için Şekil 26’da 700 °C’de yapılan döküm numune fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 26: Döküş Yüksekliğine Bağlı Akıcılık Döküm Numuneleri

Şekil 26’da verilen resimler incelendiğinde döküş yüksekliğinin de sıvı metal ilerleme mesafesi üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Döküş yüksekliğinin artışı ile Tablo 9’da verilen değerlerden de anlaşılabacağı gibi hem dört kanallı akıcılık kalıbında hem de spiral

akıcılık kalıbında sıvı metal ilerleme mesafeleri artış eğilimindedir. 2 mm kesitli kanalda elde edilen sonuçlar da doğrusal bir değişim söz konusu değildir. Bu konuda ilgili kanal kesitinin çok ince olmasından dolayı sıvı metalin akıcılıktan ziyade dolum basıncı etkisi ile ilerlemenin değişiklik göstereceği düşünülmektedir. Bu kapsamda ilerleme etkisi en bariz 8 mm kesit kalınlığında gözlenmektedir. 50 mm döküş yüksekliği deneyinde 8 mm kesitli kanalda sıvı metal ilerleme mesafesi 246 mm iken, 100 mm döküş yüksekliğinde 270 mm ve 150 mm döküş yüksekliğinde kanalın tam dolması ile 300 mm olarak ölçülmüştür. Spiral akıcılık kalıbında da benzer şekilde etkiler tespit edilmiştir. Döküş yüksekliği artışı ile sıvı metal ilerleme mesafeleri sırasıyla 262 mm, 292 mm ve 298 mm olarak tespit edilmiştir. Döküş yüksekliğinin artışı ile sıvı metal ilerleme mesafesinin artışının, kalıba dolum hızının artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yerçekimi etkisi ile dökümlerde sıvı metalin kalıba döküş hızı serbest düşmede hızdan etkilenmektedir. Serbest düşmede hız hesaplanırken önemli olan etkenlerden biri de döküş yüksekliğidir. Buna bağlı olarak yükseklik arttıkça sıvı metalin kalıba dolum ilk hızı artış göstermekte ve dolumun daha fazla olması beklenmektedir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda optimum döküş yüksekliğinin sıvı metalin kalıba giriş hızını doğrudan etkilediğinde akıcılığı artırdığı ve sıvı metal ilerleme mesafesinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin dökümü sırasında dökme yüksekliğinin numunelerin bifilm içeriği ve homojen mikro yapı oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği ifade edilmiştir (Mao vd., 2006; Gyarmati vd., 2020).

Sıvı metal temizliğinin akıcılık üzerine etkisini incelemek amacıyla, Şekil 27’de dört kanallı akıcılık kalıbı, Şekil 28’de spiral akıcılık kalıbından elde edilen fotoğraf görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

	Temizleme olmadan yapılan dökümler	Temizleme sonrası yapılan dökümler
660 °C - 50 mm		
700 °C - 100 mm		
740 °C - 150 mm		

Şekil 27: Dört Kanallı Akıcılık Kalıp Numunelerinde Sıvı Metal Temizliğini Etkiler

Şekil 27 ve 28’de verilen değişen döküm şartlarında temizleme etkisinin karşılaştırıldığı döküm fotoğraf görüntülerinde görüleceği gibi sıvı metal temizlemesi ile tüm döküm şartlarında sıvı metal ilerleme miktarlarında artış oluşmuştur. Bu durum hem dört kanallı akıcılık kalıbında hem de spiral akıcılık kalıbında teyit edilmiştir.

Akıcılık üzerindeki döküm sıcaklığı ve döküş yüksekliğinin artışı ile ortaya çıkan olumlu etki burada da tespit edilmiştir. Sıvı metal temizleme etkisi ile alaşım içerisindeki istenmeyen intermetalik bileşik ve inklüzyon gibi etkilerin azaldığı ve buna bağlı olarak sıvı metalin daha uzun süre kalıp içerisinde ilerleyebildiği görülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda sıvı metal temizliğinin Al alaşımlarının akıcılığı üzerinde etkileri olduğu vurgulanmaktadır (Puga vd., 2014; Tokatlı vd. 2022).

	Temizleme olmadan yapılan dökümler	Temizleme sonrası yapılan dökümler
660 °C - 50 mm		
7000 °C - 100 mm		
740 °C - 150 mm		

Şekil 28: Sıvı Metal Temizliğinin Spiral Akıcılık Kalıp Numune Görüntüleri

3.3. MODELLEME SONUÇLARI

Modelleme çalışmaları Finite Solutions Inc. Yazılım olan SolidCast döküm katılaştırma modülüne entegre olarak çalışan FlowCast programında gerçekleştirilmiştir. FlowCast döküm simülasyon akıcılık modelleme programıdır. Gerçek döküm koşullarında yapılmış dökümlerin, simülasyon ortamında sayısal değerler ile bire bir modellenmesini sağlamak, simülasyonların kullanımında iyi sonuçlar elde etmek için çok önemlidir. Bu kapsamda deney parametrelerinden döküş sıcaklığı programda tanımlanmıştır, döküş yüksekliği tasarımı katı modelde gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığı 660 °C, 700 °C ve 740 °C olarak modelleme programına girilmiştir. Sıvı metal temizliği etkisi modelleme programında kritik katı oranı (CLF-Critical liquid fraction) üzerinde yapılan değişikliklerle gerçekleştirilmiştir. CLF değeri hurda ile ergitilen ve temizlemeden yapılan dökümler için %20 (CLF20) ve birincil külçe ve

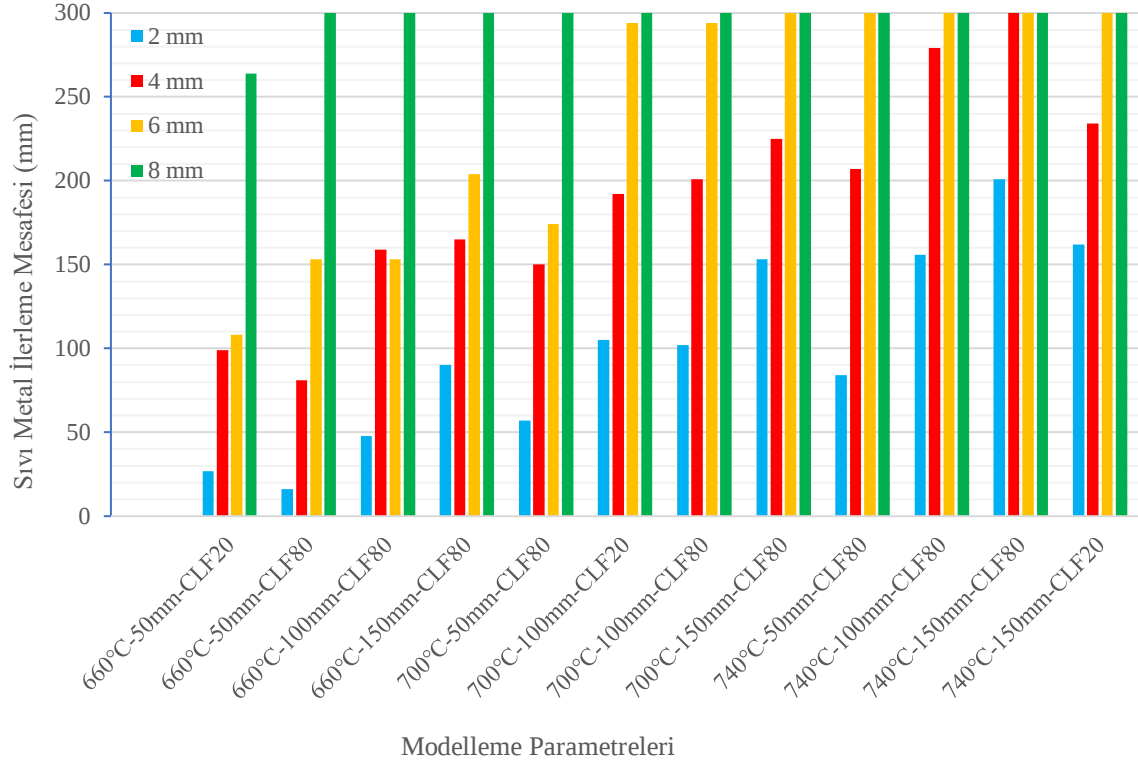
temizleme sonrası yapılan dökümlerde %80 (CLF80) olarak modellenmiştir. Alaşım olarak Al12Si alaşımı muadili A413 alaşımı program veri tabanından seçilmiştir. Akıcılığın modellenmesinde dolum süresi parametresi 5 saniye olarak tanımlanmıştır. Döküm süresi, gerçek dökümden kalıp doldurma oranına bağlı olarak değişen döküm koşullarına göre 3 ile 4 saniye arasında olduğu tespit edilerek, modelleme dolumuna bağlı 5 saniye olarak tanımlanmıştır. Modelleme çalışmaları dört kanallı akıcılık kalıbında gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri ve buna bağlı olarak değişen kesitler için FlowCast dolum modelleme yazılımından alınan sıvı metal ilerleme mesafesi, dolum süreleri ve yüzde dolum miktarına ait sonuçlar Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10: Modelleme Sonuçları

Modelleme Şartları			Dolum Miktarı (%)	Dolum Süresi (s)	Kanal Kesiti (mm)			
Döküm Sıc. (°C)	Döküş Yük. (mm)	CLF (%)			2	4	6	8
660	50	80	84.6	4.229	16	81	153	300
660	100	80	86.2	4.312	48	159	153	300
660	150	80	89.7	4.485	90	165	204	300
700	50	80	87.8	4.392	57	150	174	300
700	100	80	94.2	4.708	102	201	294	300
700	150	80	95.3	4.767	153	225	300	300
740	50	80	95.4	4.770	84	207	300	300
740	100	80	97.2	4.859	156	279	300	300
740	150	80	98.0	4.900	201	300	300	300
660	50	20	80.7	4.034	27	108	99	264
700	100	20	94.0	4.698	105	192	294	300
740	150	20	95.6	4.780	162	234	300	300

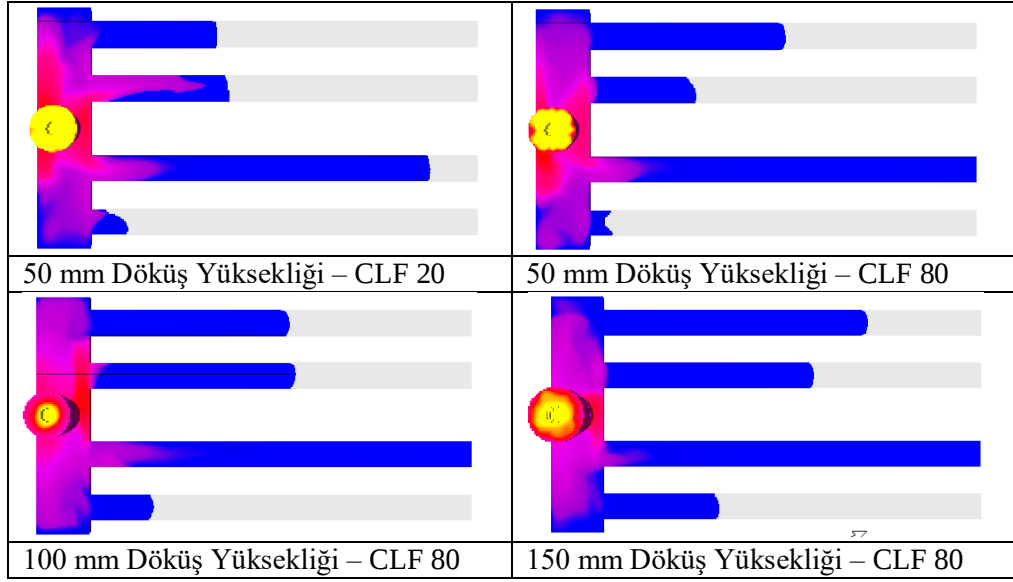
Tablo 10’da değişen döküm şartlarına göre sıvı metalin akıcılığını yitirerek katılaştığı değerler mevcuttur. Tabloda kalıp dolumu için belirlenen deney parametrelerine göre hangi süre ve hangi % dolum miktarında sıvı metalin sonlandığı ve kesit kalınlığına bağlı sıvı metal ilerleme mesafeleri verilmiştir. İlgili deney modellemelerinde verilen parametrelere göre FlowCast döküm simülasyon yazılımı her bir denemede ilgili sıcaklık ve akıcılık değerinin sınır değerine ulaşması ile sonlanarak uyarı vermekte ve modelleme durmaktadır. Değerlere bağlı sıvı metal ilerleme mesafeleri incelendiğinde tüm parametrelerin akıcılık özellikleri üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Parametreler değerlendirilecek olursa, akıcılık üzerinde en önemli etkenin döküm sıcaklığı olduğu anlaşılmaktadır. Artan döküm sıcaklığı ile her bir kesitte sıvı metal ilerleme mesafelerinde artış tespit edilmiştir. Döküş yüksekliği artışı sıvı metal kalıba giriş hızına doğrudan etki ettiğinden, sıvı metalin katılaşmadan daha uzun süre ilerlemesine katkı sağlayarak akıcılığı artırmıştır. Sıvı metal temizliğinin etkisi değerlendirildiğinde, CLF değerinin artması ile sıvı metal ilerleme mesafesinde artış olduğu gözlemlenmektedir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde modelleme programı ile mevcut literatür bilgisinin uyumlu olduğu

tespit edilmiştir. Ayrıca tüm döküm şartlarında kesit kalınlığının artışı ile sıvı metal ilerleme mesafesi artış göstermiştir. Şekil 29’da deney parametrelerinin etkilerinin karşılaştırıldığı bir grafik verilmiştir.

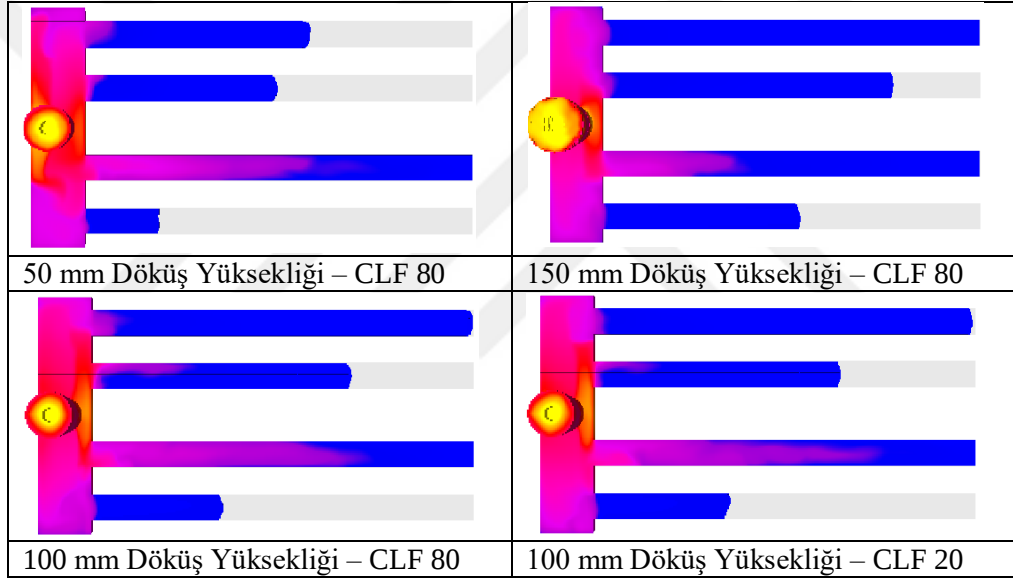


Şekil 29: Akıcılık Üzerinde Modelleme Sonuçlarına Bağlı Olarak Parametrelerin Karşılaştırılması

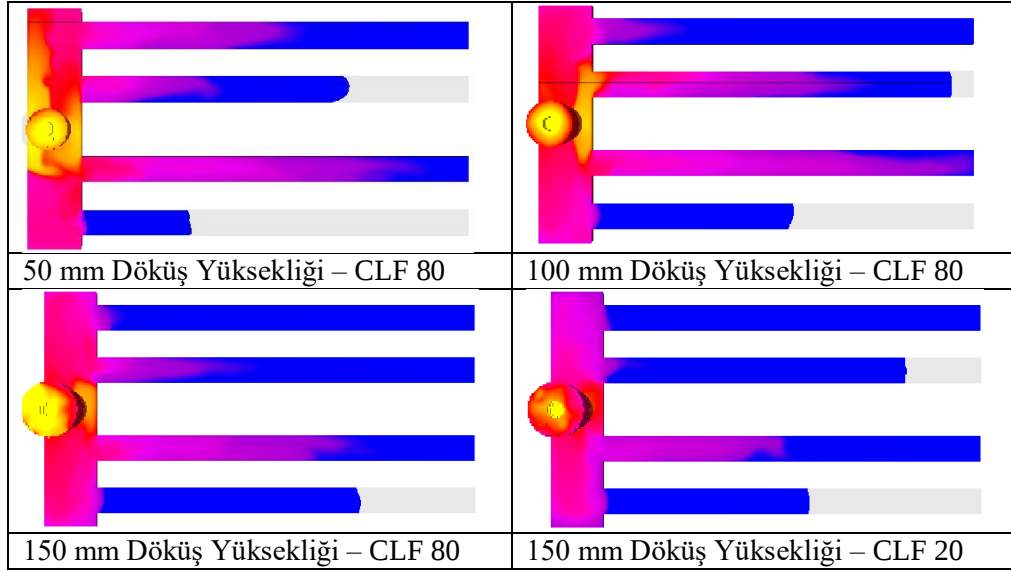
Şekil 29’da verilen sonuçlar incelendiğinde akıcılık üzerine etki eden parametrelerin önem sırasıyla döküm sıcaklığı, döküş yüksekliği ve sıvı metal temizliği olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 30’da 660 °C, Şekil 31’de 700 °C ve Şekil 32’de 740 °C de CLF 20 ve CLF 80 değerlerinde modelleme sonuçları verilmiştir.



Şekil 30: 660 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçları



Şekil 31: 700 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçları



Şekil 32: 740 °C Sıcaklıkta Değişen Şartlarda Yapılan Modelleme Çalışmaları Sonuçları

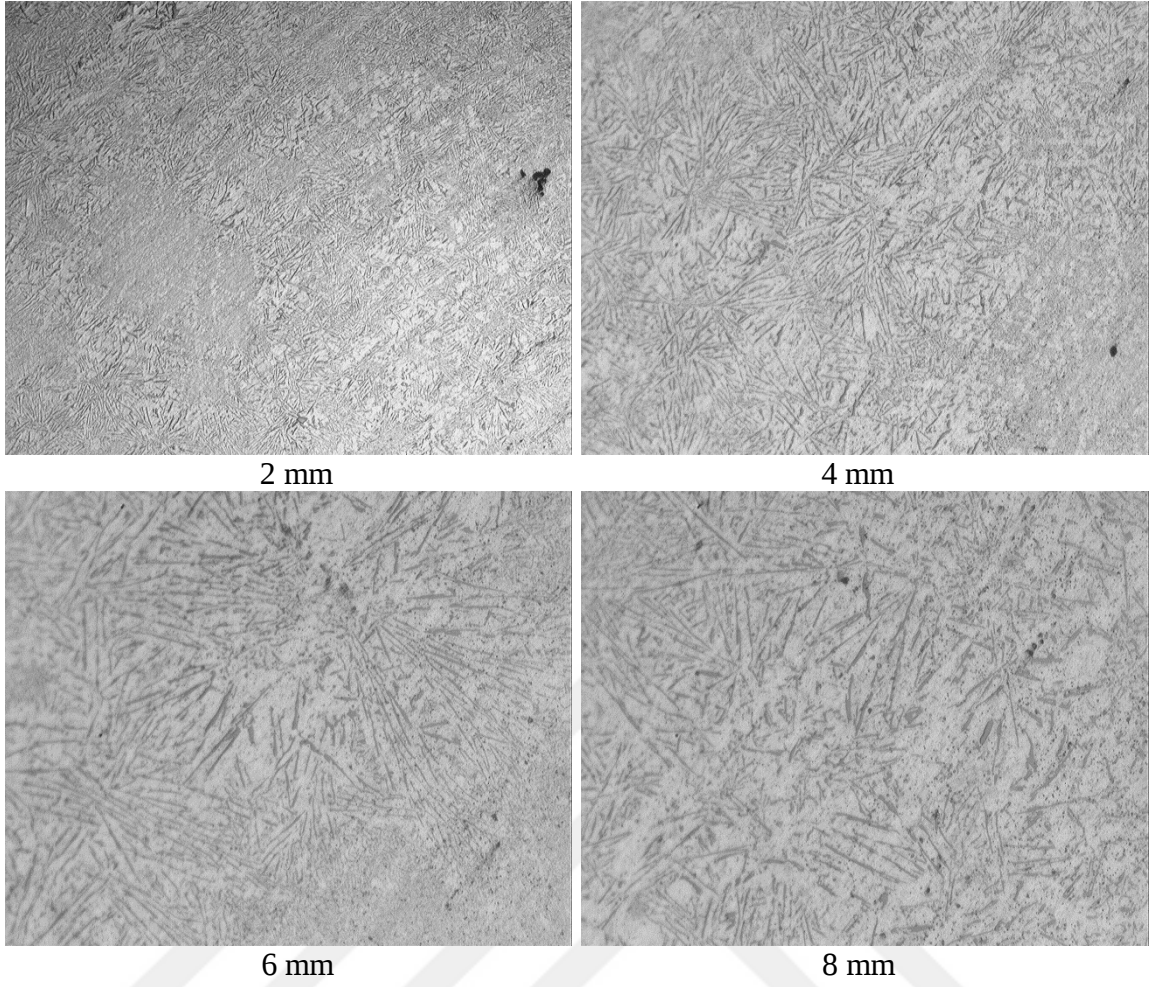
Döküm sıcaklığının akıcılığa etkisi değerlendirildiğinde, Şekil 30, 31 ve 32’de verilen resimlerde aynı şartlarda sıcaklığın artışı ile bariz bir şekilde sıvı metal ilerleme mesafesinde artış tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının artışı ile en ince kesitli kısımda bile sıvı metal ilerlemesi artış göstermiştir. Han & Zhang (2020), araştırma bulgularından hareketle akışkanlığı arttırmanın bir yolunun alaşımın döküm sıcaklığını yükseltmek olduğunu bildirmişlerdir. Aslandoğan, yaptığı çalışmada, döküm tekniğinde akıcılığı artırıcı en önemli etkinin sıcaklık olduğunu tespit etmiştir (Aslandoğan, 2009). Benzer bir çalışmada yüksek sıcaklıkların, tüm metallerin ve alaşımların akışkanlığını arttırırken, dökümdeki metalik olmayan yabancı maddelerin akışkanlığını azalttığı ve kalıp içindeki akışı engellediği belirtilmiştir (Di Sabatino, & Arnberg, 2004). Ayrıca her bir şekli aynı döküm sıcaklığı için ele alacak olursak, döküş yüksekliğinin değişen kesitlerde akıcılık özelliklerine olumlu yönde etki ettiği anlaşılmaktadır. Bu durumun, döküş yüksekliğinin sıvı metal hızını doğrudan etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Döküş yüksekliğine bağlı olarak dolumun hızlanması ile sıvı metalin ısı transferi için daha kısa süre bulması mümkün olmuş, dolum hızı sıvı metalin ilerleme mesafesine olumlu etkide bulunmuştur. Sıvı metal kalitesi etkisi modelleme programında CLF olarak tanımlanan değerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda CLF değeri daha yüksek ayarlandığında sıvı metalin akıcılığın arttığı ve kalıpta daha fazla sıvı metalin ilerleme kat ettiği gözlenmiştir. CLF değeri 0 ile 100 arasında mevcut firmanın döküm pratiğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. İlgili değerlerin yazılıma göre optimize edilmesi, modelleme programının daha gerçekçi sonuçlar vermesi ve fiziksel döküm şartları ile uyumlu olmasını sağlamıştır.

Gerçek döküm sonuçları ile modelleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Döküm deneylerinde de modelleme çalışmalarında da

döküm sıcaklık artışı, döküş yüksekliği ve sıvı metal kalitesinin artırılması ile akıcılık özelliklerinin geliştiği ve sıvı metalin daha ince kesitlerde daha uzun mesafe kat edebildiği tespit edilmiştir. Ancak model sonuçlarında gerçek dökümlere göre bazı sayısal farklılıklar gözlemlenmiştir. Bunun birçok nedeni olabilirken ilk akla gelenlerden biri akıcılığa birçok parametrenin etki etmesidir ve bu değerlerin modelleme programına sayısal ifadeler olarak girilmesidir. Bu nedenle simülasyonda elde edilen değerlerle, gerçek döküm şartlarında elde edilen değerler arasındaki değişimler, sonuçlarda değişkenliğe neden olabilir. Ayrıca, kalıbın dolumu sırasında modelleme programında tanımlanan konumla, gerçek dökümünün yapıldığı konum arasındaki farklılıklar, sıvı yönü ile kalıp içerisinde ısının dağılmasına etki edeceğinden, sonuçlarda da farklılık kaçınılmazdır.

3.4. MİKRO YAPI İNCELEME SONUÇLARI

Al12Si alaşımı ile değişen döküm şartlarında ortaya çıkan içyapı incelemeleri için dört kanallı akıcılık kalıbından numuneler alınmıştır. Mikro yapı incelemeleri deney parametrelerine bağlı olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu kapsamda kesit kalınlığı değişiminin mikro yapı üzerinde etkisinin incelenmesi için birincil külçe ile ergitilerek temizleme işlemi uygulanan ve 700 °C sıcaklıkta 50 mm döküş yüksekliğinde gerçekleştirilen dökümden numuneler alınmıştır. Numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra resimleri farklı büyütme ölçeklerinde çekilmiştir. Şekil 33'te 100X büyütmede çekilen mikro yapı resimleri verilmiştir.



Şekil 33: Kesit Kalınlık Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri

Mikro yapı resimleri incelendiğinde alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak yapıda α -Al ve ötektik Si kristalleri olduğu tespit edilmiştir. Şekil 33'te verilen mikro yapı resimleri incelendiğinde kesit kalınlığının artmasına bağlı olarak tane yapılarının ve yapıda ortaya çıkan Si kristallerinin daha büyük olduğu gözlenmektedir. Yapıda kalınlık artıka katılama zamanına bağılı olarak tanelerin büyüdüğü gözlenmiştir. Şekil 34'te döküm sıcaklığının etkisinin incelenmesi için alınan numunelerden elde edilen 50X ve 100X büyütmede çekilen mikro yapı resimleri verilmiştir.

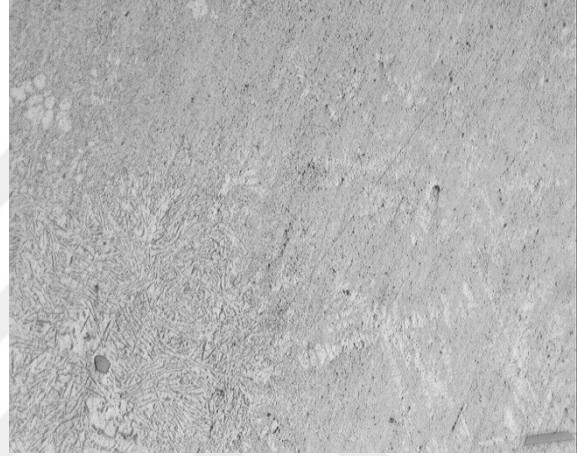
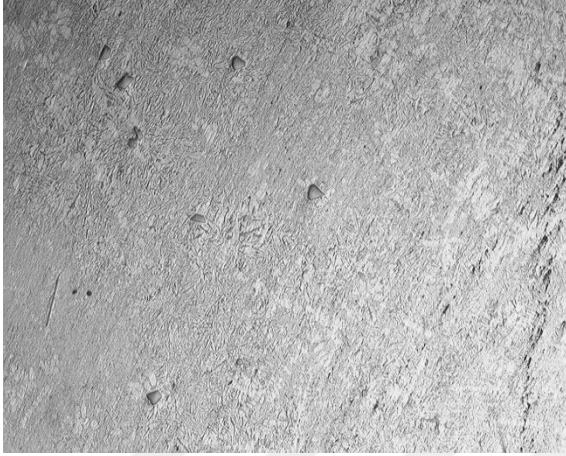
50X büyütme



100X büyütme



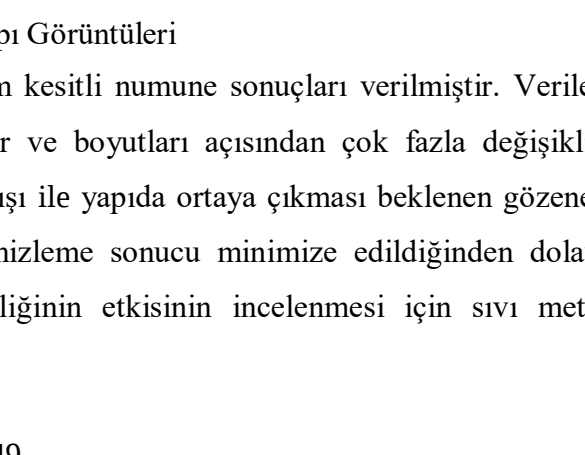
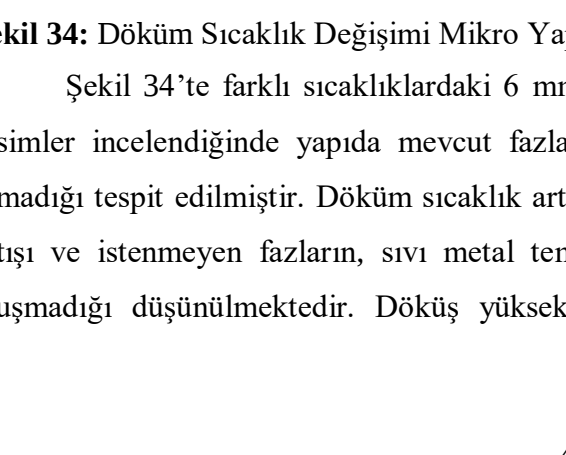
660 °C döküm numuneleri



700 °C döküm numuneleri

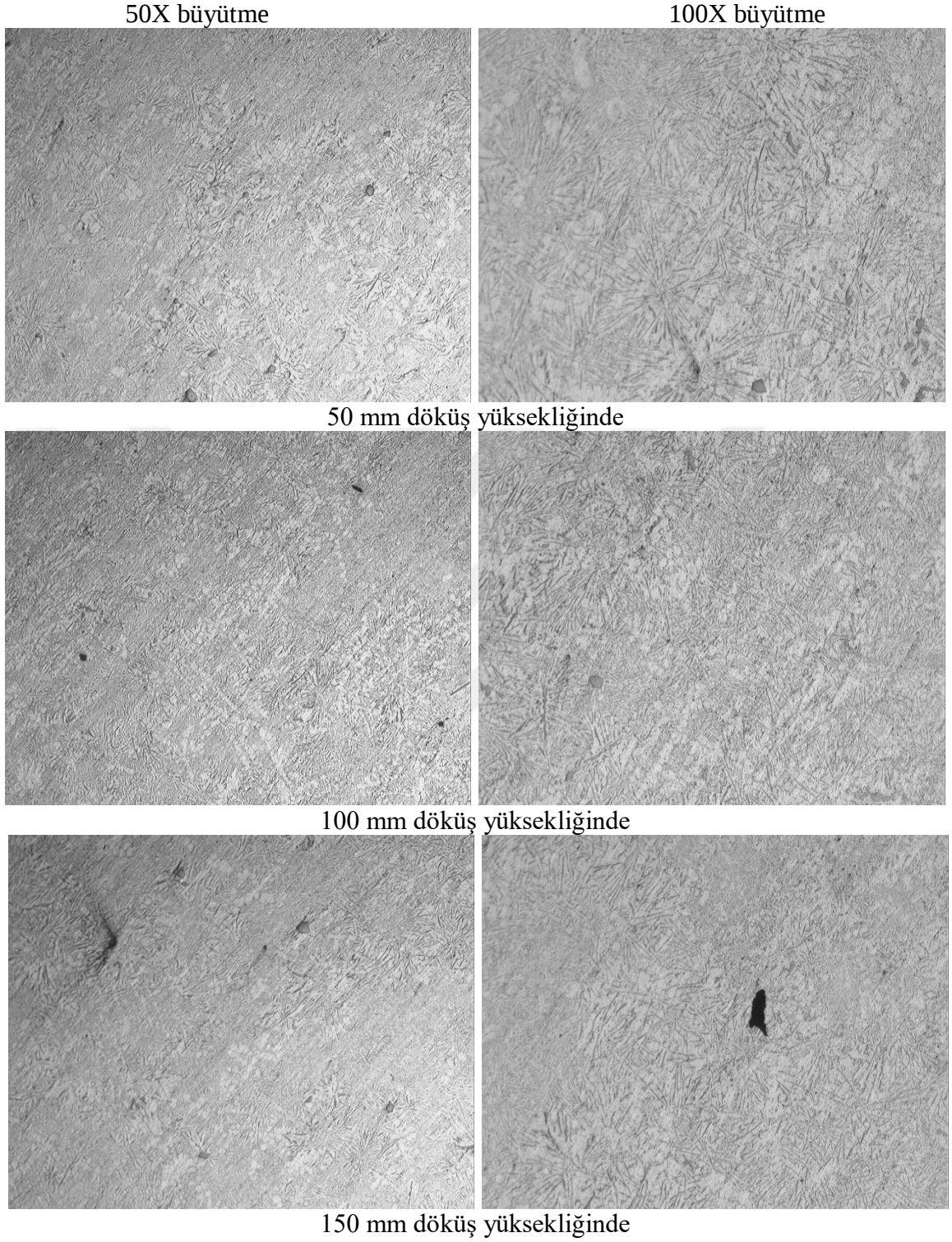


740 °C döküm numuneleri

**Şekil 34:** Döküm Sıcaklık Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri

Şekil 34'te farklı sıcaklıklardaki 6 mm kesitli numune sonuçları verilmiştir. Verilen resimler incelendiğinde yapıda mevcut fazlar ve boyutları açısından çok fazla değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Döküm sıcaklık artışı ile yapıda ortaya çıkması beklenen gözenek artışı ve istenmeyen fazların, sıvı metal temizleme sonucu minimize edildiğinden dolayı oluşmadığı düşünülmektedir. Döküş yüksekliğinin etkisinin incelenmesi için sıvı metal

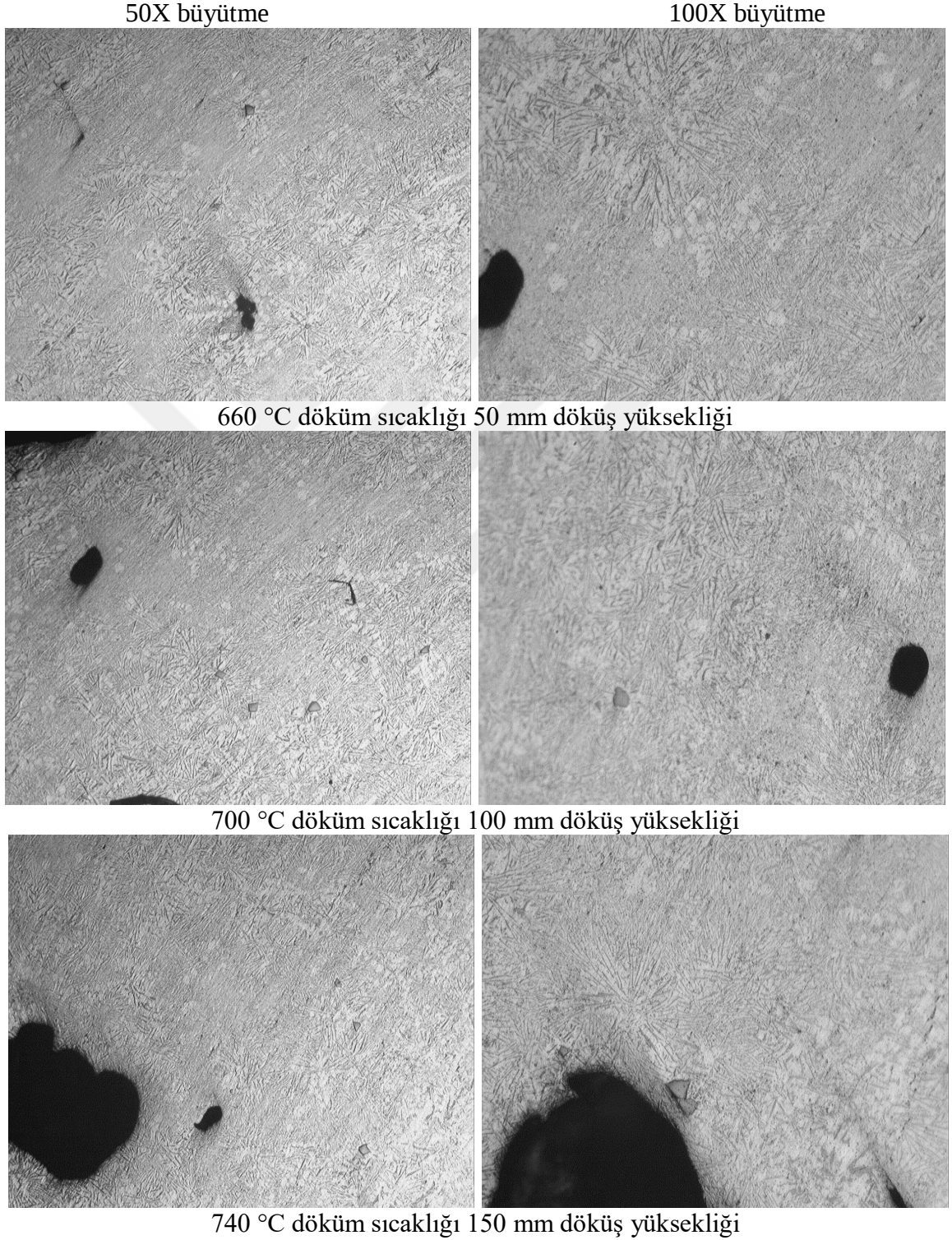
temizliği uygulanmış alaşım ile 700 °C yapılan dökümlerin 6 mm kesitli numunelerine ait mikroyapı resimleri şekil 35'te verilmiştir.



şekil 35: Döküş Yükseklik Değişimi Mikro Yapı Görüntüleri

şekil 35'te verilen döküş yüksekliğine dair mikro yapı görüntüleri incelendiğinde görüntülerde ortaya çıkan içyapının benzer olduğu görölmektedir. Döküş yüksekliğinin artması ile muhtemel türbölánstan dolayı mikro yapılarda gözenek oluşumu mevcut olduğu tespit edilmiştir. Tiryakioğlu vd. (2018)'in sonuçlarına göre VAK testi numunelerinin gözenek sayısı

yoğunluğu sıvı metalin düşme yüksekliğiyle birlikte artmıştır. Mao vd., (2006)'nın bulguları ise daha yüksek dökme yüksekliğinin eriyik akış hareketini desteklediğini ve eriyik içindeki sıcaklık alanını daha homojen hale getirdiğini ve büyük rozetli birincil α -Al tanelerini sınırladığını göstermektedir. Şekil 36'da hurda alaşım ile ergitilip temizleme yapmadan dökülen numunelere ait mikro yapı resimleri verilmiştir.



Şekil 36: Hurda Alaşımın Temizleme Uygulamadan Elde Edilen Numune Mikro Yapı Görüntüleri

Şekil 36’da verilen mikroyapı resimlerinde de görüldüğü gibi yapıda temizleme olmamasından dolayı gazdan kaynaklı gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sıcaklık artışı ile ilgili gözenek miktar ve büyüklüklerinin de arttığı anlaşılmaktadır. Hidrojen varlığının dökümde birincil gözenekliliğe neden olmasının yanı sıra, ısıtım sırasında ikincil gözenekliliğe, kabarmaya ve yüksek sıcaklık korozyonuna (ileri iç gaz çökmesi) neden olduğu bildirilmiştir (Davis, 1993) Benzer şekilde, araştırmacılar tarafından sıvı metal temizliği uygun olmayan alaşımlarda iç yapıda poroziteli sonuçların elde edildiği bildirilmiştir (Arslan vd., 2019; Tunçay, 2019).

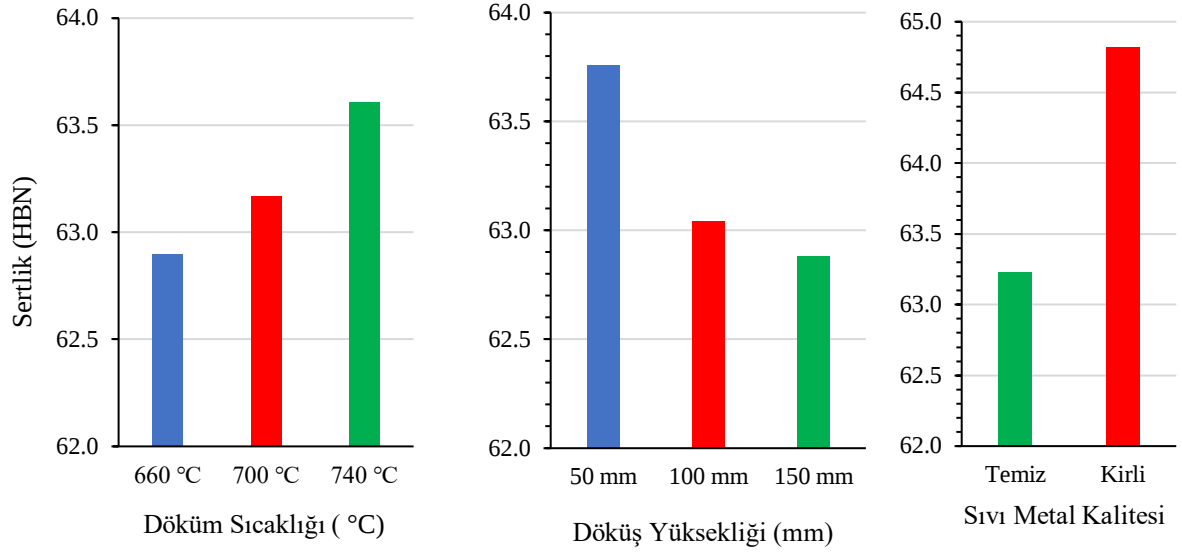
3.5. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI

Deneylerden elde edilen numunelere ait sertlik ölçümleri oda sıcaklığında Brinell yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. HRB test metodu 1,6 mm çaplı bilye ile 2,5 kgf ön yük ve 62,5 kgf toplam yük altında her bir numuneden en az 10’ar ölçüm yapılarak sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Tablo 11’de numunelerden elde edilen sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 11: Sertlik Ölçüm Sonuçları

No	Ölçüm Sonuçları (HBN)													Ortalama
1	65,5	67,8	60,5	66,6	65,1	67,0	66,2	64,8	65,1	62,3	60,1	65,7	66,9	64,9
2	58,1	62,1	65,2	62,5	62,4	60,7	61,1	62,6	61,3	60,1	61,3	62,1	62,3	61,7
3	62,7	61,3	62,3	62,1	62,7	60,9	60,5	61,2	58,4	69,4	62,9	64,5	58,9	62,1
4	60,9	64,4	62,1	61,5	60,9	61,3	63,2	64,8	62,6	67,5	63,6	62,7	63,7	63,0
5	60,7	63,6	61,9	65,7	62,9	64,0	65,1	65,7	67,0	61,3	63,3	60,7	64,8	63,6
6	60,1	62,1	68,7	61,1	61,5	61,9	62,9	64,4	63,6	64,4	61,5	63,2	62,5	62,9
7	59,4	64,8	65,1	65,3	65,1	64,8	61,7	62,9	63,2	65,7	62,3	60,7	62,8	63,4
8	62,3	62,1	65,5	61,5	62,5	68,7	65,4	63,9	63,2	63,7	63,6	63,9	63,9	63,9
9	68,1	62,1	62,9	65,3	62,7	68,1	61,7	61,5	62,5	65,5	61,5	61,3	63,4	63,6
10	63,6	64,1	64,8	65,5	62,7	65,5	65,3	66,6	63,2	62,7	64,8	62,7	63,5	64,2
11	61,5	61,7	65,5	64,8	62,1	63,6	67,8	62,9	64,2	62,1	60,7	62,7	64,9	63,4
12	62,7	65,9	67,8	63,2	68,1	64,4	69,2	67,8	69,1	68,9	68,6	63,9	68,9	66,8

Tablo 11’de sertlik testi sonuçları incelendiğinde değerlerin 61,7 HBN ile 66,8 HBN arasında değiştiği ve ilgili değerlerin mevcut alaşım için beklenen değer aralıklarında olduğu tespit edilmiştir. Değişen döküm şartlarına bağlı değerler incelendiğinde elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Deney parametrelerine bağlı alınan ortalama sertlik sonuçlarına dair değişimler Şekil 37’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 37: Deney Parametrelerine Bağlı Olarak Sertlik Testi Sonuçlarının Grafik Gösterimi

Şekil 37’de verilen sonuçlar incelendiğinde döküm sıcaklığının etkisinin incelenmesi için 660 °C’de yapılan tüm dökümlerin sertlik sonuçları benzer şekilde 700 °C ve 740 °C için alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 660 °C’de yapılan dökümlerde ortalama 62,9 HBN, 700 °C’de 63,17HBN ve 740 °C dökümlerde 63,17 HBN değerleri tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının artışı ile sertlik değerlerinde az miktarda artış gözlenmiştir. Döküş yüksekliğine dair yapılan ölçümlerde 50 mm de ortalama 63,76 HBN, 100 mm de 63,04 HBN ve 150 mm’de 62,88 HBN sertlik değerleri tespit edilmiştir. Sıvı metal temizliğinin etkisi için yapılan ölçümlerde birincil külçe ile yapılan ergitme ve temizleme sonrası dökümlerde 63,23 HBN ve hurda ergitme ve temizleme olmadan yapılan dökümlerde ortalama 64,82 HBN değerleri belirlenmiştir.

Araştırmacılar, proses sıcaklığındaki değişiklikler ile mikro yapının sertliği arasında bir korelasyon bulunduğunu bildirmiştir. Bu durumun, daha yüksek bir işlem sıcaklığı ile ergiyik içindeki safsızlıkların daha etkili bir şekilde çözülmesinden ve bunun sonucunda homojen bir şekilde dağıtılmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Suenger vd., 2014).

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ötektik Al₁₂Si alaşımının kokil kalıba dökümünde döküm sıcaklığı, döküş yüksekliği ve sıvı metal temizliğinin akıcılık üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- Dökümlerde sıvı metal temizliğinin etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda birincil külçe kullanılarak yapılan dökümlere sıvı metal temizleme işlemi uygulanmıştır. İlgili deneylerden elde edilen dökümlerde sıvı metal temizliğinin uygun olduğu, uygulanan işlemin yeterli olduğu tespit edilmiştir.
- Hurda ile ergitme yapılan dökümlere sıvı metal temizliğinin akıcılık üzerinde etkisinin tespit edilmesi amacıyla temizleme işlemi uygulanmamıştır. VAK testi ve K-mold kalıbı numuneleri ile yapılan değerlendirmelerde sıvı metal temizliği yapılmayan dökümlerde gözenek olduğu tespit edilmiştir. Hurda ile yapılan dökümlerde VAK testi numunelerinden elde edilen gözenek miktarı %5,15 iken temizleme uygulanan döküm numunelerinin VAK testi gözenek değerleri %0,3 olarak bulunmuştur.
- Sıvı metal temizliğinin K-mold deneyleri ile karşılaştırmasında temizleme işlemi uygulanan dökümlerde K değeri 0,28 iken, hurda ile yapılan ergitme ve temizlemesiz dökümde 1,8 olarak ölçülmüştür. İlgili değerler temizleme yapılan dökümlerde işlemin uygun, hurda dökümlerinde de temizleme gereksinimi olduğuna işaret etmektedir.
- Değişen döküm şartlarında akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için değişen kesit kalınlıklarına sahip dört kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbı kullanılmıştır. Kalıplardan elde edilen numunelerde belirlenen sonuçlar akıcılık özelliklerinin tüm parametrelerden etkilendiğini göstermektedir.
- Dört kanallı akıcılık kalıbında değişen kesitlerde farklı sıvı metal ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir. Kesit kalınlığının döküm şartlarına bağlı değişkenlik gösterdiği anlaşılmıştır.
- Akıcılık üzerinde en önemli parametrenin döküm sıcaklığı olduğu, sıcaklık artışı ile tüm şartlarda sıvı metal ilerleme mesafelerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Döküş yüksekliğinin de sıvı metalin kalıba giriş hızını artırmasından dolayı etkili olduğu ve döküş yüksekliği artışı ile akıcılık özelliklerinin olumlu yönde değiştiği belirlenmiştir. Sıvı metal temizliğinin de akıcılık üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Sıvı metal temizleme işlemi ile akıcılık özellikleri olumlu yönde değişmektedir.

- Modelleme sonuçları ile gerçek döküm deneylerinden elde edilen sonuçların paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. İlgili sonuçlar birebir uyumlu olmasa da parametrelerin değişimi akıcılık özelliklerini benzer şekilde değiştirmiştir. Modelleme ile gerçek döküm sonuçlarındaki farklılıklar halen modelleme yazılımlarının gelişmeye açık olduğunun ve göz ardı edilen bazı parametreler olduğunun bir işareti olarak değerlendirilmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri ile diğer deneylerden elde edilen sonuçlar arasında benzerlikler tespit edilmiştir. Genel değerlendirmede, döküm sıcaklık artışı ve döküş yüksekliğinin artışına bağlı olarak yapıda az da olsa gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Sıvı metal temizleme olmayan hurda malzeme ile yapılan dökümlerde, gazdan kaynaklı gözenekler yapıda dikkat çekmiştir.
- Deney numunelerinden elde edilen sertlik ölçümleri sonucunda değerlerin 61,7 HBN ve 66,8 HBN arasında olduğu gözlenmiştir. İlgili değerler alaşım standart aralığındadır. Döküm sıcaklığı artışı sertlik değerlerinde artış, döküş yüksekliğinin azalması ile sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur.

KAYNAKÇA

- Al_Saadi, H. I. A., ve Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5/3, 525–532.
- Aran, A., (1991), *Metal Döküm Teknolojisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arslan, İ., Gavgalı, E., Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al₅Ti₁B ve Al₁₀Sr İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(2), 237-244.
- Asan, Y. E., Çolak, M. (2022). Modeling the Effect of Pour Height, Casting Temperature and Die Preheating Temperature on the Fluidity of Different Section Thicknesses in Permanent Mold Casting of Al₁₂Si Alloys. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 15(Special Issue I), 14-27.
- Ashley, S. (1994). Aluminum vehicle breaks new ground. *Mechanical Engineering-CIME*, 116(2), 50-52.
- Aslandoğan, R. (2009). Dökümde akıcılık ve akıcılığı etkileyen faktörlerin araştırılması. Tez (Yüksek Lisans)- Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydoğan, Y., Ertan, Ö. K. (2022). Az Alaşımlı Çelikten Üretilen Yatak Başlığının Kum Kalıba Döküm Optimizasyonu. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 20(1), 12-16.
- Campbell, J., (2003), *Castings: The New Metallurgy of Cast Metals (Second Edition)*, Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Car, E. (2011). İkincil Alüminyum Üretimine Genel Bir Bakış, *Metalurji Dergisi*, 160, 42-50.
- Car, E. (2019). İkincil Metal Üretimi ve Metalurji Mühendisliği: Değişimler-Etkileşimler, *Metalurji Dergisi*, 187, 25-37.
- Christudasjustus, J., Larimian, T., Esquivel, J., Gupta, S., Darwish, A. A., Borkar, T., & Gupta, R. K. (2022). Aluminum alloys with high elastic modulus. *Materials Letters*, 320, 132292.
- Cortina, M., Arrizubieta, J. I., Calleja, A., Ukar, E., & Alberdi, A. (2018). Case study to illustrate the potential of conformal cooling channels for hot stamping dies manufactured using hybrid process of laser metal deposition (LMD) and milling. *Metals*, 8(2), 102.
- Çakanyıldırım, Ç., Gürü, M. (2021). Alüminyum Üretim Teknolojilerindeki Gelişmeler,

- Çolak, M., Şirin, S. (2010). Solidcast Döküm Simülasyon Programıyla Kalıplama Tasarımının İşlem Basamakları. Metal Dünyası Dergisi, 202, 2-5.
- Çolak M, Kayikci R, Dispınar D. (2016). Melt Cleanliness Comparison Of Chlorine Fluxing And Ar Degassing Of Secondary Al-4Cu. Metallurgical And Materials Transactions B, 47: 2705-2709.
- Çolak, M. (2020). OPTICast yazılımı ile döküm endüstrisinde kalıplama tasarımı optimizasyonu uygulaması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(3), 545-551.
- Çolak, M., Arslan, İ. (2018). Kokil kalıp dökümde alüminyum alaşımların beslenmesi üzerinde kalıp ön ısıtma sıcaklığının etkisinin araştırılması. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 131-140.
- Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. ASM international.
- Dişpınar, D. ve Campbell, J., (2007). “Alüminyum ve Alaşımlarında Porozite Olayı ve Döküm Kalitesinin Belirlenmesi”, Metal Dünyası, 190–195.
- Dişpınar, D. ve Campbell, J., (2011). “Porosity, Hydrogen and Bifilm Content in Al Alloy Castings”, Materials Science and Engineering: A, 528(10):3860–3865.
- Dişpınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., ve Arnberg, L., (2010). “Degassing, Hydrogen and Porosity Phenomena in A356”, Materials Science and Engineering A, 527(16):3719–3725.
- Dişpınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., ve Arnberg, L., (2010). “Degassing, Hydrogen and Porosity Phenomena in A356”, Materials Science and Engineering A, 527(16):3719–3725.
- Di Sabatino, M., Arnberg, L. (2004). A review on the fluidity of Al based alloys. Metallurgical Science and Tecnology, 22(1).
- Di Sabatino, M., Arnberg, L. (2009). Castability of aluminium alloys. Transactions of The Indian Institute of Metals, 62, 321-325.
- Djurđević, M. B., Odanović, Z., & Pavlović-Krstić, J. (2010). Melt quality control at aluminum casting plants. Metallurgical & Materials Engineering, 16(1), 63-76.
- EAA–European Aluminium Association. (1994). Resistance During Spot Welding of Steel and

Aluminium.

Eskin, G I. Ultrasonic treatment of light alloy melt [M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.

Eti Alüminyum, 2023. <http://www.etialuminyum.com/> , (Erişim Tarihi: 01.12.2023).

Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Molnár, D., Tokár, M. (2019). The melt cleaning efficiency of different fluxes and their effect on the eutectic modification level of AlSi7MgCu alloy. *Livarski Vestnik*, 66(2), 70-87.

Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Tokár, M., & Mende, T. (2020, August). Effect of the sampling method on the results of melt quality assessment of aluminum alloys with computed tomography. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 903, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.

Han, Q., & Zhang, J. (2020). Fluidity of alloys under high-pressure die casting conditions: flow-choking mechanisms. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51, 1795-1804.

Hou, J. P., Li, R., Wang, Q., Yu, H. Y., Zhang, Z. J., Chen, Q. Y., ... & Zhang, Z. F. (2019). Three principles for preparing Al wire with high strength and high electrical conductivity. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(5), 742-751.

Hudson, S.W., Apelian, D. (2016). Inclusion Detection in Molten Aluminum: Current Art and New Avenues for In Situ Analysis. *Inter Metalcast* 10, 289–305
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0030-x>

Ilkhchy, A. F., Jabbari, M., & Davami, P. (2012). Effect of pressure on heat transfer coefficient at the metal/mold interface of A356 aluminum alloy. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 705-712.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.001>

Kan M., İpek, O., ve Kuru, M. (2022). Basıncılı döküm prosesinde iki farklı soğutma kanallı kalıpların döküm-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısının nümerik olarak incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 283-300.

Karakışlak, M. (1978). Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60 s.

Kharkiv, (2013). Physical and Chemical Bases Technological Processes. Retrieved from <https://cidecs.net/wp-content/uploads/2019/01/Lecture-instructions-in-Technology-of-Engineering-in-III-Parts.pdf>

Laslaz, G. ve Laty, P., (1991). “Gas Porosity and Metal Cleanliness in Aluminum Casting

- Alloys”, AFS Transactions, 99:83–90.
- Lee P, Hunt J. (2001). Hydrogen Porosity In Directionally Solidified Aluminium Copper Alloys: A Mathematical Model. *Acta Materialia*, 49: 1383-1398.
- Liu, W., Wang, S., Wang, G., Zhang, J., & Zhou, C. (2022). Investigation on the differences of surface cleaning properties of series of superhydrophobic aluminum alloys. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 651, 129614.
- Ludwig, T., Di Sabatino, M., Arnberg, L., & Dispinar, D. (2012). Influence of oxide additions on the porosity development and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings. *International Journal of Metalcasting*, 6, 41-50.
- MEVKA, (2019). Seydişehir İlçe Raporu, Mevlâna Kalkınma Ajansı, <https://www.mevka.org.tr> . Erişim Tarihi: 11.12.2023
- Mao, W., Bai, Y., & Lin, H. (2006). Effect of pouring height on the solidified microstructure of AlSi7Mg alloy. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 13(4), 324-328.
- Ni Hj, Sun B, Jiang Hy, Ding Wj. 2003. Effects Of Rotating Impeller Degassing On Microstructure And Mechanical Properties Of The A356 Scraps. *Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing*, 352: 294-299.
- Nikolić, F., Štajduhar, I., & Čanadija, M. (2023). Casting defects detection in aluminum alloys using deep learning: A classification approach. *International Journal of Metalcasting*, 17(1), 386-398.
- Niu, G., Wang, Y., Zhu, L., Ye, J., & Mao, J. (2022). Fluidity of casting Al–Si series alloys for automotive light-weighting: a systematic review. *Materials Science and Technology*, 38(13), 902-911.
- Nunes, H., Emadinia, O., Soares, R., Vieira, M. F., Reis, A. (2023). Adding Value to Secondary Aluminum Casting Alloys: A Review on Trends and Achievements. *Materials*, 16(3), 895.
- Özkan, E. (2023). Simülasyon destekli örnek bir tasarım ile döküm hatalarının engellenmesi ve maliyetlerin düşürülmesi. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 108-117.
- Reddy, B. M., & Nallusamy, T. (2021). Degassing of aluminum metals and its alloys in non-ferrous foundry. In *Advances in Materials Research: Select Proceedings of ICAMR*

2019 (pp. 637-644). Springer Singapore.

- Reza Kashyzadeh, K., Amiri, N., Maleki, E., Unal, O. (2023). A Critical Review on Improving the Fatigue Life and Corrosion Properties of Magnesium Alloys via the Technique of Adding Different Elements. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 527.
- Riyahi Malayeri, K. (2023). Vacuum degassing impact on non-metallic inclusions during clean steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 1-6.
- Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., Yüksel, Ç., (2022). Alüminyum alaşımlarının dökümünde yaygınca kullanılan sıvı metal temizleme yöntemlerinin incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1): 423-434.
- Puga, H., Barbosa, J., Tuan, N. Q., & Silva, F. (2014). Effect of ultrasonic degassing on performance of Al-based components. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(11), 3459-3464.
- Rana, R. S., Purohit, R., & Das, S. (2012). Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. *International Journal of Scientific and research publications*, 2(6), 1-7.
- 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.
- Suenger, S., Kreissle, M., Kahnert, M., & Zaeh, M. F. (2014). Influence of process temperature on hardness of friction stir welded high strength aluminum alloys for aerospace applications. *Procedia CIRP*, 24, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.141>
- Tiryakioğlu, M., Yousefian, P. & Eason, P.D. Quantification of Entrainment Damage in A356 Aluminum Alloy Castings. *Metall Mater Trans A* 49, 5815–5822 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4865-z>
- Tokatlı M., Sıvı metal kalitesinin K-mold tekniği ile tayini ve çekinti üzerine etkisi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Erzurum, 2022.
- Tokatlı M., Uslu E., Çolak M., Yüksel Ç., 2022. Investigation of Liquid Metal Cleanliness Control Methods Applied to Aluminium Alloys, *Bayburt University Journal of Science*, vol. 5, no 2, pp. 235-247
- Tunçay, T., (2019). AlSiCu (LM24) alüminyum alaşımında modifikasyon ve tane inceltmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 21-28.
- Uchida, H., Yoshida H. (1996). *Aluminum and Magnesium for Automotive Applications*, The Minerals, Metals & Materials Society.

- Uludağ, M., Çetin, R., Dişpinar, D., Tiryakioğlu, M. (2018). On the Interpretation of Melt Quality Assessment of A356 Aluminum Alloy by the Reduced Pressure Test: The Bifilm Index and Its Physical Meaning. *Inter Metalcast* 12, 853–860 <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0217-4>
- Vinod Kumar, G. S., Mukherjee, M., Garcia-Moreno, F., Banhart, J. (2013). Reduced-pressure foaming of aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44, 419-426.
- Wang, Y., Lang, L., Sherkatghanad, E., K Nielsen, B., Li, X.X., Sun, Z.Y. (2018). Rigid-flexible coupling forming process for aluminum alloy automobile body panels, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 95, 3905–3918, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1494-4>
- Wu, R., Qu, Z., Sun, B., & Shu, D. (2007). Effects of spray degassing parameters on hydrogen content and properties of commercial purity aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 456(1-2), 386-390.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum döküm alaşımlarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmelere genel bakış ve değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210.
- Yüksel, Ç., Alüminyum alaşımlarının sıvı metal kalitesinin arttırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016, İstanbul, Türkiye.

ÖZ GEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Yavuz Selim İlköğretim okulunda tamamlayarak 2010 yılında mezun olmuştur. Lise öğrenimini Bayburt Anadolu Lisesinde tamamlamıştır.

2015 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini, 2020 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2021 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2021-2022 yılları arasında özel sektörde Makine Mühendisi olarak çalışmıştır. 2022 yılında Erzincan Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'nde Makine Mühendisi olarak göreve başlamış ve halen bu görevine devam etmektedir.

