



**A356 ALAŞIMIN DÖKÜMÜNDE Fe İÇERİĞİNE
BAĞLI Mn İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Nurdan ALKAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Murat ÇOLAK

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

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

A356 ALAŞIMIN DÖKÜMÜNDE Fe İÇERİĞİNE BAĞLI Mn İLAVESİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nurdan ALKAN

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

BAYBURT- 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında, Nurdan ALKAN tarafından hazırlanan “A356 Alaşımın Dökümünde Fe İçeriğine Bağlı Mn İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 22.01.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Engin ERBAYRAK

Üye : Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN

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

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında hazırlamış olduğum “A356 Alaşımın Dökümünde Fe İçeriğine Bağlı Mn İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

22.01.2025

Nurdan ALKAN



ÖN SÖZ

Bilgi ve emekleriyle yön gösterip, yüreğiyle her zaman yanımda olan lisans ve yüksek lisans döneminde ve tez hazırlık sürecinde benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, meslek sevgisi ve sabrıyla bana örnek olan tez danışmanım Murat ÇOLAK’a,

Bütün hayatım boyunca sevgisini ve ilgisini benden asla esirgemeyip aldığım tüm kararlarda yanımda olan, anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nurdan ALKAN



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

A356 ALAŞIMIN DÖKÜMÜNDE Fe İÇERİĞİNE BAĞLI Mn İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Nurdan ALKAN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2025, Sayfa: 58

Alüminyum döküm alaşımları, yüksek mukavemet, yüksek korozyon dayanımı, yüksek termal iletkenlik ve düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı başta otomotiv olmak üzere birçok endüstriyel alanlarda yaygınca kullanılmaktadır. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte alüminyum dökümlerinin kalitesinin artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarının dökümünde ikincil alüminyum kullanımı; çevre, maliyet ve hammadde kaynaklarının azalmasına bağlı olarak gerekli bir süreçtir. Ancak hurda kullanımında özellikle Fe içeriğine bağlı olarak çeşitli kırılma fazlar ortaya çıkması ve mekanik özelliklerde olumsuz etkileri bilinmektedir. Alüminyum döküm alaşımlarında mekanik özellikleri (çekme mukavemeti, uzama, yorulma ömrü vb.) iyileştirebilmek için alaşımda bulunan gözeneklilik ve yapısal kusurların sayısının en aza indirilmesi gerekmektedir. Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini etkileyen ez zararlı elementlerden biri Fe elementidir. Alaşım içinde bulunan Fe elementi alaşımdaki diğer elementler ile bağlanarak intermetalikler oluşturmaktadır. Oluşan bu intermetalik bileşiklerin mekanik özellikler, gözeneklilik, dökülebilirlik, korozyon direnci ve yüzey işlemlerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda Fe elementinin zararlı etkilerinin giderilmesi ve alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılması ve üretimde yeni teknoloji kullanımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada farklı Fe içeriklerine sahip A356 hurda alaşımının içerisinde değişen oranlara Mn ilavesi yapılarak döküm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylece alaşımda Fe ve Mn etkileri kapsamlı deneyler ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda sıvı metal temizleme yönteminin hurdadan kaynaklı etkiyi nasıl ve hangi oranda ortadan kaldırdığı belirlenerek akıcılık, mekanik özellikler ve mikroyapı özellikleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: A356 alaşımı, akıcılık, mekanik özellikler, Fe içeriği, Mn ilavesi.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Mn ADDITION DEPENDING ON THE Fe CONTENT IN CASTING OF A356 ALLOY

Nurdan ALKAN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ÇOLAK

Bayburt-2025, Pages: 58

Aluminum casting alloys are widely used in many industrial areas, especially in the automotive industry, due to their superior properties such as high strength, high corrosion resistance, high thermal conductivity and low density. However, with the developing technology, there is a need to increase the quality of aluminum castings. In addition, the use of secondary aluminum in the casting of aluminum alloys is a necessary process due to the environment, cost and the decrease in raw material resources. However, it is known that various brittle phases occur in the use of scrap, especially depending on the Fe content, and have negative effects on mechanical properties. In order to improve the mechanical properties (tensile strength, elongation, fatigue life, etc.) in aluminum casting alloys, the number of porosity and structural defects in the alloy must be minimized. One of the most harmful elements affecting the mechanical properties of aluminum casting alloys is the Fe element. The Fe element in the alloy binds with other elements in the alloy and forms intermetallics. It is known that these intermetallic compounds have negative effects on mechanical properties, porosity, castability, corrosion resistance and surface treatments. In this context, studies are ongoing on eliminating the harmful effects of the Fe element and making castings with different alloy element additions depending on the increase in quality expectations from the alloys and using new technologies in production. In this study, casting experiments were carried out by adding Mn to varying ratios in the A356 scrap alloy with different Fe contents. Thus, the effects of Fe and Mn in the alloy were evaluated with comprehensive experiments. In this context, it was determined how and to what extent the liquid metal cleaning method eliminated the effect originating from scrap and the fluidity, mechanical properties and microstructure properties were evaluated.

Keywords: A356 alloy, fluidity, mechanical properties, Fe content, Mn addition.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER	VII
TABLOLAR	IX
ŞEKİLLER	X
KISALTMALAR	XII
SİMGELER	XII
GİRİŞ	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Terim ve Tanımları	2
BİRİNCİ BÖLÜM	3
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	3
1.1. ALÜMİNYUM.....	3
1.1.1. Alüminyum Üretimi.....	4
1.1.1.1. Birincil alüminyum üretimi	5
1.1.1.2. İkincil alüminyum üretimi	6
1.2. ALÜMİNYUMUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	7
1.3. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI	7
1.3.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkileri.....	8
1.3.2. Alüminyum Alaşımlarında Demir Elementinin Etkisi	11
İKİNCİ BÖLÜM	17
2. YÖNTEM	17
2.1. DENEY TASARIMI.....	17
2.2. DÖKÜM İÇİN ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI.....	18
2.3. DÖKÜM İÇİN KALIPLARIN HAZIRLANMASI	19
2.4. ERGİTME VE DÖKÜM İŞLEMLERİ	19
2.5. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ.....	22
2.5.1. Kimyasal Bileşim Analizi.....	23
2.5.2. RPT Kalıbı Numunelerinin İncelenmesi	23
2.5.3. K-mold Numunelerinin İncelenmesi	26
2.5.4. 8 Kanallı Akıcılık Kalıbı Numunelerinde Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Tespiti.....	27
2.5.5. Mekanik Test Kalıbı Numunelerinin İncelenmesi.....	28
2.5.6. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi	30
2.5.7. Mikroyapı İncelemeleri	30
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	32
3. BULGULAR	32
3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ	32

3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ	32
3.3. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI.....	39
3.4. MEKANİK TESTİ SONUÇLARI.....	42
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI.....	44
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKÇA.....	52
ÖZ GEÇMİŞ	58



TABLÖLAR

Tablo 1: Döküm Deneyleri Fe ve Mn Oranları	18
Tablo 2: Deneylerde Kullanılan Alaşımlara Ait Kimyasal Bileşim (% Ağ.)	18
Tablo 3: Döküm Deneylerine Ait Kimyasal Analiz Sonuçları (% Ağ.)	32
Tablo 4: Deney Numunelerine Ait Ortalama K Değeri.....	38
Tablo 5: 8 Kanallı Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafelerine Ait Ortalama Sonuçlar.....	41
Tablo 6: Mekanik Test Kalıbı Çekme Çubuğu Test Sonucu.....	42



ŞEKİLLER

Şekil 1: Alüminyum Kullanım Alanları	4
Şekil 2: Alüminyum Üretimi	5
Şekil 3: Alüminyum Hurda Görüntüleri	7
Şekil 4: Kritik Demir ile Birincil Al Katılaşmasını Gösteren Üçlü Al-Si-Fe Faz Diyagramı	12
Şekil 5: Al-%5si-%1cu-%0.5mg-(Fe) Alaşımlarının Mikroyapı Resimleri	13
Şekil 6: A) Birbirine Bağlı B-Al ₅ fesi Trombositleri ve B) Yazı Benzeri A-Al ₁₅ (Fe, Mn) ₃ Si ₂ Fazlarının 3 Boyutlu Rekonstrüksiyonları	13
Şekil 7: Alüminyum İçinde Oluşan İnklüzyon Görselleri.....	15
Şekil 8: Deneysel Çalışmalar İşlem Basamakları	17
Şekil 9: Döküme Hazır Kalıpların Görüntüsü.....	19
Şekil 10: Elektrik Direnç Ocağı ve Sic Pota	20
Şekil 11: Mn İlavesi ve Sıcaklık Ölçümü Görselleri	20
Şekil 12: Sıvı Metal Temizleme Elemanları Ve Şematik Görsel.....	21
Şekil 13: Döküm Esnasından ve Döküm Sonrası Numunelere Ait Örnek Bir Görüntüsü	22
Şekil 14: Numunelerinin Kimyasal Bileşiminin Belirlendiği Spektrometre Cihazı	23
Şekil 15: RPT Test Cihazı Ve Test Kalıbı	24
Şekil 16: Arşimet Prensibi Yoğunluk Ölçüm Düzenegi	24
Şekil 17: İmaj Yazılım Renk Eşleştirme Görüntüsü.....	25
Şekil 18: K-Mold Test Kalıbı Numune Katı Model Görüntüsü ve Numune Ölçüleri.....	26
Şekil 19: 8 Kanallı Akıcılık Kalıbı Ölçüleri ve Kalıp Görüntüsü.....	27
Şekil 20: Akıcılık Kalıbı Ölçüm Örneği	28
Şekil 21: Mekanik Test Numunesi.....	29
Şekil 22: Çekme Testi Örnek Fotoğraf Görüntüsü	29
Şekil 23: Spiral Akıcılık Kalıbı Görseli ve Numune Ölçüleri	30
Şekil 24: Zımparalama Parlatma Cihazı, Optik Mikroskopta Mikroyapı Görüntüsü	31
Şekil 25: %0,1 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri	33
Şekil 26: %0,15 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri	34
Şekil 27: %0,2 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri	34
Şekil 28: RPT Numunelerine Ait Ortalama Yoğunluk İndeksi Değerleri	35
Şekil 29: RPT Numuneleri Kesit Yüzey Görüntüleri	36
Şekil 30: RPT Numuneleri Ortalama Bifilm İndeksi Grafiği	36
Şekil 31: K-Mold Örnek Numunesine Ait Üst Ve Yan Görüntüsü	37
Şekil 32: K-Mold Numunelerine Ait Kırık Yüzey Örnek Görüntüleri	38
Şekil 33: Spiral Akıcılık Örnek Numune Resimleri	40
Şekil 34: 8 Kanallı Akıcılık Örnek Numune Resimleri	40
Şekil 35: Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafelerine Ait Ortalama Grafiği	41
Şekil 36: Yapılan Deneylerden Elde Edilen Ortalama Çekme Test Sonuçları	43
Şekil 37: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Numune Mikroyapı.....	45
Şekil 38: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Deneyin Numune Mikroyapı.....	46
Şekil 39: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	46
Şekil 40: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	47
Şekil 41: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	47
Şekil 42: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	48

Şekil 43: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	48
Şekil 44: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Mikroyapı	49
Şekil 45: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı	49



KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
SEM	: Taramalı Eltron Mikroskobu
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
O	: Oksijen
Si	: Silisyum
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Mg	: Magnezyum
Ti	: Titanyum
Sr	: Stronsiyum
Ni	: Nikel
S	: Kükürt
RPT	: Reduced Pressure Test – Vakum Altında Katılaştırma
OES	: Optik Emisyon Spektrometre
TBMMO	: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği

SİMGELER

lt	: Litre
kg	: Kilogram
ml	: Mililitre
dk	: Dakika
cm³	: Santimetreküp
K	: Kelvin
pm	: Pikometre
J	: Joule
°C	: Santigrat
kW	: Kilowatt
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre

GİRİŞ

Alüminyum (Al) metalik özelliklere sahiptir ve “doğada en çok bulunan metal” ünvanını taşır. Endüstriyel alanda ise 50 yıldır çelikten sonra en çok kullanılan metaldir. II. Dünya Savaşı ve Sanayi Devrimi sonrasında artan enerji ihtiyacı, daha hafif ve dayanıklı parçalar, kolay üretim ve geri dönüşüm, alüminyum endüstriyel uygulamalarda ön plana çıkarmıştır (Eroğlu & Şahiner, 2018).

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum alaşımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri, içerdikleri alaşım elementinin çeşidine ve oranına bağlıdır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında A356 alaşımına farklı oranlarda demir (Fe) ve mangan (Mn) ilave edilerek bu alaşımların döküm özellikleri incelenmiştir. Deneyler, sıvı metal temizliği üzerindeki etkisini belirlemek için K-mold kalıbı ve RPT numuneleri kalıbı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akıcılık etkisini değerlendirmek amacıyla farklı kesit kalınlıkları olan 8 kanallı ve spiral akıcılık kalıbına dökümler yapılarak incelenmiştir. Akıcılık deney numunelerinden oluşturulan mikroyapı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca, mekanik özellikler incelenmiştir.

Araştırmanın Amacı

Alüminyum döküm alaşımları, yüksek mukavemet, yüksek korozyon dayanımı, yüksek termal iletkenlik ve düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı başta otomotiv olmak üzere birçok endüstriyel alanda yaygınca kullanılmaktadır. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte alüminyum dökümlerinin kalitesinin artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Alüminyum döküm alaşımlarında, mekanik özellikleri (çekme mukavemeti, uzama, yorulma ömrü vb.) iyileştirebilmek için alaşımda bulunan gözeneklilik ve yapısal kusurların sayısının en aza indirilmesi gerekmektedir. Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini etkileyen en zararlı elementlerden biri Fe elementidir. Alaşım içinde bulunan Fe elementi alaşımdaki diğer elementler ile bağlanarak intermetalikler oluşturmaktadır. Oluşan bu intermetalik bileşiklerin mekanik özellikleri gözeneklilik, dökülebilirlik, korozyon direnci ve yüzey işlemlerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda, Fe elementinin zararlı etkilerinin giderilmesi ve alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılması ve üretimde yeni teknoloji kullanımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada farklı Fe içeriklerine sahip A356 hurda alaşımının içerisine değişen oranlarda Mn ilavesi yapılarak döküm deneyleri gerçekleştirilecektir. Böylece alaşımda Fe ve Mn etkileri ve ilişkileri irdelenecektir. Bu kapsamda sıvı metal temizleme yönteminin

hurdadan kaynaklı etkiyi nasıl ve hangi oranda ortadan kaldırdığı incelenecektir. Çalışmada sıvı metal temizleme kalitesi belirlenerek mekanik özellikler ve mikroyapı özellikleri değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Alüminyum alaşımlarının dökümünde ikincil alüminyum kullanımı, çevre, maliyet ve hammadde kaynaklarının azalmasına bağlı olarak gerekli bir süreçtir. Ancak, hurda kullanımında özellikle Fe içeriğine bağlı olarak çeşitli kırılma fazlar ortaya çıkmasına sebep olup mekanik özelliklerde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Çalışmada, Fe kırılma fazlarının Mn ilavesi ile daha az zararlı Fe fazlarına dönüştürülmesi ve Mn ile ilişkilerinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Böylece, hurda alüminyum kullanımının daha ulaşılabilir olması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada hurda ile yapılan ergitmelere uygulanan işlemlerin, ne oranda sıvı sıvı metal içerisindeki olumsuz etkilerinin ne oranda olduğu tespit edilecektir. Böylece, çalışma sonunda olumsuz özellikleri minimize edilmiş şekilde hurda kullanımı ve etkileri belirlenecektir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Literatürde, farklı Fe oranlarına sahip A356 alaşımlarına yapılan ve farklı oranlarda Mn ilavesinin etkisini inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Terim ve Tanımları

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

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

Alüminyum: Atom numarası 13 olan gümüş renginde sünek bir metaldir.

Mekanik Özellik: Malzemenin, zorlamalara karşı gösterdiği dayanıklılık özellikleridir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ALÜMİNYUM

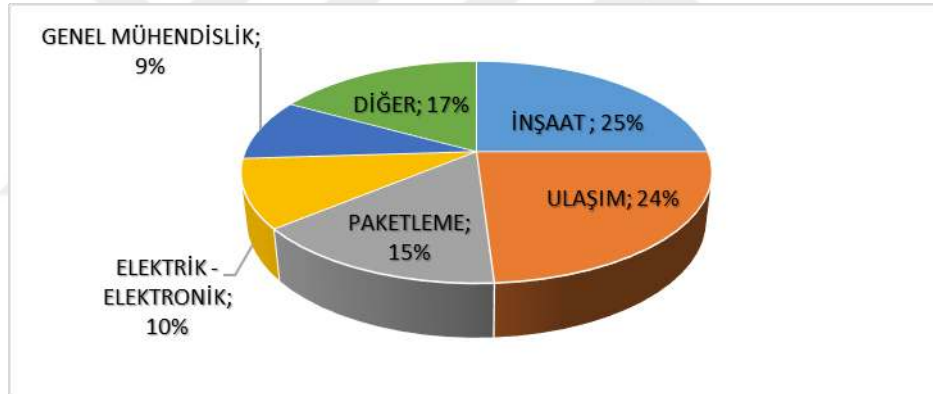
Alüminyum (Al), en çok bulunan üç elementten (oksijen (O), silisyum (Si) ve alüminyum) biridir ve yer kabuğu ağırlığının %8'ini oluşturur. Tektonik katman olarak da bilinen litosfer, Dünya'nın en dış katmanıdır. Kabuk katmanı iki bölümden oluşur, bunlar SIAL ve SIMA katmanlarıdır. SIAL katmanı, adını yerkabuğunda en çok bulunan elementler olan Si ve Al'den; SIMA katmanı ise adını Si ve Mg'dan almıştır (TMMOB, 2010). Alüminyum en çok bulunan elementlerden biri olmasına rağmen, bileşik oluşturma eğilimi yüksektir. Bu nedenle, aşırı indirgeyici ortamlarla sınırlı olan ve bileşik oluşturmaya yatkın bir metaldir. Bu durum, saf alüminyum örneklerinin tespitini çok zorlaştırmış ve keşfini geciktirmiştir (Shakhashiri, 2000).

Alüminyum ilk olarak 1807 yılında Humphry Davy'nin demir alaşımları üzerine yaptığı araştırmalar sırasında, alüminyumun demir alaşımlarının içindeki bir bileşik halinde bulunmasıyla keşfedilmiştir. Saf alüminyumun üretilmesi, ilk olarak 1825 yılında Hans Christian Orsted'in alüminyum klorürü indirgemek için potasyum amalgamı kullanması ve 1827'de Friedrich Wöhler'in, Hans Christian Orsted'in çalışmasına benzer bir yöntem ile susuz alüminyum klorürü saf potasyum kullanılarak gri alüminyum tozuna indirgenmesiyle gerçekleştirmiştir. Alüminyumun eldesinin ilerleyişi incelendiğinde, 1852 yılında Robert Bunsen yaptığı çalışmalarda Humphry Davy'nin yöntemini geliştirip metalik alüminyum elde etmiştir. 1854 yılında Henri-Étienne Sainte-Claire Deville, yeni ve teknik olarak uygulanabilir bir kimyasal süreç keşfetmiştir. Henri-Étienne Sainte-Claire Deville bu yöntemi keşfetmesiyle büyük ilgi görmüştür ve yarattığı alüminyumun parlak ve gümüş rengindeki görünümü birçok mücevherde kullanılmasına yol açmıştır. 1886 yılında Oberlin Koleji öğrencisi Charles Hall ve Fransız mühendis Paul Ruhl, alüminyum üretiminde kullanılan birincil alüminyum üretmek için ucuz bir ergimiş tuz elektrolizini, farkında olmadan benzer temel prensiplere dayanarak aynı dönemde geliştirmişlerdir. Bugün hala kullanımda olan Hall-Heroux işlemi, iki bilim adamı tarafından eş zamanlı olarak geliştirilen bir erimiş tuz elektroliz işlemidir. 1887'de Avusturyalı mühendis Karl Joseph Beyer, boksit mineralinden alüminyum oksit üretmek için kimyasal bir süreç geliştirdi. Boksit minerallerinden alüminyum oksit (Al_2O_3) elde etmek için Bayer prosesi kullanılır, ardından saf alüminyum üretmek için Hall-Heroux prosesi uygulanır. Keşfettiği yöntemi kullanarak 1890 yılına kadar 200 tonun üzerinde alüminyum üretti, ancak bu yöntemi kullanarak üretmek hala pahalıydı. Sanayi Devrimi ve teknolojinin hızla

gelişmesinin ardından Werner von Siemens, elektrik alanındaki araştırmaları kapsamında 1866 yılında dinamoyu keşfetti. Jeneratörün keşfi büyük ölçekte elektrik üretmeyi mümkün kıldı. Elektrik üretiminin artması birçok endüstride alüminyum metali üretmenin maliyetini düşürdü ve seri üretimin temelini attı (Totten vd., 2018). Almanya, Adolf Hitler'in önderliğinde alüminyum üretiminde dünya lideri olurken, Amerika Birleşik Devletleri'nde yeni hidroelektrik proje ile 1942'de alüminyum üretiminde bir numara olmuştur (Matweb, 2021; Binczewski, 1995; Demirci, 2012).

Döküm alüminyum alaşımı birçok avantajlı özelliği sayesinde başta otomotiv sektörü olmak üzere pek çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Birol vd., 2006). Üretilen parçaların ağırlığının azaltılması ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji verimliliği, alüminyum alaşımlarına diğer rakip ürünlere göre avantaj sağlamıştır. Alüminyum, endüstriyel yolculuğuna 1889 yılında mutfak eşyalarıyla başlamıştır. 2000'li yıllarda otomotiv sektör parçaları imalatında yaygınca kullanılmaya başlanmıştır (Campbell vd., 2002).

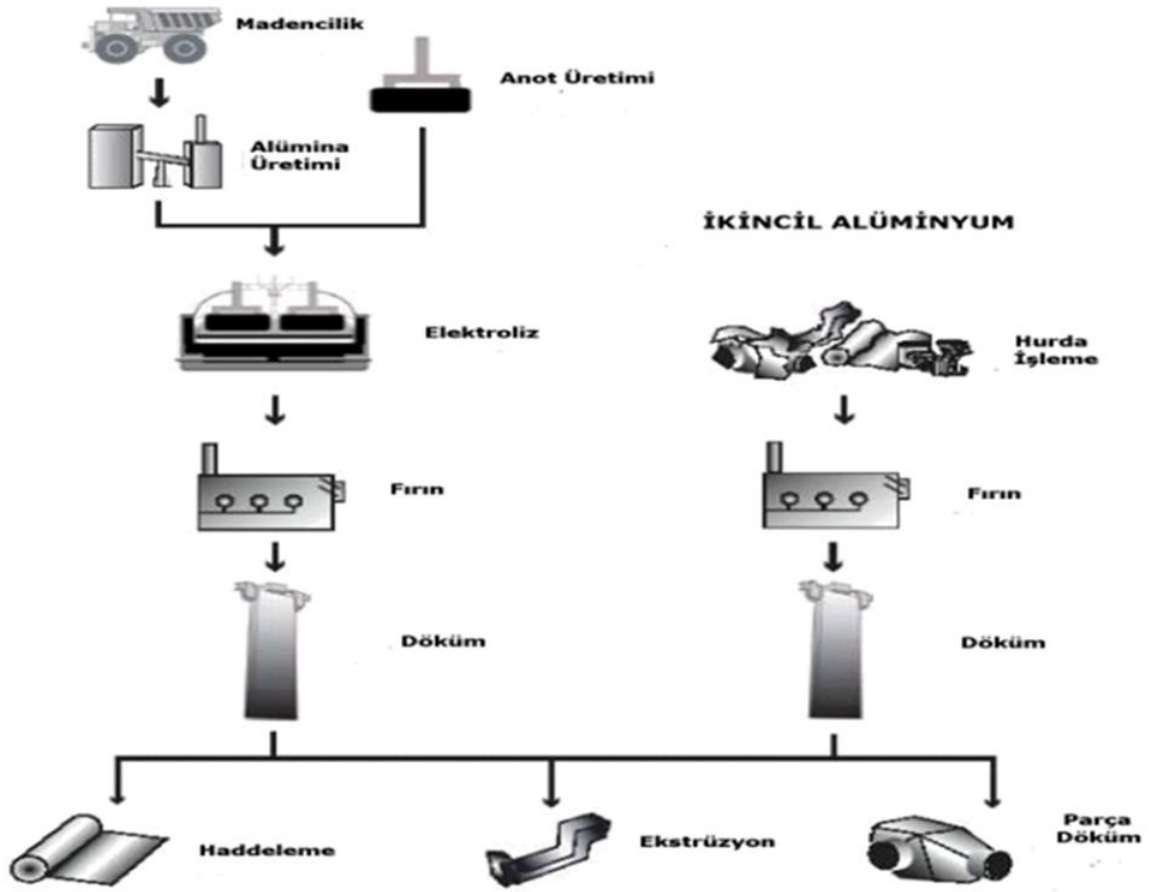
Alüminyum kullanımının en çok inşaat ve ulaşım alanlarında olduğu belirlenmiştir. Alüminyumun kullanım alanlarının dağılımı Şekil 1'de görülmektedir (Car, 2019).



Şekil 1: Alüminyum Kullanım Alanları (Car, 2019)

1.1.1. Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretimi için iki farklı yol vardır. Birincisi, doğada alüminyum boksit cevheri, gibsit, boehmit ve diasporit minerallerini içeren bir cevher olarak bulunur. Birincil üretimde, bu cevherlerden alüminyum eldesi etme yöntemidir. İkincil üretimde ise alüminyum kullanım ömrü dolmuş veya atık hale gelmiş hurdaları geri dönüştüren bir yöntemdir. Birincil üretime göre ikincil üretimde enerji kullanımından oldukça tasarruf edilebilmektedir. Bu nedenle ikincil üretim daha çok talep gören bir yöntemdir. Şekil 2'de alüminyum üretim şeması gösterilmiştir (Car, 2019).



Şekil 2: Alüminyum Üretimi (Car, 2011)

1.1.1.1. Birincil alüminyum üretimi

Birincil alüminyum üretim süreci denilince ilk olarak boksit cevherinden metalik alüminyumun çıkarılması işlemi akla gelmektedir. Bu süreç dört temel adımdan oluşur;

- Boksit madeninden boksit cevheri üretimi,
- Bayer Prosesi,
- Alüminadan elektroliz yöntemi ile sıvı alüminyum üretimi,
- Döküm ürününün nihai ürüne dönüştürülmesi (Car, 2011; Car, 2019).

Bu parçaların sonunda elde edilen sıvı alüminyum, külçe haline getirilir ve daha sonra ekstrüzyon ile haddelme yapılarak yarı mamul ve üretilmiş parçalara dönüştürülür. Bu üretim aşamalarının her biri, alüminyum sanayisinde ayrı bir sektör oluşturur. Dünyada, bu parçaların tamamını barındıran tesislerin sayısı oldukça azdır. Bu kapasitedeki tek entegre tesis, Seydişehir Eti Alüminyum Tesisleri'dir. Türkiye'de yaygın olarak Bayer yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde, önce sodyum hidroksit çözeltisinin ayrıştırılmasıyla alüminyum hidroksit elde edilir, ardından kalsinasyon işlemi ile alüminyum oksit (Al_2O_3) üretilir.

Metalik alüminyum üretimi için temel mineral boksit cevheridir. Bir ton alüminyum metal üretmek için iki ton alümina gerekirken, iki ton alümina üretmek için dört ton boksit cevheri gerekmektedir. Boksit cevheri, tipik olarak dünya yüzeyinin 0 ile 2 m altında bulunan bir mineraldir ve boehmit, gibbsite ile birlikte diğer elementleri Fe, silisyum (Si) ve titanyum (Ti) içerir (Car, 2011; Car, 2019).

Bayer prosesi, boksit cevherinden susuz alüminyum oksit veya alümina üretmeye yönelik bir yöntemdir. Bayer işlemi, çözelti, çöktürme ve ısıtma işlemi olmak üzere üç farklı adımdan oluşur. Analiz sürecinde boksit cevheri, alüminyum oksiti sodyum alüminaya dönüştürmek için kostik soda çözeltisi ile reaksiyona sokulur. Bu işlem sayesinde, çözeltideki çözünmeyen madde, kırmızı çamur adı verilen bir çözelti kalıntısı olarak filtrasyon yoluyla çözeltiden uzaklaştırılır. Çöktürme işlemi şu şekilde yapılır: Çözelti yöntemiyle elde edilen sodyum alümina, kostik çözeltisinde çökeltilir. Yıkama ve kurutmanın ardından alüminyum hidroksit ve kostik çözeltisine ayrışır. Alüminyum hidroksit, son aşama olan pişirme aşamasına girdiğinde, aşındırma çözeltisi yeniden kullanılarak eritme aşamasına geri dönülür (Hernandez & Ramírez, 2017).

1.1.1.2. İkincil alüminyum üretimi

Günlük hayatımızda korozyona dayanıklılık, yüksek mukavemet, iletkenlik gibi özellikleri artık karşılayamayan ve kullanım ömrü tamamlanmış alüminyum parçalar, alüminyumun geri dönüştürülebilirliği sayesinde geri dönüştürülerek yeniden kullanılmaktadır. Alüminyumun ikincil üretimi (geri kazanımı) için gereken enerji miktarı, birincil üretim sırasında kullanılan enerjinin %5'i kadardır, dolayısıyla alüminyum üretimi sırasında atmosfere salınan gaz miktarı, alüminyumun birincil üretim miktarının %5'i kadardır. Enerji gereksinimi düşük olduğundan çevre dostu bir metaldir (Car, 2011). Alüminyum, farklı işlemler ve farklı hammaddeler kullanılarak geri kazandırılır. Şekil 3'te kullanım ömrünü tamamlamış alüminyum hurda görüntüleri verilmiştir. Alüminyum hurdalar, öncelikle kalitelerine ve yapılan işlemin türüne göre toplanır ve sınıflandırılır. Daha sonra tekrar eritilerek, kullanım şartlarına göre külçe halinde yeniden dökülmektedir.





Şekil 3: Alüminyum Hurda Görüntüleri (Car, 2011)

Alüminyumun geleceğine yönelik en büyük tehdit alüminyum hurdasıdır. 1980’den bu yana, ikincil alüminyum sektörünün büyüme hızı, birincil alüminyumun büyüme hızını aşmıştır. Son 20 yılda, birincil alüminyum üretimindeki büyüme %2,5 civarında olurken, ikincil sanayide bu rakam %5’tir (Car, 2011).

1.2. ALÜMİNYUMUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Alüminyumun elastisite modülü, çeliğin elastisite modülünün üçte biri kadardır. Bu özellik, tasarım hesaplamalarında büyük titreşim yükleri için önemli fayda sağlamaktadır. Çelikle karşılaştırıldığında, büyük titreşim yüklerinde bile üstün sönümleme sağlar. Alüminyumun en önemli özellikleri şekil alabilmesi ve kolay işlenebiliyor olmasıdır. Saf alüminyum yumuşaktır ve filmaşın haline getirilmesi kolaydır. Dolayısıyla kalıplama, çekme, presleme ve bükme gibi bilinen yöntemler kullanılarak kolaylıkla şekillendirilebilir. Alüminyumun mukavemeti oldukça yüksektir. Dinamik güç, statik gücün 0,4 ila 0,45 katıdır. Soğuk şekillendirilmiş alüminyum parçaların kaynağında geçiş alanının mukavemeti azalır. Ancak, alüminyum tavlama gibi ısı işlemleriyle gücünü yeniden kazanır (Al-saadı & Tunay, 2017).

1.3. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI

Dökme alüminyum alaşımları kum döküm, yerçekimi döküm, hassas döküm, basınçlı döküm (alçak basınç ve yüksek basınç) ve diğer döküm yöntemleriyle dökülebilen yüksek dökülebilirliğe sahip alaşımlardır (Kaufman & Rooy, 2004). Dökülebilirlik, bir metalin hatasız dökülebilme ve nihai dökümde istenen özellikleri yeniden üretebilme yeteneğidir (ASM HandBook, 1986). Dökülebilirliği etkileyen en önemli faktörlerden biri akışkanlıktır. Akışkanlık, erimiş metalin katılaşmadan önce kat edebileceği maksimum mesafe olarak tanımlanır (Sabatino & Arnberg, 2013). Alüminyumun akışkanlığı, kirlenmenin artmasıyla

azalır. Alüminyumun saflığı azaldıkça akışkanlığının azaldığı bilinmektedir. ± 6 saf alüminyumun akışkanlığı ± 8 saf alüminyumun akışkanlığının yalnızca %70'dir (Timelli & Bonollo, 2007).

1.3.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkileri

Alüminyum alaşımları birçok alanda kullanılmaktadır ve yüksek kaliteli ürünler üretmenin anahtar faktörü, erimiş metalin kalitesi ve alaşımda bulunabilecek istenmeyen elementlerin uzaklaştırılmasıdır (Han vd., 2020) Bu elementler Fe, çinko (Zn), bakır (Cu), magnezyum (Mg) ve mangan (Mn) gibi elementlerdir. Erimiş metalin kalitesi, alaşımın genel performansını ve özelliklerini belirleyen en temel faktörlerden biridir (Ashtari vd., 2005). Bu diğer elementlerin ilavesi safsızlık kavramının ortaya çıkmasına sebep olur. Çünkü alüminyum, doğada genellikle alüminyum oksit minerali olarak bulunur ve bu madde saflaştırılarak alüminyum metal elde edilir. Ancak saflaştırma işlemi sırasında bazen diğer metallerin veya bileşiklerin alüminyumla karışması mümkündür. Bu karışımlar, alüminyumun saflığını etkiler ve istenmeyen özelliklere veya zayıf mekanik değerlere neden olabilir (Rathinasuriyan vd., 2022).

Bakır (Cu): Alüminyum alaşımına eklenen bakır %12 oranına kadar mukavemeti artırır ancak, bu yüzdenin üzerinde alüminyum-bakır alaşımı kırılganlaşmaya başlar. Ortak özelliklerinden biri yüksek sıcaklıklarda işlenebilmesidir. Mn ilave edildiğinde çekme mukavemeti yükselir. Yüksek dayanımlı konstrüksiyonlarda, makine elemanları, taşıt araçları, aktarma parçaları ve vagonlarının üretimi tercih edilir. Sertleşmiş durumda mukavemeti St. 52 çeliğinin mukavemetine erişilmektedir. Ni ilave edildiğinde ise, ısıtılma işlem sonucunda oda sıcaklığında sertleşmektedir. Sıcakta mukavemetini kaybetmez. Patlamalı motorların silindir kafaları ve pistonların imalatında kullanılmaktadır.

Silisyum (Si): Alüminyuma %20 oranına kadar eklenebilmektedir. Az miktarda Mg ilave edilen Al-Si alaşımları ısıtılma işlemi tabi tutulabilir. Bu alaşımların çekme mukavemeti çok yüksek olmayıp 13,6 ile 15,4 kg/mm² arasında değişmektedir. Yüksek ısı iletkenliği, elektrik iletkenliği, korozyon direnci ve genleşme düşük olacaktır. Bu alaşımlar korozyona dayanıklıdır ancak işlenmesi çok zordur. Dökme alaşımlara %12 Si eklenmesi, alaşımın akışkanlığını ve yüksek sıcaklık direncini artırır.

Çinko (Zn): Çinko, bazı alaşımlarda istenmeyen bir element olarak ortaya çıkar. Alaşımdaki çinko içeriğinin artırılması alaşımın akışkanlığını artırır ancak yüksek sıcaklık direncini azaltır. Soğuma sırasında büyük çekilmeler ve sıcak çatlama meydana gelir. İyi sonuçlar için dökümün hızlı bir şekilde soğutulması gerekir. Çinko ve diğer alaşım elementlerinin kullanımı, mukavemeti ve haddeleme kabiliyetini önemli ölçüde artırır.

Özellikle alaşımlara magnezyum eklenmesi çekme mukavemetini, darbe mukavemetini ve haddeleme kabiliyetini artırır. Mg eklenmiş hali ile bütün alüminyum alaşımlarından daha yüksek bir mukavemete sahiptir. Bundan dolayı en çok uçak sanayisinde kullanılmaktadır.

Titanyum (Ti): Alüminyum alaşımlarının dökümünde titanyum elementinin etkileri, özellikle mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde önemli değişiklikler yaratmaktadır (Zhao vd., 2010; Liu, 2011). Çalışmalar, %0,2'ye kadar ağırlık konsantrasyonlarında titanyum eklenmesinin, çekme mukavemeti ve sertlik gibi alaşımın mekanik özelliklerini iyileştiren rafine bir mikro yapıya yol açabileceğini göstermiştir. Titanyum ilavesi ile yapıda hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi gözlenmektedir. Alüminyum tanelerinde inceltilmiş yapının küçük, düzenli ve eşeksiz biçime dönüşmesi sayesinde mekanik özellikler daha izotropik, alaşım daha mukavemetli olur. Bu durum döküm kusurlarını ortadan kaldırmaya ve malzemenin genel bütünlüğünü artırmaya yardımcı olur (Liu & Kuhn, 2011). Tane inceltme işlemi gözenek miktarı ve boyutunu azaltmakta, böylece alaşımın besleme kabiliyetini artırdığı bilinmektedir (Sighworth, 2007). Tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada; Etial160 alüminyum döküm alaşımı ile yapılan kum dökümlerinde besleme etkinliğinin tane boyutunun küçülmesi ile arttığını ve buna bağlı olarak makro porozite oluşumunun azaldığını göstermiştir. İyi derecede tane inceltilmiş bir dökümde dendrit blokajı sınırını belirleyen kritik katı oranı %50 iken bu oran tane inceltilmemiş bir dökümde %35 olarak ölçülmüştür (Kayıkcı & Çolak, 2009)

Araştırmalar, titanyumun agresif ortamlarda alüminyum alaşımlarının korozyon direncini artırabileceğini göstermektedir; bu, malzemelerin zorlu koşullara maruz kaldığı havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki uygulamalar için özellikle faydalıdır (Yang, 2023). Ayrıca, titanyumun alüminyumla kararlı intermetalik bileşikler oluşturma yeteneği, termal kararlılığın ve yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı direncin iyileştirilmesine katkıda bulunabilir (Feng vd., 2021). Ayrıca, titanyumun varlığı, alüminyum alaşımının döküm sürecinde daha homojen bir mikro yapı elde edilmesine yardımcı olur, bu da mekanik özelliklerin iyileşmesine katkıda bulunur (Zhao vd., 2010). Döküm sürecinde titanyumun kullanımı, ayrıca alaşımın işlenebilirliğini ve dayanıklılığını artırarak, endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı sağlar (Sun & Apelian, 2011). Titanyumun varlığının alüminyum eriyiklerinin ıslanabilirliğini iyileştirdiği, diğer alaşım elementlerinin ve takviye parçacıklarının daha iyi ilave edilmesini kolaylaştırdığı ve böylece döküm alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini daha da geliştirdiği bildirilmiştir (Mohammadpour vd., 2014). Titanyum eklenmesi, ZL108 alaşımının aşınma direncini artırmakta ve bu durum, titanyumun alaşımın mikro yapısındaki etkileriyle ilişkilidir (Liu vd., 2011). Titanyum ve alüminyum alaşımlarının

bir arada kullanılması, bu malzemelerin birleşiminden elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerini de geliştirmektedir (Chen, 2011).

Bor (B): Bor, alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanıldığında, alaşımın mekanik özelliklerini artırmakta ve döküm kalitesini iyileştirmektedir. Bor ilavesi, döküm işlemi sırasında oluşan soğuma hızını etkileyerek, daha ince ve homojen bir mikro yapı elde edilmesine olanak tanımaktadır (Arslan vd., 2019; Yunak, 2023). Dahası, borun alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, katılaşma sürecindeki rolü aracılığıyla daha iyi anlaşılabilir. Borun eklenmesi, alaşımın mekanik özelliklerini belirlemede kritik öneme sahip olan intermetalik bileşiklerin oluşumunu etkileyebilir. Örneğin, bor oksitlerinin alüminyumla reaksiyonu, alaşımın yaşlanma işlemini ve mekanik performansını önemli ölçüde etkileyebilen AlB₂ ve AlB₁₂ gibi bileşiklerin oluşumuna yol açabilir (Khatami, 2011). Borun eklenmesinin, alüminyum dökümlerde mekanik bütünlüğü ciddi şekilde etkileyebilen yaygın bir kusur olan katılaşma sırasında gözenek oluşumunu azalttığı gösterilmiştir (Kuo, 2011). Bor, aynı zamanda alaşımın korozyon direncini artırmakta ve döküm sırasında oluşabilecek oksidasyon ve diğer safsızlıkların etkilerini azaltmaktadır. Bu bağlamda, bor ilavesinin, alüminyum alaşımının sıvı metal kalitesini artırarak, döküm sırasında meydana gelen hataların azaltılmasına katkı sağladığı belirtilmektedir (Tokatlı vd., 2022).

Stronsiyum (Sr): Özellikle Al-Si alaşımlarına stronsiyum eklenmesi, alaşımın mikro yapısında belirgin değişiklikler yaparak, özellikle laminar morfolojideki kaba ötektik Si fazının inceltilmesine yardımcı olur. Al-Si alaşımlarında, silisyum fazı tipik olarak kırılabilirliğe ve sünekliğin azalmasına yol açabilen kaba, levha benzeri bir yapı sergiler. Ancak, stronsiyumun eklenmesi bu yapıyı daha ince, lifli bir morfolojiye dönüştürür ve bu da alaşımın sünekliğini ve tokluğunu artırır (Wang, 2003). Bu morfolojik değişim, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yol açan silisyum parçacıklarının boyut ve en boy oranındaki azalmaya atfedilir (Wang, 2003) (Sangchan vd., 2014). Stronsiyumun eklenmesi alaşım içindeki intermetalik fazların oluşumunu da etkileyebilir. Örneğin, stronsiyum, alaşımın korozyon direncini ve genel dayanıklılığını etkileyebilen belirli demir açısından zengin intermetaliklerin oluşumunu teşvik eder (Ji vd., 2024). Alaşım içerisindeki stronsiyumun eklenmesinin katılaşma davranışını etkilediği, ötektik fazın çekirdeklenme ve büyüme özelliklerini değiştirebildiği ve bu da matris boyunca silisyum parçacıklarının daha düzgün bir şekilde dağılmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Dahle vd., 2001). Bu düzgünlük, mekanik yükleme sırasında çatlak başlama olasılığını en aza indirdiği ve böylece alaşımın yorulma direncini artırdığı için kritik öneme sahiptir. Çalışmalar, stronsiyumla modifiye edilmiş alaşımların, özellikle mikro yapıyı daha da rafine eden ve gözeneklilik seviyelerini azaltan T6 ısıtılma işlemine tabi tutulduğunda, modifiye edilmemiş muadillerine kıyasla üstün yorulma ömrü

sergilediğini göstermiştir (Haskel vd., 2018). Stronsiyumun dökümdeki diğer bir etkisi, alaşımın termal iletkenliğini artırmasıdır. Ayrıca, stronsiyumun eklenmesi, alaşımın yüksek sıcaklık dayanımını artırarak, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli avantajlar sağlar (Baril vd., 2003).

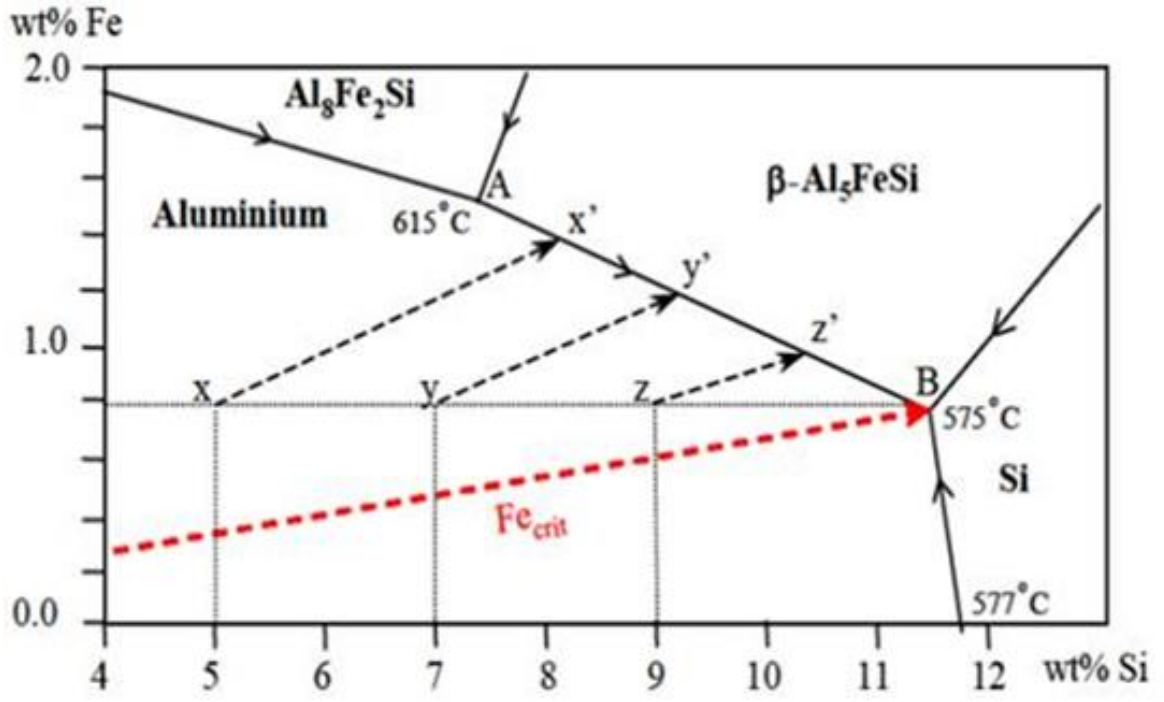
Stronsiyumun katı çözelti güçlendirme etkisi, yüksek sıcaklıklarda gelişmiş performansa katkıda bulunur ve stronsiyum modifiyeli alaşımları termal kararlılığın kritik olduğu uygulamalar için uygun hale getirir (Dybowski, 2014). Bu, bileşenlerin çalışma sırasında genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde özellikle önemlidir. Ancak stronsiyumun aşırı eklenmesi (örneğin, %0,2 Sr üzeri) alaşımın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu durumda alüminyum ve silisyum ile birleşip istenmeyen intermetalik fazların (Al_2SrSi_2 ve Al_4SrSi_2 gibi) oluşmasını sebep olabilir. Ayrıca ötektik üstü alaşımlarda görülen birincil silisyum parçacıklarını inceltmek için eklenen fosfor ile birlikte kullanılmasında da problem riski söz konusudur (Sangchan vd., 2014).

Nikel (Ni): Sürünme direncini ve sertliğini artırmak için alaşımına küçük miktarlarda eklenir. Alaşıma parlaklık katarak yüzey kalitesini artırır. Yüksek demir içeriği nedeniyle olumsuz özellikleri azaltır. Genellikle alaşımlara %0,5-3,0 oranında eklenir.

1.3.2. Alüminyum Alaşımlarında Demir Elementinin Etkisi

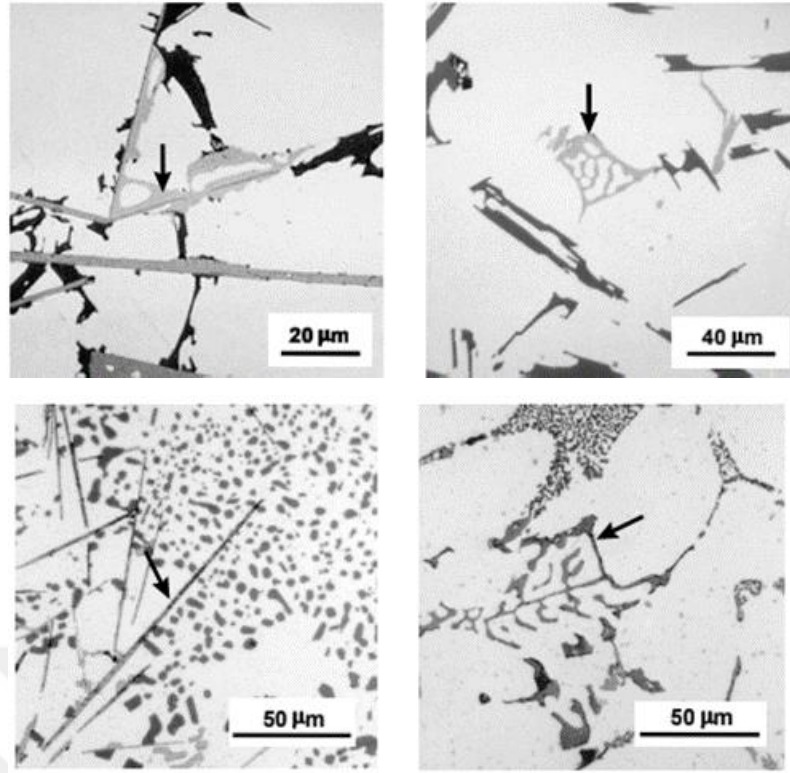
Alüminyum alaşımlarının içerisinde alaşım elementi ilavelerinden veya üretimden kaynaklanan istenmeyen çeşitli elementler bulunabilir. Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini belirlemede demir bu elementler arasında en zararlı safsızlıklarından biridir. Demirin alüminyumda sıvı çözünürlüğü iyi fakat katı çözünürlüğü düşüktür. Bunun sonucu olarak alaşımdaki demirin çoğu var olan diğer safsızlıklara veya alaşımdaki diğer elementler ile bağlı olan intermetalikler oluşturmaktadır. Bu intermetalik bileşiklerin; mekanik özellikler, gözeneklilik, dökülebilirlik, korozyon direnci ve yüzey işlemlerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir (Ak, 2012).

Fe seviyesi yükseldikçe alaşımların sünekliği azalır. Çekme dayanımı azalır, akma dayanımı demirden etkilenmez, süneklik ise akmaya ulaşmadan malzemede gevrek kırılma oluşacak biçimde etkilenir. Demirin negatif etkileri düşük Fe seviyelerinden itibaren başlar, kritik Fe seviyesine doğru ciddi etkilere ulaşır. Kritik demir seviyesi direkt olarak alaşımın Si içeriğiyle ilişkili olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Şekil 3'de Al-Si-Fe üçlü faz diyagramının bir bölümünde bu durum Taylor'un yapmış olduğu bir çalışmada açıklanmıştır (Taylor, 2004).



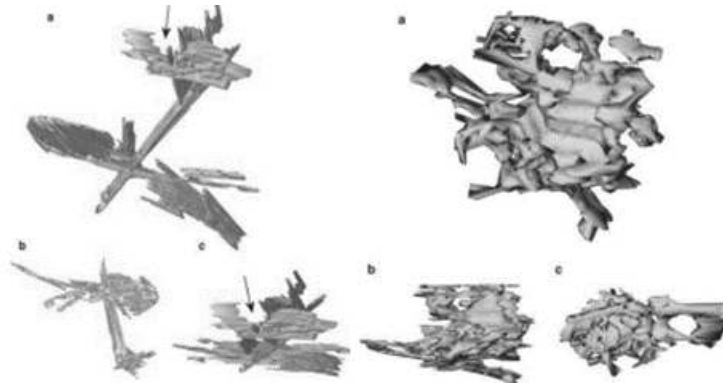
Şekil 4: Kritik Demir ile Birincil Al Katılaşmasını Gösteren Üçlü Al-Si-Fe Faz Diyagramı (Taylor, 2004)

Şekil 4’de görüldüğü gibi, alaşımın Si içeriği arttıkça β-fazı başlamadan önce tolere edilebilecek demir miktarı artmaktadır. %5 silisyum içeriğinde kritik demir içeriği ~ %0,35, %7Si’de ~ %0,5, %9’da ~ %0,6 ve %11’de ~ %0,75 değerlerinde olduğu ifade edilmiştir. Sabit demir yüzdelерinde, artan Si miktarı ile β’nın oluşabileceği sıcaklığın azaldığı belirtilmiştir. β-faz alanı ve Al faz alanı arasındaki AB çizgisi en büyük ve en hasar verici intermetalik taneciklerin oluştuğu bir periyot olarak vurgulanmıştır (Taylor, 2004). Al-Si alaşımlarının mikroyapısında mikroskop altında farklı morfoloji ve renklerde belirgin bir şekilde görülmektedir. Aşağıda verilen şekilde farklı fazların görünümlerine ait örnekler verilmiştir.



Şekil 5: Al-%5Si-%1Cu-%0.5Mg-(Fe) Alaşımlarının Mikroyapı Resimleri (Taylor, 2004)

Şekilde görüldüğü üzere fazlar farklı morfolojilerde karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5b’de α fazı yazı benzeri bir morfolojidedir. Ancak α ’nın farklı versiyonu olan $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ daha kompakt, bloklu bir form ve hatta bazen çokyüzlü kristaller olarak bulunabilir. Şekil 5d’de bulunan π fazı da yazı benzeri bir morfoloji sergilemektedir. π fazı her zaman olmasa da β fazı ile yakından bağlantılıdır (Şekil 5c) ve bu da farklı morfoloji ortaya çıkarmaktadır. Şekil 5a’de ise β fazının morfolojisi görülmektedir. β fazı iğne gibi görünmektedir ve β trombositleri olarak adlandırılır. Bu demir intermetaliklerinin farklı şekilleri, demirin dökülebilirlik ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinden kısmen sorumludur.



Şekil 6: a) Birbirine Bağlı B- Al_5FeSi Trombositleri ve B) Yazı Benzeri A- $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ Fazlarının 3 Boyutlu Rekonstrüksiyonları (Dinnis vd., 2005)

1.3.3. Alüminyum Alaşımlarına Akıcılık

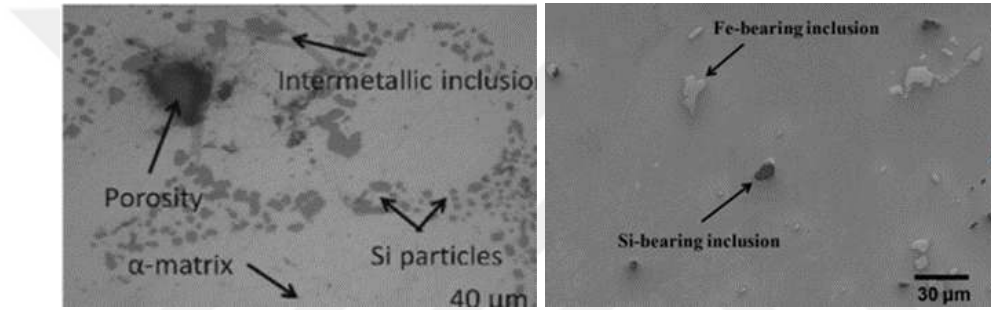
Akışkanlık, döküm alaşımlarının dökülebilirliği, sıvı metalin katılaşma sırasında durduruluncaya kadar kalıp içinde aktığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlık yoğunluk gibi fiziksel bir özellik değildir, ancak bir döküm uygulamasının belirli koşulları altında bir alaşımın sıvı veya sıvı-katı ikili fazının sıvı akışı ve katılaşmasıyla ilgili karmaşık bir davranıştır (Bang vd., 2022). Bu yüzden, dökümhanelerde pratik olarak yapılabilen akışkanlık testi ile sıcaklık ve bileşime bağlı olarak döküm şartları belirlenmelidir. Metalin akıcılığı, ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda artmakla birlikte, sıcaklığın aşırı artışı ise birçok olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu gibi olumsuz etkileri giderebilmek için bir optimum sıcaklığın tespiti gerekir. Döküm tamamlanuncaya kadar oluşabilecek ısı kayıplarının önlenmesi için alaşım döküm sıcaklığının, ergime sıcaklığından 100-150°C fazla olması yeterli olmaktadır (Aslandoğan, 2009).

Döküm akıcılığını etkileyen birçok değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler genellikle iki geniş kategori altında gruplanabilir; Metal ile ilgili değişkenler ve kalıpla ilgili değişkenler. Bunlar alaşımın bileşimi, ergimiş alaşımın sıcaklığı, katılaşma esnasında yapı içinde oluşan çökelekler, inklüzyonlar, oksitler, bifilmeler, yolluk sistemi, viskozite, döküm süresi, kristalleşmenin şekli ve katılaşması, soğutma hızı, sıvı metal içerisinde bulunan yabancı maddeler gibi faktörlerdir (Fazeli vd., 2021).

Yukarıda açıklanan faktörler alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, gözeneklilik, dökülebilirlik, akıcılık gibi özellikleri etkilediği ayrıca içeriğinde bulunan çeşitli elementlerin ve element miktarlarının etkilediği açıklanmaktadır (Dışpınar, 2022). Alaşımın akıcılığını artırmak için sıvı metal temizliği, kalıp sıcaklığını artırma, döküm sıcaklığını artırma, aşılama elementi eklemek gibi çeşitli işlemler uygulanmaktadır.

Alaşıma uygulanan temizleme işlemleri akıcılığı artırmak için uygulanan işlemlerden biridir. Alaşım içinde istenmeyen elementler gaz, inklüzyon ve kalıntı gibi kirliliklerin ortadan kaldırılması veya asgari düzeye indirgenebilmesi gerekmektedir ve bu istenmeyen etkiler temizleme yöntemler ile temizlenebilmektedir (Tokatlı, 2022). Sıvı metal temizliği uygulanan alaşımların akıcılığının arttığı yapılan çalışmalarda gözlemlenmektedir

Ergiyik alaşımda farklı elementler bulunabilir. Bu elementlerden Fe, Zn, Cu, Mg ve Mn gibi elementlerin ilavesi alaşımların akıcılığını oldukça etkilemektedir. Al döküm alaşımlarında Fe içeriği akışkanlıkta azalmalar meydana getirmektedir (Rooy, 1985; Rooy, 1988). Alaşıma ilave edilen elementin oranı önemlidir, ilave elementlerin küçük miktarlarının etkisi çok fazla olmamaktadır. Alüminyumun alaşımlarının akışkanlığı, metal saflığı azaldıkça hızla azalmaktadır (Taylor, 1996). Yani akışkanlıktaki azalmayı, alaşımda çözünmeyen Fe içeren fazların miktarındaki artışa bağlıdır. Alaşımdaki Fe seviyesindeki artışın intermetalik sayısını artırdığı için akıcılığı azalttığı bildirilmektedir (Wang vd., 1995; Gowri & Samuel, 1994). Alaşım içinde Şekil 7’de gösterilen yapıların oluşması alaşımların döküm özelliklerinin etkilenmesini sağlamaktadır. Test, şerit (dilim) akıcılık testi ve vakum akıcılık testidir (Saxena vd., 2017).



Şekil 7: Alüminyum İçinde Oluşan Inklüzyon Görselleri (Divandari vd., 2004)

Alaşımların akıcılığını etkileyen bir diğer faktör kalıp sıcaklığı ve ergiyiğin sıcaklığıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kalıp sıcaklığının azalmasıyla akıcılığın azaldığı, kalıp sıcaklığının artmasıyla kalıbın soğutma etkisinin azaldığı dolayısıyla akışkanlığın arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 200°C ve üstü kalıp sıcaklıklarında Al ve alaşımlarının döküm akışkanlığının hızla arttığı bildirilmektedir (Ravi vd., 2008). Ayrıca belirli bir alaşım bileşimi için ergime sıcaklığının artmasıyla akışkanlığın arttığını bildirmişlerdir (Hua vd., 2007). Örneğin yapılan çalışmada A356 alaşımlarının daha yüksek dökme sıcaklıklarında akışkanlığının gözle görülür biçimde arttığını göstermiştir (Prukkanon, 2009). Fazeli 2021 çalışmasında Al-Sfero dökümü (Fe-3.2C-8.5Al-0.05Mg), aynı uzunluk farklı kalınlıklarda 4 şeritli kalıp kullanarak dökümünü yapmışlardır. Ergiyiği 4 farklı sıcaklıkta dökerek akıcılığını incelemişlerdir. Artan sıcaklığın akıcılığı her kademedede artırdığını gözlemlemiştir. Ayrıca kalınlıkların farklı olmasının oluşan oksit tabakası da değiştirmesine bağlı olarak akıcılığı azalttığını da görmüşlerdir.

Akıcılığa etki eden parametrelerden biri de kalıbın kaplamasıdır. Saxena ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında, spiral kalıp ve şerit kalıpta farklı kalıp kaplama

malzemelerini kullanmanın akıcılığı nasıl etkilediği incelenmiş ve dökümü yapılan alaşımın kalıp malzemesine bağlı olarak farklı kaplama yöntemleri kullanıldığında akıcılık miktarlarının gözle görünür derecede değiştiğini fark ettiğini bildirmişlerdir. Sabatino at al. 2006 çalışmada 356 alaşımının üç farklı sıcaklık (700, 715 ve 730°C) uygulanarak şerit ve spiral akıcılık dökümleri kalıplarda kaplama olması ve olmaması durumunu değerlendirerek dökümünü gerçekleştirmişlerdir. Kaplama olan kalıpların akıcılıklarının daha iyi olduğu ayrıca sıcaklık değerinin artmasının her iki kalıpta da daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

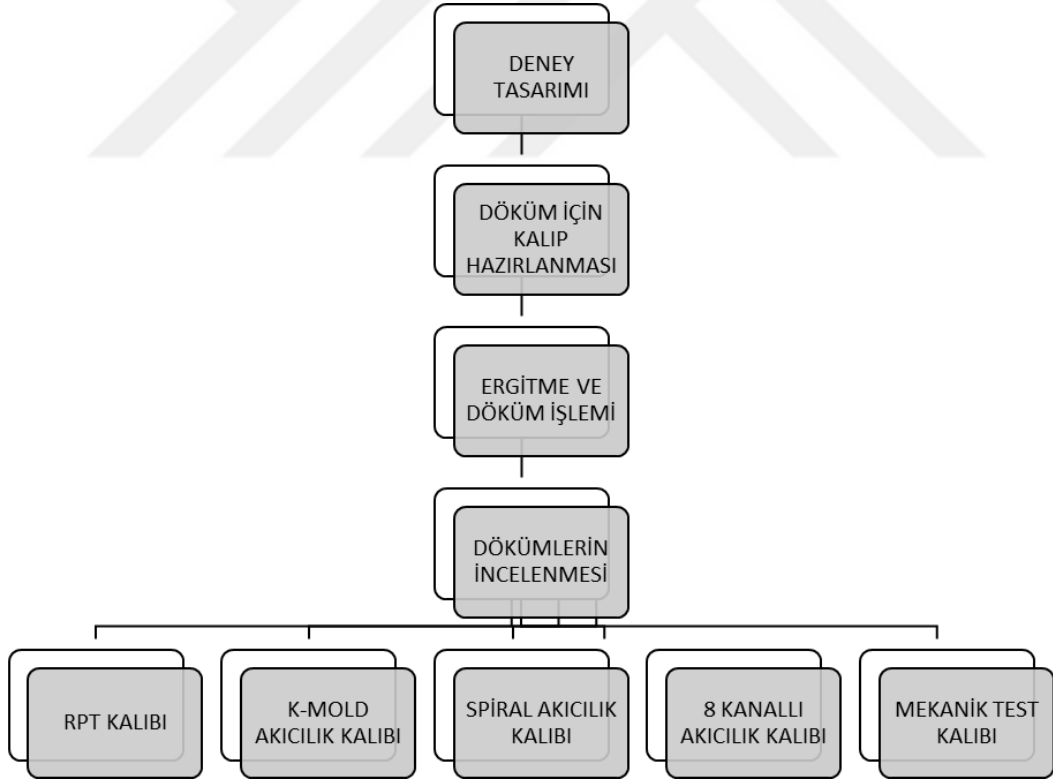
Alaşıma ilave edilen bazı elementler de akıcılığı etkilemektedir. Bu Taghaddos vd., çalışmasında 413 alaşımına Fe etkisinin akıcılığı nasıl etkilediğini vakum akıcılık kalıbında döküm yaparak araştırmıştır. Araştırma kapsamında Mn ilavesi yaparak Mn 'ın etkisini de incelemişlerdir. Ergiğin içinde bulunan Fe'nin intermetalik oluşumunu artırması ve tortu oluşumunu artırmamasından dolayı akıcılığı azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca Mn ilave edilen ergiyiklerin akıcılıklarının edilmeyenlere göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Heidarzadeh 2014, çalışmasında Al-15%Mg₂Si alaşımını kullanarak Cu ilavesinin şerit akıcılık kalıbında akıcılık incelemiştir. İnceleme esnasında kalıp sıcaklığının akıcılığı artırıp artırmadığını da araştırmıştır. Sonuç olarak alaşıma Cu miktarı ilavesinin Cu oranı arttıkça akışkanlığı azalttığı alaşımın ve kalıbın sıcaklığının artmasının akıcılığı artırdığını gözlemlemiştir.

Ergiyik içerisinde bulunan kirlilikler, oksitler ve istenmeyen elementler sıvı metal temizleme yöntemleri ile ortamdaki uzaklaştırılarak akıcılık artırılmaktadır. Hal 2023 yaptığı çalışmada, A356 alaşımına 720°C de sıvı metal temizliğinde gaz giderme işlemi için flaks kullanımının akıcılığı nasıl etkilediğini incelemiştir. İncelemede spiral akıcılık test kalıbı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sıvı metal temizliğinde flaks kullanarak yapılan gaz giderme işleminin bifilm indeksini azalttığı ve bunun sıvı metal akıcılığının artırdığı sonucuna varmışlardır.

İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilecektir. Çalışmalar kapsamında, Mn'ın farklı Fe içerikli A356 alaşımı üzerindeki etkisi incelenecektir. Deneylerde alaşım olarak Cevher Jant A.Ş. den tedarik edilen primer alaşım, talaş ve fire jant hurdaları kullanılmıştır. Deneylerde farklı Fe ve Mn içeriğinde toplam 9 döküm deneyi gerçekleştirilmiştir. Döküm deneyleri kokil kalıp içerisine gerçekleştirilmiştir. Kalıplar her döküm öncesindeki sıcaklığı 250°C ısıya getirilmiştir. Döküm sıcaklığı 700°C olacak şekilde dökülmüştür. Deneylerde ilk olarak vakum altında katılaştırma (Reduced Pressure Test-RPT), K-mold kalıbı, mekanik test kalıbı, 8 kanallı akıcılık kalıbı ve spiral akıcılık kalıbı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında, ergitme ve sıvı metal temizleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonrasında kalıplara döküm yapılarak inceleme ve değerlendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan işlemlere ait şematik iş planı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Deneysel Çalışmalar İşlem Basamakları

2.1. DENEY TASARIMI

Tez çalışmasında Mn elementinin farklı Fe içerikli alaşımlarının karakteristiğiyle etkileşimi analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Mn miktarı %0,05, %0,1, %0,2 olarak, alaşım içerisindeki Fe miktarı %0,1, %0,15, %0,2 olarak belirlenmiştir. Çalışmada Tablo 1’de verildiği gibi 9 deney planlanmıştır.

Tablo 1: Döküm Deneyleri Fe ve Mn Oranları

Deney Adı	% Fe içeriği	% Mn içeriği
%0,1 Fe-%0,05 Mn	0,1	0,05
%0,1 Fe-%0,1 Mn	0,1	0,1
%0,1 Fe-%0,2 Mn	0,1	0,2
%0,15 Fe-%0,05 Mn	0,15	0,05
%0,15 Fe-%0,1 Mn	0,15	0,1
%0,15 Fe-%0,2 Mn	0,15	0,2
%0,2 Fe-%0,05 Mn	0,2	0,05
%0,2 Fe-%0,1 Mn	0,2	0,1
%0,2 Fe-%0,2 Mn	0,2	0,2

2.2. DÖKÜM İÇİN ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI

Deneylerde alaşım olarak Cevher Jant A.Ş. den tedarik edilen primer alaşım, talaş ve fire jant hurdaları kullanılmıştır. Mn ilavesi için %75 Mn içeren Al75Mn master alaşımı kullanılmıştır. Tablo 2’de deneylerde kullanılan alaşımlara ait kimyasal bileşim verilmiştir.

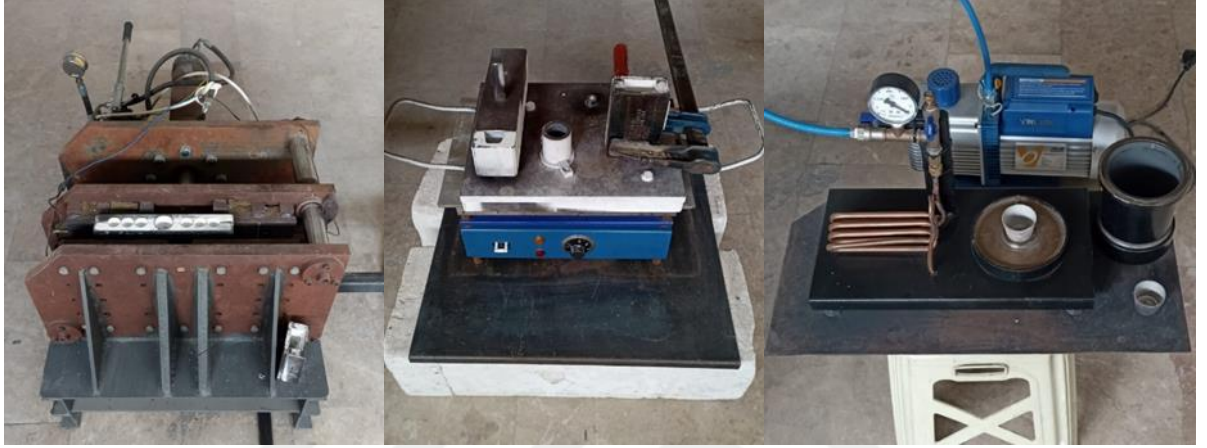
Tablo 2: Deneylerde Kullanılan Alaşımlara Ait Kimyasal Bileşim (% ağırlık)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Ca	V	Pb	Na	Al
Primer Alaşım	7,02	0,08	0,001	0,002	0,27	10	0,001	0,01	0,001	0,001	Kalan
Talaş Hurdası	7,48	0,1	0,001	0,002	0,26	0,11	0,002	0,01	0,001	0,001	Kalan
Fire Jant Hurdası	7,11	0,46	0,001	0,004	0,23	0,12	0,001	0,01	0,001	0,001	Kalan
Al75Mn	-	-	-	75	-	-	-	-	-	-	25

Alaşım içeriğindeki Fe içeriği ayarlamak için Tablo 5’de verilen kimyasal içeriklerde görüldüğü gibi fire jant hurdası kullanılmıştır. Fire jant hurdasına talaş hurdası ve primer alaşım ilavesi ile Fe içerikleri ayarlanmıştır.

2.3. DÖKÜM İÇİN KALIPLARIN HAZIRLANMASI

Döküm öncesi kalıplar ısıtıcı tablo üzerinde 250 °C ön ısıtma sıcaklığına getirilerek döküme hazır hale getirilmiştir. Mekanik test kalıbı ısıtma ünitesine sahip prese bağlanarak ısıtması gerçekleştirilmiştir. Deneyler için RPT, K-mold kalıbı, mekanik test kalıbı, 8 kanallı akıcılık kalıbı, spiral akıcılık kalıbı ve basamak kalıbı olmak üzere bütün kalıplara 3'er adet döküm yapılmıştır. Şekil 9'da ısıtma plakası üzerinde döküme hazır kalıp görüntüleri verilmiştir.



Şekil 9: Döküme Hazır Kalıpların Görüntüsü

2.4. ERGİTME VE DÖKÜM İŞLEMLERİ

Ergitme işlemi 8000 g sıvı alüminyum kapasitesine ve 10 kW gücüne sahip elektrik direnç ocağında ve SiC pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi sırasında şarj malzemesinin ağırlığı 6500 g olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 10: Elektrik Direnç Ocağı ve SiC Pota

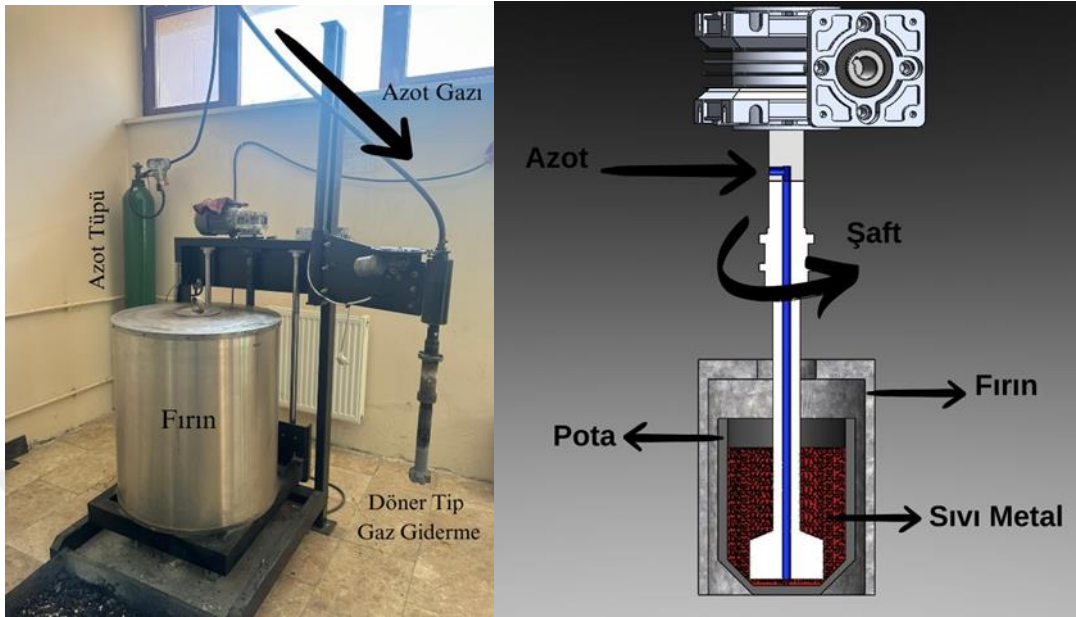
Planlanan sıcaklıkta ergitme ve döküm yapabilmek için sıvı metal sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu sıcaklık ölçümü esnasında kullandığımız cihaz daldırmalı pirometredir. Pirometre ile yapılan ölçüm sonucunda sıvı metal sıcaklığı 720° ulaştığında, deney parametresine uygun Mn miktarı hesaplanıp Al75Mn alaşımı alüminyum folyoya sarılarak sıvı metale ilave edilmiştir ve manuel olarak sıvı metal içerisinde karıştırma gerçekleştirilmiştir. Mn yüklendikten 5 dakika sonra sıvı metal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 11’de ocak sıcaklık ölçümü, Mn miktarı tartımına dair görseller verilmiştir.



Şekil 11: Mn İlavesi ve Sıcaklık Ölçümü Görselleri

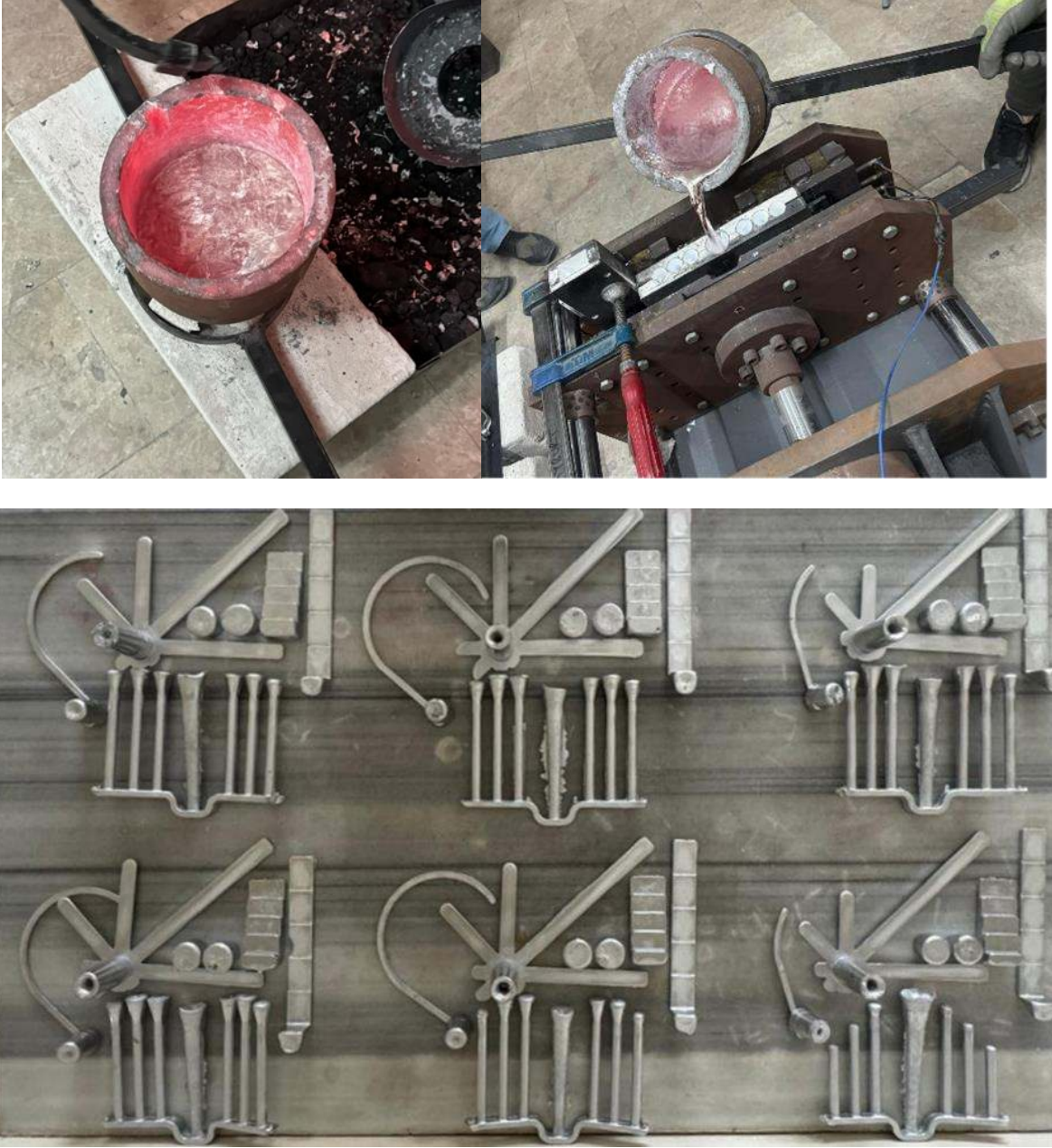
Sıvı metal temizlemede döner tip gaz giderme işlemi uygulanmıştır. Döner tip gaz giderme işleminde, sıvı metal içerisine daldırılan grafit nozul 350 rpm devirde dönerek bir girdap oluşturmuştur. Bu esnada içerisine verilen azot gazı sıvı metalin her yerine ulaşması,

azot gazı etkisi ile sıvı metal içerisindeki oluşan kabarcıklar sıvı metal içerisindeki yabancı maddeleri uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Şekil 12’de sıvı metal temizleme işlemine dair görseller verilmiştir.



Şekil 12: Sıvı Metal Temizleme Elemanları ve Şematik Görsel

Temizleme süresi arttıkça bu kabarcıkların etkinliğini arttığını inanılmaktadır ancak planlanan süre yeterli ise zaman enerji ve kaynak israfını önlemek için süre planlanır. Bu deney için optimize etmiş olduğumuz parametreler 7 dk boyunca 7 lt/dk debi, 350 rpm çark hızıdır. Bu şartlarında sıvı metal temizleme işlemi yapılmıştır. Pirometre cihazı ile yapılan ölçümde sıcaklık 700°C geldiğinde, döküme başlamak için pota dışarı alınmış ve pota demir çabuk yardımı ile iki taraftan tutularak önce RPT ve daha sonrası sırasıyla mekanik, K-mold, sekiz kanal ve spiral akıcılık kalıbına döküm yapılmıştır. Döküm sonrası kalıplar açılarak numuneler incelenmek üzere çıkartılmıştır. Şekil 13’de döküm esnasından ve döküm sonrası numunelere ait örnek bir görüntü verilmiştir.



Şekil 13: Döküm Esnasından ve Döküm Sonrası Numunelere ait Örnek Bir Görüntüsü

2.5. DÖKÜMLERİN İNCELENMESİ

Döküm sonrası katılaşma ve soğumanın ardından kalıplar açılarak döküm numuneleri alınmıştır. Dökümler sonrası RPT, K-mold, 8 kanallı akıcılık kalıbı ve mekanik test numuneleri elde edilmiştir. Yapılan dökümlerden sonra ilk olarak numunelerin makro olarak incelenmiş ve fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Daha sonra her bir test numunesi ilerleyen kısımlarda detayları verildiği şekilde incelenmiştir.

2.5.1. Kimyasal Bileşim Analizi

Her bir deney için akıcılık döküm numunelerinden kimyasal analiz testleri yapılmıştır. Kimyasal analiz testleri Cevher Jant San. A.Ş. firmasında ARL marka optik spektrometre ile EN 1706 standartı ile analiz edilmiştir. Bu yöntemde optik emisyon spektrometre (OES) cihazı ile parça üzerine gönderilen ark ile yüzeyde yanma oluşturulur. Yüzeyden yayılan dalga boylarına göre numune içerisindeki elementleri görülebilmektedir. Şekil 14’de kimyasal analiz testlerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görüntü verilmiştir.



Şekil 14: Numunelerinin Kimyasal Bileşiminin Belirlendiği Spektrometre Cihazı

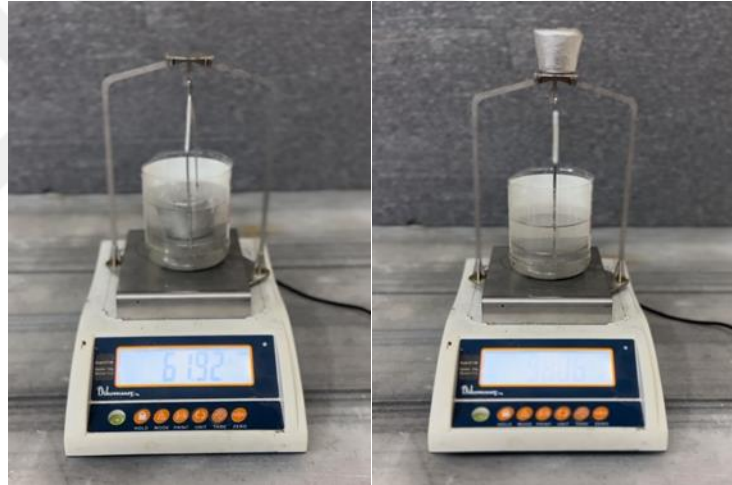
2.5.2. RPT Kalıbı Numunelerinin İncelenmesi

Şekil 15’de gösterilen RPT cihazı ile sıvı metalden numuneler alınmıştır. Ayrıca, aynı sıvı metalden yoğunluk indeksi ölçümleri için atmosfer ortamında yapılan dökümlerden numuneler elde edilmiştir. Vakum altında katılaştırma testinde diğer kalıpların dökümüne geçmeden önce kepçe yardımıyla ince cidarlı çelik potaya (Şekil 15, test kalıbı) yaklaşık 100-150 g sıvı metal dökülmüş ve daha sonra hızlı bir şekilde vakum altına alınmıştır. Bu vakum basıncı yaklaşık 80 mbar’dır. Sıvı metal tamamen katılaşıncaya kadar vakum altında bu işlem tamamlanmıştır. Sonra, numune kalıptan çıkarılarak soğumaya bırakılır. Bu şekilde sıvı metalin temizlik derecesi hem yorumlama hem de işlemlerde alınacak önlemlerin daha anlamlı duruma dönüştürülmesinde önemli bir yardımcı unsur olmaktadır.



Şekil 15: RPT Test Cihazı ve Test Kalıbı

RPT kalıbına dökülerek elde edilen numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi ile hesaplanmıştır. Arşimet prensibine göre dökülen her numunenin ağırlığı önce havada daha sonra saf suda ağırlıkları ölçülmektedir. Tartım işlemi, Şekil 16’da gösterilen 0,02 g hassasiyete sahip elektronik teraziye kurulan Arşimet düzeneği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16: Arşimet Prensibi Yoğunluk Ölçüm Düzeneği

Elde edilen veriler aşağıda verilen Eşitlik 1’deki formül ile hesaplanmıştır.

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

d_n -döküm numunenin yoğunluğu,

m_s - numunenin saf sudaki ağırlığı,

d_s - oda sıcaklığında suyun yoğunluğu

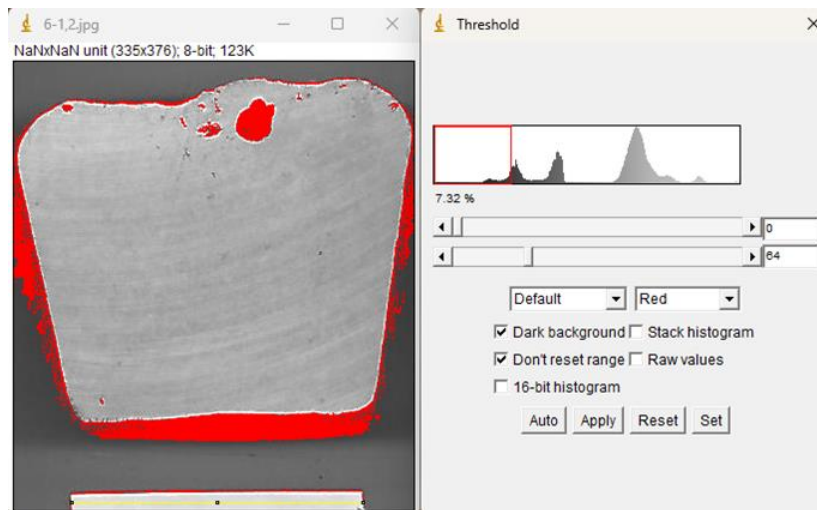
m_h –numunenin havadaki ağırlığı

Deneylerde hem atmosfer ortamında hem vakum altında katılan numunelerin havada

ve suda ölçümleri yapılarak yoğunluk indeksleri belirlenmiştir. Yoğunluk indeksinin hesaplanması için vakum altında katılaştırılan sıvı metal numunesi ile atmosferik ortamda katılaştırılan sıvı metal numunesinin yoğunluklarının formülize edilerek hesaplanması yöntemine dayanmaktadır. Katılaşma sonrası elde edilen numunelerin hassas terazi vasıtasıyla tartılarak yoğunlukları hesaplanır. Hesaplanan yoğunluk değerleri yoğunluk indeksi formülünde yerine koyulur. Böylece elde edilen indeks ile metal temizliği (çözünmüş hidrojen) hakkında fikir sahibi olunabilir.

Yoğunluk indeksi = $[(\text{Datm} - \text{Dvakum}) / \text{Datm}] * 100$ formülü ile hesaplanır. (2)

Ayrıca RPT numunelerindeki gözenekleri görmek için numune dikey olarak ortadan ikiye kesilmiş ve kesilen yüzeylere önce 100 meşlik zımpara daha sonra 400 meşlik zımpara ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu yüzeylerin görüntüsünü dijital ortama aktarmak için tarayıcı ile tarama işlemi yapılmıştır. Bu görüntüler üzerinden İmageJ programı ile bifilm analizleri gerçekleştirilmiştir. Bifilm indeksi hesaplanırken ilk önce RPT numunelerinin kesilip zımparalanan yüzeyinde gözeneklerin belirginleştirilmesi sağlanmıştır. Öncelikle skala çizgisi tanımlanarak ‘feret diameter’ olarak bilinen hesaplamalara geçilmiştir. Analiz programları numunenin içerisinde bulunan kusurların çevresini tanımlamak ve ardından feret diameter'ı hesaplamak için çeşitli algoritmalar kullanarak yapı içerisindeki kusurların boyut ve şekillerini analiz ederek karşılaştırmaktadır. Program üzerinde değerleri belirtilen analizin Şekil 17’de görüldüğü gibi renk eşleştirmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece numunenin analizi yapılarak içerisinde bulunan gözenek hesaplamaları yapılabilmiştir.



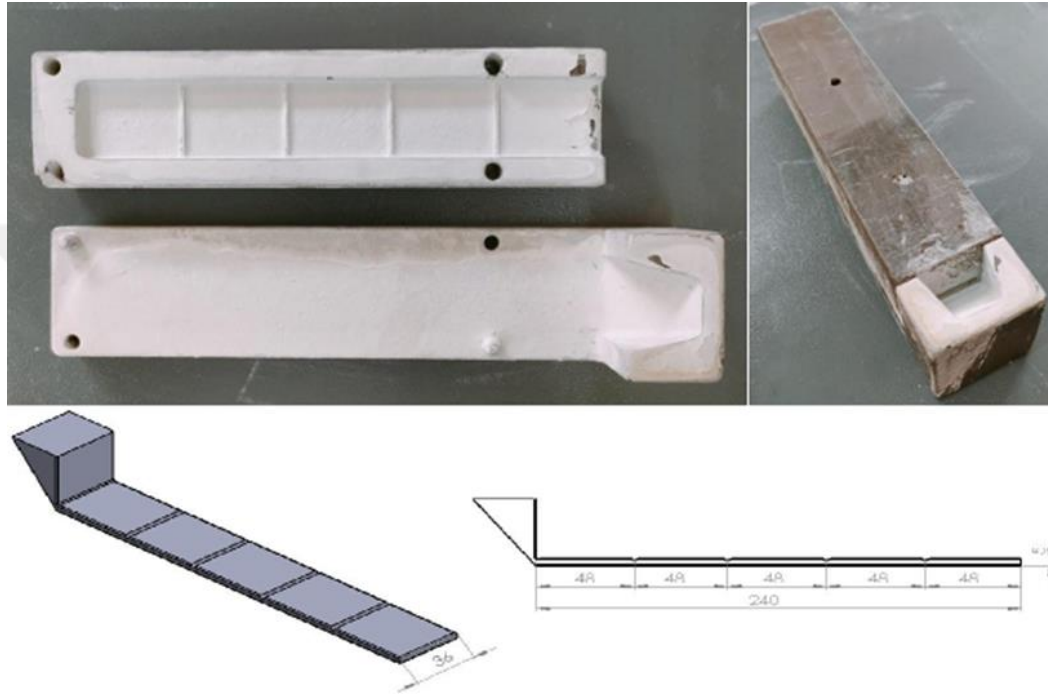
Şekil 17: İmajJ Yazılım Renk Eşleştirme Görüntüsü

Hesaplama içerisine dahil edilen bu alanlar daha sonra sayısal veri olarak alınır ve feret değerleri toplanarak numune içerisinde ne kadar alan kapladığı hesaplanmaktadır. Deneyler kapsamında elde edilen tüm RPT numunelerine aynı işlemler gerçekleştirilerek bifilm değerleri

tespit edilmiştir.

2.5.3. K-mold Numunelerinin İncelenmesi

K-mold kalıbı kullanılarak sıvı metal temizlik miktarı tespit edilmesi amaçlanmıştır. K-mold numunesi eşit kesit kalınlığına sahip beş parçadan oluşmaktadır. Şekil 18’de döküm deneylerinde kullanılan K mold kalıbına dair görseller verilmiştir.



Şekil 18: K-Mold Test Kalıbı Numune Katı Model Görüntüsü ve Numune Ölçüleri

Katılaşmanın tamamlanmasından sonra numune üzerinde bulunan çentikli bölgelerden kırılarak bu parçaların yüzeylerindeki kirlilik (oksit kalıntısı) adetleri sayılarak metal rafinasyonu öncesi ve sonrası ile kıyaslanmaktadır. Ergitilen alaşımın temizliği K-mold değeri ile ifade edilir. Bu değer K ile ifade edilmektedir. Dökümde elde edilen numune eşit aralıklı yerlerden kırılarak eriyik temizliğinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Kırılan yüzeylerin görsel olarak incelenmesi kırılan yüzeylerin fotoğrafları çekilerek yüzeydeki kusurların sayıları belirlenmektedir. Elde edilen kusur sayıları Eşitlik 3’te verilen formülde yerine konularak alaşımın temizliği hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.

$$K=S/n \quad (3)$$

K; kırık yüzey ortalama kusur sayısı,

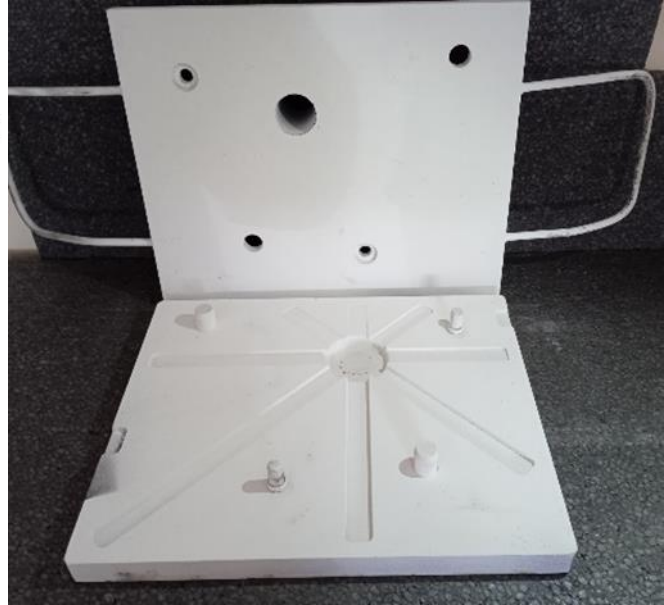
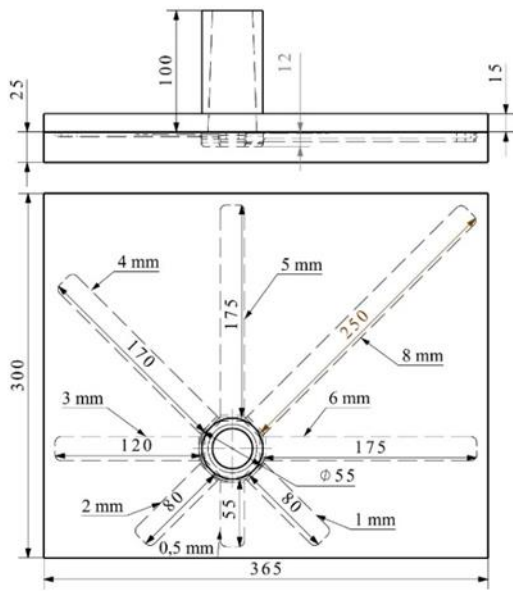
S; tüm numune kırık yüzeylerindeki toplam kusur sayısı,

n; incelenen örnek sayısı olarak ifade edilir. K değerinin hangi aralıkta sıvı metal temizliği sıvı metale temizleme işlemi gerekip gerekmediği belirlenmektedir. K değeri;

- K-değeri <0,5 ise sıvı metal temiz,
- 0,5 <K-değeri <1,0 aralığında ise sıvı metal temizliği kabul edilebilir değerlerdedir ancak, sıvı metalin proses edilerek temizlenmesi gerekmektedir.
- K-değeri>1,0 üzerinde ise mutlaka sıvı metalin temizlenmesi gerekmektedir.

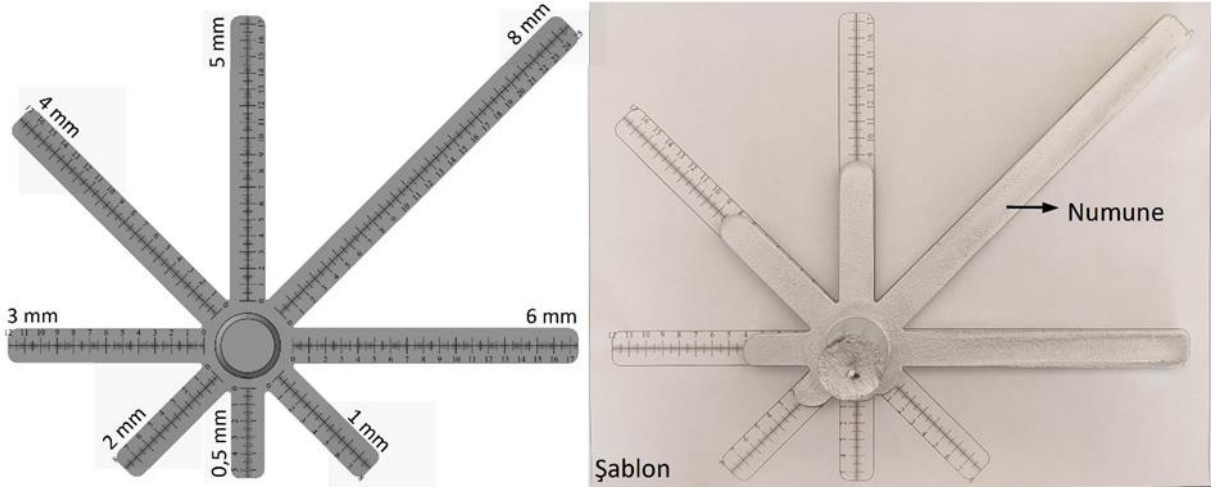
2.5.4. 8 Kanallı Akıcılık Kalıbı Numunelerinde Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Tespiti

Alaşım akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için tasarlanan farklı kesit kalınlıklarına sahip 8 kanallı akıcılık kalıbına dökümler yapılmıştır. Şekil 19’da 0,5 mm’den 8 mm’ye kadar değişen kesit kalınlıklarına sahip 8 kanallı akıcılık kalıbına dair ölçüler ve kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 19: 8 kanallı Akıcılık Kalıbı Ölçüleri ve Kalıp Görüntüsü

Döküm sonrası kalıptan çıkarılan numuneler her bir kesit için sıvı metal ilerleme mesafeleri belirlenmiştir. Şekil 20’de akıcılık döküm numunesi üzerinde yapılan ölçümlere dair örnek bir görsel verilmiştir.



Şekil 20: Akıcılık Kalıbı Ölçüm Örneği

8 kanallı akıcılık kalıbında farklı kesit kalınlıklarının olmasından dolayı, değişen döküm şartlarında sıvı metal ilerleme mesafelerinin değerlendirilebilmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca her bir kesit için ayrı ayrı yapılan değerlendirmelerde farklılıklar ile karşılaşılabilir. Sıvı metal ilerleme mesafesi, kalıba yapılan döküm süresi, döküm sıcaklığı, döküm anında potanın hangi kanala yakın olduğu ve döküm hızı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Oluşan bu farklılıkları standartlaştırmak ve ortalama bir değer elde edebilmek için akıcılık indeksi geliştirilmiştir. Akıcılık indeksi, her kanaldaki sıvı metal ilerlemesinin, ilgili kanalın kesit kalınlığına bölünmesi ve elde edilen tüm değerlerin toplanması yoluyla hesaplanmaktadır. Akıcılık indeksi hesaplanırken, bu indeksin bulunduğu kalıpta yer alan kanal sayısına bağlı olarak genişletilerek hesaplanabilmektedir. Akıcılık indeksi formülü 8 kanallı akıcılık kalıbı için Eşitlik 4'de verilmiştir.

$$\text{Akıcılık İndeksi} = \text{Sıvı metal ilerleme (mm)} / \text{Kesit Kalınlığı (mm)} \quad (4)$$

Akıcılık kalıbından elde edilen numunelere ait sıvı metal ilerleme mesafeleri sonuçları daha anlaşılır olması açısından akıcılık indeksi ile sunulacaktır.

2.5.5. Mekanik Test Kalıbı Numunelerinin İncelenmesi

Değişen deney parametrelerine bağlı olarak çekme testi yapılabilmesi için 6 çubuklu mekanik test kalıbına dökümler yapılmıştır. Döküm sonrası katılaşma ve soğumanın akabinde deney numuneleri kalıptan çıkarılarak incelemelere tabi tutulmuştur. Şekil 21'de mekanik test kalıbı ile üretilen döküm numunesine ait örnek bir görüntü verilmiştir.



Şekil 21: Mekanik Test Numunesi

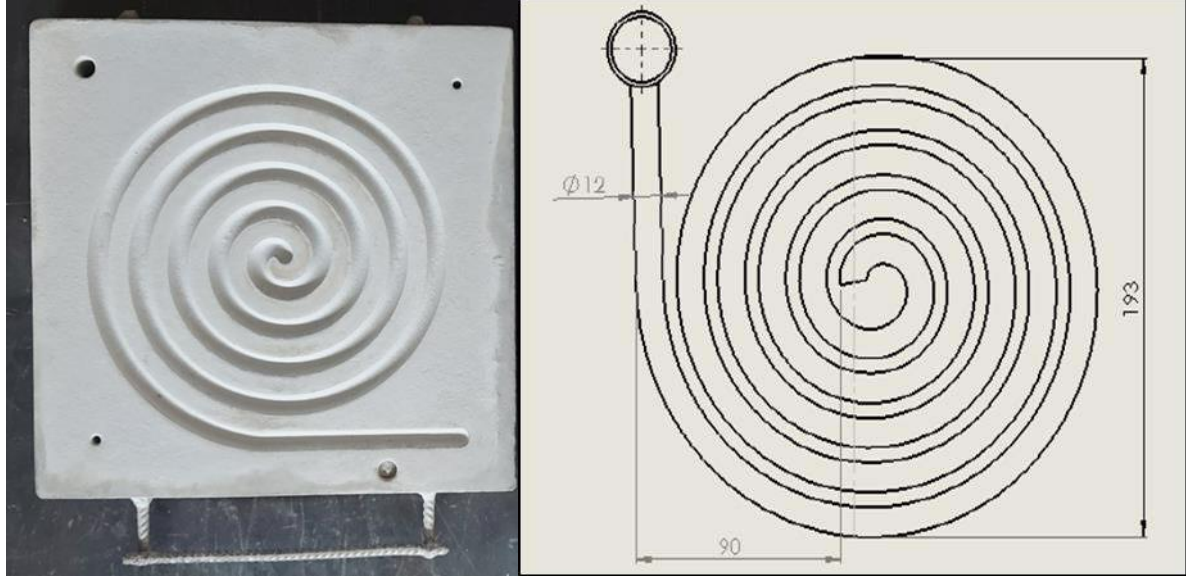
Döküm numuneler yolluklarından ayrıldıktan sonra CNC torna tezgâhında işlenerek çekme testi numunesi formuna getirilmiştir. Çekme testleri her döküm koşulunda Zwick Z100 Model çekme cihazında EN ISO 6892-1 standardı kullanılarak yapılmıştır. Çekme cihazının kapasitesi maksimum 100 kN olacak şekildedir. Çekme testi ile numunelere ait akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler ile alaşıma farklı hurda oranı kullanımının mekanik özelliklere etkisi değerlendirilecektir. Şekil 22’de çekme testi aşamasından örnek bir görsel verilmiştir.



Şekil 22: Çekme Testi Örnek Fotoğraf Görüntüsü

2.5.6. Spiral Akıcılık Kalıp Numunelerinin İncelenmesi

Akıcılık testlerinde literatür kısmında genişçe yer alan Şekil 23’de görüntüsü verilen spiral akıcılık test modeli kullanılmıştır. Tasarımı verilen kalıbın kokil kalıba dökümler yapılarak değişen döküm şartlarında sıvı metal ilerlemesi ölçümü yapılacaktır.

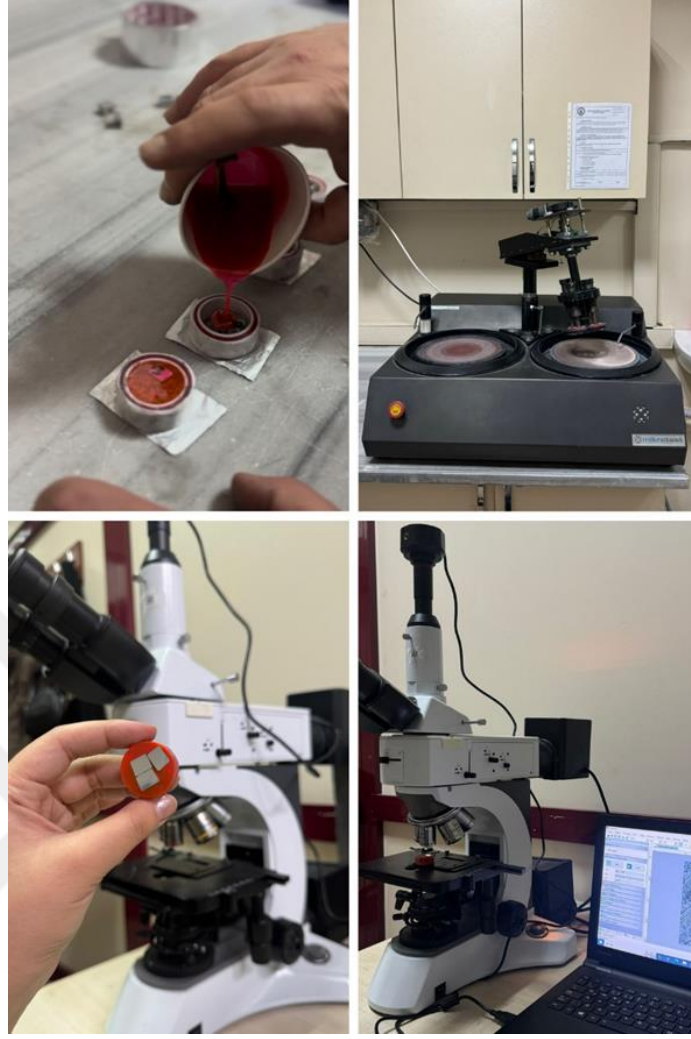


Şekil 23: Spiral Akıcılık Kalıbı Görseli ve Numune Ölçüleri

Spiral akıcılık kalıbından elde edilen numuneler sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2.5.7. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri yapabilmek için her bir deney şartlarındaki akıcılık kalıbı numunelerinin en uç kısımlarından numuneler alınmıştır. Alınan numuneler hazırlık süreçlerinde kolaylık olması açısından ve tek seferde daha fazla sayıda numunenin hazırlanabilmesi açısından bakalite alınmak suretiyle kalıplanmıştır. Bakalite alınmış numuneler 180-400-800-1200-2000 meşlik zımpara ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Uygulanan zımparalama işleminin ardından 3µm, 1µm alümina süspansiyonu ve son olarak 0,05 µm’lik kollodial silika ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası numuneler Keller çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Uygulanan dağlama işlemi sonrası, 1000 kez büyütme yeteneğine sahip, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 µm hassasiyet özelliklerine sahip NMM-800/820 serisi metalurjik optik mikroskopta mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Fotoğraf çekimleri mikroskopa bağlı dijital kamera ile yapılmıştır. Şekil 24’de metalografik muayenede kullanılan zımparalama-parlatma cihazı, bakalite hazırlanışı ve mikroyapı fotoğraflarının çekildiği optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 24: Zımparalama Parlatma Cihazı, Optik Mikroskopta Mikroyapı Görüntüsü

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ve değerlendirmeleri sunulmuştur. Sonuçlar; kimyasal analiz testleri, sıvı metal kalitesinin belirlenmesi, akıcılık sonuçları, mikroyapı incelemeleri ve mekanik test sonuçları başlıklarında detaylı olarak verilmiştir.

3.1. KİMYASAL BİLEŞİM UYGUNLUĞUNUN TESPİTİ

Çalışma kapsamında, deneysel çalışmalar bölümde detaylı bir şekilde açıklandığı üzere farklı Fe ve Mn içeriklerinde dökümler yapılmıştır. Yapılan dökümlerden alınan numunelere ait kimyasal bileşim sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Döküm Deneylerine Ait Kimyasal Analiz Sonuçları (% Ağırlık)

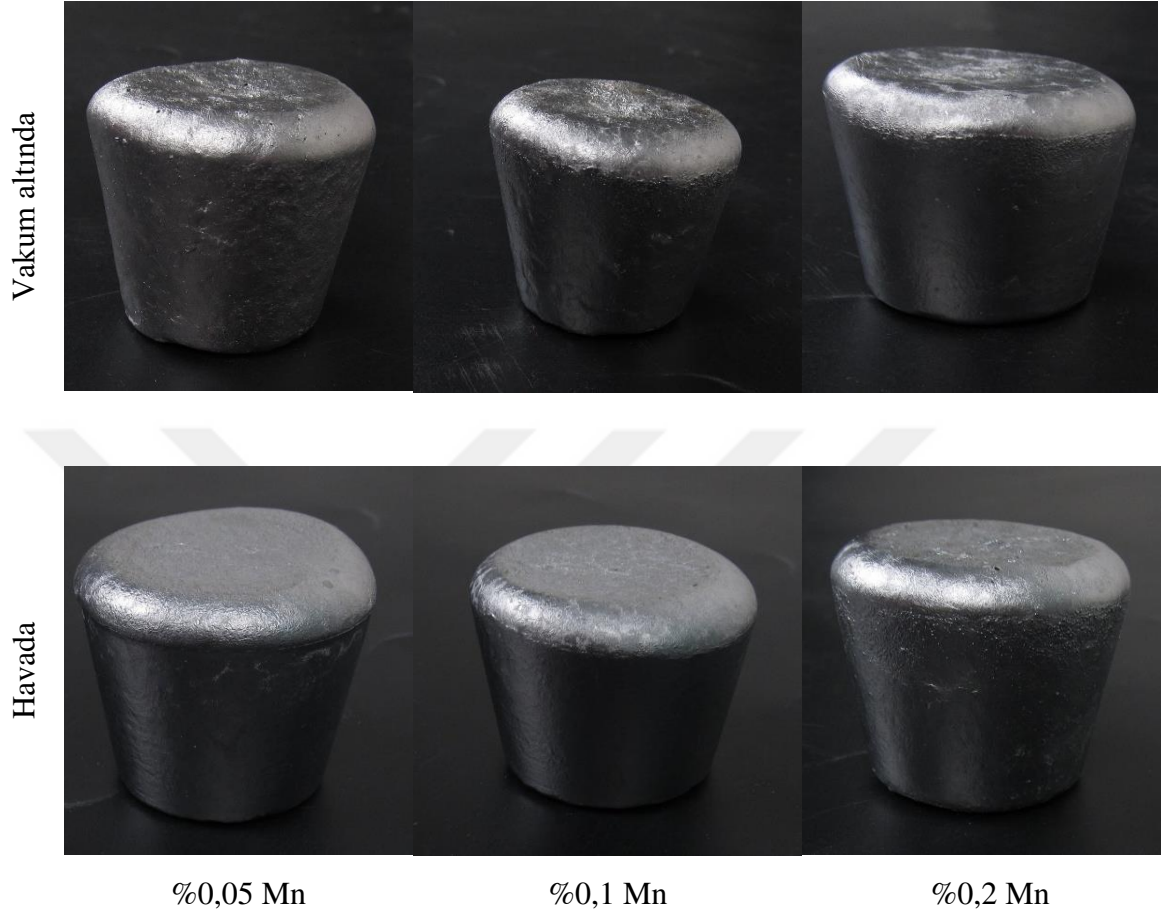
Deney Seri No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sr	Al
0,1 Fe - 0,05 Mn	6,94	0,13	0,001	0,065	0,26	<0,0010	0,13000	0,0010	0,005	0,0009	0,003	92,464
0,1 Fe - 0,1 Mn	7,35	0,12	0,003	0,102	0,22	<0,0010	0,12000	0,0010	0,004	0,0008	0,002	92,077
0,1 Fe - 0,2 Mn	7,28	0,11	0,001	0,191	0,25	<0,0010	0,12000	0,0008	0,001	0,0009	0,035	92,01
0,15 Fe - 0,05 Mn	7,18	0,17	0,001	0,046	0,24	<0,0010	0,13000	0,0010	0,004	0,0002	0,008	92,219
0,15 Fe - 0,1 Mn	7,12	0,16	0,001	0,104	0,22	<0,0010	0,12000	0,0010	0,003	0,0010	0,003	92,267
0,15 Fe - 0,2 Mn	7,38	0,17	0,001	0,202	0,25	<0,0010	0,13000	0,0010	0,003	0,0009	0,012	91,85
0,2 Fe - 0,05 Mn	7,31	0,21	0,004	0,058	0,29	<0,0010	0,12000	0,0031	0,015	0,0009	0,008	91,981
0,2 Fe - 0,1 Mn	7,33	0,19	0,001	0,112	0,21	<0,0010	0,12000	0,0009	0,002	0,0008	0,002	92,031
0,2 Fe - 0,2 Mn	7,27	0,19	0,001	0,201	0,20	<0,0010	0,13000	0,0008	0,003	0,0009	0,001	92,202

Tablo 3’da görüldüğü gibi alaşım kimyasal bileşimi A356 standardına uygun olduğu ve ilave edilmesi planlanan miktarlarda Fe ve Mn ilavesi gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. İlk üç deneyde Fe oranı %0,1 olarak ayarlanmış ve deneylerde sırasıyla %0,13, %0,12 ve %0,11 olarak bulunmuştur. %0,15 Fe içeren deneylerde de Fe içerikleri sırasıyla %0,17, %0,16 ve %0,17 olarak tespit edilmiştir. %0,2 Fe içeren deneylerde benzer şekilde çok az % değişim ile %0,21 %0,19 ve %0,19 değerinde sonuçlar gözlenmiştir. Alaşımda hedeflenen Fe içerikleri için fire jant, talaş hurdası ve A356 primer külçesi kullanıldığından külçe içeriklerindeki farka bağlı olarak sonuca etki etmeyecek %0,01-%0,05 arası farklar ortaya çıkmıştır.

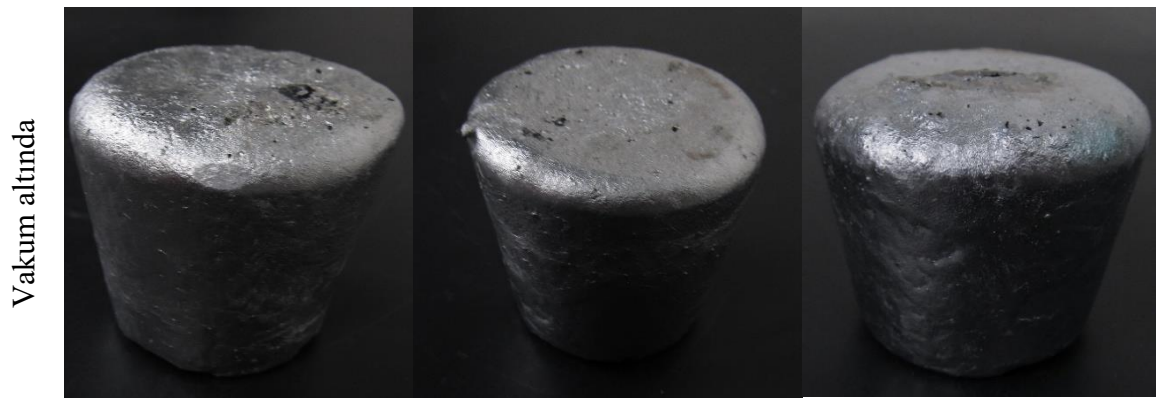
3.2. SIVI METAL KALİTESİNİN ANALİZİ

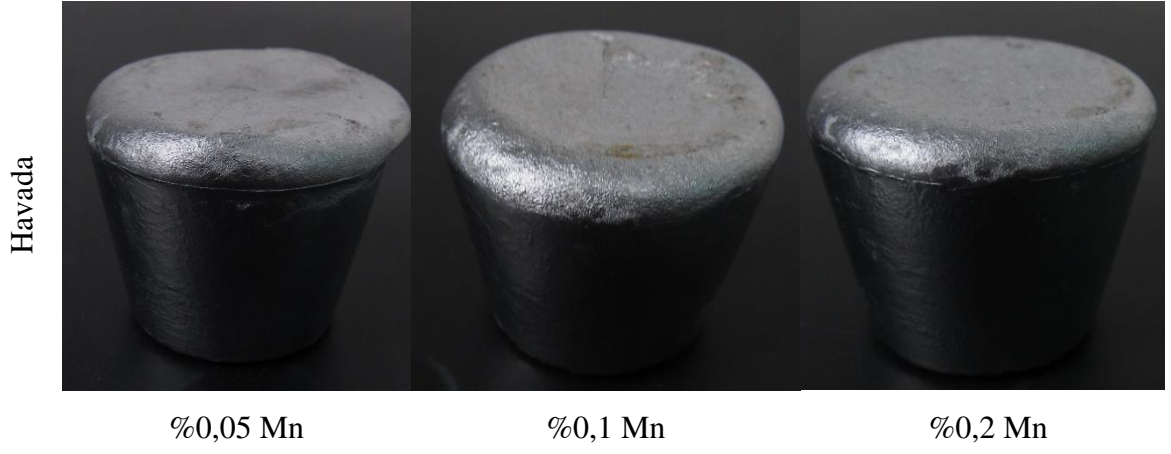
Çalışmada, sıvı metal içerisinde olası gazların sonucu etkilemesinin önüne geçilmesi amacıyla döküm öncesi sıvı metal kalitesi testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sıvı metal kalitesinin belirlenmesi için RPT testi ve K-mold kalıbına yapılan numuneler incelenmiştir. RPT numuneleri makro inceleme, yoğunluk indeksi, bifilm analizi incelemeleri yapılmıştır.

Şekil 25’de %0,1 Fe, Şekil 26’da %0,15 Fe ve Şekil 27’de %0,2 Fe içeren deneylere ait vakum altında ve havada katılaştırılan numune görselleri verilmiştir.

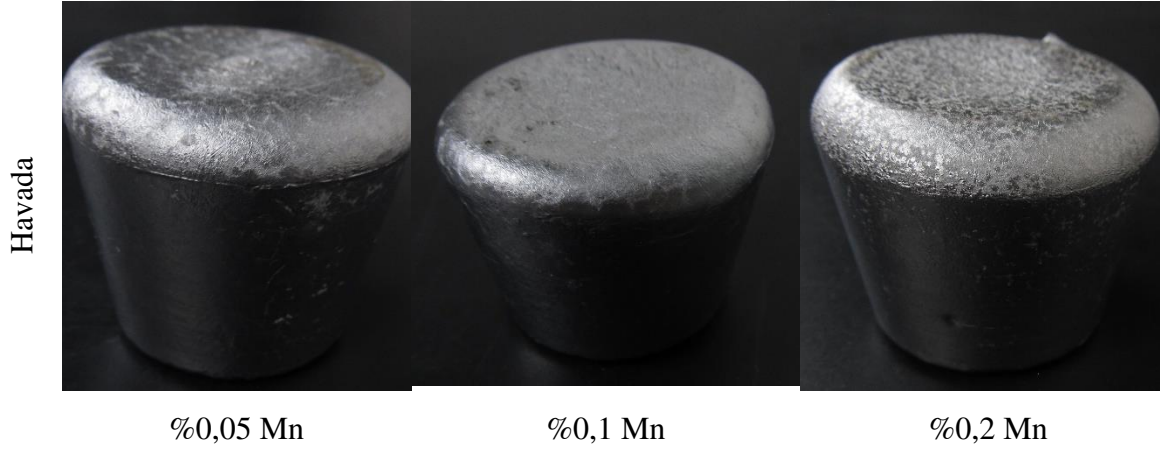
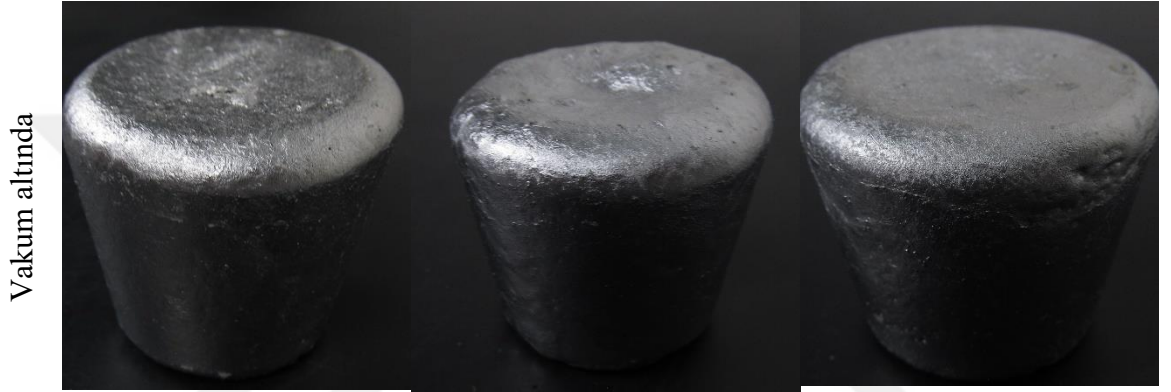


Şekil 25: %0,1 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri



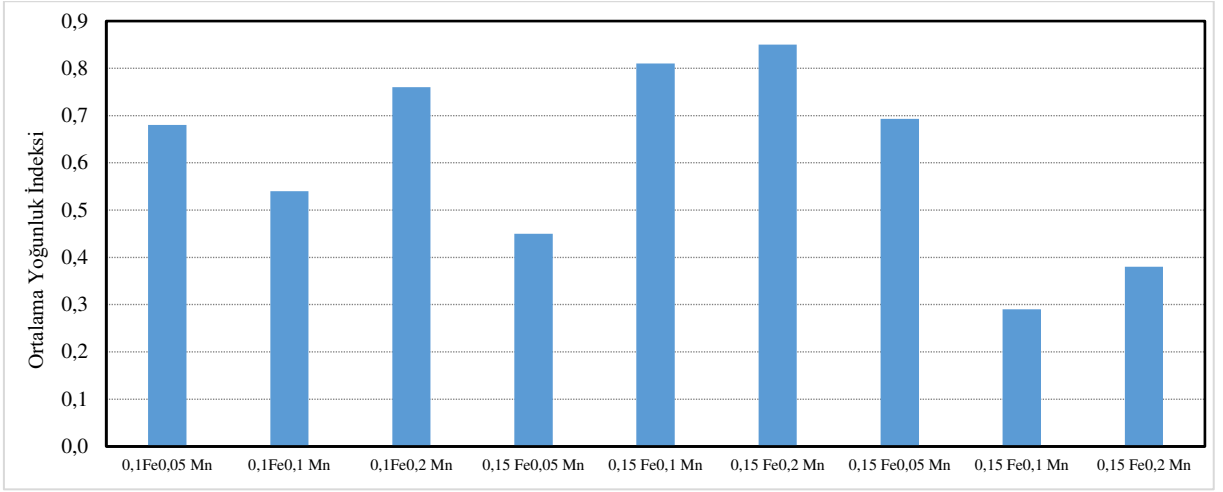


Şekil 26: %0,15 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri



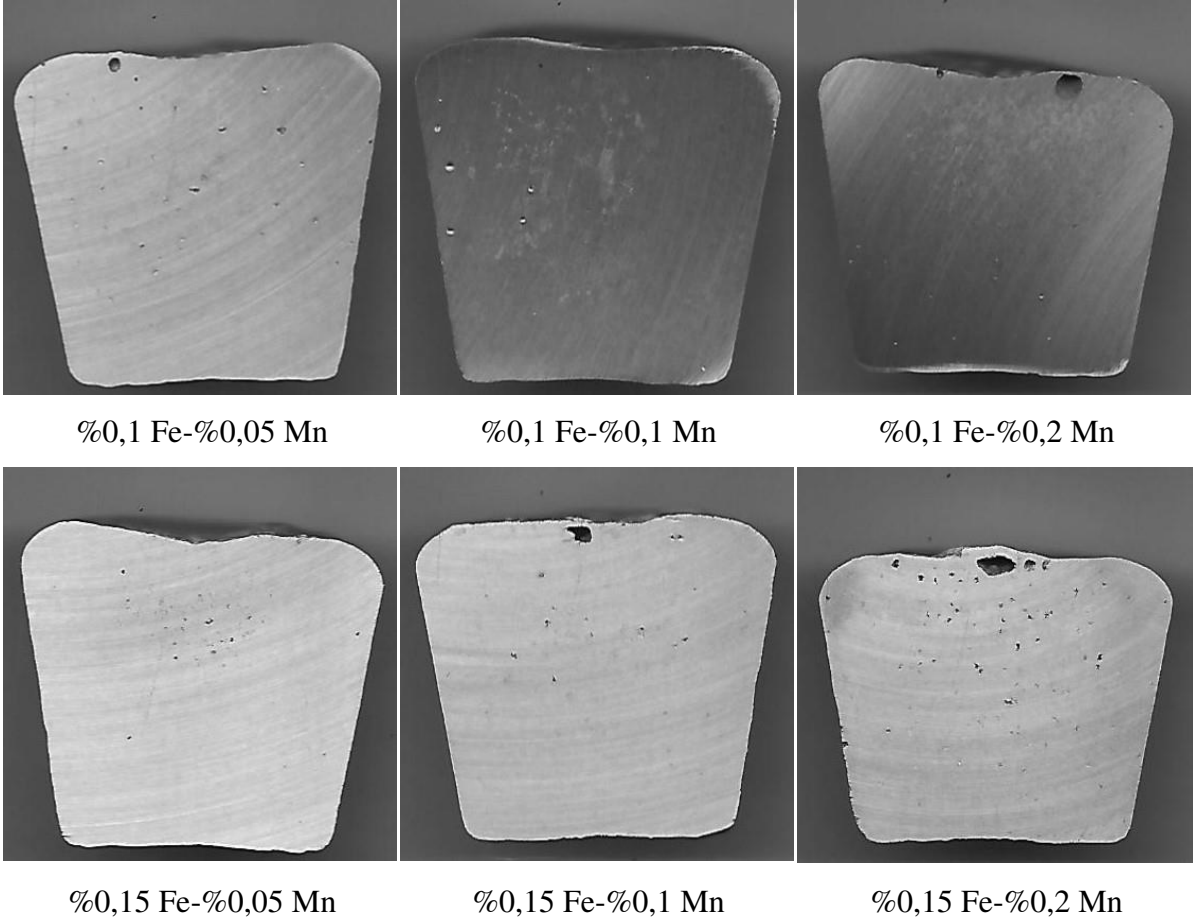
Şekil 27: %0,2 Fe İçeren Deneylere Ait Havada ve Vakum Altında Numune Görselleri

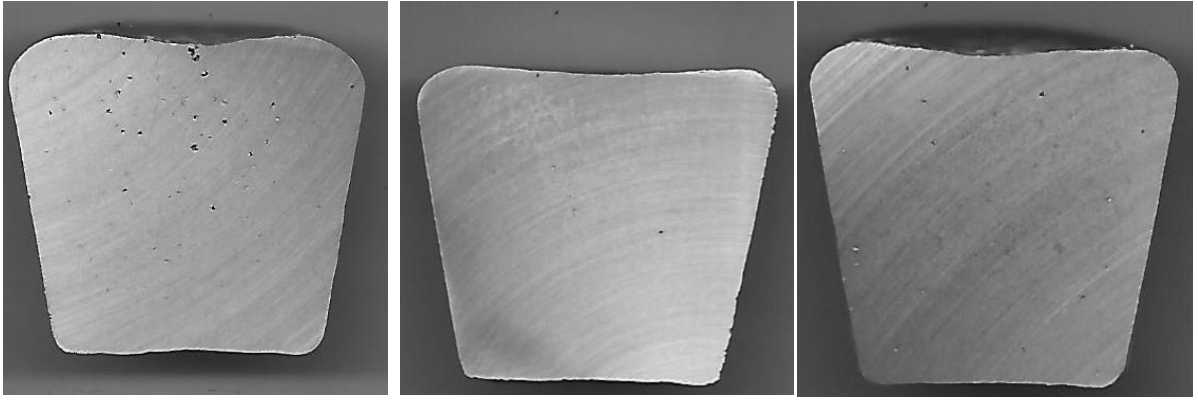
Sıvı metal incelemesi için vakum altında ve havada katılaştırılan numunelere ait Şekil 26, 27 ve 28’de verilen görseller incelendiğinde havada katılaşan numunelerin yüzeyinde çöküntüler mevcut olup, vakum altında katılaşan numunelerde bir miktar kabarma olduğu tespit edilmiştir. Sıvı metal temizliği açısından mevcut gazlılık durumunun ne derece olduğunun tespiti açısından numuneler bütün olarak yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 29’da numunelere ait ortalama yoğunluk indeksi hesaplamaları grafiği verilmiştir.



Şekil 28: RPT Numunelerine Ait Ortalama Yoğunluk İndeksi Değerleri

Şekil 28’da verilen sonuçlar incelendiğinde, yoğunluk indeksi değerleri 0,29 ile 0,85 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yoğunluk indeksi değeri, 0,29 hesaplanan deney %0,15 Fe- %0,1 Mn sahip olan deneydir. 0,85 yoğunluk indeksine sahip olan deney ise %0,1 Fe- %0,2 Mn oranına sahip olan deneydir. Vakum altında katılaştırılan RPT numuneleri, kesit yüzeylerinin incelenmesi açısından ortadan dikey olarak ikiye kesildikten sonra yüzeyleri zımparalanarak taranmıştır. Şekil 29’da verilen taranmış yüzey görüntüleri verilmiştir.





%0,2 Fe-%0,05 Mn

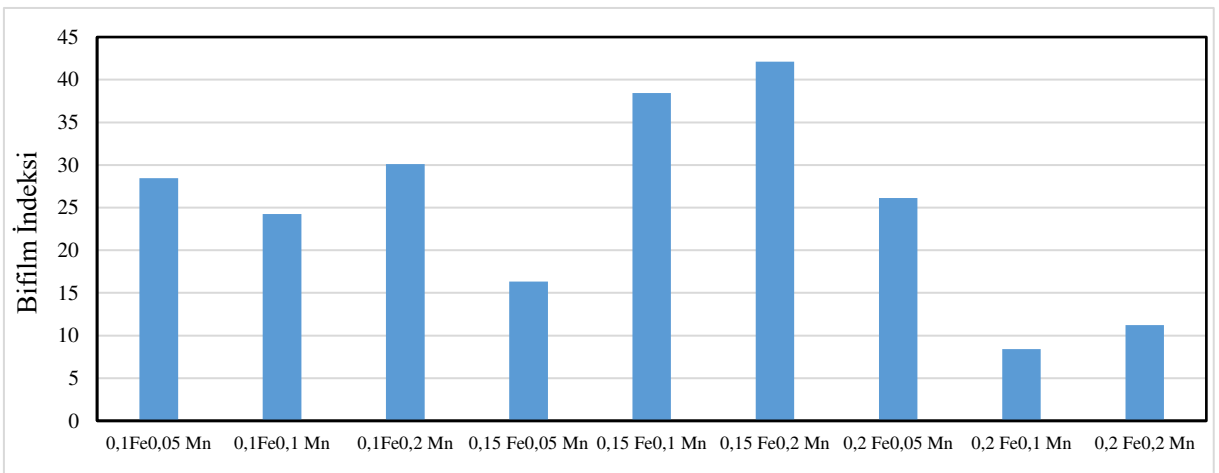
%0,2 Fe-%0,1 Mn

%0,2 Fe-%0,2 Mn

Şekil 29: RPT Numuneleri Kesit Yüzey Görüntüleri

Şekil 29’da verilen kesit yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyde gözeneklerin minimum seviyede olması da sıvı metal temizliğini göstermektedir. Çeşitli araştırmacılar, RPT 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). Farklı bir çalışmada, sıvı metal kalitesinin uygunluğunun kontrolü için numuneler üzerinden tespitler yapılmış, numunede yüzeyinde öküntü olması ve gözenek miktarının %0,5’in altında olmasının sıvı metal kalitesi açısından uygun olduğunu belirtilmiştir (Uludağ vd., 2018).

Vakum altındaki numunelere ait kesit yüzey görüntülerinden detayları Deneysel Çalışmalar bölümünde açıklandığı gibi bifilm analizi gerçekleştirilmiştir. Bifilm analizi ile numunelerde bulunan gözeneklerin, sayısal verilerle karşılaştırılması sağlanmıştır. Her deneyde yapılan ölçümlere ait ortalama Bifilm sonuçları Şekil 30’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 30: RPT Numuneleri Ortalama Bifilm İndeksi Grafiği

Şekil 30’da görülen değerler incelendiğinde, bifilm değerleri 8,40 ile 42,12 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bifilm değeri 8,4 hesaplanan deney %0,2 Fe- %0,1 Mn sahip olan deneydir. 42,12 yoğunluk indeksine sahip olan deney ise %0,15 Fe- %0,2 Mn oranına sahip olan deneydir.

Çalışmada, sıvı metal temizliği ayrıca, K-mold kalıbına yapılan döküm numuneler ile değerlendirilmiştir. Şekil 31’de K-mold numunesine ait örnek numune görüntüsü verilmiştir.



Şekil 31: K-mold Örnek Numunesine Ait Üst ve Yan Görüntüsü

K-Mold test yönteminde amaç, alüminyum alaşımlarının döküm öncesi metal temizliğinin uygunluğunu kırılma yöntemi ile kontrol etmektir. K-Mold yöntemi kolay kullanım, kısa sürede hızlı sonuç vermesi, numunelerin kolay elde edilmesi, taşınabilirlik, inklüzyonların gözle görülür düzeyde belirlenmesi ve maliyet açısından ekonomik olması gibi avantajları vardır (Djurdjevic vd., 2010). Numuneler, çentikli bölgelerden kırılarak, kırık yüzeylerin görselleri temin edilmiştir. Şekil 32’de K-mold numune kırık yüzeylerinin görselleri sunulmaktadır. Şekil 32’de kırık yüzeylerinde sayılan inklüzyon ve sayım yapılan parça adetine bağlı olarak belirlenen ortalama K değeri sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.



%0,1 Fe-%0,05 Mn

%0,1 Fe-%0,1 Mn

%0,1 Fe-%0,2 Mn



%0,15 Fe-%0,05 Mn

%0,15 Fe-%0,1 Mn

%0,15 Fe-%0,2 Mn



%0,2 Fe-%0,05 Mn

%0,2 Fe-%0,1 Mn

%0,2 Fe-%0,2 Mn

Şekil 32: K-mold Numunelerine Ait Kırık Yüzey Örnek Görüntüleri

Tablo 4: Deney Numunelerine Ait Ortalama K Değeri

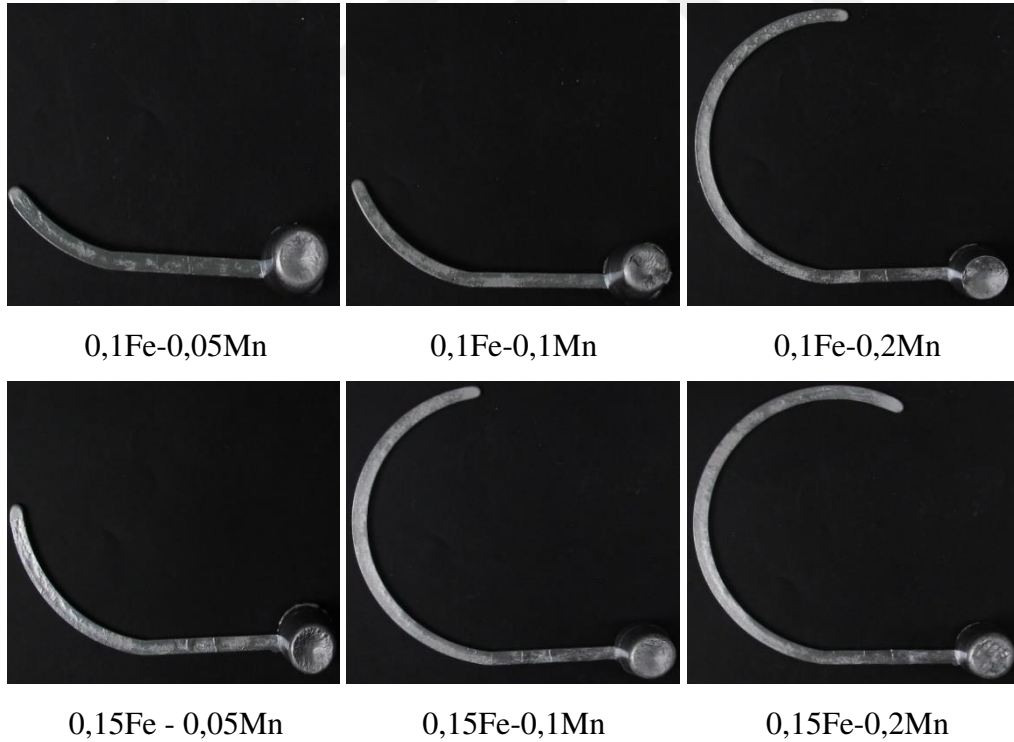
Numune Adı	İnklüzyon Sayısı	K-mold parça sayısı	K değeri
%0,1 Fe-%0,05 Mn	3	4	0,75
%0,1 Fe-%0,1 Mn	1	4	0,25
%0,1 Fe-%0,2 Mn	1	4	0,25
%0,15 Fe-%0,05 Mn	2	4	0,50
%0,15 Fe-%0,1 Mn	3	4	0,75
%0,15 Fe-%0,2 Mn	3	4	0,75
%0,2 Fe-%0,05 Mn	2	4	0,50
%0,2 Fe-%0,1 Mn	3	4	0,75
%0,2 Fe-%0,2 Mn	3	4	0,75

Tablo 4’de K-mold kesit yüzey görsellerinden elde edilen K değerlerinin incelendiğinde yapılan bütün döküm testlerinde ortaya çıkan K değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. K-mold ve RPT verileri, sıvı metal temizliğinin döküm içinde gaz kaynaklı gözenek meydana gelmesini önlemek için yeterli düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, dökümlerde olası gözeneklerin genellikle gaz kaynaklı olmadığını ve eğer varsa, yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözeneklerinin neden olabileceği düşüncesini desteklemektedir. Balaban ve ark. yaptıkları çalışmada K-mold değeri<0,5 olduğunda sıvı metalin temiz olduğu anlaşılmaktadır. 0,5<K değeri<1,0 aralığında kabul edilebilir değerlerde olduğunu ve K-değeri>1,0 üzerinde olduğunda kesinlikle sıvı metalin temizlenmesi yapılması gerektiği vurgulamıştır. Sıvı metal kalitesini değerlendirmek için K-mold test yöntemini kullanılarak çalışmalarda, K değerleri 1’in altında olduğunda kabul edilebilir kalitenin elde edildiğini ve temizleme işleminin etkinliğini doğruladığını göstermektedir. Deneysel sonuçlar, temizlenmeden dökülen numunelerin 1’i aşan K değerleri sergilediğini ortaya koymakta ve bu gibi durumlarda temizleme işleminin gerekliliğinin altını çizmektedir (Gyarmati vd., 2022). Tokatlı ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada sıvı metal temizliğinde K değerinin 0,5’in altında olması gerektiğini savunmuş, özellikle K değerinin 1’den büyük olduğu seviyelerde sıvı metal

kalitesi uygun olmadığını, sıvı metal temizliğinin yapılmasının gerektiğini belirtmiştir (Tokatlı vd., 2022). Elde edilen K değerleri incelemesi yapıldığında, tüm deneylerde 1,0'ın altındaki değerlerde olduğu ve sıvı metal kalitesinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu ve bu durum, temizleme işleminin uygun olduğunun teyiti yapılmaktadır (Balaban, Şen, Özer & Güler, 2006). Sıvı metal temizliğine yönelik K-mold değerleri ve RPT sonuçları incelemesi yapıldığında, döküm içerisinde gaz kaynaklı gözenek oluşmasını engellemek ve sıvı metal temizleme işleminin yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, dökümlerde oluşması muhtemel inklüzyonlar gaz kaynaklı olmayacaktır. Oluşan inklüzyonlar yetersiz beslemeye dayalı çekinti gözenekleşmesi nedeni ile olabileceği düşünülmektedir.

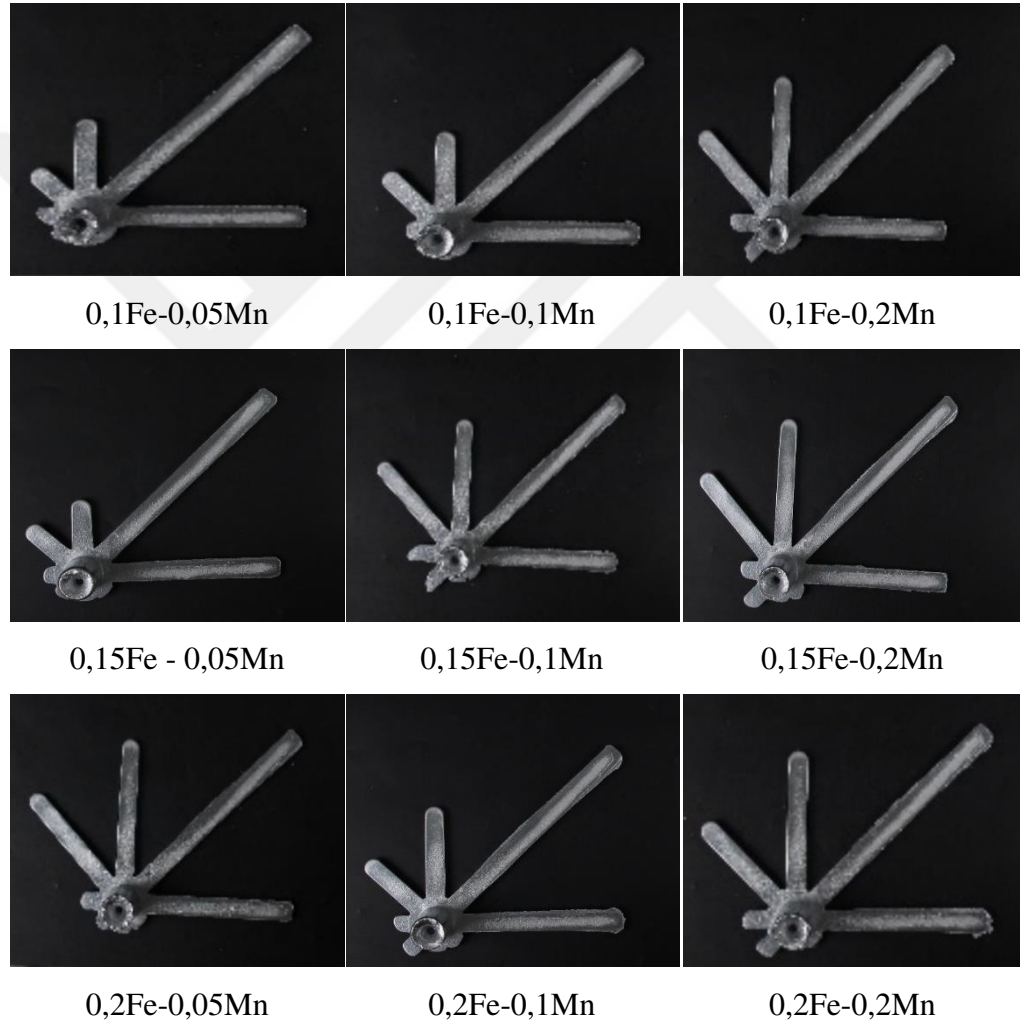
3.3. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI

A356 alüminyum alaşımının dökümünde akıcılığa etki eden parametreler spiral akıcılık kalıbı ve 8 kanallı akıcılık kalıbından çıkan numuneler aracılığı ile incelenmiştir. Belirlenen farklı deney parametrelerinin spiral akıcılık kalıbına yapılan dökümlerden elde edilen numunelere atit temsili resimleri Şekil 34'de, 8 kanallı akıcılık kalıbına yapılan dökümlerden elde edilen temsili numune resimleri Şekil 33'de verilmiştir.



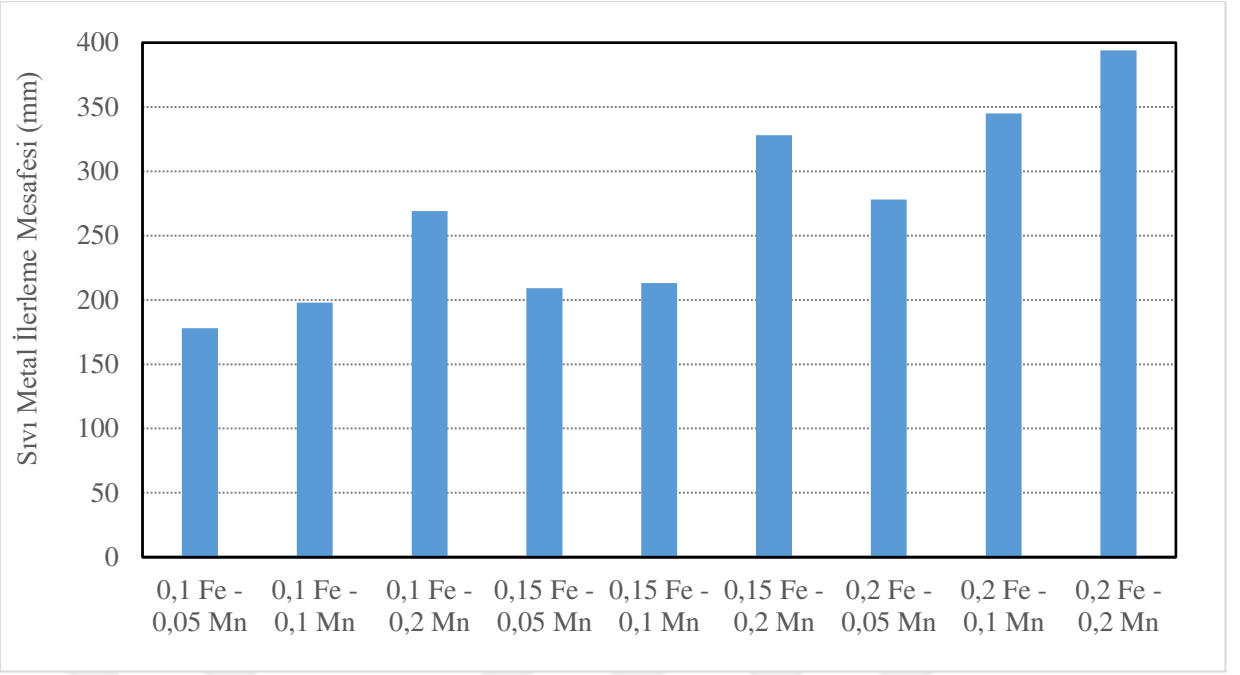


Şekil 33: Spiral Akıcılık Örnek Numune Resimleri



Şekil 34: 8 Kanallı Akıcılık Örnek Numune Resimleri

Şekil 34’de verilen spiral akıcılık numune görüntüleri incelendiğinde farklı deney parametreleri uygulanan numunelerin, sıvı metal ilerleme mesafelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Spiral akıcılık numunelerinden elde edilen ortalama sıvı metal ilerleme mesafeleri grafiği Şekil 35’te verilmiştir.



Şekil 35: Spiral Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafelerine Ait Ortalama Grafiği

Şekil 36’da verilen grafik incelendiğinde, sıvı metal ilerleme mesafeleri 178 ile 394 mm arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek sıvı metal ilerleme mesafesi 394 mm ile %0,2 Fe- %0,2 Mn deneyinde, en düşük sıvı metal ilerleme mesafesi ise 178 mm ile %0,1 Fe- %0,05 Mn deneyinde ölçülmüştür. %Fe oranı arttıkça ilerleme mesafelerinde artış gözlemlenmiştir. Benzer iekilde Mn oranındaki artış sıvı metal ilerleme mesafelerinde artışla sonuçlanmıştır.

Şekil 35’de verilen 8 kanallı akıcılık kalıbı numune görüntüleri incelendiğinde farklı deney parametreleri uygulanan numunelerin, sıvı metal ilerleme mesafelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. 8 kanallı akıcılık numunelerinden elde edilen ortalama sıvı metal ilerleme mesafeleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: 8 Kanallı Akıcılık Sıvı Metal İlerleme Mesafelerine Ait Ortalama Sonuçlar

Deney Seri No	Sıvı Metal İlerleme Mesafesi (mm)								Akıcılık İndeksi
	0,5 mm (55 mm)	1 mm (80 mm)	2 mm (80 mm)	3 mm (120 mm)	4 mm (170 mm)	5 mm (175 mm)	6 mm (175 mm)	8 mm (250 mm)	
0,1 Fe - 0,05 Mn	4,00	9,00	8,00	11,00	45,00	52,00	175,00	250,00	106,73
0,1 Fe - 0,1 Mn	4,00	8,00	7,00	15,00	62,00	83,00	175,00	250,00	117,02
0,1 Fe - 0,2 Mn	8,00	9,00	14,00	28,00	46,00	97,00	175,00	250,00	132,65
0,15 Fe - 0,05 Mn	7,00	9,00	18,00	10,00	57,00	75,00	175,00	250,00	125,00
0,15 Fe - 0,1 Mn	8,00	10,00	19,00	21,00	95,00	125,00	175,00	250,00	151,67
0,15 Fe - 0,2 Mn	8,00	9,00	11,00	20,00	126,00	148,00	175,00	250,00	158,68
0,2 Fe - 0,05 Mn	7,00	9,00	27,00	19,00	17,00	132,00	175,00	250,00	133,90
0,2 Fe - 0,1 Mn	5,00	9,00	23,00	24,00	104,00	140,00	175,00	250,00	152,92
0,2 Fe - 0,2 Mn	8,00	11,00	32,00	35,00	114,00	129,00	175,00	250,00	169,38

Tablo 8’de verilen değerler incelendiğinde değişen kesit kalınlıklarında farklı sıvı metal ilerleme mesafeleri olduğu tespit edilmiştir. Akıcılık indeksi değeri ile tüm kalıbı bir bütün

olarak değerlendirdiğimizde sonuçların spiral akıcılık kalıbı ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Genel olarak Fe oranının artması ile akıcılık özelliklerinin azaldığı ve Mn ilavesi ile akıcılıkta olumlu yönde değişim olduğu tespit edilmiştir. Akıcılık indeksi yaklaşımının değişen kesitli kalıplarda karşılaştırma için çok faydalı bir metot olduğu tespit edilmiştir (Durmuş vd., 2024).

Akıcılık zerine yapılan literatürdeki çalışmalar incelendiğinde deneylerde elde edilen sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalarda alaşım elementi ilaveleri ile sıvı metal akıcılığının olumsuz yönde etki edebileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca sıvı metal temizleme işlemlerinin de alaşımda bulunan safsızlık elementleri, oksitler, kapanımlar gibi oluşumların zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için olumlu etkileri olduğu ve bunun da akıcılığa olumlu katkı sağladığı ifade edilmektedir (Erzi vd., 2019; olak vd., 2016).

3.4. MEKANİK TESTİ SONUÇLARI

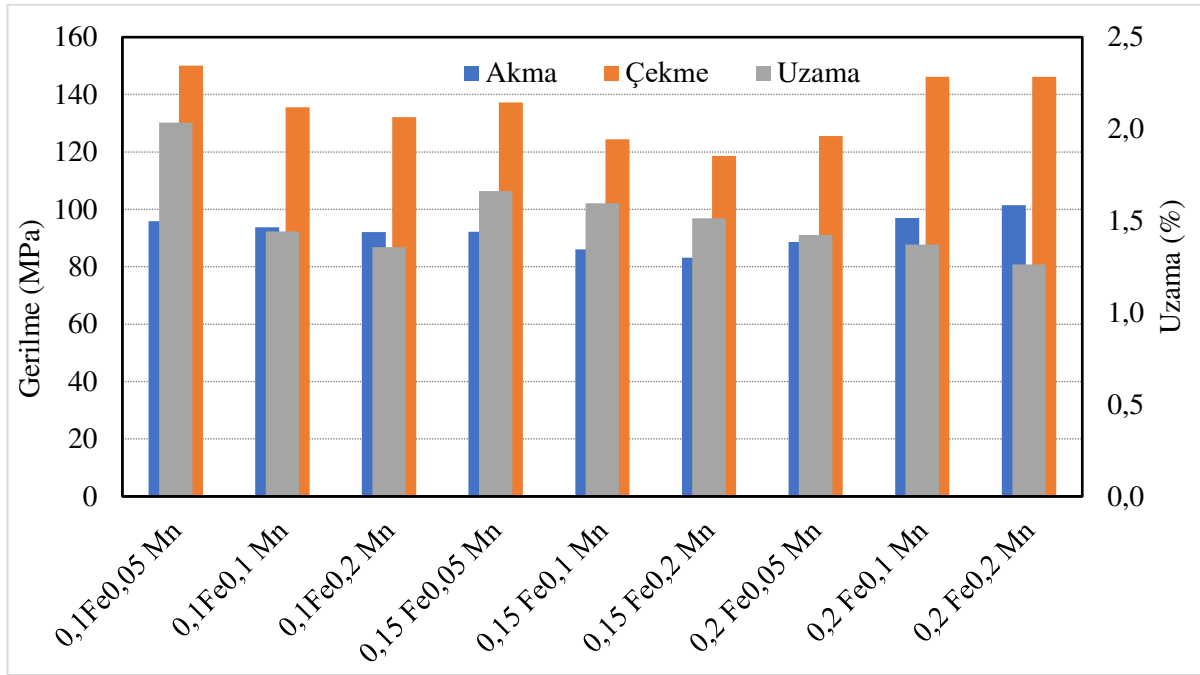
Mekanik testler için, A356 alaşımının farklı oranlarda %Fe ve %Mn takviyesiyle hazırlanan dökümlerinden numuneler temin edilmiştir. Numuneler, ekme testi sonuçlarının incelenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Mekanik test kalıbı numuneleri yolluklarından kesildikten sonra çekme çubuğu formuna getirilerek çekme testine tabi tutulmuştur. Tablo 6’da çekme testi ile elde edilen ortalama çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerleri konumuna göre verilmiştir.

Tablo 6: Mekanik Test Kalıbı ekme ubuğu Test Sonucu

Deney Seri No	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum ekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
0,1 Fe - 0,05 Mn	95,86	150,06	2,03
0,1 Fe - 0,1 Mn	93,75	135,56	1,44
0,1 Fe - 0,2 Mn	92,11	132,09	1,36
0,15 Fe - 0,05 Mn	92,21	137,25	1,66
0,15 Fe - 0,1 Mn	86,04	124,40	1,60
0,15 Fe - 0,2 Mn	83,20	118,60	1,51
0,2 Fe - 0,05 Mn	88,67	125,50	1,42
0,2 Fe - 0,1 Mn	97,03	146,15	1,37
0,2 Fe - 0,2 Mn	101,40	146,20	1,26

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde akma dayanımı sonuçlarının 83,2 MPa ile 101,4 MPa arasında değiştiği, çekme dayanımı sonuçlarının 118,6 MPa ile 150,06 MPa arasında değiştiği görülmektedir. % uzama değerlerinin tüm deneyşerde %1,26 ile %2,03 arasında olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçlarına ilişkin olarak, çekme testi sonuçları şekil 26’da grafik olarak verilmiştir. Her bir döküm için en az 3 numune üzerinde testler

yapılmıştır. Grafikte yer alan değerler, her bir döküm için elde edilen ortalama çekme testi sonuçlarını ifade etmektedir.



Şekil 36: Yapılan Deneysel İçeriklerden Elde Edilen Ortalama Çekme Test Sonuçları

Şekil 36’da verilen deney sonuçları incelendiğinde akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin %0,1 ve %0,15 Fe içeren deneylerde Mn ilavesi ile azaldığı gözlenmiştir. Ancak %0,2 Fe içeren dökümlerde akma ve çekme deneylerinde Mn ilavesi ile artış gözlenmiş ancak % uzama değerlerinde yine düşüş devam etmiştir. En yüksek akma dayanımı değeri 101,4 MPa ile %0,2 Fe ve %0,2 Mn içeren deneyde elde edildiği tespit edilmiştir. Maksimum çekme gerilmesi için en yüksek değer 150,06 MPa değeri ile %0,1 Fe ve %0,05 Mn içeren deneyde elde edilirken en düşük değer %0,15 Fe ve %0,1 Mn içeren deneyde 118,6 MPa olarak ölçülmüştür. % uzama için artan Fe ve Mn içerikleri olumsuz etki ortaya çıkardığı gözlenmiştir. En yüksek uzama %2,03 ile %0,1 Fe ve %0,05 Mn ilaveli deneyde iken en düşük %uzama değeri %1,26 değeri ile %0,2 Fe ve %0,2 Mn içeren döküm deneylerine uygulanan testlerde elde edilmiştir.

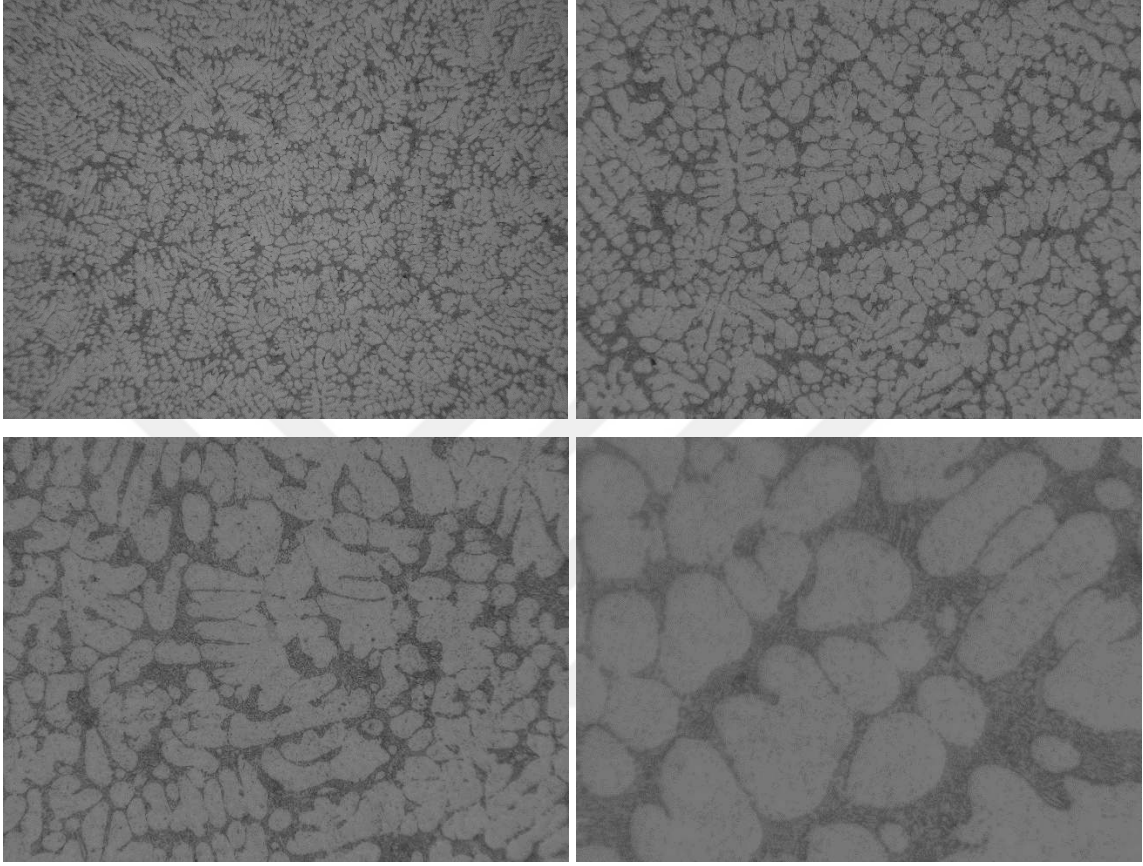
Literatür incelendiği zaman dökümlerde ergiyik içerisinde var olan katışkılarından, farklı safsızlıklardan kaynaklı kusurlar bulunabilir. Bu var olan oluşumlar, gaz boşlukları veya döküm sırasında oluşan katışkıların (inklüzyonlar) varlığı, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu zararlı etkilerin ne olduğu, yapıda bulunan oranının bu etkileri nasıl değiştirdiği üzerine ve bu olumsuz durumların giderilebilmesi için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir.

Ak tarafından yapılan çalışmada; AA206 alaşımında 5 farklı seviyede (0,07, 0,11, 0,2, 0,32 ve 0,4) demirin etkisini incelemiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda çekme mukavemetlerinin ve sünekliklerinin Fe seviyesinin artmasıyla azaldığı görülmüştü (Ak, 2012). Podprocká vd. tarafından yapılan çalışmada, farklı miktarlarda Mn ve Fe içeriğine sahip AlSi7Mg0.3 alaşımında demir bazlı intermetalik fazların oluşumu üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak ise alaşımdaki demir içeriğinin ve mangan içeriğinin artmasının intermetalik bileşiklerin daha fazla oluşmasına neden olduğunu görmüşlerdir (Podprocká & Bolibruchová, 2018). Shabestari tarafından Fe ve Mn içeriğinin Al-Si alaşımlarında intermetalik bileşiklerin morfolojisi üzerindeki etkisi Al-12.7 % Si alaşımında incelenmiştir. Çalışma sonucunda Fe ve Mn oranının artmasıyla intermetalik bileşiklerin hacminin arttığını ve alaşımdaki elementlerin oranlarının değişmesiyle bileşiklerin morfolojilerinin değiştiğini gözlemlemiştir (Shabestari, 2004). Tunçay ve Bayoğlu tarafından yapılan çalışmada, geleneksel kum döküm yöntemiyle dökülen A356 alaşımının farklı Fe içeriklerinde mikroyapı ve gerilme mukavemeti incelenmiştir. Sonuç olarak yapıda bulunan β -Al₅FeSi ve α -Al₈Fe₂Si fazları yapıda demir içeriği arttıkça β -Al₅FeSi fazına dönüştüğü ve bu dönüşüm sonucunda yapıda keskin kenarlı intermetalikler arttığı gözlenmiştir. Çekme testi sonuçlarının da demir içeriğinin artmasıyla azaldığı sonucuna varmışlardır. (Tunçay, & Bayoğlu, 2017.) Ferraro vd tarafından yapılan çalışmada, ikincil yüksek basınçlı döküm AlSi9Cu3(Fe) alaşımındaki kalıntı parçacıklarının değişimini farklı oranlarda elementler Fe (%0,80, 1,00, 1,20), Mn (%0,25, 0,40, 0,55) ve Cr (%0,06, 0,10) katarak incelemiştir. Sonuç olarak Fe, Mn ve Cr oranlarındaki artışların çok yüzölçümlü ve yıldız benzeri morfolojilerde (α -Al_x(Fe,Mn,Cr)_ySi_z) ve yüksek Fe:Mn oranında, iğnemsiz β -Al₅FeSi parçacıklarının varlığının artış gösterdiğini görmüşlerdir. Bu artışların tortu oluşumunu desteklediği sonucuna varmışlardır (Ferraro vd., 2015).

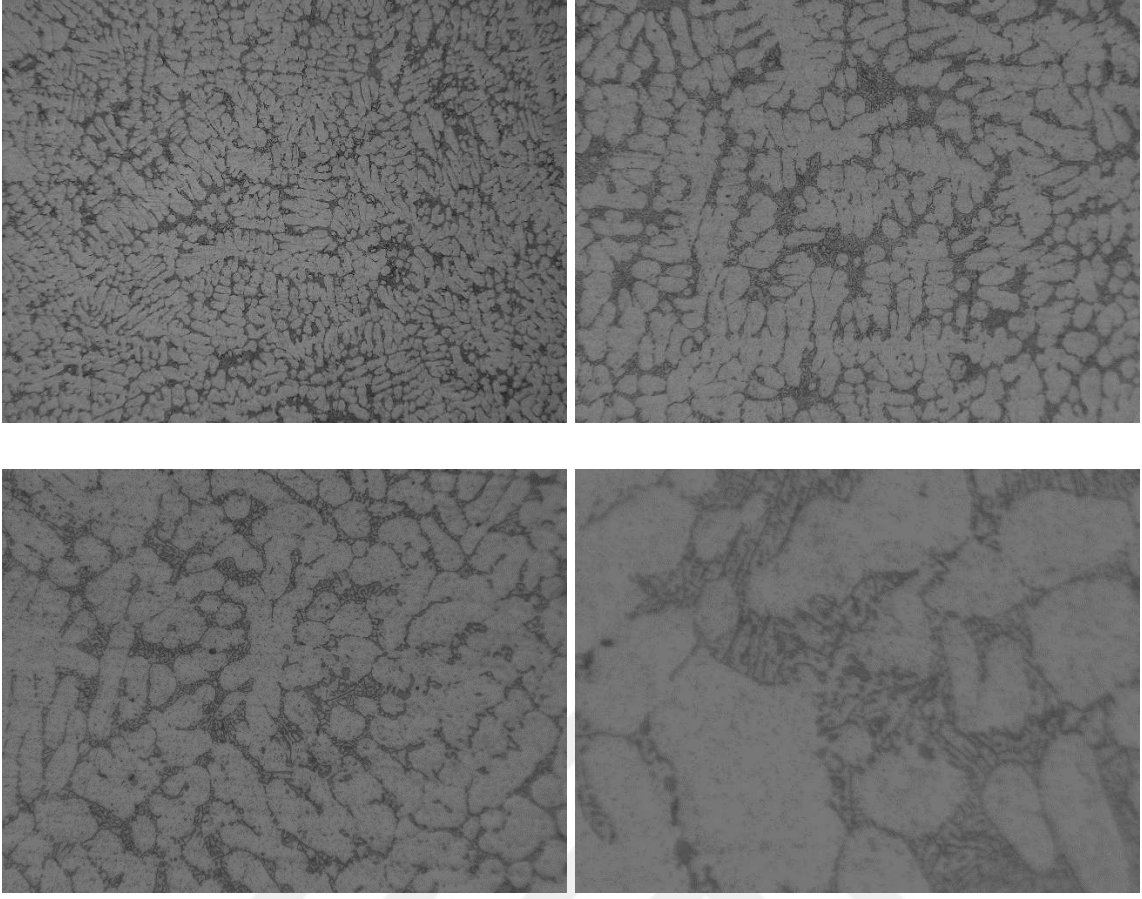
3.5. MİKROYAPI SONUÇLARI

A356 alaşımında farklı %Fe ve %Mn oranlarının katılaşma zamanına göre mikroyapıya etkisini incelemek için basamak kalıbına dökümler gerçekleştirilmiştir. %0,1 Fe içeren deneylerde %0,05 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri Şekil 37’de, %0,1 Fe içeren deneylerde, %0,1 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri Şekil 38’de, %0,1 Fe içeren deneylerde, %0,2 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri, Şekil 39’de, %0,15 Fe içeren deneylerde %0,05 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri, Şekil 40’de, %0,15 Fe içeren deneylerde %0,1 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri, Şekil 41’de, %0,15 Fe içeren deneylerde %0,2 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı

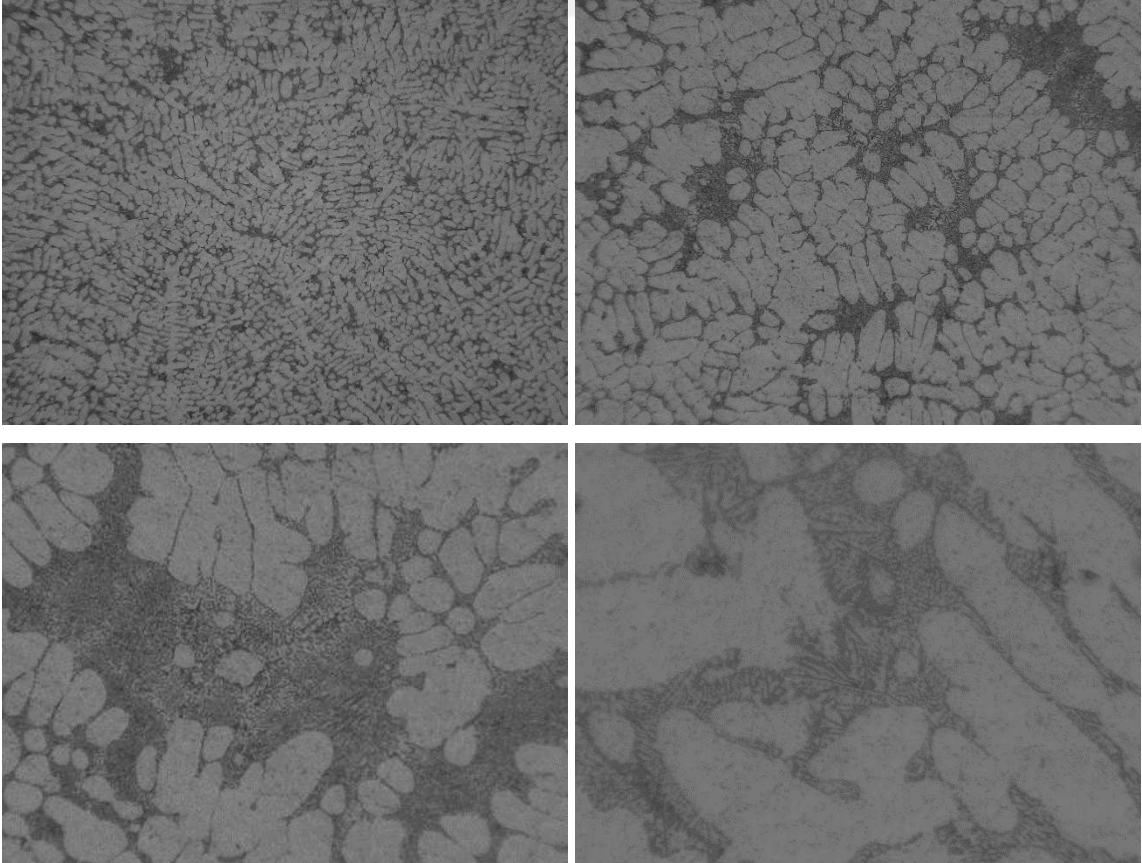
görüntüleri Şekil 42’de, %0,2 Fe içeren deneylerde %0,05 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri Şekil 43’de, %0,2 Fe içeren deneylerde %0,1 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri Şekil 44’da, %0,2 Fe içeren deneylerde %0,2 Mn içeren deneyin farklı katılaşma zamanına sahip numune mikroyapı görüntüleri Şekil 45’de verilmiştir.



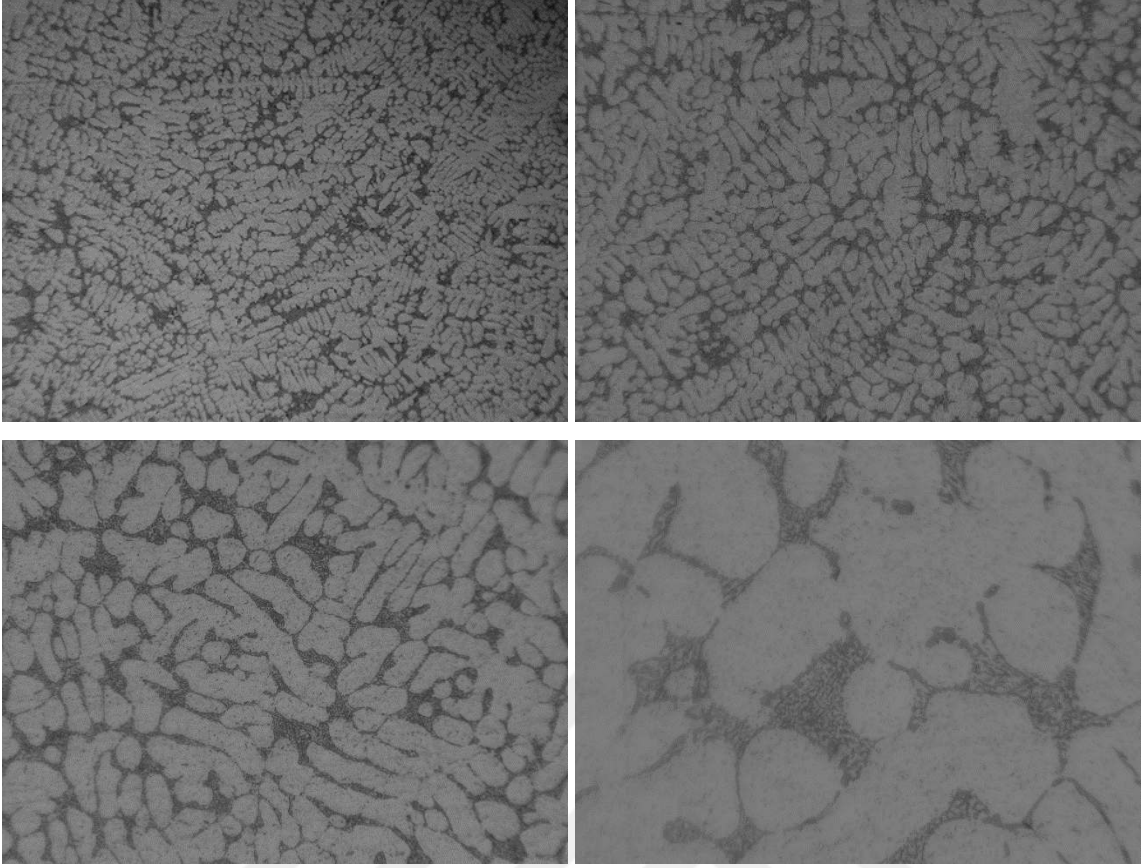
Şekil 37: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Numune Mikroyapı



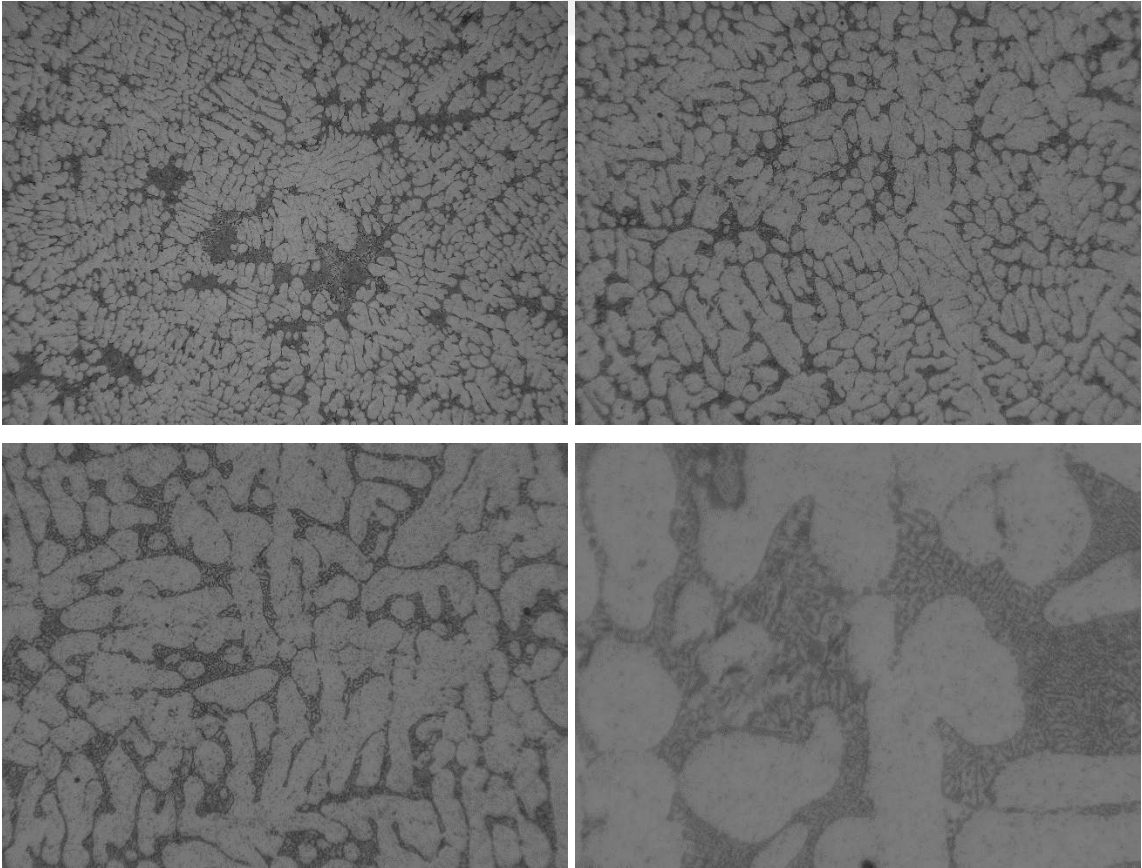
Şekil 38: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Deneyin Numune Mikroyapı



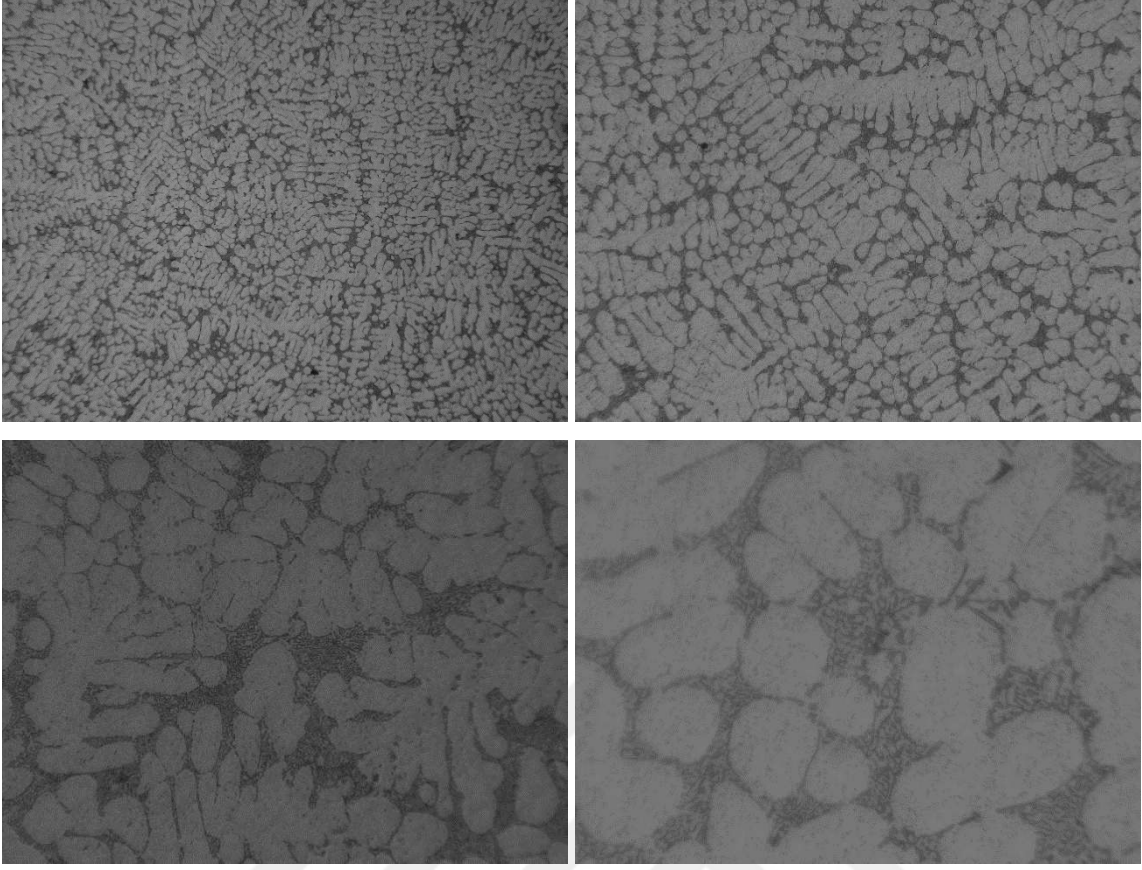
Şekil 39: %0,1 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı



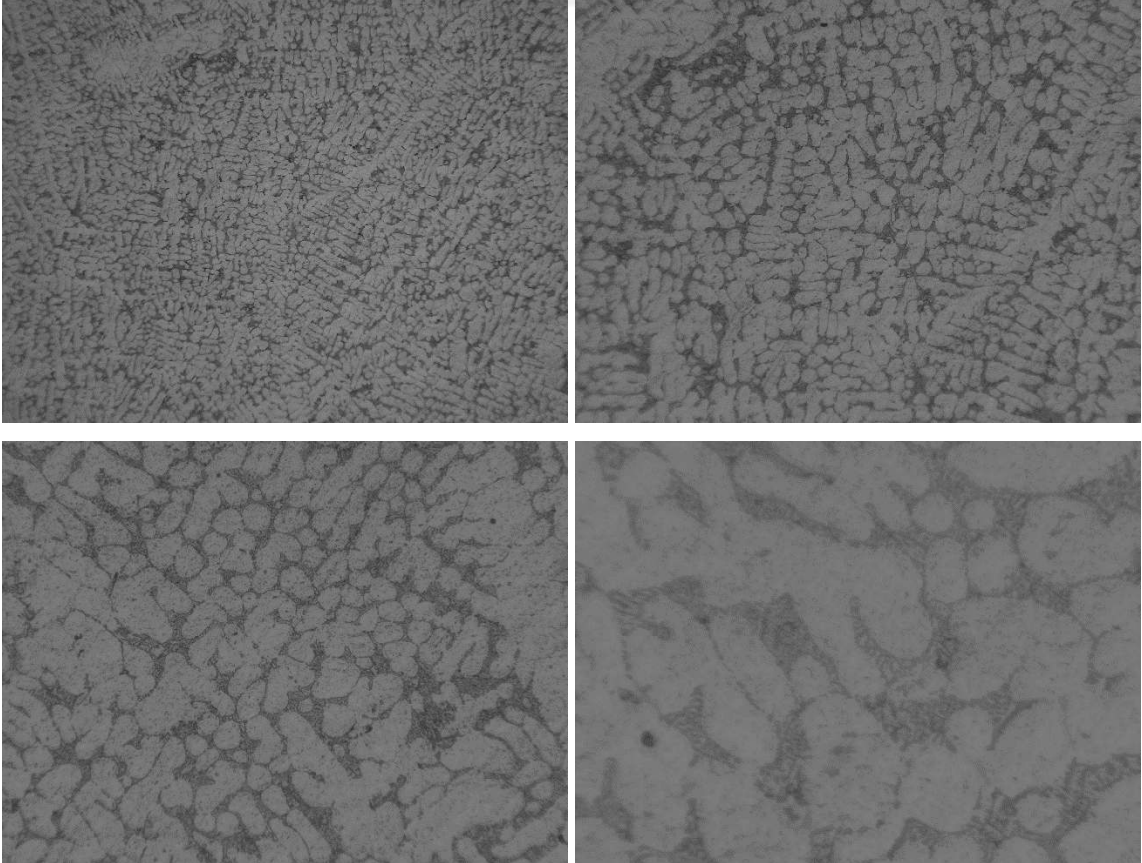
Şekil 40: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı



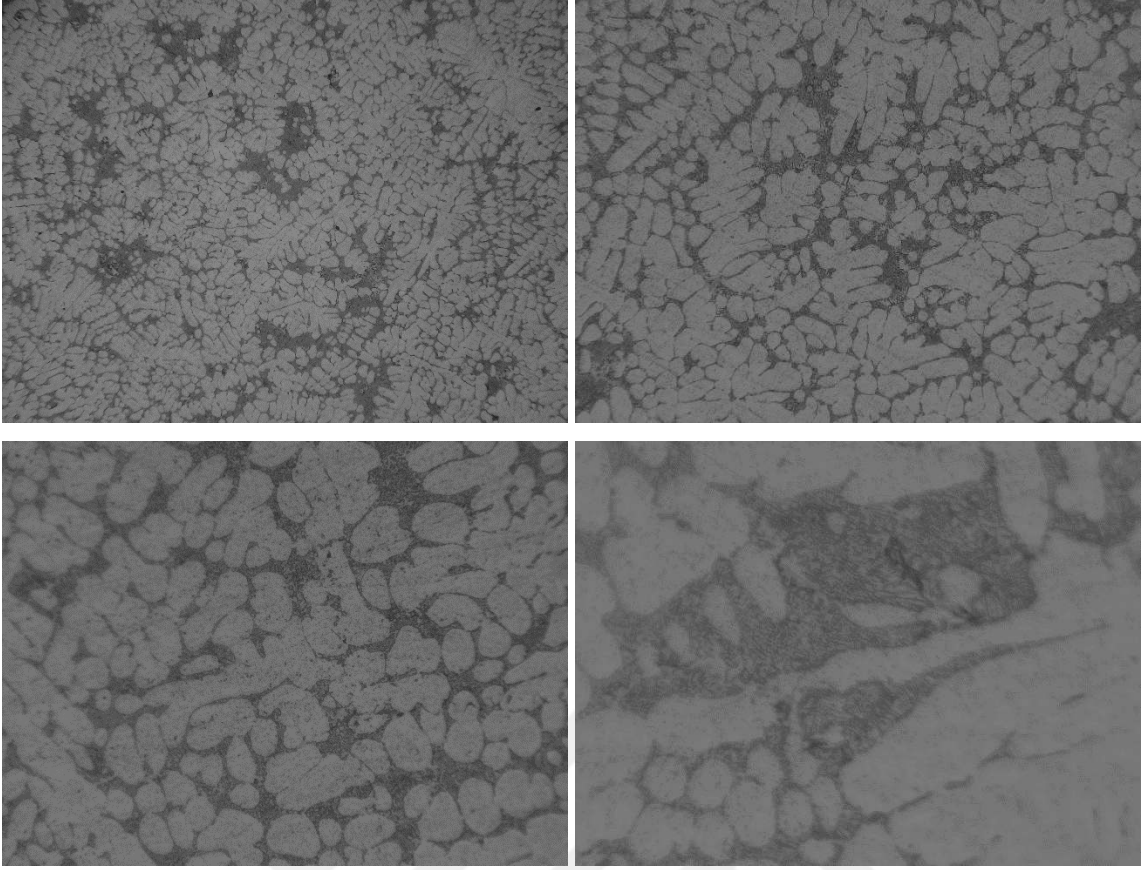
Şekil 41: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı



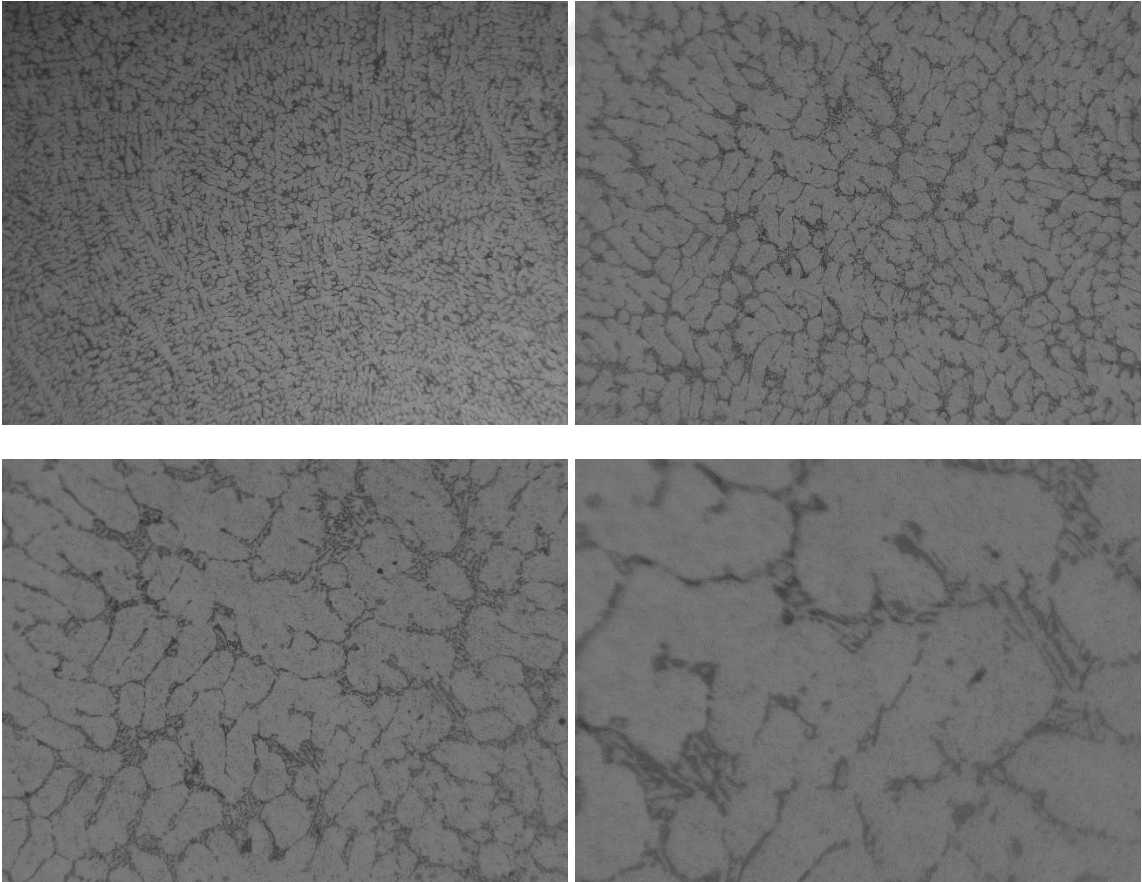
Şekil 42: %0,15 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı



Şekil 43: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,05 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı



Şekil 44: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,1 Mn İçeren Mikroyapı



Şekil 45: %0,2 Fe İçeren Deneylerde %0,2 Mn İçeren Deneyin Mikroyapı

Şekillerde verilen mikroyapılar incelendiğinde Fe içeriğini artmasına bağlı olarak yağda ortaya çıkan Fe intermetaliklerinde artışlar gerçekleşmiştir. Resimlerde görülen farklı renkteki yapılar Fe'nin farklı fazlar oluşturduğunu göstermektedir. Bunun olmasındaki sebeplerden birinin kimyasal bileşimde %Fe oranı artışı yanında Mn oranlarında da artış olmasıdır.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; alüminyum alaşımlarının bileşimi, döküm sıcaklığı, katılaşma sırasındaki soğuma hızları ve mikro/makro ayrışma gibi faktörler, döküm alüminyum alaşımlarının mikro yapısını ve makro yapısını etkilediği vurgulanmaktadır (Berlanga-Labari vd., 2020). Fe'nin katılaşma sırasında, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini bozabilecek Fe içeren intermetalik bileşikler oluşturduğu bilinmektedir. Alüminyum alaşımlarındaki Fe içeriği %0,03 ile 0,15 arasında olması beklenmektedir. Fe'nin ağırlıkça oranının Si miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte %0,2 kritik değerleri aşması durumunda, yapıda Fe intermetaliklerin artışına neden olduğu belirtilmektedir. Mikroyapılardaki özellikle iğne görünümlü yapıların artışının, üretilen malzemenin özelliklerini olumsuz etkileyerek, kırılgan bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu kırılgan yapı, diğer birçok intermetalik parçacık gibi kırılgan bir yapı sergilemektedir. Numunenin içindeki bu kırılgan yapıların artışının, döküm alaşımlarının mukavemetini ve sünekliğini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Bu sebeple, alaşım içinde bulunan Fe fazlarının kontrol altına alınması için çeşitli uygulamalar yapılarak bu olumsuz etkilerin minimize edilmesi amaçlanmaktadır (Darwish vd., 2010; Taylor, 2012; Tillová vd., 2016).

Demirin alüminyum alaşımlarında sadece mekanik özellikleri değil, aynı zamanda kaynama ve katılaşma süreçlerini değiştirebileceği ve mikroyapıda demir zengini intermetalik fazların oluşabileceği gözlemlenmiştir. Bu durumun mikroyapı ve sertlik üzerinde belirleyici bir rol oynayabileceği yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Nascimento vd., 2019; Liu vd., 2010). Yani alüminyum döküm alaşımlarının katılaşma hızı, alaşımın mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir (Farina vd., 2017). Bu yüzden alüminyum döküm alaşımlarının nihai ürün kalitesini artırmak için, alaşımdaki demir miktarının ve katılaşma koşullarının dikkatlice kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca mikroyapı, döküm alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olabilir ve porozite gibi kusurların varlığı mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir (Linder vd., 2006).

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, A356 alaşımına farklı % oranlarında Fe ve Mn ilave edilerek kokil kalıba dökümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

➤ Kimyasal bileşim sonuçları değerlendirildiğinde yapılan deneylerde, alaşım kimyasal bileşimi A356 standardına uygun olduğu ve ilave edilmesi planlanan miktarlarda Fe ve Mn ilavesi gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

➤ Çalışmada sıvı metal temizliği adına K-mold ve RPT verileri, sıvı metal temizliğinin kabul edilebilir seviyede olduğu anlaşılmıştır.

➤ Spiral akıcılık numunelerinden elde edilen ortalama sıvı metal ilerleme mesafeleri 179 ile 420 mm arasında değişiklik göstermiştir. En yüksek sıvı metal ilerleme mesafesi 420 mm ile %0,1 Fe- %0,2 Mn deneyinde, en düşük sıvı metal ilerleme mesafesi ise 179 mm ile %0,2 Fe- %0,05 Mn deneyinde ölçülmüştür. %Mn miktarı artışı ile ilerleme mesafelerinde artış gözlenirken, %Fe oranının artışı ile birlikte sıvı metal ilerleme mesafelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

➤ 8 kanallı akıcılık kalıbı ile yapılan dökümlerde, değişen kesit kalınlıklarında farklı sıvı metal ilerleme mesafeleri olduğu tespit edilmiştir. Akıcılık indeksi değerleri ile spiral akıcılık kalıbı karşılaştırıldığında sonuçların paralel bir şekilde, Fe oranının artması ile akıcılık özelliklerinin azaldığı ve Mn ilavesi ile akıcılıkta olumlu yönde değişim olduğu tespit edilmiştir. % uzama değerleri %1,26 ile %2,03 arasında olduğu tespit edilmiştir.

➤ Mekanik test sonuçları incelendiğinde yapılan dökümlerde akma dayanımı değerleri 83,2 MPa ile 101,4 MPa arasında, çekme dayanımı 118,6 MPa ile 150,06 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek akma dayanımı değeri %0,2 Fe ve %0,2 Mn içeren deneyde elde edildiği tespit edilmiştir. Maksimum çekme gerilmesi için en yüksek değer %0,1 Fe ve %0,05 Mn içeren deneyde elde edilirken en düşük değer %0,15 Fe ve %0,1 Mn içeren deneyde elde edilmiştir.

➤ Akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin %0,1 ve %0,15 Fe içeren deneylerde Mn ilavesi ile azaldığı gözlenmiştir. Ancak %0,2 Fe içeren dökümlerde akma ve çekme deneylerinde Mn ilavesi ile artış gözlenmiş ancak % uzama değerlerinde yine düşüş devam etmiştir.

➤ En yüksek uzama %2,03 ile %0,1 Fe ve %0,05 Mn ilaveli deneyde iken en düşük %uzama değeri %1,26 değeri ile %0,2 Fe ve %0,2 Mn içeren döküm deneylerine uygulanan testlerde elde edilmiştir.

➤ Mikroyapı incelemelerinde artan Fe ve Mn değeri ile alaşım içerisinde intermetalik ve gözenek oluşumunun difüzyon süresi arttıkça daha fazla artırdığı görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Ak, M. (2012). *Aa206 alüminyum döküm alaşımında empürite demirin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Al-Saadi, H. I. A. ve Tunay, R. F. (2017). Suni yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525–532.
- Alüminyum raporu*. (2010). İstanbul: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 137.
- Apelian, D. Shankar, S. (2002) *Materials Transactions*. 33B, 465–476.
- Arslan, İ. Gavgalı, E. & Çolak, M. (2019). Kum kalıba dökülen farklı alüminyum alaşımlarının dökümünde Al5Ti1B ve Al10Sr ilavesinin mikroyapı özelliklere etkisinin incelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(2), 237-244.
- Ashtari, P. Tezuka, H. & Sato, T. (2005). Modification of Fe-containing intermetallic compounds by kaddition to Fe-rich AA319 aluminum alloys. *Scripta Materialia*, 53(8), 937-942.
- ASM HandBook. (1986). *The materials information company*, ASM Metals HandBook Volume 2: Properties and Selection: Nanferrous Alloy and Special-Purpose Materials. (2). 18-40.
- Awano, Y. Shimizu, Y. (1990). *AFS Transactions*. 98, 889–895.
- Backerud, L. Chai, G. Tamminen, J. (1990). Solidification characteristics of aluminum alloys, *AFS/Skan Aluminium*, (2), Oslo.
- Balaban, C. Şen, Ö. Özer, G. & Güler, K.A. (2006). 380 alaşıımının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane inceltmenin etkisi. *13th International Metallurgy & Materials Congress*.
- Baril, E. Labelle, P. & Pekguleryuz, M. (2003). Elevated temperature Mg-Al-Sr: Ccreep resistance, mechanical properties, and microstructure. *Jom*, 55, 34-39.
- Belov, N.A. Aksenov, A.A. Eskin, D.G. Iron in aluminum alloys, impurity and alloying *Element*. Taylor & Francis Inc, New York, 2002.
- Berlanga-Labari, C. Biezma-Moraleda, M.V. & Rivero, P.J. (2020). Corrosion of cast aluminum alloys: A review. *Metals*, 10(10), 1384.
- Binczewski, G. J. (1995). The point of a monument: A history of the aluminum cap of the Washington Monument. *Jom*, 47(11), 20-25.
- Birol, Y. Çakır, O. & Alageyik, F. (2006). Elektromanyetik karıştırma ile tiksotropik alüminyum biyet üretimi. *13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı*. İstanbul, Türkiye, 1704-1712.
- Campbell, J. (2002). Döküm metallerinin yeni metalurjisi. *2. Uluslararası Alüminyum Döküm Teknolojisi Sempozyumu*.

- Cao, X. & Campbell, J. (2000). Effect of precipitation of primary intermetallic compounds on tensile properties of cast Al-11. 5 Si-0. 4 Mg alloy. *In Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Fourth Annual Castings Congress*, 391-400.
- Car, E. (2011). İkincil alüminyum üretimine genel bir bakış, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*
- Car, E. (2011). Alüminyum Üretim Süreçleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*.
- Car, E. (2019). Sürdürülebilir kalkınma ve alüminyum. *TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası Dergisi. İstanbul*, (166).
- Chen, S. Li, L. Chen, Y. & Huang, J. (2011). Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(3), 891-898.
- Couture, A. (1981). Iron in aluminum casting alloys-a literature survey. *International Cast Metals Journal*, 6(4), 9-17.
- Çakanyıldırım, Ç. & Gürü, M. (2021). Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevresel etki ve uygulama alanları. *Politeknik- Dergisi*, 24(2).
- Çetin, A. (2017). *Alüminyum Döküm Alaşımları, El Kitabı Dökümhane Eğitim Projesi Özel Sayı Serisi*, İstanbul.
- Çolak, M. Kayıkci, 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.
- Dahle, A. K. Nogita, K. McDonald, S. D. Zindel, J. W. & Hogan, L. M. (2001). Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 949-960.
- Darvishi, A. Maleki, A. Atabaki, M. M. & Zargami, M. (2012). The mutual effect of iron and manganese on microstructure and mechanical properties of aluminium-silicon alloy. *Metallurgical and Materials Engineering*.
- Demirci, K. M. (2012). Dünya alüminyum ticaretinde Türkiye'nin yeri. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası*, 17-29.
- Dispınar, D. Campbell, J. (2011). Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, *Materials Science and Engineering A*. 528, 3860– 3865.
- Dispınar, D. Nordmark, A. DI Sabatino, M. ARnberg, L. (2009). Alüminyum ve alaşımlarının dökümü sırasında gaz giderme işlemi ve döküm kalitesi üzerine etkileri. *Alüminyum Sempozyumu. İstanbul*, 405–410.
- Dışpınar, D. Akhtar, S. Nordmark, A. Di Sabatino, M. & Arnberg, L. (2010). Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356, *Materials Science and Engineering A*, 527(16),3719–3725.
- Durmuş, M, Dispınar, D. Gavgalı, M. Uslu, E. & Çolak, M. (2024). Evaluation of Fe content on the fluidity of A356 aluminum alloy by new fluidity index. *International Journal of Metalcasting*, 1-15.

- Dünya ve Türkiye'de alüminyum. (2018). *Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı*, Ankara.
- Dybowski, B. Rzychoń, T. & Chmiela, B. (2014). The influence of strontium on the microstructure of cast magnesium alloys containing aluminum and calcium. *Key Engineering Materials*, 607, 37-42.
- Eklund, J.E. (1991). *PhD Thesis*, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland,
- Erman, C. A. R. *Det. Al Alüminyum LTD*. Azerbaijan.
- Eroğlu, G. & Şahiner, M. (2018). Dünya ve Türkiye’de Alüminyum. *Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü*, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Erzi, E. Gürsoy, Ö. Yüksel, C. Colak, M. & Dispınar, D. Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: Supplier’s quality index (*SQI*), *Metals* 9 (2019) 957.
- Farina, M. E. Bell, P. Ferreira, C. R. F. & Dedavid, B. A. (2017). Effects of solidification rate in the microstructure of Al-Si5Cu3 aluminum cast alloy. *Materials Research*, 20, 273-278.
- Feng, Z. H. Ding, X. F. Feng, X. Nan, H. & Zhang, A. B. (2021, July). Comparative Study of Surface Contaminated Layer on Titanium Aluminum Alloy and Titanium Alloy Investment Castings. *In Materials Science Forum*, 1035, 602-607.
- Ferraro, S. Fabrizi, A. & Timelli, G. (2015). Evolution of sludge particles in secondary die-cast aluminum alloys as function of Fe, Mn and Cr contents, *Materials Chemistry and Physics*, 153, 168-179.
- George, F. Voort. V. Lozano. J. A. (2009). The Al-Si Phase Diagram. *Cambridge University Press*,
- Glaisher, W. H. (1951). Segregation of iron and manganese in some aluminum casting alloys. *Metallurgia*, 43, 127-131.
- Gobrecht, J.B. *Giesserei* 62 (1975) 263–266.
- Gobrecht, J.B. *Giesserei* 63 (1976) 558–561.
- Han, J. Liu, Z. Jia, Y. Wang, T. Zhao, L. Guo, J. Xiao, S. & Chen, Y. (2020). Effect of TiB₂ addition on microstructure and fluidity of cast TiAl alloy. *Vacuum*, 174, 109210.
- Haskel, T. Verran, G. O. & Barbieri, R. (2018). Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: Effects of strontium addition and T6 heat treatment. *International Journal of Fatigue*, 114, 1-10.
- Hernandez, C.F.R. Ramírez, J.M.H. & Mackay, R. (2017). *Al–Si Alloys*.
- Hsu, F-H. Lin, H-J. (2009). A Diffusing Runner for Gravity Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 40: 833-842.
- Ji, K. Li, L. Liang, J. Li, C. Zhao, X. Han, Q. Chen, L. Zuo, L. Zhang Y. (2024, June). Effect of strontium modification on microstructure and mechanical property Al₁₂SiCuMgNi alloy in squeeze casting. *In Journal of Physics: Conference Series*, 2785, 1, 012153.

- Jorstad, J. L. (1986). Understanding sludge. *Die Casting Engineer*, 30(6).
- Kaufman, J. G. & Rooy, E. L. (2004). Aluminum alloy castings: Properties, processes, and applications. *Asm International*.
- Kayıkçı, R. & Çolak, M. (2009). Kuma dökülen etial160 alüminyum alaşımında tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelenmesi, 5th. In *International Advanced Technologies Symposium, May, 13-15*.
- Khatami, N. Mirdamadi, S. & Razavizadeh, H. (2011). The Boron Effect on Mechanical Properties of Aged 2024 Aluminum Alloy. *Advanced Materials Research*, 339, 152-156.
- Kuhn, H. A., Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003). Designing for Aluminum forging. *Handbook of Aluminum*, 775.
- Kulunk, B. Shabestari, S. G. Gruzleski, J. E. Zuliani, D. J. (1996). *AFS Transactions*. 104, 1189–1193.
- Kuo, Y. S. (2011). Effects of solidification time on porosity content in A201 aluminum alloy castings. *Advanced Materials Research*, 311, 648-652.
- Laslaz, G. ve Laty, P. (1991). Gas Porosity and Metal Cleanliness in Aluminum Casting Alloys. *AFS Transactions*, 99:83–90.
- Linder, J. Arvidsson, A. & Kron, J. (2006). The influence of porosity on the fatigue strength of high-pressure die cast aluminium. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29(5), 357-363.
- Liu, L. Samuel, F.H. (1998). Effects of Inclusions on The Tensile Properties of Al-1% Si-0.35%Mg (A356.2) Aluminum Casting Alloy. *J. Materials Science*, 33, 2269-2281.
- Liu, N. C. Li, J. Q. & Li, G. (2011). Influence of different titanium alloying methods on the microstructure and wear behavior of ZL108 alloy. *Advanced Materials Research*, 311, 712-715.
- Liu, Y. Liu, M. Luo, L. Wang, J. & Liu, C. (2014). The solidification behavior of AA2618 aluminum alloy and the influence of cooling rate. *Materials*, 7(12), 7875-7890.
- Matweb. (2021, Mart). Alüminyumun tarihçesi. <https://www.matweb.com/>
- Mohammadpour, M. Khosroshahi, R. A. Mousavian, R. T. & Brabazon, D. (2014). Effect of interfacial-active elements addition on the incorporation of micron-sized SiC particles in molten pure aluminum. *Ceramics International*, 40(6), 8323-8332.
- Nascimento, M. S. Santos, G. A. D. Teram, R. Santos, V. T. D. Silva, M. R. D. & Couto, A. A. (2019). Effects of thermal variables of solidification on the microstructure, hardness, and microhardness of Cu-Al-Ni-Fe alloys. *Materials*, 12(8), 1267.
- Osame, Y. Toyoda, K. Tsumura, Y., Suzuki, M., Furuya, S., & Nagayama, K. (1986). Sludge deposition in molten aluminum die casting alloys in the holding furnace. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 36(12), 813-818.

- Podprocká, R., & Bolibruchová, D. (2018). Effect of manganese and iron content on morphology of iron intermetallic phases in AlSi7Mg0.3 Alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 18(2), 95-99.
- Rathinasuriyan, C. Bharath, A. & Sridhar, K. (2022). Reducing iron content from aluminium molten bath through filter bag, centrifugal separation and flux refining method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1026-1032.
- Rooy, E. L. (1988). *Metals Handbook 9th Ed.* Castings, 743-770.
- Rooy, E. L. (1985). *AFS Trans.* 93, 935–938.
- Sabatino, M.D. & Arnberg, L. (2013). A review on the fluidity of Al based alloys. *Metallurgical Science and Technology*. 22, 9-15.
- Sangchan, A. Plookphol, T. Wannasin, J. & Wisutmethangoon, S. (2014). Effect of strontium on microstructure and mechanical properties of semi-solid A356 Al alloy. *Advanced Materials Research*, 893, 353-356.
- Shabestari, S. G. & Gruzleski, J. E. (1995). Modification of iron intermetallics by Strontium in aluminum alloys (95-26). *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 103, 285-294.
- Shabestari, S. G. Mahmudi, M. Emamy, M. & Campbell, J. (2002). Effect of Mn and Sr on intermetallics in Fe-rich eutectic Al-Si alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, 15(1), 17-24.
- Shabestari, S.G. (2004). The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum–silicon alloys, *Materials Science and Engineering, A* 383 (2004) 289–298.
- Shabestari, S.G. Gruzleski, J. E. (1995). *Metallurgical and Materials Transactions A*. 26A, 999–1006.
- Shakhashiri, B. Z. (2000, March). Privilege of teaching. *American Chemical Society*, 219, U428-U428).
- Shivkumar, S. Wang, L. Apelian, D. (1991). Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum Alloys. *In Journal of Metals*. 43, 26-32.
- Sighworth, GK. Kuhn, T.A. (2007). Refinement of Aluminium Casting Alloys. *AFS Transactions*, 115, 1-12.
- Sun, N. & Apelian, D. (2011). Friction stir processing of aluminum cast alloys for high performance applications. *Jom*, 63, 44-50.
- Taylor, J. A. (1996). Metal-related castability effects in aluminium foundry alloys. *Cast Metals*, 8(4), 225-252.
- Taylor, J.A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys. *Procedia Materials Science*, 1, 19-33.
- Tillová, E. Chalupová, M. Borko, K. & Kuchariková, L. (2016). Changes of fracture surface in recycled A356 cast alloy. *Materials Today: Proceedings*, 3(4), 1183-1188.

- Timelli, G. & Bonollo, F. (2007). Fluidity of aluminium die castings alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 20(6), 304-311.
- Tokatlı, M. Saydam, F. Hal, M. Koşatepe, A. Çolak, M. & Yüksel, Ç. (2022). Investigation of liquid metal cleaning methods commonly used in the casting of aluminium alloys. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(1), 423-434.
- Tunçay, T. & Bayoğlu, S. (2017). The effect of iron content on microstructure and mechanical properties of A356 cast alloy. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*.
- Vargel, C. (2020). Alüminyumun korozyonu. Elsevier. Vargel, C. (2020). Corrosion of aluminium. Elsevier. *Second Edition*
- Wang, Q. G. (2003). Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34, 2887-2899.
- Warmuzek, M. Ratuszek, W. & Sęk-Sas, G. (2005). Chemical inhomogeneity of intermetallic phases precipitates formed during solidification of Al-Si alloys. *Materials Characterization*, 54(1), 31-40.
- Yalçın, Ö. Tokatlı, M. Tigli, A. & Çolak, M. (2024). A356 alüminyum alaşımının dökümünde katılaşma zamanı ve Nb ilavesinin mikroyapıya etkisinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 479-492.
- Yang, Y. Zhang, Y. Liu, X. & Zhang, H. (2023). Study on chemical corrosion properties of titanium alloy in 2A14 aluminum melt. *Materials Research Express*, 10(10), 106512.
- Yapıcı, C. (2012). *ALTi5B1 master alaşımının alüminyum basınçlı döküm yönteminde tane inceltici olarak kullanımının incelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yıldırım, H. (2006). *Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları*.
- Yılmaz, F. (2009). Al-Si alaşımlarında çiftfilm ve modifikasyon teorilerine eleştirel bakış, *Alüminyum sempozyumu. İstanbul*, 411-423.
- Yunak, T. Duru, E. Sevinç, S. & Aslan, S. (2023). Al-5Ti-0, 2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerin AA 1050 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Open Journal of Nano*, 8(2), 99-106.
- Yüksel, Ç. (2016). *Alüminyum alaşımlarının sıvı metal kalitesinin artırılması*, (Doktora tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Zhao, H. Song, Y. Li, M. & Guan, S. (2010). Grain refining efficiency and microstructure of Al-Ti-C-RE master alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 508(1), 206-211.
- Zhao, JW & Wu, SS. (2010). Reo dökümlü A390 alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri. *Çin Demir Dışı Metaller Derneği İşlemleri*, 20, 754-757.

ÖZ GEÇMİŞ

Nurdan ALKAN, ilköğretimini Pınarbaşı İlköğretim Okul’unda, lise eğitimini ise Kültür Temel Lisesi’nde tamamladı. Lisans eğitimini ise 2021 yılında Bayburt Üniversitesi’nde tamamladı. 2022 yılında Makine Mühendisliği bölümünde Doç. Dr. Murat ÇOLAK danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı. Şu an da makine mühendisi olarak çalışmaktadır.

