



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



**OTOMOTİV JANT KALIPLARINDA, ALÇAK  
BASINÇLI DÖKÜM SIRASINDA KALIP KESİT  
KALINLIKLARININ ISI TRANSFERİNE VE  
KALIP DÖKÜM PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

ALİ UZUNCA

Makine Mühendisliği

İzmir  
2023

T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**OTOMOTİV JANT KALİPLERİNDE, ALÇAK  
BASINÇLI DÖKÜM SIRASINDA KALIP KESİT  
KALINLIKLARININ ISI TRANSFERİNE VE KALIP  
DÖKÜM PERFORMANSINA ETKİSİ**

ALİ UZUNCA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan GÜRLEK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2023





# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Otomotiv Jant Kalıplarında, Alçak Basıncılı Döküm Sırasında Kalıp Kesit Kalınlıklarının Isı Transferine ve Kalıp Döküm Performansına Etkisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

21 / 08 / 2023

Ali-UZUNCA



**ÖZET****OTOMOTİV JANT KALIPLARINDA, ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM  
SIRASINDA KALIP KESİT KALINLIKLARININ ISI  
TRANSFERİNE VE KALIP DÖKÜM PERFORMANSINA ETKİSİ**

UZUNCA, Ali

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan GÜRLEK

Ağustos 2023, 94 sayfa

Alüminyum alaşımlı metal malzemeler günlük hayatta çok fazla kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanlarından bir tanesi de araç jantlardır.

Jant üretiminin başlıca yöntemlerinden olan alçak basınçlı döküm prosesi pek çok farklı parametreden oluşmaktadır. Karşımıza çıkan parametrelerin pek çoğunu bir arada içeren ve döküm performansına kompleks etkisi olan en önemli bileşen, brüt modelin içinden çıktığı kalıptır. Kalıbı oluşturan her bir kalıp parçasının, döküm prosesi ve parametreleri üzerinde direk etkisi bulunmaktadır. Bu etkiye sebep olan kalıp parça özelliklerinden bir tanesi de kalıp kesit kalınlıklarıdır. Kalıp kesit kalınlıkları dökümden çıkan ürünün kalitesi, kalıba uygulanan soğuma etkisinin iletilmesi ve yönsel katılaşmanın yönetilebilmesi konusunda oldukça önemlidir, tüm bunlar kesitlerin uygun forma getirilmesiyle daha yönetilebilir hale gelecektir.

Bu tez kapsamında, jant kalıplarında kullanılan kalıp parçalarında en uygun kesit kalınlıklarının sağlanarak, alüminyum döküm alaşımının katılaşması sırasında gerçekleşen ısı transferinin ve döküm performansının incelenmesi yapılmıştır. Çalışmada farklı kalıp kesitleri için ısı transferi hesaplamaları yapılarak, analiz çalışmaları ve simülasyon ortamında birbirleriyle karşılaştırılmalı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışma ile en doğru tasarımın yapılması ve genel bir tasarım girdisinin oluşturulması amaçlanmıştır; çalışma ile farklı varyasyonlar analiz edilerek, termal hesaplamalar ile yapılan tasarımın en uygun tasarım olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Kalıp kesit kalınlığı, LPDC, jant dökümü



**ABSTRACT****THE EFFECT OF DIE SECTION THICKNESS ON HEAT TRANSFER AND DIE CASTING PERFORMANCE DURING LOW PRESSURE CASTING IN AUTOMOTIVE WHEEL DIES**

UZUNCA, Ali

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Dr. Gökhan GÜRLEK

August 2023, 94 pages

Aluminum alloy metal materials contain a lot of use areas, surviving daily. One of these usage areas is car rims.

The low casting process, which is one of the most important methods of wheel production, consists of many different parameters. The most important one, which contains many of the parameters we encounter and has a complex effect on the casting performance, is the mold from which the gross model comes out. Each mold piece that makes up the mold has a direct impact on the casting process and its parameters. One of the heart part features that cause this use is the die section thicknesses. Mold section thicknesses are very important in terms of the quality of the product coming out of the casting, the transmission of the cooling effect applied to the mold and the management of directional solidification. All of these will become more manageable by bringing the mold sections into the appropriate form.

The scope of this thesis is to examine the heat transfer and casting performance during the solidification of the aluminum casting alloy by providing available cross-section thicknesses in the mold parts used in the rim molds. In the study, heat transfer calculations, optimization studies and simulation simulation comparisons were made for different mold sections. The aim of the study was to make the most accurate design and to create a general design input; by analyzing different variations in the study, it has been shown that the design made with thermal calculations is the most suitable design.

**Keywords:** Die section thickness, LPDC, rim casting



## ÖNSÖZ

Bu çalışma, CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş. ile birlikte, alüminyum alaşımlı jant üretimi sektöründe; gelişen teknolojiye ve rekabet şartlarına uygunluk sağlanması gerekliliği vizyonu ile gerçekleştirilmiştir. Çeşitli tesislerde her yıl milyonlarca jant dökümü bu şekilde yapılmaktadır. Üretilen araç jantları çok farklı stillerde olup, oldukça değişkenlik göstermektedir. Üretilen jantların ebatları ise her geçen gün büyümektedir. Artan bu çeşitlilik ve ebat büyümesi üretim sırasında güçlüklerin artmasına sebep olmaktadır. Değişen müşteri talepleri ve rekabet şartlarına uygunluk sağlanması gerekliliği, jant üretiminde yenilikler ve geliştirmeler yapılmasını gerektirmektedir. Ebatlardaki büyüme ve stillerdeki derin farklılıklar mevcut döküm alışkanlıklarına ve kalıp tasarımına farklı bir bakış açısı ile yaklaşmayı gerektirmektedir. Bu tez ile bu gerekliliklere yenilikçi bir katkı sunulması hedeflenmektedir.

Teze başlanma sürecinden, tezin bitişine kadar her aşamada büyük bir özveri ile çalışılmış, bilimsel çalışma metodolisi kullanılarak tez süreci yürütülmüştür. Çalışmada mühendislik yaklaşımıyla, tasarım, optimizasyon ve simülasyon süreçleri yürütülerek, genel geçer tasarım girdileri oluşturulmuştur.

İZMİR

21/08/2023

Ali UZUNCA



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK .....	ii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xviii
TABLolar DİZİNİ.....	xxiv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Jant Tanımı.....	4
2.2. Jantın Yapısı ve Teknik Terimler .....	4
2.3. Jant Üretimi.....	6
2.3.1. Soğuk Şekillendirme ile Jant Üretimi.....	6
2.3.2. Dövme Yöntemi İle Jant Üretimi .....	7
2.4. A.356 Döküm Alaşımı .....	10
2.5. Alçak Basıncılı Dökümde Jant Kalıbı.....	12
2.5.1. Kalıp Malzemesi.....	13

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
2.5.2. Kalıp Tasarımı .....	13
2.6. Jant Dökümünde Yaşanan Hatalar .....	14
2.6.1. Tam Dolmama Hatası .....	15
2.6.2. Soğuk Birleşme Hatası .....	15
2.6.3. Segregasyon .....	16
2.6.4. Döküm Boşluğu Hatası .....	16
2.6.5. Sıcak Yırtılma, Çatlak Hatası .....	17
3. GEREÇ VE YÖNTEMLER .....	18
3.1. Alçak Basıncılı Dökümde Isı Transferi .....	18
3.2. Isı Transfer Şekilleri .....	19
3.2.1. Isı İletimi .....	19
3.2.2. Isı Taşınımı .....	19
3.2.3. Isı Işınımı .....	20
3.3. Isı Yayılımı .....	21
3.4. Sonlu Hacimler Yöntemi .....	22
3.5. Sonlu Farklar Yöntemi ile Isı İletiminin İki Boyutta İncelenmesi .....	23
3.6. Enerji Dengesinin Ağ Yapısında İncelenmesi .....	24
3.7. Bilgisayar Destekli Tasarım .....	26
3.8. Bilgisayar Destekli Analiz .....	26

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
3.9. Kalıp Datasının Bilgisayar Ortamında Hazırlanması .....	27
3.9.1. Yükseltici Tüp .....	28
3.9.2. Seramik Ara Yolluk .....	29
3.9.3. Üst Yolluk .....	29
3.9.4. Filtre .....	29
3.9.5. Sap .....	29
3.10. A356 Alaşımının Katılaşması .....	30
3.10.1. Magmasoft Döküm Simülasyonunda Katılaşma .....	31
3.10.2. Akışın Simülasyonda Matematiksel Modellenmesi .....	32
3.11. Soğuma Teorisi .....	32
3.11.1. Laminer ve Türbilanslı Akış .....	33
3.11.2. Reynold Sayısı .....	33
3.11.3. Nusselt Sayısı .....	34
3.11.4. Biot Sayısı .....	34
3.11.5. Fourier Sayısı .....	34
3.11.6. Prandtl Sayısı .....	35
3.11.7. Mach Sayısı .....	35
4. ÇALIŞMA .....	36
4.1. Farklı Kalıp Kesit Kalınlık Varyasyonlarının Belirlenmesi ve Tasarım Farklılıkları .....	36

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. Brüt Jant Kalınlığı.....	38
4.1.2. Standart Kalıp Kesit Kalınlığı (Feder İnce – Göbek Kalın) .....	38
4.1.3. Jant Kesit Kalınlığına Göre Hesaplanmış Kalıp Kalınlığı.....	40
4.1.4. Standart Ters Kalıp Kalınlığı (Feder Kalın – Göbek İnce) .....	41
4.1.5. 20 mm Sabit Kalıp Kesit Kalınlığı .....	42
4.1.6. Termal Formüllerle Hesaplanmış Kalıp Kesit Kalınlığı.....	43
4.2. Alt Maça Boşaltmaları ve Radüsleri ve Delikler .....	47
4.3. Magmasoft Döküm Simülasyonu .....	47
4.3.1. Geometri ve Tanımlaması.....	48
4.3.2. Örgü Yapısı (Mesh) .....	50
4.3.3. Malzeme Tanımlaması.....	51
4.3.4. Isı Transferi Tanımlaması.....	56
4.3.5. Döküm Simülasyonu Dolu Parametre Tanımlama .....	56
4.3.6. Kalıp Ön Hazırlama .....	57
4.3.7. Kalıp Kapanma Süresi .....	57
4.3.8. Gecikme süresi.....	58
4.3.9. Kalıp Açma Süresi.....	58
4.3.10. Tahliye Süresi .....	58
4.3.11. Optimizasyon.....	59

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5. BULGULAR .....	60
5.1. Optimizasyon Sonuçları.....	60
5.2. Simülasyon Sonuçları .....	61
5.2.1. Porozite Sonuçları.....	61
5.2.2. Katılma Sonuçları.....	64
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	71
TEŞEKKÜR SAYFASI.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	77

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Jant ebat gösterimi (Örmeci, 2021) .....	4
Şekil 2.2 Jant Kesit Görseli (Işık, 2019) .....	5
Şekil 2.3 İmalatı tamamlanmış kasnak (Ercan, 2011).....	6
Şekil 2.4 Sac jant üretim prosesi (Ercan, 2011) .....	7
Şekil 2.5 Dövme jant üretim prosesi (Işık, 2019).....	7
Şekil 2.6 Dövme ile jant üretim yöntemi (Zhang vd., 2014).....	8
Şekil 2.7 Alçak Basınç Tezgâhı (Akıncı, 2005).....	9
Şekil 2.8 Al-Si Faz Diyagramı (Wang vd., 2006) .....	11
Şekil 2.9 Jant kalıbının ana elemanları (Akıncı, 2005) .....	12
Şekil 2.10 Alçak basınç döküm tekniğiyle dökülmüş bir jant (Akıncı, 2005) .....	12
Şekil 2.11 Jant Kalıbı Tanıtım Görseli (Yay, 2021).....	14
Şekil 2.12 Tam Dolmama Hatası Yaşanmış Parça (İştar vd., 2021) .....	15
Şekil 2.13 Soğuk Birleşme Hatası Yaşanmış Parça (İştar vd., 2021).....	15
Şekil 2.14 Mikroyapı Üzerinde Segregasyon Görünümü (Gourlay vd., 2004).....	16
Şekil 2.15 Simülasyon ve X-ray Üzerinde Porozite Görseli (Merlin vd.,2009)....	17
Şekil 2.16 Jant Çatlağının Mikroyapı'da Görünümü (Yamagata vd., 2018) .....	17
Şekil 3.1 İletimle Bir Boyutlu Isı Geçişi (Bergman vd., 2011).....	19
Şekil 3.2 Sıcak Bir Yüzeyden Taşınım İle Isı Transferi (Bergman vd., 2011) .....	20
Şekil 3.3 Koordinat Üzerinde Kontrol Hacmi (Bergman vd., 2011) .....	21

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.4 İki Boyutta Ağ Yapısı (Bergman vd., 2011).....	23
Şekil 3.5 Ağ Noktalarında Sonlu Farklar Gösterimi (Bergman vd., 2011).....	23
Şekil 3.6 İki Boyutta Isı İletimi Sıcaklık ve Isı Akısı Çizgileri (Bergman vd., 2011).....	24
Şekil 3.7 İç Düğüm Noktasının Diğer Noktalar İle İletim (Bergman vd., 2011) ..	25
Şekil 3.8 Simülasyonlarda kullanılan örnek bir kalıp model görseli (Akıncı, 2005) .....	27
Şekil 3.9 Catia ortamında örnek kesit kalıp datası gösterimi (Örmeci, 2021).....	28
Şekil 3.10 Seramik ara yolluk kesit gösterimi (Örmeci, 2021) .....	29
Şekil 3.11 Alaşımın Katılaşmasının Sıcaklık ve Zaman Hal Grafiği (Tüdoksad, 2023).....	30
Şekil 3.12 Fiziksel Temas Yerlerinden Isı Çizgilerinin Hareketi (Velluvakkandi, 2009).....	31
Şekil 3.13 Jet Çarpması Olayını Karakterize Edilmesi (Demircan ve Türkoğlu, 2021).....	33
Şekil 4.1 İrdelenen modelde feder ucunda X'rayde görülen Porozite Görünümü	36
Şekil 4.2 Tüm Kalıp Alt Maça Kalınlık Varyasyon Görünümleri .....	37
Şekil 4.3 Alt Maça Kesit ve Jant Kesit Görünümü .....	37
Şekil 4.4 Brüt Jant Üzerinde Sorunlu Bölge Görünümü .....	38
Şekil 4.5 Standart Alt Maça Tasarımına Ait Kesit Kalınlık Dağılımı.....	39
Şekil 4.6 Standart Alt Maça Tasarımına Ait Bölge Tanımlamaları ve Kalınlık Görünümü .....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 4.7</b> Jant Kesit Kalınlığına Göre Tasarlanmış Maça ve Brüt Jant Kesit Kalınlık Görünümü.....	40
<b>Şekil 4.8</b> Jant Kesit Kalınlığına Göre Hesaplanmış Kalıp Kesitleriyle Tasarlanmış Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü .....	40
<b>Şekil 4.9</b> Uzaklığa Göre Jant Kesit Alan Hesaplama Metodunu Gösteren Temsili Görsel.....	41
<b>Şekil 4.10</b> Standart Ters Kesit Kalınlığına Sahip Maça ve Brüt Jant Kesit Görünümü .....	41
<b>Şekil 4.11</b> Standart Ters Kalıp Kesit Kalınlığına Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü.....	42
<b>Şekil 4.12</b> 20 mm Sabit Kesit Kalınlığına Sahip Maça ve Brüt Jant Kesit Görünümü .....	42
<b>Şekil 4.13</b> 20 mm Sabit Kalıp Kesitine Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü .....	43
<b>Şekil 4.14</b> Termal Kesite Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü ....	43
<b>Şekil 4.15</b> Termal Alt Maça Tasarımına Ait Bölge Tanımlamaları ve Kalınlık Görünümü .....	45
<b>Şekil 4.16</b> Alt Maçada Arka Boşaltma Yapan Bir Kesim Yüzeyi .....	47
<b>Şekil 4.17</b> Magmasoft Kalıp Kesit Görünümü .....	48
<b>Şekil 4.18</b> Magmasoft Programında Malzeme Tanımlama.....	49
<b>Şekil 4.19</b> Magmasoft Döküm ve Kalıp Parçalarının Tanımlanması.....	49
<b>Şekil 4.20</b> Magmasoft Mesh Görünümleri .....	50
<b>Şekil 4.21</b> Mesh Sayısı ve Boyutları .....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.22 AlSi7Mg Isı İletim Değerleri .....	51
Şekil 4.23 AlSi7Mg Isı İletim Grafiği .....	51
Şekil 4.24 AlSi7Mg Sıcaklıklardaki Yoğunluk Değerleri.....	52
Şekil 4.25 AlSi7Mg Sıcaklıklardaki Yoğunluk Grafiği .....	52
Şekil 4.26 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Cp Değerleri .....	52
Şekil 4.27 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Cp Grafiği .....	53
Şekil 4.28 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Entalpi Değerleri.....	53
Şekil 4.29 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Entalpi Grafiği .....	54
Şekil 4.30 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Vizkozite Değerleri.....	54
Şekil 4.31 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Vizkozite Grafiği .....	54
Şekil 4.32 AlSi7Mg Sıcaklık Farklı Termal Genleşme Değerleri.....	55
Şekil 4.33 AlSi7Mg Sıcaklık Farklı Termal Genleşme Grafiği .....	55
Şekil 4.34 Magmasoft Jant ve Kalıp Isı Transferi Tanımlaması.....	56
Şekil 4.35 Simülasyon Tanımlama Arayüzü.....	56
Şekil 4.36 Basınçlandırma Değerleri (Zaman-Basınç) ve Basınçlandırma Grafiği (Zaman-Basınç) .....	57
Şekil 4.37 Kalıp Kapanma Tanımlama Arayüzü.....	58
Şekil 4.38 Kalıp Gecikme Süresi Tanımlama Arayüzü.....	58
Şekil 4.39 Kalıp Açılma Süreleri Tanımlama Arayüzü.....	58

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 4.40</b> Tahliye Süresi Tanımlama Arayüzü.....	59
<b>Şekil 4.41</b> Optimizasyon Arayüzü.....	59
<b>Şekil 5.1</b> Optimizasyon Sonuçları .....	60
<b>Şekil 5.2</b> Optimizasyon Sonuç Tablosu.....	60
<b>Şekil 5.3</b> Porozite Sonuçları .....	62
<b>Şekil 5.4</b> Porozite Değer Karşılaştırması Yapılan Nokta .....	63
<b>Şekil 5.5</b> Aynı Noktadan Alınan Porozite Değerleri .....	64
<b>Şekil 5.6</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (2 min, 6sn) .....	65
<b>Şekil 5.7</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (2 min, 33sn) .....	65
<b>Şekil 5.8</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (2 min, 45 sn) .....	66
<b>Şekil 5.9</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (3 min, 24 sn) .....	66
<b>Şekil 5.10</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (3 min, 45 sn) .....	67
<b>Şekil 5.11</b> Standart ve Termal Kesit Katılaşma Görünüm Karşılaştırmaları (3 min, 51 sn) .....	67



**TABLolar DİZİNİ**

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 1</b> Alüminyum alaşımın LPDC yöntemi ile sınırları (Kaufman ve Rooy, 2004).....	10
<b>Tablo 2</b> A.356 Alaşımın Kütlece Yüzde Kimyasal Kompozisyonu (Güneren, 2019).....	10
<b>Tablo 3</b> A356 Mekanik özellikleri (Işık, 2019) .....	11
<b>Tablo 4</b> A.356 Malzemesinin Termal Özellikleri (Das vd., 2012) .....	11
<b>Tablo 5</b> H13 Kalıp Çeliği % kompozisyonu (Akıncı, 2005) .....	13
<b>Tablo 6</b> Dökme Demir, % kompozisyonu (Akıncı, 2005).....	13
<b>Tablo 7</b> Jant Bölgelerinin Kütle ve Alan Değerleri .....	46
<b>Tablo 8</b> Enerji Eşitlik Tablosu .....	46
<b>Tablo 9</b> Kalıp Kesit Kalınlık Tablosu .....	46



## SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Al	Alüminyum
Al-Si	Alüminyum-Silisyum Alaşımı
Mg	Magnezyum
Si	Silisyum
Sr	Stronsiyum
°F, °C	Fahrenheit, Celcius
W	Watt
T	Sıcaklık
%IACS	International Annealed Copper Standard
HB	Brinell, sertik birimi
Q	Sisteme geçen net ısı miktarı
W	Sistemin yaptığı net iş
h	Isı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
MPa, Gpa	Megapascal, Gigapascal
Re	Reynold Sayısı
Bi	Biot Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
Cp	Özgül Isı
Fo	Fourier Sayısı
Ma	Mach Sayısı
C	Ses Hızı

Kısaltmalar

A356	Alüminyum Alaşımının Ticari Adı
OEM	Orijinal Ürün Üreticisi
DAS	Dendrit Kol Uzunluğu
SDAS	İkincil Dendrit Kol Uzunluğu
LPDC	Low Pressure Die Casting (Alçak basınçlı Döküm)
H13	Kalıp Çeliği





## 1. GİRİŞ

Türkiye’de gelişen otomotiv sektörü, beraberinde belirli bir jant sanayisinin ve jant pazarının oluşmasına yol açmıştır. Ağır sanayi olması dolayısıyla, gelişmiş batılı ülkeler, jant üretiminden ve diğer otomotiv yan sanayi faaliyetlerinden uzaklaşmış ve montaja ağırlık vermişlerdir. Böylece yabancı sermaye ve teknoloji ülkemize yönelmiş ve geçmişi elli yılı bulan jant üretim tesislerinin temelleri atılmıştır. Günümüzde jant üretim sektörü, ondan fazla irili ufaklı şirket ile üretim hacmini ve kalitesini artırarak büyümeye devam etmektedir (Oytaç, 2006).

Jant üretimi yaygın bir yöntem olarak alçak basınçlı döküm yöntemiyle yapılmaktadır. Döküm prosesi oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğundan pekçok problem yaşanmaktadır. Döküm tezgâhlarında jant dökülürken yaşanan sorunlar, jantların karmaşık ve değişken tasarımlardan dolayı her modele özel ayrı bir döküm prosesi oluşturulmasıyla ortaya çıkmaktadır. Döküm prosesi pekçok farklı parametreden oluşmaktadır. Karşımıza çıkan parametrelerin pekçoğunu bir arada içeren ve döküm performansına kompleks etkisi olan en önemli bileşen, döküm parçasının içinden çıktığı kalıptır. Kalıbı oluşturan her bir kalıp parçasının döküm prosesi ve parametreleri üzerinde direk etkisi bulunmaktadır. Bu etkiye sebep olan kalıp parça özelliklerinden bir tanesi de kalıp parça kesit kalınlığıdır. Kalıp kesit kalınlıkları dökümden çıkan ürünün kalitesi, kalıba uygulanan soğuma etkisinin iletilmesi ve düzgün katılaşmanın yönetilebilmesi konusunda oldukça önem arz etmektedir.

Katılaşma, doğası itibariyle oldukça karmaşık bir prosestir. Çünkü katılaşma prosesi tüm transfer olaylarını içerir. Bu olayın iyi anlaşılabilmesi sonucunda birçok döküm parçanın döküm hatalarına sahip olduğu görülebilmektedir. Döküm işlemi ideal şartlarda yapılabilir olsa ve dökülecek parçanın her noktası doğrusal ve eşit bir şekilde soğutulabilseydi hiçbir problem yaşanmayabilirdi. Tabi hiçbir problem yaşamamak için aynı zamanda kalıbın da parçanın büzülürken yapmak istediği tüm hareketlere izin vermesi ve onu hiçbir doğrultuda kısıtlamaması gerekirdi. Ancak gerçekte bu ütopya hiçbir zaman mümkün olamamaktadır. Bu yüzden katılaşma ve döküm prosesinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Çok yakın bir geçmişe kadar birçok dökümhane geleneksel hesaplara dayalı deneme yanılma yoluyla yöntemlerini geliştirme ve döküm hatalarını minimize etme çabasıydı. Bilindiği gibi bilgisayar destekli simülasyon metodları birçok endüstride son ürün üzerinde uygulanarak tasarımlara yön vermektedir. Son yıllarda işlemcilerin ve yazılımların daha da gelişmesiyle çok karmaşık simülasyonlar kabul edilebilir bir zaman içerisinde yapılabilmektedir. Bu noktadan hareketle simülasyon sadece son ürün üzerinde uygulanan bir tasarım aracı olmaktan çıkmakta ve üretim aşamasında da prosesi ve son ürünü iyileştirmede kullanılan bir araç haline gelmektedir (Akıncı, 2005).

Alçak basınçlı döküm literatüründe, proses parametrelerinin seçimi için, önceki araştırmalar esas olarak sayısal simülasyona ve ardından proses parametrelerini optimize etmek için deneysel doğrulamaya dayanmaktadır. Ou ve arkadaşları, A356 alaşımının otomotiv jantlarının üretiminde sıcaklık alanı gelişimini simüle etmek için bir modelleme metodolojisi sunmuş ve geliştirilen

model malzeme üzerindeki gözeneklilik kümelerini tahmin edebilmiştir (Ou vd., 2020). Jant dökümünde sayısal simülasyonlar, deney sayısını azaltmak ve deneylerin verimliliğini ve başarı oranını artırma amacına ulaşmak için döküm süreç optimizasyonu için genel bir yön sağlayabilmektedir (Duan vd., 2020). Üretim tecrübesini dökümün teorik çalışmaları ile birleştiren alçak basınçlı döküm prosesi, dolum prosesi ve katılaştırma prosesi olarak ikiye ayrılmaktadır (Dhisale vd., 2022). Doldurma aşaması esas olarak erimiş metalin akış durumunun simülasyonunu ve deneyini gerektirir. Sıvı metal yerine benzer viskoziteye sahip başka sıvıların kullanılması, sıvı metalin basınç altında dolum sürecini gözlemlemek için daha uygun olabilmektedir. Viswanath ve arkadaşları su modeli deneyleri ve sayısal simülasyonlar yoluyla kalıp dolumu sırasında serbest yüzey akış özelliklerini araştırmıştır (Viswanath vd., 2017). Doldurma basıncı ayarlanarak akış koşulunun etkisi analiz edilmiş ve ardından ısı transferiyle bağlantılı sayısal bir akış modeli geliştirilmiştir. Modele göre, daha iyi performansa sahip bir ürün elde etmek için, dolum işleminin sorunsuz gerçekleşmesini sağlayacak şekilde dolum basıncı uygun şekilde ayarlanabilmektedir (Jadhav vd., 2021). Fiili üretimde, kalıp yapısının çeşitliliği ve karmaşıklığı nedeniyle, dolum prosesinin araştırılması oldukça karmaşıktır (Li vd., 2021). Katılma süreci esas olarak erimiş alüminyumun sıcaklığı ve basıncından etkilenmektedir, üretim ekipmanlarıyla yapılan deneylerle bu süreç optimize edilebilmektedir (Hamasaidd vd., 2019). Bu nedenle çok sayıda araştırmacı katılma sürecindeki süreç parametrelerini optimize etmeyi seçmektedir. (Erzi vd., 2019)

Önceki çalışmalar, genellikle kalıp kesit etkisini sabit tutarak farklı soğutma süreçleri altındaki ürünlerin mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını karşılaştırmış ve analiz etmiştir. Sonuçlar, kalıp soğutma hızının uygun şekilde artırılmasıyla daha ince tane boyutuna sahip alüminyum alaşımlı dökümlerin elde edilebileceğini göstermektedir (Wang vd., 2016). Azqadan ve arkadaşları da soğutma hızının LPDC AZ80 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemiş ve daha düşük bir soğutma hızının gözenek yoğunlaşmasına yol açabileceğini bulmuştur. Düşük sıcaklık ve yüksek dolum oranı koşullarında, daha yüksek bir soğutma hızı oluşturulmuş ve bunun tepe basınç akış stresi üzerinde daha büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Yukarıdaki araştırmaya göre, farklı işlem parametreleri altında jantın LPDC kusurlarının sayısal simülasyon yöntemiyle tahmin edilebilir olduğu ve LPDC'nin uygulanmasını ve geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla döküm kalitesini iyileştirmek için işlem penceresinin oluşturulmasıyla parametrelerin optimize edilebilir olduğu gösterilmiştir (Azqadan vd., 2022). Professor R.D. Pehlke ve arkadaşları tarafından da kalıpta ısı transferi ve kalıcı kalıpta metal arayüz çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada Professor Pehlke ve arkadaşları, jant formuna benzer konik bir parça üzerinde LPDC yöntemiyle ısı transfer katsayısı belirlemek adına bir dizi çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Pehlke vd., 2021).

Şu ana kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların LPDC simülasyonu ve proses parametre optimizasyonu üzerine bir dizi çalışma yürüttüklerini, prosesin farklı temel parametrelerinin jant dökümünü şekillendirmede etkili olduğunu gösterdikleri görülmektedir. Bu çalışmada da önceki araştırmalara dayanarak, LPDC A356 alaşımlı jantın proses parametreleri sayısal simülasyonla optimize edilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kalıp kesit kalınlığı değişken olarak alınmış ve bu değişkenliğin simülasyon sonuçlarında irdelenmesi yapılmıştır.

Yapılan analizler ile en doğru kesit versiyonunun bulunması hedeflenmiştir. Çalışma, gerçekte problem görülen bir jant datası kullanılarak ve fiili dökümde kullanılabilir şekilde seri üretime uygulanabilir kalıp dataları kullanılarak yapılması; minimal feder kalıpları kullanılarak değil de alçak basınçlı döküm prosesinde kullanılabilir büyük bir jant kalıbı olarak kurgulanması yönüyle literatürdeki çalışmalardan farklıdır.

Bu çalışma kapsamında en net ifadeyle, jant kalıplarında kullanılan kalıp parçalarında optimum kesit kalınlıklarının sağlanarak, alüminyum döküm alaşımının katılaşması sırasında gerçekleşen ısı transferinin ve döküm performansının incelenmesi simülasyon ortamında yapılmış ve yapılan çalışma ile en doğru tasarımın yapılması ve genel bir tasarım girdisinin oluşturulması amaçlanmıştır.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Jant Tanımı

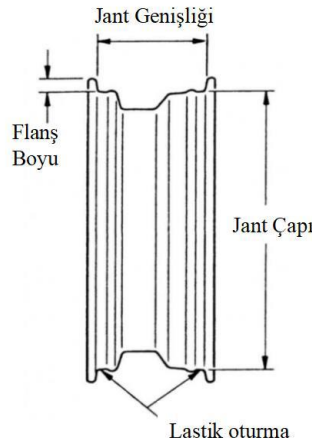
Jantlar taşıtlarda lastikle aks sistemi arasında bulunan, lastiğin takıldığı ve desteklendiği, yük taşıyan ve dönen emniyet parçalarıdır. Emniyet parçaları: araç üzerinde mal ve can güvenliğini direkt etkileyen yasal yükümlülükleri olan parçalardır.

Jantlar ve lastikler aracın zeminle olan ilişkisini sağlayan parçalardır. Araçlar seyir halindeyken, yürüyen aksamla ilgili oluşabilecek herhangi bir aksaklığın oldukça önemli sonuçları olabilir. Bu nedenle, üstün kalite ile üretilmiş, yüksek performansa sahip jant kullanımının önemi ortaya çıkmaktadır.

Bir jantın dayanıklı ve sağlam olması birçok açıdan önemlidir. Bu nedenle, boyut ve tasarım ne olursa olsun, her türlü yol ve kullanım koşuluna dayanıklı, uzun ömürlü, güvenli, aracın motor gücünü ve performansını yola kusursuz biçimde yansıtan jantların kullanılması çok önemlidir (Oytaç, 2006).

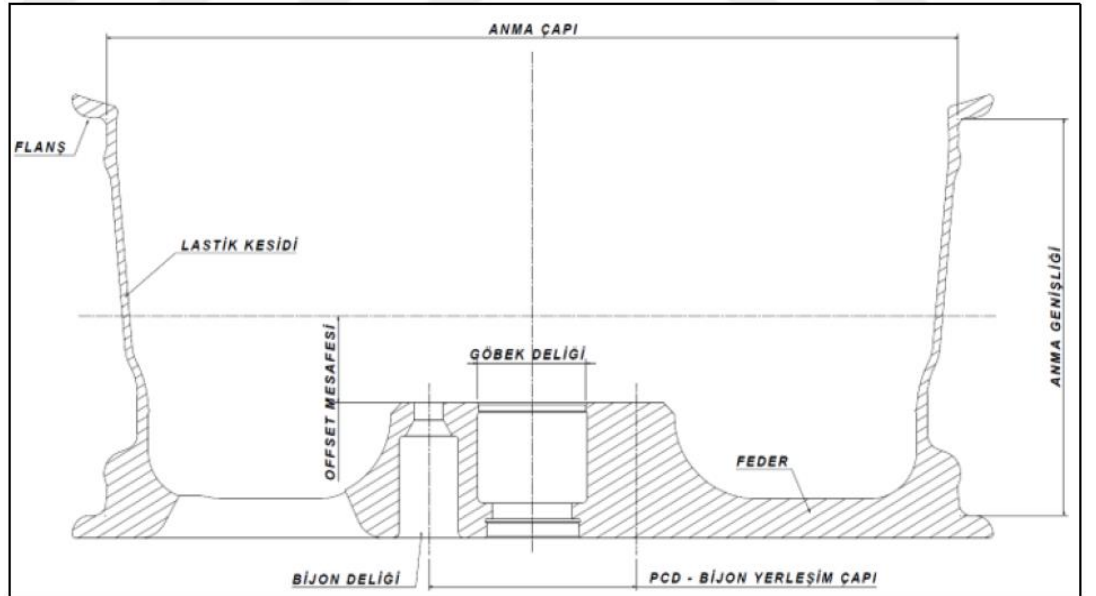
Jantlar, araçta lastiğin iç kısmında çember şeklinde bulunmaktadır. Aracın dış görünüşünde önemli bir görsel unsur olan jantlar doğrudan aks sistemine bağlıdır. Çeşitli malzemelerden (Alüminyum alaşım jant, çelik jant gibi) üretilen jantların araç performansı üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Jant seçimi bu durumdan dolayı büyük öneme sahiptir. Aracın ağırlığına, çekiş gücüne ve temel özelliklerine aykırı olarak seçilen jantlar nedeniyle sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Jantların geometrik şekilleri, offset mesafeleri, ebatları, test ağırlıkları vb. özelliklerine göre aracın vereceği tepkiler (viraj alma, yakıt tüketimi vb.) değişmektedir. Bu sebeple jant seçimleri titizlikle yapılmalıdır (Örmeci, 2021).

### 2.2. Jantın Yapısı ve Teknik Terimler



Şekil 2.1 Jant ebat gösterimi (Örmeci, 2021)

Jantın geometrik yapısı incelendiğinde, dairesel bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Muelaner, 2020). Şekil 2.1’de jant üzerinde temel bölgeler gösterilmiştir. Jant çapı ve jant boyu norm gösterimde kullanılmaktadır (Örmeci, 2021). Jant genişliği, lastiğin janta oturduğu yüzeyin uzunluğunu inç cinsinden ifade eden ölçüdür. Jantların üzerinde markalanmış olan bu değer, jant çapı ile birlikte lastik seçimi için temel referans ölçüleri oluşturur (Oytaç, 2006). Örneğin, jant markalamasında 8x17 şeklinde bir ibare var ise; bu jantın genişliğinin 8” ve jant çapınının 17” olduğunu ifade etmektedir. Bu değerler her araç için farklıdır (Örmeci, 2021). Jant çapı ölçüsü ise lastiğin janta oturduğu yüzeyin çapını inç cinsinden ifade eder. Lastik seçiminde en temel ölçü jant çapıdır. Çünkü lastikler, jant çapı referans alınarak üretilirler. Jant ve lastik seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta: jant ve lastiğin aynı çap değerlerine sahip olup olmadığıdır. Bu ölçülerin yanı sıra; jant karakteristiğini belirten kasnak açısı, lastik topuklarının oturma çapı, tubeless koruması, sübap deliğinin şekli ve ölçüsü, bijon delik çapları, bijon delik çeşitleri gibi diğer ölçüler de jantın kullanım yerine, özelliklerine ve lastik seçimine göre değişiklik gösteren spesifik özellikler arasındadır (Oytaç, 2006). Flanş, jantın lastik için yanıl destek sağlayan kısmıdır (Örmeci, 2021). Lastiğin oturduğu yüzey, lastik yüzeyi; jantın dış görünümünün olduğu kısım, jant stil yüzeyi olarak adlandırılmaktadır. Bu stil yüzeyini oluşturan ve farklı tasarımlara sahip olan kollara ise feder denmektedir. Jantın araca bağlantısı bijonlarla yapılmaktadır (Muelaner, 2020).



Şekil 2.2 Jant Kesit Görseli (Işık, 2019)

Yukarıda şekil 2.2’de gösterilen araç bağlantısında en önemli olan parametrelerden biri offset mesafesidir. Offset, ölçüsü -50 mm ve 70 mm arasında değişiklik gösteren jantın iç göbeğinden jantın tam ortasına kadar olan mesafenin uzunluğudur (Örmeci, 2021).

### 2.3. Jant Üretimi

Jant üretimi otomotiv endüstrisinde üç farklı şekilde üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemler: soğuk şekillendirme, dövme ve alçak basınçlı döküm yöntemleri ile jant üretimleri yapılmaktadır. Bu bölümde alçak basınçlı döküm, dövme ve soğuk şekillendirme yöntemleri ile jant üretimi hakkında bilgi verilecektir.

#### 2.3.1. Soğuk Şekillendirme ile Jant Üretimi

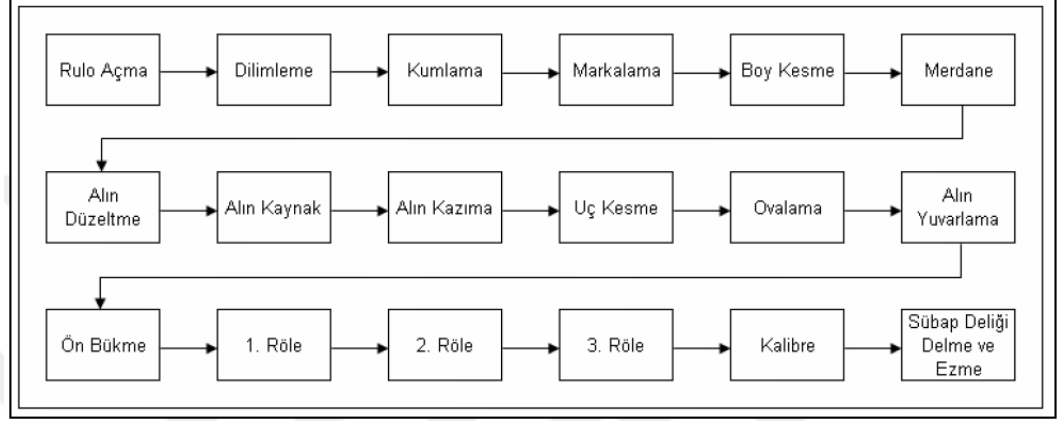
Soğuk şekillendirme yöntemi; günümüzde otobüs, kamyon, iş makinaları, forklift, traktör vb. araçların jant üretim yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemde en sık kullanılan malzemeler çelik saclardır. Üretim süreci bu yöntemle üç ana aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; kasnak üretimi, disk üretimi ve bu parçaların montajlanmasıdır.

Üretimi sırasında, ilk olarak rulo şeklindeki saclar açılarak istenen ölçü ve şekilde kesilir. Ardından bu parçalara kumlama yapılır. Bu şekilde kasnak üretimi için gerekli olan sac hazırlanmış olur. Bu parçalara uygun haddeleme ve alın düzletme işlemi yapılır. Alın kaynak, alın kazıma, uç kesme ve ovalama işlemleri gerçekleştirilir. Daha sonra bu işlemleri tamamlayan parçanın lastik oturma yüzeyinin şeklini aldığı alın yuvarlama ve ön bükme uygulamaları yapılır (Işık, 2019).



Şekil 2.3 İmalatı tamamlanmış kasnak (Ercan, 2011)

Disk üretiminde izlenen süreç, kasnak üretimde gerçekleşen süreç ile aynı adımları izlemektedir. Disk yapmak için kullanılacak malzeme yuvarlak bir malzeme olmalıdır. Disk malzemesine önce soğuk sıvama uygulanır. Bu işlem ardından jant malzemesinin iç yapısında kalıcı deformasyonlar yaratılarak jantın mekanik özelliklerinde iyileşme elde edilmiş olur (Ercan, 2011).



Şekil 2.4 Sac jant üretim prosesi (Ercan, 2011)

Kasnak ve disk üretimleri tamamlandıktan sonra bu iki parçanın birleştirilmesi gerekmektedir. Öncelikle bu iki parça, pres ile sıkı geçme yapacak biçimde birleştirilir ve daha sonra tozaltı kaynak yöntemleri ile birbirine montajlanır. Jant üretilmiş olur (Işık, 2019).

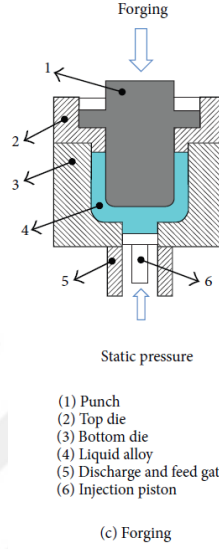
### 2.3.2. Dövme Yöntemi İle Jant Üretimi



Şekil 2.5 Dövme jant üretim prosesi (Işık, 2019)

Dövme ile jant üretim prosesi bir çeşit sıcak şekillendirme yöntemidir. Dövme işlemi ile jant üretiminde alüminyum bloklar kullanılır. Bloklar ortalama 8000 tonluk pres ile 300°C kalıpta temel bir jant şekline dönüştürülür. Şekil 2.5'te dövme jant üretim prosesinin temel adımları gösterilmiştir. Dövme işleminin ardından, mekanik özelliklerin artırılması amacıyla jantlar ısıl işleme tabi tutulur. Talaşlı imalat ile jant lastik kesiti istenen ölçülere getirilir ve stil geometrisi

oluşturulur. Dövme işlemi ile elde edilen jantın mukavemet özellikleri alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen jantlara göre oldukça yüksektir. Jant geometrisinin her bölgesi eşit mukavemet değerine sahiptir (Işık, 2019). Gerekli mukavemet değeri daha az malzeme kullanılarak sağlanabileceği için daha hafif jantlar üretmek mümkündür (Zhang vd., 2014).



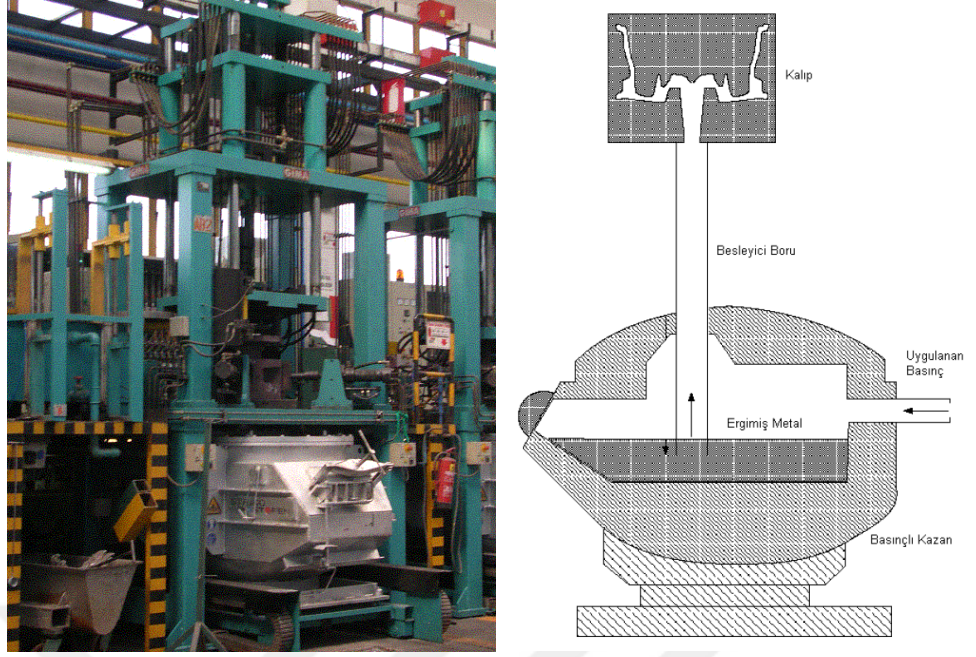
Şekil 2.6 Dövme ile jant üretim yöntemi (Zhang vd., 2014)

### 2.3.3. Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi İle Jant Üretimi

Alçak basınç döküm yöntemi otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle jant, silindir kafaları ve motor bloğu imalatında tercih edilmektedir. Şekil 2.7’de şematik olarak alçak basınç döküm tezgâhı görülmektedir. Dolu işlemi basınçlı kazanda oluşan basınç sebebiyle ergimiş metalin besleyici boruya doğru hareket etmesi, oradan da kalıptaki malzemeye eklenmesi sonucunda gerçekleşmektedir. Uygulanan basınç 1-2 Bar arasındadır. Böylece kalıpta ileri doğru bir doluş gerçekleşmekte ve yukardan aşağıya doğru azalan sıcaklık gradyanları oluşmaktadır ki bu da yönlendirilmiş katılaşmayı sağlamaktadır (Akıncı, 2005).

Basıncın uygulanması ile birlikte besleyici borudan yukarı doğru hareket eden ergimiş metal kalıptaki hava ventillerinden dışarı atılan hava oranıyla orantılı olarak kalıba doğru ilerleyebilmektedir (Duff, 1999).

Daha sonra kalıbı beslemek için uygulanan basınç artırılır ki bu da besleme basıncı olarak isimlendirilir (Akıncı, 2005). Dolu tamamlandıktan sonra sıvı alaşımın katılaşması gerekmektedir. Katılaşma işlemi hızlı ve yönlü bir şekilde olması gerekmektedir. Aksi takdirde jant üzerinde döküm de katılaşmadan kaynaklı metalürjik hatalar oluşabilir. Katılaşma süreci önce iç flanş tarafından başlayıp bijon ve göbek bölgesine ilerleyecek şekilde gerçekleşmelidir (Örmeci, 2021). Katılaşmanın gerçekleşmesiyle birlikte basınç serbest bırakılır ve girişteki fazla sıvı besleyici borudan aşağıya doğru hareket eder. Döküm işlemi başlamadan önce basınçlı kaptaki basınç için basınç- zaman ( $P - t$ ) grafiği oluşturularak tezgâh programlanır (Akıncı, 2005).



Şekil 2.7 Alçak Basınç Tezgâhı (Akıncı, 2005)

Dökümde kaliteyi etkileyen birçok parametre ve sebep yer almaktadır. Bu parametreler: Dökümde kullanılacak alaşım türü, kalıp tasarımı, kalıp soğutmaları, dolum yöntemi ve dolum hızı üretilecek üründe kaliteyi etkileyen önemli parametrelerdir. Ürünün istenilen özelliklerde sağlanabilmesi için bu parametreler arasında optimizasyon sağlanması gerekmektedir (Campbell, 2011).

Alçak basınçlı döküm yönteminin çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Avantajları:

- Karmaşık ve büyük hacimli geometriler bu yöntemlerle üretilebilir.
- Elde edilmek istenen ürüne yakın ürünler üretildiğinden döküm sonrası süreci kısaltmaktadır.
- Seri üretim yapılmak istenen ürünler için uygun bir yöntemdir. Bu sebeple ürün maliyetlerini düşürmektedir.

Dezavantajları:

- Yüksek ısıya ihtiyaç duyulduğu için enerji ihtiyacı çok fazladır.
- Oluşturulan ürünlerde mekanik özellikler konusunda kısıtlamalar yaşanmaktadır.
- Ürünlerin içyapısında gözle göremediğimiz döküm kusurları oluşabilmektedir (Campbell, 2011).

Aşağıda alüminyum alaşımının alçak basınçlı dökümde kullanılması ile elde edilebilecek malzeme özellikleri verilmiştir (Kaufman ve Rooy, 2004).

**Tablo 1** Alüminyum alaşımlarının LPDC yöntemi ile sınırları (Kaufman ve Rooy, 2004)

<b>Çekme Dayanımı</b>	<b>MPa</b>	<b>70-505</b>
<b>Akma Dayanımı</b>	<b>MPa</b>	<b>20-455</b>
<b>Uzama</b>	<b>%</b>	<b>&lt;1-30</b>
<b>Sertlik</b>	<b>HB</b>	<b>30-150</b>
<b>Elektrik iletkenliği</b>	<b>%IACS</b>	<b>18-60</b>
<b>Termal iletkenlik, (W/mK, 25°C'de)</b>	<b>W/m. K</b>	<b>85-175</b>
<b>Yorulma limiti</b>	<b>MPa</b>	<b>55-145</b>
<b>Lineer termal genleşme katsayısı 68-212°F (20-100 °C)</b>	<b>1/°F 1/°C</b>	<b>9,8-13,7 x 10<sup>-6</sup> 17,6-24,7 x 10<sup>-6</sup></b>
<b>Kesme dayanımı</b>	<b>MPa</b>	<b>42-325</b>
<b>Elastik modülü</b>	<b>GPa</b>	<b>65-80</b>
<b>Özgül ağırlık</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>2,57 – 2,95</b>

#### 2.4. A.356 Döküm Alaşımı

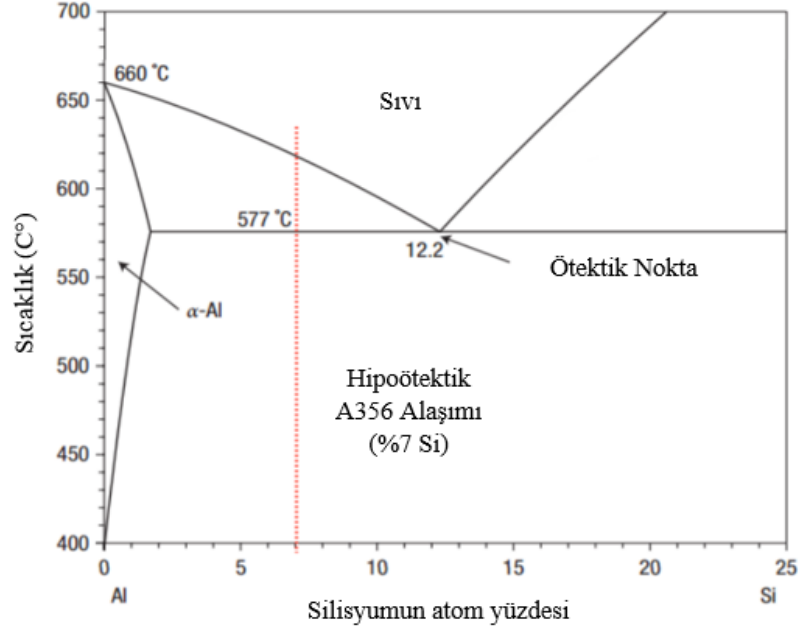
Alüminyum alaşımları otomotiv sektörü ve birçok sanayide tercih edilmektedir. Tercih edilmesinin başlıca sebepleri; mekanik özelliklerinin yüksek olması, ısı iletkenliğinin iyi olması, hafiflik özelliği, yüksek sertliklere ulaşabilmeleri, karmaşık geometrilere sahip ürünleri farklı üretim yöntemleri ile üretilme imkanı sağlamasıdır.

Alüminyum esaslı alaşım olan A.356 alaşımı kütlece yüzde alüminyum içermesinin dışında kütlece oranda yüksek silisyum ve magnezyum içermektedir. A.356 alaşımında Tablo 2’de belirtildiği gibi farklı elementler de yer almaktadır (Kimura ve Nakamoto, 2016).

**Tablo 2** A.356 Alaşımın Kütlece Yüzde Kimyasal Kompozisyonu (Güneren, 2019)

A.356	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Diğer Elementler	Al
	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.25-0.45	0.10	0.20	0.15	Diğer

A.356 döküm alaşım malzemesine ait fiziksel, mekanik özellikler ve termal özellikler Tablo 3 ve Tablo 4 üzerinde; Al-Si faz diyagramı ise Şekil- 2.8 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Al-Si Faz Diyagramı (Wang vd., 2006)

Tablo 3 A356 Mekanik özellikleri (Işık, 2019)

Özellik	Değer	Birim
Özkütle	2,67	gr/cm <sup>3</sup>
Sertlik	70 - 105	HB
Akma dayanımı	165	MPa
Çekme dayanımı	234	MPa
Kopma uzaması	3,50	%
Elastisite modülü	72,4	GPa
Kayma modülü	27,2	GPa
Poisson oranı	0,33	
İşlenebilirlik	50%	%

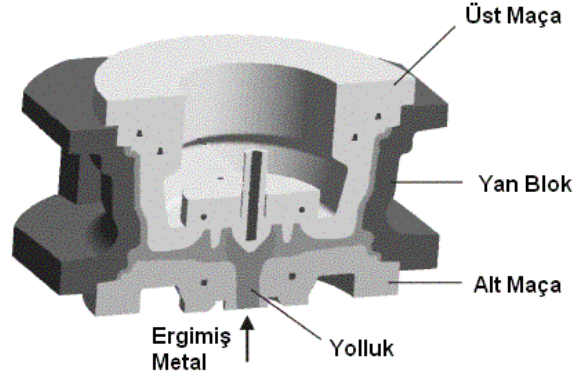
Tablo 4 A.356 Malzemesinin Termal Özellikleri (Das vd., 2012)

Özellik	Değer
Yoğunluk (sıvı) / (kg / m <sup>3</sup> )	2495
Isı iletkenliği (sıvı) / W / (m.K)	160
Özgül ısı / J / (kg.K)	1082
Gizli ısı / (J / kg)	397700
Katılma sıcaklığı / ° C	555(828 K)
Sıvı sıcaklığı / ° C	615(888 K)
Viskozite/Pa.s	0.00113

## 2.5. Alçak Basınçlı Dökümde Jant Kalıbı

Döküm kalıbı, belirlenen alaşımın ergitilmesi ve üretilmek istenen ürünün şeklinin oluşturmak için gerekli parçaların bir araya gelmesi ile oluşan parçalar bütünüdür (Oytaç, 2006).

Alçak basınç döküm yönteminde kullanılan bir jant kalıbının ana elemanları, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, alt maça, üst maça, yan bloklar ve yolluk parçalarıdır (Akıncı, 2005).



Şekil 2.9 Jant kalıbının ana elemanları (Akıncı, 2005)

Alt maça ve üst maça malzemesinde genellikle kalıp çelikleri kullanılırken, yan blok da ise dökme demir tercih edilmektedir. Yolluk malzemesi ise seramiktir. Bilindiği gibi günümüzdeki rekabet koşullarında jantların estetik olarak görünüşleri de önemlidir. Bu karmaşık geometrilerin tasarlanması için 3 boyutlu yazılımlar (Catia, Unigraphics, Solidworks vs.) kullanılmaktadır. Kalıp tasarımlarının da yine bu yazılımlarla yapılması zorunluluğu vardır. Çünkü bu karmaşık geometrilerin elde edilmesinde kullanılacak olan kalıp parçaları da doğal olarak karmaşık geometrilere sahiptirler. Bu parçaların imalatında bilgisayar destekli imalat (Computer Aided Manufacturing) yöntemleri kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da bir jantın kalıptan çıkmış ve işlenmemiş hali görülmektedir (Akıncı, 2005).



Şekil 2.10 Alçak basınç döküm tekniğiyle dökülmüş bir jant (Akıncı, 2005)

### 2.5.1. Kalıp Malzemesi

Dökümde ergimiş alüminyum alaşımın (700°C) dolun esnasındaki ısınma ve katılaşma esnasında soğutma kullanımı ile kalıp sıcaklıkları 400°C-600°C arasında değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlikler altında malzeme seçimi önem taşımaktadır.

Yapılan çalışmada alt maça ve üst maça malzemesi olarak H13 kalıp çeliği, yan blok malzemesi olarak dökme demir, döküm (jant) malzemesi olarak ise AlSi<sub>11</sub>Mg ve AlSi<sub>7</sub>Mg alüminyum alaşımları olarak belirlenmiştir (Akıncı, 2005).

#### 2.5.1.1. Kalıp Çeliği (H13) Malzeme Özellikleri

Kalıp çeliği H13'ün kompozisyonu Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5** H13 Kalıp Çeliği % kompozisyonu (Akıncı, 2005)

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0.41	0.35	1.00	5.13	1.43	1.00

#### 2.5.1.2. Dökme Demir Malzeme Özellikleri

Dökme demir iç yapı kompozisyonu Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6** Dökme Demir, % kompozisyonu (Akıncı, 2005)

C	Mn	Si
3.70	0.15	2.00

#### 2.5.1.3. Döküm Malzemesi (AlSi<sub>7</sub>Mg) Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada AlSi<sub>7</sub>Mg döküm malzemesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Solidus ve likidus sıcaklıkları AlSi<sub>7</sub>Mg için 556 –590 °C'dir (Akıncı, 2005).

### 2.5.2. Kalıp Tasarımı

Bir jantın kalıp tasarımı yapılırken, öncelikle jantın dökümden çıkan hali olan brüt jant tasarımı yapılır. Yapılan brüt jant tasarımı gerekli talaş payları verilerek tamamlanır. Brüt jant tasarımından sonra kalıp maçaları tasarlanır. Üretilmesi istenen jant modeline göre kalıp tasarımları değişkenlik göstermektedir.

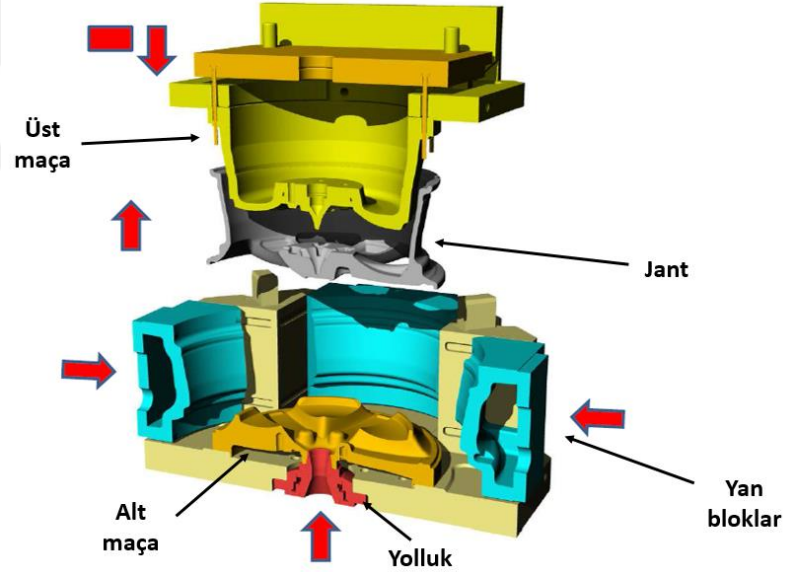
Kalıp maçaları tasarlanırken, kalıp parça kesit kalınlıkları yüksek önem taşımaktadır. Kalıp kesit kalınlıkları, jantın modeline, stiline ve ebatına göre değişkenlik göstermektedir. Bunun sebebi, üretim aşamasında madenin dolunu sırasında kalıp içerisinde her yerin aynı sıcaklıkta olmamasıdır.

Kesit kalınlıkları sıcak tutulmak istenen bölgelerde diğer bölgelere göre daha ince kesit, hızlı soğutulması gereken yerlere ise daha kalın kalıp kesit kalınlıkları olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Üretimde yönlü katılaşmanın sağlanmasında kalıp kesit kalınlıklarının yanı sıra soğutma grupları da yüksek önem taşımaktadır. Dolumu tamamlanmış kalıp üzerinde yönlendirilmiş katılaşmaya sağlamak için soğutmalar kullanılmalıdır. Soğutma işlemleri hava veya su ile yapılmaktadır. Soğutma gruplarının yerleştirilmesi ve sayısı her modelde değişkenlik göstermektedir.

Jantın dökümden sonra kalıptan ayrılabilmesi gerekmektedir. Bu sebeple tasarım aşamasındayken gerekli toleranslar ile jant üzerinde çıkma açıları verilmelidir. Üretimi etkileyen ve kalıp tasarımının önemli olduğu bir başka konu ise termal kaynaklı genişlemedir. Kalıp tasarımı sırasında tasarlanan brüt jant modelinde genişleme payı verilmelidir.

Kalıp sürekli kullanılan türden kalıp olduğu için kalıp ömrü de kalıp tasarım açısından önem arz etmektedir. Kalıp seri üretimde sürekli kullanıldığı için kalıp maçaları devamlı ısınma ve soğumaya maruz kalmaktadır, bu durumdan kaynaklı olarak hızlı sıcaklık değişimi görmektedir. Bu durum kalıp ömrünü etkilemektedir (Velluvakkandi, 2009).



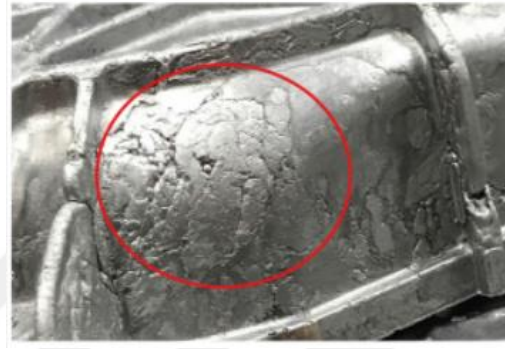
Şekil 2.11 Jant Kalıbı Tanıtım Görseli (Yay, 2021)

## 2.6. Jant Dökümünde Yaşanan Hatalar

Alçak basınçlı döküm tezgâhlarında alüminyum esaslı alaşımların dökümünde çeşitli döküm hataları meydana gelmektedir. Bu hataların türlerine göre sebep etkenleri de çeşitlilik göstermektedir (Duff, 1999). Döküm boşluğu, çekinti (porozite), sıcak yırtılma ve çatlak oluşumu, soğuk bölge kaynaklı dolum eksikliği, genişlemeye bağlı çarpılma hataları, segregasyon ve soğuk birleşme oluşabilecek bazı hata türlerindedir (Akıncı, 2005).

### 2.6.1. Tam Dolmama Hatası

Dolum sırasında kalıp içerisindeki hava ventillerinin yeterli olmaması veya yanlış dizilmesi durumunda havanın tahliye edilememesi veya madenin kalıp içinde bazı bölgelerinde düşük sıcaklık kaynaklı erken katılaşması ya da ancak belli bir noktaya kadar yükselebilmesi sonucu kalıp tam doldurulamamaktadır. Bu durum için soğuk kalan bölgeleri önlemek için kalıp kesitleri tekrar revize edilmelidir (Akıncı, 2005).



Şekil 2.12 Tam Dolmama Hatası Yaşanmış Parça (İştar vd., 2021)

### 2.6.2. Soğuk Birleşme Hatası

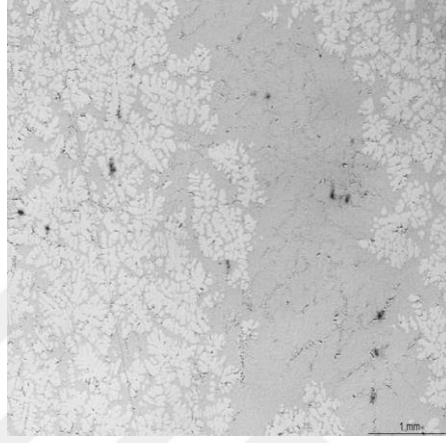
Kalıp üzerinde tasarımdan gelen yanlış bir kurguyla soğutma gruplarının yanlış konumlandırılması ve döküm parametrelerinden kaynaklı olarak kalıp sıcaklığının düşmesi sebebiyle veya dolum sırasında aynı bölgenin iki farklı yerden doldurulması sebebiyle bu hata türü görülebilmektedir. Bu durumlarda kalıpta o bölgenin sıcaklığının artırılması gerekmektedir. Bunun için kalıba elyaf eklenmesi, soğutma gruplarında ısı transferinin düşürülmesi veya soğutma parametrelerin değiştirilmesi gibi çalışmalar yapılabilir (Kaya ve Alaykırın, 2019).



Şekil 2.13 Soğuk Birleşme Hatası Yaşanmış Parça (İştar vd., 2021)

### 2.6.3. Segregasyon

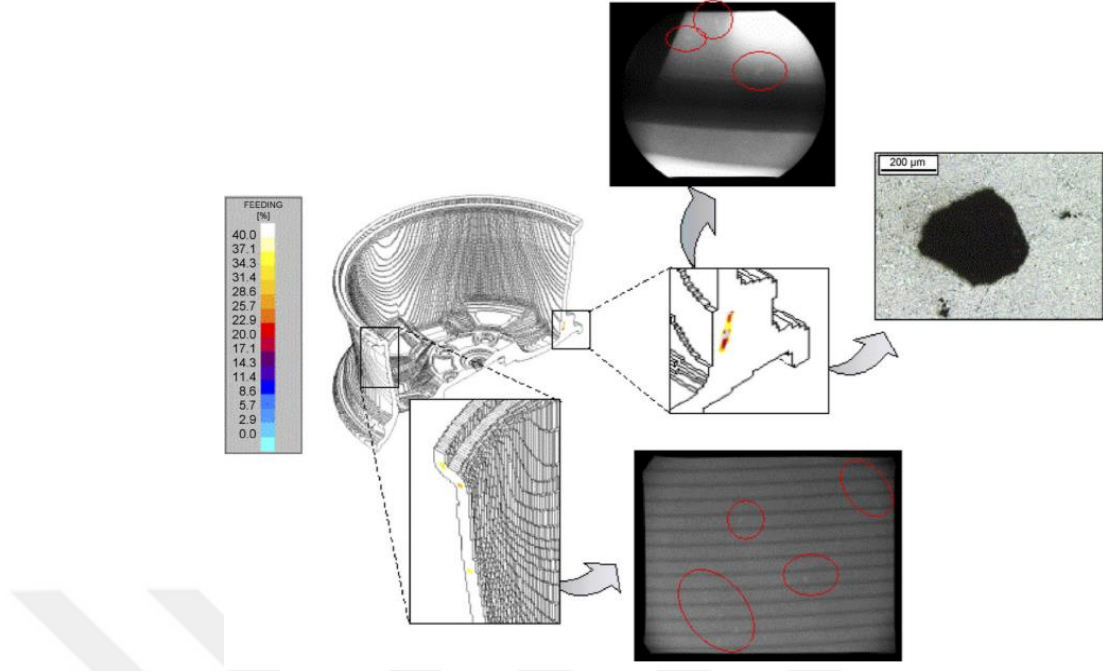
Dökümde kullanılan alüminyum alaşım malzemesinde, farklı sıcaklıklardan kaynaklı olarak kalıp içerisinde yüzdesel farklılıklar görülebilmektedir. Bu durum dökümde segregasyon hatası olarak adlandırılmaktadır. Kalıbın fazla ısınması segregasyon olayını arttırmaktadır.



Şekil 2.14 Mikroyapı Üzerinde Segregasyon Görünümü (Gourlay vd., 2004)

### 2.6.4. Döküm Boşluğu Hatası

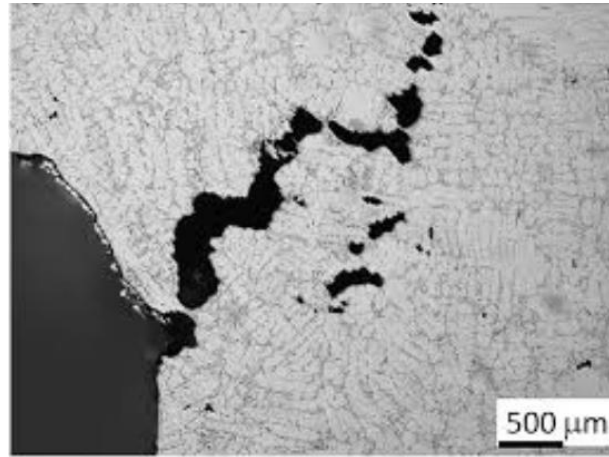
Kalıbın dolumu sırasında türbülanslı akım oluştuğunda ergimiş metalin yüzeyindeki oksit ve nem tabakası kıvrılarak ergimiş metalin içerisinde hapsolmakta ve bunlarda döküm boşluklarına sebep olabilmektedirler. Aslında akışkanın besleyici borudaki hareketi sırasında türbülanslı akışlar oluşmaktadır. Bunların oluşturacağı sorun kalıbın girişine filtre takılarak ortadan kaldırılmaktadır. Ancak kalıbın içerisindeki türbülans sonucu ergimiş metal içerisinde hapsolan oksit ve hava kabarcıklarını dışarı atmak mümkün olmamaktadır. Bunları engellemenin yolu, akışkan akımını belirli bir hızın altında tutabilmekten geçmektedir ki, bunun pratikte uygulanması çok zordur. LPDC yönteminde hem çevrim zamanını azaltmak hem de yönlendirilmiş katılaşmayı sağlamak için genellikle kalıbın dışında hava sirkülasyonu sağlayarak, kalıptan ısı çekecek şekilde soğutma boruları yerleştirildiğine değinmiştik. Bunların yanlış yerleştirilmesi veya çalışma zamanlarının yanlış ayarlanması da çekme hatalarına sebep olmaktadır Döküm boşluğu, çekinti (porozite) görülmemesi için soğutmaların jantın ısı miktarının arttığı yerlerde daha etkin kullanılması gerekmektedir. Bu hata tipini önlemek için döküm alaşımının kalıp kesitleri ve soğutma grupları ile yönlendirilmiş katılaşması sağlanmalıdır (Akıncı, 2005).



Şekil 2.15 Simülasyon ve X-ray Üzerinde Porozite Görsele (Merlin vd.,2009)

### 2.6.5. Sıcak Yırtılma, Çatlak Hatası

Jant dolumu ve katılma sırasında soğutmalar kaynaklı veya beslemenin erken kesilmesinden kaynaklı olarak, dökümde sıcak yırtılma ve çatlak gözlemlenebilmektedir. Sıcak yırtılma çatlak oluşumu olan bölgelerde katılma başlangıcında meydana gelmektedir. Katılma sırasında soğutma veya besleme kaynaklı farklı gerilmeler oluşması çatlak oluşumunu tetiklemektedir. Bu durumu önlemek için sıcak kalan bölgeler analizlerde tespit edilmeli ve kalıp üzerinde kesit değişikliği, soğutma grubu değişikliği veya üretim parametre değişiklikleri yapılmalıdır (Akhyar vd., 2017).



Şekil 2.16 Jant Çatlağının Mikroyapı'da Görünümü (Yamagata vd., 2018)

### 3. GEREÇ VE YÖNTEMLER

#### 3.1. Alçak Basıncılı Dökümde Isı Transferi

Isı bir enerji çeşididir. İletim, taşınım ve ışıma olmak üzere üç farklı şekilde transferi gerçekleşebilmektedir. Isı transferinin gerçekleşmesi için farklı iki madde veya ortam arasında sıcaklık farkı olmak zorundadır. Transfer bu iki ortam arasında sıcaklık farkı ortadan kalkana kadar devam eder. Isı transferi, termodinamiğin birinci yasası, 'Enerjinin Korunumu Kanunu' ile ilişkilidir (Bergman vd., 2011).

Bu kanunda, sistemin toplam enerjisinin değişmediği ifade edilmektedir. Sistemde olan enerji farklı enerji tiplerine dönüşebilmektedir (Bergman vd., 2011).

$$\Delta E_{st}^{top} = Q - W$$

$\Delta E_{st}^{top}$ : Sistemde depolanan toplam enerji

$Q$ : sisteme geçen net ısı miktarı

$W$ : sistemin yaptığı net iştir.

$$\Delta E_{st} = E_{giren} - E_{çıkan} + E_{üretilen}$$

$\Delta E_{st}$ : Sistemde depolanan ısı ve mekanik enerjiler

$E_{giren}$ : Sistemde giren ısı ve mekanik enerjiler

$E_{çıkan}$ : Sistemden çıkan ısı ve mekanik enerjiler

$E_{üretilen}$ : Sistemde üretilen ısı ve mekanik enerjiler

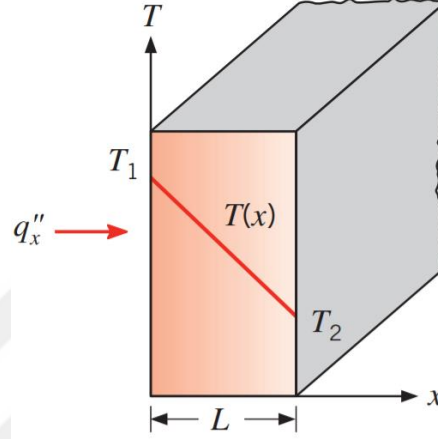
Döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlı jantların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kalıpta ve alışımda gerçekleşen ısınma ve soğuma olayı büyük önem taşımaktadır. Sıvı metalin kalıp içerisini doldurması ve daha sonra sıcaklık farkından dolayı sıcaklığının düşmesi ve katılaşmaya başlaması ısı transferinin kalıp içerisinde yönetilmesiyle ilgilidir. Sıvı alışımda katılaşırken alaşımda içyapısı oluşmaktadır (Li vd., 2021).

Mekanik özelliklerin iyileşmesi, üretim sürecinin hızlandırılması ve döküm hatalarının oluşmasına engel olacak en önemli etkilerden birisi yönlü katılaşma, yani ısı transferinin kalıp içerisinde yönetilmesidir. Dökümde jant kalıbı içerisini kaplayan döküm alaşımı kendi sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olan kalıp ile arasında ısı transferi gerçekleştirecektir. Bu ısı transferi sonucu sıvı olan alaşım katılaşmaya başlayacaktır fakat kalıptaki kesit kalınlıkları istenen yönlü katılaşma için kısıt oluşturmaktadır. Jant üzerinde enerji hesaplamaları yaparak bu hesaplara uygun soğutmalar ve kalıp kesitleri ile yönlü katılaşma ve yüksek mekanik özelliklere sahip jant elde edilebilir. (Akıncı, 2005)

## 3.2. Isı Transfer Şekilleri

### 3.2.1. Isı İletimi

Isı iletimi, bir sistemin temaslı olduğu bir başka sisteme enerji aktarma yöntemidir. Bu enerji transferi sistemler arası sıcaklık farkı ortadan kalkana kadar devam etmektedir (Bergman vd., 2011).



Şekil 3.1 İletimle Bir Boyutlu Isı Geçişi (Bergman vd., 2011)

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

$q''$ : Isı akısı ( $W/m^2$ )

$k$ : Isı iletim katsayısı ( $W/m^2K$ )

$\frac{dT}{dx}$ :  $x$  doğrultusundaki sıcaklık gradyanı

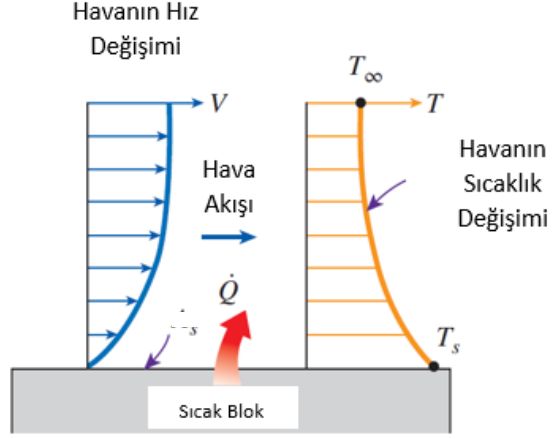
$$q = q'' \cdot A$$

$q$ : Isı miktarı (W)

$A$ : Isı transfer alanı ( $m^2$ )

### 3.2.2. Isı Taşınımı

Taşınım, enerjisi yüksek olan bir sistem ile o sisteme temas halinde olan akışkan (gaz, sıvı) ile arasında gerçekleşen ısı transfer türüdür. Yüzey sıcaklığı ve akışkan sıcaklıklarının farklı olması kaynaklı sıcak blok ve akışkan hava arasında taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Taşınım ile ısı transferinde, akışkanın hareket hızı arttıkça ısı transferi de artar (Bergman vd., 2011).



Şekil 3.2 Sıcak Bir Yüzeyden Taşınım İle Isı Transferi (Bergman vd., 2011)

Akışkanı etkileyen bir unsur olmadan kendi sıcaklığı ile kendinden daha sıcak veya daha soğuk bir ortam arasında gerçekleşen taşınım işlemine doğal taşınım; taşınım ile ısı transferini hızlandırmak ya da yön vermek için dış bir müdahale ile oluşan taşınım türü ise zorlanmış taşınım olarak adlandırılır.

Isı transferi hesaplamalarında taşınım yöntemi ile gerçekleşen ısı transferinin hesaplanmasında Newton Soğuma Kanunu kullanılır (Sazhin vd., 2001).

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

$q''$ : Isı akısı ( $W/m^2$ )

$h$ : Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )

$T_s$ : Yüzey sıcaklığı

$T_\infty$ : Akışkan sıcaklığı

$$q = A_s h(T_s - T_\infty)$$

$q$ : Isı miktarı ( $W$ )

$A_s$ : Akışkanın temas ettiği yüzey alanı ( $m^2$ )

### 3.2.3. Isı Işınımı

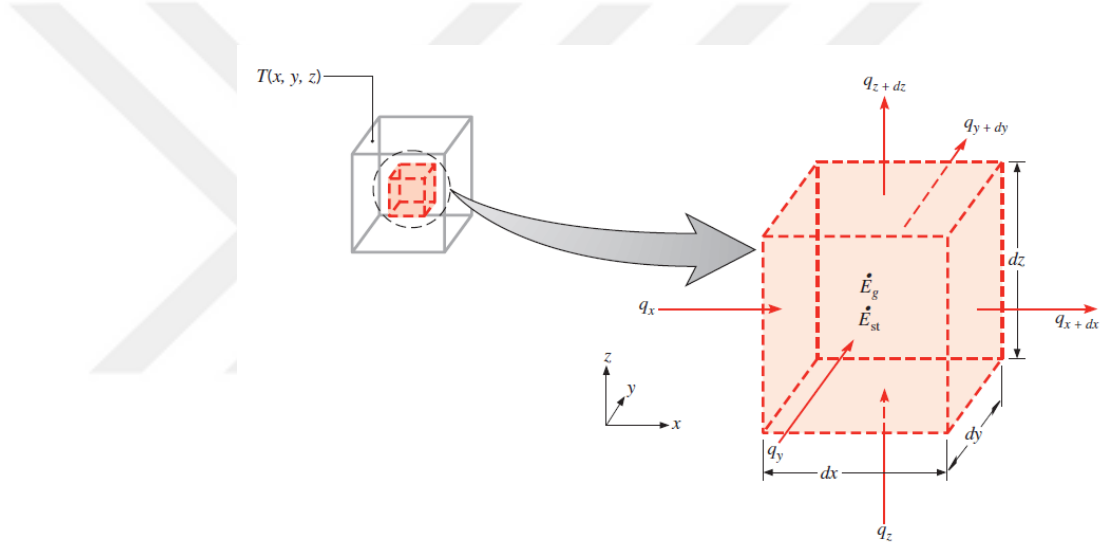
Işınım, sıcaklığı sıfırdan farklı enerji sahibi cisimlerin yaymış olduğu enerji türüdür. Sürekli olmakta olan bir ısı transfer türü olan ışınım ile ısı transferi üzerine kullanılan kanun, Stefan–Boltzmann Kanunu'dur. Bu ışınım türünde ortamın ya da ışınım yapan cismin emissivity değeri önem taşımaktadır. Siyah cisim ışınımında bu değer maksimum olmaktadır (Bergman vd., 2011).

$$q = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

$q$ : Isı miktarı (W)  
 $T_s$ : Yüzey sıcaklığı  
 $A_s$ : Işımanın gerçekleştiği yüzey alanı ( $m^2$ )  
 $\varepsilon$ : Yayıma oranı ( $0 < \varepsilon < 1$ )

### 3.3. Isı Yayılmı

Isı yayılımı; modellenmesi veya hesaplanması istenen ısı transferinde öncelik belirtilen sınır koşulları içinde gerçekleşen sıcaklık değişimini, dağılımını ve gerçekleşen ısı transferini tanımlamaktır. Bu değişkenliği belirlemek ısı transferinin gerçekleştiği bölgelerde sıcaklık değişimi, değişim hızı ve ısı akısını hesaplanabilmesiyle mümkündür. Bu hesaplamalar Fourier denklemleri kullanılarak hesaplanabilmektedir (Bergman vd., 2011).



Şekil 3.3 Koordinat Üzerinde Kontrol Hacmi (Bergman vd., 2011)

Koordinat sisteminde bir kontrol hacmi oluşturulduğunda, buldukları hacim üzerindeki yüzeylere uygun olacak şekilde sıcaklıklar  $T(x,y,z)$  olmaktadır,  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  ise kontrol hacmini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned}
 q_{x+dx} &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\
 q_{y+dy} &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\
 q_{z+dz} &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \\
 \Delta E_{st} &= E_{giren} - E_{çıkan} + E_{üretilen}
 \end{aligned}$$

Kontrol hacminde kullanılmak üzere; ısı iletim formülleri Fourier Denklemi'nde kullanılır.

$$q_x = -k d_y d_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k d_x d_z \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k d_x d_y \frac{\partial T}{\partial z}$$

Denklemler Fourier yasasında incelenirse:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Isı yayılım hesaplamalarının yapılması kalıpta ve jantta döküm sırasında ve dökümden sonraki çevrimler için önem taşımaktadır. Bu hesaplamalar yardımı ile jant ve kalıp sıcaklıkları incelenebilmektedir. Isı transferinde sıcaklık incelemelerinin yapılabilmesi için enerji korunum yasası ve sonlu hacimler yöntemi yardımıyla ilgili bölgelerde ısı transferleri hesaplanmalıdır.

### 3.4. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi gibi, yapılandırılmamış bir örgüye dayanır. Bu nedenle düzensiz ve karmaşık geometriler için uygun olmaktadır. Bu yöntem, akışkanlar mekaniği problemleri için sonlu elemanlar yöntemine göre daha çok avantaja sahiptir. Özellikle şok yakalama özelliği olarak da adlandırılan bir alan içindeki keskin gradyanlar (yani büyük türevler) için daha fazla doğruluk/kararlılık sağlar. Korunum yasaları, integral denklemlerle (yani Reynolds taşıma teoremi) ifade edilebilir. Örneğin, süreklilik denkleminin diferansiyel formu şu şekilde yazılabilir (Örmeci, 2021).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0$$

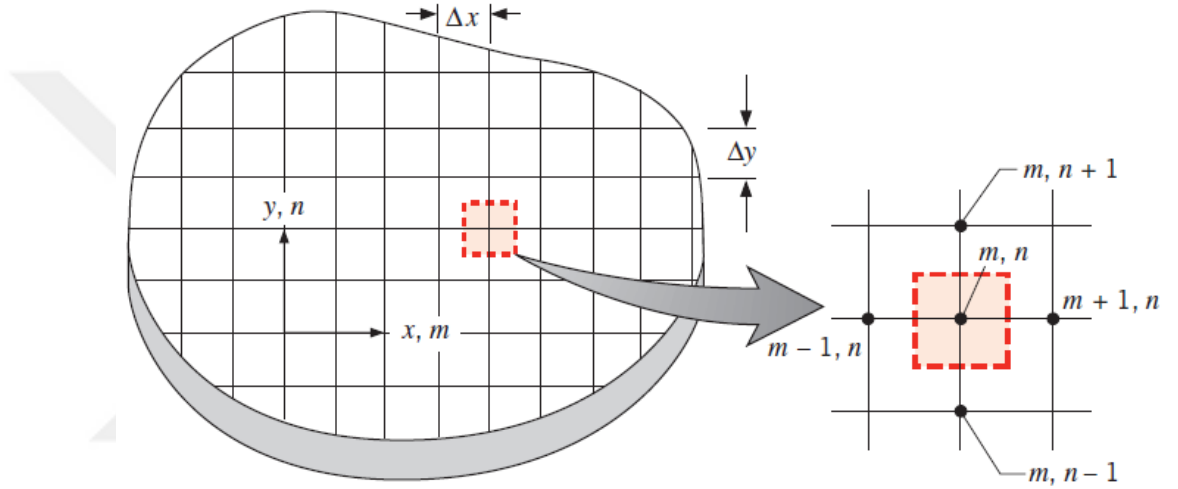
Burada x, y ve z yönlerindeki akış hızlarının bileşenleri,  $\rho$  yoğunluktur. Bir kontrol hacmi (veya sonlu bir hacim) için sürekliliğin integral formu şu şekilde yazılabilir (Örmeci, 2021).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho u \cdot dS = 0$$

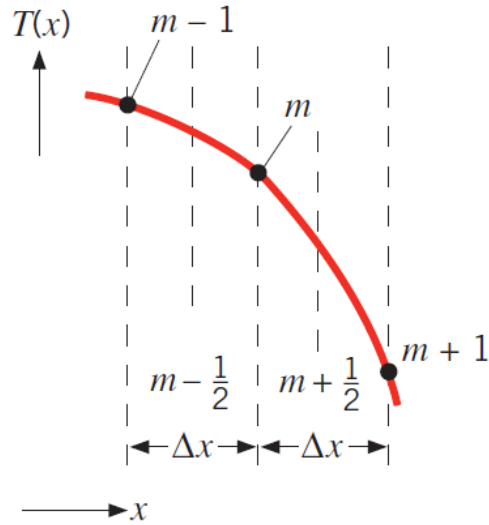
Burada V kontrol hacmi, S kontrol yüzeyi,  $u = (u, v, w)$  ve S yüzey vektörüdür. Bu nedenle, bir kontrol/sonlu hacim içindeki kütle değişimi artı, kontrol yüzeyinden geçen net kütle akıları sıfır olmalıdır. Sonlu hacimler yönteminde, alan ilk önce bir dizi örtüşmeyen sonlu hacim veya hücreye ayrıştırılır. Genellikle, bu sonlu hacimler için üçgenler (2B) veya prizmalardır (3B). Daha sonra, korunma yasaları, durum değişkenlerini hesaplamak için çözülebilen yeterli cebirsel denklem oluşturmak için her bir hücreye uygulanır (Neill, 2018).

### 3.5. Sonlu Farklar Yöntemi ile Isı İletiminin İki Boyutta İncelenmesi

Isı akısı ilerleyişi, inceleme yapılan model geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu ilerleme doğrusal bir ilerleme olmadığı için inceleme yapılmak istenen geometri üzerinde sonlu farklar yönteminden yararlanır. Sonlu farklar yöntemi ile ağ yapısı oluşturulur ve bu ağ yapısı üzerinde düğüm noktaları belirlenir. Belirlenen bu düğüm noktaları ve ağ yapısı üzerindeki yüzeyler ile hesaplanmak istenen sıcaklık değişimleri iki boyut üzerinde incelenebilir. İncelenmek istenen model üzerindeki ağ ve düğüm sayısı arttırıldıkça hesaplamalar sonucunda bulunan değerlerin, gerçeklikten sapması düşmektedir (Bergman vd., 2011).



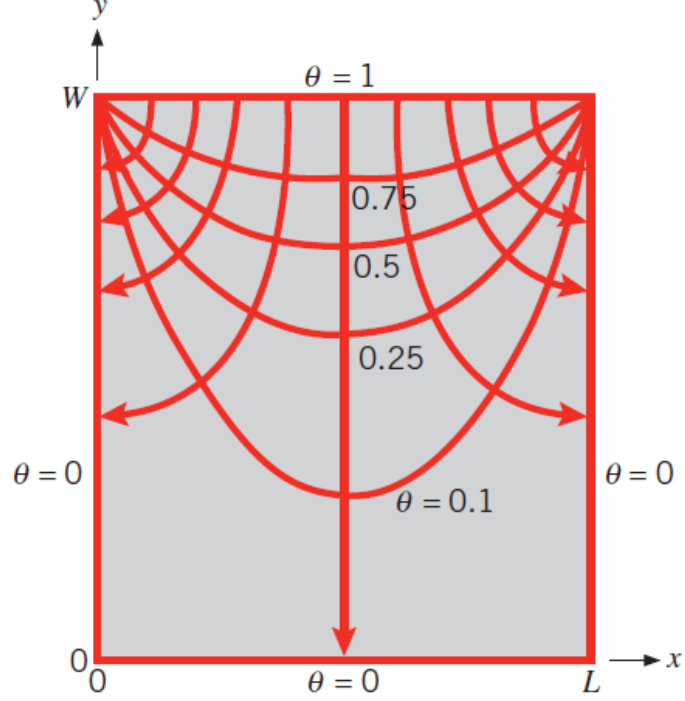
Şekil 3.4 İki Boyutta Ağ Yapısı (Bergman vd., 2011)



Şekil 3.5 Ağ Noktalarında Sonlu Farklar Gösterimi (Bergman vd., 2011)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n} = \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2,n} = \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}$$



Şekil 3.6 İki Boyutta Isı İletimi Sıcaklık ve Isı Akısı Çizgileri (Bergman vd., 2011)

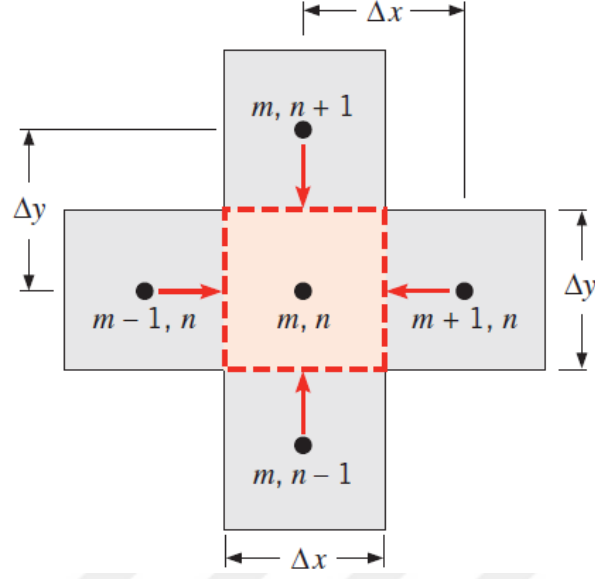
$$\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

Fourier denkleminde yararlanarak  $\theta$  değeri hesaplanabilmektedir.

$$\theta(x, y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{1} \sinh\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \frac{\sinh(n\pi y / L)}{\sinh(n\pi W / L)}$$

### 3.6. Enerji Dengesinin Ağ Yapısında İncelenmesi

Enerji dengesine sonlu farklar yöntemi ile yaklaşımda, bir düğüm noktası için sonlu farkları kullanarak diğer düğüm noktaları ile gerçekleşecek ısı iletimi hesaplanmaktadır. Bu formüller sonlu hacimler ile ağ yapısında oluşan ısı transferi hesaplamalarının çözülmesinde kullanılmaktadır (Bergman vd., 2011).



Şekil 3.7 İç Düğüm Noktasının Diğer Noktalar İle İletim (Bergman vd., 2011)

Sonlu farklar yöntemi ile enerji dengesi incelendiğinde, (m,n) noktasına kontrol hacmi tanımlandığında, temas halinde olduğu diğer kontrol hacimleri ile arasındaki ısı iletimi formülüle edilebilmektedir. Bu formüller hesaplanırken, enerji dengesine yaklaşım yapılarak, ısı akısı geçişlerinin bu formüller üzerinden yapıldığı varsayılmıştır. Hesaplama yapılırken sürekli rejimde olduğu varsayılmıştır (Bergman vd., 2011).

$$\Delta E_{st} = E_{giren} - E_{çıkan} + E_{üretilen}$$

$$\dot{E}_{st} \equiv \frac{dE_s}{dt} = \dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} + \dot{E}_g$$

$\dot{E}_{st}$ : Bulunan toplam mekanik ve ısı enerjisi

$\dot{E}_{giren}$ : Kontrol hacmine giren enerji

$\dot{E}_{çıkan}$ : Kontrol hacminden çıkan enerji

$\dot{E}_g$ : Üretilen enerji

- Isı iletimi, iki boyutlu sonlu hacimler yöntemi ile ısı transferi, ısı üretimi ve düğüm noktaları ile bağ kurarak hesaplanmaktadır (Bergman vd., 2011).

$$\sum_{i=1}^4 q_{(i) \rightarrow (m,n)} + \dot{q}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot 1) = 0$$

- Düğüm noktalarında Fourier yasasının kullanımı:

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

- Fourier yasasında elde edilen sonuçların enerji denge denkleminde kullanımı:

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n-1} + T_{m,n+1} + \frac{\dot{q}(\Delta x \cdot \Delta y)}{k} - 4T_m, n = 0$$

### 3.7. Bilgisayar Destekli Tasarım

Bu tez çalışmasında bilgisayar destekli tasarım programı olarak CATIA V5 kullanılmıştır. CATIA'nın açılımı "Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application (Bilgisayar Destekli Üç Boyutlu İnteraktif Kullanım)" dır. Yüzey çalışmalarında öncü olan program özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Dünyada hemen hemen tüm otomotiv ana sanayii tarafından bilgisayar destekli tasarım ve imalatta kullanılmaktadır. CATIA üretilecek olan ürünlerin, üretimi esnasında tasarlanan süreçlerin sanal ortamda gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. Özetle programı; endüstriyel amaçlı tüm ürünlerin hem tasarımı hem analizi hem de imalatını son derece hızlı, kolay ve güvenilir yapan bir bilgisayar yazılımıdır (Örmeci, 2021).

### 3.8. Bilgisayar Destekli Analiz

Bu tez çalışmasında bilgisayar destekli mühendislik aracı olarak sonlu hacim yöntemi ile çözümlene yapan Magmasoft programında analizler yapılmıştır. Magmasoft yazılımında, parça tasarımları ve optimizasyonları için mühendislik hizmeti de bulunmaktadır. Bugün, Magmasoft metal döküm sanayinin her kolunda tasarım ve optimizasyon amacıyla kullanılmakta olup; özellikle otomotiv endüstrisi ve ağır sanayi kollarına yönelik döküm yapan firmalar tarafından tercih edilmektedir. Magma Giessereitechnologie GmbH 1998 yılında kurulmuş olup merkezi Almanya'nın Aachen kentinde bulunmaktadır. Programda sadece taşınım ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Işıma ısı transferi ihmal edilmektedir. Taşınım ısı transfer formülü aşağıdaki gibi verilmiştir. Işıma ısı transferi ihmal edilmektedir. Analizlerde Magmasoft programına ait "non-ferrous" modülü kullanılmıştır. Bu modül sayesinde dolun ve katılma esnasında alaşım malzeme davranışları daha sağlıklıdır (Örmeci, 2021).

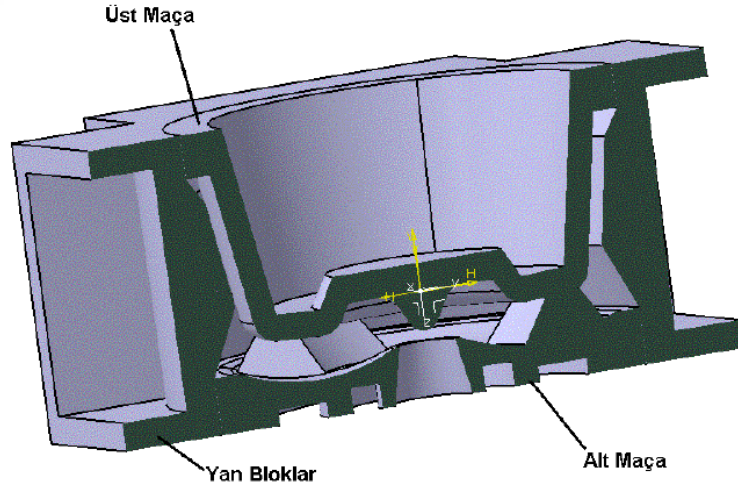
$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty)(W)$$

Burada  $h$ , ısı taşınım katsayıdır ve birimi  $[W/m^2K]$  ile verilir.  $A_s$  ise, taşınımın gerçekleştiği yüzeyin alanıdır ( $m^2$ ).  $T_s$  yüzey sıcaklığı (K),  $T_\infty$  ise yüzeyden yeteri kadar uzaktaki akışkanın sıcaklığıdır (K) (Örmeci, 2021).

### 3.9. Kalıp Datasının Bilgisayar Ortamında Hazırlanması

Endüstriyel anlamda ortaya çıkan ihtiyaç sonucu akış problemlerinin çözülmesi için sonlu hacimler metodu kullanılmaya başlanmıştır. Kalıp elemanlarının ve brüt modelin tasarımı yapıp, daha sonra ilgili elemanların matematiksel modelleri oluşturulduktan sonra, sonlu hacimler metodu ile döküm simüle edilmektedir. Bu simülasyonlarda parametrelerin ve dökümün iyi bir biçimde belirlenmesi, yani senaryonun sağlıklı bir biçimde oluşturulması ile simülasyon programı daha sağlıklı sonuç verecektir. Analiz programından yönlü katılaşmanın kontrolü, sıcaklık profili, akış takibi, porozite oluşabilecek yerler, çekinti oluşabilecek yerler gibi birçok istenilen bilgi alınabilmektedir. Tabii ki yapılan simülasyon ve döküm tamamıyla aynı olmayacaktır. Ancak senaryoların kurulması ne kadar sağlıklı olur ise simülasyon programı da o denli sağlıklı sonuçlar verecektir.

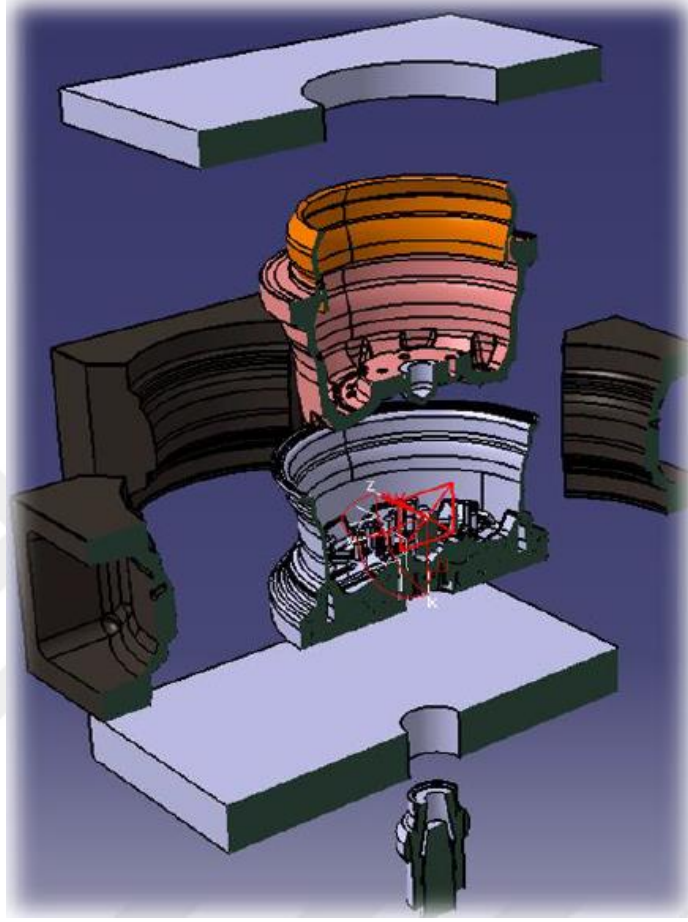
Kalıp verileri hazırlanırken, bilgisayarda CAD programında kalıp parçaları ve ayrı ayrı tasarlanır. Her bir kalıp elemanı tasarlandıktan sonra brüt jant çıkarmak için CAD programında sanal montajı yapılır. Bilgisayar ortamında montajı yapılan kalıp elemanları üzerine gerekli diğer elemanlar tasarlanarak montaj ortamında yerleştirilir (Örmeci, 2021).



Şekil 3.8 Simülasyonlarda kullanılan örnek bir kalıp model görseli (Akıncı, 2005)

Tasarlanan kalıp temel olan 3 parçadan oluşmaktadır. Bunlar alt maça, üst maça ve yan bloklardır (Akıncı, 2005). Sıralama olarak, CATIA programında önce jantın stil bölgesini oluşturan alt maça, jantın arka bölümünü oluşturan üst maça ve lastik kesiti bölgesini oluşturan yan maçaların montajı yapılır. Bunlar aşağıda yazılmış olan ara elemanlar da tasarlanarak montaja eklenir. Bu ekleme sonrası sağlıklı brüt jant datası için montajı yapılan kalıp dataları içerisinde brüt jant datası çıkartılır. Kalıp dataları içerisinde brüt jant çıkarmak önemlidir. Çıkan brüt jant

datası da eklendikten sonra kalıbın soğutmaları datalar arasına eklenir. Soğutmalar çevrim süresinin azaltılması ve jantın mekanik değerlerinin artırılması için önemli etkenlerdir. Soğutmalar ile yönlü katılaşma sağlanmaya çalışılır. Ne kadar sağlıklı yönlü katılaşma sağlanır ise çekinti gibi döküm hataları o kadar azalır ve daha mukavemetli bir jant elde edilir.



Şekil 3.9 Catia ortamında örnek kesit kalıp datası gösterimi (Örmeci, 2021)

Kalıp Ara Elemanları:

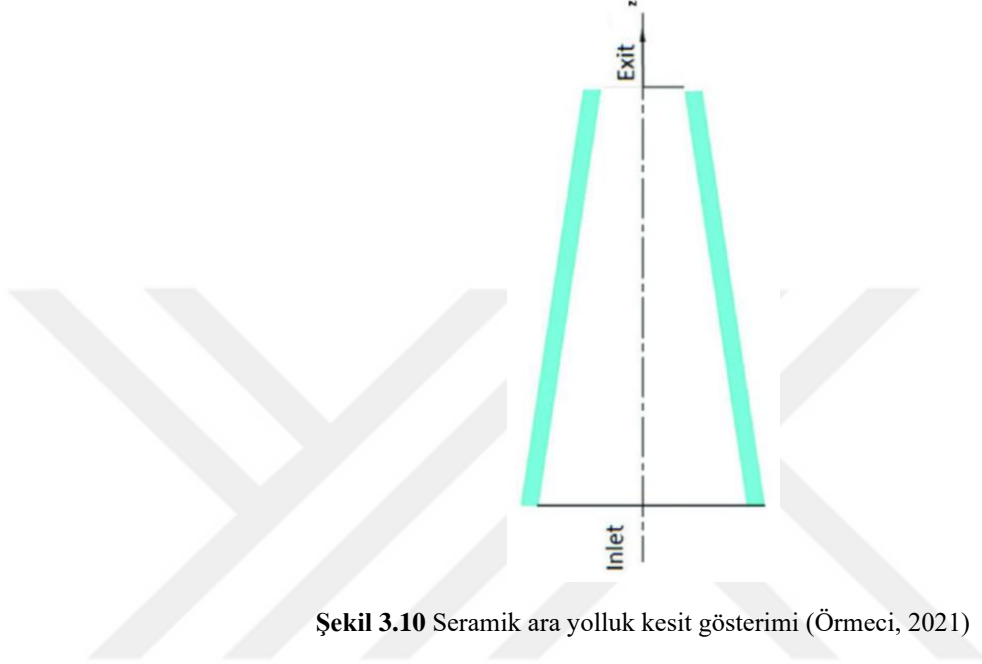
1. Yükseltici tüp
2. Seramik Ara Yolluk
3. Üst yolluk
4. Filtre
5. Sap

### 3.9.1. Yükseltici Tüp

Yükseltici tüp, ergimiş metalin bekleme havuzundan ara seramik yolluğa aktarılmasını sağlayan kısımdır. Kalıp toplamada montajı yapılmayan tüp, alçak basınç kokil döküm makinesi içerisinde bulunur. Ergimiş metalin, aktarım sırasında oluşacak ısı kaybının minimum olmasının istenmesi sebebiyle seramik malzemeden yapılmaktadır (Örmeci, 2021).

### 3.9.2. Seramik Ara Yolluk

Ara yolluk geometrisinden dolayı girişinde yüksek basınç ve düşük hıza sağlayıcı bir ara eleman iken; uca doğru küçük çapa geldiğinde yüksek hız, düşük basınç sağlayıcı bir eleman olmaktadır. Bu sayede ergimiş metal daha rahat hareket edebilmektedir. İçerisinden ergimiş metal geçmesi sebebiyle seramik malzemeden üretilir. Ara yolluk geometrisi Şekil 3.10’da sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Seramik ara yolluk kesit gösterimi (Örmeci, 2021)

### 3.9.3. Üst Yolluk

Bu eleman şekli bakımından ara yolluğun ters geometrisi şeklindedir. Ergimiş metal ara yolluğun üst kısmından çıkarken basınç artırılır ve hız düşürülür. Bu sayede basınç artırımlarında homojen dağılım sağlanır ve türbülans oluşum potansiyeli azaltılmış olur.

### 3.9.4. Filtre

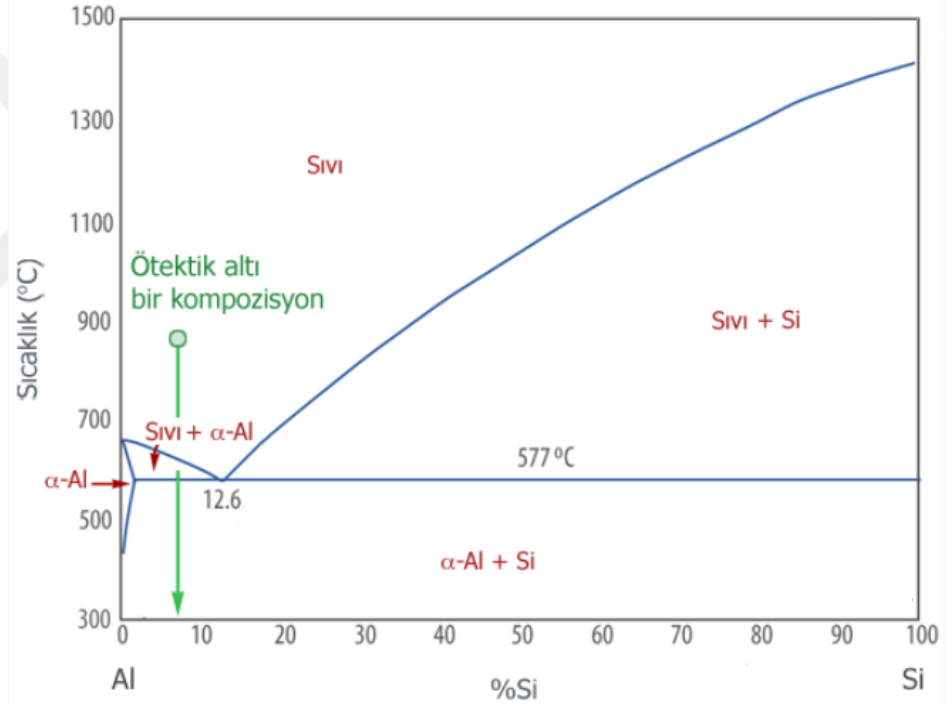
Filtre üst yolluk içerisine yerleştirilmektedir. İki kullanım amacı bulunmaktadır. Birinci amacı; ergimiş metal içerisinde potansiyel bulunabilecek cürufkların tutulmasıdır. İkinci amacı ise ergimiş metal akışında türbülansı engellemek ve laminar bir akış sağlamaktır.

### 3.9.5. Sap

Sap, alçak basınç kokil döküm makinesi içerisinde ve kalıp içerisinde kullanılan bir eleman değildir. Analiz kurgusunda ergimiş metalin yürümesini simüle etmek için kullanılan sanal bir elemandır.

### 3.10. A356 Alaşımının Katılaşması

Hazırlanan ısıtılmış sıvı metal alçak basınçlı tezgâh yardımı ile kalıp içerisine doldurulmaya başlar. Kalıp içerisinde dolumu tamamlanan madenin kalıpla temas ettiği her bölgede ısı transferi gerçekleşmeye başlar. Kalıp içerisinde jantın geometrik şekli kaynaklı ve dolunun zamanla olmasından dolayı, kalıp içerisindeki maden her bölgede aynı sıcaklıklarda değildir. Bu sebeple jantın enerji analizi yapılırken farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değerleri ile kalıp dolumu gerçekleşir. Bu yüzden enerji hesabı yapılırken jantı bölgesel incelemek gerekmektedir. Jantın bölgesel enerji hesabı yapıldıktan sonra, kalıp kesit kalınlıkları ile ısı iletim olayı hesaplanmaya başlanır. Kalıp, kalıp dış yüzeyinden doğal taşınım ve kalıp üzerinde bulunan soğutma grupları ile zorlanmış taşınım yardımıyla dıştan soğutulmaya başlanır. Kalıp üzerine uygulanan soğutma miktarı, çekilmek istenen enerji miktarından fazla olmamalıdır. Bu enerji hesabını yapmak için bölgesel olarak ortalama sıcaklık, kütle ve malzeme özellikleri bilinmesi ve belirlenmesi gerekmektedir (Ou vd., 2020).

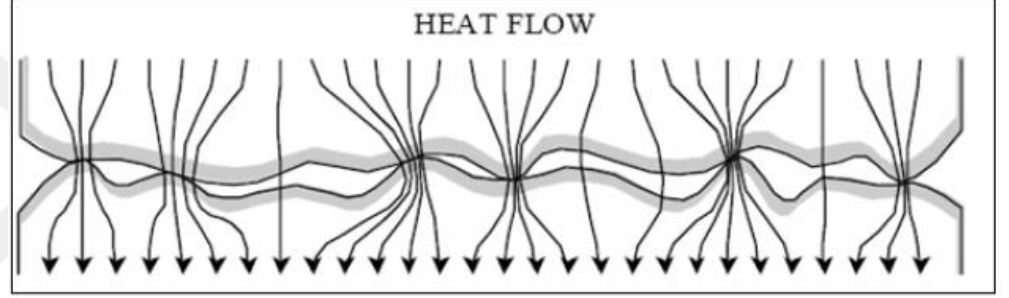


Şekil 3.11 Alaşımın Katılaşmasının Sıcaklık ve Zaman Hal Grafiği (Tüdoksad, 2023)

Kalıp içerisinde dolumu tamamlanan alaşım sıcaklığı maksimum değerdedir. Kalıptaki madene göre düşük sıcaklık ve kesit farkları ile alaşımın sıcaklığı düşmeye başlar. Bu sıcaklık eğrisini incelediğimizde, dolumu tamamlanan ve maksimum sıcaklıktaki alaşım likidus (623°C) sıcaklığına gelmeye başlar.

Likidus sıcaklığının altına düşen alaşım daha fazla ısı kaybederek solidus (577°C) sıcaklığına doğru düşmeye başlar. Bu sıcaklıklar arasında

alaşım katılaşma aşamasına başlamıştır. Bu yarı-katı hal olarak bulunan durumda soğuma hızı jantın mekanik özelliklerinin oluşumunda önemli rol almaktadır. 577 °C altına düşen bölgeler katılaşmış olarak tanımlanmaktadır. Dolundan sonra geçen bu katılaşma sürecine katılaşma zamanı olarak adlandırılır. Katılaşma işlemi tamamlandıktan sonra, jantın kalıp içerisinde soğutma işlemi uygun sıcaklığa gelene kadar devam eder. Döküm katılaşması sırasında kalıp ve kalıp yüzeyine karşı ısı direnci gösterilmektedir. Kalıp dolumu sırasında kalıp ile alaşım arasında sıkışan hava durumu ihmal edilir. Kalıp içerisinde bulunan kaplama düşük termal iletkenliğe sahip olduğu için ihmal edilir. Pürüzsüz gibi görülen yüzey üzerinde aslında mikro ölçekte incelendiğinde pürüzler bulunmaktadır. Isı transferi bu pürüzler ile alaşımın temas yerlerinde şekilde görüldüğü gerçekleşmektedir (Velluvakkandi, 2009).



Şekil 3.12 Fiziksel Temas Yerlerinden Isı Çizgilerinin Hareketi (Velluvakkandi, 2009)

### 3.10.1. Magmasoft Döküm Simülasyonunda Katılaşma

Magmasoft, modellemenin gerçekleşmesini sağlamak için temel ısı transferi hesaplamalarını kullanan bir katılaşma paketidir. Tüm ısı transferi hesaplamasının temelini, ısı transfer katsayısı veya bir temas direnci terimi kullanılarak hesaplamaktadır. Bu hesaplama aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir (Magmasoft, 2023).

$$\frac{L}{K} + \frac{1}{h} + \frac{1}{t} = R_{TC}$$

L ve K, hem metalde (boşluk) hem de kalıpta mesafe ve sıcaklık terimleri iken, h terimi arayüz terimini ifade eder (Magmasoft, 2023).

### 3.10.2. Akışın Simülasyonda Matematiksel Modellenmesi

Simülasyonlarda sıvı metal akışının sıkıştırılamaz olduğu varsayılmıştır. Newton kanunu ve LPDC sürecinin dolun ve katılaştırma aşamalarını yöneten denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

➤ Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

➤ Isı transferi denklemi:

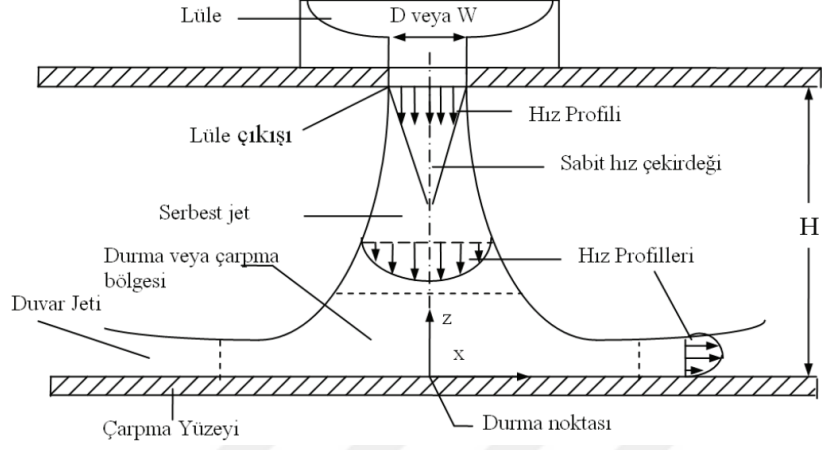
$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + L \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

$\rho$  yoğunluk;  $u$ ,  $v$  ve  $w$ , hız vektörleri;  $t$ , zaman;  $\mu$ , sıvı metalin dinamik viskozitesi;  $g_x$ ,  $g_y$  ve  $g_z$ , yerçekimi ivme vektörleri;  $p$ , basınç;  $C_p$ , erimiş metalin özgül ısı;  $\lambda$ , termal iletkenlik;  $T$ , sıcaklık;  $L$ , gizli ısı ve  $f_s$ , katılma aşamasındaki fonksiyonu ifade etmektedir (Huang vd., 2017).

### 3.11. Soğuma Teorisi

Soğutma kanallarında gerçekleşen durum, akışkanın yüzeye yüksek hız ile çarpması sonucu oluşan jet çarpması olayıdır. Jet çarpması olayı, hava ile sıcak bir cismi soğutma konusunda etkili kullanılabilecek yöntemdir.

Jet çarpma olayı endüstride birçok yerde kullanılmaktadır. Bu olayın endüstride önemli rol alma sebebi soğutulacak olan cismi, kütleyi veya bölgeyi olacak olan süreden daha hızlı ve etkili soğutabildiği için tercih edilmektedir (Türkan, 2021).



Şekil 3.13 Jet Çarpması Olayını Karakterize Edilmesi (Demircan ve Türkoğlu, 2021)

Boru içerisinde gelen sıkıştırılmış yüksek basınçtaki hava kalıp üzerinde soğutulması istenen bölgelere gelen delikler üzerinden belirli sürelerde aktif olması ile soğutma etkisinde kullanılır. Soğutulmak istenen bölge kalıbın dış yüzeyinden, soğutma boruları yardımıyla soğutulmaya başlanır.

### 3.11.1. Laminer ve Türbilanslı Akış

Boru içerisinde hareket eden bir akışkanın, düşük hızlarda düzgün şekilde ilerlemesi olayı laminar akıştır. Akışkanın belirli bir hız sınırı değerinin üzerine çıkması sonucu akışkan çizgileri düz bir akışkan dalgalı bir yapıda akış sağlar, sağlanan bu akış tipine ise türbilanslı akış denir.

Laminer akışta akışkan vektörleri akış düzlemine ve diğer akış vektörlerine göre paralel hareket ederken, türbilanslı akışta akış vektörleri yüzeye ve diğer vektörlere paralel hareket etmezler daha çok karmaşık bir yapıda hareket ederler (Bozkurt, 2019).

### 3.11.2. Reynold Sayısı

Akışkanın laminar akış yada türbilanslı akış olduğunun bilinmesine yardımcı olan boyutsuz bir sayıdır. Reynolds sayısı birçok değere bağlıdır ve atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranından hesaplanabilmektedir (Yavuz, 2019).

$$Re = \frac{V_{ort}D}{\nu} = \frac{\rho V_{ort}D}{\mu}$$

- $Re \leq 2300$  : *Laminer Akış*
- $2300 \leq Re \leq 4000$  : *Geçişli Akış*
- $4000 \leq Re$  : *Türbülanslı Akış*

### 3.11.3. Nusselt Sayısı

Nusselt sayısı, taşınım ile gerçekleşen ısı transferi hesaplamalarında kullanılan, boyutsuzlaştırılmış birimi olmayan bir sayıdır. Bu değer, ısı transferi hesaplamalarındaki değişkenleri azaltarak hesaplamalar konusunda yardımcı olmaktadır. Nusselt sayısı ısı taşınımı (h) ile ısı iletimi (k) arasındaki bağı kurmuştur (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$Nu = \frac{\dot{q}_{taşınım}}{\dot{q}_{iletim}} = \frac{h\Delta T}{\frac{k\Delta T}{L_c}} = \frac{hL_c}{k}$$

- $L_c =$  Karakteristik uzunluk (m)
- $h =$  Isı transfer taşınım katsayısı ( $W/m^2.K$ )
- $k =$  Isı transfer iletim katsayısı ( $\frac{W}{m}.K$ )

### 3.11.4. Biot Sayısı

Nusselt sayısı, sıvı-katı arayüzü boyunca iletken veya taşınım ile ısı transferinin baskın olup olmadığını teyit ederken, Biot sayısı, bir katının yüzeyinden uzağa ısı transferinin katı içindeki ısı transferine oranıyla bir katı içinde önemli termal gradyanların gelişip gelişmeyeceğini doğrular. Biot sayısı sadece  $[Bi < 0.1]$  olduğu durumlarda kullanılabilir (Çengel ve Cimbala, 2008).

- ✓  $Bi \ll 1$ : katı madde içerisindeki sıcaklık değişimi çok düşüktür,
- ✓  $Bi \gg 1$ : katı madde içerisindeki sıcaklık değişimi önemli seviyededir.

### 3.11.5. Fourier Sayısı

Biot sayısının dışında zamana bağlı gerçekleşen ısı transferlerinin belirlenmesinde kullanılan bir sayıdır. Isı transferi gerçekleşen malzemenin ısı iletiminin, ısı depolama kapasitesine oranlanması ile elde edilir. Boyutsuz birimsiz bir sayıdır (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$Fo = \frac{Q_{iletim}}{Q}$$

### 3.11.6. Prandtl Sayısı

Prandtl sayısı, momentum yayılımının termal yayılımına oranı ile elde edilen, boyutsuz bir sayıdır. Prandtl sayısının yüksek olması ısı taşınımının yüksek olduğunu, düşük olması ise ısı iletiminin yüksek olduğunu gösterir (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\text{viskoz yayılım hızı}}{\text{ısı yayılım hızı}}$$

$$\alpha: \text{ısı yayılım katsayısı} = \frac{k}{c_p \rho} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$v: \text{kinematik viskozite} = \frac{\mu}{\rho} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

### 3.11.7. Mach Sayısı

Akışkanların sıkıştırılabilir olmasının incelenmesinde kullanılan sayıdır. Mach sayısı akışkan hızı ve ses hızı ile orantılı olarak değişmektedir. Mach sayısı değerinin 0.3'ün altında olması akışkanın sıkıştırılmaz olduğunu göstergesidir (Çengel ve Cimbala, 2008)

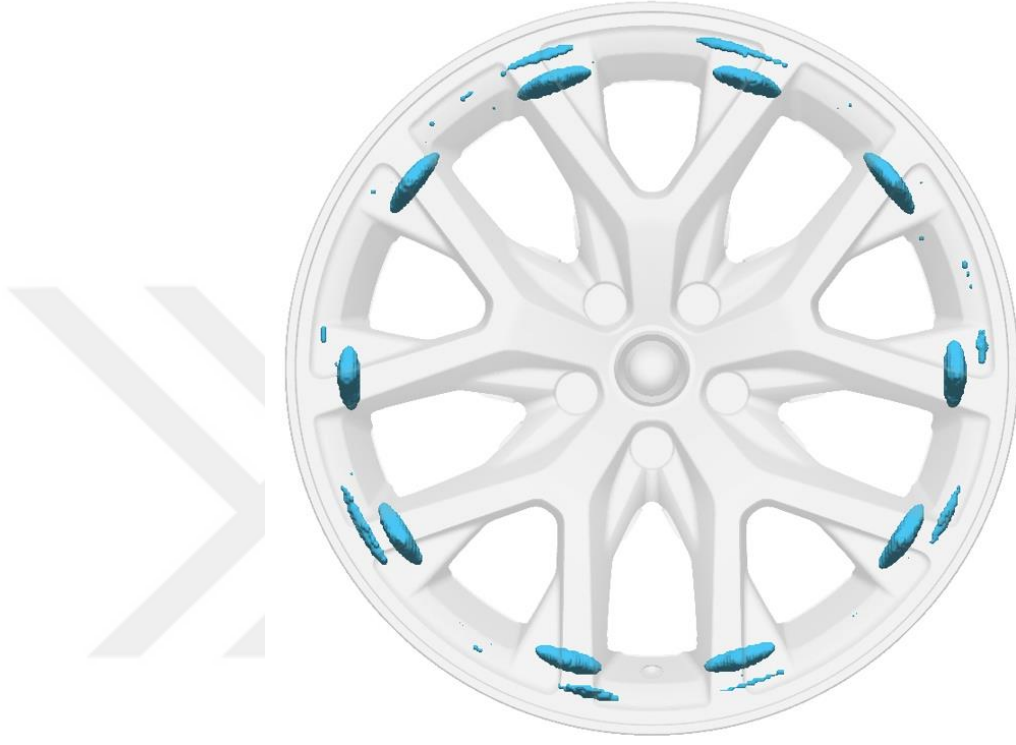
$$\text{Mach: } Ma = \frac{v}{C}$$

$v$ : akışkanın hızı

$C$ : ses hızı = 343.2 m/s

#### 4. ÇALIŞMA

Bu çalışmada genel olarak feder bölgesinde, X-ray'de porozite problemi görülen bir jant modeli üzerinde yaşanan problemin çözümüne yönelik olarak farklı kesit kalınlıklarıyla tasarım çalışmaları yapılarak, en doğru seçimin tespitinin yapılması ve genel bir tasarım girdisinin oluşturulması amaçlanmıştır. Modelde gözükten feder ucunda porozite görünümü Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 İrdelenen modelde feder ucunda X'rayde görülen Porozite Görünümü

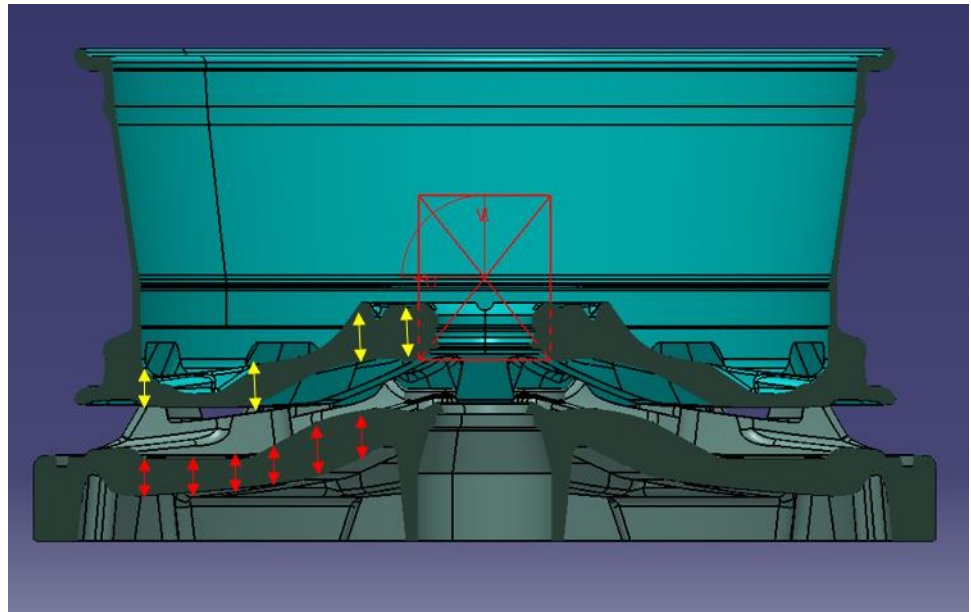
##### 4.1. Farklı Kalıp Kesit Kalınlık Varyasyonlarının Belirlenmesi ve Tasarım Farklılıkları

Feder bölgesinde yönlü katılmanın sonlandığı görülen bir X modelinde yaşanan porozite problemlerine yönelik olarak kesit kalınlıkları ile ilgili yapılan çalışmada, 3D tasarımlar CATIA-V5 CAD programında yapılmıştır. CMS Jant ve Makine Sanayii A. Ş'de kalıp tasarımı çalışmalarında bir tasarım döküm performans öngörüsü oluşturması adına Magmasoft döküm simülasyon programı kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında, simülasyon çalışmaları bu program yardımıyla yürütülmüştür.

Yapılan çalışmada kalıbın en önemli parçası olan alt maçada; standart kesit, standart tersi kesit, 20 mm sabit kesit ve termal hesaplamalara dayanan kesit (termal kesit) olarak adlandırılan farklı alt maça tasarım dizaynları değerlendirilmiştir. Şekil 4.2'de bu dizaynlar gösterilmiştir. Her bir dizaynın ne anlama geldiği ve nasıl oluşturulduğu sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



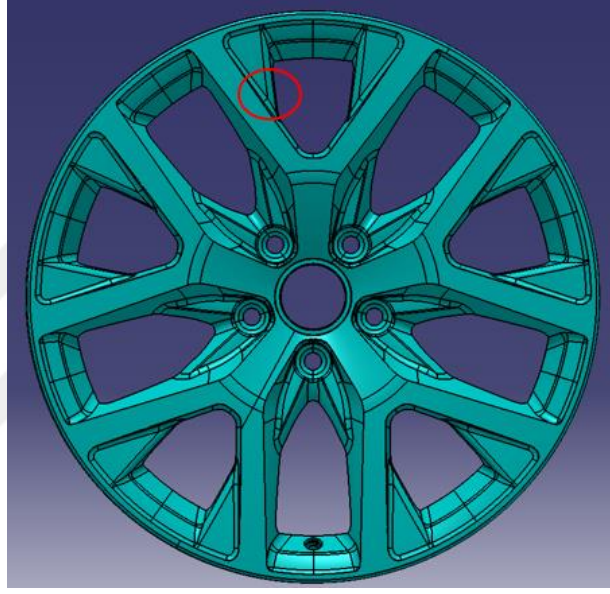
Şekil 4.2 Tüm Kalıp Alt Maça Kalınlık Varyasyon Görünümleri



Şekil 4.3 Alt Maça Kesit ve Jant Kesit Görünümü

Şekil 4.3'te kalıbın içinden çıkan işlenmemiş (brüt) janta ve kalıbın en önemli parçası olan alt maçaya ait bir kesit görünümü verilmiştir. Verilen görseldeki sarı oklar janta ait kesitleri tanımlarken, kırmızı oklar ise kalıp parçasına ait kalıp kesit kalınlıklarını tanımlamaktadır. Maça kesiti ve jant kesitinin kalınlık miktarları bu parçalar arasındaki ısı transferinde etkili olduğundan, çalışma kapsamında irdelenmiştir. Mümkün olan en düzgün kesit kalınlığı ile ilgili, bir standart ve mühendislik yaklaşımı belirleme ve döküm esnasında oluşabilecek besleme problemlerini minimuma indirmek; bu çalışmadan alınması hedeflenen çıktı olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 4.1.1. Brüt Jant Kalınlığı

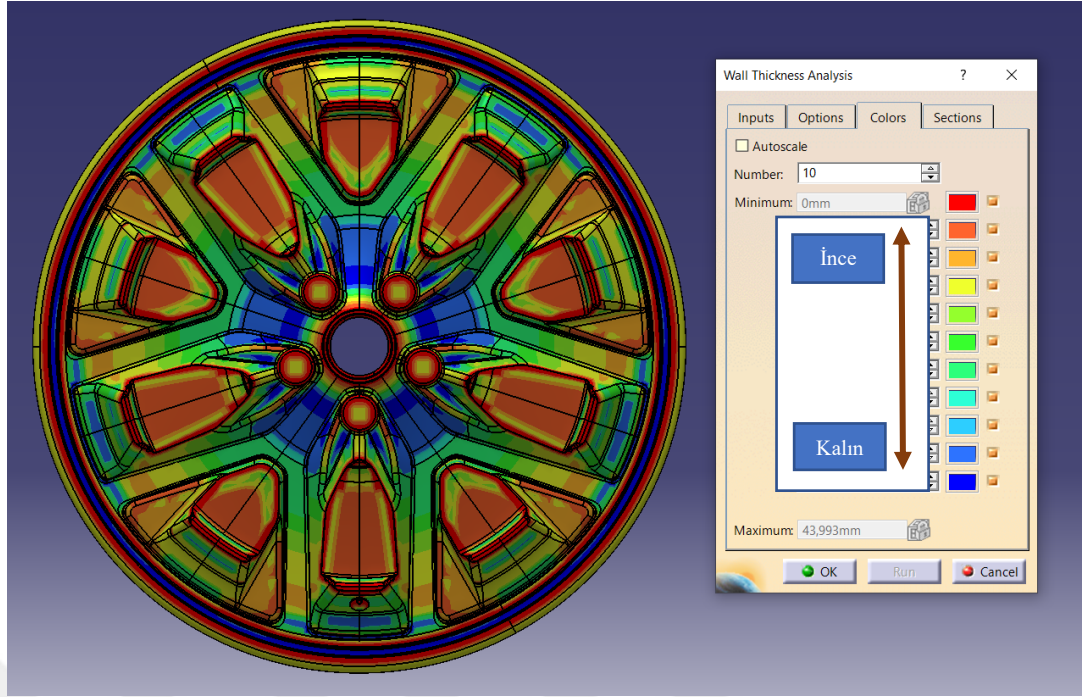


Şekil 4.4 Brüt Jant Üzerinde Sorunlu Bölge Görünümü

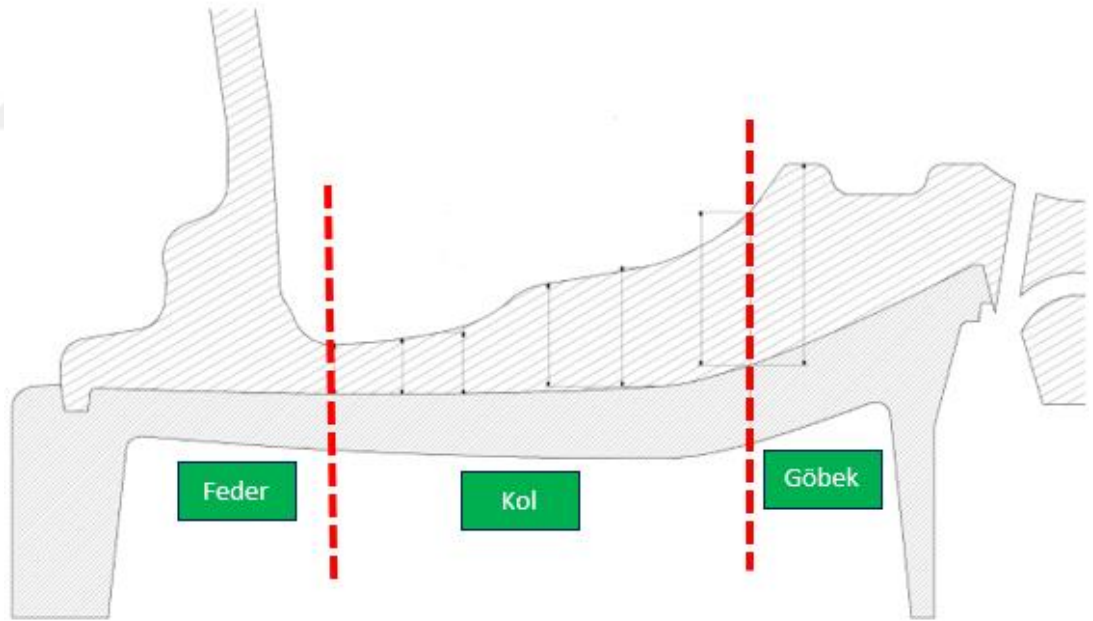
Jant modeli incelendiğinde, işaretli bölgede kesitte bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Jant göbeğe doğru kalınlaşmakta olan normal kollara sahip bir janttır. Jant üzerinde görünen başka problem bulunmamaktadır. Jant üzerinde değişiklik yapılmadığı için farklı alt maça kesitleri ile çalışılarak problemin aşılmasına çalışılacaktır.

#### 4.1.2. Standart Kalıp Kesit Kalınlığı (Feder İnce – Göbek Kalın)

Oluşturulmuş olan bu varyasyon, firma bünyesinde standart olarak yapılan tasarım ile oluşturulmuş feder ucunda incelen, göbek bölgesinde kalın tasarıma sahip alt maça tasarımıdır. Bu tasarımda genel geçer bir uygulama olarak jantta ince, kalıpta kalın kesit meydana getirilmektedir. Şekil 4.5'te standart tasarım uygulaması yapılan alt maçadaki kesit kalınlık geçişinin görünümü gösterilmiştir. Bu görünüm CATIA programında "Wall-Thickness Analsis" aracı kullanılarak yapılmıştır. Görselde verilen renkler yukarı doğru gidildikçe ince bölgelere aşağı doğru gidildikçe kalın bölgelere karşılık gelmektedir.



Şekil 4.5 Standart Alt Maça Tasarımına Ait Kesit Kalınlık Dağılımı

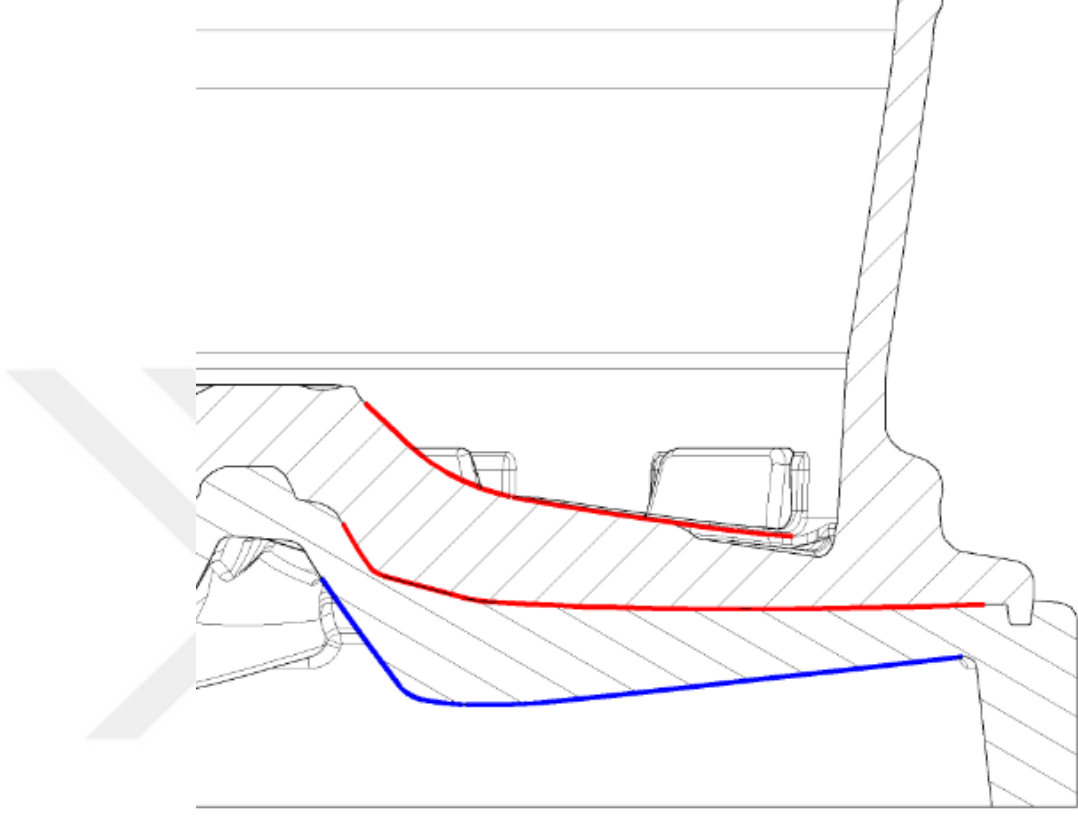


Şekil 4.6 Standart Alt Maça Tasarımına Ait Bölge Tanımlamaları ve Kalınlık Görünümü

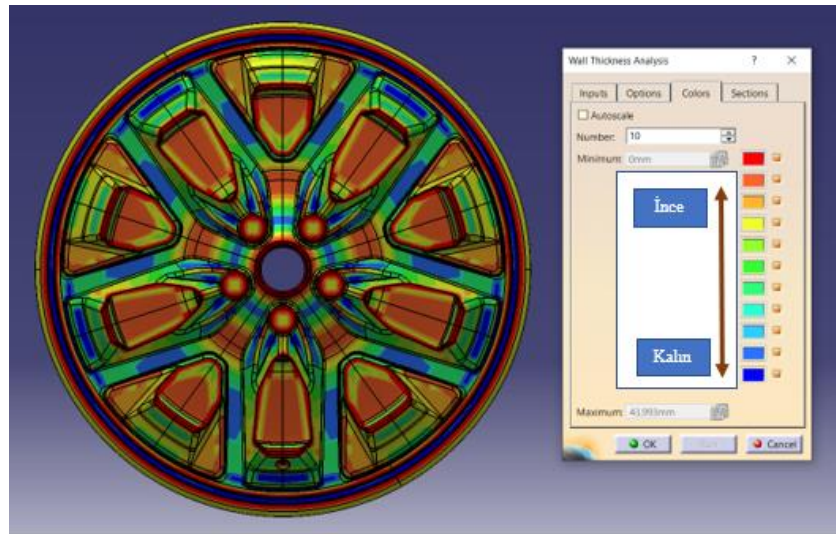
Standart alt maça tasarımından alınan kesit görünümü ve bölge tanımlamaları Şekil 4.6'da verilmiştir.

### 4.1.3. Jant Kesit Kalınlığına Göre Hesaplanmış Kalıp Kalınlığı

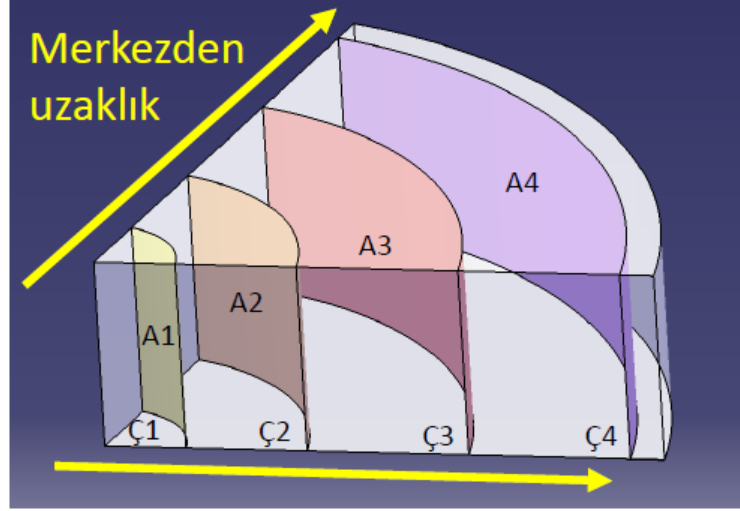
Jantın kesit kalınlığına göre hesaplanmış alt maça ve janta ait kesit görünümü Şekil 4.7’de, maçaya ait kesit kalınlık dağılım görseli de Şekil-4.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.7 Jant Kesit Kalınlığına Göre Tasarlanmış Maça ve Brüt Jant Kesit Kalınlık Görünümü



Şekil 4.8 Jant Kesit Kalınlığına Göre Hesaplanmış Kalıp Kesitleriyle Tasarlanmış Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü

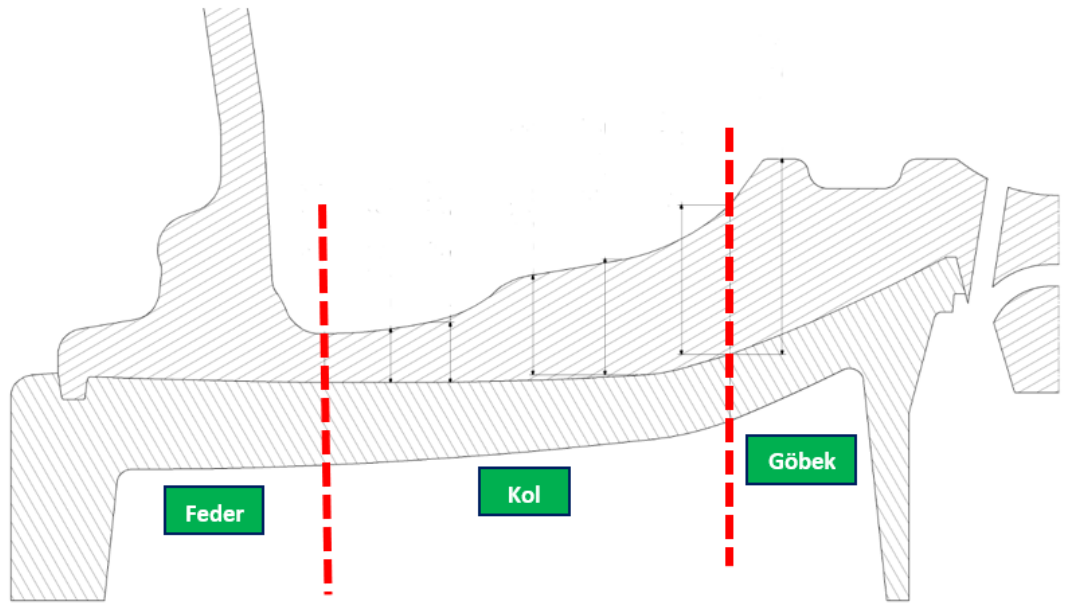


Şekil 4.9 Uzaklığa Göre Jant Kesit Alan Hesaplama Metodu Gösteren Temsili Görsel

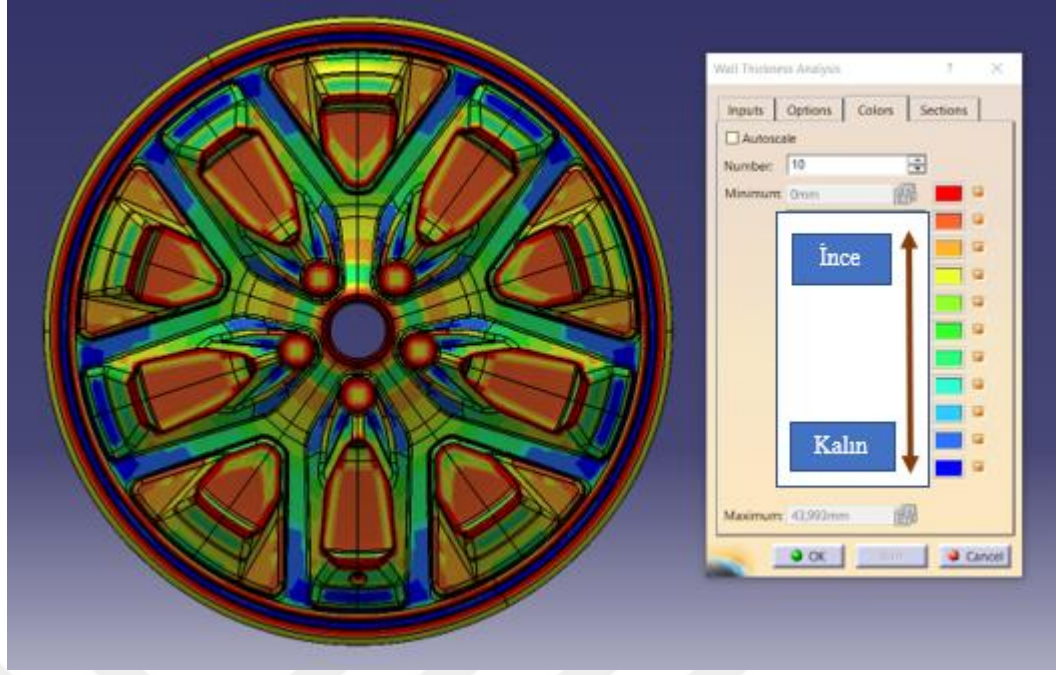
Brüt janta göre kalınlık hesaplaması yapılırken, model stiline göre eş-açısal ve tamamladığında bütünü oluşturacak parçalara ayrılır. Daha sonra radyal şekilde merkezden flanşlara doğru kesilerek kesit alanları çıkarılır. Merkezden uzaklığına göre elde edilen alanlarla orantılı olarak bir katsayı belirlenerek maça tasarımı yapılır. Hesaplama mantığını gösteren temsili görsel Şekil 4.9’da verilmiştir.

#### 4.1.4. Standart Ters Kalıp Kalınlığı (Feder Kalın – Göbek İnce)

Oluşturulmuş bu versiyon, firma bünyesinde standart olarak yapılan tasarıma ters olarak, feder ucunda kalınlaşan, göbek bölgesinde ince tasarıma sahip alt maça tasarımıdır. Tasarıma ait görseller Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.



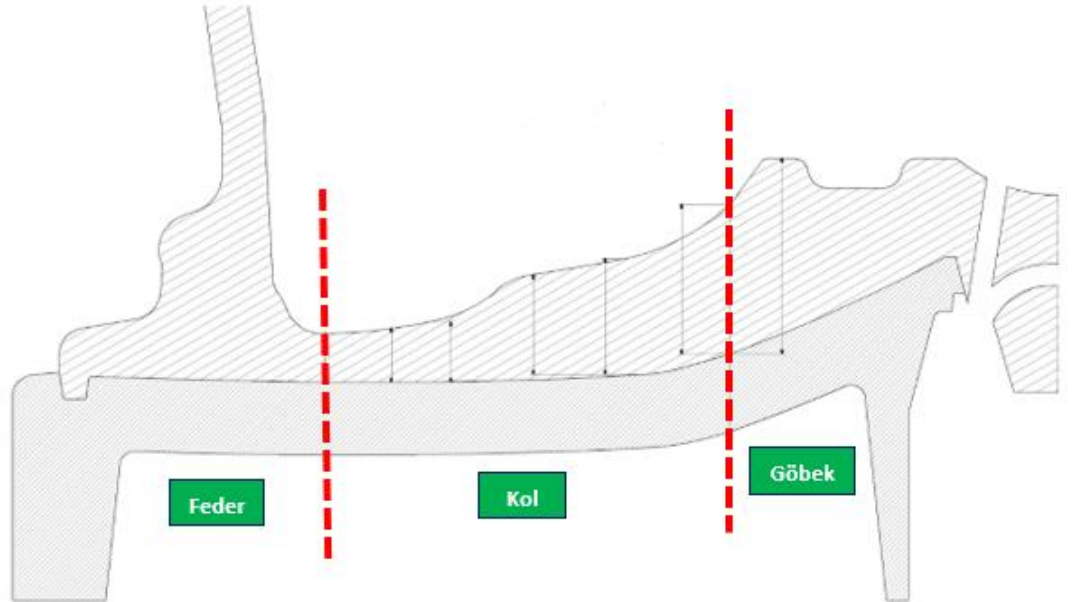
Şekil 4.10 Standart Ters Kesit Kalınlığına Sahip Maça ve Brüt Jant Kesit Görünümü



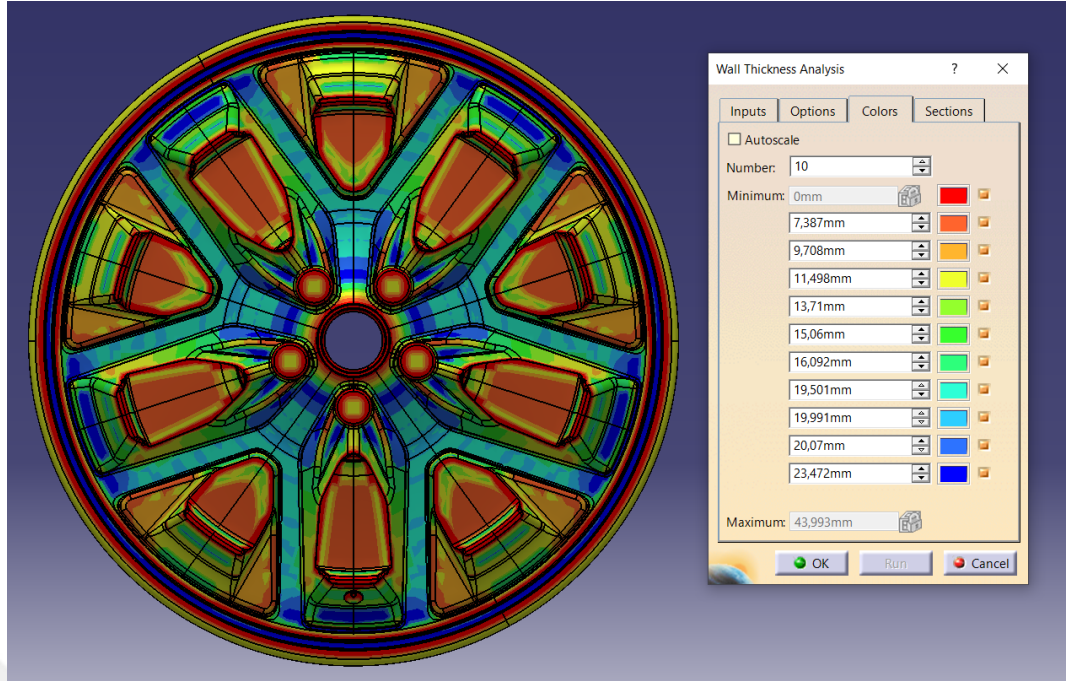
Şekil 4.11 Standart Tersi Kalıp Kesit Kalınlığına Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü

#### 4.1.5. 20 mm Sabit Kalıp Kesit Kalınlığı

Göbek bölgesinden, feder ucu bölgesine kadar sabit kalıp kesit kalınlığına sahip alt maça tasarım görseli Şekil-4.12 ve Şekil-13'te gösterildiği gibidir.



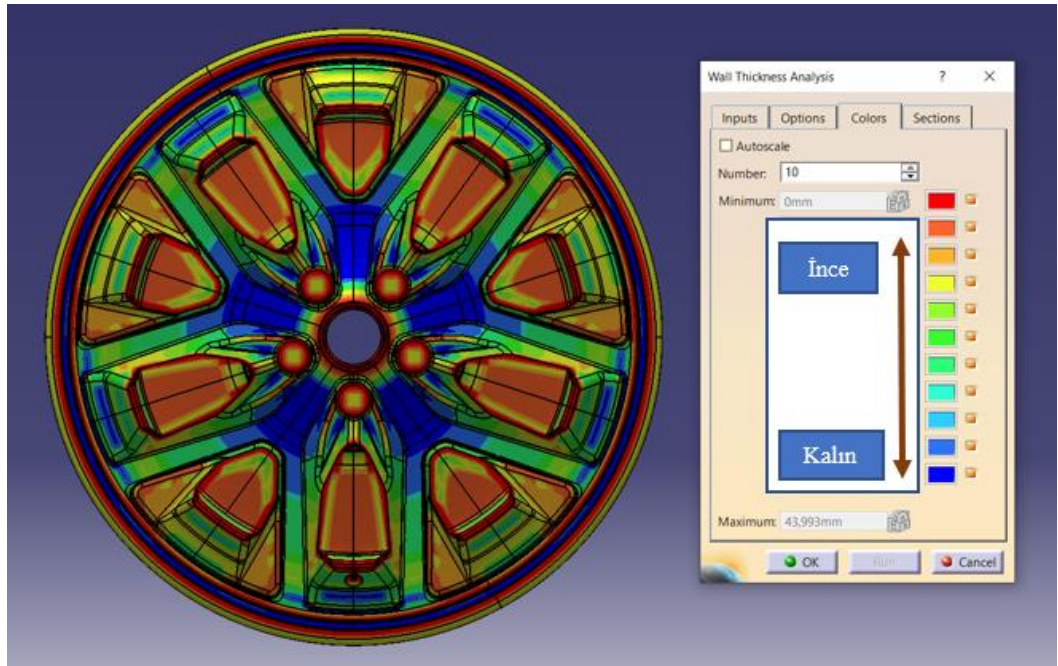
Şekil 4.12 20 mm Sabit Kesit Kalınlığına Sahip Maça ve Brüt Jant Kesit Görünümü



Şekil 4.13 20 mm Sabit Kalıp Kesitine Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü

#### 4.1.6. Termal Formüllerle Hesaplanmış Kalıp Kesit Kalınlığı

Oluşturulmuş bu varyasyonda, termal hesaplamalara dayanan kesite sahip alt maça tasarımı yapılmıştır. Alt maça tasarım görseli Şekil-4.14'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.14 Termal Kesite Sahip Alt Maça Kesit Kalınlık Dağılım Görünümü

Termal hesaplamalara dayanan kesit tasarımı aslında ısı transferi hesaplamalarında kullanılan temel formüllerin kullanımı ile alakalıdır. Bu formüller aşağıda özetlenmiştir. Termal kesit hesabı bu esaslara göre yapılmaktadır.

- a. Jant soğuyarak enerji kaybederken kalıp bu enerjiyi alarak ısınır. Jantın kaybettiği enerji kalıbın kazandığı enerjiye eşittir. (Enerji Korunumu)

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{al} = Q_{kalıp}$$

$$Q_{al} = m_{al} \cdot C_{p_{al}} \cdot \Delta T_{al}$$

$$Q_{kalıp} = m_{kalıp} \cdot C_{p_{kalıp}} \cdot \Delta T_{kalıp}$$

$$Q = \text{enerji (J)}$$

$$m = \text{kütle (kg)}$$

$$C_p = \text{özısı (J/kg.K)}$$

$$\Delta T = \text{Sıcaklık değişimi (K)}$$

- b. Kalıp ile döküm parça arasında ısı transferi sınırsız değildir. Kalıp döküm parça ara yüzeyinde ısı transferi için sınır koşulları vardır.

$$J = h \cdot \Delta T_{int}$$

$$J = \text{Isı akısı (W/m}^2\text{)}$$

$$h = \text{ısı transfer katsayısı (W/m}^2\text{.K)}$$

$$\Delta T_{int} = \text{yüzeyler arası sıcaklık farkı. (K)}$$

- c. Janttan kalıba geçen enerjinin iletimi sınırlıdır.

$$J = k \cdot \Delta T / \Delta X$$

$$J = \text{Isı akısı (W/m}^2\text{)}$$

$$k = \text{ısı iletim katsayısı (W/m.K)}$$

$$\Delta T = \text{ısı iletimi olan mesafe arasında sıcaklık değişimi (K)}$$

$$\Delta X = \text{ısı iletimi olan mesafe (m)}$$

- d. Isı transferi oluşurken süre ve kalıp-döküm parça arasındaki ara yüzey alanı etkilidir.

$$Q = A \cdot t \cdot J$$

$$Q = \text{enerji (J)}$$

$$A = \text{yüzey alanı (m}^2\text{)}$$

$t$ = süre (sn)

$J$ = Isı akısı ( $W/m^2$ )

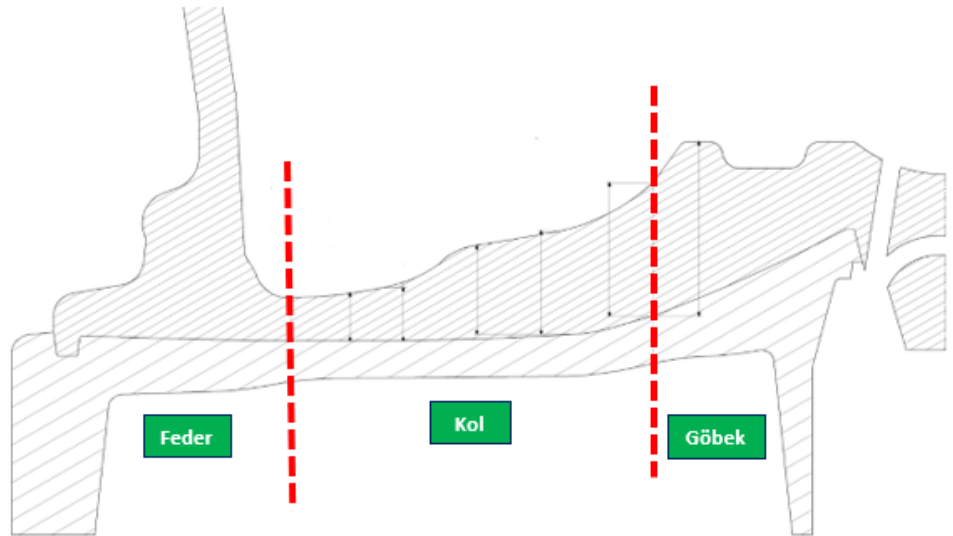
Bu esaslara göre jant üretiminde;

- ✓ Jant kütlesi
- ✓ Jant kalıp arası yüzey alanı
- ✓ Kalıp kütlesi
- ✓ Kalıp ısı iletim katsayısı
- ✓ Jant kalıp arası ısı transfer katsayısı
- ✓ Kalıp döküm sıcaklığı
- ✓ Jant döküm sıcaklığı
- ✓ Özgül ısı değerleri
- ✓ Süre

kalıp kesit kalınlığını etkiler.

Malzeme özellikleri ve ısı transfer katsayısı dışarda bırakıldığında geometrik özelliklerin etkin olduğu görülmektedir. Bu duruma göre her jant için ayrı kesit kalınlığı hesaplanmalıdır. Bu hesap yapılırken lokal jant bölgelerinde toplam alüminyum kütlesi, kalıp-jant yüzey alanı, kalıp ve jant sıcaklık değişimleri göz önüne alınmalıdır. Soğutma tasarlanmamış bir simülasyonda kütle/yüzey alanı minimum olan lokal bölgede kesit kalınlığı minimum olmalıdır. Çünkü sabit kalıp kesit kalınlığında, döküm parçanın en ince olduğu (yani minimum kütle olan) ya da yüzey alanın maksimum olduğu bölge ilk katılaşacaktır. Brüt jant üzerinde bu bölge kol arka boşaltmasının olduğu yere denk gelmektedir. Yönlü katılaşma için gereken parametreler, kütle, yüzey alanı ve istenen katılaşma süresi olmalıdır. Bu duruma göre kol kesit kalınlıkları belirlenmelidir.

Yapılan çalışmada kalıp kesit kalınlıkları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 4.15 Termal Alt Maça Tasarımına Ait Bölge Tanımlamaları ve Kalınlık Görünümü

Çalışılan jant modeli feder, kol ve göbek olmak üzere üç parça olarak incelenmiştir. Her bir parçanın kütlesi çıkartılarak, toplam alanları hesaplanmıştır. Her bir parçaya ait kütle ve alan değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7** Jant Bölgelerinin Kütle ve Alan Değerleri

Bölge	Kütle (kg)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Alan (m <sup>2</sup> )
Feder	2,947	107964,179	0,107964179
Kol	2,74	113575,39	0,11357539
Göbek	1,937	31632,29	0,03163229

Kütlesi ve alanı belli olan döküm parçası jant ile kalıp arasındaki alınan verilen enerji denkleğinden kalıp kütlelerinin ve kalınlıklarının ne olması gerektiğinin yorumu yapılabilmektedir.

$$Q_{al} = Q_{kalıp}$$

$$m_{al} \times c_{p_{al}} \times \Delta T_{al} = m_{kalıp} \times c_{p_{kalıp}} \times \Delta T_{kalıp}$$

**Tablo 8** Enerji Eşitlik Tablosu

Bölge	m <sub>Al</sub> (kg)	c <sub>p<sub>Al</sub></sub> (J/Kg.K)	ΔT <sub>Al</sub>	Q <sub>Al</sub> (J)	c <sub>p<sub>Kalıp</sub></sub>	ΔT <sub>Kalıp</sub>	m <sub>Kalıp</sub>
Feder	2,947	1082	180	636552	665	90	9,589936842
Kol	2,74	1082	180	591840	665	90	8,916330827
Göbek	1,937	1082	180	418392	665	90	6,30326015

$$\Delta T_{Al} = 720 - 540 = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{Kalıp} = 540 - 450 = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Alimünyum metal sıcaklığı 720 °C olarak, kalıp sıcaklığı 450°C olarak kabul edilmiş, içindeki katkı elementleri ile birlikte 577 °C olan solidus sıcaklığının 540 °C'lere düştüğü kabul edilmiştir (Tüdoksad, 2023). ΔT hesaplamaları buna bağlı olarak yapılmıştır. Alüminyum elementinin c<sub>p</sub> değeri 1082 (J/Kg.K) (Das vd., 2012), kalıp parçasının c<sub>p</sub> değeri 665 (J/Kg.K) olarak alınmıştır. Bu eşitlik kullanılarak m<sub>Kalıp</sub> değeri bulunur.

**Tablo 9** Kalıp Kesit Kalınlık Tablosu

Bölge	m <sub>Kalıp</sub>	d <sub>Kalıp</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>Kalıp</sub> (m <sup>3</sup> )	Alan (mm <sup>2</sup> )	Alan (m <sup>2</sup> )	h (m)
Feder	10,63578947	7600	0,001261834	107964,1	0,107964	0,0116875
Kol	9,888721805	7600	0,001173201	113575,3	0,113575	0,0103297
Göbek	6,990676692	7600	0,000829376	31632,29	0,031632	0,0262192

$$m_{\text{Kalıp}} = d_{\text{Kalıp}} * V_{\text{Kalıp}}$$

Yukarıdaki eşitlikten yola çıkılarak  $V_{\text{Kalıp}}$  değeri bulunur. Bulunan  $V_{\text{Kalıp}}$  değeri Tablo 7’de verilen her bölgeye ait alan değerine bölünerek, kesit kalınlığını veren  $h$  değeri bulunur.

### **h (mm)**

Feder: 11,68752272

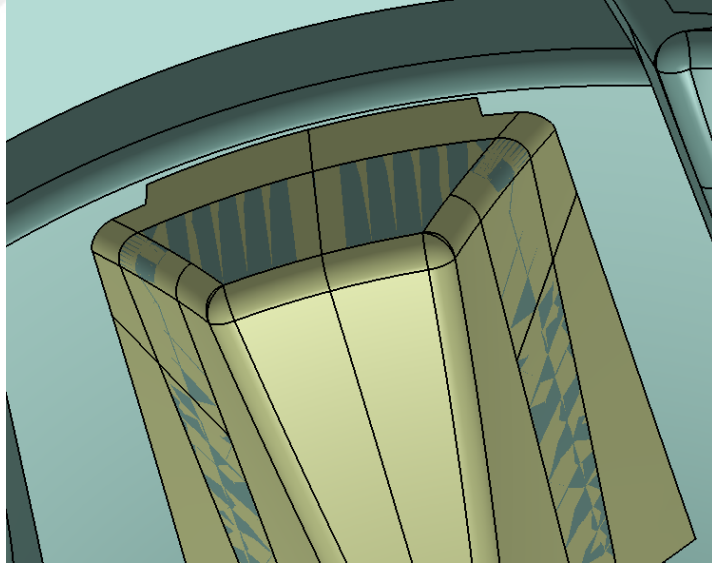
Kol: 10,32971513

Ofset: 26,21929476

## **4.2. Alt Maça Boşaltmaları ve Radüsleri ve Delikler**

Alt maça boşaltmaları jant geometrisine mümkün olan en yakın geometri ile ofsetlenerek yapılarak yapılmıştır. Tüm geometrilerde aynı boşaltma geometrik seti kullanılmıştır. Buna örnek bir kesim yüzeyi Şekil 4.16’da verilmiştir. Kalıplarda boşaltma farkı yoktur. Kalıp boşaltması jant geometrisine uygun olacak şekilde yakın kalınlıklar ve yönetilebilir ısı transferi elde etmek amaçlı olarak yapılmaktadır.

Tüm geometrilerde radüs ölçüleri ve yerleri sabit olarak yapılmıştır. Bu şekilde kol kesit kalınlıkları dışında farklılık minimuma indirilmiştir.



**Şekil 4.16** Alt Maçada Arka Boşaltma Yapan Bir Kesim Yüzeyi

## **4.3. Magmasoft Döküm Simülasyonu**

Simülasyonlarda, analiz kurgusunun dökümü tanımlayacak bir biçimde belirlenmesi, yani kurgunun sağlıklı bir biçimde oluşturulması gereklidir. Magmasoft programı bize jant dökümü ile ilgili tüm parametreleri sağlamaktadır.

Simülasyon aynı versiyon içinde optimizasyon olarak yapılmıştır. Optimizasyon değişkeni olarak yukarıda anlatılmış olan 5 tip alt maça geometrisi kullanılmıştır. Alt maça geometrileri dışında fark yoktur.

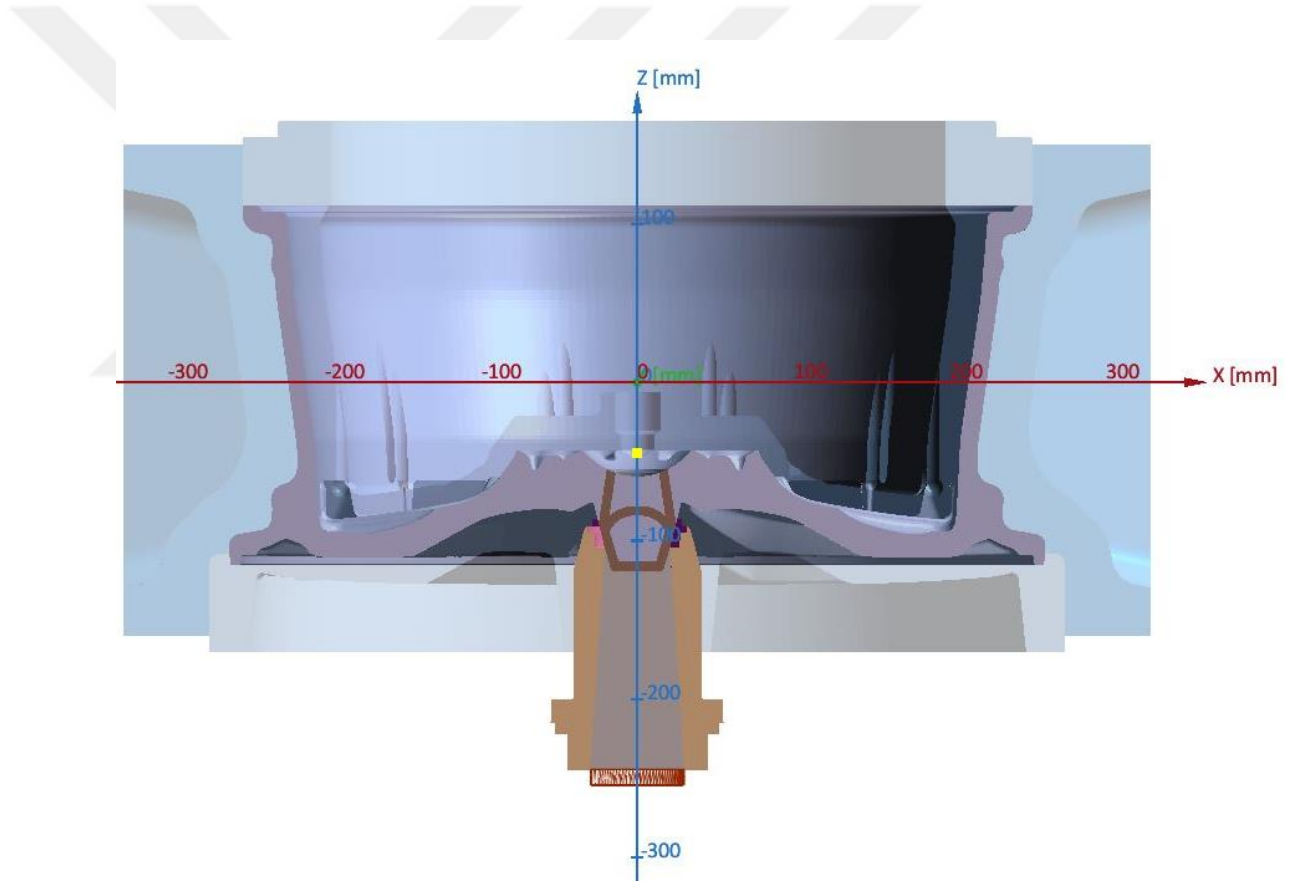
Simülasyon 450 °C homojen kalıp sıcaklığında başlayıp tek çevrim ve soğutmasız olarak yapılmıştır. Döküm süresi 700 saniye olarak sabit tutulmuştur.

Versiyon içinde optimizasyon yapıldığı için tek değişken alt maça kesit kalınlığıdır.

Dolum parametreleri 3 kademe dolum parametresidir.

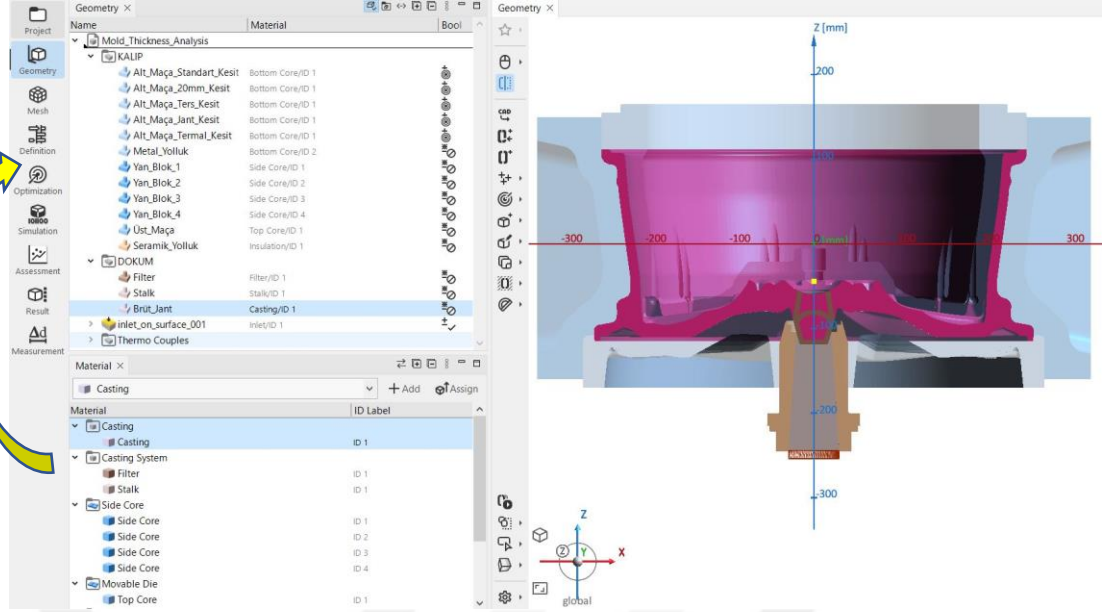
### 4.3.1. Geometri ve Tanımlaması

Döküm parçası olan jantın, diğer döküm parçalarının ve jant kalıbının magmasoft üzerindeki görünümü şekil 4.17'deki gibidir.



Şekil 4.17 Magmasoft Kalıp Kesit Görünümü

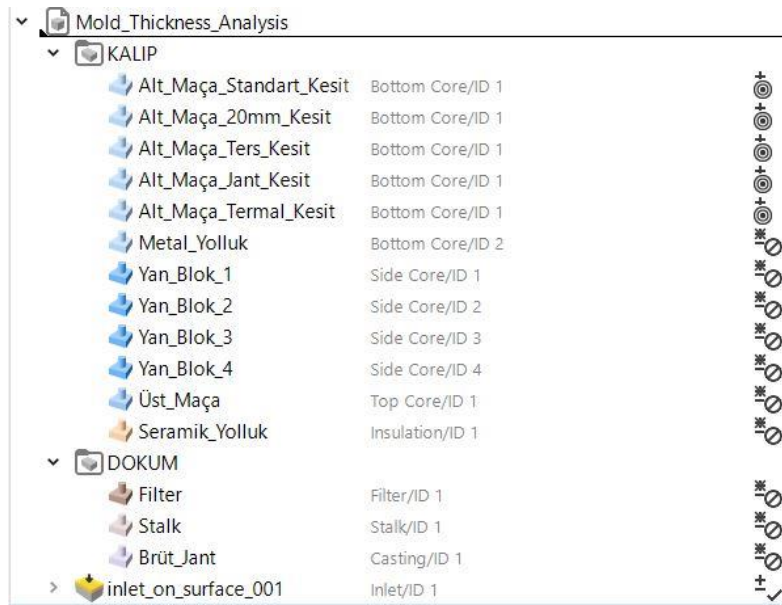
CAD programından alınan kalıp ve döküm parçaları Magmasoft programı içerisine alınır. İçeri alınan verilere aşağıda Şekil 4.18 ve 4.19'de görüldüğü gibi tek tek malzeme tanımlamaları yapılır.



Şekil 4.18 Magmasoft Programında Malzeme Tanımlama

Tasarlanmış veriler tanımlandıktan sonra sanal elemanlar eklenir. Bunlar:

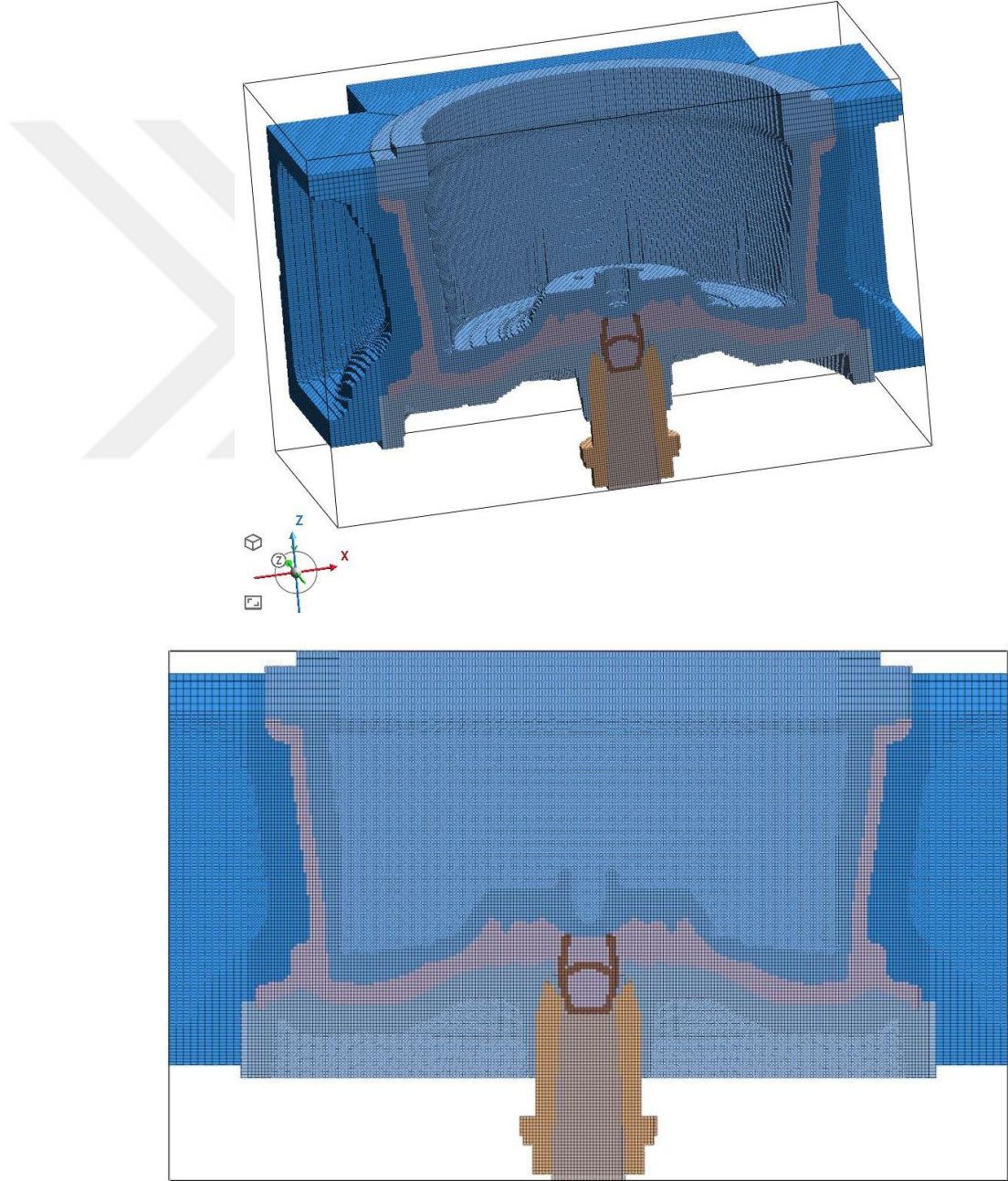
- **Giriş (İnlet):** Giriş tanımlaması ergimiş metalin ilk girdiği yeri göstermektedir. Ergimiş metal buradan başlayarak diğer elemanlara aktarılır.
- **Termokupllar:** Termokupllar kalıp üzerine delik açılarak yerleştirilir. Fiziksel olarak yerleştirilen termokupl verileri ile kurgu aşamasında aynı yere yerleştirilmiş olan termokupl verileri karşılaştırılarak süreç doğrulaması yapılabilmektedir. Sıcaklık verisi alınmaktadır.



Şekil 4.19 Magmasoft Döküm ve Kalıp Parçalarının Tanımlanması

### 4.3.2. Örgü Yapısı (Mesh)

Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için uygun örgü tipinin seçimi ve gerekli sayıda kullanılması önemli bir husustur. Kullanılan elementlerin büyüklüğünün hesaplama alanı içindeki değişimleri yansıtacak kadar küçük olması ve gereksiz çok sayıda eleman kullanılmaması istenilmemektedir. Bu durumda fazla hesaplama zamanı harcanmayacaktır. Magmasoft programında kullanılan örgü kübiktir. Elemanlar kübik bir biçimde örgülenerek yüzeyler birbiri ile örtüşür ve böylece komşu kübikler arasında ısı transferi gerçekleşir. Bu sebeple örgü işlemi yüksek öneme sahiptir. Biz yapmış olduğumuz çalışmada en ince kesitte 3 kübik örgü olarak çalışılmıştır.



Şekil 4.20 Magmasoft Mesh Görünümleri

Mesh Size			
Number of cartesian cells	8,762,364	Number of cartesian cavity cells	465,560
Mesh Quality			
Blocked cells	27		0.0 %
Edge-over-edge connected cells	277		0.1 %
Thin wall elements	1,310		0.3 %
Air contact cells	64		0.0 %

Şekil 4.21 Mesh Sayısı ve Boyutları

### 4.3.3. Malzeme Tanımlaması

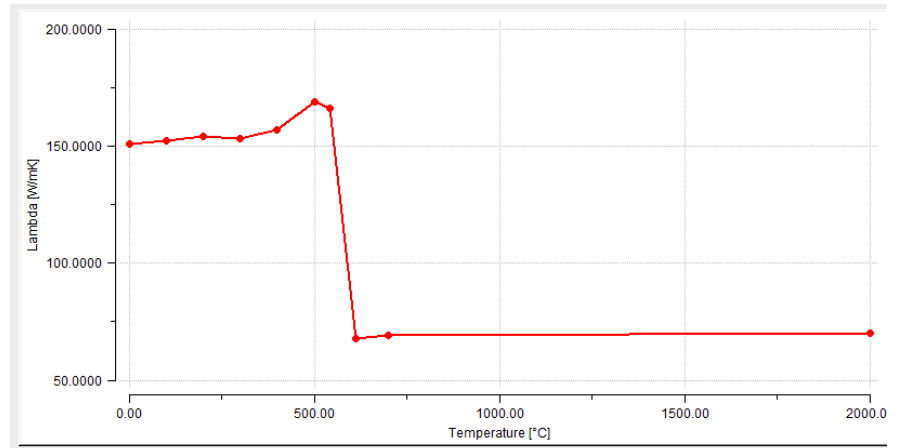
Kalıp parçalarında kullanılan alt maça, yolluk, üst maça ve yan maçaların malzeme tanımlamaları bu bölümde verilmiştir.

AlSi7Mg-Permanent Mold malzemesi döküm simülasyonunda döküm parçası olarak tanımlanmaktadır.

AlSi7Mg-Permanent Mold malzemesinin değişken sıcaklıklardaki ısı iletim değerleri Şekil-4.22 ve Şekil-4.23’de belirtilmiştir.

Lambda as function of Temperature	
Temperature [°C]	Lambda [W/mK]
1.00	151.0000
100.00	152.0000
200.00	154.0000
300.00	153.0000
400.00	157.0000
500.00	169.0000
542.00	166.0000
613.00	68.0000
700.00	69.0000
2000.00	70.0000

Şekil 4.22 AlSi7Mg Isı İletim Değerleri

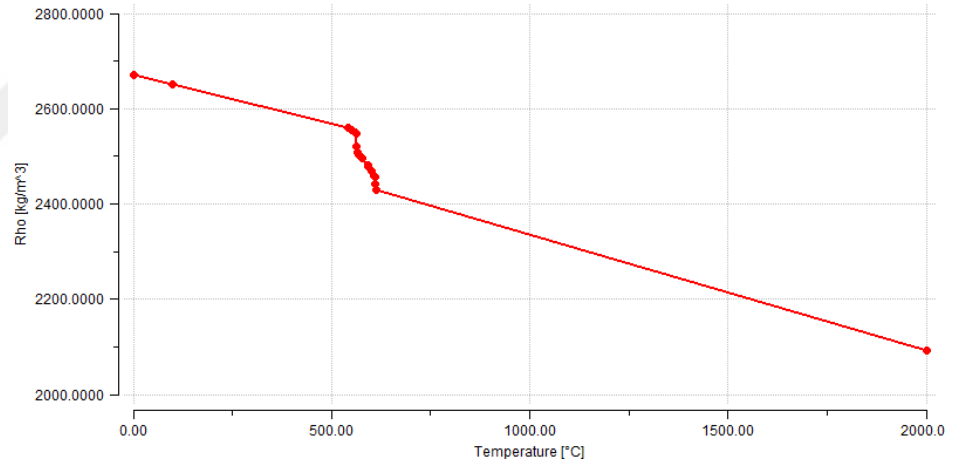


Şekil 4.23 AlSi7Mg Isı İletim Grafiği

AlSi7Mg-Permanent Mold malzemesinin değişken sıcaklıklarda yoğunluk değerlerinin simülasyon database değerleri Şekil-4.24 ve Şekil-4.25'deki gibi belirtilmiştir.

Temperature [°C]	Rho [kg/m <sup>3</sup> ]
1.00	2670.0000
100.00	2650.0000
542.00	2560.0000
552.00	2556.0000
561.00	2551.0000
562.00	2547.0000
563.00	2521.0000
565.00	2508.0000
570.00	2504.0000
578.00	2495.0000
591.00	2482.0000
592.00	2478.0000
602.00	2469.0000
608.00	2460.0000
609.00	2456.0000
611.00	2443.0000
613.00	2430.0000
2000.00	2092.9600

Şekil 4.24 AlSi7Mg Sıcaklıklardaki Yoğunluk Değerleri

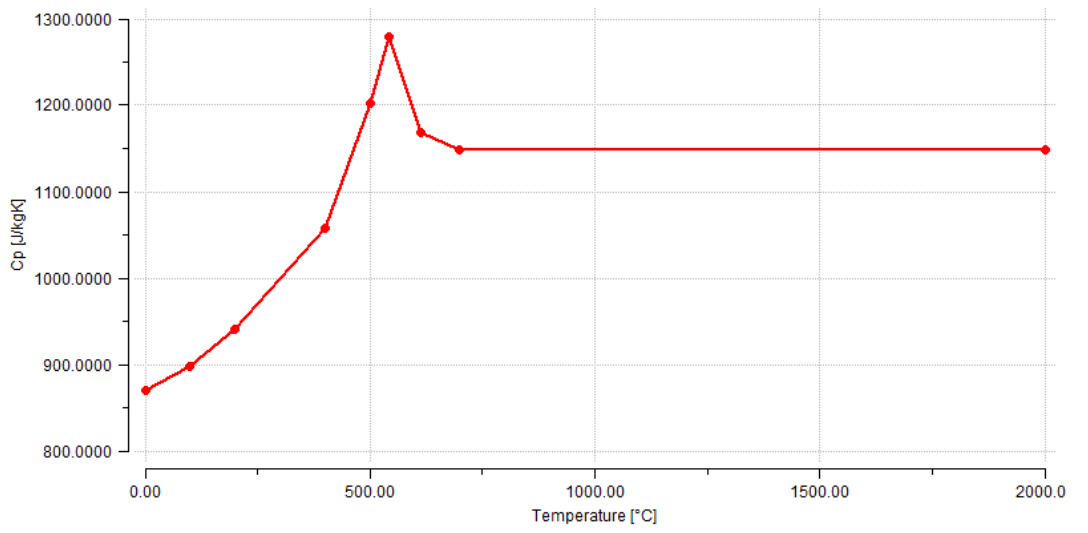


Şekil 4.25 AlSi7Mg Sıcaklıklardaki Yoğunluk Grafiği

AlSi7Mg malzemesinin simülasyonda tanımlı değişken sıcaklıklardaki Cp değerleri Şekil-4.26 ve Şekil-4.27'deki gibi belirtilmiştir.

Cp as function of Temperature	
Temperature [°C]	Cp [J/kgK]
1.00	870.0000
100.00	898.0000
200.00	941.0000
400.00	1058.0000
500.00	1203.0000
542.00	1279.0000
613.00	1168.0000
700.00	1149.0000
2000.00	1149.0000

Şekil 4.26 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Cp Değerleri



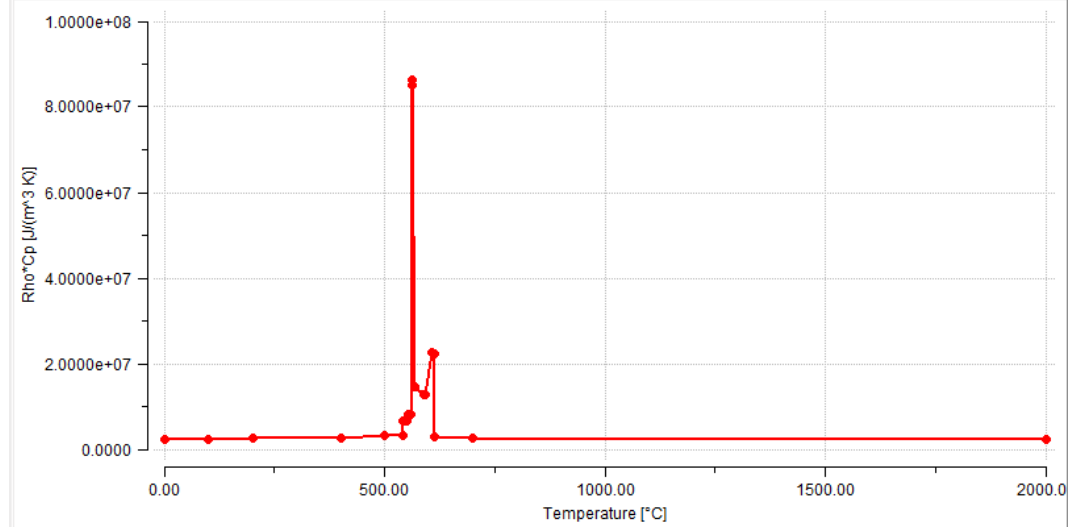
Şekil 4.27 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Cp Grafiği

AlSi7Mg malzemesinin sıcaklık değişkenliğine bağlı olarak yoğunluk ve Cp değerlerinin değişkenlik göstermesi sebebi ile entalpi değerleri de değişkenlik göstermektedir. Entalpi değer değişkenlikleri Şekil-4.28 ve Şekil-4.29'daki gibi belirtilmiştir.

Temperature [°C] Rho\*Cp [J/(m<sup>3</sup> K)]

1.00	2.3229e+06
100.00	2.3797e+06
200.00	2.4745e+06
400.00	2.7391e+06
500.00	3.0900e+06
542.00	3.2742e+06
543.00	6.5756e+06
551.00	6.5354e+06
553.00	8.1141e+06
560.00	8.0738e+06
562.00	8.6201e+07
564.00	8.5093e+07
569.00	1.4702e+07
571.00	1.4683e+07
591.00	1.2665e+07
593.00	1.2633e+07
607.00	2.2559e+07
613.00	2.2247e+07
614.00	2.8374e+06
700.00	2.7678e+06
2000.00	2.4048e+06

Şekil 4.28 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Entalpi Değerleri

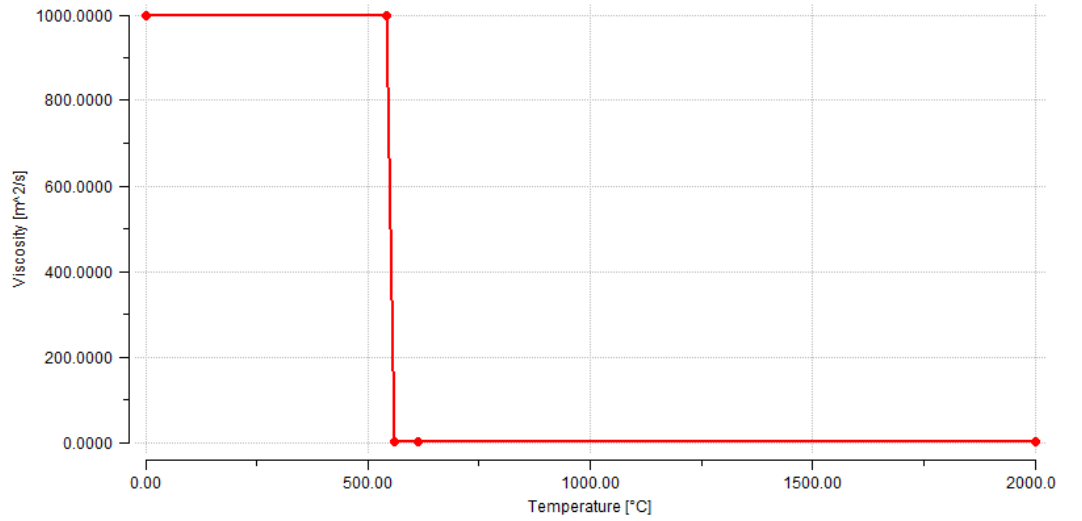


Şekil 4.29 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Entalpi Grafiği

AlSi7Mg malzemesinin farklı sıcaklığa bağlı vizkozite değerleri Şekil-4.30 ve Şekil-4.31'deki gibi belirtilmiştir.

Temperature [°C]	Viscosity [m <sup>2</sup> /s]
1.00	1000.0000
542.00	1000.0000
559.75	1.0000e-02
613.00	4.5000e-07
2000.00	4.0000e-07

Şekil 4.30 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Vizkozite Değerleri

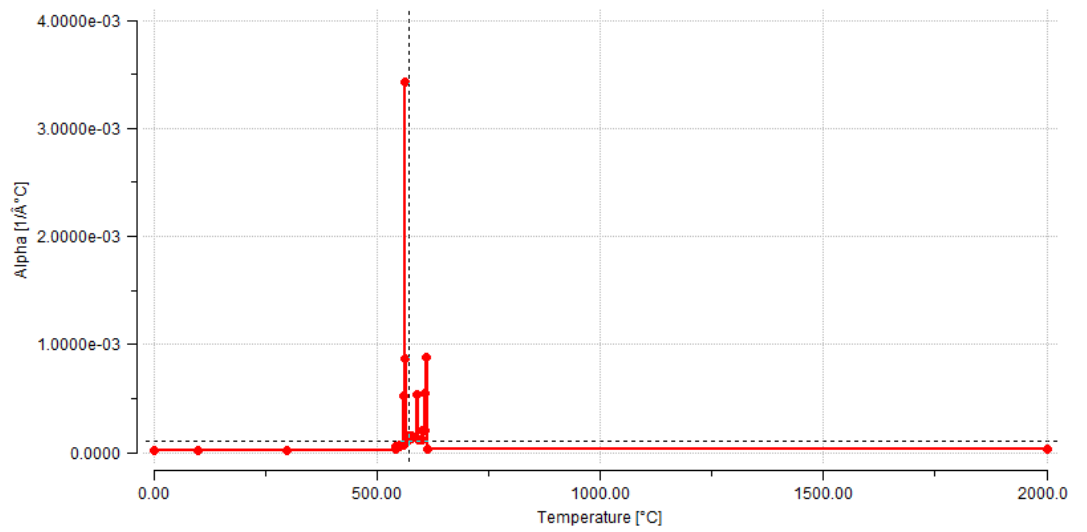


Şekil 4.31 AlSi7Mg Farklı Sıcaklıklardaki Vizkozite Grafiği

AlSi7Mg malzemesinin termal genişleme değerleri sıcaklığa bağlı olarak Şekil-4.32 ve Şekil-4.33'deki gibi belirtilmiştir.

Temperature [°C]	Alpha [1/°C]
1.00	2.1500e-05
99.75	2.1500e-05
100.25	2.1500e-05
300.00	2.3500e-05
541.75	2.6208e-05
542.00	2.6208e-05
542.25	5.2139e-05
551.75	5.2139e-05
552.25	7.2547e-05
560.75	7.2547e-05
561.25	5.2321e-04
561.75	5.2321e-04
562.25	3.4260e-03
562.75	3.4260e-03
563.25	8.6242e-04
564.75	8.6242e-04
565.25	1.0644e-04
569.75	1.0644e-04
570.25	1.5012e-04
577.75	1.5012e-04
578.25	1.3407e-04
590.75	1.3407e-04
591.25	5.3778e-04
591.75	5.3778e-04
592.25	1.2136e-04
601.75	1.2136e-04
602.25	2.0300e-04
607.75	2.0300e-04
608.25	5.4258e-04
608.75	5.4258e-04
609.25	8.8533e-04
610.75	8.8533e-04
611.25	8.9004e-04
612.75	8.9004e-04
613.25	3.6792e-05
2000.00	3.6792e-05

Şekil 4.32 AlSi7Mg Sıcaklık Farklı Termal Genleşme Değerleri



Şekil 4.33 AlSi7Mg Sıcaklık Farklı Termal Genleşme Grafiği



**Die Filling & Intensification Definitions**

Specify the boundary conditions for the melt to flow into the die and for the intensification phase. Select one of the available control types.



Control Type

Pressure Curve

Pressure Curve with Reduction Control / Intensification

Filling Time

Filling Rate

Pressure Curve

Time (s)	Pressure (mbar)
0.0	0.0
10.0	200.0
30.0	350.0
50.0	900.0
650.0	900.0
700.0	0.0

Şekil 4.36 Basınçlandırma Değerleri (Zaman-Basınç) ve Basınçlandırma Grafiği (Zaman-Basınç)

### 4.3.6. Kalıp Ön Hazırlama

Burada kalıp açıkken yapılan işlemler tanımlanmaktadır. Gerçek jant döküm işleminde jant çapak yaparsa veya kalıp içerisinde görünür pislik var ise hava tutulmaktadır. Bu durumdan dolayı bu işlemler de Magmasoft programında tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada bu süre ihmal edilmiş 0 saniye olarak tanımlanmıştır.

### 4.3.7. Kalıp Kapanma Süresi

Programda kalıp kapanma süresi de tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamanın olmasının sebebi; kalıp açıkken hava ile teması sonucu kalıbın belli bir oranda soğumasıdır. Kalıbın açık kalma süresi filtrenin koyulması, jantın alınması gibi olaylara bağlı olarak 5-10 saniye arasında olmaktadır. Bu çalışmada bu süre 5 saniye olarak alınmıştır.

**Die Close Definitions**

Specify the parameters for closing of the die.



Control Type

Time

Temperature

Die Materials

User Selected Material

Thermocouple

Time

Time  s

Time reference

Şekil 4.37 Kalıp Kapanma Tanımlama Arayüzü

### 4.3.8. Gecikme süresi

Burada ergimiş metalin bekleme potasından üst yolluğa gelme süresi tanımlanmaktadır. Bu parametrenin amacı ergimiş metalin bekleme potasından üst yolluğa geleseye kadar geçtiği seramik malzemelerde oluşan ısı transferini hesaba katmaktır. Bu çalışmada gecikme süresi 2 saniyedir.

#### Delay Time Definitions

Define the time from die closing up to the beginning of the filling.



Delay time  s

Şekil 4.38 Kalıp Gecikme Süresi Tanımlama Arayüzü

### 4.3.9. Kalıp Açma Süresi

Kalıp kapanıp dolum başladıktan sonra kalıbın açıldığı zamana kadar geçen süre tanımlanmaktadır. Kalıp açma süresi düşük girildiğinde kalıp katılaşması tamamıyla gerçekleşemezken, kalıp açma süresi fazla girilirse kalıp çoktan katılaşmış olur ve gereksizce kalıp içerisinde bekler. Bu durumdan dolayı bu değer uygun olarak girilmesi önemlidir. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde kurgulanmış olan proses Şekil 4.39'daki gibidir.

#### Die Open Definitions

Define the separation of cast alloy materials and die materials.



Material	Mat ID	Process Control	Boundary Definition
Permanent Mold			
Bottom Core	ID 1	3.0 s after Die Open Step - Side Core ID 1	MAGMA/default.lpdcco
Bottom Core	ID 2	3.0 s after Die Open Step - Side Core ID 1	MAGMA/default.lpdcco
Side Core	ID 1	700.0 s after End of Preparation	MAGMA/default.lpdcco
Side Core	ID 2	700.0 s after End of Preparation	MAGMA/default.lpdcco
Side Core	ID 3	700.0 s after End of Preparation	MAGMA/default.lpdcco
Side Core	ID 4	700.0 s after End of Preparation	MAGMA/default.lpdcco
Top Core	ID 1	2.0 s after Die Open Step - Bottom Core ID 1	MAGMA/default.lpdcco

Şekil 4.39 Kalıp Açılma Süreleri Tanımlama Arayüzü

### 4.3.10. Tahliye Süresi

Kalıp açıldıktan sonraki iticilerin çalışma süresi tanımlanmaktadır. Bu çalışmada tanımlanan değer 3 saniyedir.

### Ejection Time Definitions

Define an extra time required for removing the ejected casting from the machine.

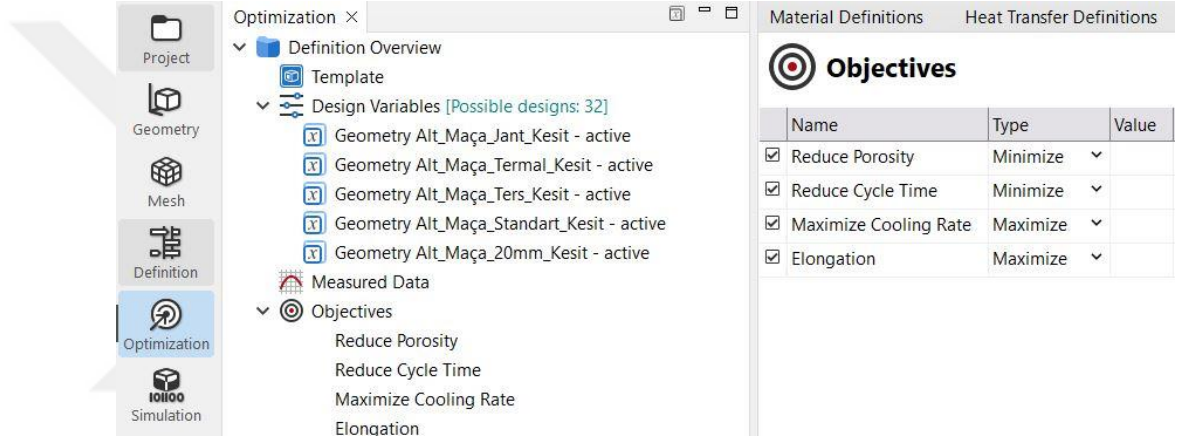


Ejection time  s

Şekil 4.40 Tahliye Süresi Tanımlama Arayüzü

### 4.3.11. Optimizasyon

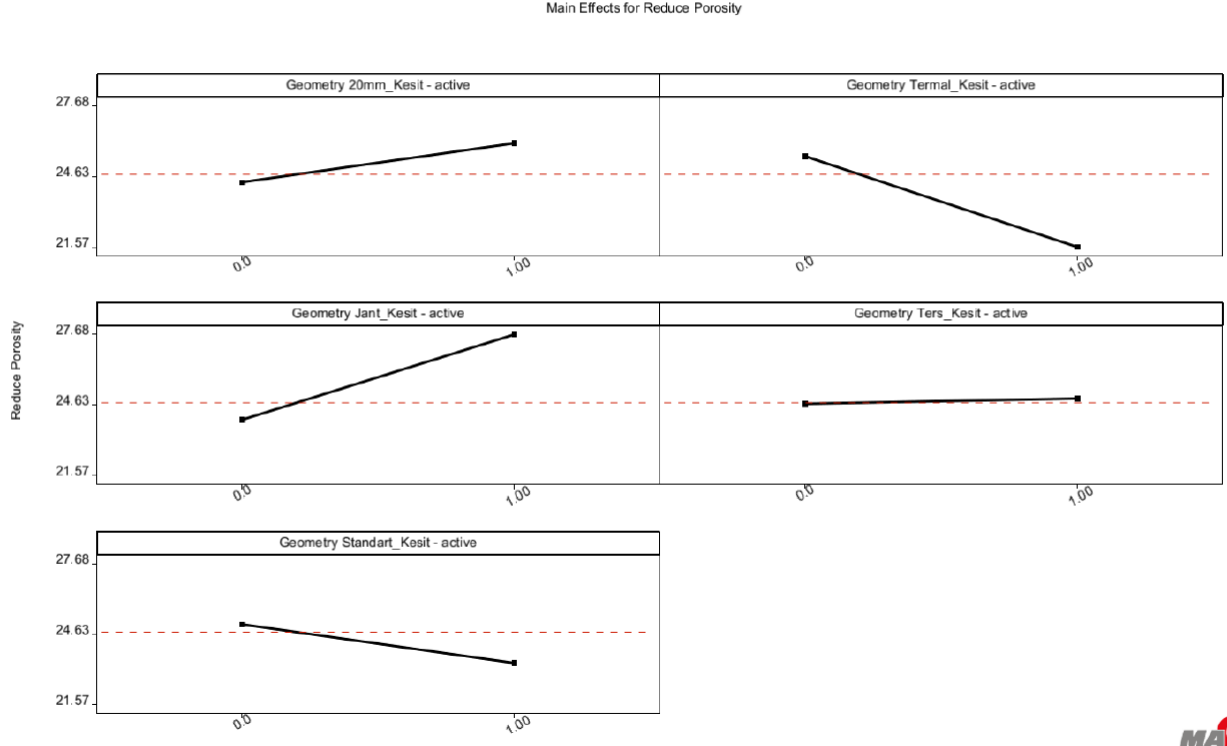
Çalışma kapsamında en doğru kesit çalışmasını bulabilmek için optimizasyon arayüzü kullanılmıştır. Arayüz aşağıda Şekil-4.41’de gösterildiği gibidir. Optimizasyon kurgusu yapılırken minimum porozite, cycle time kurgusu yapılırken, maksimum soğutma hızı ve uzama oranlarını elde edecek şekilde bir kurgu yapılmıştır.



Şekil 4.41 Optimizasyon Arayüzü

## 5. BULGULAR

### 5.1. Optimizasyon Sonuçları



**MAGMA**

Şekil 5.1 Optimizasyon Sonuçları

- Design-1: Jant Kesit
- Design-2: Termal Kesit
- Design-3: Ters Kesit
- Design-4: Standart Kesit
- Design-5: Sabit 20 mm Kesit

Rank	Design	Elongation (-)	Maximize Cooling Rate (-)	Reduce Cycle Time (-)	Reduce Porosity (-)
Rank 1	Design 4	3.77	0.0315	705.01	23.38
Rank 2	Design 1	3.79	0.0287	705.01	27.68
Rank 3	Design 2	3.76	0.0239	705.01	21.57
Rank 4	Design 5	3.77	0.0198	705.01	26.07
Rank 5	Design 3	3.77	0.0137	705.01	24.9

Şekil 5.2 Optimizasyon Sonuç Tablosu

Kesitleri simülasyon ortamında karşılaştırmak ve genel bir yorum yapabilmek adına optimizasyon aracı kullanılmıştır. Kullanılan araç ile 5 farklı dizayn ayrı ayrı çözdürülerek en düşük porozitenin, en düşük çevrim süresinin, maksimum soğuma oranının ve malzeme uzama özelliklerinin görüleceği dizaynların analiz edilmesi ve listelenmesi sağlanmıştır. Yapılan analizde tez kapsamında odaklanılan nokta, en düşük porozitenin elde edilmesi olduğundan o alana odaklanılmıştır.

Termal olarak hesaplanmış kesit ve Standart kesit ortalama değere göre daha iyi sonuç vermiştir. Ters kesit ortalama sonuç verirken, en kötü sonuçları sabit kesit ve jant kesit kalınlığına göre giden kesitler vermiştir. Bunu Şekil 5.2’de verilen tablodaki “Reduce Porosity” bölümündeki değerlerin büyüklüğünden yorumlayabilmekteyiz.

Optimizasyon çalışması ile birlikte yapılan farklı tasarımlar ve simülasyon dizaynları ayrı ayrı Magmasoft döküm simülasyonunda da analiz edilmiştir. Magmasoft programı, dolun ve katılşma ile ilgili sonuçları ayrı ayrı verebilmektedir. Yapılan çalışmada standart bir dolun prosesi kullanıldığı için, katılşma grubu altında aşağıdaki sonuçlar incelenmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen katılşma grubu ile ilgili sonuçlar:

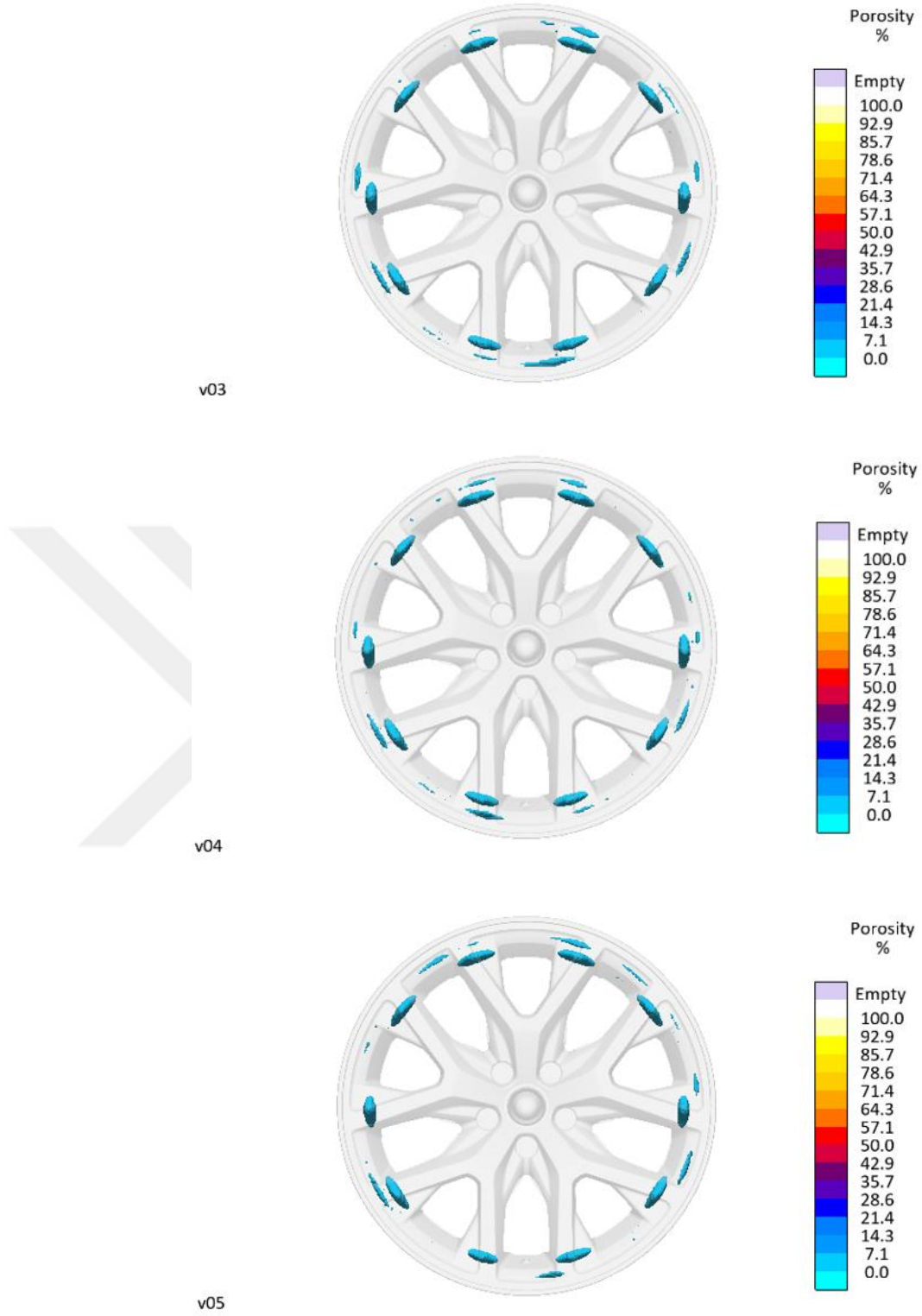
- Porozite
- Katılşma Sonuçları

## 5.2. Simülasyon Sonuçları

### 5.2.1. Porozite Sonuçları

Magmasoft simülasyon programı ilgili sonucu bize vermektedir. Programdan görsel çıktılar alınırken nokta ile işaretleme yapılarak o noktadan değersel okuma imkânı da sağlamaktadır.






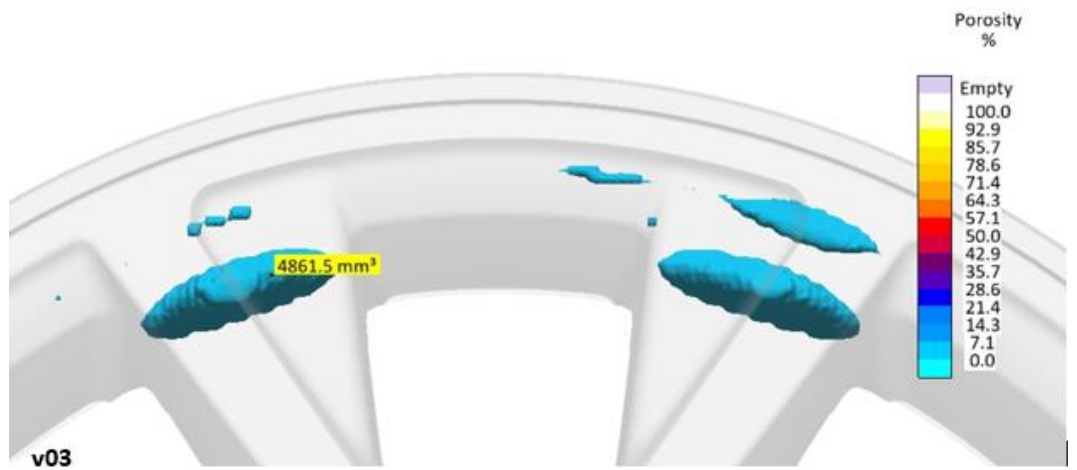
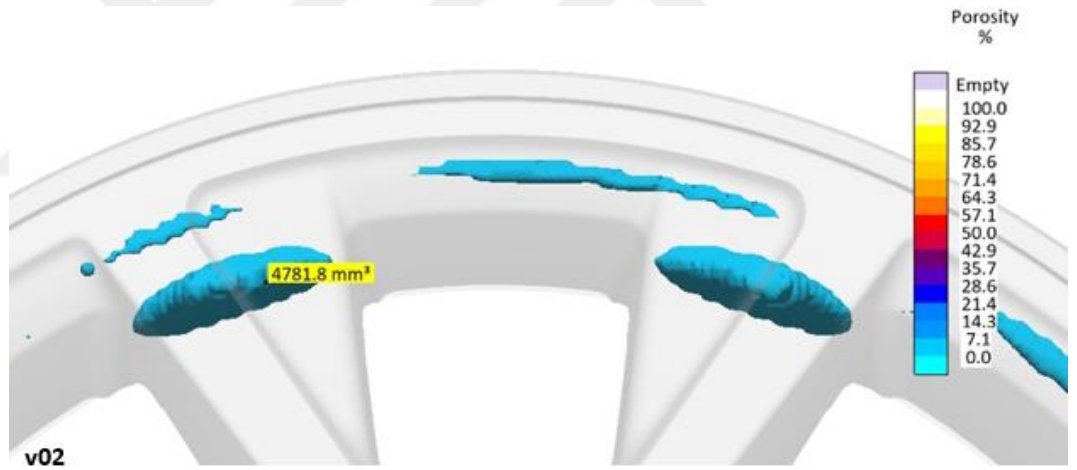
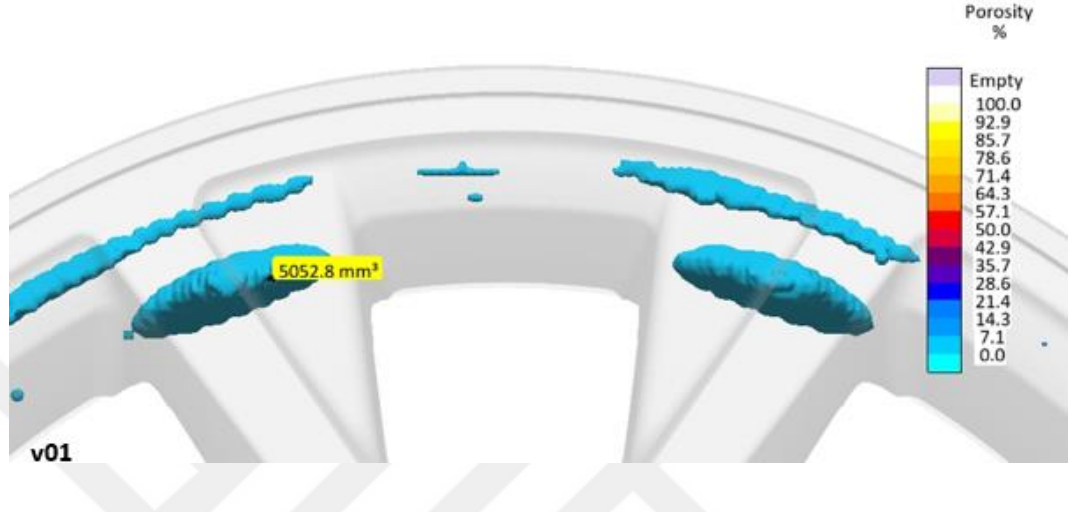
**Şekil 5.3** Porozite Sonuçları

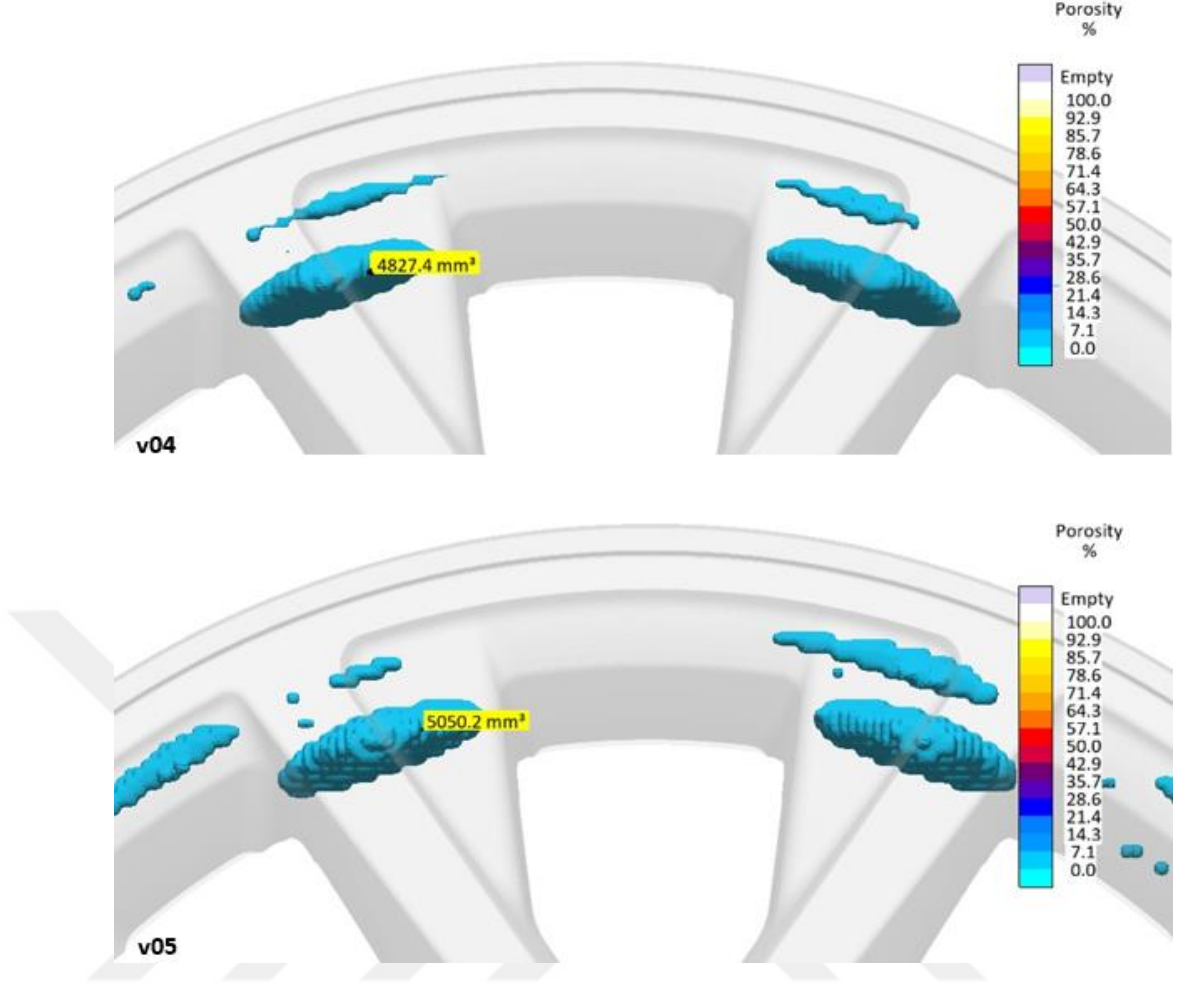
Simülasyon görselleri incelendiğinde değersel olarak okuma değil, görsel olarak yorumlama yaptığımız için sonuçlar yanıltıcı görülebilmektedir. Optimizasyon sonuçlarına göre dizayn dört en iyi sonuçlardan biri görülürken dizayn beş en kötü sonuçlardan biri olarak karşımıza çıkmıştır. Görsellerden bu ayırım görülememektedir. Optimizasyon sonuçlarının porozite değerleriyle uyumlu

olduğu göstermek adına, tüm dizaynlardan aşağıda Şekil 5.4'deki noktadan alınan porozite değerleri Şekil-5.5'te gösterilmiştir.

 -60.67 -206.28 -84.47 4861.5 mm<sup>3</sup>

Şekil 5.4 Porozite Değer Karşılaştırması Yapılan Nokta



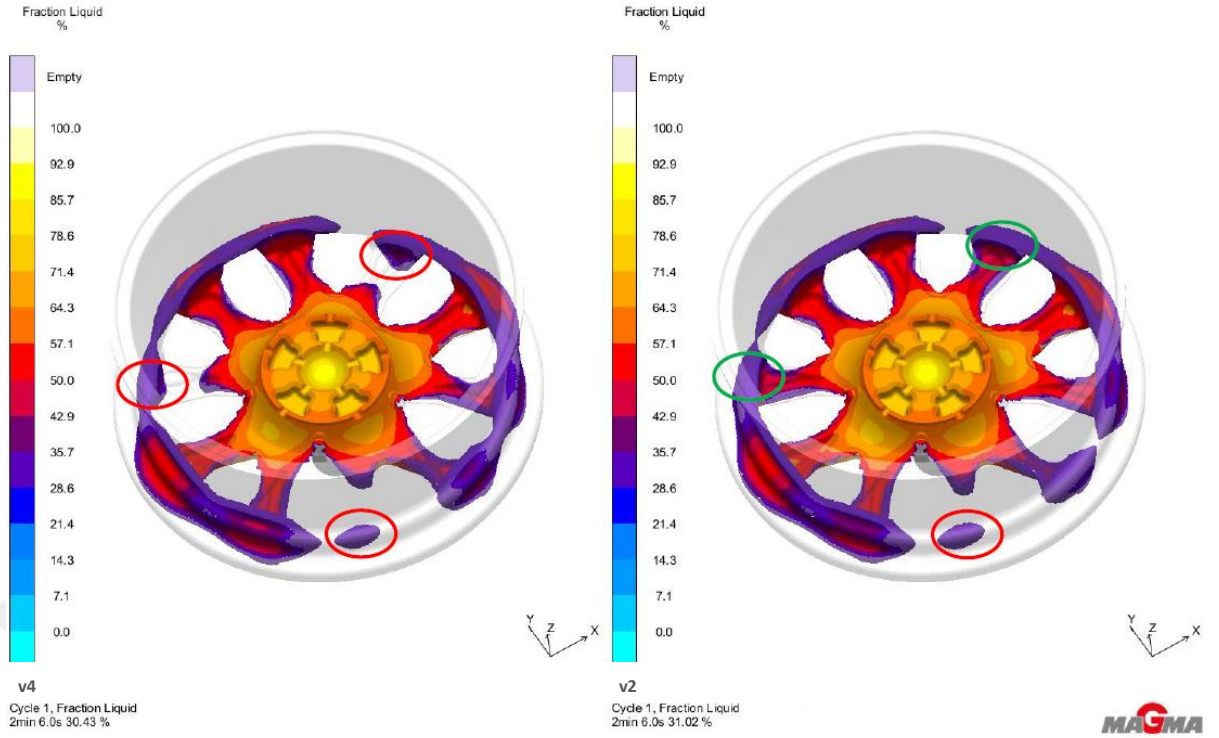


Şekil 5.5 Aynı Noktadan Alınan Porozite Değerleri

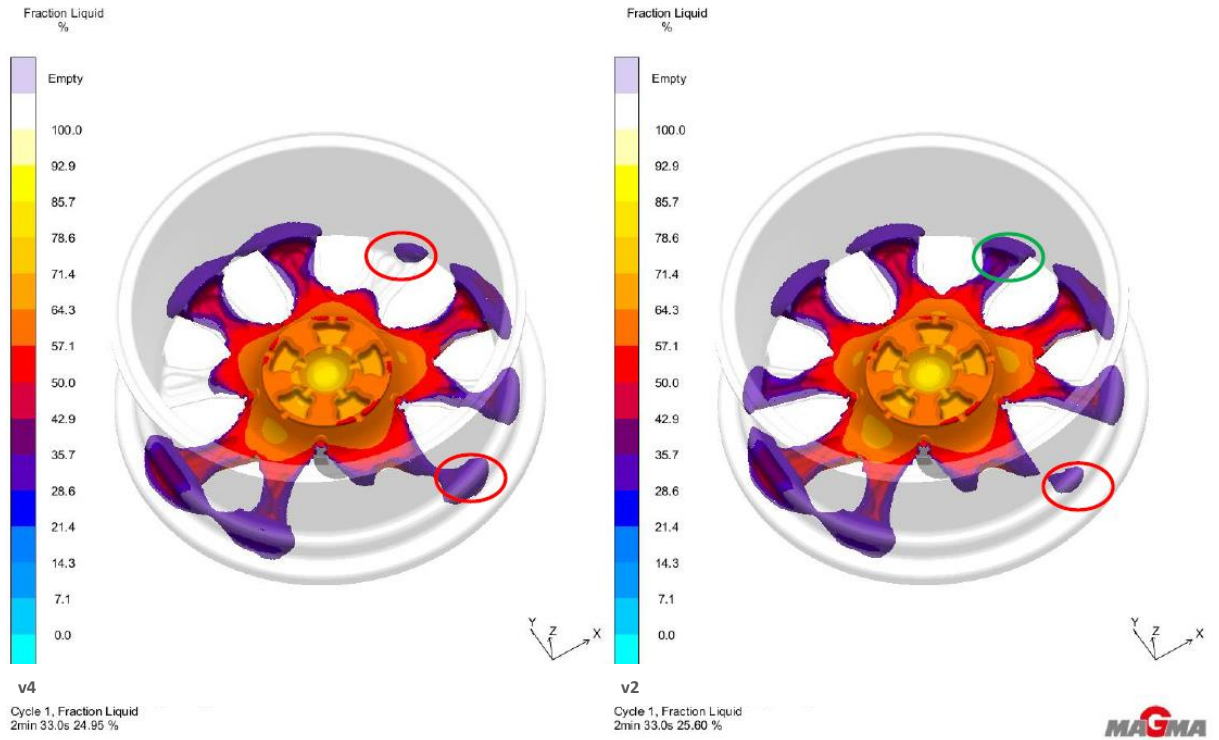
Aynı noktadan alınan porozite değerlerinin büyüklüklerine de bakıldığında, termal olarak hesaplanmış kesit en iyi sonucu, standart kesitin ise ortalama değere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ters kesit ortalama sonuç verirken, en kötü sonuçları sabit kesit ve jant kesit kalınlığına göre giden kesitler vermiştir. En kötü sonuç, jant kesit kalınlığına göre yapılmış tasarıma aittir.

### 5.2.2. Katılma Sonuçları

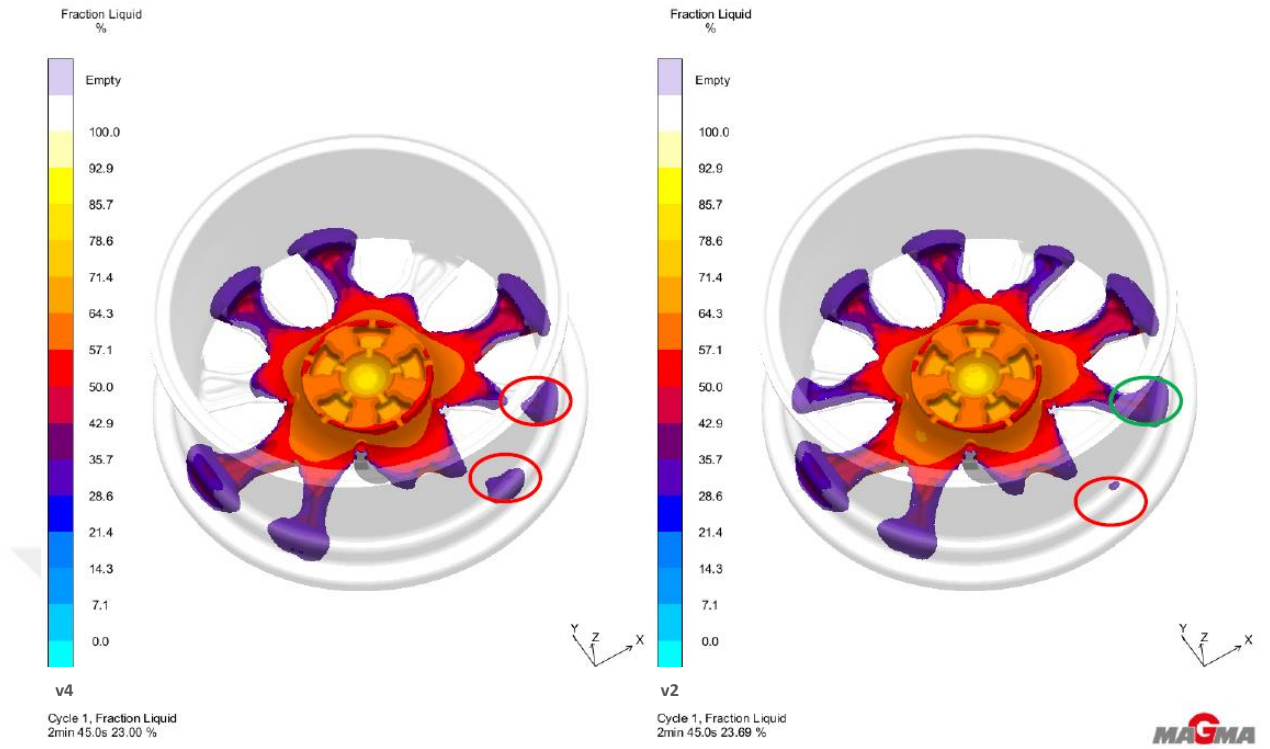
Bu bölümde, porozite sonuçları ve optimizasyon çalışmasından elde edilen sonuçlara göre porozitenin fazla görüldüğü bölgedeki katılma sonuçları incelenmiştir. Sonuçlardaki karmaşıklığı ve tüm sonuçlardaki fazlalığı azaltmak adına, en iyi iki versiyonun katılma karakteristikleri simülasyon programından alınarak sonuç karşılaştırması yapılmıştır. Katılma simülasyonunda görülecek erken kopmaların, sağlıksız ve yönsel olmayan katılmanın poroziteye sebep olup olmadığının yorumunun yapılması incelenecek sonuçlar ile mümkün kılınacaktır.



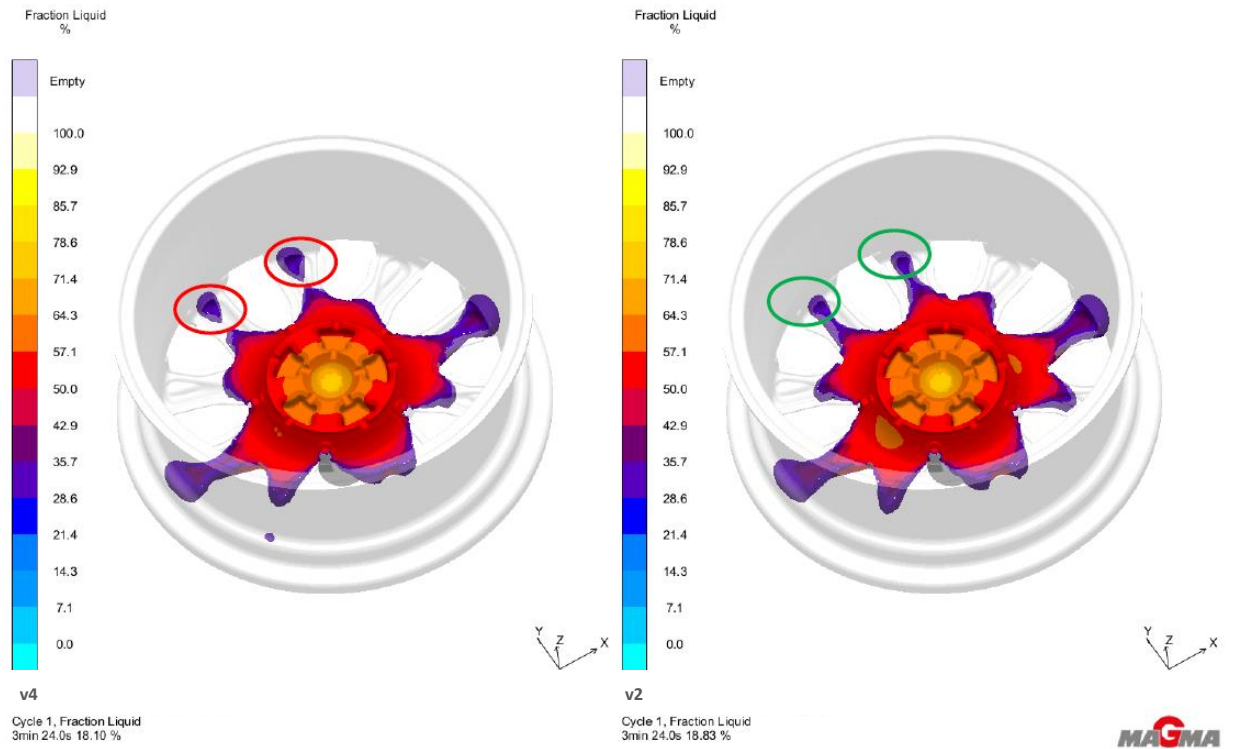
Şekil 5.6 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (2 dk, 6sn)



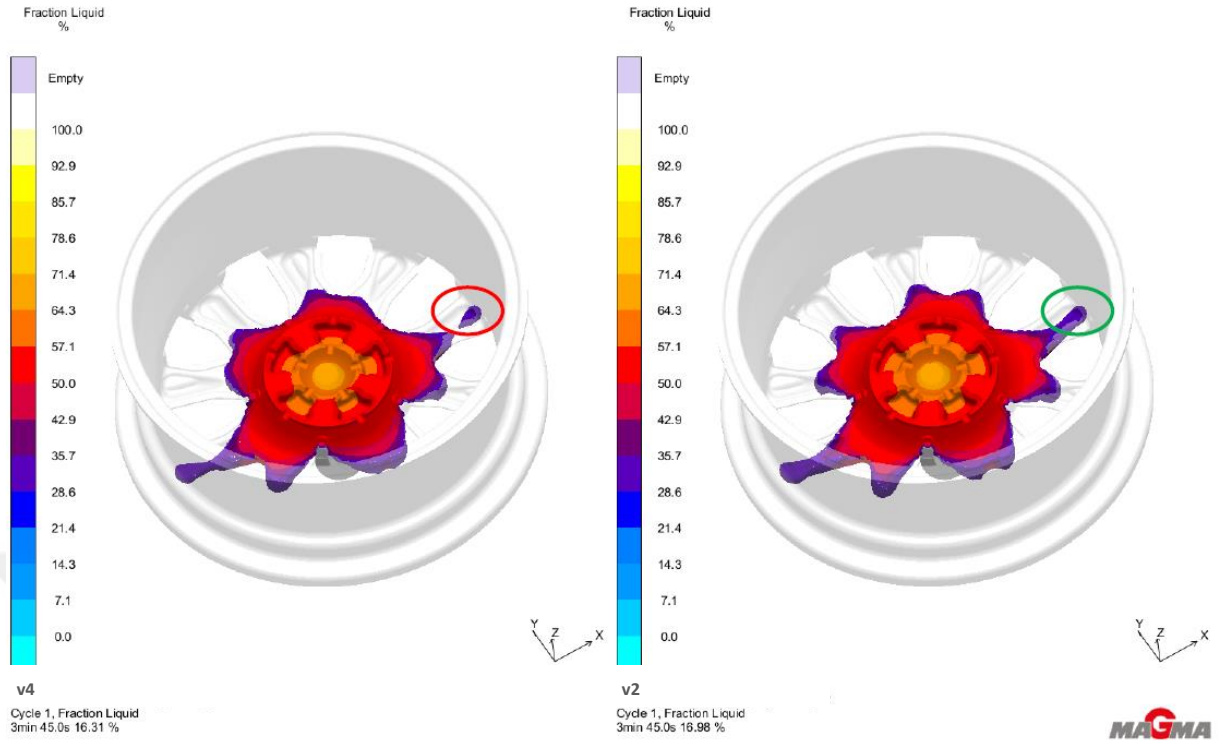
Şekil 5.7 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (2 dk, 33sn)



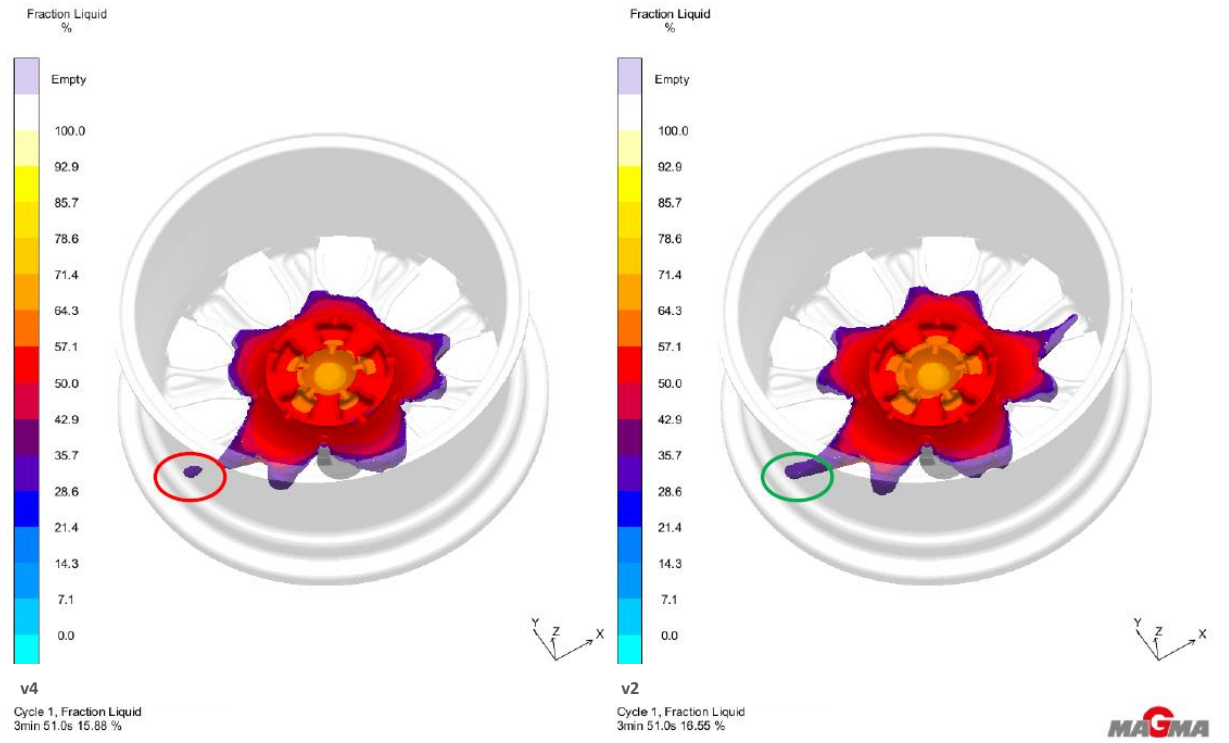
Şekil 5.8 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (2 dk, 45 sn)



Şekil 5.9 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (3 dk, 24 sn)



Şekil 5.10 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (3 dk, 45 sn)



Şekil 5.11 Standart ve Termal Kesit Katılma Görünüm Karşılaştırmaları (3 dk, 51 sn)

Katılaşma sonuçları içindeki maden katı faz ve sıvı oranının zamana bağlı olarak incelemesi yapabildiğimiz bu sıvı oranı sonuç arayüzünden erken katılaşan yerlerin ve yönsel katılaşmanın yorumu yapılabilmektedir.

Kalıp içerisinde dolum tamamlandıktan sonra alaşımın sıcaklığı maksimum değerdedir. Kalıptaki madene göre düşük sıcaklık ve kesit farkları ile alaşımın sıcaklığı düşürülmeye başlanır. Bununla ilgili genel bilgiler daha önceki bölümlerde literatürde paylaşılmıştır. Literatürdeki faz diyagramı sıcaklık eğrisini incelediğimizde, dolumu tamamlanan ve maksimum sıcaklıktaki alaşım likidus ( $623^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklığına gelmeye başlar. Likidus sıcaklığının altına düşen alaşım daha fazla ısı kaybederek solidus ( $577^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklığına doğru düşmeye başlar. Bu sıcaklıklar arasında alaşım katılaşma aşamasına başlamıştır. Bu yarı-katı hal olarak bulunan durumda soğuma hızı jantın mekanik özelliklerinin oluşumunda önemli rol almaktadır.  $577^{\circ}\text{C}$  altına düşen bölgeler katılaşmış olarak tanımlanmaktadır. Simülasyonda beyaz bölgeler katılaşmış bölgeleri ifade ederken, renkli bölgeler madenin henüz katılaşmadığı bölgeleri ifade etmektedir.

Yukarıdaki standart ve termal kesitlere ait görseller eklenmiştir. Eklenen görsellerde, ait oldukları zamanlara ait katılaşma oranları açıkça görülmektedir. Görsellerde işaretli bölgeler karşılaştırıldığında feder ucu bölgesinde termal kesitteki kopmanın daha az olduğu ve oransal olarak daha düşük olduğu, buna bağlı olarak da görülen porozite miktarının az olduğu yorumu rahatlıkla yapılabilir.

Bölgedeki porozite oranının daha da azaltılması için yönsel katılaşmanın daha sağlıklı şekilde yapılması sağlanabilir. Bunun için soğutmalar kullanılabilir. İlave olarak, termal kalıp üzerinde her kolda yönlü katılaşma görülmüştür. Çünkü aynı hesaplamaların üst maça ve yan bloklar içinde yapılması gerekmektedir. Ancak çalışma alt maça kesit kalınlıklarının termal hesaplamalarla daha iyi hale getirilebileceğini göstermiştir. Çalışmaya dahil olmayan soğutmalar da dahil edildiğinde standart kesit ve termal kesitlerde döküm katılaşması yönlü hale getirilebilecektir. Ancak bu çalışmada incelenmemiştir.

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler yorumlanarak aşağıdaki yorumlar yapılmaktadır.

- Standart kalıp kesit kalınlıkları tasarım için uygundur ancak termal kesit hesaplamaları daha iyi sonuç vermiştir. Bu kapsamda tasarımlara yeni bir bakış getirilebilir.
- Termal kalıp üzerinde her kolda yönlü katılma görülmemiştir. Çünkü aynı hesaplamaların üst maça ve yan bloklar gibi diğer kalıp parçaları için de yapılması gereklidir. Ancak çalışma alt maça kesit kalınlıklarının termal hesaplamalarla daha iyi hale getirilebileceğini göstermiştir.
- Termal kesit çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar için olumlu yorum yapabilmek mümkündür. Ancak kalıp kesitinde sınırlar olmasından dolayı yönlü katılmanın sadece kalıp kesitleri ile sağlanması çok mümkün görülmemiştir. Bu konu göz önüne alınarak, yönlü katılmayı tam olarak sağlamasa da optimum kesitlere sahip kalıplar olumlu etki sağlayacaktır. Çünkü soğutma süreleri mekanik özellikleri etkilemektedir. Optimum kalıp kesiti maksimum soğutma süresi sağlamak için kullanılabilir bir etkidir.
- Çalışmaya dahil olmayan soğutmalar da dahil edildiğinde standart kesit ve termal kesitlerde döküm katılması yönlü hale getirilebilir. Ancak bu çalışmada incelenmemiştir.
- Her jant için modele özgü kalıp kesit kalınlıkları ayarlanmalıdır. Bu kesit alt maça için topuk bölgesinde, jant topuk bölgesi kütlesine göre kalın başlamalı, boşaltma bölgesinde minimum kesit kalınlığı kalıbın çatlamayacağı minimum değerlere kadar inebilir olmalıdır. Jant göbek bölgesinde jantın feder kol bölgesinde beslemeyi artırmak için kol kesit kalınlığına göre kol offset birleşiminden başlayarak artan bir kalınlık olmalıdır. Bu kalınlıklara soğutma gücü de çok etki etmektedir. Soğutulamayacak kadar kalın ya da fazla ince kesit seri üretim problemlerine neden olabilecektir.
- Her jant için ayrı olarak elle kesit kalınlığı hesaplamak çok doğru bir yöntem olmayacaktır. Bu durum ya kalıp tasarım tekniklerine ayrı bir eğitim ve hesaplama yükü verecek ya da mühendislik hesaplaması için ek süre gerektirecektir. Konuyla ilgili numerik yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Alternatif yöntemler olarak ürün tasarımı ve soğutma tasarımı üzerinde geliştirmeler yapılabilir. Ancak çalışma sonucunda her ürün için standart kalıp kesiti, soğutma tasarımı olamayacağını göstermektedir. Standart ürün de yapılamayacağı için ürün-kalıp-soğutma arası optimizasyonun ve standartlaşmasının numerik yöntemlerle yapılması gerekmektedir.

- Yapılacak çalışma üründe döküm tasarımı standartlaştırılması ile başlayacak, kalıp tasarımında standartlaştırma ile devam edecektir. Ancak soğutma ile ilgili konuda ise proses standartlaştırma çalışmaları gerekmektedir.
- Bu çalışmalarda numerik yöntemlerin kullanılması kararlaştırılırsa elde bulunan döküm simülasyon programında gerçekçi döküm sonuçları elde etmek için geliştirme yapılmalıdır. Bu geliştirmeler teorik olarak yapılmıştır. Fakat doğrulanmamıştır. Doğrulama yapılabilmesi için gerçek sonuçlarda bulunan zaman ve kalıp sıcaklığı dışında alüminyum sıcaklıklarının da ölçülmesi gerekmektedir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akhyar, H., Malau, V., & Iswanto, P. T.** (2017). Hot tearing susceptibility of aluminum alloys using CRCM-Horizontal mold. *Results in physics*, 7, 1030-1039.
- Akıncı, E.** (2005). Alçak Basınç Döküm Tekniğiyle Jant İmalatında Kalıp Tasarımı. İzmir: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azqadan, E., Uramowski, J., Roostaei, A. A., Behraves, S. B., Javaid, A., Williams, B. W., & Jahed, H.** (2022). The effect of cooling rate and degassing on microstructure and mechanical properties of cast AZ80 magnesium alloy. *Materials Science and En.*
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., Dewitt, D. P., & Lavine, A. S.** (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Seventh Edition.*
- Bozkurt, E.** (2019). Investigation of Cooling Design Systems In Low Pressure Casting (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Campbell, J.** (2011). *Complete casting handbook: Metal casting processes, techniques and design.* Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M.** (2008). Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları. İstanbul, 939.: Nobel Matbaacılık.
- Das, P., Samanta, S. K., Chattopadhyay, H., & Dutta, P.** (2012). Das, P., Samanta, S. K., Chattopadhyay, H., & Dutta, P. (2012). Effect of pouring temperature on cooling slope casting of semi-solid Al-Si-Mg alloy. *金属学报英文版*, 25(5), 329-339.
- Demircan, T., & Türkoğlu, H.** (2021). Çarpma osilasyonlu jetlerde osilasyon karakteristiklerinin ve çarpma mesafesinin akış ve ısı transferine etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4).
- Dhisale, M., Vasavada, J., & Tewari, A.** (2022). An approach to optimize cooling channel parameters of Low pressure Die casting process for reducing shrinkage porosity in Aluminium alloy wheels. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3189-3196.
- Duan, Y. C., Zhang, F. F., Yao, D., Tian, L., Yang, L., Guan, Y. P., & Hu, J. H.** (2020). Numerical prediction of fatigue life of an A356-T6 alloy wheel

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- considering the influence of casting defect and mean stress. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104903.
- Duff, E. S.** (1999). Fluid Flow Aspects of Solidification Modelling Simulation of Low Pressure Die Casting, Department of Mining and Metallurgical Engineering, The University of Queensland.
- Ercan, S.** (2011). Ticari Taşıtlarda Kullanılan Jantlarda Dinamik İşletim Yüğü Altında Oluşan Yorulma Ömrünün Bilgisayar Destekli Belirlenmesi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erzi, E., Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Colak, M., & Dispınar, D.** (2019). Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: supplier's quality index (SQI). *Metals*, 9(9), 957.
- Gourlay, C. M., Dahle, A. K., & Laukli, H. I.** (2004). Segregation band formation in Al-Si die castings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 2881-2891.
- Güneren, A.** (2019). T6 heat treatment optimization of A356 alloy. (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi). 56(663).
- Hamasaıid, A., Dargusch, M. S., & Dour, G.** (2019). The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 47, 229-237.
- Huang, P. H., Wu, W. J., & Shieh, C. H.** (2017, May). Numerical simulations of low pressure die-casting for A356 aluminum rims. In *Materials Science Forum* (Vol. 893, pp. 276-280). Trans Tech Publications Ltd.
- Işık, M.** (2019). Alüminyum Alaşımılı Binek Araç Jantlarının Dinamik Viraj Yorulması Davranışının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi.
- İştar, K. C., Şahin, S., Yıldırım, M., & Uygun, M.** (2021, 04 02). Yüksek Basınçlı Alüminyum Enjeksiyon Döküm Prosesinde Hata Türleri ve Olası Nedenleri Analizi ve Pompa Sektöründe Kullanılan Örnek Bir Parçadaki Hatalar ve Önlemleri. Avcılar - İstanbul, Türkiye.
- Jadhav, A. R., Hujare, D. P., & Hujare, P. P.** (2021). Design and optimization of gating system, modification of cooling system position and flow simulation

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- for cold chamber high pressure die casting machine. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7175-7181.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L.** (2004). *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. Asm International.
- Kaya, S. Ş., & Alaykiran, K.** (2019). Hata türü ve etkileri analizi ve döküm sektöründe bir uygulama. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 76-89.
- Kimura, T., & Nakamoto, T.** (2016). Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 89, 1294-1301. 56(670).
- Li, Y., Liu, J., Zhang, Q., & Huang, W.** (2021). Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure. *Materials Today Communications*, 27, 102416.
- Magmasoft**, [https://www.magmasoft.com.tr/tr/support/LEARNING\\_WORLD\\_support/](https://www.magmasoft.com.tr/tr/support/LEARNING_WORLD_support/) adresinden alındı (2023, 08 16).
- Merlin, M., Timelli, G., Bonollo, F., & Garagnani, G. L.** (2009). Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels. *Journal of materials processing technology*, 209(2), 1060-1073.
- Muelaner, J. E.** (2020). *Unsettled Technology Domains for Pathways to Automotive Decarbonization* (No. EPR2020014). SAE Technical Paper.
- Neill, S.** (2018). Finite Volume Method. In *Fundamentals of Ocean Renewable Energy*. (pp. 193-235).
- Ou, J., Wei, C., Cockcroft, S., Maijer, D., Zhu, L., Li, C., & Zhu, Z.** (2020). Advanced process simulation of low pressure die cast A356 aluminum automotive wheels—part I, process characterization. *Metals*, 10(5), 563.
- Oytaç, M.** (2006). *A Research On Turkish Wheel Industry And Tool Steels Used In Wheel Production*. Yüksek Lisans Tezi, 56(669), 50-51.
- Örmeci, İ.** (2021). Alçak Basınç Kokil Döküm İle Üretilen Alüminyum Alaşımli Jantın Modellenmesi Ve Doğrulanması. T.C. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 14-17.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pehlke, P. R., Cookson, D. J., Hao, D. S., Krishna, D. P., & Bilkey, K. T.** (2021). Heat Transfer at the Mold - Metal Interface in Permanent Mold. Department of Materials Science and Engineering The University of Michigan.
- Sazhin, S. S., Gol'dshtein, V. A., & Heikal, M. R.** (2001). A transient formulation of Newton's cooling law for spherical bodies. *J. Heat Transfer*, 123(1), 63-64.
- Tüdoksad.** (2023). Alüminyum alaşımlarının döküm sürecinde soğuma eğrilerinin kullanımı. <https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-alasimlarinin-dokum-surecinde-soguma-egrilerinin-kullanimi/> adresinden alındı
- Türkan, B.** (2021). Çarpan Hava Jetlerinde Farklı Parametrelerin Hız Sınır Tabakası Üzerindeki Etkisinin Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 873-889.
- Velluvakkandi, N.** (2009). Developing an Effective Die Cooling Technique for Casting Solidification: A Thesis Submitted in Fulfilment of the Degree of Master of Engineering, School of Engineering, Auckland University of Technology, July 2009 (Doctoral dissertation, AUT University).
- Viswanath, A., Manu, M. V., Savithri, S., & Pillai, U. T.** (2017). Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 320-330.
- Wang, L. D., Li, X. S., Chao, W. A., Wang, L. M., & Cao, Z. Y.** (2016). Effects of cooling rate on bio-corrosion resistance and mechanical properties of Mg-1Zn-0.5 Ca casting alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 704-711.
- Wang, Y., Schmidt, V., Senz, S., & Gösele, U.** (2006). Epitaxial growth of silicon nanowires using an aluminium catalyst. *Nature nanotechnology*, 1(3), 186-189.
- Yamagata, H., Tachibana, H., Kijima, S., Adachi, M., & Koiwai, S.** (2018). Direct observation of hot tearing of Al-7% Si-0.35% Mg alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4(3), 480-492.
- Yavuz, H.** (2019). Investigation of the cooling system efficiency in aluminum low pressure die casting (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Yay, B.** (2021). Kokil kalıplarda tungsten alaşımlı malzeme kullanımı ile termal yorulma ve aşınma direncinin artırılması. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Zhang, Q., Cao, M., Zhang, D., Zhang, S., & Sun, J.** (2014). Research on integrated casting and forging process of aluminum automobile wheel. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 870182.



## TEŞEKKÜR SAYFASI

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ve mühendislik alanında ilerlememi sağlayan tez danışmanım, Sn. Dr. Gökhan GÜRLEK'e;

Çalışmanın her aşamasında desteklerini esirgemeyen, başta Sn. Eren BOZKURT olmak üzere Sn. Hakan YAVUZ'a, Sn. Ali KARA'ya, tüm çalışma arkadaşlarıma; çalışmalarda maddi ve manevi her türlü desteği veren, çalışma imkânı sağlayan sektöründe öncü CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş.'ne;

Tüm hayatım boyunca yanımda olup beni sonuna kadar destekleyen, benim için büyük emek sarf eden sevgili aileme;

Saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZGEÇMİŞ

Ali UZUNCA

Ali UZUNCA, ilk ve ortaokulu Buca Hüseyin Avni Ateşoğlu İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini ise Bornova Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. Daha sonra hazırlık eğitimini de alarak Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne başlamıştır. 2020 yılında 3.17 / 4' lük lisans mezuniyet derecesi ile bu bölümden mezun olmuştur. Lisans öğrenimini tamamlar tamamlamaz Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, Termodinamik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine devam etmiştir. Aktif çalışma hayatına Kalıp Tasarım & Arge-2 Bölümü'nde, Kalıp ve Proses Geliştirme Mühendisi olarak CMS Jant ve Makine Sanayii A.Ş.'de devam etmektedir.