

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARININ
VE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNİN
SİMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI



Tuğçe YAĞCI

Aralık, 2021
İZMİR

ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARININ VE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tuğçe YAĞCI

**Aralık, 2021
İZMİR**

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TUĞÇE YAĞCI, tarafından **PROF. DR. ÜMİT CÖCEN** ve **PROF. DR. OSMAN ÇULHA** yönetiminde hazırlanan “**ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARININ VE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. ÜMİT CÖCEN

Yönetici

Doç. Dr. FATİH KAHRAMAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. ESRA DOKUMACI ALKAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. AHMET TÜRK

Jüri Üyesi

Doç. Dr. MÜCAHİT SÜTÇÜ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım sırasında değerli vaktini, fikir ve önerilerini benimle paylaşan ve laboratuvar imkanlarını sonuna kadar sağlayan saygıdeğer tez danışmanı hocalarım Sn. Prof. Dr. Ümit CÖCEN'e ve Sn. Prof. Dr. Osman ÇULHA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, doktora sürecim boyunca, kıymetli teknik ve bilimsel önerileri ile desteklerini esirgemeyen tez izleme komitemizin değerli üyeleri Sn. Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN'a ve Sn. Doç. Dr. Esra DOKUMACI ALKAN'a minnetlerimi sunarım.

Gerek simülasyon uygulamalarına dayalı araştırmalarım gerekse laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarım sırasında göstermiş oldukları ilgi ve yardımlardan ötürü Cevher Jant A.Ş. firmasından başta Kalite Proses Yöneticisi Sn. Ali İLERİ ve Yeni Teknolojiler ve Dijitalizasyon Müdürü Sn. Elvan ARMAKAN olmak üzere, Sn. Ertan CAR, Sn. Yiğit KAYA, Sn. Serhat BARDAKCI ve tüm firma çalışanlarına teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, doktora tez çalışmamızda hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmalarının yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen ONATUS Öngörü Teknolojileri firmasından Sn. Onur ÖZTÜRK ve Sn. Yağız AKYILDIZ'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen, kendisiyle ortak çalışmalarda yer almaktan keyif aldığım iş arkadaşım, Twin Ar-Ge Mühendislik Tic. Ltd. Şti. firmasından Ar-Ge Mühendisi Sn. Adem KORKMAZ'a ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamı üniversite-sanayi iş birliği ve bilimsel altyapı projeleri ile destekleyen, araştırma görevlisi olarak görev yaptığım kurumum Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nin Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne çok teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecimde uluslararası ortak proje çalışmasında bulunduğumuz, fikirleri ve disiplinli çalışması ile ufukumuzu açan Londra Brunel Üniversitesi'nden Sn.

Prof. Dr. Hari Babu Nadendla ve Dr. Erdem Karakulak’a minnetlerimi sunarım. Tez konusu kapsamında bir diğer uluslararası proje çalışmasında yer almaktan keyif duyduğumuz Çekya Liberec Teknik Üniversitesi’nden Sn. Doç. Dr. Jaromír Moravec ve ekibine minnetlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince bana “2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı” aracılığı ile maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)’a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamızı, üniversite bünyesinde 2020.KB.FEN.023 proje koduyla destekleyen Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne çok teşekkür ederim.

Son olarak; doktora tezimin her aşamasında yanımda olan, sabır ve anlayışını bir an olsun eksik etmeyen, tüm süreci benimle göğüsleyen çok değerli eşim Ali YAĞCI’ya ve bu zorlu süreçte ailemize katılarak yüzümüzü güldüren, bizi çok mutlu eden sevgili oğlum Altuğ YAĞCI’ya çok teşekkür ederim. Henüz 90 günlük bir bebeksin, fakat bir gün büyüyeceksin ve bunu okuduğunda annenle gurur duymanı temenni ederim canım oğlum. Can dostum, sevgili kedimiz Paşa’ya doktora tezimi yazdığım süre boyunca gecelerce benimle uyumayıp, bilgisayarımın yanı başından sabaha dek bana bakarak manevi destek olduğu için çok teşekkür ederim. Ayrıca, annem Sevgi, babam İbrahim ve kardeşlerim Fatma Nur, Mehmet Enes GÜLALAN ve Utku ÇELEBİ’ye de her tez izleme komitemde benimle heyecanlandıkları ve manevi bir güç olarak hep yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Tuğçe YAĞCI

ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARININ VE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, alüminyum jant üretiminde, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yönteminin kullanılmasıyla alaşım geliştirme, alçak basınçlı döküm ve bu süreçteki yapısal analizlerin değerlendirilmesi ve jant imalatında optimum verilerinin elde edilmesiyle jant üretim sürecinin ekonomik bir modeli oluşturularak, ısıtıl işlem gerektirmeyen yeni nesil proses tasarımı gerçekleştirmektir. Böylece ham madde ve üretim parametrelerinin son ürünün performansına etkisi, pilot uygulamadan önce elde edilecek ve üretim bilgiye dayalı gerçekleştirilecektir. Tez kapsamında, alüminyum alaşımları ve alçak basınçlı döküm prosesi için, malzeme teknolojilerinde yeni nesil yaklaşımlardan bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliğinin kullanılabilirliği, ülkemizde ilk kez çalışılmıştır.

Doktora tezi, deneysel tasarım, bilgisayar destekli üretim, pilot üretim, test ve karakterizasyon çalışmaları olmak üzere dört aşamada planlanmıştır. Deney tasarımı aşamasında, tam faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle alaşım kompozisyonu seçimi gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar destekli üretimde, hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarıyla, jant üretiminde kullanılan AlSi7Mg0.3 alaşımına eşdeğer olacak şekilde, alaşım elementleri çeşit ve miktarlarında özgün ötektik altı kompozisyonlar belirlenerek alaşım tasarımları gerçekleştirilmiş ve veri bankası oluşturulmuştur. Ardından bu veriler, doğrudan döküm simülasyonu yazılımına aktarılmış ve yeni alaşım kompozisyonlarıyla döküm simüle edilmiştir. Böylece, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarının kullanılmasıyla, janta ait mikroyapısal ve mekanik özellikler, alaşım kompozisyonu bazında bilgisayar ortamında elde edilmiştir. İkinci aşamada, tasarlanan alaşım kompozisyonları hazırlanarak, endüstriyel ölçekte alçak basınçlı döküm yöntemiyle örnek jant imalatları gerçekleştirilmiştir. Test ve karakterizasyon aşamasında ise, spektral analizler, makro ve mikroyapısal incelemeler, sertlik ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

Özetle, tez çalışmasında, alçak basınçlı dökümle alüminyum esaslı jant üretimi için bütünselik hesaplamalı malzeme mühendisliği üretim verileri, gerçek üretim verileriyle karşılaştırılmış ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alüminyum alaşımları, alçak basınçlı döküm, deney tasarımı, bütünselik hesaplamalı malzeme mühendisliği, simülasyon, mikroyapı, mekanik özellikler.



SIMULATION ASSISTED DESIGN OF ALUMINIUM-SILICON ALLOYS AND LOW PRESSURE DIE CASTING PROCESS

ABSTRACT

The aim of this study is to realize a new generation process design that does not required heat treatment by creating an economic model of the wheel production process by using the integrated computational material engineering method in the production of aluminum wheels, by evaluating the alloy development, low pressure die casting and structural analysis in this process, and by obtaining the optimum data in wheel manufacturing. Thus, the effect of raw material and production parameters on the performance of the final product will be obtained before the pilot application and the production will be based on knowledge. Within the scope of the thesis, the usability of integrated computational materials engineering, which is one of the new generation approaches in material technologies, for aluminum alloys and low pressure die casting process has been studied for the first time in our country.

The doctoral thesis has been planned in four stages as experimental design, computer aided production, pilot production and testing and characterization studies. In the design of experiment phase, alloy composition selection was carried out using the full factorial experimental design method. In computer-aided production, with computational materials engineering software, unique hypoeutectic compositions were determined in types and amounts of alloying elements, equivalent to the AlSi7Mg0.3 alloy used in wheel production, and alloy designs were realized and a database was created. This data was then transferred directly to the casting simulation software and the casting was simulated with the new alloy compositions. Thus, using integrated computational materials engineering approaches, the microstructural and mechanical properties of the wheel were obtained in computer environment on the basis of alloy composition. In the second stage, the designed alloy compositions were prepared and sample wheels were manufactured by low pressure die casting method on an industrial scale. In the testing and characterization phase, spectral analyzes, macro and microstructural examinations, hardness and tensile tests were carried out.

In summary, in the thesis study, the integrated computational materials engineering production data for the production of aluminum-based wheels by low pressure die casting were compared with the manufacturing scale production data and design verification studies were carried out depending on the alloy composition.

Keywords: Aluminium alloys, low pressure die casting, design of experiment, integrated computational materials engineering, simulation, microstructure, mechanical properties.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	v
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xv
 BÖLÜM 1 - GİRİŞ	 1
1.1 Alüminyum Alaşımları	1
1.1.1 Alüminyumda Alaşım Elementlerinin Etkileri	2
1.1.2 Alüminyum Döküm Alaşımları	5
1.1.2.1 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları.....	6
1.2 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarına Uygulanan Metalurjik İşlemler	9
1.2.1 Tane İnceltme	9
1.2.2 Modifikasyon	14
1.2.3 Gaz Giderme	17
1.3 Alçak Basıncı Döküm Yöntemi ile Jant Üretim Süreci.....	19
 BÖLÜM 2 - HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ VE DÖKÜM SİMÜLASYONLARI UYGULAMALARI.....	 22
2.1 Hesaplamalı Termodinamik Yöntemleri	25
2.2 Hesaplamalı Termofizik ve Termomekanik Yöntemleri.....	28
2.3 Döküm Simülasyonları.....	33
2.4 Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Yaklaşımları.....	37

BÖLÜM 3 - SAYISAL SİMÜLASYON ANALİZLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
3.1 Alaşım Kompozisyonu Tasarımı ve Seçimi	40
3.2 Bilgisayar Destekli Tasarım ve Tasarım Doğrulama Çalışmaları	46
3.2.1 Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği ile Yeni Alüminyum Döküm Alaşımı Geliştirme Çalışmaları	46
3.2.2 Geliştirilen Alaşımların Alçak Basıncılı Döküm Simülasyonları	55
3.3 Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi ile Pilot Üretim Çalışmaları	58
3.4 Test ve Karakterizasyon Çalışmaları	60
3.4.1 Makro ve Mikroyapı İncelemeleri	60
3.4.2 Mekanik Testler	63
BÖLÜM 4 - SONUÇLAR VE TARTIŞMA	66
4.1 Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Sonuçları ve Değerlendirme	66
4.1.1 Alaşımlarda Sıcaklığa Bağlı Olarak Fiziksel Özelliklerin Değişimleri	66
4.1.2 Katılaşma Analizleri	71
4.2 Alçak Basıncılı Döküm Simülasyonlarının Sonuçları ve Değerlendirme	76
4.2.1 Faz Analizleri	76
4.2.2 Makro ve Mikro Porozitelerin Analizleri	83
4.2.3 İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe Analiz Verileri	87
4.2.4 Mekanik Özelliklerin Analizleri	89
4.3 Test ve Karakterizasyon Çalışmalarının Sonuçları ve Değerlendirme	96
4.3.1 Makro ve Mikroyapısal İncelemeler	96
4.3.2 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi	109
BÖLÜM 5 - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	127

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Al-Si faz denge diyagramı	7
Şekil 1.2 A356 alüminyum alaşımına ait mikroyapı görüntüsü.....	8
Şekil 1.3 A356 alaşıma eklenen (a, b) ağırlıkça %0,2 ve (c, d) %0,6 Fe elementinin mikroyapı üzerindeki etkilerinin görüldüğü farklı büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri	9
Şekil 1.4 Al-Ti ikili faz denge diyagramının alüminyumca zengin bölgesi	10
Şekil 1.5 $TiAl_3$ kristalinin üzerinde alüminyumun çekirdeklenmesi ve büyümesinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 1.6 Katılaşma sırasındaki soğuma eğrileri	12
Şekil 1.7 Al-0,06%Ti alaşımında dendritlerin içerisinde yer alan koyu renkli ve titanyumca zengin bölgelere ait mikroyapı görüntüsü	12
Şekil 1.8 Modifikasyon işlemi mekanizmasının şematik gösterimi	15
Şekil 1.9 (A) Al-%10Si alaşımının mikroyapısı; (B) aynı alaşımın 200 ppm Sr eklenip modifikasyon işlemi gördükten sonraki mikroyapısı.....	16
Şekil 1.10 Hidrojenin alüminyum içindeki çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi	17
Şekil 1.11 Rotorlu gaz giderme sisteminin şematik gösterimi	19
Şekil 1.12 Alçak basınçlı döküm ünitesinin şematik gösterimi	20
Şekil 2.1 Thermo-Calc yazılımı kullanıcı ara yüzü	25
Şekil 2.2 Bir alüminyum döküm alaşımına ait katılaşma analizi grafiği	26
Şekil 2.3 JMatPro yazılımı kullanıcı ara yüzü	30
Şekil 2.4 JMatPro yazılımında elde edilebilen malzeme özelliklerine ait örnek grafikler. (a) A356 alaşımında sıcaklığa bağlı yoğunluğunun değişim eğrisi. (b) A356 alaşımında katılaşma esnasında sıvı fazdan oluşan fazlar ve miktarları (%ağ.). (c) A356 alaşımında soğuma hızına bağlı olarak sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde meydana gelen değişim. (d) A356 alaşımında katılaşma analizi grafiği.....	31
Şekil 3.1 Minitab yazılımı ile tam faktöriyel deney tasarımı	41
Şekil 3.2 Bir janta ait kesit görüntüsü ve jantın bölümleri.....	46
Şekil 3.3 Al-Si-Mg faz denge diyagramı	48

Şekil 3.4 JMatPro yazılımında yer alan malzeme tipi veri tabanına erişim ekranı....	50
Şekil 3.5 JMatPro yazılımında alaşım kompozisyonuna bağlı olarak hesaplanabilen malzeme özelliklerine erişim ekranı.....	51
Şekil 3.6 JMatPro yazılımından üretilen alaşım verilerinin aktarılabildiği şekillendirme, kaynak ve döküm simülasyon programları.....	52
Şekil 3.7 Thermo-Calc yazılımının çalışma ekranı.....	53
Şekil 3.8 $AlSi3Mg0.7$ alaşımına ait Thermo-Calc yazılımından elde edilen katılaşma analizi grafiği ve önemli sıcaklıkların gösterimi.....	54
Şekil 3.9 Al-Si-Mg alaşım sistemine ait üçlü faz denge diyagramı.....	54
Şekil 3.10 Döküm kalıbının Magmasoft yazılımında farklı açılardan geometrileri (a) kalıba ait üst ve alt maçanın görüntüsü, (b) kalıbın üstten plaka olmadan görüntüsü, (c) kapalı kalıbın yolluklarıyla plaka olmadan görüntüsü.....	55
Şekil 3.11 750 kg Al kapasiteli devirmeli tip elektrikli ergitme ocağı	58
Şekil 3.12 Gaz giderme işlemi	59
Şekil 3.13 Ergiyiğin alçak basınçlı döküm ünitesinin bekletme ocağına verilmesi...	60
Şekil 3.14 a) optik mikroskop, b) stereo mikroskop	61
Şekil 3.15 Test ve karakterizasyon çalışmalarında kullanılan jant kesiti numunesi örneği.....	61
Şekil 3.16 Dendrit kolları arası mesafenin hesaplanabilmesi için mikroyapıda alınan ölçümlerin şematik gösterimi.	62
Şekil 3.17 Numunelerin sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz	64
Şekil 3.18 Jant kesitinde sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar.....	64
Şekil 3.19 ASTM E8 standardına uygun çekme testi numunesi ölçüleri.....	65
Şekil 4.1 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen sıvı viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	67
Şekil 4.2 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen yoğunluk değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	69
Şekil 4.3 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen termal iletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	70
Şekil 4.4 Birincil α -Al fazının janttaki dağılımının modellenmesi	79
Şekil 4.5 Ötektik fazın janttaki dağılımının modellenmesi.....	80
Şekil 4.6 Mg_2Si fazının janttaki dağılımının modellenmesi	81

Şekil 4.7 AlFeSi intermetaliklerine ait fazların janttaki dağılımının modellenmesi....	82
Şekil 4.8 Jant modeli üzerinde alaşım kompozisyonuna bağlı olarak makro porozitelerin dağılımı	85
Şekil 4.9 Jant modeli üzerinde alaşım kompozisyonuna bağlı olarak mikro porozitelerin dağılım	86
Şekil 4.10 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna bağlı olarak ikincil dendrit kolları arası mesafenin değişimi	88
Şekil 4.11 Döküm simülasyonu ile elde edilen ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen jant bölgelerindeki akma dayanımı değerleri.....	93
Şekil 4.12 Döküm simülasyonu ile elde edilen ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen jant bölgelerindeki çekme dayanımı değerleri	94
Şekil 4.13 Dendrit kolları arası mesafe değerlerinin alaşım kompozisyonuna ve jant bölgelerine göre değişimi	106
Şekil 4.14 Alaşımlara ait çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerleri....	111
Şekil 4.15 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının jant kolu bölgesi için akma dayanımı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği	112
Şekil 4.16 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının flanş bölgesi için akma dayanımı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği	112
Şekil 4.17 Alaşımlara ait çekme testlerinden elde edilen uzama miktarı değerleri .	114
Şekil 4.18 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının jant kolu bölgesi için uzama miktarı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği	115
Şekil 4.19 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının flanş bölgesi için uzama miktarı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği	116
Şekil 4.20 Sertlik testi ölçüm sonuçları	117
Şekil 4.21 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin göbek bölgesi için karşılaştırmalı grafiği.....	118
Şekil 4.22 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin jant kolu bölgesi için karşılaştırmalı grafiği	118

Şekil 4.23 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin flanş bölgesi için karşılaştırmalı grafiği.....	119
Şekil 4.24 Isıl işlemli alaşımlara uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı değerleri.....	122
Şekil 4.25 Isıl işlemli alaşımlara uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen uzama miktarı değerleri	122



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Tam faktöriyel deney tasarımı	42
Tablo 3.2 Si ve Mg alaşım elementlerine bağlı olarak elde edilmiş tam faktöriyel deney tasarımı	44
Tablo 3.3 Deneysel tasarım faaliyetleri sonucunda çalışmada kullanılması planlanan alaşım kompozisyonları.....	45
Tablo 3.4 Doktora tez çalışmasına konu olan alaşımların sanal ve deneysel kompozisyonları (%ağ).....	49
Tablo 3.5 Magmasoft yazılımı veri giriş çubuğundaki semboller ve işlevleri.....	56
Tablo 4.1 ThermoCalc ile elde edilen, alaşımlara ait katılaşma analizi grafikleri.....	72
Tablo 4.2 Alaşımlara ait hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen katılaşma analizlerinin sonuçları.....	75
Tablo 4.3 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna bağlı olarak jant bölgelerindeki fazların dağılımı.....	78
Tablo 4.4 Makro ve mikro porozitelerin jant bölgelerine göre bulunma olasılıkları.	83
Tablo 4.5 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna ve jant bölgelerine bağlı ikincil dendrit kolları arası mesafe değerleri (µm)	87
Tablo 4.6 Döküm simülasyonlarından elde edilen mekanik özelliklere ait sayısal veriler.....	95
Tablo 4.7 Numunelerin göbek bölgesinden 30x büyütmede alınan stereo mikroskop görüntüleri	97
Tablo 4.8 Jantın farklı bölgelerinden 200x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri	100
Tablo 4.9 Numunelerin göbek bölgelerinden alınan görüntüler ile optik mikroskopta gerçekleştirilen faz analizlerinin sonuçları	103
Tablo 4.10 Alaşımlarda optik mikroskopta ölçülen dendrit kolları arası mesafe değerinin jantın bölgelerine göre değişimi	105
Tablo 4.11 Alaşımlarda kompozisyona bağlı taramalı elektron mikroskobu elementel haritalama analizi sonuçları	107
Tablo 4.12 Hesaplamalı ve deneysel olarak kaydedilen akma dayanımı değerleri .	110

Tablo 4.13 Hesaplamalı ve deneysel olarak kaydedilen uzama miktarı değerleri... 113

Tablo 4.14 Hesaplamalı ve deneysel faaliyetlerle ulaşılan sertlik değerleri..... 120



BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum (Al), periyodik cetvelde 3A grubunda yer alan, atom numarası 13, özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$, ergime sıcaklığı 660°C ($933,15 \text{ K}$) olan, mat gümüş renkli, sünek bir metaldir. Doğada, genellikle boksit cevherleri halinde bulunmaktadır. Manyetik özellik taşımayan alüminyum metali, oksidasyona karşı üstün direnci ile bilinir ve bu direnç havayla teması halinde alüminyumun üzerinde pasivasyon etkisi ile oluşan ince oksit tabakasından kaynaklanır (Şenel ve Gürbüz, 2020).

Alüminyum yer kabuğunda en fazla miktarda bulunan ikinci elementtir. Günümüzde endüstriyel alanlarda çeliğin ardından en çok kullanılan malzeme grubunu alüminyum alaşımları oluşturmaktadır (Alfrey, 1983). Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğu, yüksek spesifik dayanımı (mukavemet/yoğunluk), korozyon direnci, iyi ısı ve elektriksel iletkenliği, kolay işlenebilirlik ve şekillendirilebilirliği, geri dönüşümü, gelişmiş dökülebilirlik özellikleri ile başta otomotiv sektörü olmak üzere, havacılık, uzay uygulamaları, savunma sanayi, deniz taşımacılığı, inşaat ve beyaz eşya gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilmektedir (Cho ve diğer., 2011; Davis, 2001; Ye, 2003).

Otomotiv uygulamalarında araç hafifletme çalışmalarında, özellikle son yıllarda çelik bileşenlerin yerini alüminyum parçaların almasıyla, alüminyum alaşımları endüstrinin gözde alaşım grubu haline gelmiş ve konuyla ilgili araştırma-geliştirme ve akademik çalışmalar önem kazanmıştır (Bedir ve Delikanlı, 2006). Endüstriyel uygulamalarda enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar, daha az yakıt tüketen, daha hafif ve ekonomik araçların üretimini gerekli kılmıştır. Daha hafif taşıtların üretimi, yakıt tüketimini azaltacağından, sera gazların salınımını da düşürecektir. Bu durum, alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilen ürünlerin çevre dostu ve enerji tasarrufu niteliklerini de ön plana çıkarmaktadır (Başer, 2012). Bu gibi üstün özellikleri

sayesinde, alüminyum alaşımları otomotiv alanında öncelikli malzeme grubu içerisinde yer almaktadır.

Alüminyum alaşımlarını rakiplerinden üstün kılan bir diğer özelliği, geri dönüşüme uygunluğudur. Alüminyum alaşımları, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerjiyle tekrar ergitilebilmekte ve üretim döngüsüne yeniden kazandırılmaktadır (Pulat ve diğer., 2014). Bu durum, tıpkı araç hafifletme çalışmalarında olduğu gibi, enerji verimliliği ve çevre açısından önemlidir. Birincil alüminyum üretimi yoğun bir enerji sarfiyatı gerektirmesine rağmen, alüminyum parçaların %90 gibi yüksek verimlilik değerleriyle geri dönüştürülebilir olması, bu alaşımların imalat sektöründe güncelliğini korumasına ve rekabetçiliğine katkı sağlayan diğer etkenler arasında gösterilebilir (Sözbir ve diğer., 2016).

1.1.1 Alüminyumda Alaşım Elementlerinin Etkileri

Alüminyum metali saf halde endüstrinin ihtiyacı olan mekanik ve performans özelliklerine cevap veremediği için, pek çok elementle alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Örneğin, saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 50MPa iken, bu değer seçilen uygun elementlerle gerçekleştirilen alaşımlandırma işlemi sonucu 700MPa'ya kadar çıkabilmektedir. İstenilen metalurjik ve mekanik özelliğe göre, alüminyuma ilave edilen katkı elementlerinin çeşidi ve miktarı değişmekle beraber, silisyum, magnezyum, bakır, demir, çinko, manganez, titanyum, krom, bor alüminyum ile alaşım oluşturabilen başlıca elementlerdir (Fayomi ve diğer., 2017; Stadler ve diğer., 2013).

Silisyum (Si), alüminyuma yaklaşık %20 oranına kadar ilave edilebilmektedir. Bir miktar magnezyum (Mg) veya bakır (Cu) ilavesiyle alaşım, ısıl işleme uygun hale gelmekte ve çökelme sertleşmesi mekanizması ile (çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma basamaklarını içeren ve malzeme içerisinde daha az miktarda bulunan ikinci fazın tanecikler halinde ana faz içerisinde çökeltilmesinin sağlanması) mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Al-Si alaşımlarının korozyon direnci, elektriksel ve ısıl iletkenlikleri yüksek olmakla birlikte, termal genleşmeleri düşüktür. Döküm

uygulamalarında, alaşıma kütlece %12'ye kadar yapılan silisyum ilavesi, ergiyik metalin akıcılığını artırmakta ve döküm kabiliyetini geliştirmektedir. Bu durum aynı zamanda alaşımın yüksek sıcaklık dayanımını artırmakta ve döküm sırasında parçada oluşabilecek sıcak yırtılma hatalarının minimize edilmesini sağlamaktadır (Lumley, 2011).

Magnezyum (Mg), alüminyumla alaşım oluşturabilen ve endüstriyel uygulamalarda ısıtılma işlemle mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde etkin, son derece önemli olan bir diğer elementtir. Mg ilavesi ısıtılma işlem sonucu alaşımın sertliğini artırmakla birlikte, akma ve çekme mukavemeti değerlerini de artırmaktadır (Fortini, ve diğer., 2016). Özgül ağırlığı ve ergime sıcaklığı alüminyuma göre düşük olup, bu değerler Mg için sırasıyla 1740 kg/m³ ve 923,15 K'dir. Alüminyum ile %33 oranında ötektik bileşim veren Mg, özgül ağırlığının düşük olması sebebiyle, ilave edildiği alaşımın yoğunluğunu düşürmektedir (Yıldırım ve Özyürek, 2013).

Bakır (Cu), ısıtılma ve elektrik iletkenliği, şekillendirilebilirliği yüksek bir elementtir. Özgül ağırlığı 8940 kg/m³ olan bakırın, ergime sıcaklığı 1356,15 K'dir (Erçetin ve diğer., 2018). Alüminyuma ilave edildiğinde alaşıma sertlik, mukavemet kazandırmakla birlikte, alaşımın dökülebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerini de iyileştirmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, yüksek mukavemet gerektirmeyen fakat, iyi bir korozyon direnci istenildiği durumlarda Cu içermeyen Al-Si alaşımları tercih edilmektedir. Öte yandan, yüksek mukavemet gereken fakat korozyon direncinin o denli önemli olmadığı durumlarda %5 oranına kadar Cu içeren Al-Si alaşımları kullanılmaktadır. Ayrıca Cu, Al içinde sert ve kırılma fazların oluşumunda rol oynamaktadır (Ashrafi ve diğer., 2013; Du ve diğer., 2014).

Demir (Fe), alüminyum ile alaşım oluşturabilen, özgül ağırlığı 7860 kg/m³, ergime derecesi 1811,15K olan elementtir. İlave edildiği alüminyum alaşımının mikroyapısal özellikleri üzerinde etkin rol oynayan demir (Fe), mikroyapıda iğnemsisi ve plakalar halinde kristallenmekte ve çeşitli morfolojilerde fazlar oluşturmaktadır (Anantha,1994). Bu durum, demirin ilave edildiği alaşımın sünekliğini, tokluğunu ve korozyon direncini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, bu fazların bulunduğu bölgelerde

gerilme yığılmaları oluşacağından, Fe elementi alüminyum malzemenin kırılgenliğini da artırmaktadır. Alüminyum alaşımlarında demirin bu olumsuz etkilerini giderebilmek amacıyla manganez (Mn) ilavesi yapılmaktadır. Mn ilavesi ile iğnemi yapıya sahip Fe bileşikleri, çin yazısı ($Al_{15}(MnFe)_3Si_2$) olarak adlandırılan morfolojiye dönüşmekte ve bu sayede alaşımin kırılgenliği azaltılmaktadır (Ji ve diğ., 2013).

Manganez (Mn), alüminyuma ilave edilebilen, alaşımda düşük çözünürlüğe sahip, özgül ağırlığı 7210 kg/m^3 , ergime sıcaklığı $1520,15K$ olan, sert ve kırılgen bir alaşım elementidir. Yüksek ergime sıcaklığından dolayı, ilave edildiği alaşımin da ergime derecesini yükseltmektedir. Alüminyum alaşımlarının tokluk ve süneklik gibi özelliklerine olumlu etkisi bulunan manganezin alaşımdaki miktarı %0,1'i aşması, Mn'nin alaşımda bulunan Fe ve Si ile birleşmesine, ergime sıcaklığı çok yüksek intermetalik bileşiklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu bileşikler, alaşım içinde çözünmeyip dibe çökmekte ve alaşımin döküm kabiliyetini negatif etkilemektedirler (Nam ve Lee, 2012).

Titanyum (Ti) elementi de alüminyum ile alaşım oluşturabilmektedir. Özgül ağırlığı 4500 kg/m^3 , ergime sıcaklığı $1941,15K$ olan titanyumun, özellikle Al-Si alaşımları üzerinde tane inceltici etkisi bulunmaktadır. Al-Si alaşımlarının katılaşması sırasında, sıvı alüminyuma ilave edilen Ti, heterojen çekirdeklenmenin ergiyeğin pek çok bölgesinde başlaması için yüzey görevi görmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak katılaşma tamamlandığında birim hacme düşen tane sayısı artacaktır. Bir başka deyişle, tane boyutu küçüldüğü, yani tanelerin incelendiği gözlemlenmektedir. Bilindiği üzere, ince taneli mikroyapı, daha kaba taneli mikroyapıya göre daha üstün mekanik özellikler sergilemektedir (Lee, 2016; Easton ve Stjohn, 1999).

Bor, alüminyum alaşımlarında bulunan diğ. metallerle reaksiyon vererek AlB_2 ve TiB_2 gibi bileşikler oluşturmaktadır. TiB_2 bileşiğı, heterojen çekirdeklenme prosesinde aktif bir tane inceltici rolü oynamakta ve alaşımin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etki yaratmaktadır (Bolzoni ve Hari, 2019). Buna karşın, alaşımda oluşacak metalik karakterli bor bileşikleri, döküm uygulamalarında inklüzyon denilen ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyen yapıları oluşturmaktadır (Biol, 2017).

Çinko (Zn) elementinin, özgül ağırlığı 7140 kg/m³, ergime sıcaklığı 692,55K'dir. Alüminyum alaşımlarına ilavesi dökülebilirliği artırmaktadır. Fakat, yüksek miktarda Zn içeren Al alaşımları sıcak yırtılmaya meyillidirler. Zn miktarı, ekleneceği alışımda %0.50'nin üzerine çıkarsa, alaşımda korozyon direncini azaltmaktadır (Hekimoğlu ve Turan, 2019, ASM International Handbook Committee, 1992).

Krom (Cr), 7190 kg/m³ özgül ağırlığa ve 2163,15K ergime derecesine sahiptir. Alüminyum alaşımlarında tane küçültücü olarak da rol oynayan Cr elementi, Ti ile kullanılmaktadır. Kromun alüminyum içindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Ayrıca Cr elementi, Mn gibi alaşımda ergime sıcaklığını yükseltmektedir (Yang ve diğer., 2015; Shaha ve diğer., 2016).

Stronsiyum (Sr), alüminyum alaşımlarında modifikasyon amaçlı kullanılmaktadır. Al-Si alaşımlarında ötektik reaksiyon sonucu oluşan silisyum fazının morfolojisinin iğnemsî yapıdan lifli yapıya dönüşmesini sağlayan Sr, gösterdiği bu etki sayesinde alaşımda mukavemet ve süneklik özelliklerinde iyileşme sağlamaktadır (Cui ve diğer., 2015).

1.1.2 Alüminyum Döküm Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları araç hafifletme, enerji tasarrufu, geri dönüşüm ve çevre duyarlılığı gibi ülkemizin ve Dünya'nın öncelikli çalışma alanlarında yer alan konular göz önüne alındığında, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere, endüstrinin gözde alaşım grubunu temsil etmektedir (Cui ve Roven, 2010; Miller ve diğer., 2000).

Alüminyum döküm alaşımları sınıflandırılırken, üç basamaktan oluşan ve bir ondalık basamağa sahip bir adlandırma sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem yalnızca alüminyum döküm alaşımlarına özgü olup, dövme alüminyum alaşımları için farklı bir isimlendirme sistemi mevcuttur. Sınıflandırma sisteminde yer alan üç basamaklı sınıflandırmadaki ilk sayı, alaşımda içerdiği ana alaşım elementleri hakkında bilgi vermektedir. Bu sınıflandırma şu şekilde yapılmaktadır (Lumley, 2011).

- 1xx.x serisi: Minimum %99 alüminyum içeren alaşımlar
- 2xx.x serisi: Alüminyum – bakır alaşımları
- 3xx.x serisi: Alüminyum ve silisyuma ek olarak, bakır veya magnezyum
- 4xx.x serisi: Alüminyum – silisyum alaşımları
- 5xx.x serisi: Alüminyum – magnezyum alaşımları
- 6xx.x serisi: Kullanımda değil
- 7xx.x serisi: Alüminyum – çinko alaşımları
- 8xx.x serisi: Alüminyum – kalay alaşımları
- 9xx.x serisi: Diğer alüminyum döküm alaşımları

Üç basamaklı sayının yalnızca ilk rakamına bakılarak (1, 2 veya 3 gibi) alaşım içerdiği ana elementlerin neler olduğu anlaşılmaktadır. Her bir alaşım serisi çok farklı kompozisyonlarda alüminyum döküm alaşımı içermekte olup, alaşım yelpazesi oldukça zengindir. Ayrıca, bu alaşımların her biri de kendi içinde bazı noktalarda birbirinden ayrılmaktadır (Lumley, 2011). Bu varyasyonları göstermek amacıyla, alaşımın kodunun başına A, B gibi harfler eklenmektedir. Örneğin yaygın bir alüminyum alaşımı olan 356 göz önüne alındığında, bu alaşımın A356, B356 ya da F356 gibi varyasyonlarına rastlanmaktadır. Bu alaşımlarda, minör alaşım elementleri açısından bazı farklar bulunmaktadır. Bir örnek vermek gerekirse, 356 alaşımında maksimum %0,6 oranında demir elementine müsaade edilirken, A356 alaşımında bu sınır %0,2'ye, B356 alaşımında ise %0,05'e gerilemektedir. Ayrıca, ilgili alaşımlarda, üç basamaklı sayının sonuna bazı durumlarda 356.1 alaşımında olduğu gibi ondalık bir basamak eklenmektedir. Bu ondalık rakam, 0 (sıfır) ise döküm parçasını, 1 (bir) ise dökümde kullanılacak ingotu, 2 (iki) ise dökümde kullanılacak ve daha dar kompozisyon aralığına sahip ingotu temsil etmektedir (Açıci, 2018; Güven, 2014).

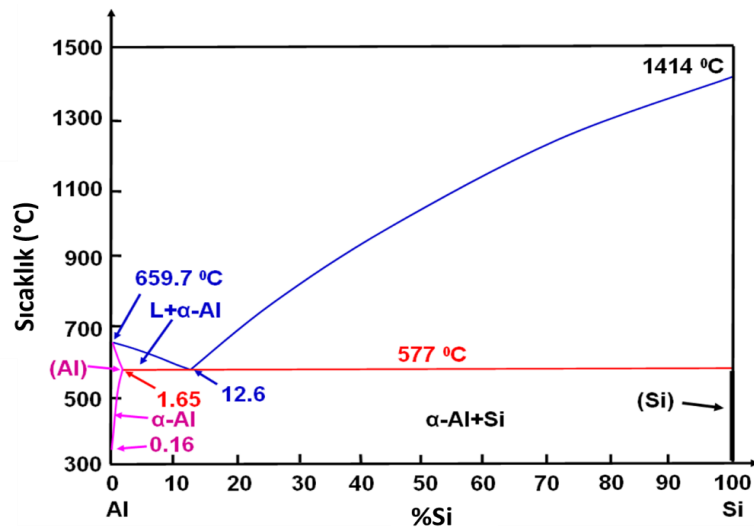
1.1.2.1 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları

Alüminyum-silisyum alaşımları, alüminyum döküm endüstrisinde en çok kullanılan alaşım sınıfını oluşturmaktadır. Döküm alaşımları sınıflandırılmasında 4XX.X koduyla, ya da içinde magnezyum ve/veya bakır da varsa 3XX.X sayı koduyla

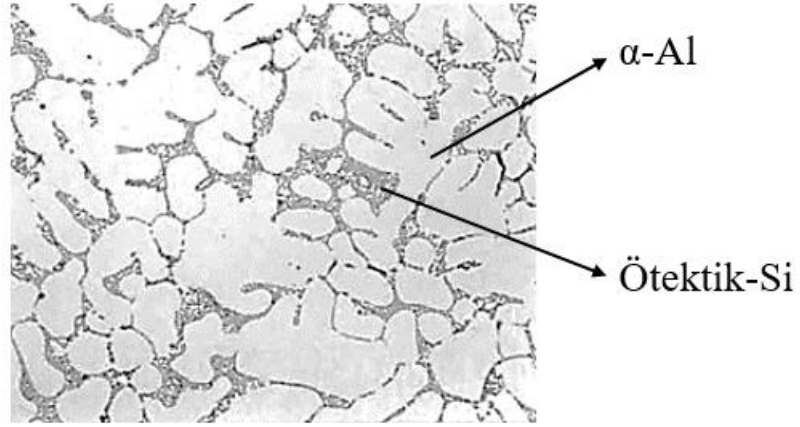
belirtilen bu alaşımlar, döküm yöntemiyle imal edilen alüminyum alaşımları içinde %90'a varan bir orana sahiptir.

Alüminyum döküm alaşımlarında, silisyumun sıvı metalin akışkanlığını artırması sayesinde karmaşık ve ince kesitlere sahip iş parçalarının dökümle üretimi mümkün hale gelmektedir. Silisyum elementi sıvı metale bir yandan akışkanlık sağlarken, aynı zamanda dökümü gerçekleştirilen iş parçasında çekinti oluşma eğilimini de azaltmaktadır (Ravi ve diğer., 2018; Aslandoğan, 2009).

Şekil 1.1'de alüminyum-silisyum ikili faz denge diyagramı yer almaktadır (Liao, 2006). Faz diyagramına bakıldığında, saf alüminyumun ergime noktasının 659,7°C (932,85K) olduğu görülmektedir. Alüminyumun ergime sıcaklığı silisyum miktarının ötektik bileşime yaklaşmasıyla azalmaktadır. Ötektik nokta, 577°C (850K) ve %12,6 Si bileşimine denk gelmektedir. Dolayısıyla, alüminyum dendritlerinin mikroyapıda bulunduğu ve yüksek dayanıma sahip alaşımlar üretebilmek için silisyum miktarını bu ötektik değerin altında tutulması gerekmektedir. A356 gibi yaygın kullanılan alüminyum döküm alaşımlarına bakıldığında, silisyum miktarının yaklaşık %7 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 1.2'de ise otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir alaşım olan A356 alaşımına ait tipik bir mikroyapı görüntüsüne yer verilmiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).

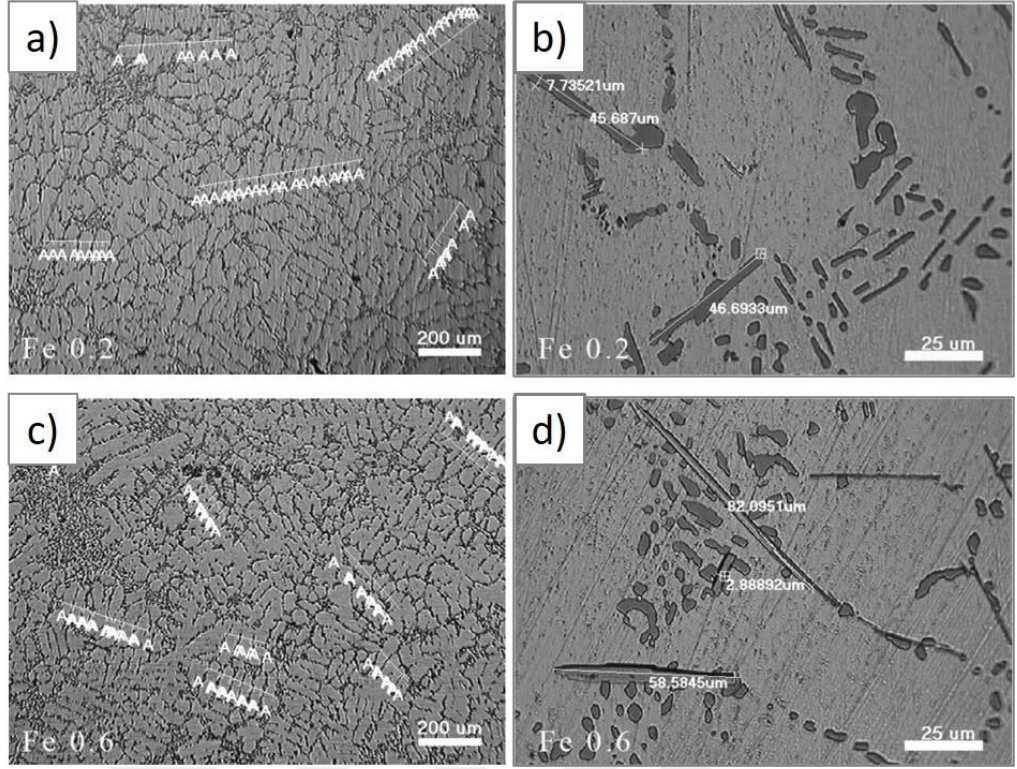


Şekil 1.1 Al-Si faz denge diyagramı (Liao, 2006)



Şekil 1.2 A356 alüminyum alaşıma ait mikroyapı görüntüsü (Kaufman ve Rooy, 2004)

Al-Si döküm alaşımlarında mikroyapıda bulunması istenmeyen elementlerin başında demir gelmektedir. Alüminyum ile oldukça kararlı yapıda, fakat kırılgan doğaya sahip metaller arası bileşikler oluşturan demir elementi, iş parçasının sünekliğini olumsuz etkilemekle birlikte, korozyon dayanımını da düşürmektedir. Kum ve kokil kalıba dökümlerde maksimum %0,6 civarına kadar tolere edilebilen demir için bu oran, basınçlı dökümlerde bazen %3'e kadar çıkabilmektedir. Döküm alaşımlarında demirin gerçekleştirdiği bu zararlı etkileri elemine etmek için alaşıma bir miktar mangan ya da kobalt eklenmektedir (Fortini ve diğer., 2016; Hwang ve diğer., 2008). %15-20 oranında silisyum ihtiva eden ötektik üstü alaşımlar yapılarında Al-Si ötektik fazı içerisine gömülü şekilde birincil silisyum fazı bulundurmaktadır. Bu alaşımlar üstün aşınma direnci göstermekle beraber, motor pistonları gibi aşınmaya karşı yüksek dayanım gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Vatansever ve diğer., 2018). Ayrıca, Al-Si döküm alaşımlarında artan Fe içeriğine bağlı olarak ikincil dendrit kolları arası mesafenin (SDAS) azaldığı ve ötektik morfolojisinin daha inceldiği bilinmektedir. Diğer bir yandan, artan demir içeriğinin alaşım mikroyapısı içerisinde bulunan intermetalik bileşiklerin morfolojisini etkilediği de kanıtlanmıştır. Şekil 1.3'te 2017 yılında Tunçay ve Bayoğlu tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınan A356 alaşıma ilave edilen Fe elementinin alaşımın mikroyapısı üzerindeki etkilerinin gözlemlendiği bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 1.3 A356 alaşıma eklenen (a, b) ağırlıkça %0,2 ve (c, d) %0,6 Fe elementinin mikroyapı üzerindeki etkilerinin görüldüğü farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri (Tunçay ve Bayoğlu, 2017)

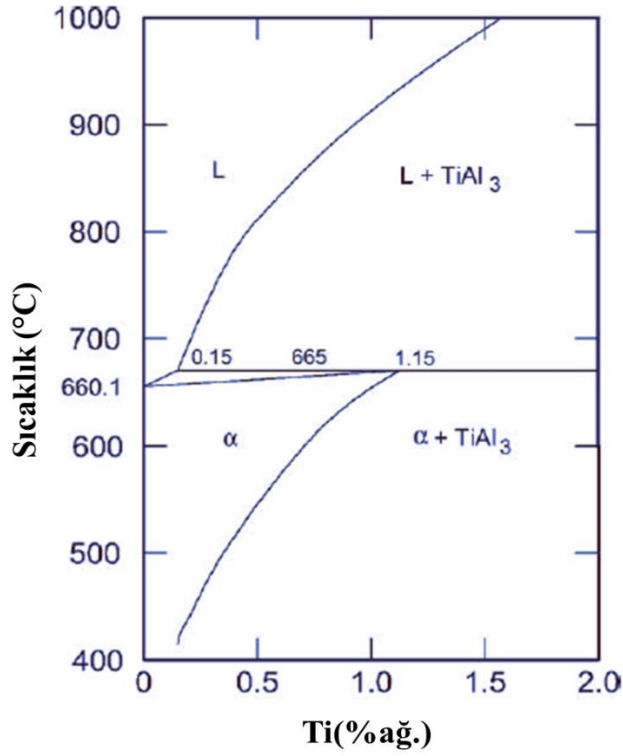
1.2 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarına Uygulanan Metalurjik İşlemler

Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarında mikroyapı, kimyasal kompozisyon, tane inceltme, modifikasyon ve gaz giderme işlemleri olmak üzere başlıca dört yolla kontrol altında tutulmaktadır. Kimyasal kompozisyonda alaşım elementlerinin etkisi detaylı olarak Bölüm 1.1’de verilmiştir. Bu bölümde, sırasıyla tane inceltme, modifikasyon ve gaz giderme işlemlerinin mekanizmaları ve alüminyum döküm alaşımlarına etkisi yer almaktadır.

1.2.1 Tane İnceltme

Tane inceltme, dökümhanelerin dökümlerinin yapısını iyileştirmek için titanyum ilavelerini kullanmaya başladığı 1930’ların başlarına dayanmaktadır. Titanyumun bu etkisini anlamak için Şekil 1.4’te yer alan Al-Ti faz diyagramının göz önüne alınması gerekmektedir. Dikkat edilmesi gereken ilk husus, titanyumun alüminyum ergime

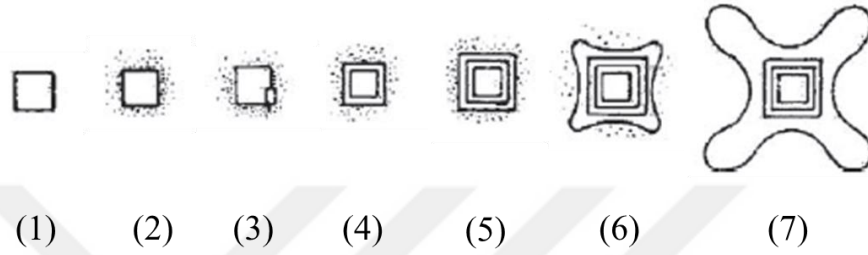
noktasını yükseltmesidir. Saf alüminyum yaklaşık 933,15K’de ergimektedir. Alaşıma titanyum eklenmesi ergime noktasını diyagramdan da açıkça görüleceği üzere 665°C’ye (938,15K) çıkarmaktadır. Bu etki, katı alüminyum tanelerinin çekirdeklenmesi ve büyümesinde önemlidir.



Şekil 1.4 Al-Ti ikili faz denge diyagramının alüminyumca zengin bölgesi (Backerud, 1983)

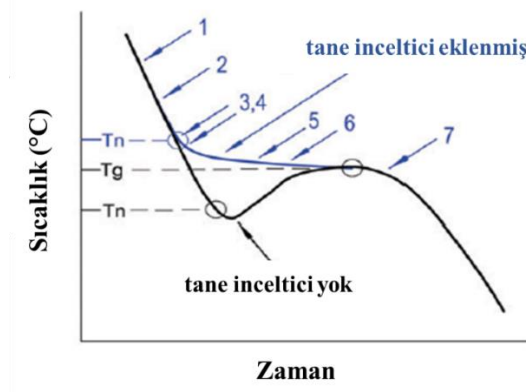
Tane inceltme mekanizması adına en iyi açıklama 1983 yılında Backerud isimli bilim insanı tarafından yapılmıştır (Şekil 1.5), Backerud’un konuyla ilgili makalesinden alınmıştır ve mekanizmayı şematik olarak göstermektedir. Titanyum ilaveleri, %5 ila 10 arasında titanyum içeren ve ergiyiğe eklenen alüminyum master alaşımları ile yapılmaktadır. Bu master alaşımlar, çok sayıda titanyum alüminit (TiAl₃) kristalini içermektedir. Master alaşım dökümden genellikle hemen önce ergiyiğe eklendiğinde, bu mikroskobik parçacıkların milyonlarcası ergiyiğe salınmaktadır. Bu parçacıklardan biri temsilen Şekil 1.5’te (1) ile gösterilmektedir. TiAl₃ kristali sıvı alüminyumla temas ettiğinde çözmeye başlar. Bu, parçacığın yüzeyindeki sıvı metalin, Şekil 1.5 (2) ile gösterildiği gibi titanyum ile zenginleştirildiği anlamına gelir. Al-Ti faz diyagramında gösterildiği gibi, alüminit ile temas halinde bulunan Ti-zengin

metal, baz alaşımının ergime noktasının üzerinde bir sıcaklıkta katılaşmaya başlar. Dolayısıyla, katı alüminyumun ilk çekirdeklenmesi, şekil 1.5 (3)'te gösterildiği gibi alüminid parçacığının yüzeyinde olacaktır. Alüminyum kristali daha sonra alminitin (4 ve 5) yüzeyi çevresinde büyür. Bu süreçte, kristalin yakınında znmş Ti'yi tüketir ve büyüme durur. Metal soğudukça dendritik büyüme başlamakta (6) ve katılaşma sürdükçe devam etmektedir (7).



şekil 1.5 TiAl₃ kristalinin üzerinde alüminyumun çekirdeklenmesi ve büyümesinin şematik gösterimi (Backerud, 1983)

Bu olayların gelişimi, malzeme bilimi temelinde termal analiz ve mikroyapı incelemesi olmak üzere iki şekilde teyit edilebilir. Termal analiz, bir metal örneğini küçük bir kaba dökmek ve bir termokupl ile katılaşma sırasında sıcaklığı kaydetmektir. Bu durumda tane inceltici master alaşım eklenmiş ve eklenmemiş metalin ortaya çıkan soğutma eğrileri şekil 1.6'da gösterilmektedir. Yöntemde, alaşımların likidüs eğrilerine göre yorum yapılmaktadır. Ti eklendiğinde çekirdekleşme sıcaklığı, T_n, genellikle büyüme sıcaklığının, T_g, üzerindedir. Ti mevcut olmadığında, metal çekirdeklenme meydana gelmeden önce büyüme sıcaklığının birkaç derece altında soğur (Backerud, 1983). Buna göre, basit bir termal analiz yönteminden faydalanılarak, alaşımda tane inceltme işleminin başarılı olup olmadığı kolayca tespit edilebilmektedir.



Şekil 1.6 Katılaşma sırasındaki soğuma eğrileri (Backerud, 1983)

Tane inceltme mekanizmasının bir başka teyidi, alüminyum dökümlerin mikroyapısının dikkatle incelenmesiyle mümkündür. Mikroyapı uygun şekilde anodize edildiğinde ve polarize ışık altında görüntülendiğinde, Şekil 1.5'teki (6) ve (7)'ye karşılık gelen Ti açısından zengin alanlar ortaya çıkar. Bir örnek Şekil 1.7'de sunulmaktadır (Easton ve Stjohn, 2000). Tanelerin merkezinde bulunan daha koyu alanların, mikroprob ölçümleri ile Ti cinsinden yüksek olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Al-0,06%Ti alaşımında dendritlerin içerisinde yer alan koyu renkli ve titanyumca zengin bölgelere ait mikroyapı görüntüsü (Easton ve Stjohn, 2000)

Titanyumun alüminyumun tane incelmesinde nasıl davrandığını açıkça gösterilmiştir, ancak dikkate alınması gereken ek bir faktör, $TiAl_3$ partiküllerinin çözünmesidir. Titanyumun alüminyum alaşımlarına ilave seviyesi yaklaşık 100 ppm'dir (%0,01 Ti). Bu az miktarda titanyum, normal döküm sıcaklıklarında nispeten

saf alüminyuma eklendiğinde çözünür. Eklenen parçacıklar çözündüğünde, tane inceltme etkisi kaybolur. Zamanla bu tane inceltme yeteneğinin kaybına “solma” (fade) denir (Sigworth, 1984). Tane inceltme etkinliğinin kaybı bir dizi faktöre bağlıdır. En önemlisi, metalin Ti içeriği, metal sıcaklığı ve kullanılan master alaşım türüdür. Bir diğer etmen, $TiAl_3$ partikül boyutudur. Al-Ti çubuk ürünleri daha küçük partiküllere sahiptir ve daha hızlı çözünme eğilimi gösterir. Bu çözünme süresi tipik olarak 10-15 dakikadır. Waffle şeklindeki master alaşım ürünleri daha yüksek bir sıcaklıktan dökülür ve daha büyük alüminid parçacıklarına sahiptir. Bu parçacıkların çözünmesi 30-40 dakika kadar sürebilmektedir. Dökümhanedeki pratik sonuç ise nispeten basittir. Metaldeki Ti, çözünürlük sınırının önemli ölçüde altında ise ($665^{\circ}C$ 'de %0,15 Ti), o zaman tutarlı bir şekilde tane inceltmek mümkün değildir.

Titanyum için maksimum limitler çoğu alaşımda oldukça yüksektir, fakat bazı durumlarda minimum değer belirtilmiştir. Örneğin 201 alüminyum alaşımında döküm sırasında sıcak yırtılmayı önlemek için bu alaşımda tane inceltmesi hayati önem taşır. Alüminyum Birliği tarafından yayınlanan 201 alaşım için şartname, %0,35 Ti'ye kadar izin verir ve minimum %0,15 Ti içeriği istenmektedir. Diğer 2xx.x ve 7xx.x döküm alaşımlarının birçoğunun da minimum değeri vardır (%0,10 veya %0,15 Ti). Birkaç istisna dışında, alüminyum döküm alaşımlarında en az %0,20 Ti'ye izin verilmektedir (Sigworth ve Kuhn, 2007).

Al-Ti tane incelticiler hakkındaki verilen bilgiler ışığında 1970'lere kadar 75 yıllık tane inceltme uygulamasının temel ifadesi şu şekildedir: “Al-Ti tane incelticilerin yapıda çözünmesini engellemek için yüksek miktarda Ti gereklidir.” 1970'li yıllarda şu anda da hali hazırda endüstriyel dökümhanelerde sıklıkla kullanılan Al-Ti-B içerikli master alaşımlar geliştirilmiştir. B içerikli tane incelticiler daha iyi etkili ve daha ekonomiktir (Cole ve diğer., 1972). Modern Tibor® tane incelticilerindeki titanyumun çoğu TiB_2 parçacıkları olarak bulunur ve titanyum diborür ergimiş alüminyumda neredeyse çözünmezdir. Bu durumda tane inceltme işleminin temel ifadesi şu şekilde güncellenmiştir: “Al-Ti-B tane incelticilerin yapıda çözünmesini engellemek için yüksek miktarda Ti gerekli değildir.” Bu durum tane inceltme prosesinin yalnızca bir parçasını oluşturmaktadır. Düşük çözünürlüğe ek olarak, borürler döküm

alaşımlarında son derece etkili çekirdeklerdir. Aslında, alüminyum döküm alaşımları için bir tane inceltici olarak borun titanyumdan daha iyi olduğu söylenmektedir (Lu ve diğer., 1981). Tane inceltme temelinde alüminyum alaşımları üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar özellikle ikinci faz partiküllerinin dağılımını değiştirmekte ve dolayısıyla döküm parçaların mekanik özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır. Ayrıca, alüminyum döküm alaşımlarına uygulanan tane inceltme işlemleri, alaşım içerisinde bulunan porozite miktarının azalmasını sağlamakta ve boyutlarını küçültmektedir. Bunun yanı sıra, tane inceltme işlemi döküm alaşımlarında besleme kabiliyetini de arttırabilmektedir (Çolak, 2009; Li ve diğ., 2013).

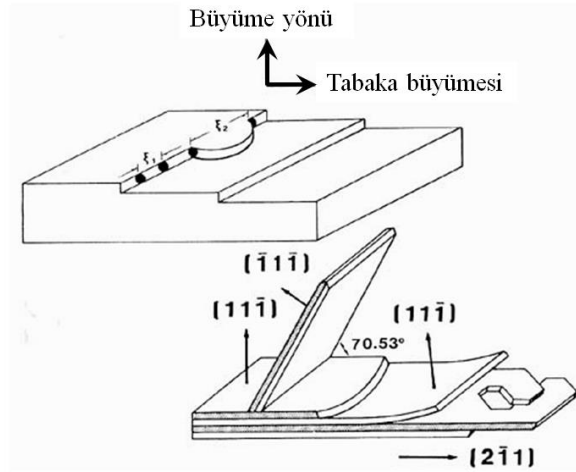
Sonuç olarak tane inceltme işlemleri, alüminyum alaşımlarının döküm uygulamaları sırasında önemli bir mukavemet arttırma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda, tane incelticilerin alaşıma ilave edilmesi, yüksek tokluk, yüksek akma mukavemeti, mükemmel şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerin elde edilmesini mümkün kılan küçük, homojen bir dağılıma sahip, eş eksenli tanelere sahip bir yapının ortaya konulması konusunda oldukça önemlidir (Li ve diğ., 2013).

1.2.2 Modifikasyon

Alüminyum alaşımlarında modifikasyon işlemi; soğutma modifikasyonu, termal modifikasyon ve kimyasal modifikasyon olmak üzere üç farklı yolla mümkündür. Yüksek katılaşma hızları (soğutma modifikasyonu), çözeltiye alma tavı (termal modifikasyon) ve çeşitli elementlerin ilavesi (kimyasal modifikasyon) işlemleri ile ötektik fazın morfolojisinin üzerinde değişiklik yapılabilir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı kimyasal modifikasyondur. Çözeltiye alma tavı, kimyasal modifikatörler bulunmadan evvel mekanik özellikleri arttırmak ve silisyum fazını daha küresel hale getirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, katılaşan yapı ötektik sıcaklığın üzerine çıkarılır. Öte yandan, ötektik sıcaklığın üzerine çıkılması, özellikle hızlı katılaşmış dökümlerde yanma olayına neden olabileceğinden süreç kontrol altında tutulmalıdır ve çözünme işlemi için biraz beklendikten sonra ani soğutma yapılarak daha ince taneli bir yapı elde edilir. Soğutma hızının artırılması ile de

modifikasyon mümkündür; fakat kokil döküm ve basınçlı dökümde soğutma hızı üzerinde etkin bir kontrol şansı yoktur. Aynı etki sadece ppm seviyesinde element ilavesiyle de gerçekleştiğinden endüstriyel uygulamalarda kimyasal modifikasyon tercih edilmektedir (Apelian ve diğer., 1984). Ayrıca, bir dökümde kesit dağılımı homojen değilse ki birçoğunda öyledir, soğutma hızı da kontrol edilemez. Bu gibi nedenlerle başarılı bir uygulama ve homojen bir mikroyapı elde etmek için kimyasal modifikasyon süreçleri tercih edilir.

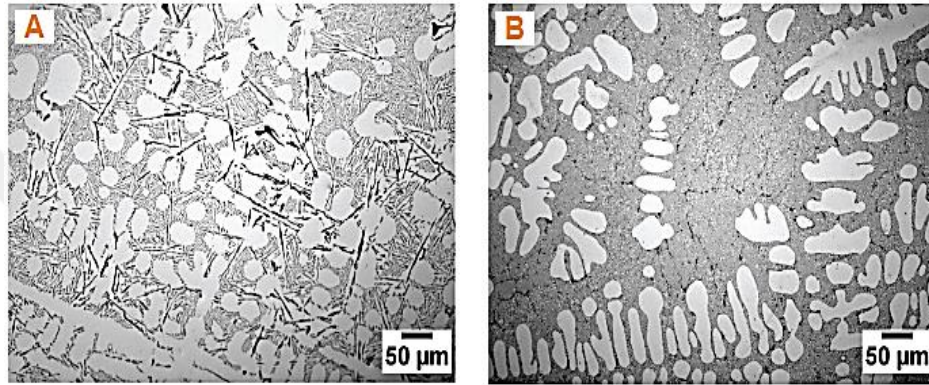
Kimyasal modifikasyon işleminde alaşıma eklenen 150-250 ppm seviyesinde Sr elementi ile ötektik faz tabakalarının iğnemi yapıyı oluşturmak için büyüme gösterdiği yönler çeşitlendirilir ve elyafımsı bir yapının ortaya çıkması sağlanır. Şekil 1.8'de alüminyum alaşımlarında kimyasal modifikasyonun mekanizması şematik olarak gösterilmektedir (Apelian ve diğer., 1984).



Şekil 1.8 Modifikasyon işlemi mekanizmasının şematik gösterimi (Apelian ve diğer., 1984)

Alüminyum döküm alaşımlarında özellikle mukavemet ve sünekliğin birlikte gerektiği uygulamalarda mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde modifikasyon işleminden yararlanılmaktadır (Tsumura, 1957). Alüminyum döküm alaşımlarında modifikasyon işlemi döküm öncesi, kimyasal yolla stronsiyum (Sr) elementi eklenmesi ile yapılmaktadır. Şekil 1.9, alaşıma ilave edilen Sr elementinin mikroyapıda meydana getirdiği değişimi göstermektedir. Mikroyapı resimlerinde açık renkli ve birbirine bağlı olarak görünen yapılar α -Al olarak isimlendirilen alüminyum

dendrit yapısını temsil etmektedir. Bu dendritler arasında yer alan ve iğnemsî morfolojide görünen koyu renkli yapılar ise, ötektik reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ötektik fazdır. Tabaka yapısındaki bu faz, mikroyapıda Şekil 1.9 (A)'da olduğu gibi iğnemsî bir yapıda görünmektedir. Şekil 1.9 (B)'de ise, alaşıma 200 ppm oranında Sr takviyesinin mikroyapıda yarattığı değişim görülmektedir. Burada, α -Al dendritleri üzerinde önemli bir etki gözlenmemesine rağmen, ötektik fazı çok daha incelmış ve iğnemsî yapıdan ziyade elyafimsî bir morfolojiye dönüşmüştür (Timpel ve diğer., 2012).

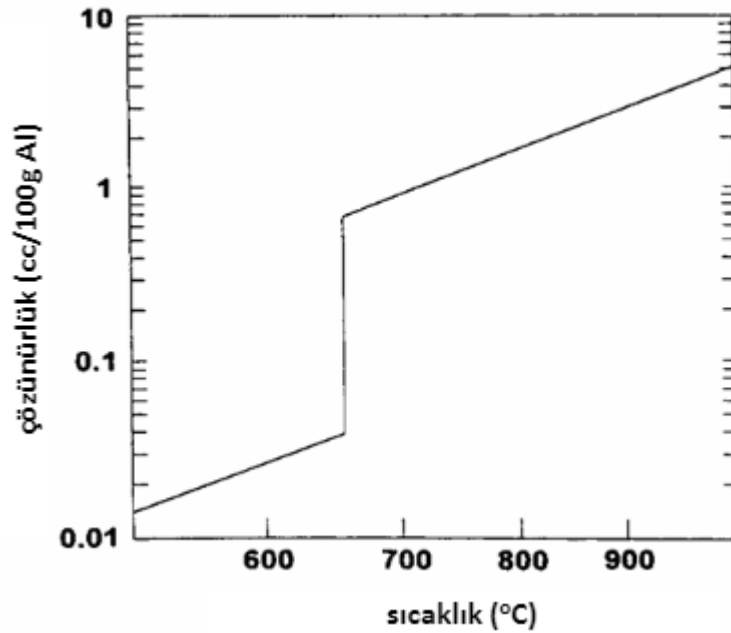


Şekil 1.9 (A) Al-%10Si alaşımasının mikroyapısı; (B) aynı alaşımın 200 ppm Sr eklenip modifikasyon işlemi gördükten sonraki mikroyapısı (Timpel ve diğer., 2012)

Al-Si döküm alaşımlarında stronsiyum elementinin etkisini özetlemek gerekirse, döküm öncesinde alaşıma eklenen eser miktar, ötektik tabakalarının ince elyaf haline dönüşmesini sağlamaktadır (Timelli ve diğer., 2016). Hem malzemenin mukavemetini hem de sünekliğini olumsuz olarak etkileyen bu sert ve iğnemsî Si tabakaları Sr elementi sayesinde ince fiber yapısına dönüşünce, malzemenin hem mukavemetinde hem de sünekliğinde kayda değer bir iyileşme meydana gelmektedir. Mikroyapıda bu tür etki yalnızca Sr elementi ile değil, sodyum (Na) ya da antimon (Sb) gibi elementlerle ya da soğuma hızının artırılmasıyla da sağlanabilmektedir. Fakat kokil ve basınçlı dökümde, alaşımlarda soğutma hızı üzerinde önemli bir kontrol olanağı olmaması ve eser miktarda Sr'nin bu etkiyi ortaya koyması sebebiyle, sektörel döküm uygulamalarında bu amaçla genellikle Sr tercih edilmektedir. Aynı zamanda stronsiyumun modifiye edici etkisinin sodyuma göre daha uzun sürmesi, bu elementin tercih edilme sebeplerinden bir diğeridir (Timelli ve diğer., 2016).

1.2.3 Gaz Giderme

Alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde çözünürlüğü yüksek olan tek gaz hidrojendir. Şekil 1.10'da hidrojenin alüminyum içerisindeki çözünürlüğünün sıcaklıkla değişiminin grafiksel ifadesi yer almaktadır (Anyalebechi, 1995). Buna göre, sıvı alüminyum içerisinde hidrojenin çözünürlüğü 0,7 ml/100g Al iken, katıda bu değer yalnızca 0,02 ml/100g Al'dir. Sıcaklık 680°C'nin üzerinde çıktığında, sıvı alüminyumda çözünebilecek hidrojen miktarı aniden yükselmektedir. Katılaşma sırasında, sıvı alüminyum içinde çözülmüş halde bulunan hidrojen katı tarafından kabul görmez. Reddedilen bu hidrojen daha sonra gaz haline dönüşerek katı alüminyumun içerisinde istenmeyen döküm hatalarından olan gaz boşluklarının meydana gelmesine sebep olur (Özer, 2012; Tiryakioğlu, 2020).



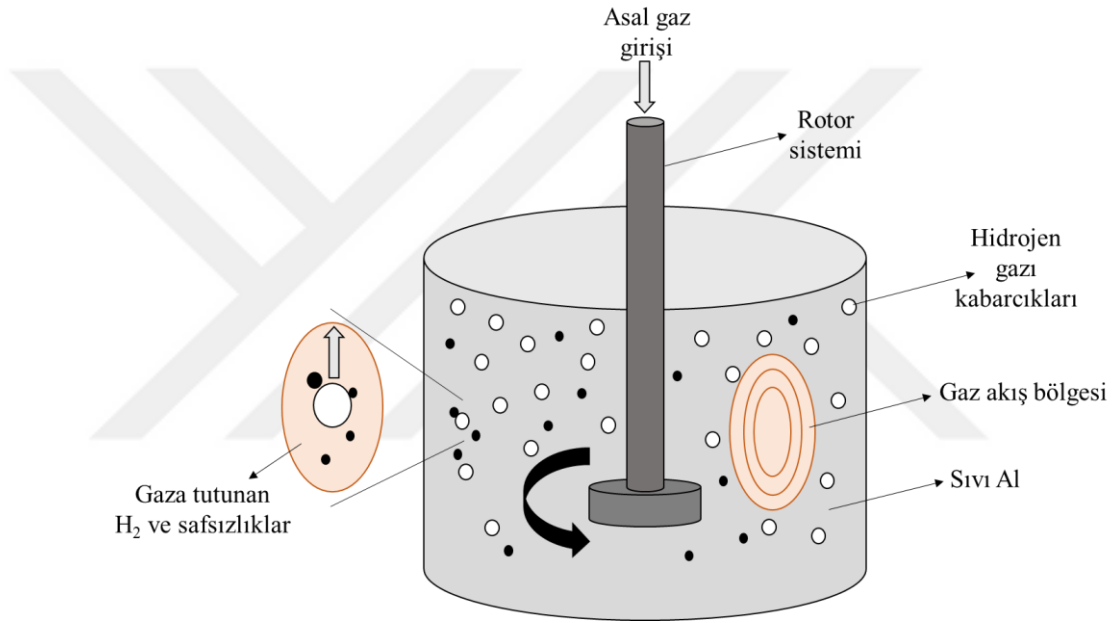
Şekil 1.10 Hidrojenin alüminyum içindeki çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi (Anyalebechi, 1995)

Alüminyum alaşımlarında hidrojenden kaçınmak amacıyla döküm prosesi sırasında dikkat edilmesi gereken parametreler mevcuttur. Bu durumun önüne geçmek adına, ıslak ya da nemli malzemeler döküm ocağına şarj edilmemelidir. Şarj malzemelerinin mutlaka kuru kalmaları ve bu şekilde prosese katılmaları sağlanmalıdır. Benzer şekilde, kirli veya boyalı hurda fırına şarj edilmemelidir. Ergitme ocağının kapağı, gaz

giderme, cüruf çekme, alaşım elementi ekleme ve şarj işlemleri gibi zorunlu haller dışında atmosfere açık tutulmamalıdır. Sıvı alüminyumun ergitme ocağından, döküm ünitesine transferi sırasında türbülans oluşumundan kaçınılmalıdır. Ayrıca, Şekil 1.10'da yer alan grafikten de açıkça görüleceği üzere, sıcaklığın her bir 373,15K artışı, alüminyum içinde çözünmüş hidrojen miktarının iki katına çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durum, alüminyum alaşımlarında ergitme ve döküm sıcaklıklarının önemini de ortaya koymaktadır. Sıvı metal sıcaklığı aşırı derecede yükseltilmeden ergitme ve döküm sağlanmalıdır (Campbell, 2003).

Bu gibi önlemlerin yanı sıra, endüstride hidrojeni alüminyumdan uzak tutmak için örtü flakslarının kullanılması, vakum yöntemi, ultrasonik yöntem ve asal gaz uygulamaları gibi farklı önlemler de alınmaktadır. Koruyucu örtü tozları, ocaktaki ergiyeğin hidrojenle temasını engellemek için sıvı metalin üzerinde bir tabaka oluşturulması prensibiyle iş görmektedir (Önel, 2015). Hidrojen genellikle ergiyeğin içerisinde nem ile temas sonucu girdiğinden, bu koruyucu örtü tozlarının ihtiyacı karşılayamadığı durumlar söz konusudur. Dökümde kullanılan potalar, alyajlar vs. bekleme sırasında mutlaka üzerlerinde nem biriktirmektedirler. Ön ısıtma yapılması, nemin giderilmesi için bir çözüm gibi görünse de endüstriyel uygulamalarda maliyet ön plana çıktığından sürekli olarak bu işlem tekrarlanmamaktadır. Vakum uygulamaları, sıvı alüminyumdan hidrojeni uzak tutmaya yarayan bir başka metottur. Bu metot, sıvı alaşımın vakum altına alınması ve yüzeydeki basıncın düşürülmesi prensibine dayanır. Bu yöntemde, endüstri koşullarında vakum sistemi kurulumu gerektiğinden, oldukça yüksek maliyetlidir (Puga ve diğer., 2019; Shih ve Weng, 2004). Ultrasonik yöntem ise, sıvı içerisinde ses dalgaları yardımıyla oyuklar oluşturulması ve basınç yaratılması ile, sıvının oluşan gözeneklerden arındırılması esasına dayanır (Shih ve Wen, 2005; Eskin ve diğer., 2014). Öte yandan, alüminyum içerisine giren hidrojeni sıvıdan uzaklaştırmak adına, endüstride sıklıkla tercih edilen, basit ve etkili olan yöntem asal gaz uygulamasıdır. Alüminyum içindeki hidrojenin çözünürlüğü Sievert kanununa göre sıcaklık ve basıncın kare kökü ile orantılıdır. Bu yöntemde, inert gaz potanın en dibinden gelecek şekilde sıvı alüminyum içerisine daldırılan dönel bir rotor sistemi yardımıyla verilmektedir. Bu sayede, dipten yüzeye doğru ilerleyen kabarcıklar, sıvının içindeki hidrojeni toplayarak yüzeyden dışarı

atılmasını sağlamaktadır (Walek ve diğer., 2021). Şekil 1.11’de alüminyum dökümde gaz gidermede kullanılan rotorlu sistemin şematik gösterimi yer almaktadır (Warke, 2005). Yöntemde kullanılan rotorlar genellikle sıvı alüminyum ile reaksiyon vermeyen silisyum karbür ya da grafit malzemeden yapılmaktadır. Rotor ergiyiğe sokulmadan önce, iyice ısıtılmalı ve neminden arındırılmalıdır. Ardından ergitme potasının dip kısmına temas edinceye kadar daldırılmalıdır. Rotorla gaz giderme sistemlerinde, argon, azot ya da klor gazı kullanıldığı gibi, bu gazların karışımı da sisteme verilebilmektedir (Türker, 2005).

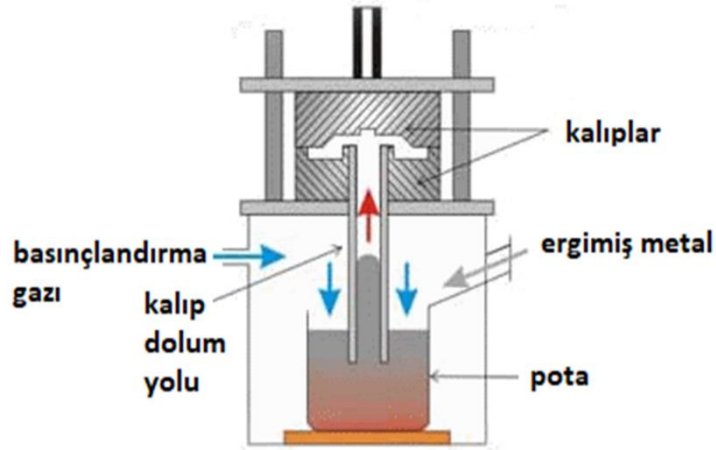


Şekil 1.11 Rotorlu gaz giderme sisteminin şematik gösterimi (Warke, 2005)

1.3 Alçak Basıncılı Döküm Yöntemi ile Jant Üretim Süreci

Endüstriyel koşullarda alüminyum esaslı jant üretiminde sıklıkla tercih edilen ve seri üretime uygun olan yöntem, alçak basınçlı dökümdür. Jant üretimi, ham maddenin ergitilmesi adımı ile başlamaktadır. Ham maddenin ergitilmesi sırasında, alaşıma eklenen sırasıyla AlTi5B1 ve AlSr10 gibi master alaşımlar yardımıyla, tane inceltme ve modifikasyon işlemleri de gerçekleştirilmektedir. Ergitme ocaklarında bileşimi hazırlanan sıvı alaşım, gaz giderme ünitesine gönderilmektedir. Burada, dönel bir rotor yardımıyla sıvı alüminyumdan azot, argon veya azot+argon gibi inert gaz geçirilmesi ile, porozite gibi döküm hatalarının önüne geçebilmek adına hidrojen gazının

giderilmesi sağlanmaktadır. Gaz giderme işlemi ortalama 10 dakika kadar sürmektedir. (Gaz giderme işleminin detayları Bölüm 1.2.3'te verildiğinden, bu kısımda ayrıntıya girilmeyecektir.) Gaz giderme işleminin ardından sıvı alüminyum alaşımı Şekil 1.12'de görülen alçak basınçlı döküm ünitesinin alt kısmında konumlanan bekletme ocağına alınmaktadır. Burada, sıvı metalin yüzeyine hava basıncı uygulanarak, ergiğin dikey yolluk boyunca yükselmesi ve jant kalıbını doldurması sağlanmaktadır. Jant kalıplarının imalatında H13 kaliteli takım çelikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, dökülen jantın kalıptan kolayca ayrılmasını sağlamak, bir diğer deyişle jantın kalıba yapışmasını önlemek ve servis ömrünü uzatmak amacıyla kalıba poteyaj işlemi uygulanmaktadır. Poteyaj işleminde kullanılan kaplama genellikle alüminyum titanattır. Kalıbın doldurulmasının ardından, iş parçası kalıba entegre soğutma sistemleri yardımıyla (hava, su veya hava+su karışımı verilerek) soğutularak katılaştırılmaktadır. Ardından, sıvı metalin yüzeyine uygulanan basınç kaldırılmakta ve dikey yollukta bekleyen fazla sıvı alüminyumun bekletme potasına geri dönüşü sağlanmaktadır. Alçak basınçlı döküm işleminin son adımında ise, iş parçası kalıptan çıkarılmaktadır (Bonollo ve diğer., 2005; Campbell, 2003). Bir jantın ortalama döküm süresi 300 saniyedir.



Şekil 1.12 Alçak basınçlı döküm ünitesinin şematik gösterimi (Shi, 2012)

Döküm ünitesinden çıkarılan jantların tamamı, X-Ray kontrolünden geçirilmekte ve iş parçaları içermiş oldukları döküm hatalarına göre değerlendirilmektedir. X-Ray değerlendirmesi sonucu uygun olan jantların döküm yolları kesilmektedir. Eğer ısı

işlem uygulaması yapılacaksa, bu kısmın ardından, ısıtma işlemi tabi tutulacak jantlar ısıtma ünitesine gönderilmektedir. Çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşan, T6 temper koduyla anılan çökelme sertleşmesi ısıtma işlemi sonrası, jantlar talaşlı imalat (CNC işleme) ünitelerine gönderilmektedir. Sonrasında, gerekli kontrol testlerinin (sızdırmazlık, boyutsal kontroller vs.) yapılmasını takiben, uygun olan jantların balans ayarlamaları yapılmakta ve boyama birimine sevk gerçekleştirilmektedir. Uygun olmayan jantlar ise, ergitme aşamasına geri gönderilmekte ve üretim sürecinin bu kısma kadar olan bölümü yeniden ergitme işlemi sonrası tekrarlanmaktadır. Üretimde yoluna devam eden ve balans ayarlamaları gerçekleştirilen jantlar kumlama ve boyama işlemlerinin ardından paketlenip, sevkiyata hazır hale getirilmektedir (Işık ve diğer., 2020; Kara ve diğer., 2017).

Alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretiminde dijitalleşme çalışmalarına yönelik olarak, hali hazırda endüstriyel uygulamalarda seri üretime geçilmeden evvel, ürün ve kalıp tasarımı aşamasında iki boyutlu teknik çizim ve üç boyutlu modelleme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Ürün tasarım aşamasında tasarım doğrulama simülasyonları, kalıp tasarım ve imalat aşamasında ise kalıp imalat ve döküm simülasyonlarından faydalanılmaktadır.

Alçak basınçlı döküm yöntemi, üründe yüksek mukavemet değerlerine erişilmesi, karmaşık geometriye sahip iş parçalarının üretimine uygunluğu, besleyicilere gerek duyulmaması, boyutsal kararlılığın yüksek olması, otomasyona uygun bir süreç niteliği taşıması ve üretim kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Buna karşın, daha yavaş döküm döngüleri ve yüksek kalıp maliyetleri, yöntemin dezavantajları arasında sayılabilir (Hasırcı, 2017; Woycik, 2008). Bu yöntem kullanılarak, otomotiv endüstrisinde hava giriş manifoldları, silindir kafaları, taşıyıcı kontrol kolları, otomobil jantı, hafif ticari araç jantı, yağ karterleri, debriyaj karteri, diferansiyel gövde ve kapak gibi pek çok ürünün imalatı mümkündür (Bozkurt, 2019; Yavuz, 2019).

BÖLÜM 2

HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ VE DÖKÜM SİMÜLASYONLARI UYGULAMALARI

Son yıllarda alaşım geliştirme çalışmaları konusunda büyük fayda sağlayan ve yeni nesil yöntemlerden biri olan Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği yaklaşımlarının endüstriyel ve akademik alanlarda kullanımı (*Computational Materials Engineering-CME*) giderek artış göstermektedir (Bedir ve Delikanlı, 2006). Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (HMM) bütünsel ve entegre bir sistem içerisinde malzemelerin üretim, tasarım ve eşzamanlı analizini gerçekleştirme konusunda büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Söz konusu yaklaşımlar, üretilmek istenen ürünün en düşük maliyetle en kısa sürede geliştirmesi konusunda büyük önem arz etmektedir.

Bu yaklaşımlar prensibinde çalışan yazılımlar ise temelinde performans-yapı-özellik ilişkilerini nicel olarak tanımlayan malzeme modellerinin geliştirilmesini, görsel ve matematiksel olarak modellenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, yeni nesil malzemelerin gelişimini sağlamak, üretilebilirliklerini kolaylaştırmak, problem oluşturabilecek durumları üretim faaliyetleri öncesinde saptayabilmek adına söz konusu yaklaşımların değerlendirilmesi önemlidir.

Hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarından faydalanılarak, sıcaklığa ve alaşımların kimyasal kompozisyonu bağlı değişim gösteren yoğunluk, termal ve elektriksel iletkenlik, entropi, entalpi, elastisite modülü, serbest enerji, viskozite gibi termodinamik ve kinetik özelliklere ilişkin hesaplamalı bilgi birikimi elde edilebilmektedir. Ayrıca, malzemelere ait akma-çekme dayanımı, uzama miktarı, farklı ısıtma işlem prosesleri ve parametreleri sonrası elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler, alaşımlara ait sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramları (TTT) ve sürekli soğuma-dönüşüm eğrileri (CCT) bu yaklaşımlar ile elde edilmesi mümkün diğer malzeme verileridir (Schäfer, 2006).

Söz konusu yaklaşımlar temelinde geliştirilen, akademik ve endüstriyel uygulamalarda sık kullanılan farklı ticari yazılımlar mevcuttur. JMatPro ve Thermo-

Calc, sıklıkla tercih edilen malzeme veritabanlı yazılımlardan yalnızca ikisidir. Bu öngörü yazılımları, döküm gibi dinamik ve çok farklı parametreleri bünyesinde barındıran bir yöntem ile alüminyum iş parçalarının üretimi öncesinde, alaşıma ait özelliklerin ortaya konulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yeni nesil ürünlerin piyasaya çıkış süresinin kısaltması gibi konularda kullanıcıya fayda sunmaktadır. Ayrıca, söz konusu prensipte çalışan yazılımlar, gelişen teknoloji seviyesine, hızlı ve etkin bir şekilde uyum göstermesiyle, araştırma-geliştirme ve inovasyon faaliyetlerinin artırılması, yurtiçi ve yurtdışı pazarda rekabetçiliğin sürdürülmesi, zaman, işgücü ve enerjiden tasarruf sağlanması konularında da etkin çözümler ortaya koymaktadır (Ovrutsky, Prokhoda ve Rasshchupkyna, 2004).

Günümüzde, hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları, malzeme teknolojileri alanında, hammadde ve alaşım geliştirme çalışmaları gerçekleştirmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle alüminyum döküm endüstrisinde, üretim parametrelerinin ve ürün özelliklerine yönelik sanal bilgi birikimin elde edilmesinde döküm simülasyonlarından yararlanılmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, akademik ve endüstriyel açıdan yeni nesil mühendislik uygulamalarını oluşturmaktadır. Özellikle, son iki yıl içerisinde, Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (*Integrated Computational Materials Engineering-ICME*) kavramının geliştirilmesi, hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları temelinde geliştirilen yazılımlar ile alaşım bileşimlerine bağlı elde edilen malzeme verilerinin, sanal-simüle ortamda doğrudan döküm simülasyonu yazılımlarına aktarılmasıyla sanal ve gerçek üretim koşulları arasında kurulmak istenen ilişkinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylelikle, alüminyum alaşımlarında, hammaddeden, nihai ürünün imal edilmesine kadar olan tüm üretim akışının bilgisayar ortamında modellenmesi, oluşması muhtemel problemlerin fiziksel ürün üretimi öncesinde öngörülmesi ve buna karşılık önlemlerin alınması mümkün olmaktadır. Halihazırda uzun süren uğraşlar ve deneysel faaliyetler sonucunda elde edilen fiziksel bilgi birikiminin, bu yaklaşımlar temelinde, sanal ortamda hızlı bir şekilde elde edilmesi, endüstriyel uygulamalarda hem üreticinin hem de müşterinin beklentilerinin karşılanabilmesi konusunda alternatif ve ekonomik bir çözüm yolu ortaya koymaktadır (Thornton ve diğer., 2002).

Öte yandan, alüminyum alaşımlarının kompozisyona bağlı fiziksel ve mekanik özelliklerinin anlaşılabilmesi, farklı ısıtım işlem çeşitleri ve parametrelerinin malzeme üzerinde meydana getirdiği etkilerin belirlenmesi gibi konularda birçok araştırma ve geliştirme çalışması gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar sırasında, bilim insanları, fazlasıyla zaman ve enerji harcanmasına neden olan birçok deneysel faaliyet gerçekleştirmektedir. Gelişen teknoloji ile ortaya atılan ilgili yaklaşımlar sayesinde bu deneysel faaliyetlerin sanal-simüle ortamda gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Bu kapsamda, birçok alaşım grubuna ait sanal bilgi birikimi elde edilebilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının ısıtım işlem uygulamalarına yönelik olarak da kullanılabilen bu yazılımlar, bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel faaliyetlerin sayısını azaltma konusunda büyük potansiyele sahiptir. Böylece gerek zaman gerekse enerjiden tasarruf edilmekte olup, büyük veri dosyalarına çok kısa sürelerde erişilebilirlik mümkün hale gelmektedir. Sağladığı tüm bu faydalar göz önüne alındığında, hesaplamalı malzeme mühendisliği, alüminyum alaşımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerine yönelik sanal bilgi birikimin oluşturulması faaliyetlerinde kullanılmakta ve günümüzde bu doğrultuda gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmalarının sayısı sürekli artış göstermektedir.

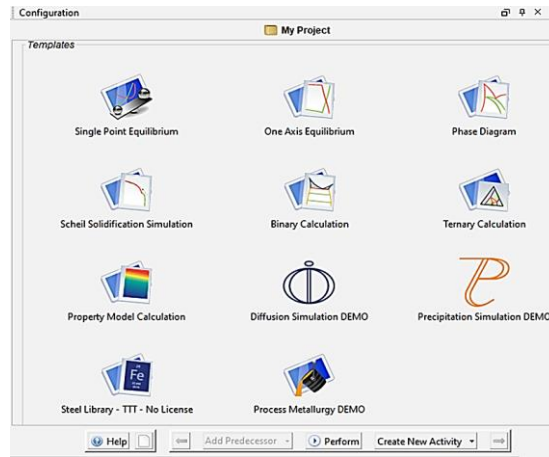
Hesaplamalı malzeme mühendisliği uygulamalarının yanı sıra, özellikle son yıllarda alüminyum döküm endüstrisinde, döküm simülasyonları yazılımlarının kullanımı giderek artmaktadır. Söz konusu döküm simülasyonları, gerçek üretim faaliyetleri öncesinde, kalıp verimliliğinin hesaplanması, proses parametrelerinin (basınç, sıcaklık, soğutma hızı, kalıp besleme hızı vb.) araştırılması, ürün özelliklerinin optimizasyonu, ürün ve/veya prosesten kaynaklı problemlerin tespiti ve önlenmesi sırasında oldukça önemli bir role sahiptir.

Alüminyum döküm simülasyonları ile mikro ve makro boyuttaki porozitelerin ürün üzerindeki miktar ve dağılımları, kalıp dolumu ve alaşımlara özgü katılma karakteristiklerinin elde edilmesi, faz analizleri ve dendrit kolları arası mesafenin belirlenmesi, ürün akma dayanımı ve uzama miktarı gibi mekanik özelliklerinin incelenebilmesi mümkündür. Bu gibi parametrelerdeki değişimlerin ürün üzerinde

olan etkilerinin gerçek üretim faaliyetleri öncesinde belirlenebilmesi, endüstriyel ölçekte ürün ve proses bazında maliyet ve kalitesel verimlilik yönünden uygulayıcısına büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Khan ve Sheikh, 2018).

2.1 Hesaplamalı Termodinamik Yöntemleri

Malzemelerin termodinamik özelliklerinin nümerik hesaplamalarında kullanılan hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından biri ThermoCalc yazılımıdır. CALPHAD (*Calculations of Phase Diagrams*) prensibine dayalı olarak çalışmakta olan ThermoCalc yazılımı ile, farklı kompozisyonlara sahip malzemelerin özellikleri zengin bir veri tabanı çerçevesinde değerlendirilmektedir. Hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları temelinde gerçekleştirilebilen sayısal analizler sayesinde, yeni nesil malzemelerin tasarlanması ve farklı süreçlerin optimize edilmesi sırasında harcanan zaman, işgücü ve enerji büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Ayrıca, gerçek üretim koşullarında, deneysel faaliyetler ile gerçekleştirilecek ve başarısız sonuçlanma olasılığı bulunan birçok araştırma çalışmasına harcanan zamanın minimize edilmesi mümkün olmaktadır. Şekil 2.1’de ThermoCalc yazılımı kullanıcı ara yüzüne ilişkin bir görsele yer verilmiştir.

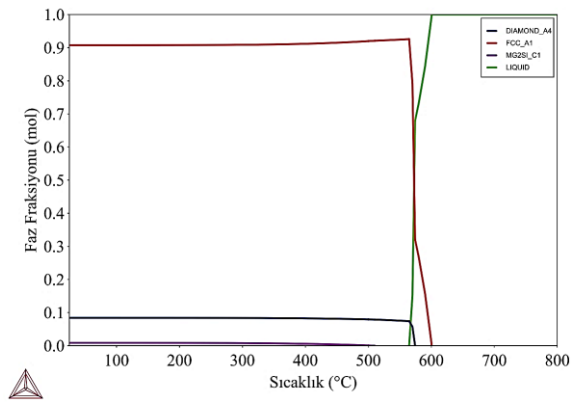


Şekil 2.1 Thermo-Calc yazılımı kullanıcı ara yüzü (www.thermocalc.com, 01.11.2021)

Thermo-Calc yazılımı kullanılarak malzeme özelliklerinin sanal-simüle ortamda belirlenmesine yönelik birçok farklı hesaplama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu hesaplamalara aşağıda yer verilmiştir. Bunlar;

- Kararlı ve yarı kararlı heterojen faz denklemlerinin hesaplamaları
 - Faz oranları ve elementel kompozisyon
 - Entalpi, ısı kapasite ve termal dönüşümler gibi termokimyasal hesaplamalar
 - Dönüşüm sıcaklıkları: sıvılaşma – katılaşma
 - Faz dönüşümlerine neden olan majör parametreler
 - Faz diyagramları: (ikili, üçlü ve çoklu bileşen içeren)
 - Katılaşma hesaplamalarının denge dışı katılaşma (Scheil-Gulliver) malzeme modellerine uygulanması
 - Kimyasal reaksiyonların termodinamik özellikleri
- şeklindedir.

ThermoCalc yazılımı, proses koşulları ve parametrelerindeki değişikliklerin, nihai ürün üzerindeki etkilerini hızlı ve doğru bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla imalat çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda, farklı kompozisyonlara sahip alaşımların sıcaklığa bağlı faz dönüşümleri elde edilebilir ve malzeme özelliklerinin proses parametrelerine bağlı değişimi sanal-simüle ortamda gerçekleştirilen çalışmalar ile tespit edilebilmektedir. Şekil 2.2’de ThermoCalc yazılımı kullanılarak bir alüminyum alaşımı için sanal ortamda elde edilen katılaşma analizi grafiğine yer verilmiştir.



Şekil 2.2 Bir alüminyum döküm alaşımına ait katılaşma analizi grafiği (www.thermocalc.com, 01.11.2021)

Hesaplamalı malzeme mühendisliği prensiplerine dayalı olarak çalışan ThermoCalc programı kullanılarak üretim proseslerinde meydana gelen problemlerin anlaşılabilmesi de mümkündür. Sanal ortamda gerçekleştirilecek termodinamik

hesaplamalar neticesinde, üretim proseslerinde yaşanan ilgili problemlerin nerede, ne zaman ve neden meydana geldiği anlaşılabilmektedir (www. thermocalc.com, 01.11.2021).

Thermo-Calc yazılımı güncel olarak pek çok araştırma geliştirme çalışmasında kullanılmaktadır ve literatürde hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarından faydalanılarak gerçekleştirilen tasarım ve tasarım doğrulama çalışmalarının sayısı her geçen gün artmaktadır. Thermo-Calc yazılımı ile yapılan çalışmalara örnek vermek gerekirse, Assadiki ve arkadaşları tarafından 2018 yılında gerçekleştirilmiş olan bir çalışmada, ilgili yazılımdan faydalanılarak, α -Al₂Cu ve β -Mg₂Si yarı kararlı fazlarının termal kararlılığında etkili olan farklı alaşım elementleri üzerine olan araştırmadan bahsedilebilir. Bu çalışmada, ilgili fazların çökeltme sertleşmesinde etkili olduğu ve dolayısıyla alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi konusunda önem arz ettiği savunulmuştur. TCAL.4.0 veri tabanı ile donatılmış Thermo-Calc yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, Ti elementinin α -Al₂Cu ve β -Mg₂Si fazları üzerinde stabilize edici etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bilgisayar ortamında elde edilen verilerin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) metodu ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda titanyumun yarı kararlı fazların sahip olduğu termal kararlılık üzerinde etkili olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır. Diğer bir yandan, Li, Hf, Co ve Ce gibi elementlerin ilgili fazlar üzerinde stabilize edici bir etki oluşturmadığı ortaya konulmuştur. Alaşımların solvüs sıcaklıklarının hesaplanması sonucunda ise, V, Ti, Cr, Zr ve Sc gibi alaşım elementlerinin α -Al₂Cu ve β -Mg₂Si'nin solvüs sıcaklığını arttırdığı gözlemlenmiştir (Assadiki ve diğer., 2018). Medved ve ekibi tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere mekanik özellikler bakımından üstün özelliklere sahip yenilikçi alüminyum alaşımlarının araştırılmıştır. Bu kapsamda Al alaşım sistemlerinin araştırılması amacıyla Thermo-Calc yazılımından faydalanılarak termodinamik denge hesaplamaları ve termal analizler yapılmış, ardından mikroskobik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında belirlenen alaşımlar kimyasal bileşim, faz dağılımı ve miktarları, denge ve denge dışı katılaşma davranışları, katılaşma sıcaklıkları ve mekanik özellikler bakımından değerlendirilmiştir. Kompozisyonda yer alan alaşım elementlerinin

mikroyapıdaki etkileri incelendiğinde, Zr'nin iğnemsî yapıda fazların oluşmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir yandan alaşıma eklenen Mo, çin alfabesi morfolojisine sahip AlFeMnMoSi fazının oluşumunda etkili olmuştur. Mo ve Zr'nin alaşım içerisinde birlikte yer aldığı yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesine imkân tanıdığı tespit edilmiştir. Alaşımlara ait sertlik karakteristiği incelendiğinde Zr'nin sertlik değerleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, Mo'nun ise tek başına herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Medved ve diğer., 2018). Yang ve ekibi, Al-Si-Cu-Ni-Mg alaşımı kullanılarak %2,63, %3,64, %4,48, ve %5,45 olmak üzere dört farklı Cu miktarında, döküm ile üretilen pistonların mikroyapılarında ortaya çıkan Ni elementi bakımından zengin fazların üzerine çalışmışlardır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, alaşımdaki Cu içeriğinin artması ile Ni fazının Al_3Ni 'den Al_3CuNi 'ye dönüştüğü ve ardından Cu içeriğinin artmasıyla Al_7Cu_4Ni fazı olarak çökeldiği belirlenmiştir. Ayrıca, faz morfolojisinin şeritli halden ağısı bir forma ve daha sonra dairesel veya yarı dairesel bir yapıya değiştiği gözlemlenmiştir. Thermo-Calc hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Analizlerde, değişen morfoloji ile, oda sıcaklığında akma mukavemeti değerinin 263,8 MPa'dan 229,6 MPa'ya düştüğü, ardından 278,9 MPa'ya yükseldiği belirlenmiştir. Çekme mukavemetinin ise %19,7 oranında arttığı, ancak doğrusal genleşme katsayısının sürekli azaldığı saptanmıştır. Diğer bir yandan, alaşımda Cu miktarının artmasıyla, yüksek sıcaklıktaki çekme mukavemetinin 78,1 MPa'dan 93,5 MPa'ya yükseldiği kaydedilmiştir (Yang ve diğer., 2012).

2.2 Hesaplamalı Termofizik ve Termomekanik Yöntemleri

Metalik malzemelerin imalat ve şekillendirme prosesleri sırasında kullanılan termal yükler, eş zamanlı olarak, malzemede faz dönüşümlerinin meydana gelmesine, metalurjik ve mekanik özelliklerin değişimine sebep olmaktadır. Meydana gelen bu değişimleri, tasarım kriterleri temelinde yönlendirebilmek hem akademi hem de sanayi temelinde gerçekleştirilen uygulamalar için büyük önem arz etmektedir. Çelik, alüminyum, magnezyum, zirkonyum vb. alaşımların sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren termofiziksel, termomekanik ve metalurjik özelliklerinin ortaya konulması

konusunda CALPHAD tabanlı malzeme karakterizasyon yazımlarından yararlanılmaktadır. Bu prensip temelinde çalışan yazılımlar enerji, iş-gücü ve zaman gibi faktörler bakımından büyük faydalar sunmaktadır.

JMatPro, farklı alaşımların sahip oldukları malzeme özelliklerini ve farklı parametrelere bağlı olarak değişimlerini CALPHAD metoduna dayalı olarak hesaplayan ve özellikle endüstriyel uygulamalar için büyük avantajlar ortaya koyan bir simülasyon yazılımıdır. JMatPro yazılımı kullanılarak alaşım elementi çeşidi ve miktarına bağlı olarak sanal-simüle ortamda gerçekleştirilebilecek hesaplama türlerine aşağıda yer verilmiştir. Bunlar;

- Kararlı ve yarı kararlı faz denge diyagramları
 - Sıcaklığa bağlı değişen fiziksel özellikler (yoğunluk, termal iletkenlik, viskozite, poisson oranı, Young modülü, spesifik ısı vb.)
 - Katılma karakteristikleri
 - Gerçek gerilme-birim şekil değişimi diyagramlarına göre mekanik özellikler
 - Termo-fiziksel ve fiziksel özellikler
 - Faz dönüşümleri
 - Kimyasal özellikler
 - Soğuma eğrileri
- şeklindedir.

JMatPro yazılımının sahip olduğu algoritma kökeni temelde CALPHAD metodolojisine dayanmaktadır. 1970’li yıllarda, açık kaynağa sahip termodinamik kodlar üretmek amacıyla kurulmuş bir enstitü olan CALPHAD, günümüzde oldukça büyük bir öneme sahip bir yaklaşım haline gelmiştir. 2010 yılı başlarında, Amerika Hükümeti tarafından başlatılmış olan “*Material Genome Project (MGI)*” projesi kapsamında, JMatPro ve termodinamik modelleme çalışmaları, farklı bir boyutta ve küresel ölçekte gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu kapsamda, malzeme ve malzeme tabanlı teknolojilerin, daha hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde tasarlanması, üretilmesi ve kullanıma sunulması amaçlanmaktadır. Gelişmiş malzeme sistemlerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde keşfini sağlayan bu yaklaşımların, gelecekte, oldukça büyük bir rekabetçi niteliğe sahip olması

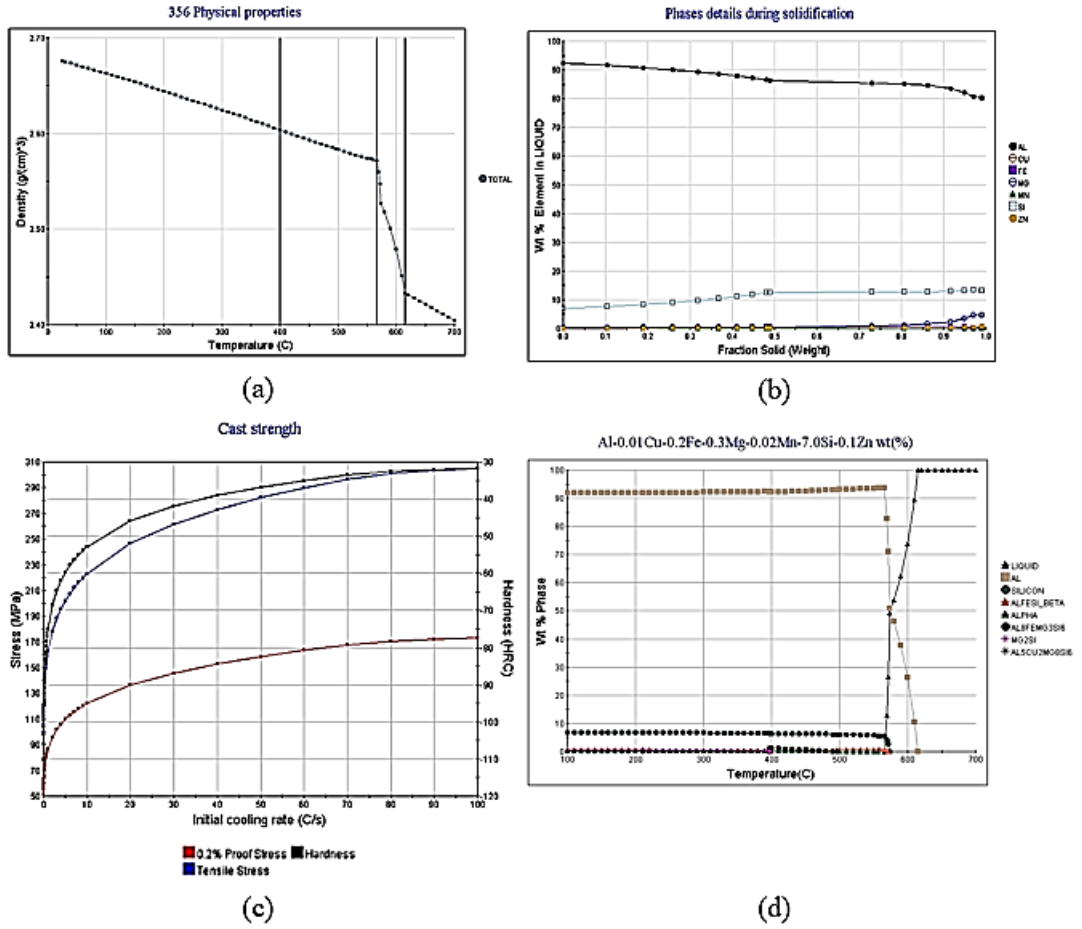
öngörülmektedir. Şekil 2.3'te JMatPro yazılımının ara yüzüne ait bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 2.3 JMatPro yazılımı kullanıcı ara yüzü (www.jmatpro-tr.com, 01.11.2021)

Ayrıca, örnek olması açısından JMatPro yazılımından faydalanılarak A356 kalitede alüminyum alaşımı ile ilgili elde edilebilen grafik örneklerine Şekil 2.4'te yer verilmiştir.

JMatPro, mühendisler ve bilim insanları için, malzeme özelliklerinin araştırılması konusunda katkı sağlamak ve bu çalışmaların gerçekleştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiş bir yazılım çözümüdür. Bu bağlamda, malzemelere ait özelliklerin hızlı ve yüksek doğruluğa sahip bir şekilde tahminlerini sağlamak konusunda modellerin kapsamlı validasyonu, hızlı ve güçlü hesaplama yapısı ve kullanıcı dostu ara yüzü gibi özellikleri sebebiyle kullanıcılarına büyük faydalar sağlamaktadır (www.jmatpro-tr.com, 01.11.2021).



Şekil 2.4 JMatPro yazılımında elde edilebilen malzeme özelliklerine ait örnek grafikler. (a) A356 alaşımında sıcaklığa bağlı yoğunluğunun değişim eğrisi. (b) A356 alaşımında katılaşma esnasında sıvı fazdan oluşan fazlar ve miktarları (%ağ.). (c) A356 alaşımında soğuma hızına bağlı olarak sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde meydana gelen değişim. (d) A356 alaşımında katılaşma analizi grafiği.

Gelişen hesaplamalı malzeme mühendisliği teknolojisi ile JMatPro yazılımı ile yapılan çalışmalar her geçen gün literatürde yerini almaya devam etmektedir. Bu çalışmaların örneklerine bakıldığında, Divrik tarafından yayınlanan bir makalede, otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan AlSi5Cu3Mg alaşımı ile kokil döküm yöntemiyle üretilen parçalar üzerinde döküm sıcaklığı, solüsyona alma ve suni yaşlandırma sürelerinin malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Çalışmada, ürün kalitesini artırmaya yönelik en uygun proses şartları araştırılmıştır. Kullanılan AlSi5Cu3Mg alaşımında, Si miktarının %4,5-7 aralığında olması tercih edilmiştir. İlgili alaşım kullanılarak üç farklı döküm sıcaklığında imal edilen numuneler üzerinde, tahribatsız muayene ve kimyasal analiz

çalışmaları gerçekleştirilmiş ve X-Ray kontrolleri yapılmıştır. X-Ray analizi sonucunda uygun görülen numuneler, 495°C solüsyona alma sıcaklığında, 4-8 saat sabit sürelerde bekletilmiş ve ardından su verme ve 170°C sıcaklıkta ve 6, 7, 8, 9 ve 10 saat sürelerinde suni yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin detaylı mikroyapısal analizleri gerçekleştirilmiş ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, farklı ısıtma işlem koşullarına bağlı olarak meydana gelen faz oluşumlarını belirlemek amacıyla hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarına dayalı çalışan JMatPro simülasyon yazılımından yararlanılmıştır. Analizler neticesinde, en yüksek dayanım, 715°C döküm sıcaklığı, 495°C'de 4 saat solüsyona alma ve 170°C'de 10 saat yaşlandırma süresine maruz bırakılan numunede elde edilmiştir. Mekanik sonuçlar değerlendirildiğinde, T6 ısıtma işlemine maruz bırakılan numunelerin T4 ısıtma işlemi uygulanan numunelere göre, çekme dayanımına etkisinin %14,30 oranında daha fazla olduğu ve uzama miktarlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, T4 ısıtma işlemine kıyasla, T6 ısıtma işlemi sonrasında çökeltilerin mikroyapıda daha homojen olarak dağıldığı görülmüştür. JMatPro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde soğuma hızının artması ile mukavemet değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. (Divrik, 2019). Kabir ve ekibi tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada yaşlandırma şartlarının ve su verme sıcaklığındaki değişimin A201.0 alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. İlgili çalışma sırasında hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından JMatPro kullanılmış ve alaşımda katılaşma sırasında oluşan metaller arası bileşikler belirlenmiştir. İncelemeler sonucunda, oluşan CuAl_2 , Al_2CuMg ve Mg-Si gibi metaller arası fazların ilgili alüminyum alaşımının sertliği üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaşlandırma işlemi $170 \pm 20^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıkta ve maksimum 105 saat boyunca uygulanmıştır. Yaşlandırma sonrası alaşımın sertliği üzerine gerçekleştirilen incelemeler sonrasında, artan yaşlandırma süresine bağlı olarak alaşımın sertlik değerinin artış gösterdiği saptanmıştır. Sonuç olarak, JMatPro yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmada, Mg-Si , CuAl_2 çökeltileri ve $\text{S-Al}_2\text{CuMg}$ ve Cu intermetalik fazlarının alaşım içerisindeki varlığı doğrulanmış ve bu fazların alaşımın sertlik karakteristiği üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır (Kabir ve diğer., 2014). Guo ve Sha ise çalışmalarında, Al-Si-Cu alaşımlarında Al_2Cu fazının

Çökeltme mekanizmasının anlaşılması üzerine odaklanmışlardır. Çalışma sırasında Al-10Si-2Cu ve Al-10Si-4Cu alaşımları kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda X-ışını kırınımı (XRD) yönteminden ve bilgisayar destekli analizlerde hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından biri olan JMatPro'dan faydalanmışlardır. JMatPro ile, farklı ısıt işlemler sonrasında Al-Si-Cu alaşımlarında oluşan fazlar ve fazların bileşimleri araştırılmıştır. XRD analizleri sonucunda ise, çökelti fraksiyonunun yaşlanmanın erken aşamalarında dikkat çekici şekilde arttığı ve ardından stabil hale geldiği görülmüştür. Ayrıca, her iki alaşımda sertliğin bir miktar düştüğü gözlenmiş, düşüşün çökelti fraksiyonu denge miktarına yaklaştığında meydana gelen çökelti kabalaşmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. 200°C ve 90 saat yaşlandırma işlemi sonrasında alaşımlarda oluşan Al₂Cu miktarının Al-10Si-2Cu ve Al-10Si-4Cu alaşımları için sırasıyla %2,53 ve %5,12 mol değerinde olduğu tespit edilmiştir (Guo ve Sha, 2005).

2.3 Döküm Simölasyonları

Günümüzde, gelişen bilgisayar teknolojisi ile üretime dair birçok simölasyon yazılımı ortaya çıkmakta ve bu yazılımların popölaritesi her geçen gün artmaktadır. Geleneksel yöntemlerin uygulanması sırasında ortaya çıkan iş gücü, enerji ve zaman sarfiyatı ise söz konusu yazılımların kullanılmaya başlanmasıyla büyük ölçüde minimize edilebilmektedir.

Simölasyon yazılımlarının kullanımı sunulmasıyla birlikte en eski üretim yöntemlerinden biri olan döküm sektörü de gelişmektedir. Küreselleşen döküm sektöründe, müşteri taleplerinin daha kısa sürede ve yüksek doğruluk oranıyla karşılanabilmesi konusunda ise döküm simölasyonu yazılımları yüksek potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, döküm simölasyonu yazılımları, kalıp tasarımlarının kolaylaştırılması, döküm proseslerinin daha ekonomik ve yüksek verim ile gerçekleştirilmesi, geleneksel deneme ve yanılma maliyetlerinin ortadan kaldırılması gibi sağladığı avantajlar ile göze çarpmaktadır. Thercast, Procast ve Magmasoft gibi yazılımlar günümüzde döküm proseslerinin simüle edilmesi

amacıyla hem akademik çalışmalarda hem de sanayide kullanılan döküm simülasyonu yazılımlarından yalnızca bazılarıdır.

Söz konusu yazılımların kullanımı ile, katılaşma, dolum, ürün ve kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı, malzeme akış hızları, soğuk birleşme noktaları, makro ve mikroporozite vb. durumlar simüle edilebilmektedir. Özellikle, endüstriyel sektörde imal edilen ürünlerde meydana gelebilecek olası döküm hatalarının ve döküm kalitesinin gerçek üretim koşulları öncesinde belirlenebilmesi, farklı döküm proseslerinin ve proses parametrelerinin ürün üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi gibi konularda bu döküm simülasyonu yazılımlarının rolü oldukça büyüktür. Diğer bir yandan enerji tüketiminin minimize edilmesine bağlı olarak çevresel ayak izinin azaltılması da bu yazılımların ulusal ve küresel bazda sağlamış olduğu önemli bir kazanımdır.

Magmasoft yazılımı ticari olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılan döküm simülasyonları yazılımlarından bir tanesidir. Magmasoft yazılımı, farklı döküm endüstrilerinde ve dökümhane uygulamalarında sıvı metal akışını modellemek için sıklıkla kullanılmakta olan üç boyutlu bir katılaşma ve sıvı metal akış inceleme yazılımıdır. İlgili yazılım, dikdörtgen biçimindeki bir örgü sistemi (grid) üzerinden ısı ve kütle transferini araştırmak ve ortaya koymak amacıyla sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır (Kenar, 2019).

Gelişmiş bir malzeme veri tabanına sahip olması, kalıp boşluğunun dolumu hakkında yararlı bilgiler ortaya koyması, sıvı metal akışının simüle edilmesi konusunda yüksek doğruluk ve verimlilik ile çalışması, söz konusu yazılımı popüler bir hale getirmektedir. Diğer bir yandan, kalıp boşluğundaki hava hapsolmesi, erken ya da geç katılaşma, sıvı metal hız dağılımı, yolluk tasarımları ve girişleri gibi döküm prosesine ilişkin özelliklerin elde edilmesi konusunda da Magmasoft yazılımı yüksek potansiyel ortaya koymaktadır (Doğan ve diğer., 2018; Vispute ve Chaudhari, 2017).

Magmasoft döküm simülasyonu yazılımının simülasyon kabiliyetlerine ve avantajlarına aşağıda yer verilmiştir. Bunlar;

- Ergitme, model ve maça tasarımlarının değerlendirilmesi, bakım ve onarım dahil olmak üzere tüm döküm malzemelerinin ve proseslerinin metalurjik açıdan değerlendirilmesi,
- Üretim riski olmadan, döküm proseslerinin yüksek verimlilik ile simüle edilebilmesi ve döküm hatalarının sanal ortamda belirlenmesi,
- Kalite, verim ve maliyet açısından optimize edilmiş çalışma alanı sunmak,
- Optimum proses koşullarının gerçek üretim koşulları öncesinde belirlenebilmesi,
- Geleneksel üretim süreçlerine harcanan zamanın minimize edilmesi,
- Proses parametrelerindeki değişimin ürün üzerindeki etkilerinin ortaya konulması

şeklindedir (magmasoft.com.tr, Erişim Tarihi: 28.11.2021).

MAGMASoft döküm simülasyonu ile yapılan ve literatüre giren çalışmalara örnek vermek gerekirse, Doğdu ve ekibi tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada A356 alüminyum alaşımına, 150, 250, 350 ve 450 ppm seviyelerindeki Sr eklenmesinin mikroyapıda silisyum modifikasyonu üzerindeki etkileri araştırılmış ve bunun döküm parçanın soğuma hızına etkilerine odaklanılmıştır. Belirlenen farklı kompozisyonların her biri kullanılarak beş farklı jant kolunun sanal ortamda MAGMASoft yazılımı ile döküm simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizleri neticesinde, Sr ilavesinin dendritler arasındaki ötektik fazın yoğunluğunu azalttığı gözlemlenmiştir. 250 ppm Sr ilavesiyle gerçekleştirilen döküm işlemleri sonrasında ürün üzerinde büyük miktarda büzülme ve porozite oluşumu gerçekleşmiştir. Mekanik özellikler açısından 250 ppm Sr ilavesinin mukavemet açısından en iyi sonuçları ortaya koymasına karşın, ortaya çıkan porozite oluşumu bu durumu olumsuz yönde etkilemektedir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında 150 ppm Sr ilavesi yapılarak elde edilen alaşım kullanılarak sanal ortamda üretilen jant kolunun diğerlerine kıyasla performans açısından en yüksek verimi sağladığı tespit edilmiştir (Doğdu ve diğer., 2021). Örmeci ve ekibi çalışmalarında, hurda ve çekinti gözenekliliği gibi üretim problemlerine rastlanan, AlSi11 alaşımı kullanılarak alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen bir janta ait proses doğrulama ve iyileştirme çalışmalarını yürütmüşlerdir. Çalışmada ürünlerde oluşan çekinti gözenekliliği

probleminin hatalı basınç eğrisinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Detaylı analiz çalışmalarının ardından, jantın tasarımı Catia V5 programı kullanılarak yapılmıştır. Sonrasında, MAGMASoft döküm simülasyonu yazılımından faydalanılarak proses geliştirme çalışmaları yürütülmüştür. Döküm simülasyonları ile, kalıba sıvı metalin giriş sıcaklığı, soğutma hızı, çevrim süresi gibi parametrelerin optimizasyonu sağlanmıştır. Bu kapsamda, jant üretimi için yeni bir döküm reçetesi geliştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar, gerçek üretim verileriyle karşılaştırılmış ve değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Eski döküm kartı ile üretilen jantlardan elde edilen numuneler incelendiğinde, büyük çaplı ve yoğun miktarda porozitelerin varlığı gözlemlenmiştir. Yeni döküm kartlarından faydalanılarak elde edilen ürünlerden alınan numuneler üzerinde yapılan incelemelerde ise, porozitelerin küçük çapta ve az miktarda olduğu tespit edilmiştir. Yapılan proses iyileştirme çalışmaları sonucunda, seri üretimde hurdaya ayrılan jant oranı %35'ten %9'a kadar düşürülmüştür. Böylelikle enerji kaynaklarının daha verimli kullanımı sağlanmış ve yüksek ihracat kapasitesine ulaşılmıştır (Örmeci ve diğer., 2020). Işık ve arkadaşları ise çalışmalarında, MAGMASoft yazılımından faydalanarak yüksek basınçlı döküm yöntemi ile AlSi9Cu3 alüminyum alaşımı esaslı jant üretimini simüle etmişler, dökülebilirlik ve tasarım doğrulama çalışmalarını yürütmüşlerdir. Döküm sıcaklığının 670°C olarak belirlendiği çalışmada, kalıp malzemesi olarak X40CrMoV51 alaşımı tercih edilmiş olup, kalıp sıcaklığı 180°C olarak yağ ile kontrol altında tutulmuştur. Döküm öncesi sırasıyla kalıp yağlama ve hava üfleme işlemleri 8'er saniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Enjeksiyon hız profili ise, birinci faz hızı artan ivmelenme ile max. 0,2 m/s ve ikinci faz hızı 4,0 m/s hıza ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. Katılaşma esnasında uygulanan spesifik basınç ise 800-1000 bar aralığında belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, alçak basınçlı döküm yöntemiyle dakikalar mertebesinde dökümü gerçekleştirilen bir jantın, yüksek basınçlı döküm yöntemiyle saniyeler mertebesinde dökülebildiği MAGMASoft simülasyon programından faydalanılarak tespit edilmiştir. Bu durumun alüminyum alaşımı esaslı jantların seri üretimine hız kazandıracağı ileri sürülmüştür. Ayrıca, yüksek basınçlı döküm yönteminin jant üretiminde alçak basınçlı döküm yöntemine kıyasla daha hızlı katılaşma sağladığı tespit edilmiştir. Diğer bir yandan, döküm sonrası ısıtıl işlem uygulamalarına gereksinim duyulmadan istenilen dayanıma sahip ürünlerin elde

edilebildiği ve dolayısıyla enerji maliyetlerinden kazanç sağlanacağı öngörülmüştür. Söz konusu çalışmanın, yüksek basınçlı döküm yönteminde soğutucu kanallardan farklı karakterlere sahip sıvıların geçirilmesiyle katılaşmanın daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebileceği ve böylelikle ürün özellikleri ve katılaşma sürecine yeni bir yaklaşım getireceği savunulmuştur (Işık ve diğer., 2020).

2.4 Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Yaklaşımları

Fonksiyonel kullanım sunan mühendislik sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla farklı uzmanlık alanlarından ve disiplinlerden elde edilen bilgi birikimi ve deneyime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda yüksek teknoloji barındıran gelişmiş sistemlerin ortaya konulması üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu amaca ulaşmak için ise bilgisayar ortamında modelleme ve benzetim çalışmaları önemli bir yere sahiptir. Tam bu noktada ise, hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ve bu prensibe dayalı olarak çalışan yazılımlar ortaya çıkmıştır. (Hesaplamalı malzeme mühendisliği ile ilgili detaylı bilgiye Bölüm 2’de yer verilmiştir).

Hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları temelinde çalışan bu yazılımların gelişen teknoloji ile birbirleriyle iletişim kurabilmeleri mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, JMatPro ya da ThermoCalc gibi bir hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımdan elde edilen malzeme çıktısı, diğer bir üretim (döküm, dövme, kaynak, ekstrüzyon vb.) yazılımı içerisinde proses girdisi olarak kullanılabilir. Böylelikle, uzun süren üretim zincirleri kapsamında imal edilen ürünlerin üretim süreçleri ham maddeden nihai ürüne dek bütünsel olarak ele alınabilmekte olup, her bir üretim adımı hem tek başına hem de bir bütün olarak incelenebilmektedir. Bu yaklaşım ise “Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği” olarak ifade edilmektedir. Bu sayede, üretim proseslerinde sanal ve gerçek verilerin birbiri ile kıyaslanabilirliği artmış ve simülasyon sonuçları gerçek sonuçlara daha da yaklaşmıştır.

Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ilk olarak 2006 yılında bir ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım, malzeme bilgisi, ürün performans analizi ve üretim-süreç simülasyonunun bir entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır. Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği entegrasyonu, yapay zeka, büyük veri, çoklu fizik modelleme ve çok ölçekli modelleme çalışmalarının bir bütün olarak yürütülmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda, ilgili yazılımlar farklı disiplin ve yaklaşımların bir bütünü olarak karşımıza çıkmaktadır (Allison, 2011; Thornton ve diğer., 2009).

Hesaplamalı malzeme mühendisliği, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği kavramlarının detaylandırılması ve konuyla ilgili yapılmış literatür çalışmalarının örneklerinin ardından bu noktada, doktora tez çalışmasının önemini vurgulamak gerekirse, alüminyum alaşımlarında ve döküm prosesinde yapı-özellik-performans-işlem ilişkilerinin anlaşılmasında fizik tabanlı simülasyonlar büyük önem taşımaktadır. Doktora tez çalışmasının konusunu oluşturan bütünleşik simülasyon çalışmaları, teorik ve kavramsal yönlerle odaklanarak, alüminyum alaşımları için yeni yöntem ve algoritmaların geliştirilmesine ve döküm işleminin fiziksel simülasyonlarına olanak sağlayacağı için ülkemizde ve küresel ölçekte öncelikli çalışma konuları arasında yer almaktadır. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2020-2021 Çağrı Planlaması'nda Otomotiv Alanı- Otomotivde Malzeme Teknolojileri kısmında yer alan, Hafif Metal ve Alaşımlar başlığı altında otomotiv sektöründe kullanılmak üzere yeni nesil alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine yönelik proje çalışmalarının destekleneceğinin belirtilmesi, doktora tez çalışmasının konusunun güncelliğini koruduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Öte yandan, IV. Sanayi Devrimi bir başka deyişle Endüstri 4.0 olarak adlandırılan, Dünya'nın içinde bulunduğu yeni süreçle üretimin her aşamasında dijitalleşmenin önemi vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, üretim sistemlerinde yaşanan bu değişimlerden en fazla etkilenecek sanayilerden biri de hiç şüphesiz ki otomotivdir ve bu doktora tezi alüminyum jant üreticileri başta olmak üzere, tüm alüminyum sektörüne dijitalleşme yolunda örnek teşkil edecektir. Ayrıca, döküm prosesi son derece geleneksel, dinamik ve çok parametrelili bir proses olduğundan, mikroyapı ve

mekanik özelliklerin gerçek döküm öncesi tayin edilmesi/öngörülmesi, alaşım, ürün, proses geliştirme çalışmaları açısından çok önemlidir. Yeni ürünün piyasaya çıkış süresinin kısaltılması, ar-ge ve inovasyon faaliyetlerinin artırılması, iç ve dış pazarda rekabetçiliğin sürdürülmesi, zaman ve iş gücü kazanımı için hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından faydalanılması, doktora tez çalışmasının önemini yansıtmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının sanal ortamda tasarlanıp modellenmesi, kontrollü katılaşma koşulları altında dökülebilirliğinin doğrulanması ve alçak basınçlı döküm yöntemi ile sanal ve gerçek üretimlerin yapılması, ürün kalitesinin “Orişinal Ürün Üreticisi (OEM)” özelliklerine göre doğrulanması sonucu, jant üretim zincirinin ilk halkası olan alaşım hazırlama aşamasından döküm prosesinin bitimine kadar dijital ikizi oluşturulmuştur. Doktora tez çalışmasından elde edilen çıktılar, otomotiv endüstrisi için bir bilgi kaynağı olarak hizmet edecek ve daha hafif ve daha güçlü jantlar/diğer döküm parçalar üretebilme sorununa zamanında çözüm sunacak ve geliştirilen yenilikçi dijital ikiz yaklaşımı diğer otomotiv/havacılık parçaları için faydalı olacaktır. Tüm üretim sürecinin dijital ikizleri, ülkemizdeki üretim üsleri için değerli bir bilgi kaynağı olacaktır.

BÖLÜM 3

SAYISAL SİMÜLASYON ANALİZLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

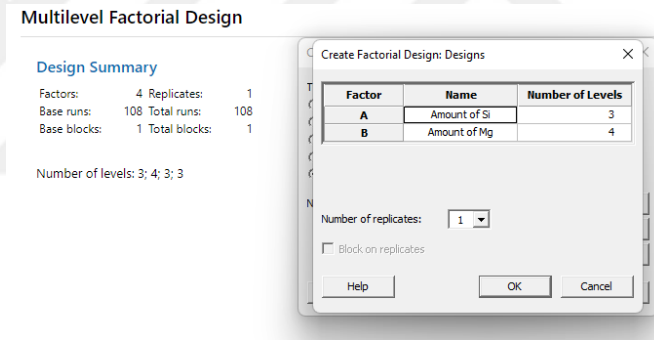
3.1 Alaşım Kompozisyonu Tasarımı ve Seçimi

Doktora tez çalışmasında alçak basınçlı döküm yöntemiyle alüminyum esaslı jant üretiminde kullanılmak üzere yeni nesil alüminyum alaşım kompozisyonunun bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ile geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Hesaplamalı malzeme mühendisliği ile alaşım tasarımı yapılabilmesi için, alaşım elementlerinin mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin literatür araştırmaları ile net bir şekilde ortaya koyulması şarttır. Bu bağlamda, hesaplamalı malzeme mühendisliği ile alaşımların modelleme çalışmalarının öncesinde, deneysel tasarım yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu aşamada ilk olarak, alüminyum alaşımlarında mikroyapıya, dolayısıyla mekanik özelliklere ve ürün performansına etkileyen temel alaşım elementleri belirlenmiştir. Bu elementler, alüminyum dökümde akışkanlığı, kalıp dolum karakteristiklerini ve yoğunluğu doğrudan etkileyen silisyum, ısıtılma işlem özelliklerini geliştirerek mekanik özelliklerin kontrol altında tutulmasını sağlayan magnezyum, sırasıyla kimyasal yollarla tane inceltme ve modifikasyon mekanizması ile mekanik özelliklere katkı sağlayan titanyum ve stronsiyum olarak belirlenmiştir. Seçilen bu elementlerin, alüminyum alaşımlarına etkileri Bölüm 1’de detaylı olarak anlatıldığından bu bölümde tekrarlanmamıştır.

Alaşımların kompozisyonunu oluşturacak elementlerin seçilmesinin ardından, Minitab yazılımından faydalanılarak deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı hem farklı bilimsel disiplinlere benzer hem de kendine özgü bir metodoloji ve terminolojiye sahiptir. Bilindiği üzere, bilim insanları deneysel çalışmalar sırasında çok sayıda deney yapmaktadır. Bu deneysel çalışmalar, laboratuvar ortamında, pilot uygulamalarda ya da klinik olarak uygulanabilmekte ve bilimin merkezinde yer almaktadır. Deney tasarımı ise, sebep-etki ilişkisini ortaya koymak için uygulanmakta olan bir yaklaşımdır (Gökçe ve Taşgetiren). Deney tasarımlarının, laboratuvar, klinik ya da endüstriyel ölçekli uygulamalarda kullanılması toplam deney sayısının

azaltılması, doğru bir deney stratejisinin ortaya konulması, parametreler ve parametrelere bağlı sonuçlar arasında bulunan ilişkinin ortaya konulabilmesi bakımından oldukça büyük bir öneme sahiptir (Lazic, 2004).

Doktora tez çalışmasında, deneysel tasarım metotlarından tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Bu yöntem, en az iki veya daha fazla sayıda faktörün ve bu faktörlere bağlı en az iki seviyenin bulunduğu deneysel çalışmalarda, seviyelerin birbirleri ile çarpımları sonucu ortaya konulan bir kombinasyondur. Tam faktöriyel deney tasarımlarının istatistiksel metotlar ile birleştirilmesi araştırmacılara büyük faydalar sağlamaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Lazic, 2004). Deney tasarımı sırasında, ilk olarak 4 faktörlü ve 3-4 seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Uygulama sırasında Minitab yazılımı üzerinde veri girişi yapılan bir görsele Şekil 3.1’de yer verilmiştir.



Şekil 3.1 Minitab yazılımı ile tam faktöriyel deney tasarımı.

Yazılım üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen tam faktöriyel deney tasarımına ilişkin bilgilere Tablo 3.1’de yer verilmiştir. Tabloda görülebildiği üzere Si, Mg, Sr ve Ti elementlerindeki değişimine göre sınıflandırılmış 4 farklı faktör seviyesi bulunmaktadır. Bu kapsamda, alaşım elementlerinin fiziksel ve mekanik özelliklere etkilerinin belirlenmesi amacıyla farklı Ti, Sr, Si ve Mg elementlerine sahip 108 farklı alaşım kompozisyonu elde edilmiştir. Tabloda yer alan 1, 2, 3 ve 4 rakamlarının her biri farklı bir seviyeyi ifade etmektedir. Si element miktarı faktörü içerisinde yer alan 1, 2 ve 3 rakamları sırasıyla %3, %5 ve %9 Si değerini temsil etmektedir. Mg miktarında yer alan 1, 2, 3 ve 4 rakamları ise sırasıyla %0,2, %0,3, %0,5 ve %0,7 Mg element miktarını ifade etmektedir. Ti ve Sr elementi için 1, 2 ve 3

rakamları ise sırasıyla, %0,09, %0,12, %0,15 ve %0,010, %0,015, %0,020 element içeriğini tanımlamaktadır. Deney tasarımı çalışmalarına AlSi7Mg0.3 alaşımı dahil edilmemiş, bu alaşım kompozisyonu baz alaşım kompozisyonu olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca, değiştirilmesi planlanan dışındaki alaşım elementleri (Mn, Fe, Ca, B, Co, Zr, Cr, Cu vb.) AlSi7Mg0.3 alaşımı ile aynı olacak şekilde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1 Tam faktöriyel deney tasarımı

Si Seviyesi	Mg Seviyesi	Sr Seviyesi	Ti Seviyesi	Si Miktarı (%ağ.)	Mg Miktarı (%ağ.)	Sr Miktarı (%ağ.)	Ti Miktarı (%ağ.)
2	3	1	3	5	0,5	0,020	0,09
2	1	3	2	5	0,2	0,015	0,15
3	2	2	2	9	0,3	0,015	0,12
3	1	2	2	9	0,2	0,015	0,12
2	3	1	2	5	0,5	0,015	0,09
2	4	1	2	5	0,7	0,015	0,09
1	2	2	3	3	0,3	0,020	0,12
1	2	3	2	3	0,3	0,015	0,15
2	3	1	1	5	0,5	0,010	0,09
3	1	1	1	9	0,2	0,010	0,09
3	4	3	2	9	0,7	0,015	0,15
1	4	1	1	3	0,7	0,010	0,09
3	1	3	1	9	0,2	0,010	0,15
3	4	2	1	9	0,7	0,010	0,12
2	3	2	2	5	0,5	0,015	0,12
1	4	2	2	3	0,7	0,015	0,12
2	1	1	3	5	0,2	0,020	0,09
1	3	2	1	3	0,5	0,010	0,12
2	2	1	3	5	0,3	0,020	0,09
2	4	1	3	5	0,7	0,020	0,09
2	4	3	3	5	0,7	0,020	0,15
2	4	3	1	5	0,7	0,010	0,15
2	3	3	2	5	0,5	0,015	0,15
3	1	3	3	9	0,2	0,020	0,15
1	3	1	3	3	0,5	0,020	0,09
3	3	3	2	9	0,5	0,015	0,15
3	2	3	2	9	0,3	0,015	0,15
2	2	1	1	5	0,3	0,010	0,09
3	4	2	2	9	0,7	0,015	0,12
3	2	1	2	9	0,3	0,015	0,09
2	3	2	3	5	0,5	0,020	0,12
1	3	1	1	3	0,5	0,010	0,09
1	1	1	3	3	0,2	0,020	0,09
1	2	3	1	3	0,3	0,010	0,15
1	3	2	2	3	0,5	0,015	0,12
3	2	1	1	9	0,3	0,010	0,09
2	2	3	2	5	0,3	0,015	0,15
1	1	2	2	3	0,2	0,015	0,12
3	3	3	3	9	0,5	0,020	0,15
3	4	2	3	9	0,7	0,020	0,12
3	2	3	3	9	0,3	0,020	0,15
3	3	1	3	9	0,5	0,020	0,09
1	3	1	2	3	0,5	0,015	0,09
3	3	2	2	9	0,5	0,015	0,12
3	2	2	3	9	0,3	0,020	0,12
1	4	3	1	3	0,7	0,010	0,15
2	2	3	3	5	0,3	0,020	0,15
3	1	3	2	9	0,2	0,015	0,15

Tablo 3.1 devamı

2	1	1	2	5	0,2	0,015	0,09
3	3	1	2	9	0,5	0,015	0,09
2	2	1	2	5	0,3	0,015	0,09
3	4	1	2	9	0,7	0,015	0,09
2	4	2	2	5	0,7	0,015	0,12
1	2	3	3	3	0,3	0,020	0,15
2	3	3	3	5	0,5	0,020	0,15
2	1	2	3	5	0,2	0,020	0,12
1	3	3	1	3	0,5	0,010	0,15
2	1	2	2	5	0,2	0,015	0,12
1	4	2	1	3	0,7	0,010	0,12
3	3	2	1	9	0,5	0,010	0,12
2	2	2	3	5	0,3	0,020	0,12
1	1	2	3	3	0,2	0,020	0,12
3	2	2	1	9	0,3	0,010	0,12
1	2	2	1	3	0,3	0,010	0,12
2	4	2	1	5	0,7	0,010	0,12
3	4	1	3	9	0,7	0,020	0,09
1	2	1	3	3	0,3	0,020	0,09
1	1	1	2	3	0,2	0,015	0,09
2	1	1	1	5	0,2	0,010	0,09
1	2	2	2	3	0,3	0,015	0,12
1	4	3	3	3	0,7	0,020	0,15
2	4	2	3	5	0,7	0,020	0,12
2	3	3	1	5	0,5	0,010	0,15
1	3	3	3	3	0,5	0,020	0,15
1	4	1	3	3	0,7	0,020	0,09
1	4	1	2	3	0,7	0,015	0,09
1	2	1	2	3	0,3	0,015	0,09
3	3	2	3	9	0,5	0,020	0,12
1	1	3	3	3	0,2	0,020	0,15
2	4	1	1	5	0,7	0,010	0,09
1	1	2	1	3	0,2	0,010	0,12
3	1	2	1	9	0,2	0,010	0,12
2	3	2	1	5	0,5	0,010	0,12
3	4	1	1	9	0,7	0,010	0,09
2	1	2	1	5	0,2	0,010	0,12
2	4	3	2	5	0,7	0,015	0,15
2	2	3	1	5	0,3	0,010	0,15
3	3	1	1	9	0,5	0,010	0,09
1	1	3	1	3	0,2	0,010	0,15
2	2	2	2	5	0,3	0,015	0,12
3	1	1	3	9	0,2	0,020	0,09
2	1	3	3	5	0,2	0,020	0,15
3	4	3	3	9	0,7	0,020	0,15
1	4	2	3	3	0,7	0,020	0,12
3	2	3	1	9	0,3	0,010	0,15
1	3	2	3	3	0,5	0,020	0,12
2	1	3	1	5	0,2	0,010	0,15
1	4	3	2	3	0,7	0,015	0,15
3	1	1	2	9	0,2	0,015	0,09
1	3	3	2	3	0,5	0,015	0,15
3	1	2	3	9	0,2	0,020	0,12
1	1	3	2	3	0,2	0,015	0,15
1	1	1	1	3	0,2	0,010	0,09
3	3	3	1	9	0,5	0,010	0,15
3	2	1	3	9	0,3	0,020	0,09
1	2	1	1	3	0,3	0,010	0,09
2	2	2	1	5	0,3	0,010	0,12
3	4	3	1	9	0,7	0,010	0,15

Toplam deney sayısı: 108

Deney tasarımından elde edilen 108 farklı alaşım kompozisyonunun alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilebilirliği ve istenilen mekanik ve performans özelliklerine erişilebileceği parametreleri göz önünde bulundurularak, literatür desteği ve hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ile değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde Cevher Jant A.Ş. firmasının alçak basınçlı jant üretimindeki yıllara dayanan tecrübeleri de son derece etkili olmuştur. İncelemeler neticesinde, alüminyumda ana alaşım elementleri olan Si ve Mg içeriğindeki değişimin, alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretim süreçlerinde daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. 3 farklı seviyede değiştirilen Ti ve Sr elementlerinin alaşımda benzer etkiyi yarattığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda Sr ve Ti elementi sistemden çıkarılarak geliştirilecek alaşım kompozisyonlarında sabit tutulmasına karar verilmiştir. Literatürde bu konu üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılan titanyum esaslı master alaşımlarının ancak % ağırlıkça 0,15 seviyelerinde etkili olduğu, bu miktardan daha fazlasının alaşımda döküm parçanın kalitesini etkileyecek herhangi bir olumlu etki yaratmadığı gözlemlenmiştir (Biol, 2012). Ardından, tam faktör deney tasarımı farklı silisyum ve magnezyum seviyeleri için yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, gerek bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmaları gerekse fiziksel deney sayısı 12'ye düşürülmüştür. Gerçekleştirilmesi gerekli olan deney faktör ve seviyelerini içeren yeni tam faktöriyel deney tasarımı parametrelerine Tablo 3.2'de yer verilmiştir.

Tablo 3.2 Si ve Mg alaşım elementlerine bağlı olarak elde edilmiş tam faktöriyel deney tasarımı

Si Seviyesi	Si Miktarı (%ağ.)	Mg Seviyesi	Si Miktarı (%ağ.)
2	5	1	0,2
2	5	3	0,5
3	9	4	0,7
3	9	2	0,3
1	3	2	0,3
1	3	3	0,5
3	9	1	0,2
2	5	4	0,7
1	3	4	0,7
2	5	2	0,3
1	3	1	0,2
3	9	3	0,5
Toplam deney sayısı: 12			

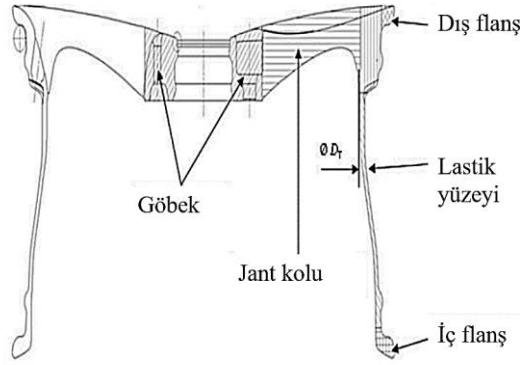
Elde edilen yeni deney tasarımı tablosunda yer alan alaşım kompozisyonları üzerinde hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından, Cevher Jant A.ř. firması ile yapılan görüşmeler neticesinde bazı alaşım kompozisyonlarının alaşımın fiziksel, mekanik ve ısıı işlem özellikleri açısından verimli sonuçlar ortaya koymayacağı kanısına varılarak, deney tasarımı tablosunda bir elemeye daha gidilmiştir. Tablo 3.3, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ile incelenmesi ve endüstriyel ölçekleri olarak alçak basınçlı dökümleri gerçekleştirilmesi planlanan alaşım kompozisyonlarını içermektedir. Buna göre, deneysel tasarım çalışmalarıyla AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 olmak üzere 7 ve bunlara AlSi7Mg0.3 baz alaşımının dahil edilmesiyle toplam 8 farklı alaşım doktora tez çalışmasına konu edilmiştir.

Tablo 3.3 Deneysel tasarım faaliyetleri sonucunda çalışmada kullanılması planlanan alaşım kompozisyonları

Si miktarı (%ağ.)	Mg miktarı (%ağ.)
5	0,2
5	0,5
9	0,7
9	0,3
3	0,3
3	0,5
9	0,2
5	0,7
3	0,7
5	0,3
3	0,2
9	0,5
Toplam deney sayısı: 7	

Deneysel tasarım çalışmalarının ardından, doktora tez çalışmasında yapılması planlanan araştırma-geliştirme faaliyetleri bilgisayar destekli üretim, pilot üretim ve test ve karakterizasyon çalışmaları olmak üzere 3 ana adımda gerçekleştirilmiştir. Sanal ortamda geliştirilen Al-Si-Mg esaslı alaşım tasarımları, endüstriyel üretim koşullarında alçak basınçlı döküm ile janta dönüştürülmüş ve performans özellikleri otomotiv endüstrisinin standartlarına uygun şekilde, metalurji ve malzeme biliminde yapı-özellik-performans ilişkisine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, gerçekleştirilen sanal ve deneysel faaliyetler ile alüminyum jant üretiminde yeni nesil

malzeme teknolojisi olan bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarının kullanılabilirliği detaylı olarak ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.2’de alçak basınçlı döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum esaslı bir janta ait kesite ve jantın bölümlerine yer verilmiştir.



Şekil 3.2 Bir janta ait kesit görüntüsü ve jantın bölümleri (www.cevher.com, 01.10.2020).

3.2 Bilgisayar Destekli Tasarım ve Tasarım Doğrulama Çalışmaları

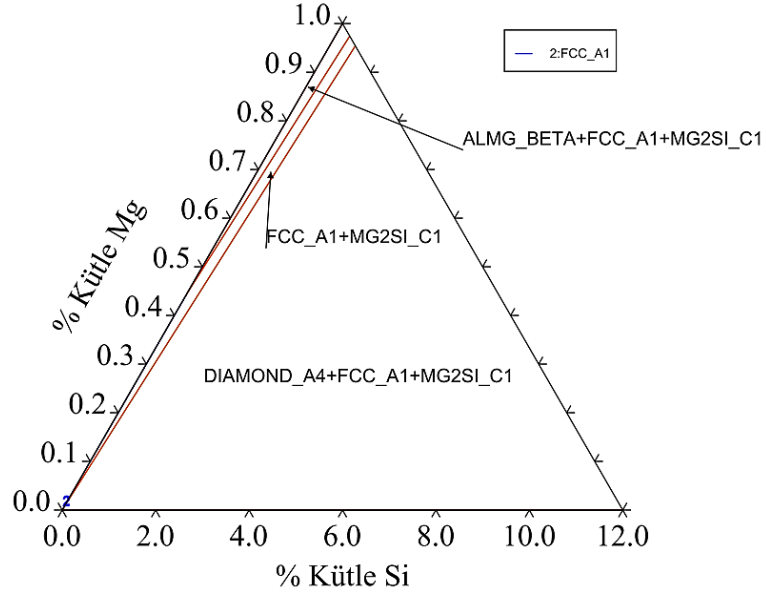
3.2.1 Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği ile Yeni Alüminyum Döküm Alaşımı Geliştirme Çalışmaları

Hesaplamalı malzeme mühendisliği ile alçak basınçlı döküm ile jant üretiminde kullanılabilecek ötektik altı kompozisyona sahip alüminyum-silisyum esaslı alaşım geliştirme çalışmalarında Thermo-Calc ve JMatPro olmak üzere iki malzeme geliştirme bilgisayar yazılımından faydalanılmıştır. Bu bağlamda, yeni alaşım kompozisyonu ve/veya kompozisyonlarının geliştirilebilmesi amacıyla, ilk olarak alüminyum esaslı jant üretiminde hali hazırda üretilenlerde kullanılan AlSi7Mg0.3 (A356) alaşımı Thermo-Calc ve JMatPro yazılımlarında mikroyapısal ve mekanik özellikler bakımından detaylı olarak analiz edilmiştir. Mevcut durumun analiz verileri, yeni yaklaşımlarla A356 alaşımına alçak basınçlı döküm ile jant üretiminde eşdeğer olacak şekilde geliştirilen alaşımlara ait verilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiklerle değerlendirilmiştir.

Bilgisayar destekli alaşım geliştirme çalışmalarından evvel konuyla ilgili detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen alaşımlar kullanılarak elde edilen bir janttan otomotiv endüstrisi tarafından beklenen performans kriterlerini malzeme bazında karşılayabilmesi hedeflenmiştir.

Bu bağlamda, bilgisayar destekli alaşım çalışmalarına, Thermo-Calc yazılımı yardımıyla Al-Si-Mg üçlü faz denge diyagramının ortaya çıkarılması ile başlanmıştır. Denge diyagramı, oda sıcaklığında ve ötektik altı (%ağ. Si <12,6) kompozisyonlar için elde edilmiştir. Maksimum %12 silisyum ve maksimum %1 magnezyum içeren Al-Si-Mg alaşımları için oluşturulan ilgili diyagram şekil 3.3'te verilmektedir. Diyagramda, diamond_A4, ötektik fazı, FCC_A1 α -Al fazını temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, tüm alaşım bileşimlerinin ortak noktası oda sıcaklığında mikroyapılarının, α -Al, ötektik ve Mg₂Si fazlarından oluşmasıdır. Tasarlanan alaşımların mikroyapısında alüminyum dendritlerinin bulunması ve yüksek çekme dayanımı sergileyebilmesi için silisyum miktarının ötektik değerin altında tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla tez çalışmasında, bütünüşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ile geliştirilecek ötektik altı kompozisyona sahip olan, ısııl işlem uygulanabilen alaşımların, ürüne dönüştüğünde otomotiv endüstrisinin beklediği performans kriterlerini karşılayabilir olması hedeflenmiştir. Otomotiv endüstrisi tarafından AlSi7Mg0.3 alaşımından alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilen ısııl işlemsiz bir janttan beklenen mekanik özellikler “Sonuçlar ve Tartışma” bölümünde detaylı olarak yer almaktadır.

TCAL7: AL, MG, SI
T=298.15, P=1E5, N=1



Şekil 3.3 Al-Si-Mg faz denge diyagramı (T=298K, P=1atm)

Doktora tez çalışmasında alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretiminde kullanılmak üzere AlSi7Mg0.3 alaşımına alternatif olarak, AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımları üzerinde tüm sanal, deneysel ve pilot ölçekli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan bu alaşımlara ait detaylı sanal ve deneysel olarak elde edilen elementel kompozisyon bilgileri karşılaştırmalı olarak Tablo 3.4'te yer almaktadır. Alaşım kompozisyonlarında değişen ana alaşım elementleri olan ve mikroyapısal ve mekanik özellikleri doğrudan etkileyen silisyum ve magnezyum oranlarıdır. Diğer alaşım elementlerinin miktarları baz alaşım olan AlSi7Mg0.3 alaşımının içeriği ile aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Tablo 3.4 Doktora tez çalışmasına konu olan alaşımların sanal ve deneysel kompozisyonları (%ağ).

		Alaşım Adı							
		Si3Mg0.7	Si5Mg0.3	Si5Mg0.5	Si5Mg0.7	Si7Mg0.3	Si9Mg0.2	Si9Mg0.3	Si9Mg0.5
Hesaplamalı malzeme mühendisliği alaşım kompozisyonları (%ağ.)	Si	3.0	5.0	5.0	5.0	7.0	9.0	9.0	9.0
	Mg	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.2	0.3	0.5
	Fe	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	Cu	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Mn	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
	Zn	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	Ti	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	Cr	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Ni	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	Sn	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	Ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Zr	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
	V	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
	Sr	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
	Co	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	B	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Al	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan
Deneysel olarak elde edilen alaşım kompozisyonları (%ağ.)	Si	3.609	5.007	5.088	5.100	7.334	8.894	9.016	8.820
	Mg	0.716	0.293	0.562	0.731	0.305	0.231	0.299	0.483
	Fe	0.0981	0.1021	0.1096	0.1100	0.1008	0.1060	0.1134	0.1237
	Cu	0.0009	0.0010	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0013
	Mn	0.0027	0.0022	0.0023	0.0027	0.0026	0.0023	0.0026	0.0031
	Zn	0.0044	0.0035	0.0038	0.0043	0.0037	0.0031	0.0034	0.0041
	Ti	0.0535	0.1084	0.1288	0.1168	0.1214	0.1252	0.1239	0.1192
	Cr	0.0016	0.0011	0.0012	0.0014	0.0015	0.0010	0.0011	0.0015
	Ni	0.0054	0.0053	0.0054	0.0054	0.0054	0.0049	0.0052	0.0055
	Sn	0.0030	0.0026	0.0026	0.0030	0.0027	0.0019	0.0020	0.0026
	Ca	0.0006	0.0003	0.0005	0.0005	0.0010	0.0008	0.0008	0.0007
	Zr	0.0017	0.0018	0.0019	0.0019	0.0026	0.0026	0.0028	0.0030
	V	0.0136	0.0125	0.0125	0.0135	0.0129	0.0139	0.0141	0.0136
	Sr	0.0078	0.0121	0.0117	0.0122	0.0147	0.0158	0.0160	0.0166
	Co	0.0037	0.0035	0.0035	0.0036	0.0035	0.0034	0.0034	0.0034
	B	0.0004	0.0013	0.0025	0.0010	0.0004	0.0006	0.0008	0.0006
	Al	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

Hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmalarında, JMatPro yazılımı ile; alaşım elementi çeşidi, miktarına bağlı değişkenlik gösteren gerçek gerilim/birim şekil değişimi eğrilerine göre mekanik özellikler ve sıcaklığa bağlı değişkenlik gösteren termo-dinamik, termo-kinetik ve fiziksel özellikler elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, alaşımlara ait faz dönüşümleri, kararlı ve yarı kararlı faz denge diyagramları, katılaşma davranışları ve özellikleri de tayin edilmiştir. JMatPro yazılımı ile sanal alaşım verisi eldesinde, izlenen yol şu şekildedir:

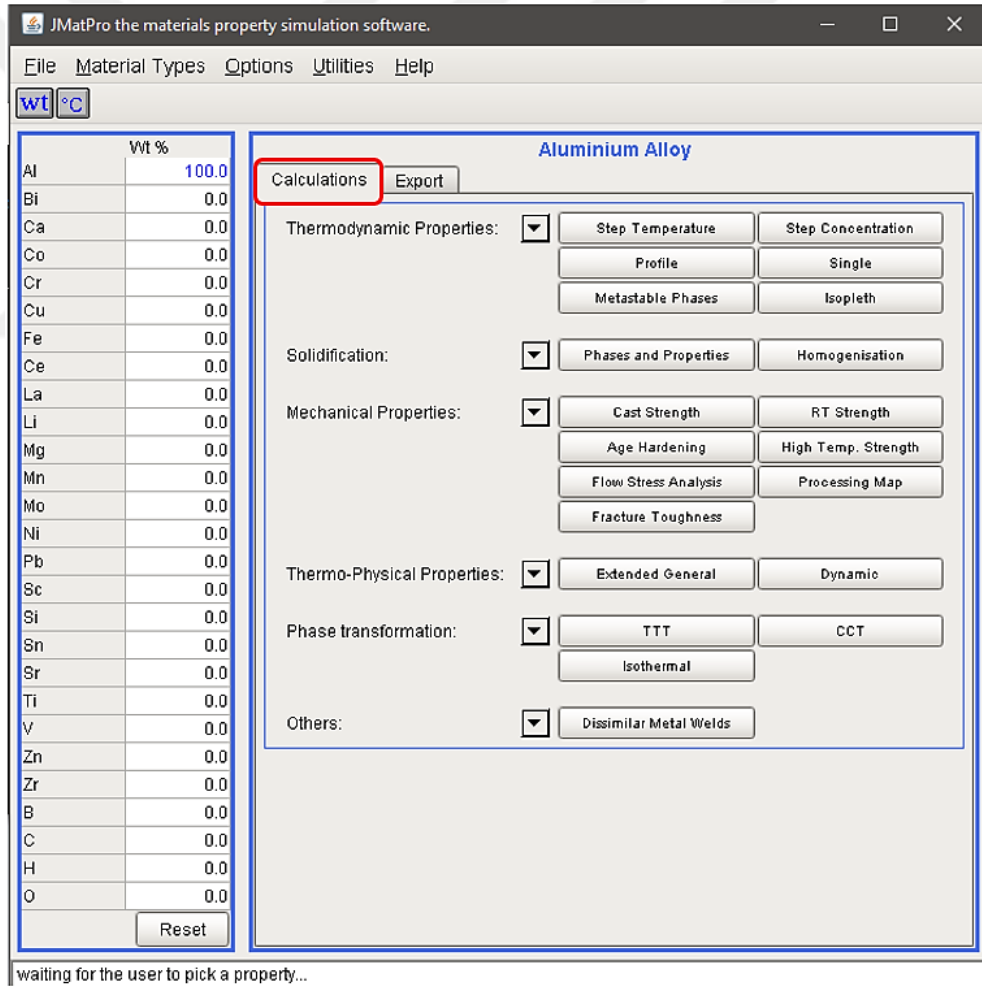
- İlgili yazılımın (JMatPro v.12-Aluminum Alloy database) çalıştırılmasının ardından Şekil 3.4’teki gibi malzeme tipi (*Material Types*) menüsünde yer alan alüminyum alaşımları (*Aluminum Alloys*) kısmı seçilmiştir.



Şekil 3.4 JMatPro yazılımında yer alan malzeme tipi veri tabanına erişim ekranı

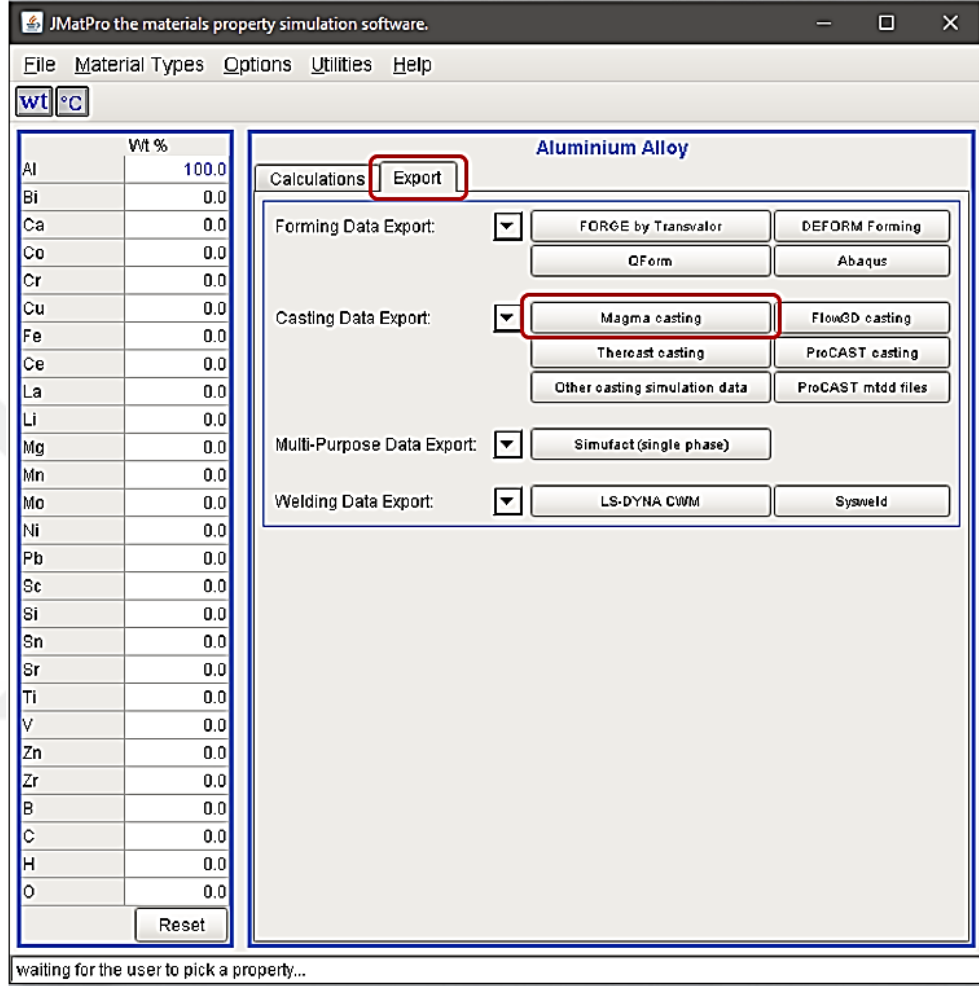
- Açılan sayfada (Şekil 3.5), solda yer alan kısma özellikleri indekslenmek istenen alaşımın kompozisyon verileri kütlece % cinsinden girilmiş ve alaşım yazılımın veri tabanına kaydedilmiştir.

– Kompozisyon giriş ekranının sağ kısmında bulunan “hesaplamalar” (*Calculations*) sekmesinden, araştırılmak istenen özellik seçilmiştir. Yazılımda bu kısımda, termodinamik özellikler, katılaşma karakteristikleri, mekanik özellikler, termofiziksel özellikler, faz dönüşümleri ve kaynaklanabilirlik özellikleri olmak üzere, gerçekleştirilecek sanal hesaplama ile pek çok malzeme karakteristiği hakkında öngörü yapılabilmektedir. Doktora tez çalışmasında bu kısımda alaşımlar ile ilgili özellikle döküm prosesinde kritik olan verilerden, katılaşma karakteristikleri, mekanik (sertlik, akma ve çekme dayanımları) ve sıcaklığa bağlı termofiziksel (yoğunluk, sıvı viskozitesi, dendrit kolları arası mesafe) özellikler üzerinde çalışılmış ve öngörüler yapılmıştır.



Şekil 3.5 JMatPro yazılımında alaşım kompozisyonuna bağlı olarak hesaplanabilen malzeme özelliklerine erişim ekranı

– Alaşımlara ait özelliklerin sanal analizlerinin ardından, Şekil 3.6’da yer alan “Export” kısmından, Magmasoft yazılımı ile alçak basınçlı döküm simülasyonunda kullanılmak üzere veri dosyası üretilmesi sağlanmıştır.

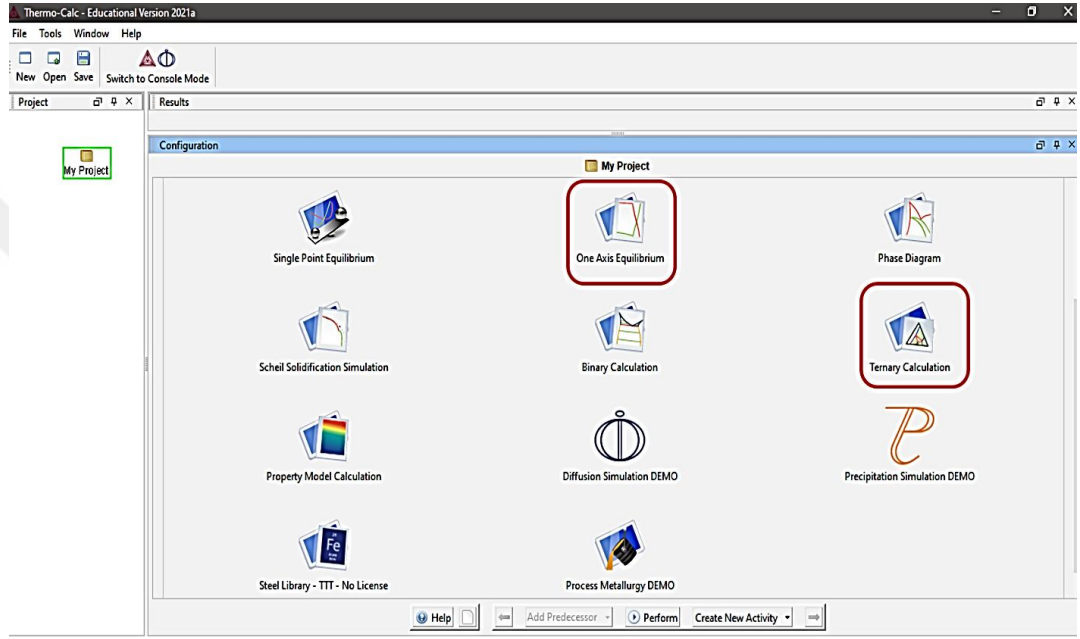


Şekil 3.6 JMatPro yazılımından üretilen alaşım verilerinin aktarılabildiği şekillendirme, kaynak ve döküm simülasyon programları.

Bir diğer yandan, Thermo-Calc yazılımının, 2021a sürümünden faydalanılarak gerçekleştirilen ayrıntılı alaşım tasarım çalışmalarında, kararlı ve yarı kararlı heterojen faz dengelerinin hesaplamaları, faz oranları ve yüzde kompozisyonlar ve termal özellikler, dönüşüm sıcaklıkları (sıvılaşma–katılaşma), faz dönüşümlerine neden olan ana parametreler, faz diyagramları (Al-Si-Mg üçlü faz diyagramı), kimyasal reaksiyonların termodinamik özelliklerin belirlenmesi ve proses süreçlerinde kullanılan temel değişkenlere ait sanal ortamda malzeme veri bankası oluşturulmuştur.

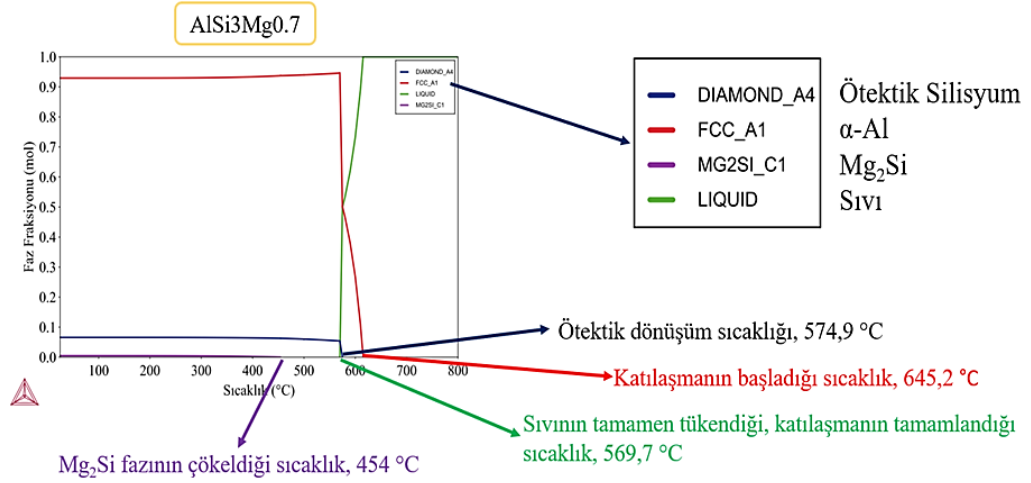
Thermo-Calc yazılımı ile sanal alaşım verisi eldesinde, izlenen yol şu şekildedir:

– Yazılım hem kod yazılması ile kullanım hem de grafik modu üzerinden çalışabildiğinden, kullanıcıya 2 farklı hesaplama yolu sunarak kolaylık sağlamaktadır. Doktora tez çalışmasında, yazılım grafik modu üzerinden kullanılmıştır. İlgili yazılımın çalıştırılmasının ardından, şekil 3.7’de yer alan ekran karşımıza çıkmaktadır.



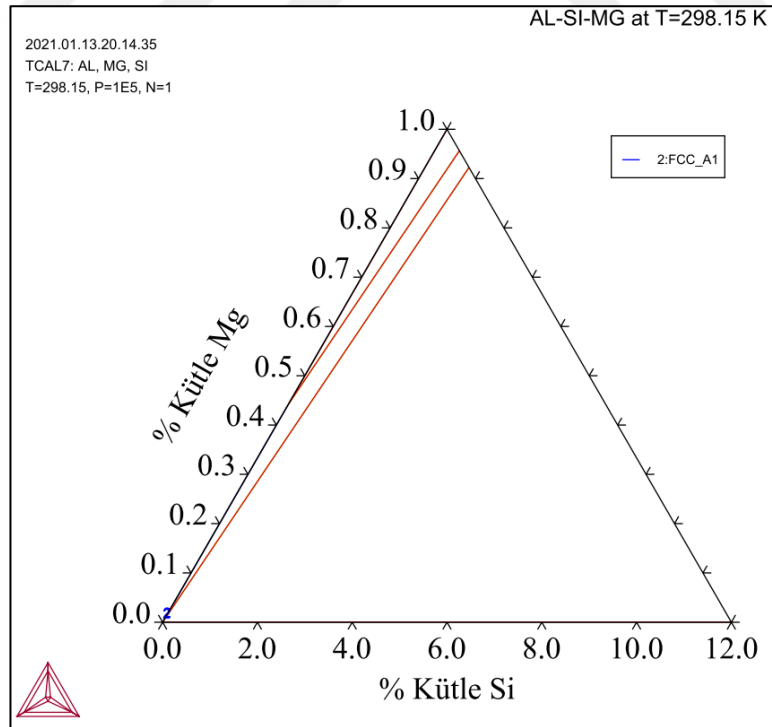
şekil 3.7 Thermo-Calc yazılımının çalışma ekranı

– Yeni bir proje sayfası açılmasının ardından, “*One axis equilibrium*” komutu ile alaşımlara ait katılaşma analizi grafikleri hesaplanabilmektedir. Katılaşma analizleri ile elde edilen grafiklerden, alaşımlarda kompozisyonuna bağlı olarak değişen ötektik dönüşüm sıcaklığı, katılaşmanın başladığı sıcaklık, sıvının tamamen tükendiği ve katılaşmanın tamamlandığı sıcaklık, katılaşma aralığı, çökelti fazların oluşum ve çözünme sıcaklıkları açıkça görülebilmektedir. Thermo-Calc hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı ile elde edilebilen AlSi3Mg0.7 alaşımına ait örnek bir katılaşma analizi grafiğine şekil 3.8’de yer verilmiştir.



Şekil 3.8 AlSi3Mg0.7 alaşımına ait Thermo-Calc yazılımından elde edilen katılaşma analizi grafiği ve önemli sıcaklıkların gösterimi

– Öte yandan, Şekil 3.7’de gösterilen “*Ternary Calculation*” komutu ile Al-Si-Mg sistemine ait istenilen kompozisyon aralıklarında, üçlü faz diyagramları ortaya çıkarılmıştır. Thermo-Calc yazılımı ile elde edilebilen örnek bir üçlü faz diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir.

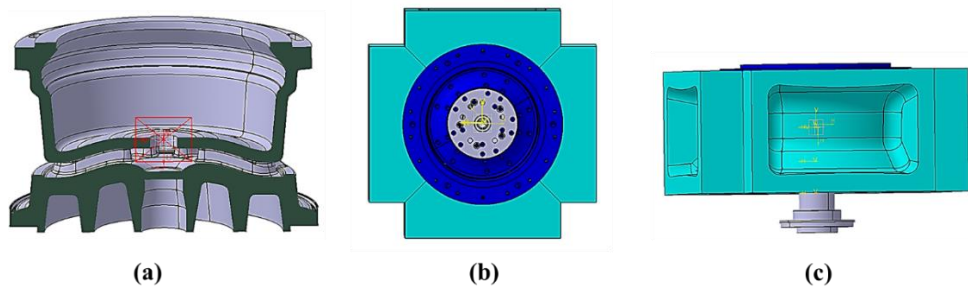


Şekil 3.9 Al-Si-Mg alaşım sistemine ait üçlü faz denge diyagramı.

3.2.2 Geliştirilen Alaşımların Alçak Basıncılı Döküm Simülasyonları

Doktora tez çalışmasında alçak basınçlı döküm simülasyonları aynı model jant üzerinde (Endüstride sıklıkla kullanılan 5 kollu model seçilmiştir). Magmasoft yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm simülasyonlarını yürütmek için gerekli olan alaşım verileri, doğrudan JMatPro yazılım programının bir çıktısı olarak .mat dosya uzantısı ile aktarılmıştır. Bu durum, ham alaşım verilerinin (fiziksel özellikler, katılaşma karakteristikleri, döküm ve ısıtma işlem özellikleri, faz analizleri vs. içeren dosyalar halinde) aktarıldığı ve analizlerin gerçek alaşım verileriyle yapılarak, endüstriyel koşullara daha yakın sonuçlar elde edilebileceği anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım, ham maddeden ürüne kadar tüm sürecin sanal ortamda modellendiği bütünsel hesaplamalı malzeme mühendisliği olarak aktarılmaktadır. Son yıllarda son derece popüler olan bu yaklaşım, ötektik altı alüminyum döküm alaşımları için ilk kez bu doktora tez çalışmasında laboratuvar ve endüstriyel ölçekli ve kapsamlı olarak bir ürün özelinde ele alınmıştır. Bu nokta, çalışmanın orijinalliğini yansıtmaktadır.

Magmasoft yazılımı ile çalışırken, hali hazırdaki endüstriyel uygulamalar ile paralel olarak, sanal ortamda tasarlanan alaşımlar için alçak basınçlı döküm simülasyonun analize başlayacağı sıcaklık 700°C, besleme oranı %40 olarak belirlenmiştir. Kalıp malzemesi olarak, alüminyum titanat ile poteyaj işlemi uygulanmış olan H13 sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan kalıba ait üst ve alt maçanın görüntüsü Şekil 3.10 (a)'da kalıbın üstten plaka olmadan görüntüsü (b)'de ve kapalı kalıbın yolluklarıyla birlikte plaka olmaksızın geometrisi (c)'de verilmektedir.



Şekil 3.10 Döküm kalıbının Magmasoft yazılımında farklı açılardan geometrileri (a) kalıba ait üst ve alt maçanın görüntüsü, (b) kalıbın üstten plaka olmadan görüntüsü, (c) kapalı kalıbın yolluklarıyla plaka olmadan görüntüsü.

Magmasoft ile döküm simülasyonu yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalar ve verilerin ilgili yazılıma nasıl işlendiğine dair detaylar Tablo 8.2’de görselleri ile açıklanmıştır.

Tablo 3.5 MagmaSoft yazılımı veri giriş çubuğundaki semboller ve işlevleri

Magmasoft Veri Giriş Çubuğu	Semboller ve İsimleri	Açıklamalar
	<i>Project</i>	Kayıtlı projelere ulaşılan kısımdır.
		
	<i>Geometry</i>	Çizim programlarından MagmaSoft yazılımına geometrinin aktarıldığı kısımdır. Burada dökümü etkileyebilecek her bir geometrik parça (yolluk, kalıp parçaları, ürün, hava kanalları, filtreler, soğutmalar vb.) çizim programından çağırılmalıdır. Ayrıca bu kısımda gerekli görüldüğü takdirde ek çizimler de yapılabilmektedir.
		
	<i>Mesh</i>	İş parçasını tanımlayan mümkün olan en küçük ağ yapısına ulaşarak gerçeğe yakınsama yapılan kısımdır. Gerekli görülen bölgelerde daha kaba ya da daha ince mesh (ağ) yapısı oluşturulabilir. MagmaSoft yazılımında bu kısımda, “standard” kaba mesh, “advanced” ince mesh olarak tanımlanmıştır. Bu kısım ağ yapısı ile ilgili uygun olmayan, problem ortaya çıkarabilecek durumların da kontrol edilebildiği bölümdür.
		

Tablo 3.5 devamı

	<i>Material</i>	Malzeme verilerinin tanımlandığı bölüm, kendi içerisinde birkaç kısma ayrılmaktadır. “Material Definition” ürün malzeme datası, giriş sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, soğutma sıcaklığı gibi verilerin girildiği bölümdür. “Heat Transfer Definitions” ısı transferi değerlerinin girildiği ve hangi parçalar arası ısı transferi olacağının tanımlandığı bölümdür. “Casting Process” simülasyonun kaç çevrim boyunca çalışacağını ve hangi çevrimdeki verilerden sonuç alınacağını belirler. Döküm yöntemi, kalıp hareketleri ve süreleri yine bu kısımda tanımlanmaktadır. “Simulation settings” kısmı veri almak istenilen çevrim bu kısımdan seçilir. Burada dolum, katılaşma ve kalıp hazırlık bölümlerini açıp kapatma imkanı vardır. Böylece kısa sürede kısmi çözümler elde edilebilmektedir.
	<i>Optimization</i>	Belirli sınır değerler çerçevesinde Magmasoft yazılımının istenilen seviyeye hangi noktada yakınsayacağını analizinin yapıldığı kısımdır.
	<i>Simulation</i>	Simülasyonun başlatılacağı bölümdür. Çalışmaların kuyruğa alınabildiği veya hemen çalıştırıldığı iki farklı seçenek sunar.
	<i>Results</i>	Analizin bitip sonuçların değerlendirildiği bölümdür. Kalıp hazırlık, dolum, katılaşma ve bunlarla ilgili fotoğraf, video veya eğrilerin alınabildiği kısımdır. Seçilen ayarlara göre, porozite, mikroyapı, ısı dengesi, besleme karakteristikleri, malzeme özellikleri vb. sonuçlar analiz edilebilmektedir.

Yapılan analizlerde, alaşım kompozisyonuna bağlı olarak, aşağıda verilen özellikler elde edilmiş ve sonuçlar baz alaşım kompozisyonu olan AlSi7Mg0.3 alaşımı ile detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

- Faz analizi (α -Al, tektik Si, Mg₂Si ve AlFeSi bileşikleri)
- Makro porozitelerin janttaki dağılımı ve miktarı
- Mikro porozitelerin janttaki dağılımı ve miktarı
- İkincil dendrit kolları arası mesafe değerinin jant bölümlerindeki (jant kolu, göbek ve flanş) değişimi
- Mekanik zelliklerin değişimi (akma dayanımı, çekme dayanımı, uzama miktarı, sertlik)

3.3 Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi ile Pilot retim alışmaları

Sanal ortamda hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımları ile hesaplamaları yapılan 8 farklı kompozisyona sahip alaşımlar, endüstriyel koşullarda alçak basınçlı döküm yöntemi ile jant üretiminde ham madde olarak kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Alaşımların ergitilmesinde, Cevher Jant A.ř. firması bünyesinde bulunan ve şekil 3.11’de görülen 750kg alüminyum kapasiteli devirmeli tip elektrikli ergitme ocağı kullanılmıştır.



şekil 3.11 750 kg Al kapasiteli devirmeli tip elektrikli ergitme ocağı

AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 olmak üzere 8 farklı kompozisyona sahip alaşımların hazırlanmasında, Cevher Jant A.Ş. tarafından endüstriyel üretimde kullanılan AlSi7 ve AlSi11 alaşımlı ve saf Al külçeler kullanılmıştır. Tüm kompozisyonların hazırlanmasında AlSi7Mg0.3 alaşımından yola çıkılmıştır. AlSi5 alaşımları hazırlanırken, AlSi7 alaşımına saf Al külçe eklemesi yapılmıştır. Benzer şekilde AlSi9 alaşımları hazırlanırken, AlSi7 alaşımı potada baz alaşım olarak tutulmuş ve AlSi11 alaşımlı külçe eklemesi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca AlSi3 alaşım kompozisyonunun hazırlanmasında, enerji ve zaman sarfiyatını minimize etmek amacıyla, daha evvel hazırlanan AlSi5 alaşımı baz olarak ergitme potasında bulundurulmuş ve üzerine uygun miktarda saf Al külçesi eklenmiştir. Bir diğer yandan, alaşımlar hazırlanırken tane inceltme amacıyla çubuk AlTi5B1 ve modifikasyon amacıyla AlSr10 master alaşımları kullanılmıştır. Alaşımlardaki Mg seviyesini ayarlamak için ise, ergitme potasına istenen miktarda saf Mg tablet eklemesi yapılmıştır. Alaşımların kimyasal kompozisyonları ergitme aşamasında, sıklıkla alınan optik spektrometre analizleri ile kontrol altında tutulmuştur. Alaşımların ergitilmesi kompozisyona bağlı olarak 700 ila 720°C arasında gerçekleştirilmiştir.

Ergitme ocağında istenilen kompozisyonlarda elde edilen sıvı alaşımlar, transfer potaları yardımıyla silisyum karbür (SiC) rotorlu gaz giderme ünitesine taşınmıştır. Sıvı metale azot gazı üflenerek, 300 ila 400 rpm arasında hızla dönen rotor yardımıyla tüm alaşımlarda, ergitme sonrası 15 dakika süreyle hidrojen gazı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşleme ait görsel Şekil 3.12’de yer almaktadır. Gaz gidermenin tamamlanmasının ardından operatör sıvı metalin üzerinden cüruf kaldırma işlemi yapmaktadır.



Şekil 3.12 Gaz giderme işlemi

Gaz giderme işleminin ardından, ergimiş metal yine transfer potaları yardımıyla Şekil 3.13'te görüldüğü gibi alçak basınçlı döküm ünitesinin bekletme ocağına aktarılmaktadır.



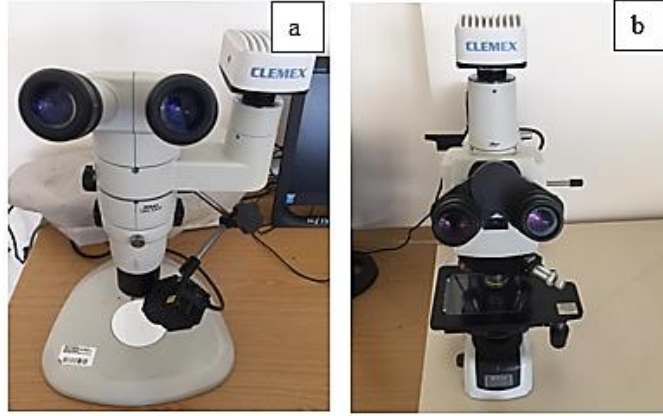
Şekil 3.13 Ergiyiğin alçak basınçlı döküm ünitesinin bekletme ocağına verilmesi

Alçak basınçlı döküm ünitesinden çıkan jantların tamamı alanında uzman operatörlerin değerlendirmelerini yaptığı X-Ray kontrolüne tabi tutulmuştur. Böylelikle sanal ortamda tasarlanan farklı silisyum ve magnezyum oranlarına sahip alaşımların, endüstriyel koşullarda dökümleri gerçekleştirilmiş ve jant ürünleri elde edilmiştir.

3.4 Test ve Karakterizasyon Çalışmaları

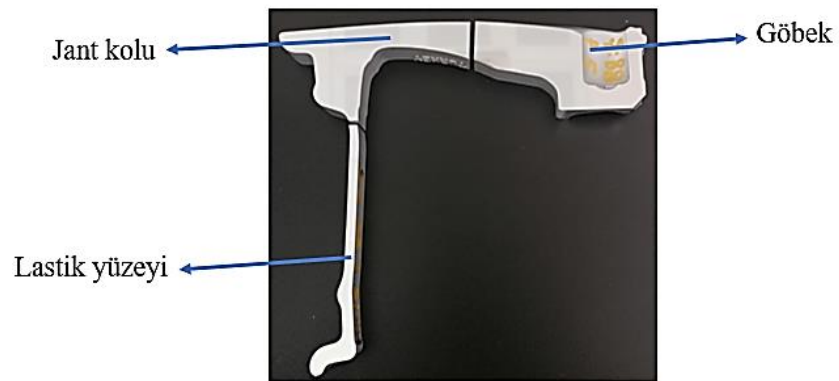
3.4.1 Makro ve Mikroyapı İncelemeleri

Tez çalışmasında yer alan alüminyum silisyum döküm alaşımlarının makro ve mikroyapı incelemeleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan stereo ve optik mikroskoplarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14 (a), makro incelemelerde kullanılan NIKON SMZ1000 Clemex markalı stereo mikroskobu, Şekil 3.14 (b) ise NIKON LV100 Clemex mikro incelemelerde kullanılan optik mikroskobu temsil etmektedir.



Şekil 3.14 a) optik mikroskop, b) stereo mikroskop

İncelemelerde, jantın kesitinden alınan göbek, jant kolu ve lastik yüzeyine ait numuneler üzerinde çalışılmıştır. $AlSi3Mg0.7$, $AlSi5Mg0.3$, $AlSi5Mg0.5$, $AlSi5Mg0.7$, $AlSi7Mg0.3$, $AlSi9Mg0.2$, $AlSi9Mg0.3$, $AlSi9Mg0.5$ olmak üzere, farklı magnezyum ve silisyum oranına sahip 8 farklı alaşım kullanılmıştır. Her bir numune, yukarıda belirtilen farklı alaşım kompozisyonlarında Cevher Jant A.Ş. firmasında endüstriyel ölçekte alçak basınçlı döküm yöntemiyle dökülen jantlardan otomotiv endüstrisinin kullandığı standartlara uygun şekilde göbek, jant kolu ve lastik yüzeyi olmak üzere bir jantın kesitine ait tüm bölgeleri kapsayarak kesilmiş ve elde edilmiştir. ISO/IEC 17025 standardına göre, makro ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilen numunelere ait bir görüntü Şekil 3.15'te yer almaktadır. Numunelerin bir yüzeyi klasik metalografi yöntemleriyle (zımparalama, parlatma, dağlama) mikro incelemeler için, diğer yüzeyleri ise stereo mikroskop ile makro incelemeler için Fe_3Cl çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır.

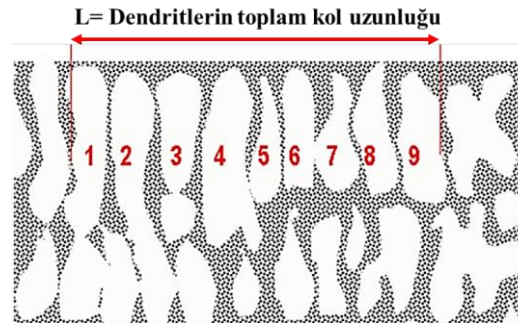


Şekil 3.15 Test ve karakterizasyon çalışmalarında kullanılan jant kesiti numunesi örneği

Makro incelemeler, her alaşım kompozisyonuna sahip numune için göbük kısımdan stereo mikroskop ile farklı büyütmelerde görüntüler kaydedilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Makro incelemelerin ardından numuneler, optik mikroskopta yer alan görüntü analiz sistemleri yardımıyla detaylı mikro incelemelere tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, her bir alaşıma ait numunenin göbük, jant kolu ve flanş bölgelerinden mikroyapı görüntüleri kaydedilmiştir. Bunun yanı sıra, mikroyapısal incelemelerde, göbük bölgesinden faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Faz analizleri, optik mikroskopta farklı fazların farklı renkler kullanılarak renklendirilmesi ve ilgili alana düşen faz yüzdelerinin belirlenmesi esasına dayanarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, α -Al fazı yeşil, ötektik faz ise lacivert renge boyanarak, her bir alaşım için göbük bölgesinden 5'er kez ölçümler alınarak yapılmıştır.

Faz analizlerinin ardından numunelerde mikroyapıda dendrit kolları arası mesafe (dendrite arm spacing-DAS) lmleri gerçekleştirilmiştir. DAS lmleri tüm numuneler için göbük, jant kolu ve flanş bölgelerinden 8'er ölçüm alınarak yapılmıştır. Ölçümlerin nasıl alındığına dair görsel şekil 3.16'da verilmiştir.



şekil 3.16 Dendrit kolları arası mesafenin hesaplanabilmesi için mikroyapıda alınan ölçümlerin şematik gösterimi.

Ölçümlerin kaydedilmesinin ardından, aşağıda verilen (3.1) numaralı denklemde yer alan dendrit kolları arası mesafe formülünün uygulanması ile yapılmıştır.

$$DAS=L/(n.V) \quad (3.1)$$

Bu formülde DAS, dendrit kolları arası mesafe değerini, L, dendritlerin toplam kol uzunluğunu, V, mikroskop büyütme değerini ve n, dendrit kollarının sayısını göstermektedir.

Alaşımlarda stereo ve optik mikroskopta mikroyapı incelemelerinin tamamlanmasının ardından, ileri seviye mikroyapısal incelemeler için taramalı elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ZEISS markalı EDX dedektörlü taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır. Temel olarak elektron tabancası, manyetik lensler ve detektörler ile analizlerin gerçekleştirildiği bu teknikte, elektron-numune etkileşimi sonucu saçılan elektronlar çeşitli detektörler vasıtasıyla analiz edilmektedir. Numunelerin içerisinde nitel ve nicel olarak elementel analiz yapılabilmekte olup, haritalandırma tekniği ile elementlerin dağılımı izlenebilmektedir. Doktora tez çalışmasında, elementel haritalama tekniğinden faydalanılarak taramalı elektron mikroskobu yardımıyla alaşımlardaki Al, Si ve Mg elementlerinin dağılımı ortaya çıkarılmıştır. Elementel haritalamada, Al elementi için gri, Si elementi için kırmızı ve Mg elementi için sarı renklendirme seçilmiştir ve analizler gerçekleştirilmiştir.

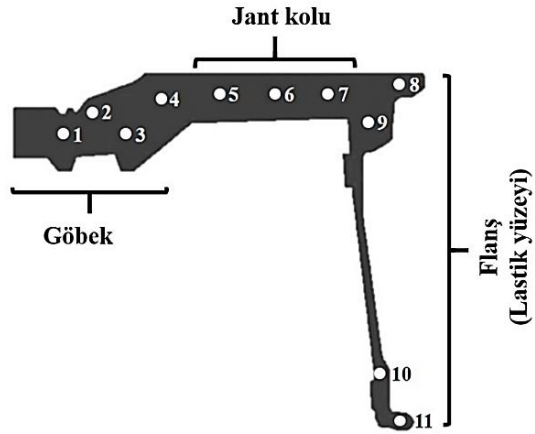
3.4.2 Mekanik Testler

8 farklı alaşım kullanılarak dökümleri gerçekleştirilen jantlardan otomotiv standartlarına uygun olarak çıkarılan kesit numunelerinde, göbek bölgesinden flanş bölgesine kadar, ASTM E10 ve ISO 6506 standartları doğrultusunda, 11 farklı noktadan Brinell sertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik ölçümlerinde, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı bünyesinde bulunan EmcoTest markalı cihaz kullanılmıştır. Kullanılan cihazın görseli Şekil 3.17'de yer almaktadır.



Şekil 3.17 Numunelerin sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz

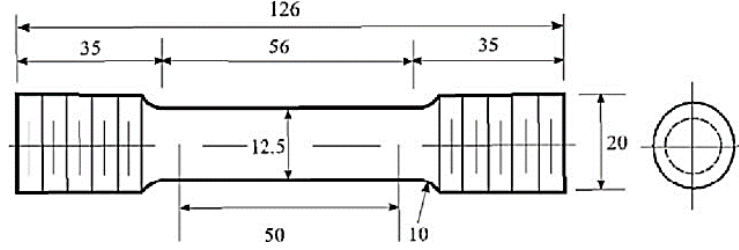
2,5 mm çaplı batıcı uç kullanılmış ve 62,5 kg yük 10 sn boyunca numune yüzeyine uygulanmıştır. Jant kesiti ve sertlik ölçümlerinin alındığı noktaları gösteren görsel Şekil 3.18’de yer almaktadır.



Şekil 3.18 Jant kesitinde sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar

Farklı alaşımlar kullanılarak üretilen jantların ASTM E8 ve ISO 6892-1 isimli otomotiv standartları gereği göbek, iç ve dış flanş bölgelerinden, uygun ölçülerde alınan numuneler oda sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuştur. Standartta tanımlı çekme testi numunesinin ölçüleri (mm cinsinden) Şekil 3.19’da verilmektedir. Çekme testlerinde Cevher Jant A.Ş. Metalurji Laboratuvarı bünyesinde bulunan, Zwick-Roell

Z100 markalı cihaz kullanılmıştır. Cihaz gerinim kontrol mekanizmasına sahip olup, test hızı 0,002 1/s olarak ayarlanmıştır. Doğru uzama sonuçlarının elde edilmesi amacıyla cihaza haricen ekstansometre bağlanmıştır.



Şekil 3.19 ASTM E8 standardına uygun çekme testi numunesi ölçüleri (mm)

Çekme testi ile numunelerde alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen uzama miktarı, çekme ve akma dayanımı değerleri kaydedilmiştir.

Öte yandan, geliştirilen alaşımlar içinden örnek olarak seçilen AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5 ve AlSi5Mg0.7 kompozisyonlarına sahip alaşımlarla üretilen jantlar, hali hazırda alçak basınçlı döküm yöntemiyle jant üretim sürecinde AlSi7Mg0.3 alaşımına uygulanan, T6 ısıtıl işlemine tabi tutulmuştur. Çökelme sertleşmesi olarak adlandırılan bu ısıtıl işlemde alaşımlar, 543°C’de 210 dakika boyunca çözeltiye alınmış, 70°C’de su verilmiş ve 163°C’de 12 saat süreyle yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Isıl işlem uygulaması Cevher Jant A.Ş. bünyesinde endüstriyel ölçekli gerçekleştirilmiştir. Bu ısıtıl işlem çalışması, doktora tezinin geleceği açısından örnek olması amacıyla yapılmıştır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Doktora tez çalışmasında hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları, döküm simülasyonları ve pilot ölçekli çalışmalardan elde edilen sonuçlar malzeme bilimi temelinde yapı-özellik-işlem-performans kriterlerine göre değerlendirilmiş ve sonuçlar literatür verileri ışığında bu bölümde detaylandırılarak tartışılmıştır.

4.1 Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Sonuçları ve Değerlendirme

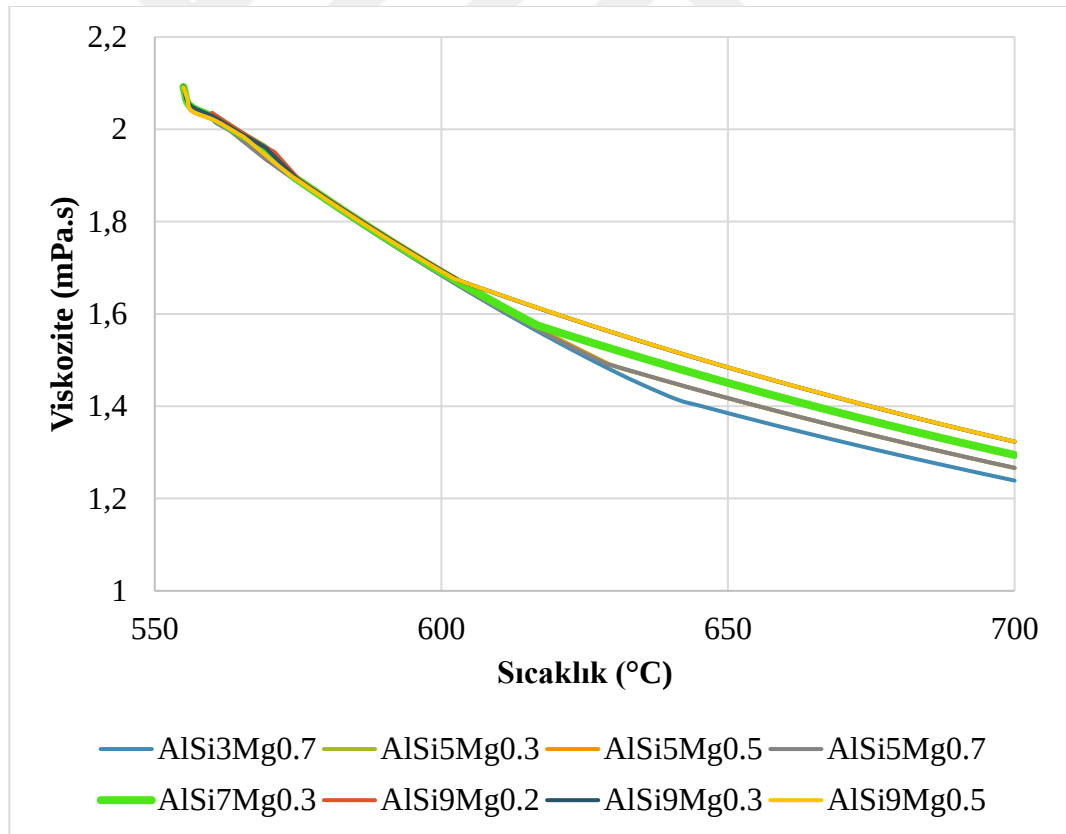
4.1.1 *Alaşımlarda Sıcaklığa Bağlı Olarak Fiziksel Özelliklerin Değişimleri*

Alaşımlarda sıcaklığa bağlı olarak değişen; sıvı viskozitesi, yoğunluk ve termal iletkenlik gibi parametreler mevcuttur. Bu parametrelerin, gerçek döküm öncesi hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ile tayini, endüstriyel proses koşullarının belirlenmesinde ve ürün özelliklerinin tahmininde yol gösterici nitelikte olmaktadır.

Doktora tez çalışmasında JMatPro hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı kullanılarak, döküm sıcaklığından (700°C) oda sıcaklığına (25°C) kadar bu fiziksel özelliklerin, alaşım kompozisyonuna bağlı nasıl değiştiği analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafik ile ifade edilmiştir.

Şekil 4.1, sıvı viskozitesinin döküm sıcaklığı üzerinden (700°C) sıvı fazın tükendiği sıcaklıklara (~550°C) kadar değişimini göstermektedir. Alaşımlar için sıvı fazın tükendiği sıcaklıklar yine hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından Thermo-Calc kullanılarak gerçekleştirilen katılaşma analizleri ile tayin edilmiş ve Bölüm 4.1.2’de detaylı olarak verilmiştir. Buna göre, yüksek sıcaklıklarda AlSi3Mg0.7 alaşımı daha düşük viskoziteye sahipken, sıvı fazın tükendiği sıcaklıklara doğru tüm alaşımlar benzer viskozite değerine sahip olmaktadır. Alaşımın bileşimi ötektığe yaklaştıkça akıcılığın genel olarak arttığı saptanan bir gerçektir. Konuyla ilgili olarak, ilk düşünceler ötektik yakınında metal viskozitesindeki değişimlerin buna

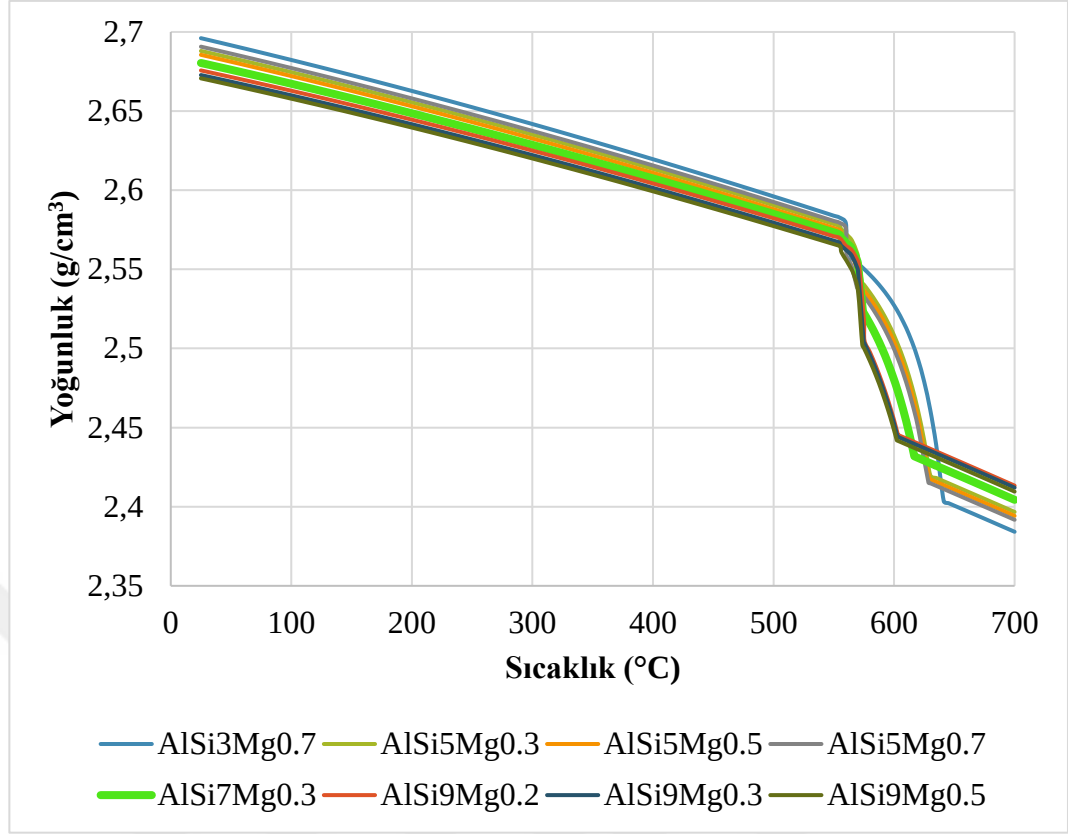
neden olduğu şeklinde idi (Flemings, 1976). Ancak şimdi bu artışın sadece katılaştırma karkteristiğinden ileri geldiği bilinmektedir. Akışkanlık kavramı birçok açıdan değerlendirildiğinde, viskozite olarak gösterilmemelidir. Fiziksel anlamda bir sıvının viskozitesi, sıvı içinde meydana gelen hareketlerle ilgilidir (Campbell, 2013). Dolayısıyla belirlenen bir sıcaklıkta kesin bir değeri vardır. Metalin akışkanlığı metal özellikleri ve yapılan testin değişkenleri olmak üzere iki temel faktöre bağlıdır. Metalle alakalı faktörler olarak viskozite, yüzey gerilimi, yüzey filmleri, gaz miktarı, kalıntılar, inklüzyon, katılaşma ve kristalleşme biçimi olarak sayılabilir. Sıvı metallerin viskozite bakımından oldukça farklı değerler aldığı ve kötü ve yavaş akan metalin yüksek viskoziteye sahip olduğuna dair inanış vardır. Ayrıca sıvı viskozitesi sıcaklıkla çok az değiştiğinden dökümlerde önemsiz bir faktördür (Atasoy, 1990). Bu sebeple, kullanılan alaşımların yakın viskozite değerleri sergilemesi, beklenen bir sonuçtur ve alaşımların döküm prosesi açısından birbirine alternatif nitelikte olacağı söylenebilir.



Şekil 4.1 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen sıvı viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 4.2’de alaşım yoğunluğunun döküm sıcaklığı üzerinden (700°C) oda sıcaklığına (25°C) kadar değişimini gösteren grafik yer almaktadır. Genel olarak metaller ergidiğinde hacimlerinde bir artış meydana gelmektedir. Bu durumda, yoğunluğun birim hacme düşen kütle miktarı olduğu düşünüldüğünde, sıvının yoğunluğunun katınlıkından daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Kullanılan alaşımlara bakıldığında, JMatPro hesaplamalı malzeme mühendisliği analizlerinde oda sıcaklığında alaşımların yoğunluk değerleri sırasıyla, AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımları için, 2,696, 2,687, 2,685, 2,690, 2,680, 2,675, 2,672 ve 2,670 g/cm³ olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda alaşımlarda silisyum miktarının ve kendi içinde magnezyum miktarının artmasıyla yoğunluk değerlerinde çok küçük de olsa azalma meydana geldiği söylenebilir. Bu kadar küçük miktarda değişiklik meydana gelmesinin sebebi, yoğunluğun fiziksel bir büyüklük olması ve alaşımların tamamında hakim olan elementin %91’in üzerinde alüminyum olmasından kaynaklanmaktadır.

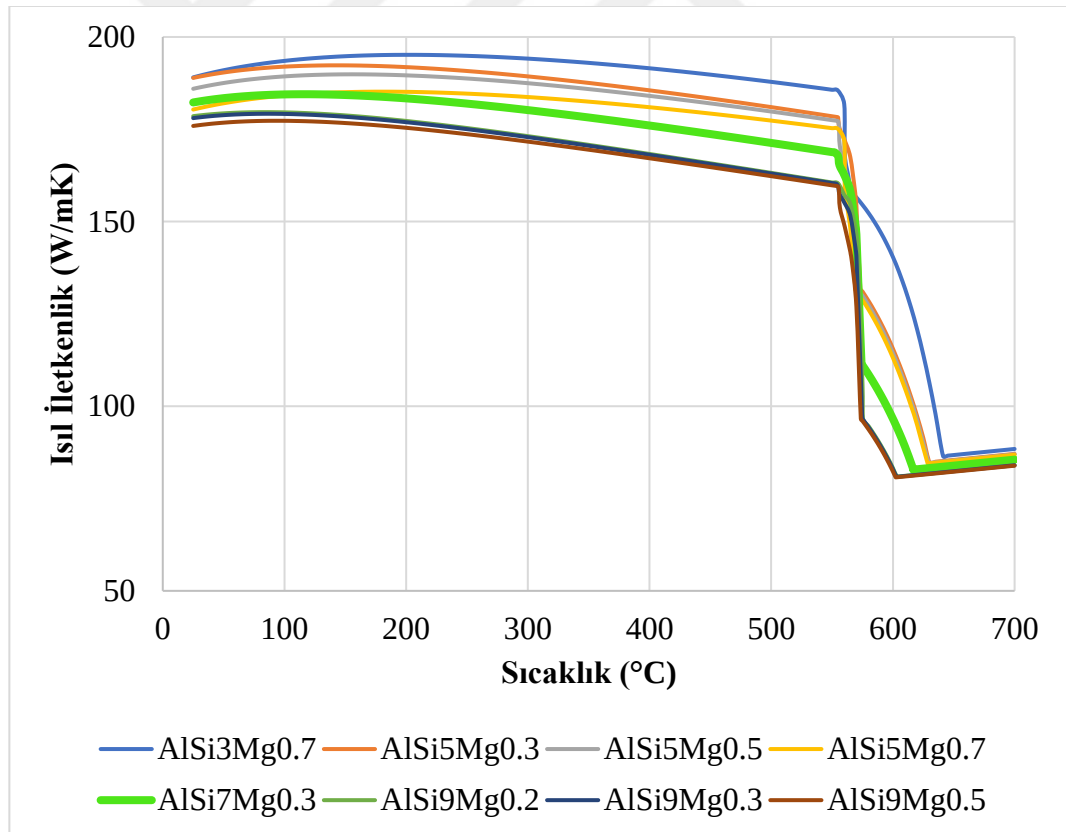
Oda sıcaklığındaki yoğunluğun daha düşük olması, ürün hafifletme çalışmaları için son derece önemlidir. Özellikle otomotiv sektöründe son yıllarda çelik bileşenlerin yerini almakta olan alüminyum bileşenler söz konusu olduğunda, yoğunlukta kazanılacak herhangi bir miktardaki azalma, toplam araç ağırlığının hafifletilmesinde kritik rol oynamakta ve üretici için gerek rekabet edebilirlik gerekse ham madde tüketiminin azaltılması (proses girdi maliyetlerinin düşürülmesi) açısından önem arz etmektedir. Otomobillerde 4 adet aktif, 1 adet yedek alüminyum jant olduğu göz önüne alındığında, bir ürünün hafifletilmesi, araç için 5 kat etki sağlayacaktır. Bu durumda, çalışmada kullanılan alüminyum alaşımlarında artan silisyum miktarının araç hafifletme çalışmaları için değerli olabileceği, hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımları ile öngörülmektedir.



Şekil 4.2 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen yoğunluk değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Döküm prosesinde etkili rol oynayan parametrelerden bir diğeri, termal iletkenlik katsayısıdır. Şekil 4.3, doktora tezinde kullanılan alaşımların ısı (termal) iletkenliğinin döküm sıcaklığı üzerinden (700°C) oda sıcaklığına (25°C) kadar değişimini göstermektedir. Alüminyum alaşımlarında ürünün servis süresini etkileyen en önemli etmenlerden biri, üründe ısıl gerilmelerin birikmesidir. Bu sebeple döküm sırasında üründeki ısıl dağılımların (termal gradyan) homojen olmasının sağlanması, proses ve ürün özelliklerinin verimi açısından son derece önemlidir. Alüminyum döküm alaşım kompozisyonunun termal iletkenlik üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde, bunun alaşımın mikroyapısal özellikleri ile doğrudan bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre, alüminyum döküm alaşımlarında daha ince dendritik ağ yapısına sahip alaşımlarda ısıl iletkenlik daha az iken, yapıda ikincil fazların oranının artması iletkenliği azaltmaktadır. Alaşımlarda, istenilen termal iletkenlik değerine ulaşabilmek için kritik bir katılma hızı belirlenmesi gerekmektedir. Isıl iletkenlikle ilgili Matthiessen kuralına göre, katı çözeltideki

elementlerin konsantrasyonunun artması, genel alaşımların direncini neredeyse doğrusal olarak artırır (Ho ve diğer., 1978). Bu bağlamda Mülazimoğlu ve ekibi alüminyum döküm alaşımlarında silisyum ve magnezyum miktarının alaşımların ısı iletkenliğine etkisine yönelik yaptıkları çalışmada, Si veya Mg konsantrasyonlarının artmasıyla elektriksel ve termal iletkenliğin doğrusal olarak azaldığını tespit etmişlerdir (Mülazimoğlu, 1989). Yukarıda verilen bilgilere göre, doktora tez çalışmasında kullanılan alaşımların mikroyapısal özellikleri incelendiğinde (Bölüm 4.3.1’de detaylı olarak verilmiştir.), oda sıcaklığında en ince alüminyum dendrit ağ yapısına sahip AlSi9Mg0.5 alaşımında en düşük termal iletkenlik görülmektedir. Alaşımların içerdiği alaşım elementi miktarı azaldıkça (AlSi9Mg0.5 bileşiminden AlSi3Mg0.7 bileşimine doğru gidildikçe), beklenildiği gibi ısı iletkenlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bu eğilim yüksek sıcaklıklarda ve düşük sıcaklıklarda da paralellik göstermektedir.



Şekil 4.3 Alaşımlarda hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen termal iletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

4.1.2 Katılaşma Analizleri

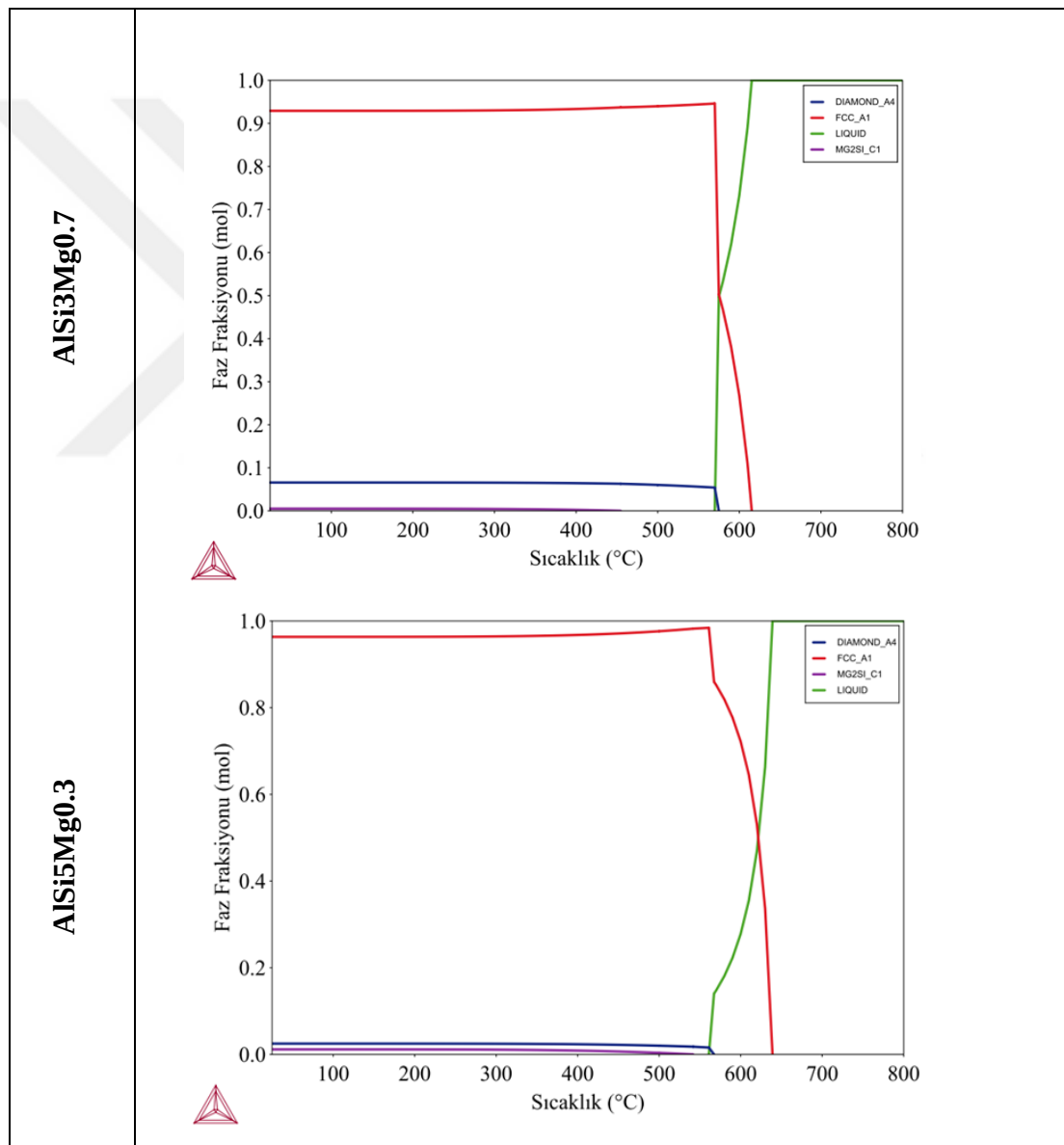
Alüminyum döküm alaşımlarında kimyasal kompozisyona baēlı olarak katılaşma davranışlarının bilinmesi, proses verimliliēi ve alaşım mikroyapısının tayini aēısından son derece önemlidir. Günümüzde gelişen alaşım/malzeme geliştirme teknoloji ile katılaşma analizlerinin bilgisayar ortamında yapılması ve bu karakteristik özelliklere endüstriyel üretim öncesi erişim mümkün olmaktadır. Bu sebeple, hesaplamalı malzeme mühendisliēi ile alaşımların özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarına katılaşma analizleri ile başlanmış ve kritik sıcaklıklar kaydedilmiştir. Katılaşma analizlerinde, alaşımın tamamen sıvı faza getiēi sıcaklık, katılaşmanın başladıēı sıcaklık, ötektik dönüşüm sıcaklıēı, yapıda varsa çökeltilerin oluşum ve çözünme sıcaklıkları, katılaşma aralıēı gibi çok önemli parametreler belirlenmektedir.

Doktora tez çalışmasında, AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımları için tüm alaşım elementlerinin Thermo-Calc hesaplamalı malzeme mühendisliēi yazılım sisteme tanımlanması ve “tek eksen-one axis” komutu kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar ile katılaşma analizleri elde edilmiştir. Bu komut ile, belirli bir kompozisyona sahip alaşımlar için, döküm sıcaklıēı üzerinden oda sıcaklıēına kadar alaşımın soēutulması ile katılaşma analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen grafikler, Tablo 4.1’de detaylı olarak verilmiştir. Bir katılaşma analizinde önemli sıcaklıklar ve gösterge panelinin okunuşu örnek olarak, AlSi3Mg0.7 alaşımı için daha evvel Bölüm 3.2’de verilmişti.

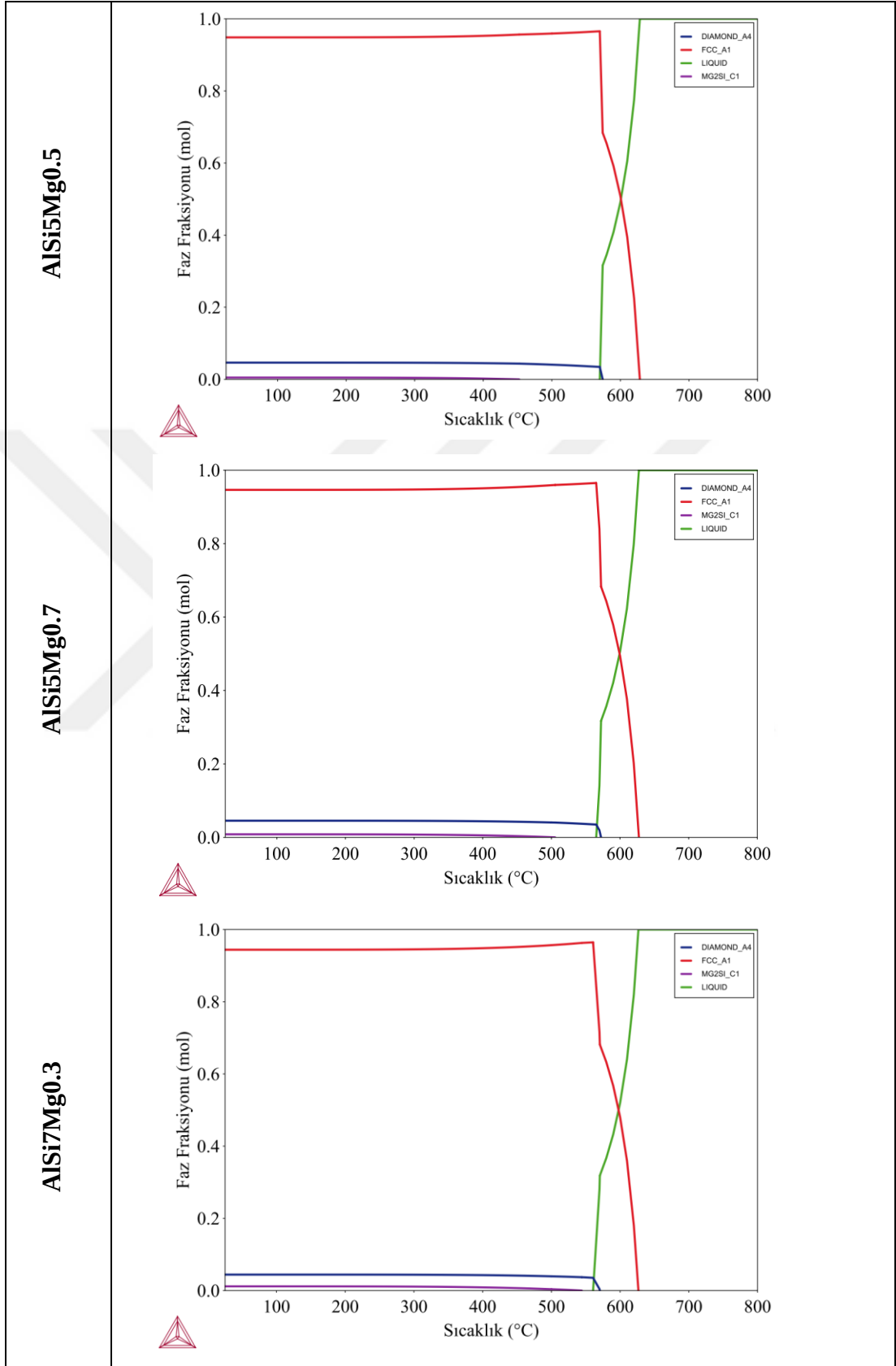
Ötektik altı kompozisyona sahip alüminyum alaşımlarında katılaşma öncelikle α -Al fazı dendritlerinin ortaya çıkması ile başlamaktadır. Dendritik katılaşma sürecinde, alaşım elementleri dendritik bölgelerden dışarı atıldıēı için, bu sırada sıvı alüminyumun bu elementler aēısından zenginleřtiēini söylemek mümkündür. Al-Si alaşımlarında, dendritik bölgelerden kusulan elementlerden en önemlisi silisyumdur. Silisyum, dendritler arası bölgelerde ötektik kompozisyona ulaşmakta ve ötektik katılaşma başlamaktadır. Eēer yapıda, Fe elementi intermetalik oluşturacak seviyede bulunuyorsa, ötektik katılaşma esnasında demir intermetaliklerinin de katılaşması

beklenmektedir. Bu çalışmada kullanılan alaşımların bileşimlerinde demir elementi çok az miktarda bulunmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir demir içeren metaller arası fazın ötektik katılaşma esnasında yapıda görülmesi söz konusu değildir. Sıcaklık daha da düşüp, alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte yaklaşık 540°C değerlerine geldiğinde, yapıda Mg_2Si fazının oluşması beklenmektedir. Tablo 4.1’de yer alan katılaşma analizi grafiklerinde de farklı renklerle ve açıkça katılaşma sırası, literatür verileri ile uyushmaktadır.

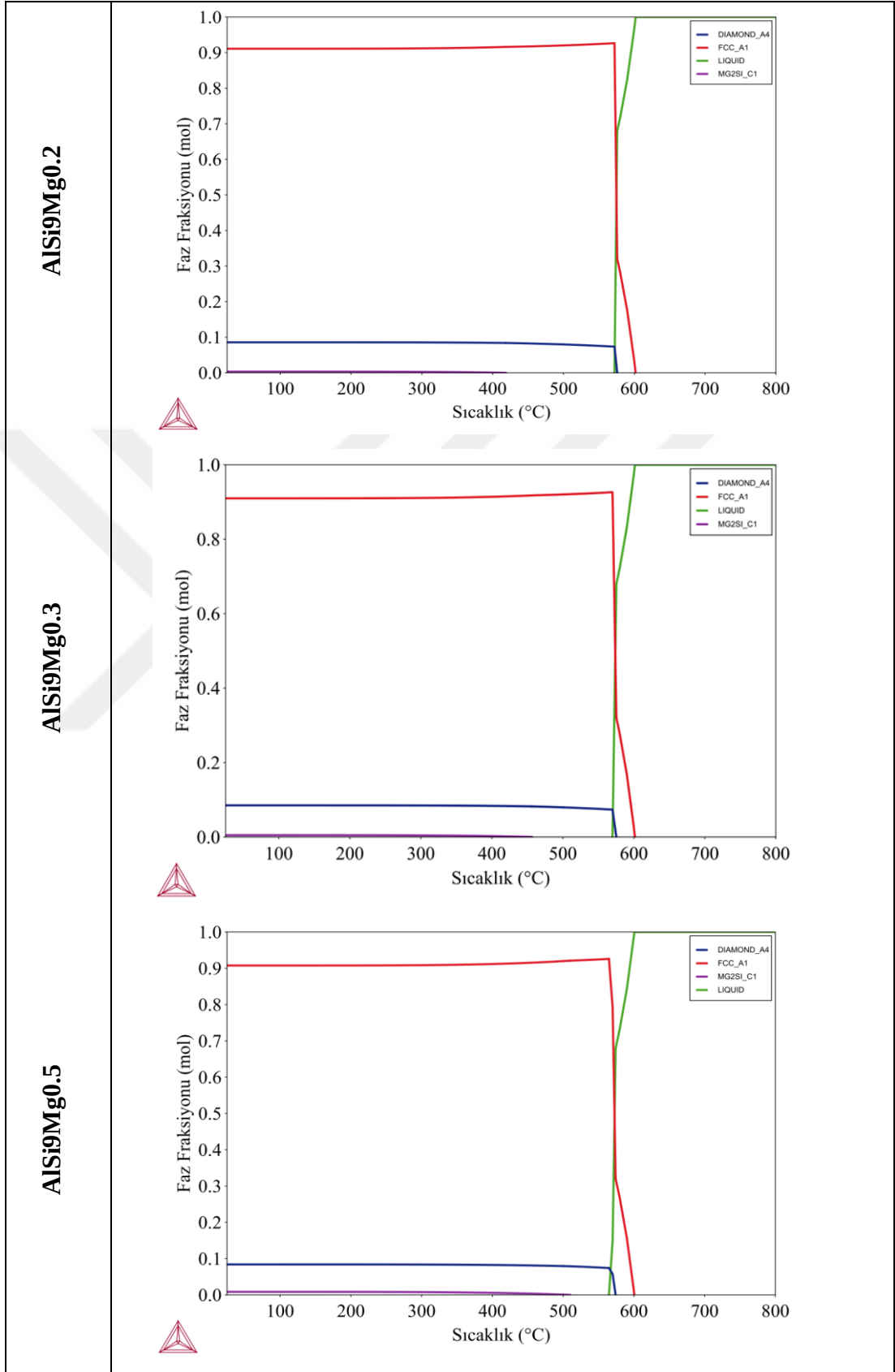
Tablo 4.1 ThermoCalc ile elde edilen, alaşımlara ait katılaşma analizi grafikleri



Tablo 4.1 devamı



Tablo 4.1 devamı



Hesaplama malzeme mühendisliği yöntemlerinden yararlanılarak Thermo-Calc yazılımı aracılığıyla elde edilen katılaşma analiz grafiklerinden alaşımlara ait ötektik dönüşüm sıcaklıkları okunabilmektedir. Alaşımların ötektik dönüşüm sıcaklıkları, katılaşmanın başladığı ve tamamlandığı sıcaklıklar ve katılaşma aralığı değerleri Tablo 4.2’de verilmektedir.

Tablo 4.2 Alaşımlara ait hesaplama malzeme mühendisliği ile elde edilen katılaşma analizlerinin sonuçları

Alaşım adı	Ötektik dönüşüm sıcaklığı (°C)	Katılaşmanın başladığı sıcaklık (°C)	Katılaşmanın tamamlandığı sıcaklık (°C)	Katılaşma aralığı
AlSi3Mg0.7	574,9	645,2	569,7	75,5
AlSi5Mg0.3	567,3	639,0	565,9	73,1
AlSi5Mg0.5	574,1	628,3	569,9	58,4
AlSi5Mg0.7	572,3	627,5	565,2	62,3
AlSi7Mg0.3	570,5	626,6	560,6	66
AlSi9Mg0.2	575,8	601,9	572,0	29,9
AlSi9Mg0.3	575,3	601,4	569,6	31,8
AlSi9Mg0.5	574,2	600,6	564,7	35,9

Katılaşma analizlerinin sayısal sonuçları incelendiğinde, alaşımların silisyum ve magnezyum miktarında meydana gelen değişimlerin ötektik dönüşüm sıcaklığını etkilemediği söylenebilir. Buna karşın, dökümde önemli olan parametrelerden katılaşma aralığını önemli ölçüde değiştirdiği açıkça görülmektedir. Katılaşma aralığı, katılaşma prosesinin başladığı likidüs sıcaklık değerinden katılaşmanın tamamlandığı sıcaklık değerinin çıkarılması ile elde edilmektedir. Katılaşma aralığı dar olan alaşımlarda döküm yapısında mikrosegregasyon oluşma eğilimi daha düşüktür. Mikrosegregasyon, alaşımların katılaşması esnasında bileşim farklılıklarının ortaya çıkışının bir diğer sonucudur ve katılaşan taneler içinde çekirdekten dışarı doğru derişikliğinin değişmesidir (Lumley, 2012). Şekil 1.1’de Al-Si ikili denge faz diyagramı

yer almaktadır (Liao, 2006). Diyagramda gösterildiği gibi alaşım kompozisyonunda ötektik bileşime yaklaşıldıkça, katılaşma aralığı azalmaktadır. Ötektik noktada ise bu değer sıfıra erişmektedir (Lumley, 2012). Doktora tez çalışmasında kullanılan alaşımlar incelendiğinde, katılaşma aralığı en düşük olan alaşım grubu AlSi9'dur. Si3 alaşımından Si9 alaşımına doğru, silisyum miktarının artmasıyla katılaşma aralığı değeri 75,5'ten, ortalama 32,5 değerine düşmektedir. Bu durumda, silisyum miktarının artmasıyla alaşımlarda dökümde mikroyapıda mikrosegregasyon (tabakalı katılaşma yapısı) eğiliminin ve alaşım özelliklerinde istenmeyen değişimlere neden olan bu olumsuzluğun azaldığını söylemek mümkündür.

Katı çözeltilerin tabakalı olarak katılaşması sonrasında, mikrosegregasyonun malzeme özelliklerindeki olumsuz etkilerini gidermek için solidüs sıcaklığının hemen altında bir homojenleştirme tavı uygulanabilir. Tutma süresi çok uzun olan bu ısıtma işlemi, endüstriyel koşullarda ekonomik sebeplerle ancak çok zorunlu hallerde uygulanmaktadır (Cantor, 2003).

4.2 Alçak Basıncılı Döküm Simülasyonlarının Sonuçları ve Değerlendirme

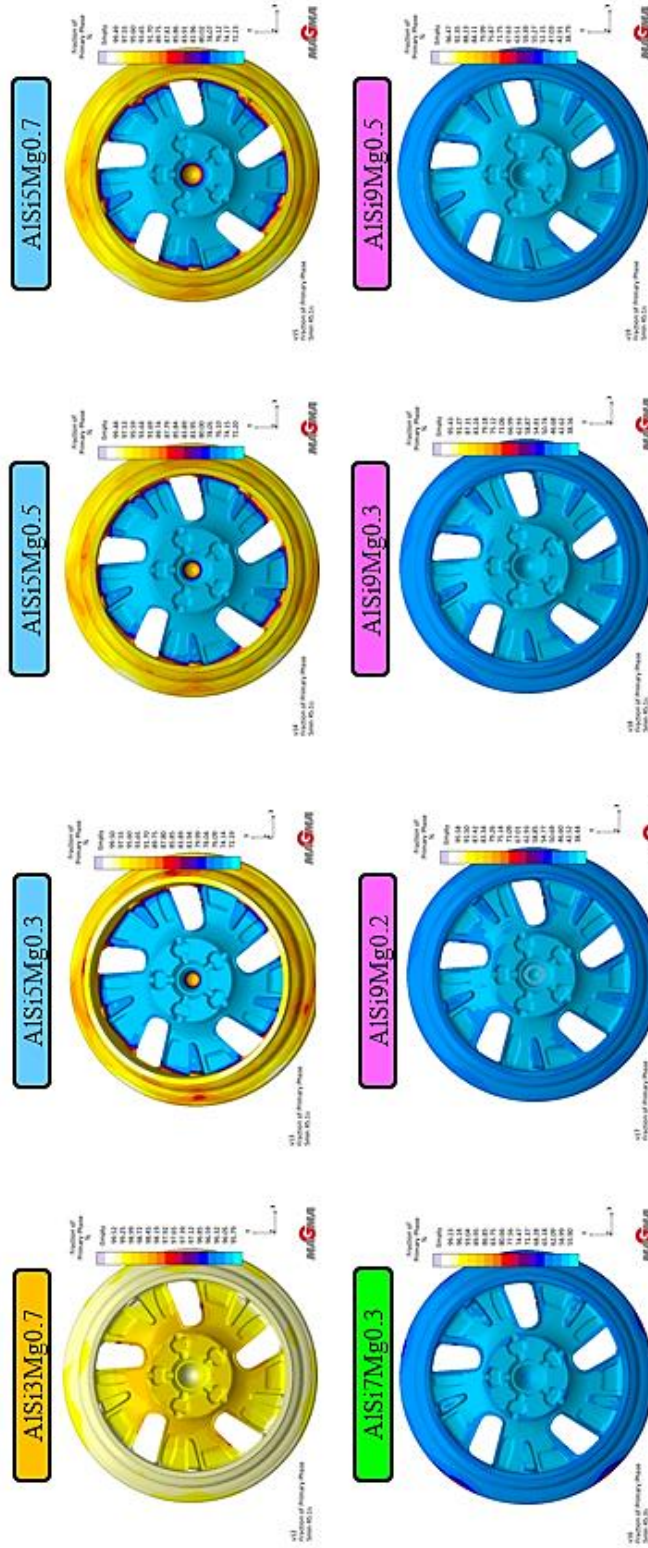
4.2.1 Faz Analizleri

Malzemelerde mikroyapının kontrol altında tutulması mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Doktora tez çalışmasında Magmasoft yazılımı ile alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklere etkiyen mikroyapıdaki olası fazların (α -Al, ötektik Si, Mg_2Si ve AlFeSi bileşikler) döküm öncesi tayini gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla α -Al, ötektik Si, Mg_2Si ve AlFeSi bileşiklerine ait faz dağılımlarının sonuçları, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de detaylı olarak verilmektedir. Analizlere ait sayısallaştırılmış sonuçlar ise Tablo 4.3'te detaylı olarak verilmektedir. Buna göre, α -Al fazının janttaki dağılıma baktığımızda, silisyum miktarı arttıkça alaşımlardaki gerek göbek gerek jant kolu gerekse flanş bölgelerinde α -Al fazının miktarının azaldığını söylemek mümkündür. Bu durum silisyum miktarının artmasıyla ötektik bileşime yaklaşıldığından ve katılaşma aralığı daraldığından, son derece normaldir ve beklenen sonuçtur. AlSi3Mg0.7 alaşımında

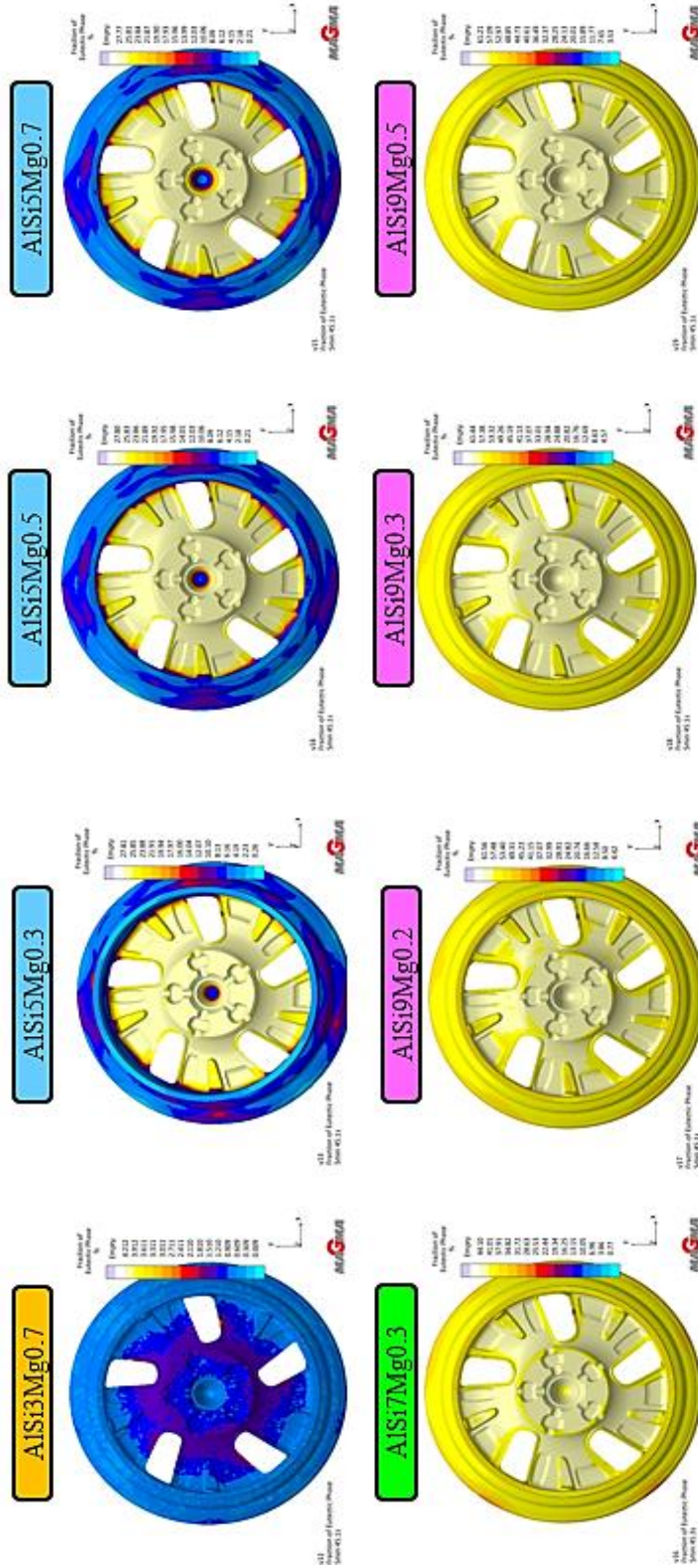
göbek bölgesinde yaklaşık %99 oranında α -Al fazı görülürken, bu oran AlSi9Mg0.5 alaşımında göbek bölgesinde %45 civarına gerilemektedir. Jant kolu ve flanş bölgeleri için de α -Al fazı için benzer eğilim söz konusudur. Ötektik fazın oranı ise, α -Al fazına ters olarak alaşımdaki silisyum miktarının artmasıyla artmaktadır. Bu durum yine beklenildiği gibidir ve literatür verileri ile örtüşmektedir. AlSi3Mg0.7 alaşımında göbek bölgesinde yaklaşık %1 oranında ötektik faz görülürken, bu oran AlSi9Mg0.5 alaşımında göbek bölgesinde %60 civarına artmaktadır. Alaşımlar henüz ısıtıl işlem görmedikleri için Mg₂Si fazının jantın göbek, jant kolu ya da flanş bölgelerinde sıfıra yakın değerlerde seyretmesi sonucu beklenen bir neticedir. Mg₂Si fazının oranı jantın tüm bölgelerinde %0 ile 0,5 arasında değişmektedir. Alüminyum alaşımlarında demir istenmeyen element konumundadır (Fortini ve diğer., 2016). Bu sebeple mikroyapıda demir bileşiklerinin bulunması ve bunların iğnemsiz yapıda morfolojilerde oluşması, mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir (Wu ve diğer., 2019). Döküm simülasyon sonuçlarına bakıldığında, mikroyapıda demirin alüminyum ve silisyumla oluşturduğu zararlı bileşiklerin miktarı ve önemsiz derecededir. Jantın tüm bölgelerinde, AlFeSi intermetalik fazlarının miktarı %0 ile 0,4 arasında değişiklik göstermektedir. Bu değerler, alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum-silisyum esaslı alaşımlı jant üretimi için kabul edilebilir değerlerdir.

Tablo 4.3 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna bağlı olarak jant bölgelerindeki fazların dağılımı

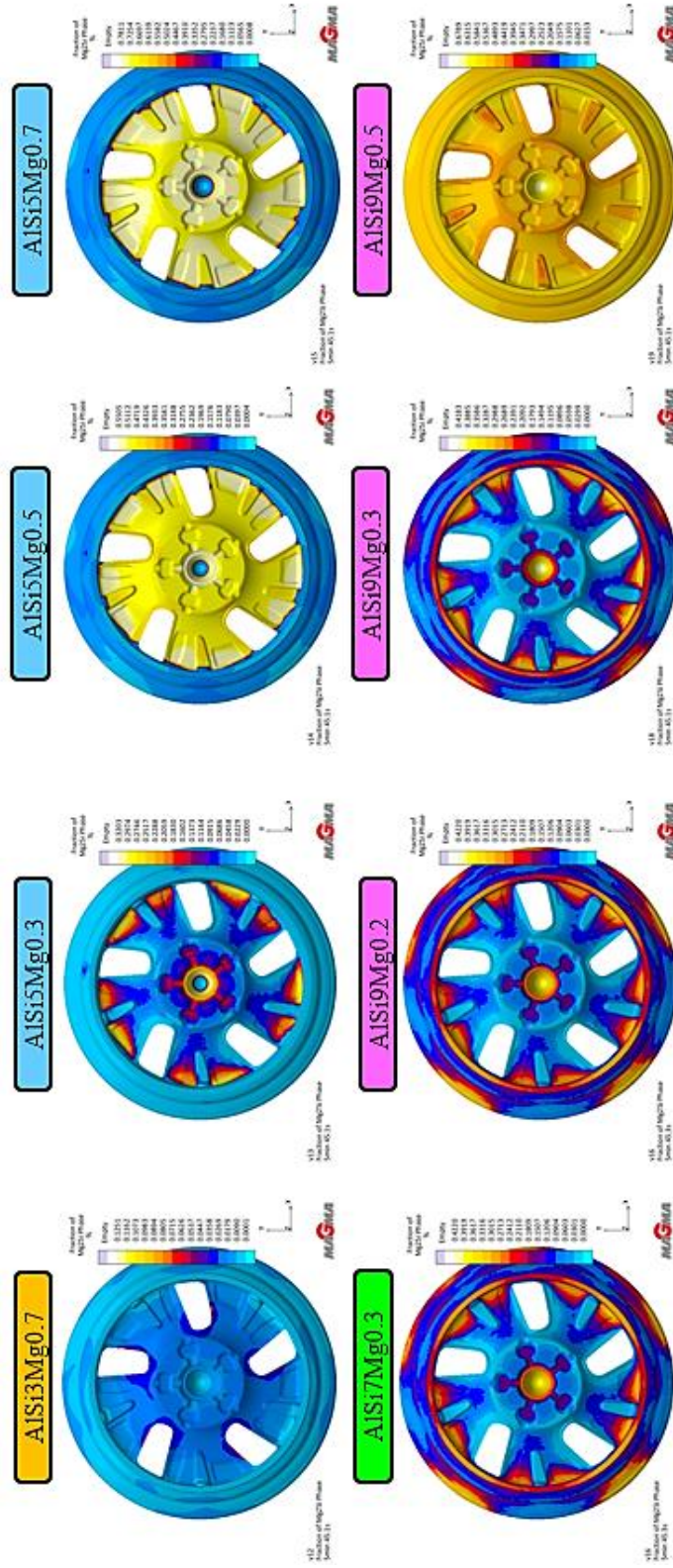
Alaşım	α -Al (%)						Örektik Silisyum (%)						Mg ₂ Si (%)						AlFeSi bileşikleri (%)					
	Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
AlSi3Mg0.7	98,45	99,25	96,85	99,25	98,99	99,52	0,30	1,5	0,30	3,6	0,3	0,5	0	0,01	0	0,08	0	0,01	0	0,02	0	0,05	0	0,02
AlSi5Mg0.3	72,19	95,60	72,19	95,60	85,85	99,50	6,16	27,81	6,16	27,81	0,26	16	0	0,18	0	0,29	0	0,02	0	0,3	0,3	0,38	0,02	0,1
AlSi5Mg0.5	72,2	95,59	72,2	95,59	87,79	99,48	6,12	27,80	6,12	27,80	0,21	15,98	0	0,4	0,4	0,5	0	0,03	0	0,3	0,3	0,8	0,02	0,1
AlSi5Mg0.7	72,23	95,60	72,23	95,60	85,86	99,49	6,12	27,77	6,12	27,77	0,21	15,96	0	0,39	0,6	0,78	0	0,05	0	0,3	0,3	0,35	0,02	0,1
AlSi7Mg0.3	55,90	68,28	55,90	68,28	55,90	68,28	37,91	44,10	10,05	44,10	28,63	44,10	0	0,36	0	0,36	0	0,36	0,34	0,45	0,1	0,45	0,41	0,45
AlSi9Mg0.2	42,52	54,77	42,52	54,77	42,52	54,77	57,48	61,56	57,48	61,56	49,31	57,48	0	0,17	0	0	0	0	0,3	0,41	0,3	0,41	0,3	0,41
AlSi9Mg0.3	38,56	54,81	38,56	54,81	38,56	54,81	57,38	61,44	57,38	61,44	49,26	57,38	0	0,23	0	0,23	0	0,23	0,4	0,48	0,4	0,48	0,4	0,48
AlSi9Mg0.5	38,79	55,27	38,79	55,27	38,79	55,27	57,09	61,21	57,09	61,21	52,97	61,21	0,39	0,58	0,39	0,58	0,39	0,58	0,27	0,39	0,27	0,39	0,27	0,39



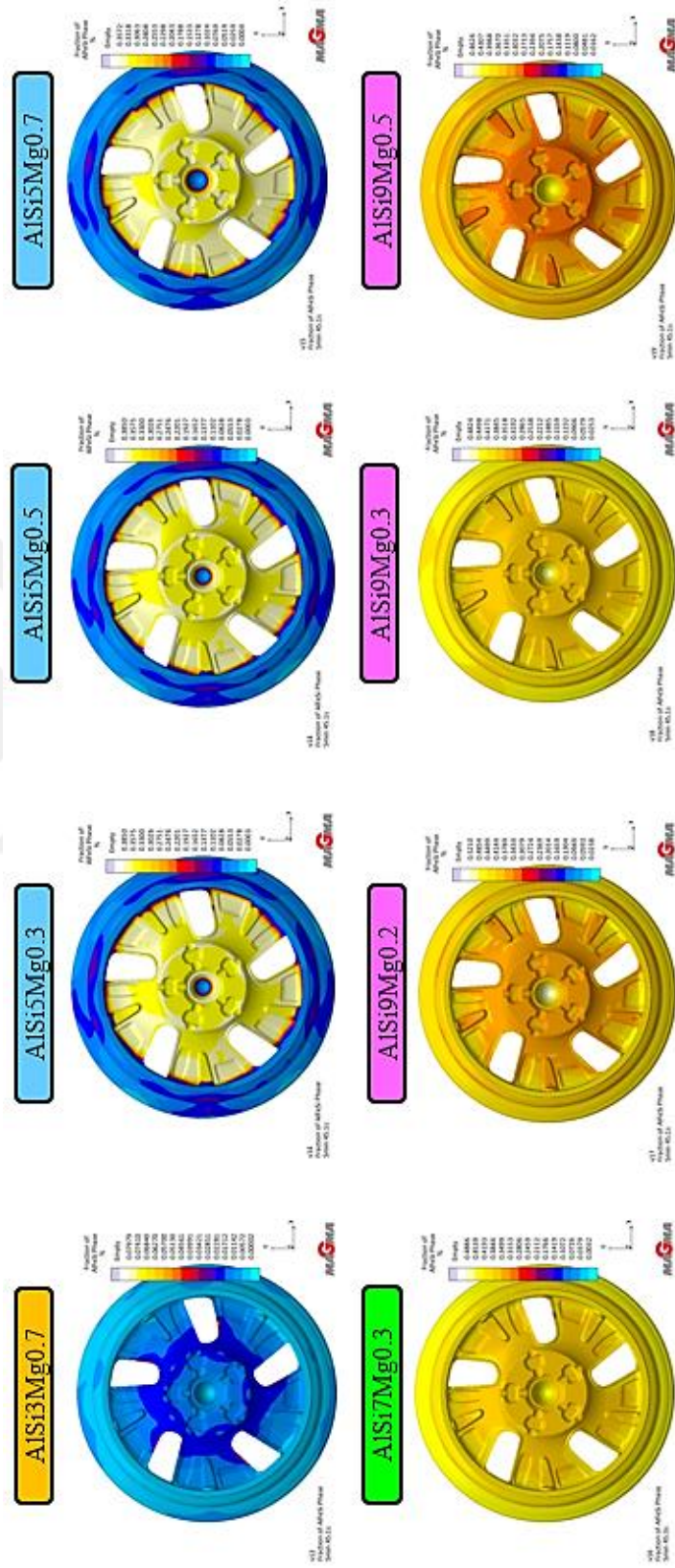
Şekil 4.4 Birincil α -Al fazının janttaki dağılımın modellenmesi



Şekil 4.5 Öteklik fazın janttaki dağılımın modellenmesi



Şekil 4.6 Mg_2Si fazının janttaki dağılımın modellenmesi



Şekil 4.7 AlFeSi intermetaliklerine ait fazların janttaki dağılımın modellenmesi

4.2.2 Makro ve Mikro Porozitelerin Analizleri

Magmasoft yazılımı kullanılarak jant üzerinde makro ve mikro porozitelerin dağılımları ve miktarları belirlenmiştir. Sonuçlar sırasıyla, Şekil 4.8 ve 4.9’da alaşım kompozisyonuna bağlı olarak jant bölgelerine göre verilmektedir. Buna göre, tüm alaşımlarda jantların göbek ve jant kolu bölgesinde herhangi bir makro porozite oluşumuna rastlanmamıştır. Öte yandan jantın flanş bölgelerinde tüm alaşımlarda makro porozite görülme olasılığı %0 ila %7 arasındadır. Makro porozitelerin flanş bölgesinde konum olarak dağılımına bakıldığında (mavi ile renklendirilmiş bölgeler), AlSi7Mg0.3 alaşımı ile benzer olduğu da görülmektedir. Bölgesel olarak detaylandırılmış, makro ve mikro poroziteye ait sayısal sonuçlar Tablo 4.4’te verilmektedir.

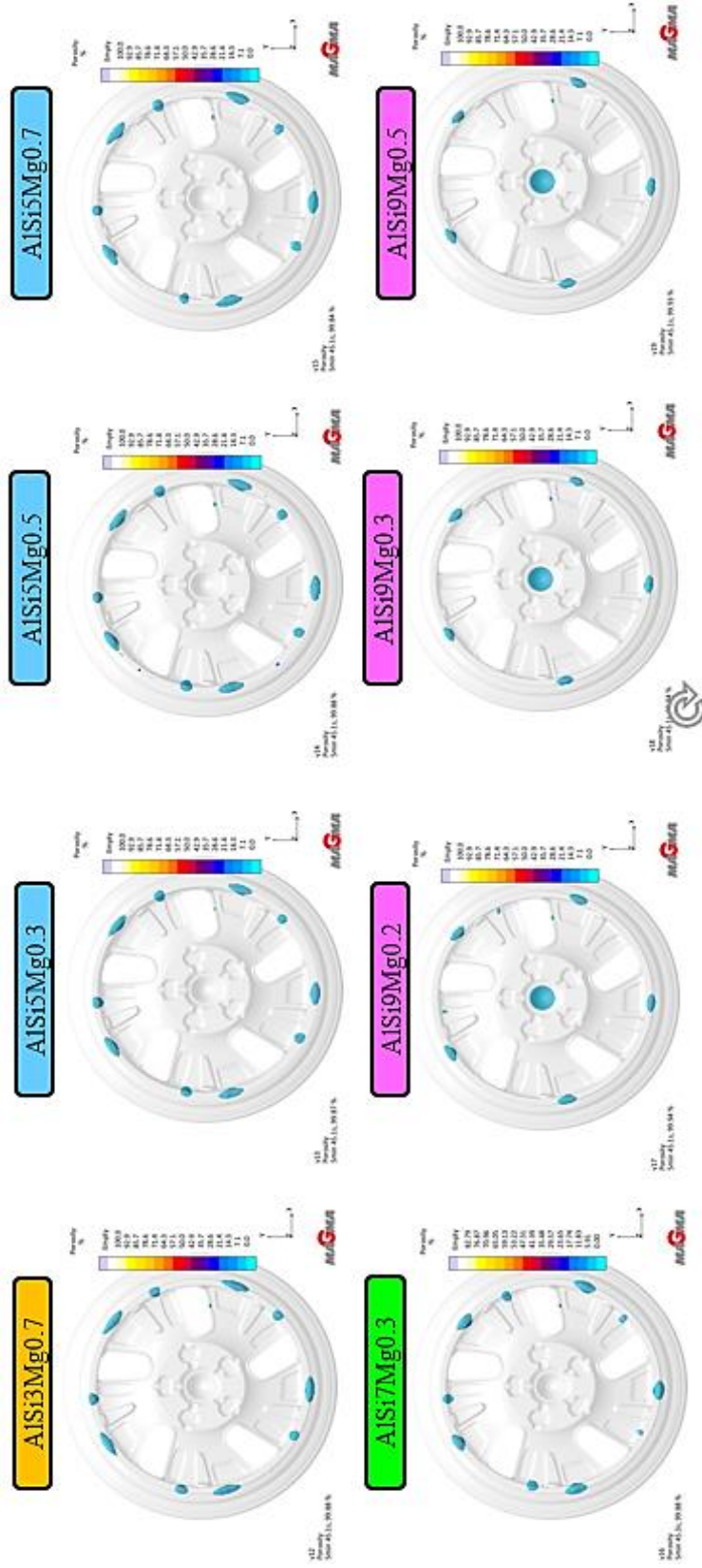
Tablo 4.4 Makro ve mikro porozitelerin jant bölgelerine göre bulunma olasılıkları

Alaşım	Makro porozite bulunma olasılığı (%)						Mikro porozite bulunma olasılığı (%)					
	Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Si3Mg0.7	0	0	0	0	0	7	2.6	3.1	0	0	2.6	3.1
Si5Mg0.3	0	0	0	0	0	7	0	0	2.8	3.3	2.8	3.3
Si5Mg0.5	0	0	0	0	0	7	0	0	2.8	3.3	2.8	3.3
Si5Mg0.7	0	0	0	0	0	7	0	0	2.9	3.4	2.9	3.4
Si7Mg0.3	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2.6	3.1
Si9Mg0.2	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2.6	3.1
Si9Mg0.3	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2.6	3.1
Si9Mg0.5	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2.6	3.1

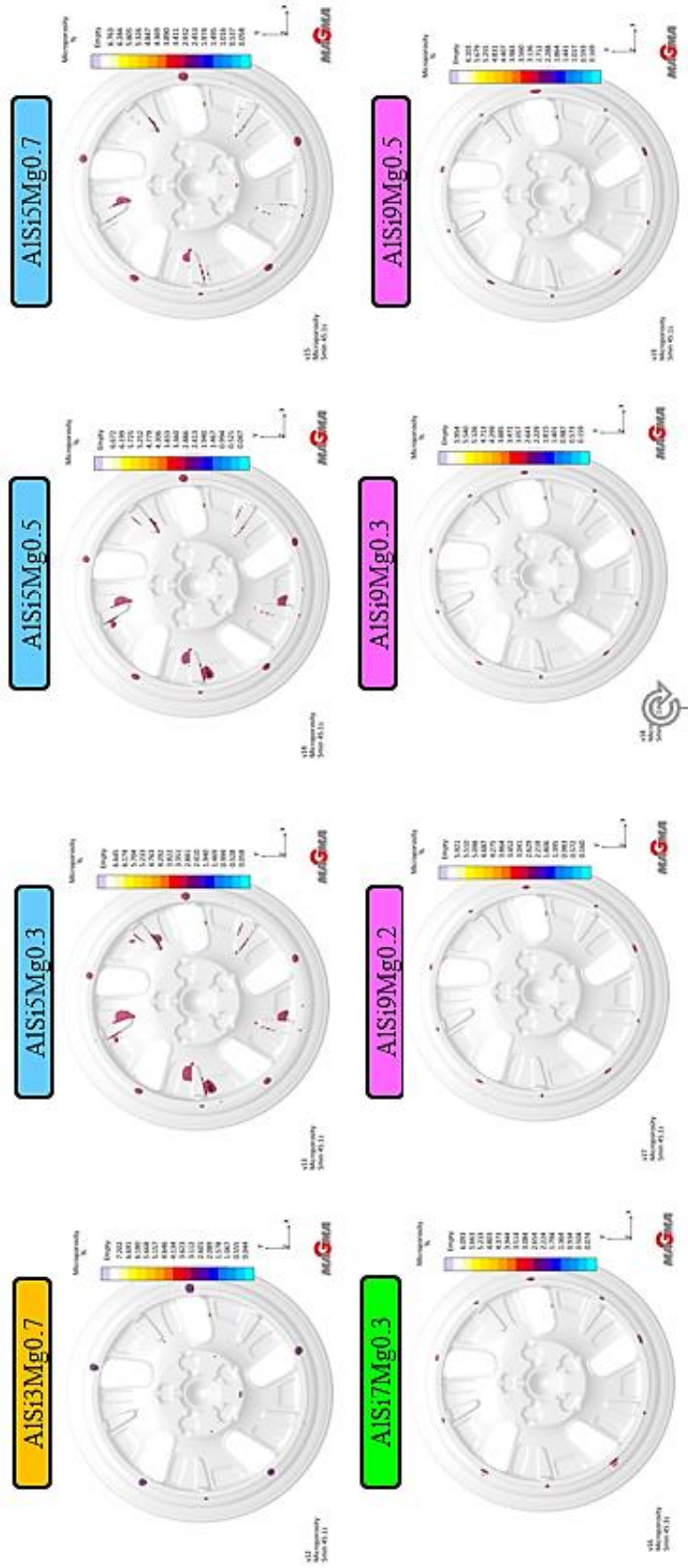
Şekil 4.9’da ise jant üzerindeki mikro porozitelerin dağılımı ve bulunma olasılıklarının simülasyon sonuçları yer almaktadır. Buna göre, sonuçlar makro

porozite sonuçları ile benzer karakterdedir. Kırmızı renk ile işaretli bölgeler, jant üzerine hangi konumlarda mikro porozite oluşum olasılığını göstermektedir. Buna durumda, AlSi5, AlSi7 ve AlSi9 alaşımlarında sanal döküm analizi sonuçlarına göre göbek bölgelerinde mikro porozite bulunma olasılığı yoktur. AlSi3Mg0.7 alaşımında ise bu olasılık minimum %2,6 maksimum %3,1'dir. Öte yandan AlSi3, AlSi7 ve AlSi9 alaşımlarında jant kolunda mikro porozite görülme olasılığı yok iken, AlSi5 alaşımında bu değer yaklaşık %3 civarındadır. Tüm alaşımlarda flanş bölgesinde mikro porozite oluşma olasılığı mevcuttur, fakat çok küçük değerlerdir.





Şekil 4.8 Jant modeli üzerinde alaşım kompozisyonuna bağlı olarak makro porozitelerin dağılımı



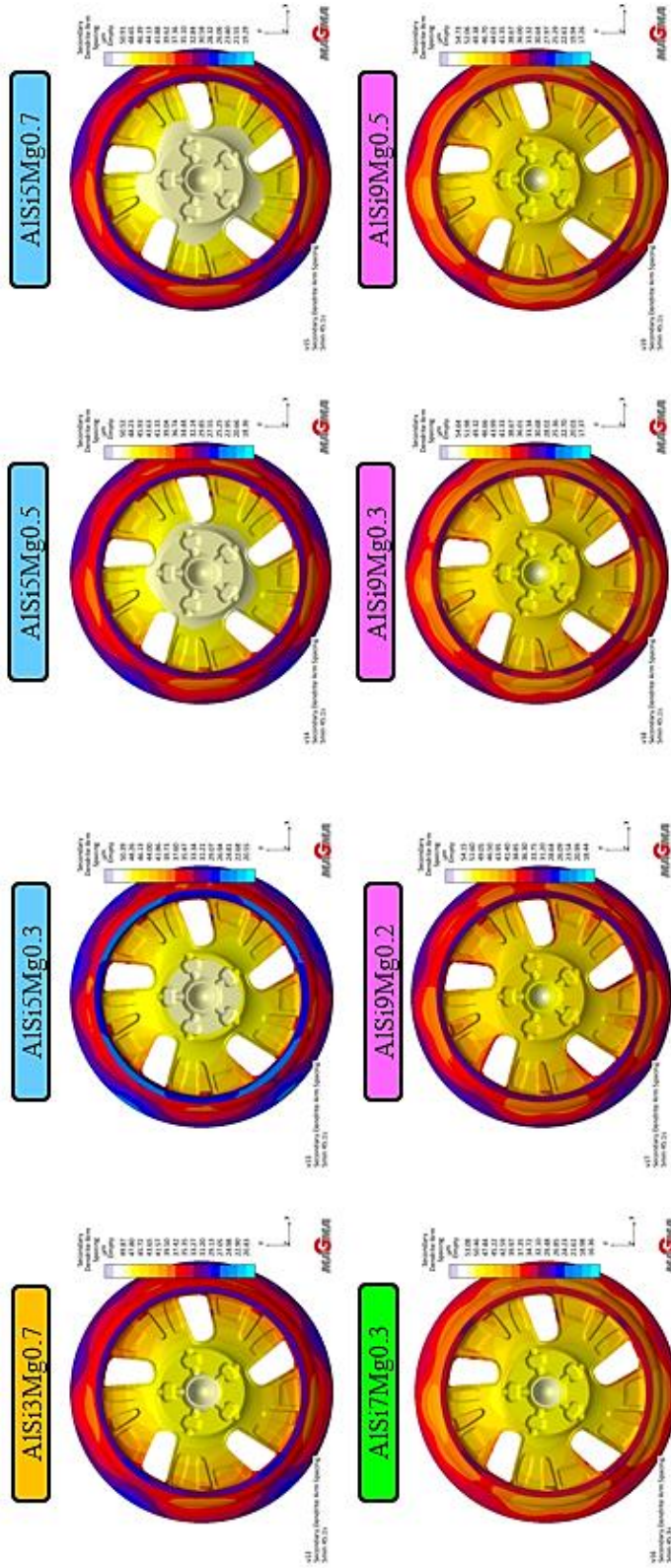
Şekil 4.9 Jant modeli üzerinde alaşım kompozisyonuna bağlı olarak mikro porozitelerin dağılımı

4.2.3 İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe Analiz Verileri

Alüminyum döküm alaşımlarında mikroyapıyı ve dolayısıyla özellikleri etkileyen bir diğer etmen ikincil dendrit kolları arası mesafe değeridir. Bu değer küçüldükçe alaşımların sergilemiş oldukları mekanik özelliklerin iyileşmesi beklenir. Doktora tez çalışmasında alaşımlara ait dendrit kolları arası mesafe değerleri optik mikroskop incelemeleri ile ölçülmüş ve sonuçlar raporun ilk kısmında detaylı olarak sebep sonuç ilişkisine dayandırılarak verilmiştir. Magmasoft yazılımı kullanılarak alaşım kompozisyonuna bağlı olarak ikincil dendrit kolları arası mesafe değerinin (*secondary dendrite arm spacing-SDAS*) jant bölgelerine göre olası değerleri Şekil 4.10'da verilmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde, tüm alaşımlar için göbekten flanş bölgesine doğru gidildikçe ikincil dendrit kolları arası mesafe değeri azalmaktadır. Durumun sebepleri ve soğuma hızı, kesit kalınlığı ilişkisi daha evvel detaylıca verildiğinden tekrar açıklanmamıştır. Sonuçlar sayısal olarak Tablo 4.5'te verilmiştir. Örneğin, AlSi3Mg0.7 alaşımının göbek bölgesinde SDAS değeri yaklaşık 47 μm iken, bu değer aynı alaşımlı jantın flanş bölgesinde ortalama 30 μm olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna göre, deneysel sonuçlarla eğilim açısından paralellik söz konusudur.

Tablo 4.5 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna ve jant bölgelerine bağlı ikincil dendrit kolları arası mesafe değerleri (μm)

Alaşım	İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe Değerleri (μm)					
	Göbek		Jant Kolu		Flanş	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
AlSi3Mg0.7	45,72	49,87	39,50	45,72	27,05	37,42
AlSi5Mg0.3	41,86	50,39	37,60	46,13	26,81	35,47
AlSi5Mg0.5	41,33	50,52	36,74	48,23	25,21	36,74
AlSi5Mg0.7	48,65	50,91	37,36	48,65	21,25	35,10
AlSi7Mg0.3	45,22	53,08	37,35	54,22	36,85	37,35
AlSi9Mg0.2	46,50	49,05	38,85	46,50	28,64	38,85
AlSi9Mg0.3	43,99	49,32	38,67	43,99	30,68	38,67
AlSi9Mg0.5	46,70	49,38	38,67	46,70	30,64	38,67



Şekil 4.10 Döküm simülasyonu sonuçlarına göre alaşım kompozisyonuna bağlı olarak ikincil dendrit kolları arası mesafenin değişimi

4.2.4 Mekanik Özelliklerin Analizleri

Alaşımların kompozisyonuna bağlı olarak değişen akma dayanımı, çekme dayanımı, uzama miktarı ve sertlik gibi mekanik özellikler döküm simülasyonları ile elde edilen önemli özelliklerdir. Bu özellikler, laboratuvar ölçekli olarak da çekme testleri ve sertlik ölçümleri ile elde edilebildiğinden, sanal ve deneysel veriler karşılaştırılıp, hesaplamalı malzeme mühendisliği ve döküm simülasyonlarının (bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımı) alüminyum alaşımları için verimliliği ve kullanılabilirliği açısından yorum yapmak mümkündür. Akma dayanım değerleri analiz edilirken, ilk olarak mevcut üretim koşullarında endüstriyel standartlarda bir jantta bölgelere göre olması gereken akma dayanım değerlerinden bahsetmek doğru olacaktır. Jant üzerinden jant kolu, iç ve dış flanşlar olmak üzere 3 farklı bölgeden çekme testi gerçekleştirilmektedir. Otomotiv standartlarına göre, jant kolu, iç ve dış flanş bölgelerinde ısıtılma işlemi uygulanmamış bir jantta olması gereken minimum akma dayanımı değeri 80MPa'dır. Magmasoft analiz sonuçları incelendiğinde (Tablo 4.6), AlSi5Mg0.3 alaşımı hariç tüm alaşımlarda, jantın tüm bölgelerinde bu değer üstüne çıktığı açıkça görülmektedir. AlSi5Mg0.3 alaşımında ise bu akma dayanımı değerinin göbek bölgesinde yaklaşık 75 MPa, jant kolu bölgesinde 76 MPa ve flanş bölgesinde 78 MPa olduğu ve döküm prosesinin her aşamasının kontrol altında tutulması zor bir süreç olduğu düşünüldüğünde, bu alaşımların da standart değeri yakaladığını söylemek pek tabii mümkün olacaktır. Şekil 4.11'de Magmasoft analizinin renk skalası ile verilen akma dayanımı verileri yer almaktadır.

Öte yandan alaşımlara ait çekme testi sonuçlarından akma dayanımı değerleri Şekil 4.14'te verilmektedir. Buna göre Tablo 4.12'de yer alan veriler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, döküm simülasyonlarından elde edilen değerler ile gerçek çekme testi sonuçları değerleri benzerlik göstermektedir. Örneğin, en yüksek akma dayanımı değerleri gerçek testlerde de simülasyon sonuçlarında da, içermiş olduğu alaşım elementi miktarı en yüksek alaşım olan AlSi9Mg0.5'te kaydedilmiştir. Gerçek çekme testlerinde jant kolu bölgesinde akma dayanımı değeri 106,44 MPa iken, Magmasoft döküm simülasyonu ile elde edilen sanal verilerde bu değer yaklaşık 116 MPa'dır. Söz konusu analizde hata payı değeri döküm gibi dinamik bir süreç göz önüne alındığında

yaklaşık %8 gibi kabul edilebilir bir değerdir. Benzer şekilde, AlSi5Mg0.7 alaşımında flanş bölgesinde gerçek çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı değeri yaklaşık 100 MPa iken, sanal sonuç aynı alaşım için ~111MPa'dır. Bu durumda yine hata payı oranı döküm prosesi gibi dinamik bir proses göz önüne alındığında son derece düşüktür.

Alaşımlar kendi içlerinde artan Mg oranına bakılarak değerlendirildiğinde ise, magnezyum elementinin mekanik özellikler üzerindeki iyileştirici etkisi açıkça göze çarpmaktadır. Örneğin, AlSi9Mg0.2 alaşımında flanş bölgesinde kaydedilen minimum akma dayanımı değeri ~91 MPa iken, AlSi9Mg0.5 alaşımında aynı bölgede elde edilen değer ~118 MPa'dır. Benzer şekilde, AlSi5Mg0.3 alaşımının jant kolu bölgesinde elde edilen akma dayanımı değeri ~76 MPa iken, AlSi5Mg0.7 alaşımında aynı bölgede bu değer ~110 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 4.12'de ise Magmasoft döküm simülasyonu ile elde edilen çekme dayanımı değerleri jant üzerinde renk skalası ile verilmektedir. Sayısal sonuçlar ise Tablo 4.6'da yer almaktadır. Çekme dayanımı değerleri de alaşımların kendi içerisinde, akma dayanım değerlerinin eğilimi ile benzerlik göstermektedir. Sanal simülasyon sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımı değerini AlSi9Mg0.5 alaşımı flanş bölgesinde 206 MPa ile sergilemektedir. Simülasyon ile elde edilen uzama miktarı değerlerine bakıldığında, alaşımların kendi içinde göbek bölgesinden flanş bölgelerine doğru artış olduğu sonucuna varmak mümkündür. Uzama miktarlarının gerçek çekme testi sonucunda alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişimleri ise Şekil 4.17'de verilmektedir. Uzama miktarlarına bakıldığında sanal sonuçlarda, değerler %3 ile %7 arasında değişirken, gerçek sonuçlar %2,45 ile %15,18 arasında değişiklik göstermektedir. Bu durumda, sanal veriler ve gerçek verilerin yüzde uzama miktarı açısından karşılaştırılması doğru olmayacaktır. Bunun sebebi, Magmasoft yazılımının uzama miktarı ile hesaplama yapabilen teorisinin yüksek sapma değeri ile çalışmasıdır. Bu bağlamda mekanik özelliklerin, akma ve çekme dayanımı ile sertlik değerlerinin sanal ve gerçek verilerinin karşılaştırmasının yapılması doğru olacaktır.

Magmasoft yazılımı jant üzerinde sertlik değerlerini görsel olarak vermemektedir. Bu durumda, çekme dayanımı ve sertlik ilişkisinden yola çıkılarak, jantın bölgelerine göre farklı alaşımlar için sertlik değerlerinin tayini yapılabilir. Çekme dayanımı ve Brinell sertliği arasındaki ilişki (4.1) numaralı denklemde verilmektedir. Bu denklemde, UTS maksimum çekme dayanımı değerini, HB ise Brinell sertlik değerini temsil etmektedir.

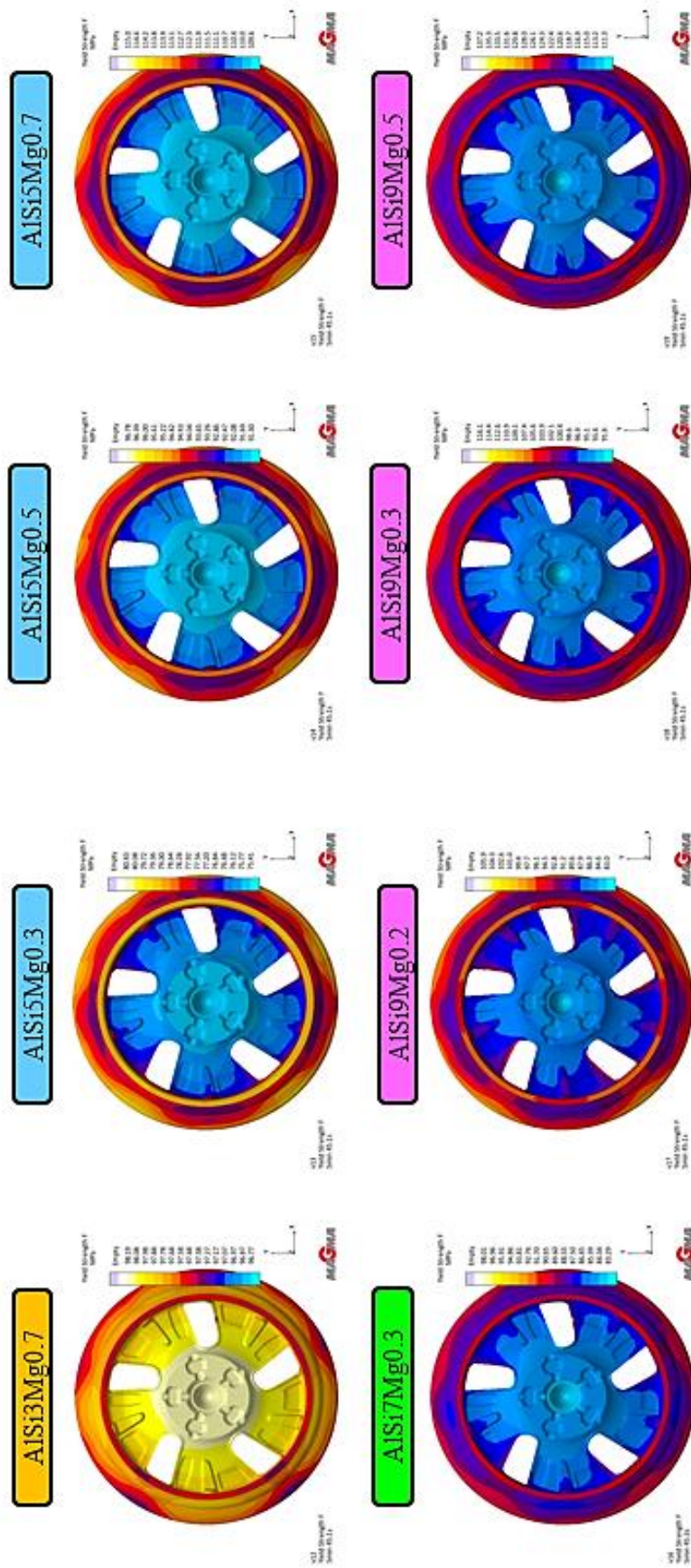
$$UTS \text{ (MPa)}=3,45 \times HB \quad (4.1)$$

Eşitliğe göre hesaplanan sertlik değerleri Tablo 4.6’da verilmektedir. Hesaplanan sertlik değerleri, mukavemet değerleri ile benzer eğilim göstermekte olup, alaşım kompozisyonuna bakılmaksızın, jantta soğumanın en yavaş olduğu göbek bölgesinde daha kaba taneli mikroyapıdan ötürü düşük sertlik değerleri elde edilirken, daha ince kesitlere sahip soğumanın daha hızlı olduğu flanş bölgelerinde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Örneğin, AlSi3Mg0.7 alaşımında jantın göbek bölgesinde, çekme mukavemeti ile Brinell sertliği arasındaki ilişkiden yola çıkılarak kaydedilen sertlik değeri yaklaşık 47 HB iken, aynı jantın flanş bölgesinde hesaplanan değer yaklaşık 51 HB’dir.

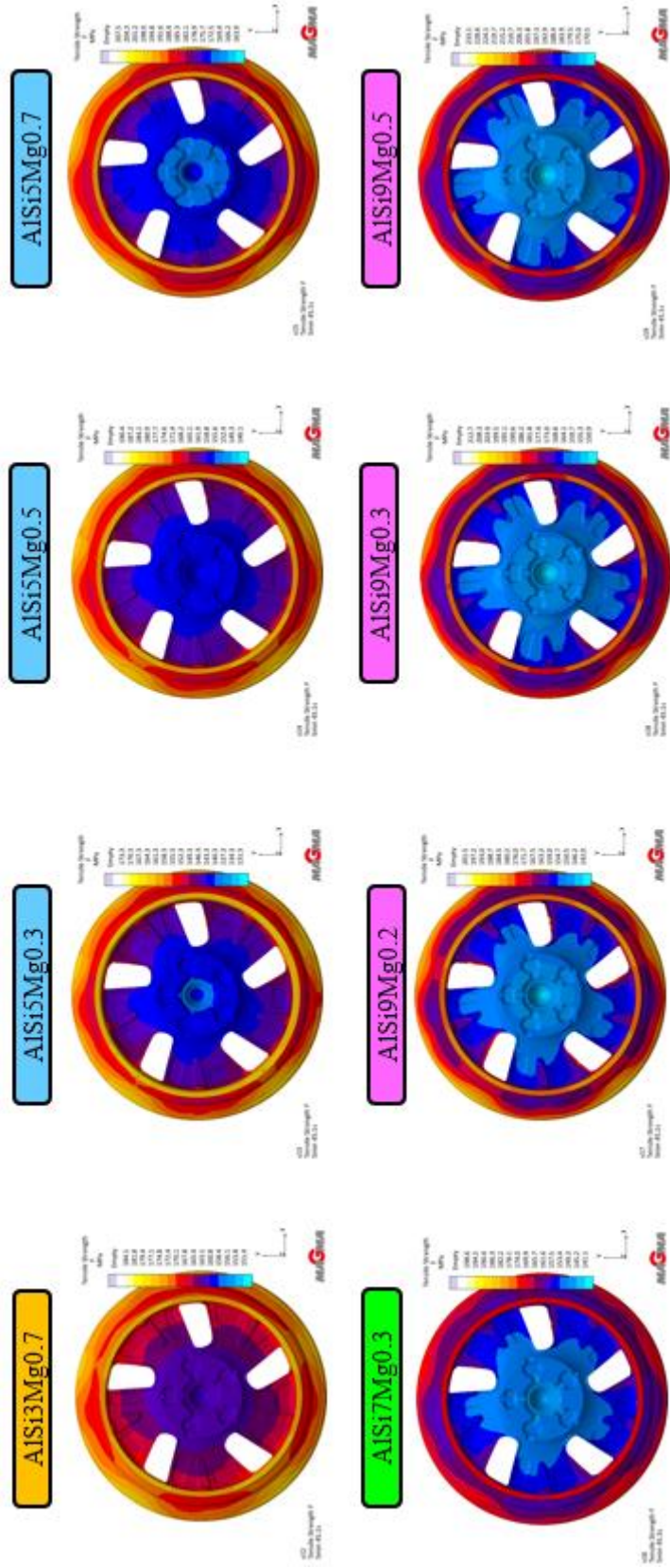
Bir diğer açıdan, alaşım kompozisyonlarına göre sertlik sonuçları incelendiğinde, AlSi3Mg0.7 alaşımından AlSi9Mg0.5 alaşımına doğru gidildikçe, artan alaşım elementi miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde genellikle artma gözlemlenmiştir. Örneğin, AlSi5Mg0.3 alaşımında jant kolunda yaklaşık 43 HB sertlik değeri elde edilirken, AlSi9Mg0.3 alaşımında aynı bölgede yaklaşık 50 HB sertliğe ulaşılmıştır. Alaşımlarda, silisyum miktarı arttıkça sertlikte kaydedilen artma, literatür verileri ile paralellik göstermektedir. Alaşımların tamamında, döküm haldeki silisyumun morfolojisinin iğnemsî yapıdan fibröz lifli yapıya dönüşümü ve mekanik özelliklerin iyileşmesi için AlSr10 master alaşımı ile kimyasal ötektik modifikasyon işlemi uygulanmıştır (Lumley, 2011). Silisyum miktarı arttıkça yapıdaki modifiye edilmiş ötektik fazın miktarı da arttığından, mekanik özelliklerde beklenen iyileşme söz konusudur (Reddy, 2013).

Alaşımlarda değişen Mg miktarına göre, sanal ortamda elde edilen sertlikler değerlendirildiğinde, aynı silisyum miktarına sahip alaşımlarda artan Mg oranı sertliklerde artışa sebep olmuştur. Örneğin, AlSi9Mg0.2 alaşımında jant kolu bölgesinde 47 HB sertlik görülürken, AlSi9Mg0.5 alaşımında aynı bölgede yaklaşık 56 HB sertlik değeri hesaplanmıştır.





Şekil 4.11 Döküm simülasyonu ile elde edilen ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen jant bölgelerindeki akma dayanımı değerleri



Şekil 4.12 Döküm simülasyonu ile elde edilen ve alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişen jant bölgelerindeki çekme dayanımı değerleri

Tablo 4.6 Döküm simülasyonlarından elde edilen mekanik özelliklere ait sayısal veriler

Alaşım	AKMA DAYANIMI (MPa)						ÇEKME DAYANIMI (MPa)						UZAMA MİKTARI (%)						Sertlik (HB)		
	Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek		Jant Kolu		Flanş		Göbek	Jant Kolu	Flanş
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max			
AlSi3Mg0.7	98,08	98,19	97,78	98,08	97,27	98,08	158,4	160,8	160,8	165,4	170,1	177,1	3	3,2	3,2	3,7	3,9	4,4	46,60	47,94	51,33
AlSi5Mg0.3	75,41	76,12	76,12	76,84	77,56	80,08	131,3	143,3	143,3	149,3	152,3	167,3	5	5,2	5,2	5,9	6,1	7	41,53	43,27	48,49
AlSi5Mg0.5	91,30	91,69	91,69	92,86	93,65	95,22	155,6	158,8	158,8	165,1	171,4	180,9	4	4,3	4,3	4,7	4,9	5,9	46,02	47,85	52,43
AlSi5Mg0.7	109,6	110,4	110,4	111,5	111,9	113,8	166,2	172,5	172,5	182,1	185,3	198	3,1	3,3	3,3	3,7	4,1	4,8	50,00	52,78	57,39
AlSi7Mg0.3	83,29	85,39	85,39	87,50	88,55	90,65	145,2	149,3	149,3	161,6	165,7	174	5	5,3	5,3	5,8	6,1	6,6	43,27	46,84	50,43
AlSi9Mg0.2	83,0	86,3	86,3	89,6	91,2	97,7	146,2	150,5	150,5	163,2	167,5	184,5	5,6	5,9	5,9	6,3	6,3	7,3	43,62	47,30	53,47
AlSi9Mg0.3	91,6	95,1	95,1	96,9	98,6	103,9	150,9	155,3	155,3	173	177,4	195,1	5,2	5,4	5,4	5,9	5,9	7	45,01	50,14	56,55
AlSi9Mg0.5	111,3	115	115	118,7	118,7	124,3	170,5	175	175	192,9	197,3	206,3	4,4	4,7	4,7	5,1	5,1	5,9	50,72	55,91	59,79

4.3 Test ve Karakterizasyon Çalışmalarının Sonuçları ve Değerlendirme

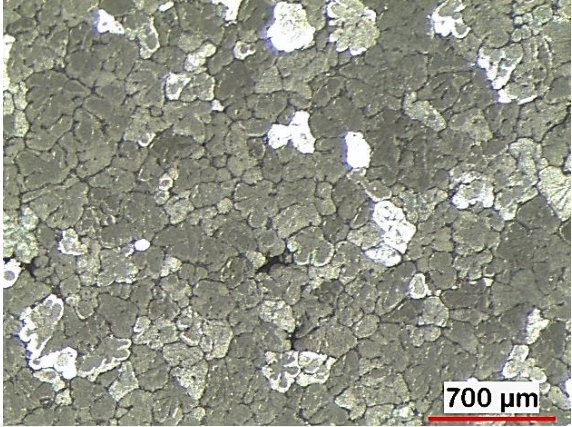
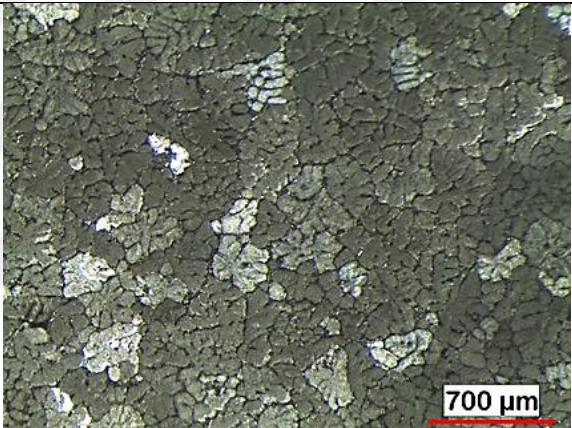
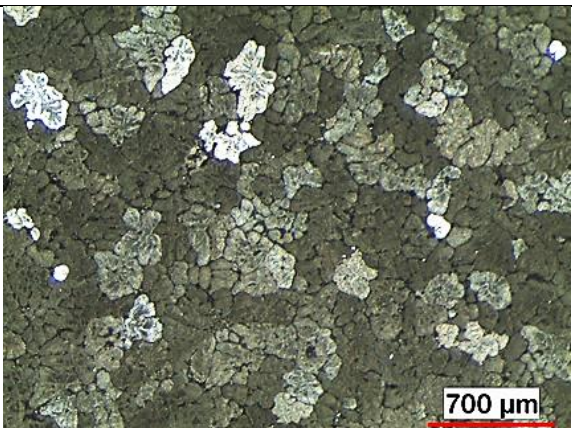
Bu bölümde bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği analizlerinden elde edilen sanal malzeme verileri ile laboratuvar ölçekli gerçekleştirilen test ve karakterizasyon çalışmalarından elde edilen gerçek sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilecektir.

4.3.1 Makro ve Mikroyapısal İncelemeler

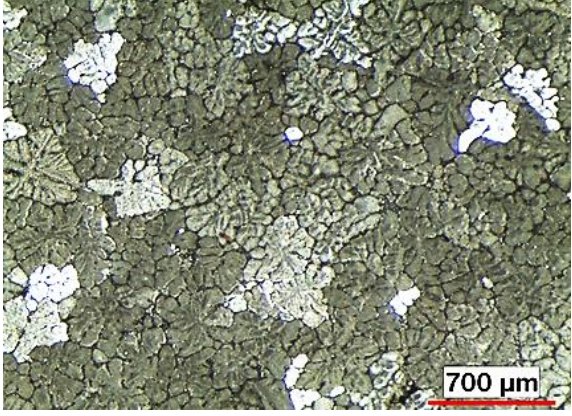
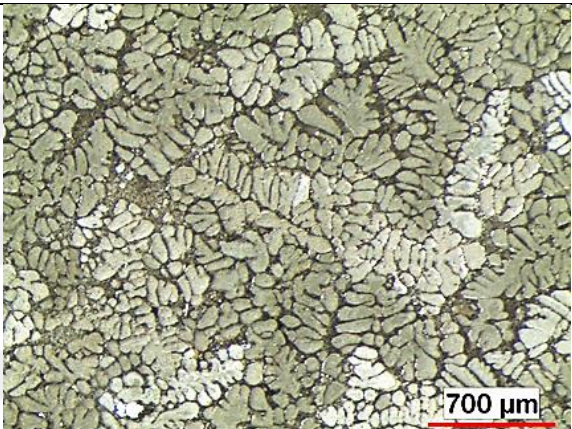
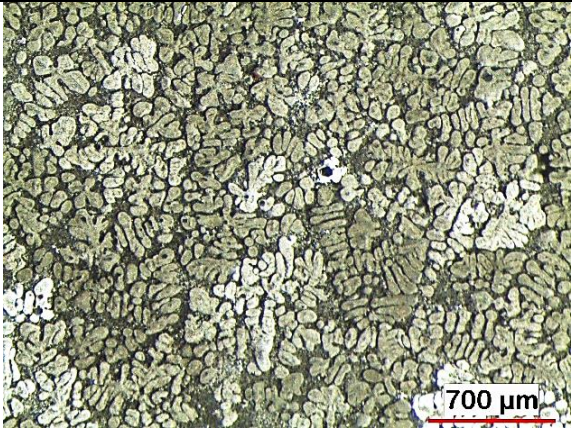
Makro incelemeler, her alaşım kompozisyonuna sahip numune için göbek kısmından stereo mikroskop ile farklı büyütme ölçeklerinde görüntüler kaydedilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.7’de, jantın göbek bölgelerinden alınan numunelere ait stereo mikroskop görüntüleri yer almaktadır.

Pilot ölçekli çalışmalar öncesinde gerçekleştirilen Magmasoft döküm analizi sonuçlarında, makro porozite bulunma olasılığı jantın göbek ve jant kolu bölgelerinde %0 olarak karşımıza çıkmışken, flanş bölgesinde bu olasılık maksimum %7 olarak öngörülmüştü. Laboratuvar ölçekli makroyapısal incelemelerde de sonuçların Magmasoft analizi ile paralellik gösterdiğini söylemek mümkündür. Buna göre, makro yapı incelemelerinde tüm alaşımlara ait numunelerde mikro düzeyde ve kabul edilebilir miktarlarda porozite gibi döküm hataları gözlenirken, herhangi bir makro yapı kusuruna rastlanmamıştır.

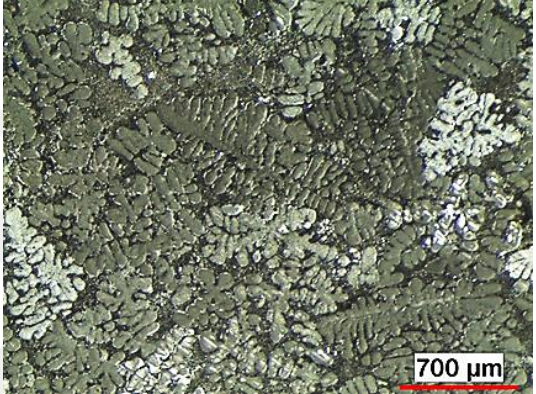
Tablo 4.7 Numunelerin göbek bölgesinden 30x büyütmede alınan stereo mikroskop görüntüleri

Alaşım Adı	Stereo Mikroskop Görüntüsü (30x büyütme)
AlSi3Mg0.7	
AlSi5Mg0.3	
AlSi5Mg0.5	

Tablo 4.7 devamı

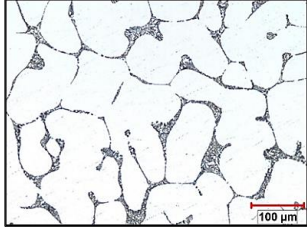
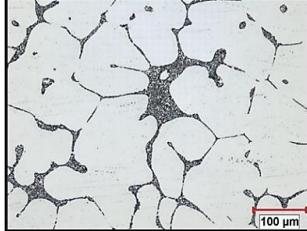
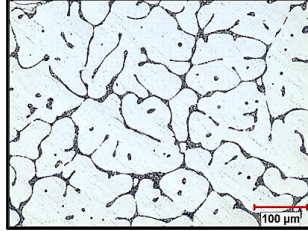
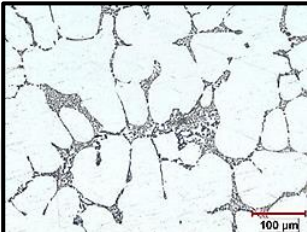
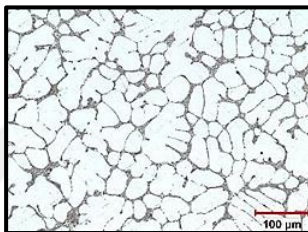
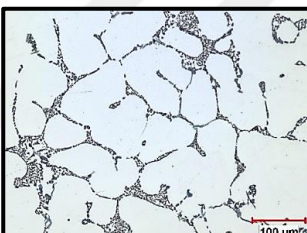
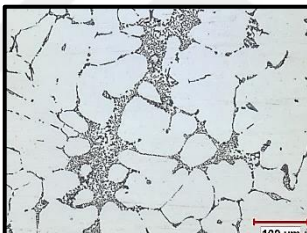
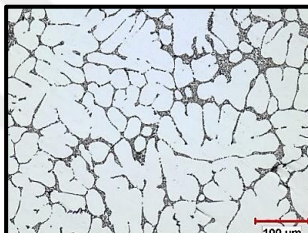
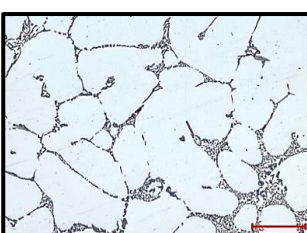
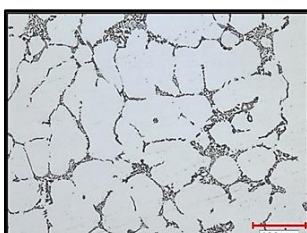
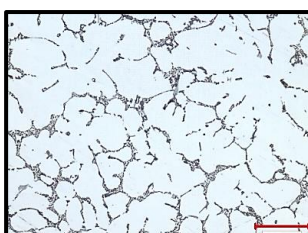
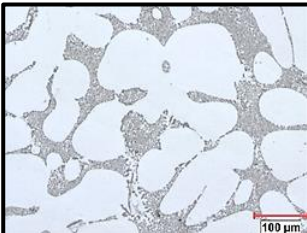
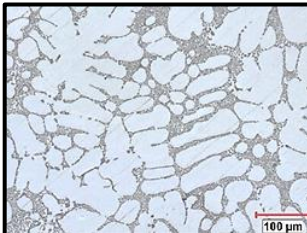
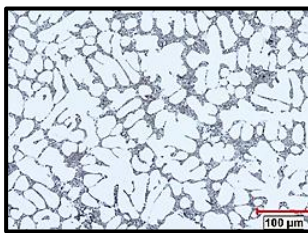
AlSi5Mg0.7	
AlSi7Mg0.3	
AlSi9Mg0.2	

Tablo 4.7 devamı

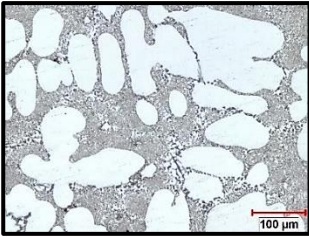
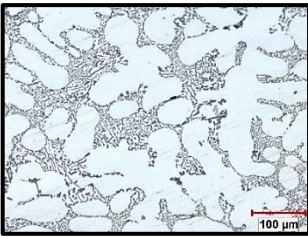
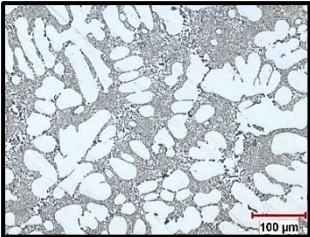
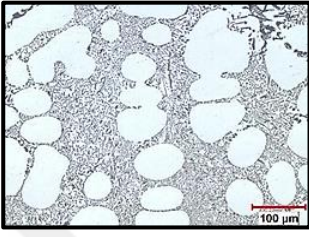
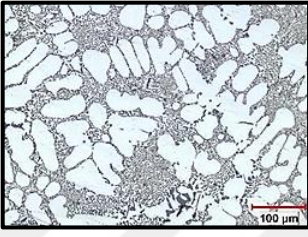
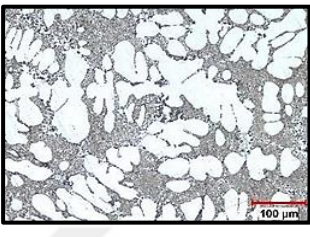
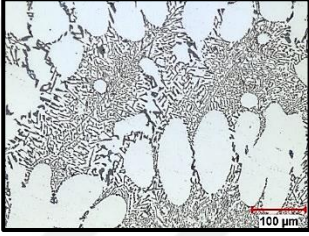
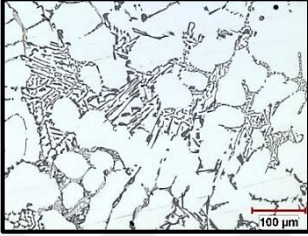
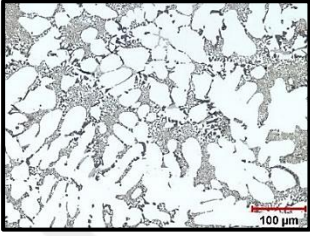
AlSi9Mg0.3	
AlSi9Mg0.5	

Stereo mikroskop ile gerçekleştirilen makroyapısal incelemelerin ardından numuneler, optik mikroskopta yer alan görüntü analiz sistemleri yardımıyla detaylı mikroyapısal incelemelere tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, her bir numunenin göbek, jant kolu ve flanş bölgelerinden mikroyapı görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen görüntüler Tablo 4.8’de karşılaştırmalı olarak bir arada verilmiştir. Bunun yanı sıra, mikroyapısal incelemelerde, göbek bölgesinden faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Faz analizlerinin yapıldığı mikroskop görüntüleri ve elde edilen sonuçlar, Tablo 4.9’da sunulmuştur.

Tablo 4.8 Jantın farklı bölgelerinden 200x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri

Jant Kısımları			
	Göbek	Jant Kolu	Flanş
AlSi3Mg0.7			
AlSi5Mg0.3			
AlSi5Mg0.5			
AlSi5Mg0.7			
AlSi7Mg0.3			

Tablo 4.8 devamı

AlSi9Mg0.2			
AlSi9Mg0.3			
AlSi9Mg0.5			

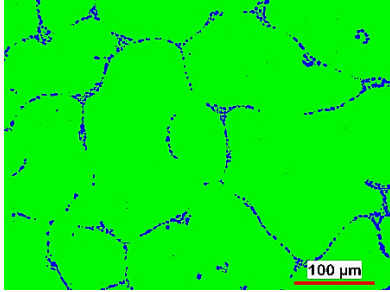
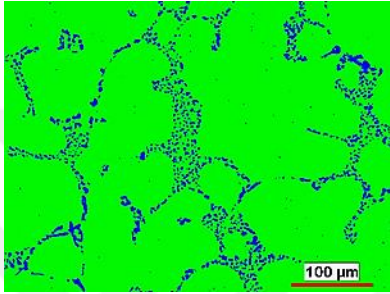
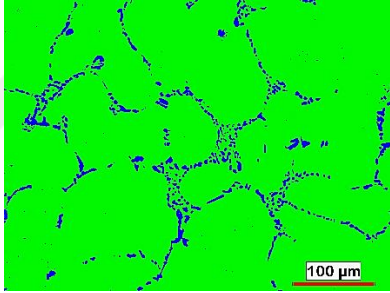
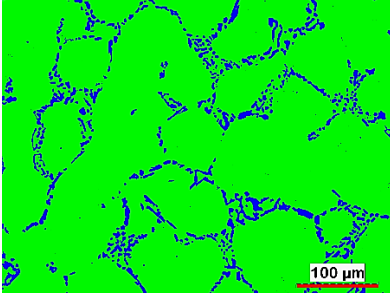
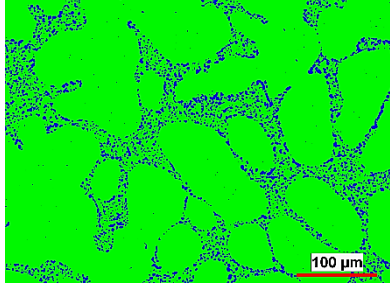
Jantın farklı bölgelerinden 200x büyütmede alınan optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, alaşımların iç yapısının açık gri renkle temsil edilen α -Al ve koyu gri renkle temsil edilen ötektik olmak üzere iki ana fazdan meydana geldiği açıkça görülmektedir. Ötektik faz ise, birincil α -Al dendritlerinin arasına yerleşmiştir. Tüm ötektik altı kompozisyona sahip (Si < ağırlık %12,6) alüminyum silisyum döküm alaşımlarında, mikroyapı bu şekilde oluşmaktadır. Tüm alaşımlar için, jantın göbek bölgesinden flanş kısımlarına doğru mikroyapının incelendiği, ana faz olan α -Al dendritlerinin boyutlarının küçüldüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra, alaşımların silisyum oranı artıkça, ötektik fazın miktarının arttığı, buna karşılık α -Al fazının miktarının azaldığı görülmektedir. Ötektik fazın miktarında meydana gelen artış ya da α -Al fazının miktarında meydana gelen azalış, sayısal olarak da görüntü analiz teknikleri kullanılarak elde edilmiş ve detaylı sonuçlar Tablo 4.9’da verilmiştir. Öte yandan, mikroyapılara bakıldığında, döküm öncesi alaşımlara AlTi5B1 ve AlSr10 master alaşımları kullanılarak sırasıyla uygulanan tane inceltme ve modifikasyon işlemlerinin başarılı olduğu sonucuna da ulaşılmaktadır. Modifikasyon işlemi ile

ötektik fazın morfolojisi iğnemsî yapıdan, fibröz lifli yapıya dönüştürülmüştür (Timpel ve diğer., 2012).

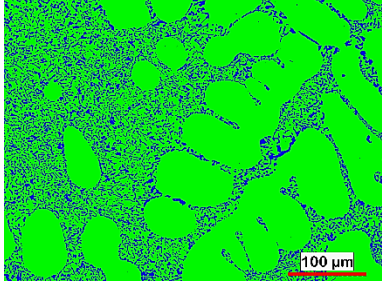
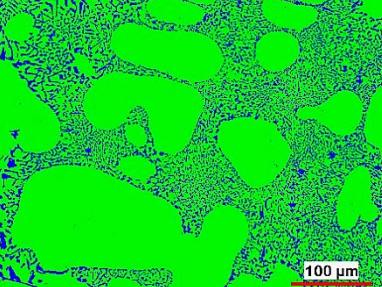
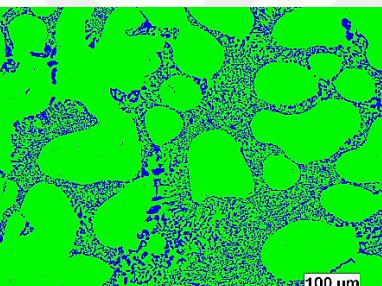
Tablo 4.9’da yer alan faz analizleri, optik mikroskopta farklı fazların farklı renkler kullanılarak renklendirilmesi ve ilgili alana düşen faz yüzdelerinin belirlenmesi esasına dayanarak gerçekleştirilir. Analizler, α -Al fazı yeşil, ötektik faz ise lacivert renge boyanarak, her bir alaşım için göbek bölgesinden 5’er kez ölçümler alınarak yapılmıştır. Tabloda yer alan değerler, 5 ölçümden elde edilen ortalama değerlerdir. Buna göre, sırasıyla, α -Al fazı AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımlarında %96,54, %93,56, %94,75, %92,71, %91,26, %84,89, %84,32 ve %84,81 olarak tespit edilmiştir. Ötektik faz ise sırasıyla AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımlarında %3,48, %6,43, %5,24, %7,28, %8,74, %15,11, %15,67 ve %15,18 olarak bulunmuştur. Faz yüzdeleri bir jantta, göbek, jant kolu ya da flanş bölgelerine göre değişiklik göstermemektedir. Bölgelere göre değişen yalnızca fazların yüzde ağırlıkça miktarlarıdır. Bu analizlerde yalnızca ilgili görüntü alanına düşen farklı renkle temsil edilen fazların alansal yüzdesinin hesaplaması yapılmaktadır. Bu sebeple numunelerin yalnızca göbek bölgesinden analizler yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.

Optik mikroskobun görüntü analiz tekniklerinden faydalanılarak gerçekleştirilen faz analizlerinin sayısal sonuçları iki boyutlu değerlendirme neticesinde elde edildiğinden, Magmasoft yazılımı ile hesaplanan üç boyutlu hacimsel sonuçlarla nicelik anlamında mukayese edilmesi söz konusu değildir. Fakat, nitelik olarak Magmasoft döküm analizi sonuçlarının eğilimleri, deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir. Gerek sanal gerekse laboratuvar ölçekli değerlendirmelerde AlSi3 bileşiminden AlSi9 bileşimine doğru gidildikçe, ötektik fazın miktarı artmakta ve α -Al fazının miktarı azalmaktadır.

Tablo 4.9 Numunelerin göbek bölgelerinden alınan görüntüler ile optik mikroskopta gerçekleştirilen faz analizlerinin sonuçları

	Göbek	α -Al (%)	Ötektik (%)
AlSi3Mg0.7		96,54	3,48
AlSi5Mg0.3		93,56	6,43
AlSi5Mg0.5		94,75	5,24
AlSi5Mg0.7		92,71	7,28
AlSi7 Mg0.3		91,26	8,74

Tablo 4.9 devamı

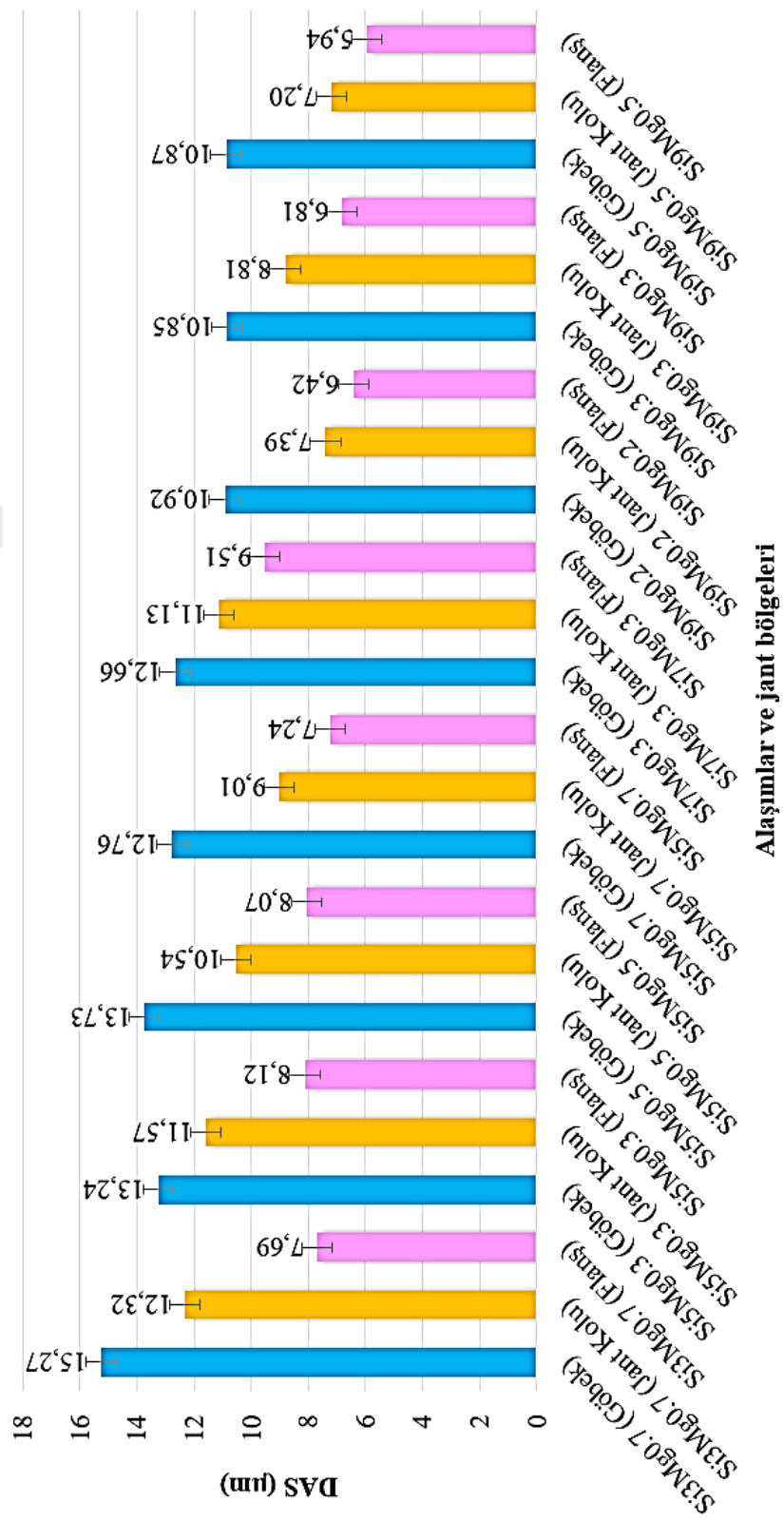
AISI9 Mg0.2		84,89	15,11
AISI9 Mg0.3		84,32	15,67
AISI9 Mg0.5		84,81	15,18

Alaşımlardan alınan numunelerin faz analizlerinin gerçekleştirilmesinin ardından, optik mikroskopta mikroyapılarında dendrit kolları arası mesafe ölçümleri yapılmıştır. Analizlerde, silisyum oranının artmasıyla, DAS değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatür verileri incelendiğinde, alüminyum döküm alaşımlarında ana alaşım elementi olan silisyum, alaşımın dökülebilirlik özelliklerini, akışkanlığını ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve döküm büzülmesini azalttığı açıkça belirtilmektedir (Djurdjević ve Grzinčič, 2012). Silisyum alaşım elementinin mikroyapıda incelme ve mekanik özelliklerde iyileşme gibi olumlu etkilerinin olmasının yanı sıra, bu etkiler döküm prosesinde farklı parametrelerin kontrolü ile de sağlanabilmektedir. Bu parametreler, kimyasal kompozisyon, sıvı metal işlemleri, soğutma hızı ve sıcaklık gradyanı olarak sıralanabilir. Bunların içinde, soğutma hızı en kritik rolü oynamaktadır. Soğutma hızının alüminyum alaşımlarının tane boyutu, ötektik fazın yapısı, dendrit kol aralığı ve demir ve mangan fazlarının morfolojisi gibi yapısal

özellikleri üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Spear ve Gardner, 1963; Rhadhakrishna, Seshan ve Seshadri, 1980; Flemings, Kattamis ve Bardes, 1991). Konu üzerine yapılan bu araştırmaların ortak sonucu; soğutma hızının artırılmasının tane boyutunu azalttığı, silisyum fazının morfolojisini değiştirdiği ve dendrit kolları arası mesafe değerini azalttığı yönündedir. Buna dayanarak, doktora çalışmasında elde edilen dendrit kolları arası mesafe değerlerinin jantın ince kesitlerinde daha düşük olması beklenen bir sonuçtur. Jant numunesi göz önüne alındığında, flanş bölgesinin çok daha ince kesitli olduğu görülmektedir. Burada, göbek bölgesine göre soğuma daha hızlıdır. Dolayısıyla, daha düşük DAS değerleri elde edilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin sonuçları Tablo 4.10'da standart sapma değerleriyle birlikte verilirken, Şekil 4.13'te karşılaştırmalı ve detaylı bir grafik halinde verilmiştir.

Tablo 4.10 Alaşımlarda optik mikroskopta ölçülen dendrit kolları arası mesafe değerinin jantın bölgelerine göre değişimi

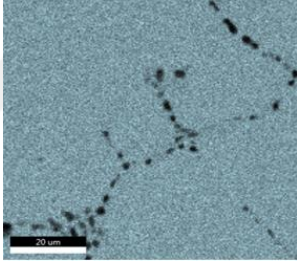
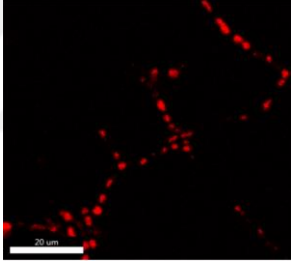
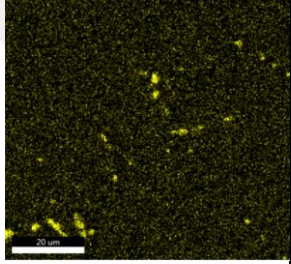
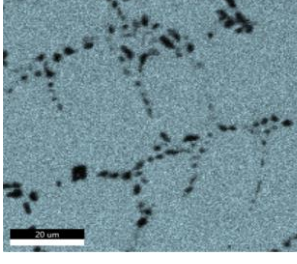
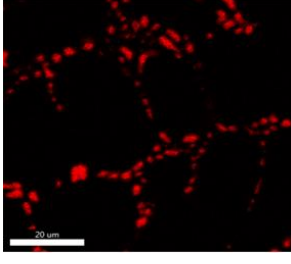
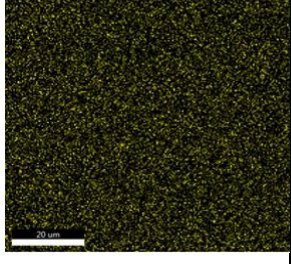
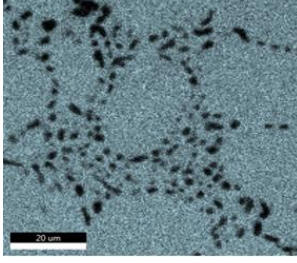
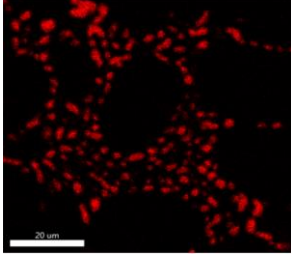
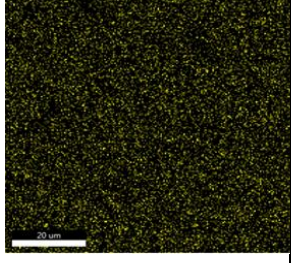
Alaşım adı	Dendrit Kolları Arası Mesafe (μm)					
	Göbek	Standart Sapma (%)	Jant Kolu	Standart Sapma (%)	Flanş	Standart Sapma (%)
AlSi3Mg0.7	15,26	2,35	12,32	3,6	7,68	1,69
AlSi5Mg0.3	13,24	1,05	11,57	1,45	8,12	0,69
AlSi5Mg0.5	13,72	2,28	10,53	2,20	8,06	1,58
AlSi5Mg0.7	12,75	1,69	9,00	0,32	7,23	0,66
AlSi7Mg0.3	12,66	1,91	11,13	1,20	9,50	0,47
AlSi9Mg0.2	10,92	2,01	7,39	0,82	6,42	0,92
AlSi9Mg0.3	10,85	0,96	8,81	0,48	6,81	0,49
AlSi9Mg0.5	10,87	2,16	7,20	0,71	5,93	0,71



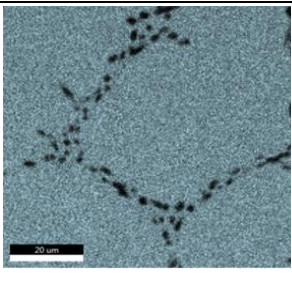
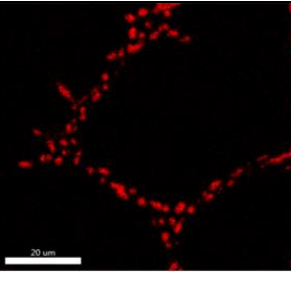
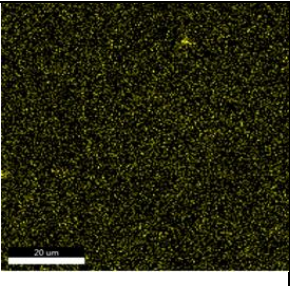
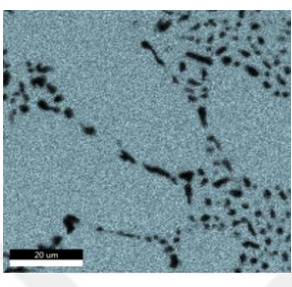
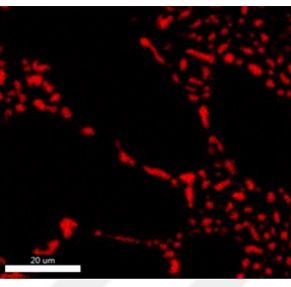
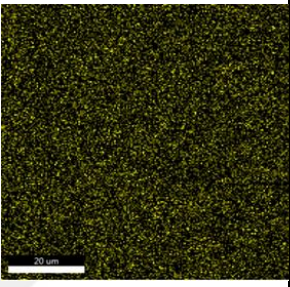
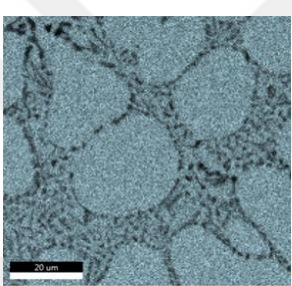
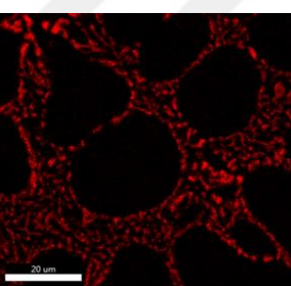
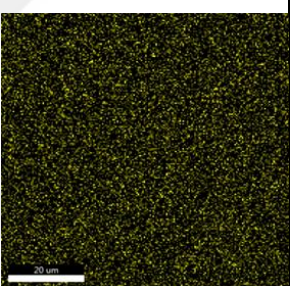
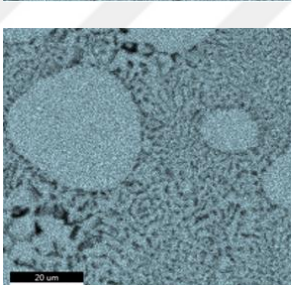
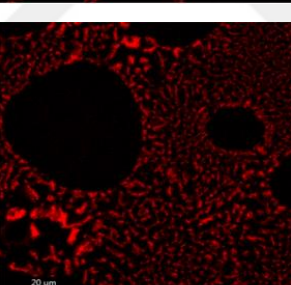
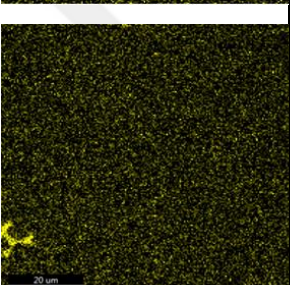
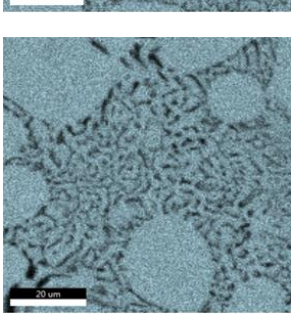
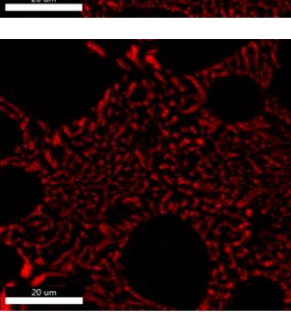
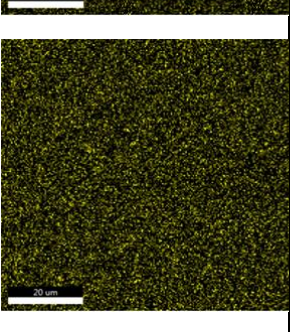
Şekil 4.13 Dendrit kolları arası mesafe değerlerinin alaşım kompozisyonuna ve jant bölgelerine göre değişimi

Optik mikroskopta mikroyapısal değerlendirmeleri tamamlanan numuneler, ileri seviye araştırma için taramalı elektron mikroskopunda EDX modülünden faydalanılarak elementel haritalama tekniği ile incelenmiştir. Tablo 4.11’de görüldüğü gibi, elementel haritalamada Al elementi için gri, Si elementi için kırmızı ve Mg elementi için sarı renklendirme seçilmiştir. Ötektik fazın α -Al dendritleri arasına yerleştiği ve silisyum miktarının artmasıyla mikroyapıda kapladığı alanın arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, alaşımlar henüz ısıtıl işlem görmedikleri için, Mg elementi mikroyapıda homojen bir şekilde dağılmış haldedir. Alaşımlar ısıtıl işleme tabi tutulduğu takdirde, Mg elementi Si ile reaksiyona girecek ve Mg_2Si fazını oluşturarak yapıda çökeltiler meydana getirecektir. O durumda, mikroyapıda yer yer küçük boyutlarda kümelenmiş halde Mg_2Si fazı görülecektir.

Tablo 4.11 Alaşımlarda kompozisyona bağlı taramalı elektron mikroskobu elementel haritalama analizi sonuçları

	Al	Si	Mg
AlSi3Mg0.7			
AlSi5Mg0.3			
AlSi5Mg0.5			

Tablo 4.11 devamı

AlSi5Mg0.7			
AlSi7 Mg0.3			
AlSi9 Mg0.2			
AlSi9 Mg0.3			
AlSi9 Mg0.5			

4.3.2 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Laboratuvarda gerçekleştirilen çekme testi sonuçlarından elde edilen akma dayanımı değerleri Şekil 4.14'te tüm alaşımlar için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çekme testleri otomotiv endüstrisi standartlarına göre jantın, jant kolu, dış flanş ve iç flanş bölgelerinden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.14'te baz alaşım olan AlSi7Mg0.3 için jant kolu ve flanş bölgelerinde olması gereken minimum akma dayanımı değerleri (80 MPa) olarak verilmiştir. Buna göre, geliştirilen alaşım kompozisyonlarından, AlSi3Mg0.7 alaşımı dış ve iç flanş bölgelerinde sergilediği sırasıyla yaklaşık 78 ve 75 MPa akma dayanımı değerleri ile sınır değerinin altında seyretmiştir. Benzer şekilde AlSi5Mg0.3 alaşımı için gerek jant kolu gerekse flanş bölgelerinde akma dayanımı 80 MPa'nın altında kalmıştır. Öte yandan, diğer alaşım kompozisyonlarının tamamı hem jant kolu hem flanş bölgelerinden alınan numunelere yapılan çekme testlerinde 80MPa sınır değerinin üzerinde değerler göstererek, akma dayanımı AlSi7Mg0.3 alaşımına alternatif olabilecek karakter sergilemiştir. Alaşımlar arasında en yüksek akma dayanımı AlSi9Mg0.5 alaşımında kaydedilmiştir.

Hesaplamalı malzeme bilimi ve döküm simülasyonları birlikte çalıştığında kaydedilen veriler olan, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği araştırma sonuçlarından elde edilen akma dayanımı değerleri ile gerçek çekme testlerinden elde edilen değerler, jant kolu ve flanş bölgeleri için karşılaştırmalı grafikler halinde sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir. Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmalarından elde edilen mekanik özelliklere ait sayısal değerler, daha evvel Tablo 4.6'da bir arada verilmiştir. Buna dayanarak değerlendirmeler yapıldığında, jant kolu bölgesinde en yüksek akma dayanımı değerleri gerçek çekme testlerinde ve döküm simülasyonu sonuçlarında, en yüksek alaşım elementi içeren (Si ve Mg elementleri açısından) AlSi9Mg0.5 alaşımında kaydedilmiştir. Sonuçlar sayısal açıdan yorumlandığında, ilgili alaşım için çekme testlerinde jant kolu bölgesinde akma dayanımı değeri 106,44 MPa iken, Magmasoft döküm simülasyonu ile elde edilen sanal verilerde bu değer yaklaşık 116 MPa'dır. Söz konusu analizde, döküm gibi

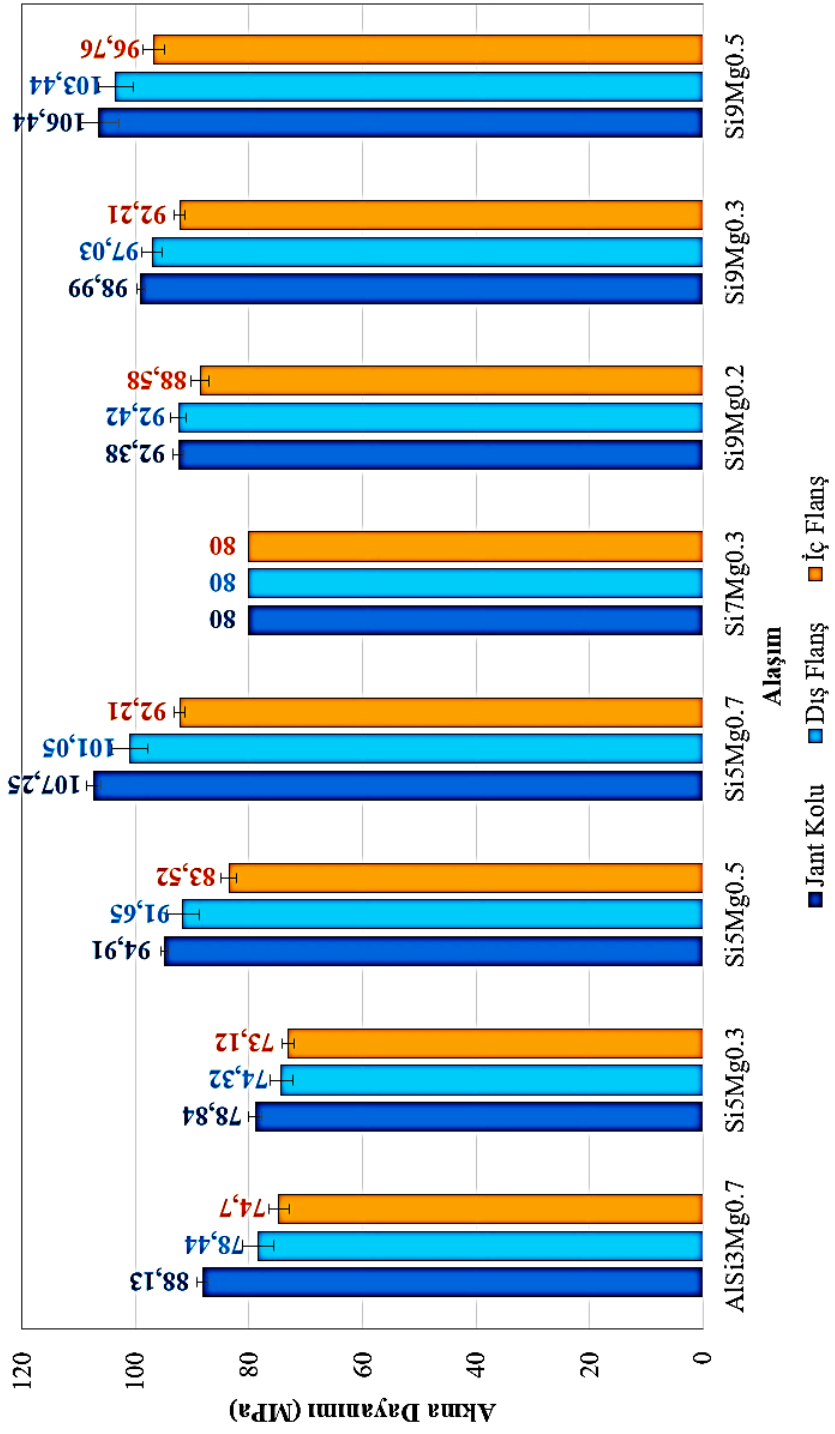
geleneksel ve dinamik bir yöntem karşısında %8 gibi düşük bir standart sapma değerine ulaşılmıştır.

Öte yandan, Tablo 4.6’da yer alan sonuçlarda jantta flanş bölgeleri için dış ve iç flanş ayrımı yoktur. Gerçekte bu bölgeler kesit bakımından birbirine son derece yakın karakterli olduğundan, gerçek çekme testlerinden dış ve iç flanş bölgeleri için ayrı ayrı kaydedilen değerlerin ortalaması alınarak sanal değerler ile karşılaştırma yapılmıştır. Benzer şekilde, flanş bölgesine ait akma dayanım değerleri incelendiğinde, AlSi5Mg0.7 alaşımında flanş bölgesinde gerçek çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı değeri yaklaşık 100 MPa iken, sanal sonuç aynı alaşım için yaklaşık 111 MPa’dır. Bu durumda yine hata payı oranı döküm prosesi gibi aktif bir proses göz önüne alındığında son derece düşüktür.

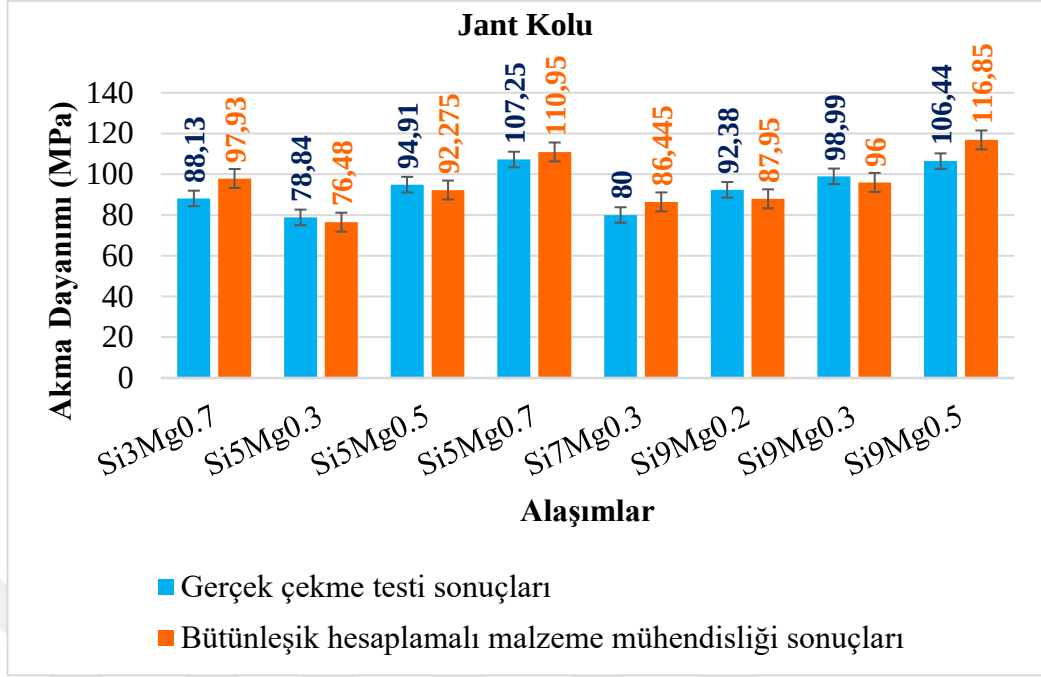
Ayrıca, bilgisayar destekli analizlerden ve laboratuvar ölçekli çekme testlerinden elde edilen akma dayanımı değerleri jant kolu ve flanş bölgeleri için standart sapma oranları ile Tablo 4.12’de verilmiştir. Döküm prosesi, kontrol altında tutulması gerekli, fakat bir o kadar da zor olan birçok üretim parametresini içinde barındıran son derece dinamik bir süreç olduğundan, gerçek çekme testlerinden elde edilen sonuçlar ile simülasyon verilerinden kaydedilen akma dayanımı sonuçları arasındaki standart sapma değerleri oldukça kabul edilebilir değerlerdir. Jant kolu için analizler neticesinde, en yüksek %11,12, en düşük %2,78 standart sapma değeri gözlemlenirken, flanş kısmı için bu değerler sırasıyla %27,56 ve %4,36 olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 4.12 Hesaplamalı ve deneysel olarak kaydedilen akma dayanımı değerleri

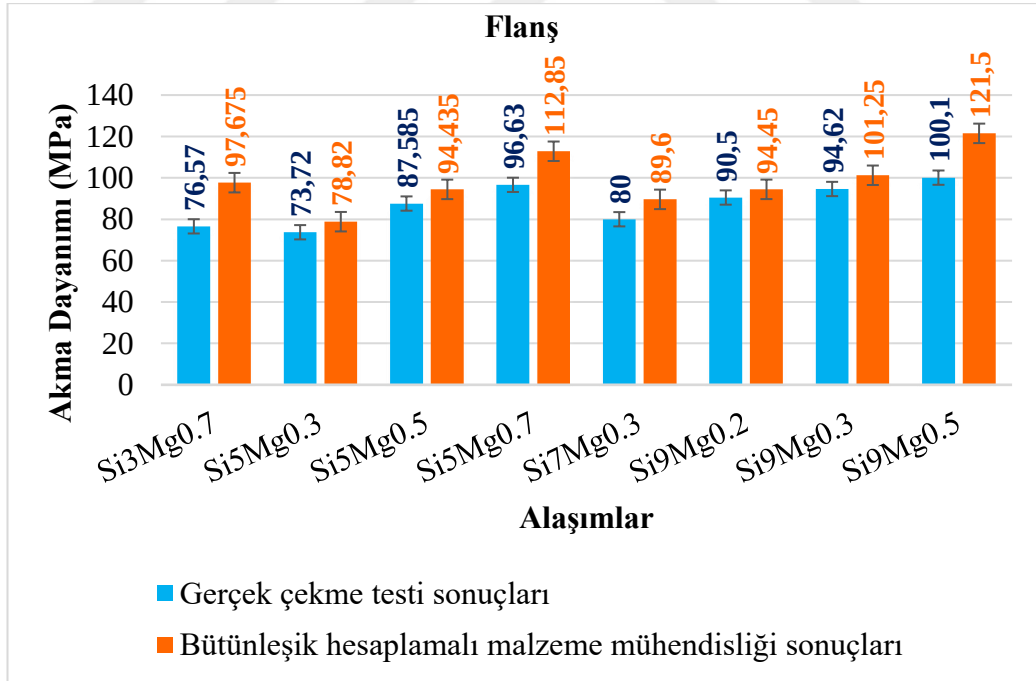
Alaşım	Jant Kolu			Flanş		
	Akma Dayanımı (MPa)		Standart Sapma (%)	Akma Dayanımı (MPa)		Standart Sapma (%)
	Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları		Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları	
Si3Mg0.7	88,13	97,93	11,12	76,57	97,675	27,56
Si5Mg0.3	78,84	76,48	2,99	73,72	78,82	6,92
Si5Mg0.5	94,91	92,275	2,78	87,585	94,435	7,82
Si5Mg0.7	107,25	110,95	3,45	96,63	112,85	16,79
Si7Mg0.3	80	86,445	8,06	80	89,6	12,00
Si9Mg0.2	92,38	87,95	4,80	90,5	94,45	4,36
Si9Mg0.3	98,99	96	3,02	94,62	101,25	7,01
Si9Mg0.5	106,44	116,85	9,78	100,1	121,5	21,38



Şekil 4.14 Alaşımlara ait çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerleri



Şekil 4.15 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının jant kolu bölgesi için akma dayanımı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği



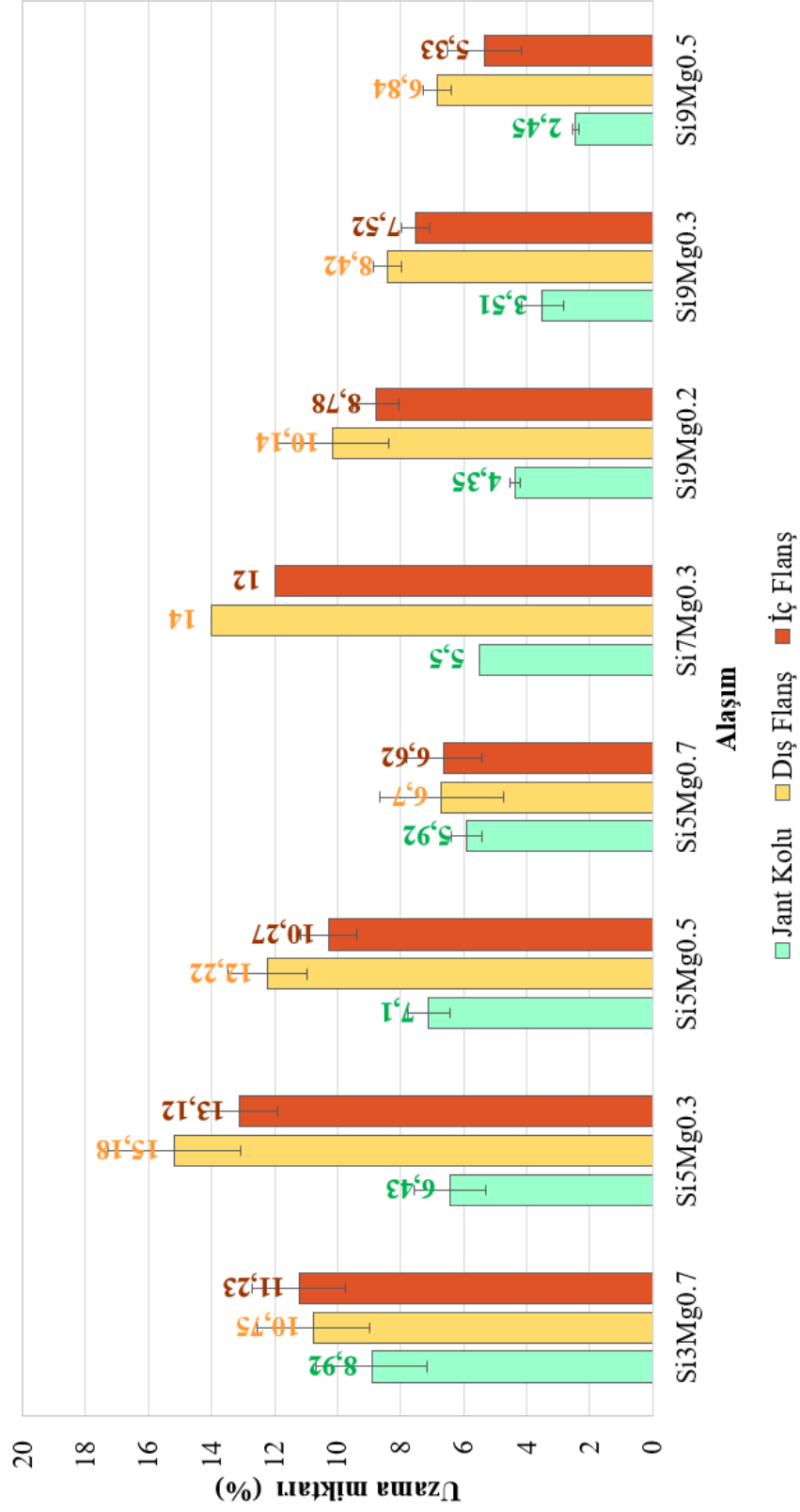
Şekil 4.16 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının flanş bölgesi için akma dayanımı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği

Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çekme testinden alaşımlara ait elde edilen bir diğer önemli sonuç olan uzama miktarıdır. Otomotiv sektöründe alüminyum jant endüstrisi tarafından AlSi7Mg0.3 alaşımından üretilen ısıtılma işlem görmemiş bir jantta kol, iç ve dış flanş bölgeleri için elde edilen uzama miktarı değerleri sırasıyla, %5,5, %14 ve %12 olarak belirlenmiştir. Standartlarda, ısıtılma işlem görmüş bir jantta göbek bölgesinde %2,6, kol bölgesinde %3,4 ve flanş bölgesinde ise %6,6 uzama miktarı beklenmektedir.

Şekil 4.17, farklı alaşım kompozisyonlarından üretilen jantların ilgili bölgelerinden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testlerinden kaydedilen uzama miktarına ait sonuçları göstermektedir. Buna göre, AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7 alaşımlarında jant kolunda sırasıyla, %8,92, %6,43, %7,1 ve %5,92 olmak üzere olması gereken %5,5 değerinin üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Öte yandan, dış ve iç flanş bölgeleri için bu 4 alaşımın içerisinde yalnızca AlSi5Mg0.3 alaşımında sırasıyla %15,18 ve %13,12 ile, baz alaşım olan AlSi7Mg0.3 alaşımınıninkinden yüksek değerler kaydedilmiştir. Fakat diğer alaşım kompozisyonlarında dış ve iç flanş bölgelerinde istenilen uzama miktarına ulaşamamıştır. AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımları ise Şekil 4.17’de açıkça görüldüğü üzere, tüm jant bölgelerinde olması gereken uzama miktarı değerlerine erişilememiştir.

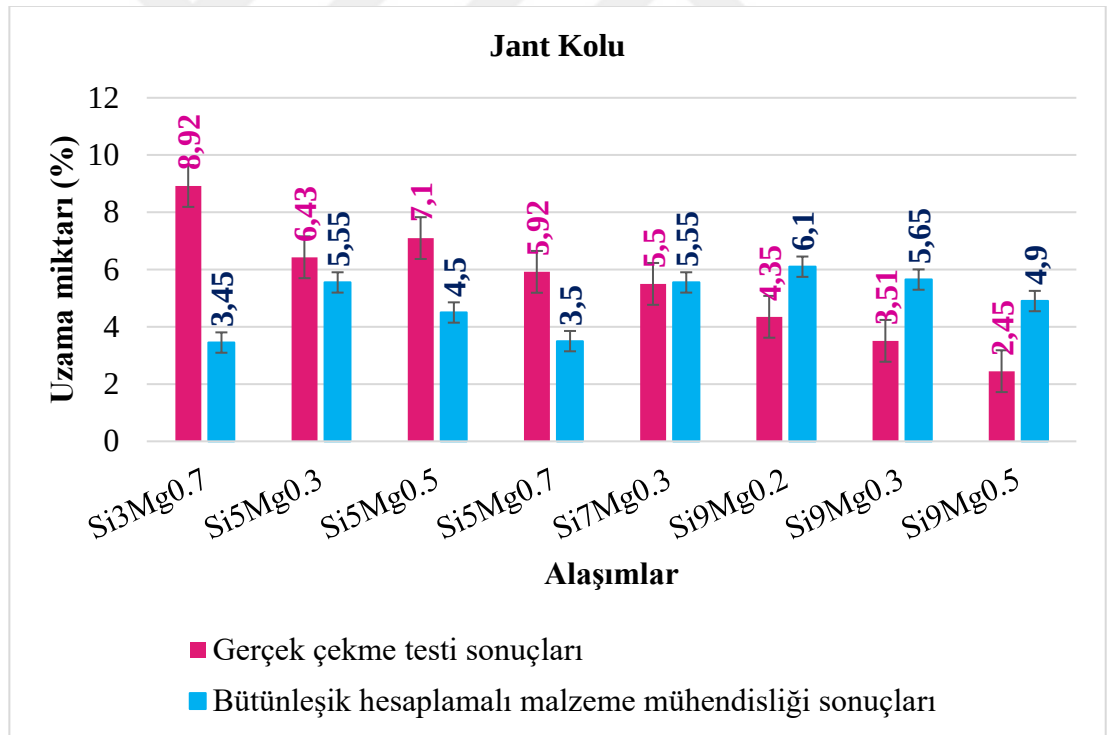
Tablo 4.13 Hesaplamalı ve deneysel olarak kaydedilen uzama miktarı değerleri

Alaşım	Jant Kolu			Flanş		
	Uzama miktarı (%)		Standart Sapma (%)	Uzama miktarı (%)		Standart Sapma (%)
	Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları		Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları	
Si3Mg0.7	8,92	3,45	61,32	10,99	4,15	62,24
Si5Mg0.3	6,43	5,55	13,69	14,15	6,55	53,71
Si5Mg0.5	7,1	4,5	36,62	11,245	5,4	51,98
Si5Mg0.7	5,92	3,5	40,88	6,66	4,45	33,18
Si7Mg0.3	5,5	5,55	0,91	13	6,35	51,15
Si9Mg0.2	4,35	6,1	40,23	9,46	6,8	28,12
Si9Mg0.3	3,51	5,65	60,97	7,97	6,45	19,07
Si9Mg0.5	2,45	4,9	100,00	6,085	5,5	9,61

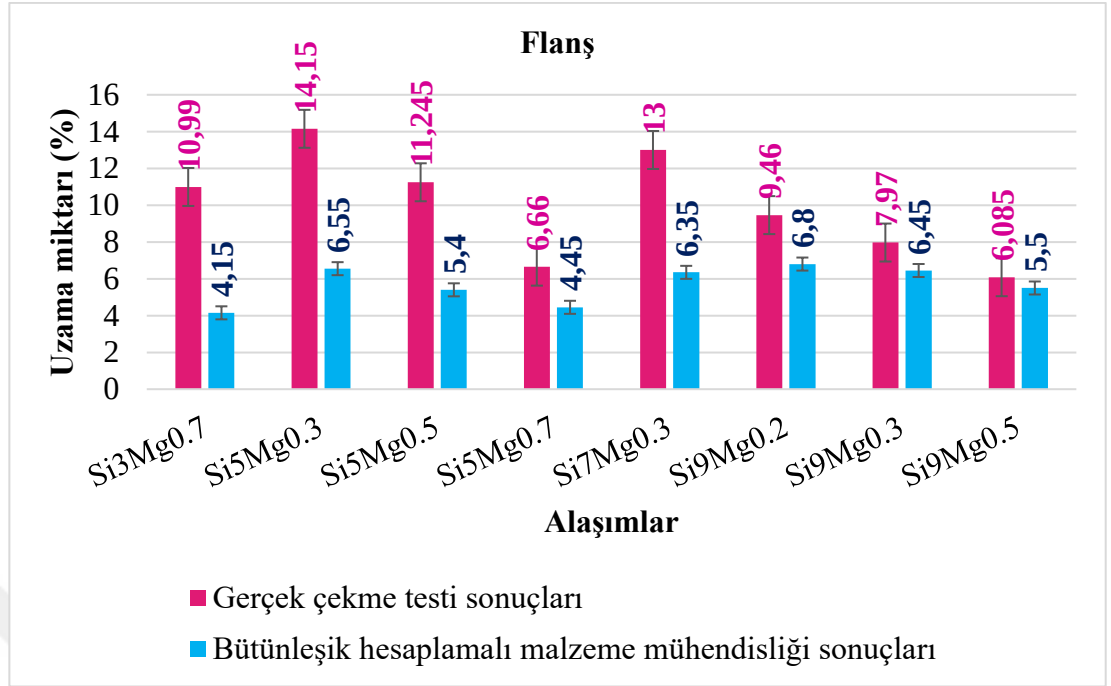


Şekil 4.17 Alaşımlara ait çekme testlerinden elde edilen uzama miktarı değerleri (%)

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da sırasıyla jant kolu ve flanş bölgeleri için sanal ve fiziksel koşullarda elde edilen uzama miktarı verilerin karşılaştırıldığı grafikler, Tablo 4.13’te ise değerlerle birlikte standart sapma oranları yer almaktadır. Uzama miktarı için simülasyon verileri hesaplanıp grafikler oluşturulurken, Magmasoft yazılımında ilgili bölgeler için elde edilen ve Tablo 4.6’da verilen minimum ve maksimum değerlerin ortalamaları alınmıştır. Sanal ile gerçek sonuçlar incelendiğinde, simüle ortamda elde edilen değerler jant bölgesi gözetmeksizin %3 ila %7 arasında değişirken, gerçek veriler %2,45 ila %15,18 arasında değişmektedir. Bu durumda, sanal veriler ve gerçek verilerin yüzde uzama miktarı açısından karşılaştırılması doğru değildir. Bunun sebebi, Magmasoft döküm simülasyonu yazılımında, uzama miktarı ile hesaplama yapabilen teori yüksek sapma oranı ile çalışmasıdır. Ayrıca, matematiksel olarak uzama miktarı değerleri daha küçük sayılar olduğundan, sanal ve fiziksel veriler arasında bir uyumun yakalanması yüzdesel olarak çok daha zordur.

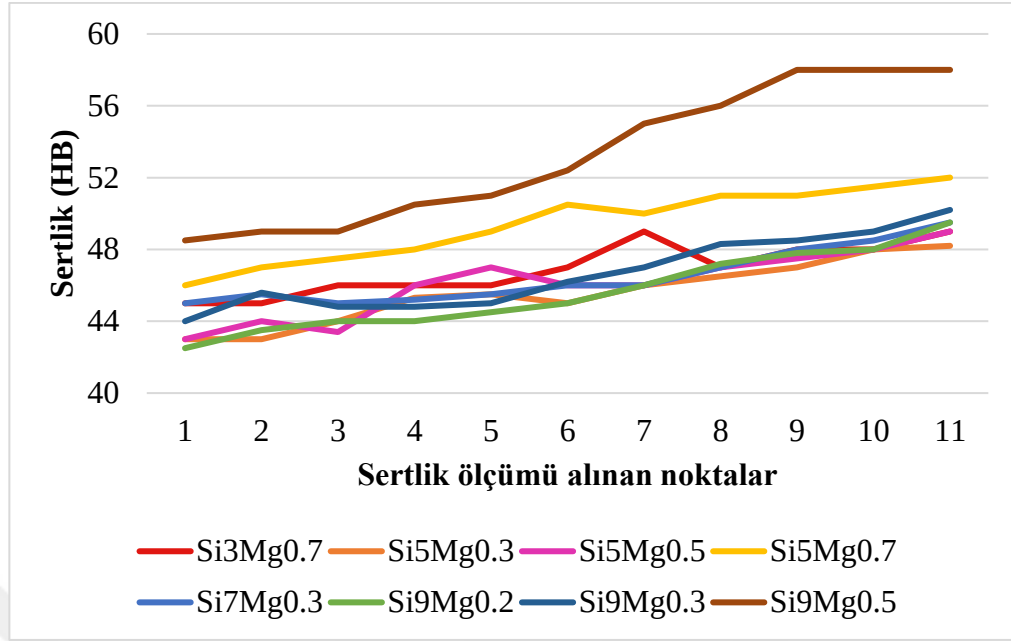


Şekil 4.18 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının jant kolu bölgesi için uzama miktarı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.19 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek çekme testi sonuçlarının flanş bölgesi için uzama miktarı değerlerinin karşılaştırmalı grafiği

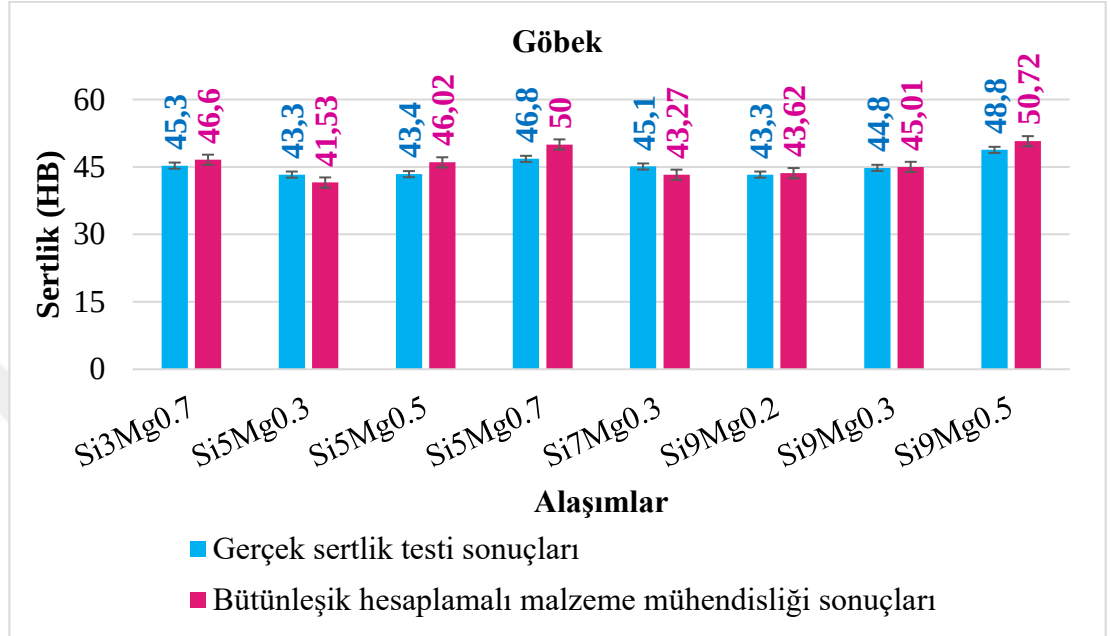
Alaşımlarda çekme testlerinin ardından, mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.20’de verilmiştir. İlgili şekilde görüldüğü üzere, jantın göbek bölgesinden flanş kısmına doğru 11 farklı noktadan alınan sertlik ölçümleri sonuçlarına göre, tüm alaşımlarda göbekten flanşa gidildikçe sertlik değerleri artış göstermiştir. Bir diğer açıdan, en yüksek sertlik değerleri en yüksek oranda alaşım elementi içeren AlSi9Mg0.5 alaşımında kaydedilmiştir.



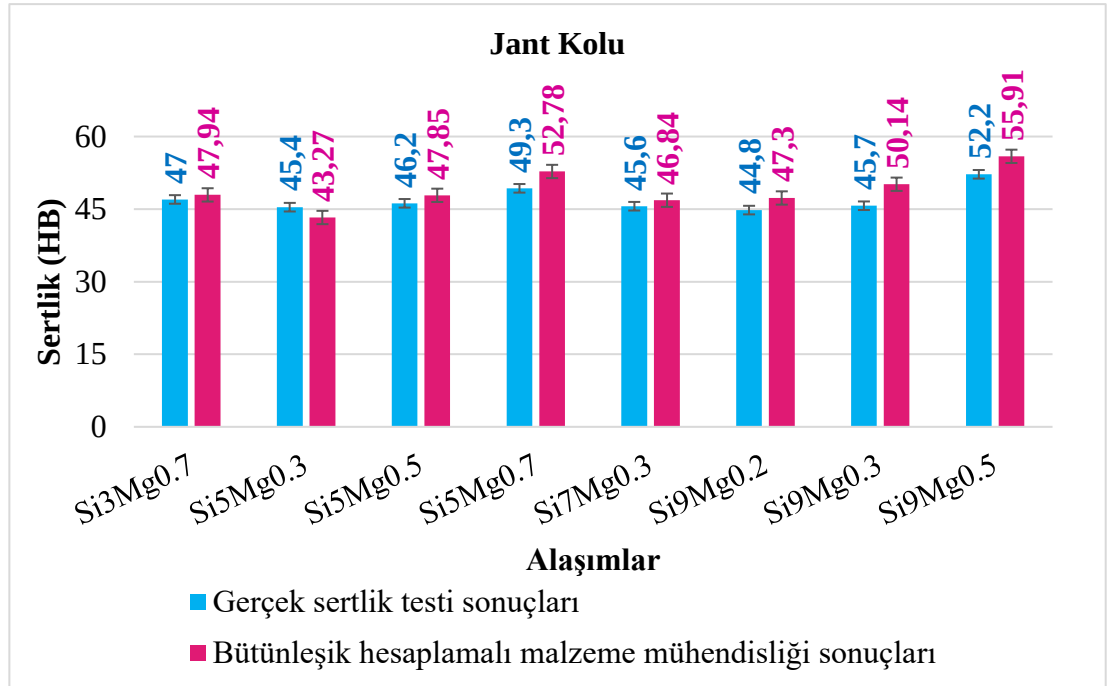
Şekil 4.20 Sertlik testi ölçüm sonuçları

Magmasoft döküm simülasyon yazılımı ile janta ait bölgesel sertlik değerlerine erişilememektedir. Bu sebeple, metalik malzemelerde çekme dayanımı ve Brinell sertlik değeri ilişkisi eşitliğinden faydalanılmış ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamaların sonuçları daha evvel Tablo 4.6’da verilmiştir. Bu kısımda alaşımların sertlik değerlerinin sanal ve fiziksel verilerinin karşılaştırıldığı grafikler göbek, jant kolu ve flanş bölgeleri için sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te, değerlerin standart sapmalarının yer aldığı sertlik bilgileri ise Tablo 4.14’te verilmektedir. İlgili tablodan görüldüğü üzere, standart sapma değerinin çok düşük olduğu sanal ve fiziksel karşılaştırma verilerinin sonuçları, bütünsel hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarının alüminyum alaşımlarında alçak basınçlı döküm prosesi verimliliği açısından kullanılabilirliğini ve verimini göstermektedir. Örneğin, baz alaşım olan AlSi7Mg0.3 alaşımının flanş bölgesinde sanal hesaplamalar ile yaklaşık 50 HB sertlik elde edilmişken, gerçek ölçüm sonuçlarında bu değer aynı noktada yaklaşık 49 HB olarak karşımıza çıkmaktadır. Başka bir örnek vermek gerekirse, AlSi9Mg0.2 alaşımının göbek bölgesinde sanal hesaplamalar ile 43,62 HB sertlik değerine erişilirken, gerçek sertlik ölçümlerinde aynı bölgede 43,3 HB değerine ulaşılmıştır. Buradaki standart sapma oranı %0,74’tür ve bu değer döküm prosesi açısından son derece düşüktür. Alaşımların tamamının, bir jantın tüm bölgelerinde

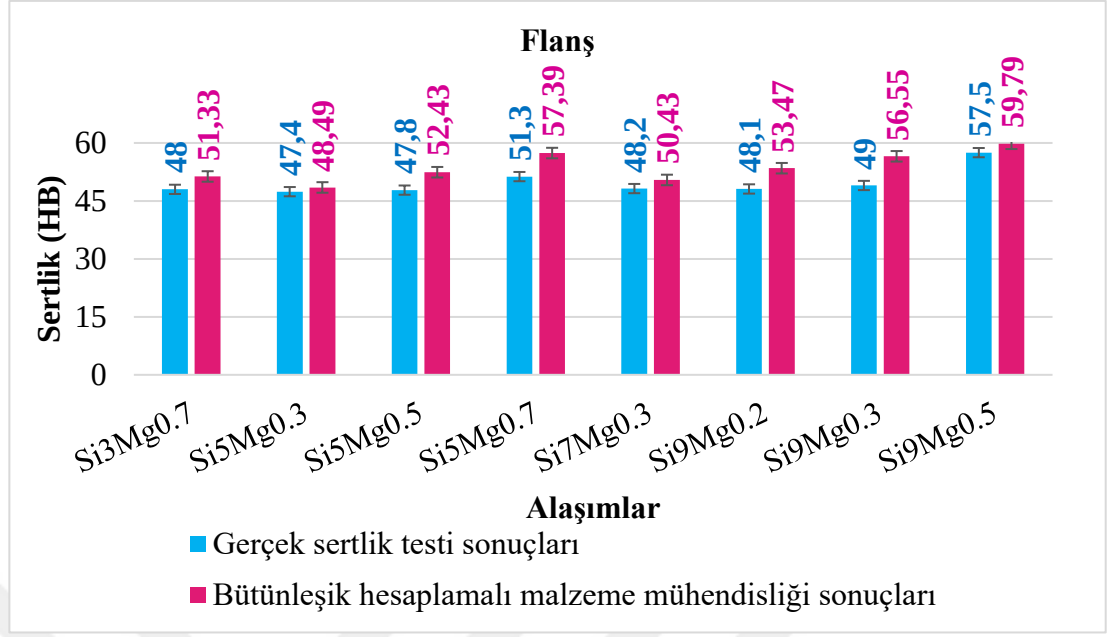
elde edilen sertlik değerleri açısından, AlSi7Mg0.3 alaşımına alternatif olabileceği bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarından faydalanılarak öngörölmüştür.



şekil 4.21 Bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin göbek bölgeşi için karşılaştırmalı grafiği



şekil 4.22 Bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin jant kolu bölgeşi için karşılaştırmalı grafiği

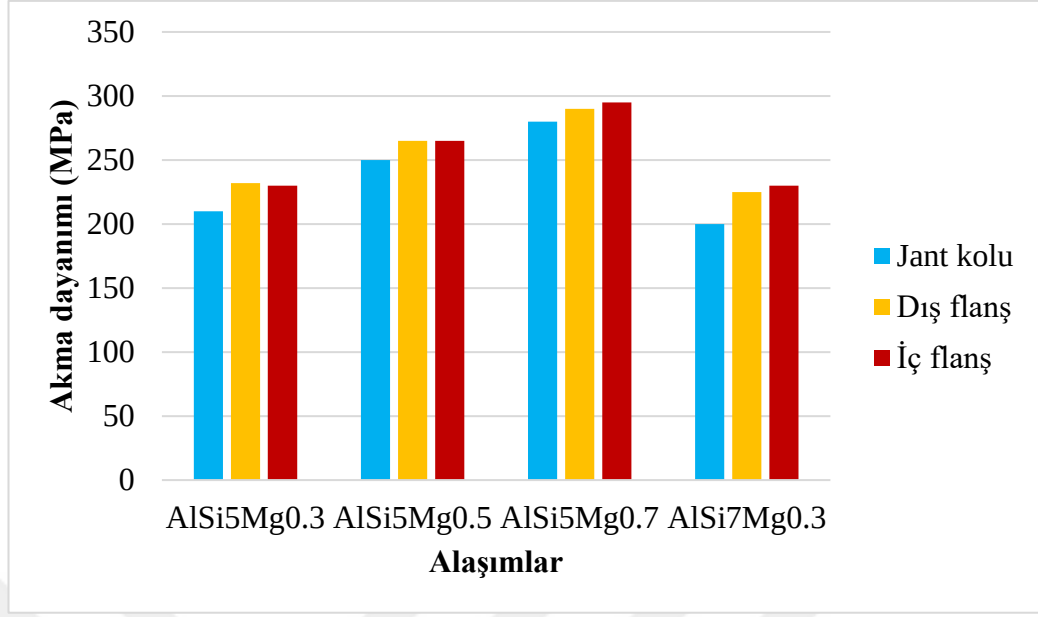


Şekil 4.23 Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği ve gerçek sertlik değerlerinin flanş bölgesi için karşılaştırmalı grafiği

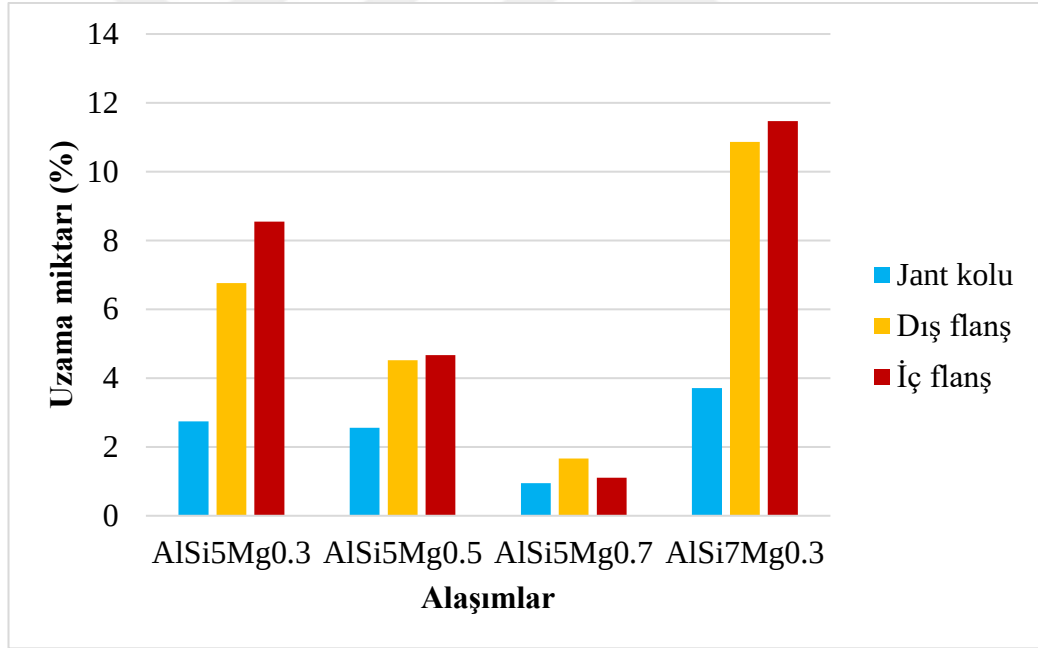
Tablo 4.14 Hesaplamalı ve deneysel faaliyetlerle ulaşılan sertlik değerleri

Alaşım	Göbek			Jant Kolu			Flanş		
	Sertlik (HB)		Standart Sapma (%)	Sertlik (HB)		Standart Sapma (%)	Sertlik (HB)		Standart Sapma (%)
	Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları		Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları		Test Sonuçları	Simülasyon Sonuçları	
Si3Mg0.7	45,3	46,6	2,87	47	47,94	2,00	48	51,33	6,94
Si5Mg0.3	43,3	41,53	4,09	45,4	43,27	4,69	47,4	48,49	2,30
Si5Mg0.5	43,4	46,02	6,04	46,2	47,85	3,57	47,8	52,43	9,69
Si5Mg0.7	46,8	50	6,84	49,3	52,78	7,06	51,3	57,39	11,87
Si7Mg0.3	45,1	43,27	4,06	45,6	46,84	2,72	48,2	50,43	4,63
Si9Mg0.2	43,3	43,62	0,74	44,8	47,3	5,58	48,1	53,47	11,16
Si9Mg0.3	44,8	45,01	0,47	45,7	50,14	9,72	49	56,55	15,41
Si9Mg0.5	48,8	50,72	3,93	52,2	55,91	7,11	57,5	59,79	3,98

Otomotiv standartlarına göre ısıt ışlem uygulanmış bir jantın kol, dış ve i flanş bölgelerinde beklenen ortalama akma dayanımı değerleri sırasıyla, 168, 188 ve 186 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre, tez çalışmasında baz alaşım olarak kullanılan AlSi7Mg0.3 alaşımı ısıt ışlemlili olarak bu bölgelerde sırasıyla, 200, 225 ve 230 MPa olarak elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, tez çalışmasında örnek olarak seçilen AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5 ve AlSi5Mg0.7 alaşımlarına uygulanan T6 ısıt ışlemi sonrasında gerçekleştirilen çekme testleri neticesinde alaşımlarda sırasıyla, kol bölgelerinde, 210, 250 ve 280 MPa akma dayanımı değerleri kaydedilmiştir. Aynı alaşımlarda dış flanş bölgelerinde sırasıyla, 232, 265 ve 290 MPa akma dayanımına ulaşılmıştır. Dış flanşa benzer olarak, alaşımlarda i flanş bölgelerinde sırasıyla 230, 265 ve 295 MPa akma dayanımı değerleri görülmüştür. Ayrıca, artan Mg seviyesi alaşımların akma dayanımını artırmıştır. Bu durum alaşımların ısıt ışlemlili halleriyle, mevcutta kullanılan AlSi7Mg0.3 alaşımına alternatif nitelik taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır. Öte yandan, ısıt ışlem sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinde alaşımlarda uzama miktarı (%) değerlerinin tüm alaşımlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Uzama miktarında bir azalma gözlemlenmesine rağmen, ısıt ışlem uygulanmış nihai üründe elde edilen sonuçlar, AlSi5Mg0.5 ve AlSi5Mg0.7 alaşımları haricinde, otomotiv standartlarınca belirlenen spesifikasyon limitlerindedir. Fakat, uzama miktarı açısından en yüksek sonuçlar baz alaşım olan AlSi7Mg0.3 alaşımında kaydedilmiştir. Nihai ürünün spesifikasyon limitleri jant kolu bölgesi için %3,5 ve iç/dış flanş bölgeleri için ise %7'dir. şekil 4.24, alaşımlara uygulanan ısıt ışlem sonucu akma dayanımı değerlerini ve şekil 4.25 ise uzama miktarı değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 4.24 Isıl işlemlili alaşımlara uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı değerleri



Şekil 4.25 Isıl işlemlili alaşımlara uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen uzama miktarı değerleri

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yakın geçmişte gelişen, metalurji ve malzeme bilimi açısından yenilikçi malzemeler geliştirme, proses iyileştirme ve inovasyon çalışmalarına ivme kazandırarak her geçen gün önemi artan bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları, yeni bir uygulama alanı olarak alçak basınçlı döküm ile alüminyum esaslı jant üretiminde kullanılmıştır. Bu bağlamda doktora tez çalışmasının sayısal sonuçlarına bakıldığında,

- Çalışmaya konu olan AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3, AlSi5Mg0.5 olmak üzere 7 farklı alüminyum esaslı alaşım, hali hazırda jant üretiminde kullanıma uygundur.
- Geliştirilen alaşım kompozisyonları ile üretilen jantlarda, bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği incelemelerinde, göbek bölgesinde makro boyutta porozite görülme olasılığı yoktur. Bu bağlamda, jantların göbek bölgeleri üzerinde yapılan makroyapısal değerlendirmeler neticesinde makroyapısal değerlendirmelerde herhangi bir makro porozite kusuruna rastlanmamıştır. Benzer şekilde mikroyapısal değerlendirmelerde, hesaplamalı ve gerçek üretim sonuçlarında paralel olarak, yalnızca flanş bölgesinde %3 civarında mikro porozite oluşma ihtimali karşımıza çıkmaktadır.
- Alaşımlarda bütünlük hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmaları sonucunda jant ürünü üzerinde elde edilen üç boyutlu faz dağılımlarına bakıldığında, AlSi3Mg0.7 alaşımından AlSi9Mg0.5 alaşımına doğru gidildikçe, α -Al faz miktarının değişen silisyum oranıyla paralel, kademeli olarak azaldığını göstermektedir. AlSi3Mg0.7 alaşımında jantın göbek bölgesinde yaklaşık %99 oranında α -Al fazı görülürken, bu oran AlSi9Mg0.5 alaşımında aynı bölgede %45 civarına gerilemektedir. Jant kolu ve flanş bölgeleri için de α -Al fazı için benzer eğilim söz konusudur. Öte yandan, AlSi3Mg0.7 alaşımında göbek bölgesinde yaklaşık %1 oranında ötektik faz görülürken, bu oran AlSi9Mg0.5 alaşımında göbek bölgesinde %60 civarına artmaktadır. Mg₂Si fazının oranı ise, jantın tüm bölgelerinde %0 ile 0,5

arasında değişmektedir. Ayrıca, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği sonuçlarına göre, tüm alaşımlarda, jantın tüm bölgelerinde AlFeSi intermetalik fazlarının miktarı %0 ile 0,4 arasında değişmektedir. Bu veriler, alçak basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum-silisyum esaslı alaşımlı jant üretimi için kabul edilebilir değerlerdir. Optik mikroskopta gerçekleştirilen iki boyutlu faz analizleri neticesinde, AlSi3Mg0.7 alaşımından AlSi9Mg0.5 alaşımına doğru artan silisyum miktarına bağlı olarak, mikroyapıdaki ötektik fazın miktarı %3,48'den %15,18'e çıkarken; α -Al fazının miktarı %96,54'ten %84,81'e gerilemiştir. Yapıda magnezyumun homojen şekilde dağıldığı ve alaşımların ısıtılma işlemi hazır olduğu ise, taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilen elementel haritalama analizleri ile doğrulanmıştır. Analizlerde, elementel halde yapıda dağılan Mg elementi tespit edilirken, ısıtılma işlemi görmemiş alüminyum alaşımlarında beklenildiği gibi Mg₂Si bileşiklerine ise rastlanmamıştır.

- Bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği çalışmaları sonucunda AlSi3Mg0.7, AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7, AlSi7Mg0.3, AlSi9Mg0.2, AlSi9Mg0.3, AlSi5Mg0.5 alaşımlarda elde edilen minimum ikincil dendrit kolları arası mesafe değerleri göbek bölgesinde sırasıyla, 45,72, 41,86, 41,33, 48,65, 45,22, 46,50, 43,99 ve 46,70 μm 'dir. Jant kolu bölgesinde bu değerler sırasıyla, 39,50, 37,60, 36,74, 37,36, 37,35, 38,85, 38,67 ve 38,67 μm olarak karşımıza çıkmaktadır. Flanş bölgesinde ise, ikincil dendrit kolları arası mesafe değerleri sırasıyla, 27,05, 26,81, 25,21, 21,25, 36,85, 28,64, 30,68 ve 30,64 μm 'dir. Buna göre, jantın göbek bölgesinden flanş bölgesine doğru azalan kesit kalınlığı ve artan soğuma hızına bağlı olarak, ikincil dendrit kolları arası mesafe değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, optik mikroskopta ölçülen dendrit kolları arası mesafe değerleri örneğin, AlSi5Mg0.3 alaşımında göbekte 13,24 μm , jant kolunda 11,57 μm ve flanş kısmında 8,12 μm olarak karşımıza çıkmaktadır. AlSi9Mg0.3 alaşımında ise göbekte 10,85 μm , jant kolunda 8,81 μm ve flanş kısmında 6,81 μm olarak ölçülmüştür. Buna göre, alaşımlarda silisyum ve magnezyum oranının artmasıyla, dendrit kolları arası mesafenin azalma eğilimi gösterdiği söylenmektedir.
- Döküm simülasyonlarından elde edilen mekanik özelliklerin jantın bölgelerine göre dağılımlarına bakıldığında, AlSi5Mg0.3 alaşımı haricinde tüm

alaşımlarda jantın tüm kısımlarında, otomotiv standartlarına göre erişilmesi gereken 80 MPa akma mukavemeti değerinin üzerinde dayanım elde edilmiştir. AlSi5Mg0.3 alaşımında ise, göbekte 75,41, jant kolunda 76,12 ve flanşta 77,56 MPa akma dayanımına erişilmiştir. Alaşımlarda artan silisyum ve magnezyum miktarına bağlı olarak, akma dayanım değerleri artış göstermiştir. Örneğin, AlSi9Mg0.2 alaşımında jant kolu bölgesinde ortalama 156 MPa çekme dayanımı görülürken, AlSi9Mg0.3 ve AlSi9Mg0.5 alaşımlarında bu değer 164 MPa ve 184 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerçek çekme testlerinden elde edilen akma dayanımı değerlerine bakıldığında, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği sonuçlarına benzer şekilde, en yüksek akma dayanımına AlSi9Mg0.5 alaşımlı jantta, jant kolu bölgesinde 106,44 MPa, dış ve iç flanş bölgelerinde ise sırasıyla 103,44 ve 96,76 MPa olarak erişilmiştir. Ayrıca, simülasyon sonuçlarında olduğu gibi gerçek çekme testi sonuçlarında da AlSi5Mg0.3 alaşımı, 80 MPa sınır akma değerine ulaşamamıştır. İlgili alaşım jant kolunda 78,84 MPa, dış ve iç flanş bölgelerinde ise sırasıyla 74,32 ve 73,12 MPa akma dayanımı sergilemiştir.

- Öte yandan, çekme testi sonuçlarından elde edilen, alüminyum döküm alaşımlı jantlar için bir diğer önemli mekanik özellik olan uzama miktarı değeri ise, döküm simülasyon programının bu değer için yüksek sapma ile çalışmasından kaynaklı olarak, hesaplamalı ve gerçek verilerin karşılaştırılmasında bugünkü teknoloji ile kullanılamamaktadır. İlerleyen zamanlarda döküm simülasyon yazılımının yeteneklerinin ve hesaplama teorilerinin geliştirilmesiyle uzama miktarı analizlerinin yapılması, elbette mümkün olacaktır.
- Doktora tez çalışmasının neticesinde alüminyum dökümde alaşım geliştirme çalışmalarında hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarından faydalanılabileceği açıkça söylenebilmektedir. Mevcutta ticari olarak kullanılan ilgili yazılımların alüminyuma dair sahip oldukları veri tabanları, ötektik altı kompozisyona sahip alüminyum-silisyum döküm alaşımları için mevcut sürümlerindeki halleri ile büyük ölçüde yeterli olmaktadır. Ayrıca, hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından döküm simülasyonu programlarına malzeme verisi aktarılması gelişen teknoloji ile mümkün hale gelmiş ve bu çalışmada başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bütünleşik

hesaplamalı malzeme mühendisliği olarak adlandırılan bu yeni teknolojik olgu sayesinde, alüminyum jant üretiminde alçak basınçlı döküm simülasyonları alaşımlara ait gerçek veri bankaları ile çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlarda gerçek değerlere çok küçük sapma miktarları ile yaklaşılmıştır.

- Bir diğer deyişle, bu çalışma ile, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları ile sanal-simüle ortamda elde edilen, alaşımların mekanik ve mikroyapısal özelliklerine ait verilerin, endüstriyel koşullarda dökümleri gerçekleştirilen jantlardan alınan numunelerin laboratuvar ortamında bir dizi teste tabi tutulması ve karakterize edilmesi sonucu elde edilen gerçek verilerle kıyaslanabilmesi ve sonucun seri üretime geçilmeden evvel alaşım tasarımı ve proses optimizasyonu çalışmalarında kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Özellikle akma-çekme dayanımı, sertlik, dendrit kolları arası mesafe ölçümleri, sıcaklığa bağlı fiziksel özelliklerin değişimleri, mikroyapısal özellikler, faz analizi ve katılaşma karakteristikleri bakımından, bütünleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımlarından jant üretiminde faydalanılarak, akademik ve endüstriyel alanlarda araştırma geliştirme çalışmaları yürütülebilir.

Doktora tez çalışmasında örnek olarak seçilmiş olan AlSi5Mg0.3, AlSi5Mg0.5, AlSi5Mg0.7 ve AlSi7Mg0.3 alaşımları dışında kalan kompozisyonların ısıtıl işlem özellikleri incelenmemiştir. Son yıllarda gelişen farklı hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılım programları ile bilgisayar destekli olarak ortamda doktora tez çalışmasında yer alan alaşımların tamamına ısıtıl işlem uygulanarak sonuçların gerçek ısıtıl işlemli alaşımlarınki ile karşılaştırılması, ilgili çalışmaya başka bir teknolojik boyut kazandıracaktır.

KAYNAKLAR

- Açıci, N. (2018). *A356 ve A380 alaşımlarının eğimli soğutucu ile dökümü ve yarı katı dövme işlemi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ashrafi, E. A., Hasan A. ve Rashed, H. (2013). Effect of Cu in Al-Si alloys with phase modelling. *International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering*, 583-588.
- Aslandoğan, R. (2009). *Dökümde akıcılık ve akıcılığı etkileyen faktörlerin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Allison, J. (2011). Integrated computational materials engineering: A perspective on progress and future steps. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 63(4), 15-18.
- Alfrey, A. C. (1983). Aluminum. *Advances in Clinical Chemistry*, 23, 69-91.
- ASM Handbook. (1992). *Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials*. ASM International Committee, Materials Park, Ohio.
- Anantha N, L., Samuel, F. H. ve Gruzleski, J. E. (1994). Crystallization behavior of iron containing intermetallics compounds in 319 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25, 1761-1773.
- Andersson, J.O., Helander, T., Höglund, L., Shi, P. ve Sundman, B. (2002). Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science. *Calphad*, 26(2), 273-312.
- Anyalebechi, P. N. (1995). Analysis of the effects of alloying elements on hydrogen solubility in liquid aluminum alloys. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 33(8), 1209-1216.

Apelian, D., Sigworth, G. K. ve Whaler, K. R. (1984). Assessment of grain refinement and modification of Al-Si foundry alloys by thermal analysis. *American Foundry Society Transactions*, 92, 297-307.

ASTM E8/E8M-16 Standard test methods for tension testing of metallic materials.

ASTM E10-15 Standard test method for Brinell hardness of metallic materials.

Backerud, L. (1983). How does a good grain refiner work?. *Light Metal Age*, 6-12.

Başer T. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.

Bedir, F. ve Delikanlı, K. (2006). Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde uygulanılabilirliği ve mekanik özellikleri. *Mühendis ve Makina*, 47(555), 37-49.

Birol, Y. (2017). Melt treatment of Al-Si foundry alloys with B and Sr additions. *Journal of Material Science*, 52, 6856-6865.

Birol, Y. (2012). Effect of silicon content in grain refining hypoeutectic Al-Si foundry alloys with boron and titanium additions. *Materials Science and Technology*, 28(4), 385-389.

Bolzoni, L. ve Hari B. N. (2019). Towards industrial Al-Nb-B master alloys for grain refining Al-Si alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5631-5638.

Bonollo, F., Urban, J., Botter, M. ve Bonatto, B. (2005). Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: A technical and economical benchmark. *La Metallurgia Italiana*, 6, 23-32.

- Bozkurt, E. (2019). *Investigation of cooling design systems in low pressure casting*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Campbell, J. (2003). *Castings* (2. Baskı). Londra: Butterworth-Heinemann.
- Cho, K. T., Yoo, S., Lim, K. M., Kim, H. S. ve Lee, W. B. (2011). Effect of Si content on surface hardening of Al–Si alloy by shot peening treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 265–270.
- Cui, J. ve Roven, H. J. (2010). Recycling of automotive aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(11), 2057–2063.
- Cui, X. L., Wu, Y. Y. ve Liu, X. F. (2014). Preparation of a novel Al-3B-5Sr master alloy and its modification and refinement performance on A356 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 906-911.
- Cole, G. S., Cissé, J., Kerr, H. W. ve Bolling, G. F. (1972). Grain refinement in aluminum and aluminum alloys. *American Foundry Society Transactions*, 80, 211-218.
- Çolak, M. (2009). Alüminyum dökümlerde tane inceltme. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 11-17.
- Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Aluminum and aluminum alloys*. Amerika Birleşik Devletleri: ASM International.
- Doğan A., Kenar O., Erdil B. ve Altuncu E. (2018). Effect of different air venting designs on porosity in high pressure aluminum die casting process. *19th International Metallurgy and Materials Congress*, İstanbul.

- Du, X., Gao, T., Wu, Y. ve Liu, X. (2014). Effects of copper addition on the in-situ synthesis of SiC particles in Al–Si–C–Cu system. *Materials and Design*, 63, 194-199.
- EN ISO 6892-1:2019 Metallic materials, tensile testing method of test at room temperature.
- Easton, M. A. ve Stjohn, D. H. (1999). Grain refinement of aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 13-16.
- Easton, M. A. ve Stjohn, D. H. (2000). The partitioning of titanium during solidification of aluminum alloys. *Material Science and Technologies*, 16(9), 993-1000.
- Erçetin, A., Aslantaş, K., ve Perçin, M. (2018). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tungsten-bakır kompozit malzemelerin mikro frezelenmesi: Kompozisyon ve sinterleme sıcaklığının etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1369-1381.
- Eskin, D., Alba-Baena, N., Pabel, T. ve Silva, M. (2014). Ultrasonic degassing of aluminium alloys: Basic studies and practical implementation. *Materials Science and Technology*, 31(1), 79-84.
- Fayomi, O. S. I., Popoola, A. P. I. ve Udoeye, N. E. (2017). Effect of alloying element on the integrity and functionality of aluminium-based alloy. *Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*, 13, 243-262.
- Fortini, A., Merlin, M., Fabbri, E., Pirletti, S. ve Garagnani, G. L. (2016). On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy. *Procedia Structural Integrity*, 2, 2238-2245.

Gökçe, B. ve Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.

Güven, E. A. (2014). *Alüminyum alaşımının yarı katı halde ekstrüzyonu ve mikroyapı incelemeleri*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

Hekimoğlu, A. P. ve Turan, Y. E. (2019). Çinko oranının Al-(5-50)Zn alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 16-25.

Hasırcı, H. (2017). Alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretimin avantajları, *1.Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Bilim Kongresi*, Antalya.

Hwang, J. Y., Doty, H. W. ve Kaufman, M. J. (2008). The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys. *Material Science and Engineering A*, 488, 496-504.

Işık, S. B., Zeren, M., ve Atamay, K. (2020). Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum alaşımlı otomobil jant üretiminin simülasyonu. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 125-132.

ISO/IEC 17025 Standart testing and calibration laboratories.

Ji, S., Yang, W., Gao, F., Watson, D. ve Fan, Z. (2013). Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si diecast alloys. *Materials Science and Engineering A*, 564, 130-139.

JMatPro. *Malzeme özellikleri için uygulama yazılımı*. 01.11.2021, www.jmatpro-tr.com.

Kara, A., Çubuklusu, H. E., Topçuoğlu, Ö. Y., Çe, Ö. B., Aybarç, U. ve Kalender, C. (2017). Alüminyum alaşımlı jantların tasarım ve ağırlık optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 23(8), 957-962.

Kaufman, J. G. ve Rooy, E. L. (2004). *Aluminum alloy castings: Properties, processes and applications*. Amerika Birleşik Devletleri: ASM International.

Kenar, O. (2019). *Yüksek basınçlı döküm prosesi ile üretilen alüminyum otomotiv parçalarında kalıp tasarım değişikliklerinin parça döküm kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Lazic, Z. R. (2004). *Design of experiments in chemical engineering a practical guide*. Almanya: Wiley-Vch.

Lee, J. G. (2017). *Computational materials science an introduction* (2. Baskı). New York: CRC Press.

Lee, C. (2016). Effect of Ti-B addition on the variation of microporosity and tensile properties of A356 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 668, 152-159.

Liao, Y. (2006). *Practical electron microscopy and database*. 21 Haziran 2021, <https://www.globalsino.com/EM/>.

Lu, H. T., Wang, L. C. ve Kung, S. K. (1981). Grain refining in A356 alloys. *Journal of Chinese Foundryman's Associations*, 29, 10-18.

Lumley, R. (2011). *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Oxford: Wood Publishing Limited.

Magmasoft Software, 28.11.2021, <https://www.magma-soft.com.tr/en/>

- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A. ve Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering A*, 280(1), 37-49.
- Nam, S. ve Lee, D. H. (2012). The effect of Mn on the mechanical behavior of Al alloys. *Metals and Materials International*, 6(1), 13-16.
- Ovrutsky, A. M., Prokhoda, A. S. ve Rasshchupkyna, M. S. (2004). *Computational materials science, computer modeling of physical phenomena and processes*. Amerika Birleşik Devletleri: Elsevier.
- Önel, K., Dokumacı, E., Eken, C., Çubuklusu, E. H., Aybarç, U., Çe, Ö. B., ve diğer. (2014). Alüminyum gaz giderme işleminde ultrasonik yöntemin kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 21(56), 667-672.
- Özer, H. (2012). *Alüminyum alaşımlarının sürekli dökümünde kullanılan hidrojen gaz giderme sistemi parametrelerinin optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Puga, H., Barbosa, J., Seabra, E., Ribeiro, S. ve Prokic, M. (2009). New trends in aluminium degassing – A comparative study. *4th International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials*, Hamburg.
- Pulat, D., Altubay, M., Erzi, E., Yüksel, Ç. ve Dispinar, D. (2014). Alüminyum geri dönüşümünde verimlilik ve akışkanlığın incelenmesi. *15. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 905-909.
- Ravi, K. R., Pillai, R. M., Amaranathan, K. R., Pai, B. C. ve Chakraborty, M. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 456(1-2), 201-210.

- Reddy, S. M. ve Reddy, A. C. (2013). Studies on tool wear, cutting forces and chip morphology during high-speed milling of Al-Si-Mg-Fe alloys. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 2(8), 1987-1995.
- Schäfer, M. (2006). *Computational engineering-introduction to numerical methods*. Berlin: Springer-Verlag.
- Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. ve Chen, D. L. (2016). Effect of Cr, Ti, V and Zr micro-additions on microstructure and mechanical properties of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 2396-2409.
- Shih, T. S. ve Weng, K. Y. (2005). Effects of degassing and fluxing on the quality of Al-7%Si and A356.2 alloys. *Material Transactions*, 46, 263-271.
- Shih, T. S. ve Weng, K. Y. (2004). Effect of a degassing treatment on the quality of Al-7Si and A356 melts – degassing diffusers. *Materials Transactions*, 45, 1852-1858.
- Sigworth, G. K. ve Kuhn, T. A. (2007). Grain refinement of aluminum casting alloys. *International Journal of Metalcasting*, 1, 31-40.
- Sigworth, G. K. (1984). The grain refining of aluminum and phase relationships in the Al-Ti-B system. *Metallurgical Transactions A*, 15, 277-282.
- Sözbiç, N., Ateş, A. ve Akçıl, M. (2016). Alüminyum cürufundan çelik endüstrisi için flaks üretimi. 3. *Uluslararası Çevre ve Ahlak Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 27-32.
- Stadler, F., Antrekowitsch, H., Fragner, W., Kaufmann, H., Pinatel, E. R. ve Uggowitzer, P. J. (2013). The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys. *Materials Science and Engineering A*, 560, 481-491.

Şenel, M. C. ve Gürbüz, M. (2020). Mikron altı boyutlu alümina katkısının ve soğuk deformasyon işleminin üretilen alüminyum kompozit yapının mekanik özellikleri ve mikroyapısına etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1) 76-85.

Thermo-Calc Software. *Computational materials engineering*, 01.11.2021, www.thermocalc.com.

Thornton, K., Nola, S., Garcia, R. E., Asta, M. ve Olson, G. B. (2009). Computational materials science and engineering education: A survey of trends and needs, *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 61(10), 12-17.

Thornton, K. (2009). Computational materials science and engineering education: A survey of trends and needs. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 61, 12-18.

Timpel, M., Wanderka, N., Schlesiger, R., Yamamoto, T., Lazarev, N., Isheim, D., ve diğer., (2012). The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys. *Acta Materialia*, 60(9), 3920-3928.

Timelli, G., Callari, D. ve Rakhmonov, J. (2016). Influence of process parameters and Sr addition on the microstructure and casting defects of LPDC A356 alloy for engine blocks. *Journal of Material Science and Technology*, 32(6), 515-523.

Tiryakioğlu, M. (2020). The effect of hydrogen on pore formation in aluminum alloy castings: myth versus reality. *Metals*, 10(3), 368.

Tsumura, Y. (1957). On the theory of modification of aluminium-silicon alloys. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 21(2), 69-83.

- Türker, E. (2005). *Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dökümünde rafinasyon yöntemlerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Vatansever, F., Ertürk A. T. ve Karabay, S. (2018). Alüminyum-Silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin T6 ısıt işlemleri ile iyileştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 797-803.
- Vispute P. ve Chaudhari D. (2017). Utilizing flow simulation in the design phase of a casting die to optimize design parameters and defect analysis. *International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing Materials Today*, 4, 9256-9263.
- Walek, J., Michaleki K., Tkadlecková, M. ve Saternus, M. (2011). Modelling of technological parameters of aluminium melt refining in the ladle by blowing of inert gas through the rotating impeller, *Metals*, 11, 284-298.
- Warke, V. S., Shankar, S., ve Makhlof, M. M. (2005). Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminum cleansing by the rotating impeller degasser - Part II. removal of hydrogen gas and solid particles, *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 112-118.
- Woycik, G. G. (2017). *Low-pressure metal casting* (15. Baskı), Amerika Birleşik Devletleri: ASM Handbook.
- Yang, Y., Zhong, S. Y., Chen, Z., Wang, M., Ma, N. ve Wang, H. (2015). Effect of Cr content and heat-treatment on the high temperature strength of eutectic Al-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 647, 63-69.
- Yavuz, H. (2019). *Investigation of the cooling system efficiency in aluminum low pressure die casting*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir.

Ye, H. Z. (2003). An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12(3), 288-297.

Yıldırım, M. ve Özyürek, D. (2013). The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. *Materials and Design*, 51, 767-774.

