T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ELEKTRİK MOTOR KAPAKLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMÜNDE YOLLUK VE PROSES OPTİMİZASYONU

Onur BALTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı

Danışman

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI

Temmuz , 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ELEKTRİK MOTOR KAPAKLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMÜNDE YOLLUK VE PROSES OPTİMİZASYONU

Onur BALTA tarafından hazırlanan tez çalışması 18.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Anıl AKDOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU, Üye
Adnan Menderes Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Ali Serdar VANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Alüminyum Alaşımlı Elektrik Motor Kapaklarının Yüksek Basınçlı Dökümünde Yolluk Ve Proses Optimizasyonu " başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur BALTA

İmza

Aileme, arkadaşlarıma

ve

diğer tüm sevdiklerime…

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana her türlü desteği sağlayan ve katkılarını esirgemeyen değerli kişi ve kurumlara içtenlikle teşekkür ederim.

İlk olarak, tez danışmanım **Doç. Dr. Ali Serdar VANLI**'ya, araştırmamın her aşamasında gösterdiği hoşgörü, ilgi ve değerli rehberliği için teşekkür ederim. Onun derin bilgi birikimi, eleştirileri ve yapıcı yönlendirmeleri bu çalışmanın bilimsel anlamda derinleşmesini ve kalitesinin artmasını sağlamıştır.

Ayrıca, tezimin gelişim sürecinde profesyonel anlamda katkı sağlayan **Sn. Selda Kanar KAYAOKAY**'a teşekkürlerimi sunarım. Birlikte çalıştığımız süre boyunca gösterdiği destek, öneriler ve katkılar, araştırmamın verimli bir şekilde ilerlemesine olanak tanımıştır.

Çalışmamı gerçekleştirdiğim **GAMAK MAKİNA SANAYİ A.Ş.**'ye, tez çalışmamı gerçekleştirmem için sağladığı fırsatlar ve her aşamada gösterilen destek için teşekkür ederim. Şirketin sunduğu imkanlar ve çalışma ortamı, araştırmamın pratiğe dökülmesinde büyük bir rol oynamıştır. Bu süreçte bana yardımcı olan tüm GAMAK çalışanlarına teşekkür ederim.

Ailem, özellikle annem ve babama, bana her zaman moral kaynağı oldukları, bu süreç boyunca sabırla yanımda durdukları ve her türlü desteği sağladıkları için minnettarım. Onların sevgisi ve desteği, bu zorlu süreçte en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Son olarak, arkadaşlarıma ve çalışma arkadaşlarıma, beni her zaman destekleyen, moral veren ve bu çalışmaya katkı sağlayan herkese teşekkür ederim. Onların yardımları, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Tüm bu katkıların, bu tezin ortaya çıkmasında önemli bir etkisi olmuştur. Katkı sağlayan herkese bir kez daha teşekkürlerimi sunarım.

Onur BALTA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viiii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

1 GİRİŞ 1

1.1 Döküm ve döküm tekniği……..……..1

1.1.1 Dökümün tarihsel gelişimi……..……...1

1.1.2 Anadolu'da dökümün tarihsel gelişimi……...……...2

1.1.3 Osmanlılarda döküm ve metallurji teknolojisinin evrimi……...……...3

1.1.4 Avrupa'da döküm tekniklerinin gelişimi ve Osmanlı'ya etkileri……..4

1.2 Döküm sanayini gelişimi…….……..…….6

1.2.1 Döküm sanayisinin dünyadaki gelişimi……...……..6

1.2.2 Dünyada döküm üretimi……...……..……8

2 ALÜMİNYUM YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ 11

2.1 Yüksek basınçlı döküm……..……..11

2.2 Yüksek basınçlı döküm yönteminin sağladığı üstünlükler.....……14

2.3 Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminin Olumsuz Yönleri ……..……...15

2.4 Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinin İşleyişi ve Kontrol Değişkenleri……..16

3 YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR 18

3.1 Alüminyum alaşımları…….18

3.1.1 Alüminyum-Silisyum tabanlı döküm alaşımları ……..……..19

3.1.2 Alüminyum-Magnezyum tabanli döküm alaşimlari …….....…….....20

3.1.3 Alüminyum-Bakır tabanlı döküm alaşımları.……...…….….21

3.2 Alüminyum döküm alaşımının sınıflandırmasının incelenmesi …….....21

4 YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI 23

4.1 Yüksek basınçlı döküm kalıplarının tanımı ve işlevi…….....…….....23

4.2 Kalıp elemanları…….……...25

4.2.1 Yolluk…….…….25

4.2.2 Çekirdek……..26

4.2.3 Kalıp yarımları…….……..26

4.2.4 Maçalar……27

4.2.5 İtici plakası, paraleller ve iticiler…….……....27

4.2.6 Dağıtıcılar, hava tahliye kanalları ve taşma cepleri…….……...29

4.2.7 Soğutma Kanalları.…….…….....30

4.3 Yüksek basınçlı dökümde kalıp dizaynı.……..31

5 YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM HATALARI 35

5.1 Yüksek basınçlı döküm hatalarının sınıflandırılması……...…….……35

5.1.1 Gaz porozitesi…….……..42

5.1.2 Soğuk birleşme…….……....43

5.1.3 Çekinti (Shrinkage)……..44

5.1.4 Baloncuk (Blister) ……...…45

5.2 Yüksek basınçlı dökümün kalite kontrol süreçleri…...……..46

5.2.1 Porozite (X-Ray Kontrolleri)……..……47

5.2.2 Görsel kusurlar..……..……..47

5.2.3 Trim kusurları...…….……...47

5.2.4 Kaçak problemi (Leakage) ……..…48

5.3 Simülasyon tabanlı yöntemlerle yüksek basınçlı döküm analizi …..……...48

6 DENEYSEL ÇALIŞMA 50

6.1 Elektrik motorlarının tanımı ve çalışma prensibi……...……...50

6.2 Deneysel Çalışmalar……..51

6.2.1 Yolluk hesaplaması…….…….....53

6.2.2 Yolluk ve hava cepleri tasarımının İncelenmesi……..59

6.2.3 Döküm simülasyonlarının incelenmesi…….……...62

6.2.4 Revizyonların gerçekleştirilmesi ve döküm……..……...70

6.3 Kalite kontrol……74

6.3.1 Görsel kontroller…….…….....74

6.3.2 Spektral analiz (optik emisyon spektrometre)…….…..……..75

6.3.3 Optik mikroskop sonuçları…….……..77

6.3.4 Gaz giderme (Degazing) işlemi……...78

6.3.5 X-Ray radyoskopi analiz sonuçları……...……...79

6.3.6 Çekme deneyi sonuçları…….……..…80

6.4 Verimlilik analizi…….…….81

7 SONUÇ 82

KAYNAKÇA 84

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 87

SİMGE LİSTESİ

AlSi9Cu3	Alüminyum alaşım türü
Al	Alüminyum elementi
%Cu	Bakır yüzdesi
Cu	Bakır elementi
CNC	Bilgisayar Kontrollü
°	Derece
Fe	Demir elementi
%Fe	Demir yüzdesi
-	Eksi işareti veya aralık göstergesi
UTM	Evrensel Test Makinesi
GPa	Gigapascal
H-Index	Hidrojen indeksi testi
ISO	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
Sn	Kalay elementi
%Sn	Kalay yüzdesi
L/dk	Litre/dakika (debi)
Mg	Magnezyum elementi
%Mg	Magnezyum yüzdesi
Mn	Mangan elementi
%Mn	Mangan yüzdesi
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
MPa	Megapascal (gerilme/basınç)
Ni	Nikel elementi
%Ni	Nikel yüzdesi
OES	Optik Emisyon Spektrometre
Pb	Kurşun elementi
%Pb	Kurşun yüzdesi

rpm	Devir/dakika
°C	Santigrat derece
Si	Silikon elementi
%Si	Silikon yüzdesi
Ti	Titanyum elementi
%Ti	Titanyum yüzdesi
%Zn	Çinko yüzdesi
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

AISI	American Iron and Steel Institute
CNC	Bilgisayar Kontrollü (Computer Numerical Control) tezgahı
EN AB	Avrupa Birliği standartları
H-Index	Hidrojen indeksi testi
H10/H11/H13	Sıcak iş takım çeliği sınıfları (DIN/SAE standartları)
HPDC	Yüksek basınçlı döküm
HRC	Rockwell Sertlik Ölçeği (C Skalası)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
M.Ö.	Milattan Önce
MPa	Megapascal (basınç birimi)
OES	Optik Emisyon Spektrometresi
PT100	Sıcaklık sensörü (Platin rezistans tipi)
R&D	Research and Development (Araştırma ve Geliştirme)
ROI	Yatırım Getirisi (Return on Investment)
rpm	Devir/dakika (Revolutions per minute)
SAE	Society of Automotive Engineers
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
UTM	Evrensel Test Makinesi (Universal Testing Machine)
µm	Mikrometre
vs.	ve benzeri (Latince: versus)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Soğuk kamaralı metal enjeksiyon makinesi ……..…....**12**
Şekil 2.2 Sıcak kamaralı metal enjeksiyon makinesi……..……....**12**
Şekil 2.3 Sıvı Metalin Kovan İçindeki Davranışı (Soğuk Kamaralı)…….……**13**
Şekil 2.4 Basınç altında gerçekleştirilen dökümde enjeksiyon adımları…..……..**14**
Şekil 2.5 Yüksek basınçlı döküm proses döngüsü……..**16**
Şekil 4.1 Yüksek basınçlı döküm kalıbını oluşturan bileşenler …...…….…...…...**24**
Şekil 4.2 Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri……..**25**
Şekil 4.3 Hareketli kalıp yüzeyine montelenmiş çekirdek bileşeni ……...…**26**
Şekil 4.4 Kalıp hamillerinin kalıp seti içerisinde görünümü……..…**26**
Şekil 4.5 Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü…….……..…….…**27**
Şekil 4.6 Kalıp düzeninde yer alan itici levha ve paralel çubuklar…...……..**28**
Şekil 4.7 İtici pimlerin şematik gösterimi……...…...**29**
Şekil 4.8 Bir kalıpta yolluk giriş noktaları ve taşma odaları …….……...….**30**
Şekil 4.9 Soğutma kanallarının şematik gösterimi……...……..**30**
Şekil 4.10 İki gözlü kalıpta A- Klavuz pimi B- Hidrolik pompası C- Maça…..….**33**
Şekil 4.11 Hava tahliye yolları ve cepleri ……...……..…..**34**
Şekil 5.1 Hataların kategorizasyonu ve nedenleri ……...……...…..…**42**
Şekil 5.2 Alüminyum döküm parçasındaki gaz kaynaklı boşluklar (porozite)…..**43**
Şekil 5.3 Yüksek basınçlı döküm sırasında soğuk birleşme kusurunun meydana gelme süreci……...……...**43**
Şekil 5.4 Düşük mekanik kuvvet altında kırılmaya neden olan soğuk birleşme kusuru……...**44**
Şekil 5.5 Mikroyapı ve üç boyutlu analizde porozite ile çekinti boşluklarının dağılımı……...…….…**45**
Şekil 5.6 Baloncuk hatasının meydana gelme süreci (üst kısım) ve makro düzeyde görünümü (alt kısım)……...……..**46**
Şekil 6.1 Elektrik motoru görseli ve parçaları…….…….……....**50**
Şekil 6.2 Deneysel çalışma sistematiği……..……..…..**51**
Şekil 6.3 Elektrik motoru kapağı ve özellikleri……...…….**51**
Şekil 6.4 Parçada gözlemlenen döküm hataları……...…….**52**
Şekil 6.5 Eski yolluk giriş kesit alanı……...…….…….**55**
Şekil 6.6 Yeni yoluk giriş kesit alanı……...…….…**55**

Şekil 6.7 Eski ve yeni yoluk kolu kesit alanı……..…...….**56**
Şekil 6.8 Eski-yeni yoluk kesit alanları (topuz kısmından başlayan nokta)……..**56**
Şekil 6.9 Eski ve yeni yoluk dönüş kesit alanı 1…….……..…**57**
Şekil 6.10 Eski ve yeni yoluk dönüş kesit alanı 2……....**58**
Şekil 6.11 Chillvent kesit alanları……...**58**
Şekil 6.12 Topuz kısmı eski ve yeni ölçüler……..…..**59**
Şekil 6.13 Yollukta revizyonun gerçekleştirildiği bölge…….....**59**
Şekil 6.14 Önceki ve yeni hava cepleri tasarımları…….……**60**
Şekil 6.15 Yeni eklenen hava cepleri…….…**60**
Şekil 6.16 Eski ve yeni tasarım salkım……..…..**61**
Şekil 6.17 Simülasyonda sıcaklık analizi……..…..**63**
Şekil 6.18 Simülasyonda hız analizi…….…..**64**
Şekil 6.19 Simülasyonda hava tahliye analizi……...….**65**
Şekil 6.20 Simülasyonda oluşması muhtemel boşlukların analizi……**66**
Şekil 6.21 Hot spot bölgeler (Sıcak bölgeler)…….....**67**
Şekil 6.22 Parçanın tasarımında yapılan iyileştirmeler…….…..**68**
Şekil 6.23 Göbek bölgesi için tasarlanılan soğutma kanalı…….....**68**
Şekil 6.24 Hareketli ve Sabit Kalıp yarımları için tasarlanılan soğutma Kanalları……..….**69**
Şekil 6.25 İyileştirmeler sonrası hot spot (Sıcak bölgeler) analizi……..…...**70**
Şekil 6.26 Kalıpta gerçekleştirilen revizyon…….…….……...**70**
Şekil 6.27 Yeni hava cebi ve tahliye kanalı…….……**71**
Şekil 6.28 Tasarlanılan chilvent ve yerleştirme bölgesi…….…...…..**71**
Şekil 6.29 Eklenen chilventler…….……..….**72**
Şekil 6.30 Yolluk girişleri…….…….……**72**
Şekil 6.31 Göbek bölgesi soğutma kanalı…….……..…**73**
Şekil 6.32 Döküm kalıbı Son hali…….…..**73**
Şekil 6.33 Yeni kalıp döküm işlemi salkımı…….…..**74**
Şekil 6.34 Talaşlı işlem öncesi ve sonrası kapağın göbek bölgesi…….....**74**
Şekil 6.35 Spektral analizde kullanılan numune……..…**75**
Şekil 6.36 Spektral analiz cihazı……..…**75**
Şekil 6.37 Hazırlanan numune örneği ve ters tip endüstriyel optik mikroskop..……**77**
Şekil 6.38 Mikroskop altında görüntüleri……...…**77**
Şekil 6.39 Gaz giderme (Degazing) işlemi……..…**78**
Şekil 6.40 X-ray radyoskopi görüntüleri……....**79**

Şekil 6.41 Alüminyum alaşımın çekme deneyi ve sonuçları……...…**80**
Şekil 6.42 Optimizasyon öncesi-sonrası ret oranı…….…..**81**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Alüminyum döküm alaşımlarının endüstriyel sınıflandırması**..**…….**22**

Tablo 4.1 Yüksek basınçlı döküm kalıp parçalarında kullanılan malzemeler..……...**31**

Tablo 5.1 Derek Leonard Cocks göre döküm hatalarının kategorize edilmesi …...**35**

Tablo 5.2 Campbell göre döküm hatalarının kategorize edilmesi …….…….**36**

Tablo 5.3 NADCA'ya göre döküm hatalarının kategorize edilmesi …..…..……..**37**

Tablo 5.4 İç hataların kategorize edilmesi...……..…….**38**

Tablo 5.5 Şekilsel hataların kategorize edilmesi ……...…….…...**40**

Tablo 5.6 Yüksek basınçlı döküm prosesinde görülen hata türlerinin ortaya çıkma oranlarının yüzdeliği …….……..**40**

Tablo 6.1 Alüminyum dolum zamanı…….…....**54**

Tablo 6.2 Simülasyon parametre değerleri…….....**62**

Tablo 6.3 Kimyasal kompozisyon değerleri……..….**75**

Tablo 6.4 Spektral analiz sonuçları değerleri…….……**76**

ÖZET

Alüminyum Alaşımlı Elektrik Motor Kapaklarının Yüksek Basınçlı Dökümünde Yolluk Ve Proses Optimizasyonu

Onur BALTA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali Serdar VANLI

Bu çalışmada, yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen ve üretim sürecinde döküm hatalarının gözlemlendiği elektrik motoru kapaklarının üretim kalitesini artırmak amacıyla yapılan iyileştirme ve optimizasyon çalışmaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Özellikle eski tasarımda sıklıkla karşılaşılan ve parçanın göbek kısmında oluşan çekinti porozitesi problemi, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiş, bu da ürün ömrünün kısalmasına ve kullanım sırasında güvenilirlik sorunlarına neden olmuştur. Bu problemleri gidermek amacıyla süreçte kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Proses parametrelerinin yeniden değerlendirilmesinin yanı sıra, yolluk tasarımında yapılan değişiklikler, hava cepleri düzenlemeleri, chilvent eklemeleri ve kalıp içerisindeki soğutma sisteminin optimize edilmesi gibi çok yönlü iyileştirmelere gidilmiştir. Bu teknik düzenlemeler, döküm esnasındaki metal akışının daha dengeli hale gelmesini, hava tahliyesinin daha etkin bir şekilde sağlanmasını ve sıcaklık dağılımının daha homojen olmasını mümkün kılmıştır. Yapılan bu çalışmaların etkinliği, döküm simülasyon programı MagmaSoft yazılımı ile yapılan analizler sayesinde somut

verilerle desteklenmiş ve iyileştirmelerin başarısı doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önceki tasarımlarda gözlemlenen sıcak bölgeler, akış bozuklukları ve gaz hapsolması gibi problemlerin yeni tasarım ve prosesle büyük ölçüde giderildiğini ortaya koymuştur. Bu optimizasyonlar uygulamaya alınmış gerekli revizyonlar gerçekleştirilmiştir. Sahada uygulanması sonucunda yapılan kalite kontrollerinde de olumlu sonuçlar elde edilmiş; hem ürün kalitesinde artış sağlanmış hem de hurda oranı önemli ölçüde düşürülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışma döküm süreçlerinde yapılan teknik revizyonların, nihai ürünün dayanıklılığı, güvenilirliği ve üretim verimliliği üzerindeki olumlu etkilerini gözler önüne sermektedir. Bu bağlamda, benzer üretim süreçlerinde karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik olarak yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Basınçlı Döküm, Elektrik Motoru Kapakları, Döküm Hataları, Ürün kalitesi, Proses ve Kalıp Optimizasyonu

ABSTRACT

Gating System And Process Optimization of Aluminum Alloy Electric Motor Covers in High Pressure Die Casting

Onur BALTA

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Dr. Ali Serdar VANLI

In this study, the improvement and optimization efforts aimed at enhancing the production quality of electric motor covers manufactured through high pressure die casting where casting defects were observed during the production process are discussed in detail. In particular, the shrinkage porosity issue frequently encountered in the hub area of the previous design had an adverse effect on the mechanical properties of the part, resulting in a shortened product lifespan and reliability issues during use. To address these problems, a comprehensive analysis of the process was conducted. In addition to re-evaluating the process parameters, multifaceted improvements were implemented, including modifications to the gating system design, adjustments to air vents, the addition of chill vents, and the optimization of the cooling system within the mold. These technical modifications enabled more balanced metal flow during casting, more effective air evacuation, and a more homogeneous temperature distribution. The effectiveness of these improvements was supported by concrete data through analyses conducted using MagmaSoft casting simulation software. The simulation results demonstrated that issues such as hot spots, flow disturbances, and gas entrapment observed in the previous designs were significantly mitigated with the new design and process. These optimizations were subsequently implemented, and the necessary revisions

were carried out. Quality inspections following the field application yielded positive results, showing improvements in product quality and a significant reduction in scrap rate. In conclusion, this study highlights the positive impact of technical revisions in casting processes on the durability, reliability, and production efficiency of the final product. In this context, it serves as a guiding reference for addressing similar issues encountered in comparable manufacturing processes.

Keywords: High-Pressure Die Casting, Electric Motor Covers, Casting Defects, Product Quality, Process and Mold Optimization

1
GİRİŞ

1.1 Döküm ve Döküm Tekniği

Metallere şekil verme yöntemleri arasında döküm, hem üretim sürecinin pratikliği hem de ekonomikliği bakımından önemli avantajlar sunar. Bu özellikleri sayesinde, döküm yöntemi üretim teknolojileri içerisinde ayrıcalıklı bir konuma sahiptir. Dökümle elde edilen ürünlerin çeşitliliği, maliyeti ve kalite düzeyi, bir ülkenin sanayi altyapısı, bilimsel gelişmişliği ve eğitim seviyesiyle yakından ilişkilidir.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde döküm teknolojisi; ulaşım araçları, konut inşası, tarımsal ekipmanlar, kentsel altyapı sistemleri, temel sanayi ürünleri ve belirli özel üretim alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanayileşme süreçlerinin hız kazanmasıyla birlikte döküm ürünlerine olan ihtiyaç yalnızca altyapı alanlarında değil; aynı zamanda ana metal sanayi, kimya, enerji ve madencilik gibi temel sektörlerde de artış göstermektedir.

Bununla birlikte, elektrikli ya da mekanik makineler, dayanıklı tüketim ürünleri, otomotiv endüstrisi ve gemi inşası gibi yüksek katma değerli sektörlerde döküm parçalarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Tüm bu gelişmeler, döküm teknolojisinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal kalkınmanın da stratejik bir bileşeni olduğunu göstermektedir. [1]

1.1.1 Dökümün Tarihsel Gelişimi

Metal işleme ve şekillendirme süreci, insanlık tarihi kadar eski bir geçmişe sahiptir. Arkeolojik ve tarihsel bulgular, M.Ö. 6000'li yıllarda insanların metalleri keşfetmeleriyle birlikte döküm yöntemlerini de kullanmaya başladıklarını göstermektedir. Bu erken dönemlerde, özellikle altın, gümüş ve bronz gibi kolay işlenebilen metaller, günlük kullanım eşyalarının üretiminde kullanılmıştır. Çanak, kupa ve benzeri basit ev gereçlerinin yanı sıra, estetik ve işlevsel nesnelerin

üretiminde döküm tekniğinden yararlanılmıştır. Altın ve gümüş gibi doğada saf halde bulunabilen metallerin yanı sıra, Mezopotamya coğrafyasında M.Ö. 6000'lerde bakırın karbonat minerallerinden elde edilmesiyle daha gelişmiş metal işleme teknikleri ortaya çıkmıştır. Mezopotamya, Babil, Mısır, Hindistan ve Çin gibi kadim medeniyetlerde, tarım dışı zanaatların gelişimiyle birlikte dökümün önemi artmıştır. Demir mineralleri Bakır Çağı'ndan bu yana bilinse de, ilk zamanlarda yalnızca meteorit demiri kullanılabilmiştir. Bronz Çağı'nın sona ermesiyle birlikte Demir Çağı'nın başlaması, metalurjik alanda büyük bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. M.Ö. 2000'li yıllarda Hititler, demir metalürjisi konusunda büyük bir ilerleme kaydetmiş ve bu alanda bir tür tekel oluşturmuşlardır. Özellikle demirden ürettikleri silahlarla askerî anlamda önemli bir güç elde eden Hititler, demiri hem stratejik bir kaynak hem de ticari bir metal olarak kullanmışlardır. Demirin işlenmesi ise genellikle cevherin katı halde redüksiyona uğratılması ve ardından yüksek sıcaklıkta dövülmesi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. M.Ö. 1400'lerden sonra Kafkasya'da yaşayan demirci topluluklar, demirin eritilmesiyle yapılan döküm tekniklerini geliştirmişlerdir. Bu toplulukların yaşadığı bölgelerde bol miktarda bakır ve demir cevherinin bulunması, metal işçiliğinin ilerlemesine büyük katkı sağlamıştır. Bölgeden günümüze ulaşan dökümhane kalıntıları, bu alandaki gelişimin somut kanıtları arasında yer alır. Döküm tekniklerinin sadece Batı Asya ile sınırlı kalmadığı, aynı zamanda Doğu Asya'da da geliştiği bilinmektedir. M.Ö. 300'lü yıllardan itibaren Çin'de demir dökümünün yaygınlaştığı, özellikle M.Ö. 200 ile M.S. 200 yılları arasında Han Hanedanı döneminde büyük fırınlarda demirin 1400°C'yi aşan sıcaklıklarda eritilerek kalıplara döküldüğü belgelenmiştir. Avusturya'nın Noricum bölgesinde bulunan arkeolojik kalıntılar, bölgenin hem bronz hem de demir işçiliğinde ileri bir merkez olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Anadolu'da çıkarılan demir cevherlerinin klasik dönem ticaret yolları üzerinden Balkanlar'a ulaştığı ve burada da demir işleme teknolojilerinin geliştiği anlaşılmaktadır.[2]

1.1.2 Anadolu'da Dökümün Tarihsel Gelişimi

Anadolu, yalnızca medeniyetlerin kesişim noktası olmasıyla değil, aynı zamanda metal işçiliği ve dökümcülük tarihine öncülük eden zengin geçmişiyle de dikkat çeker. Yapılan arkeolojik çalışmalar, bu topraklarda madencilik faaliyetlerinin Neolitik Çağ'a kadar uzandığını ortaya koymaktadır. Konya'nın Çumra ilçesinde

yer alan Çatalhöyük kazılarında, M.Ö. 6000'li yıllara tarihlenen metal işçiliğine dair kesin kanıtlar elde edilmiştir. Tokat'ın Erbaa ilçesindeki Gümüşlük mevkiinde gerçekleştirilen kazı ve sondajlarda, dağlık bölgelerdeki maden galerilerinde M.Ö. 3800 yılına ait olduğu düşünülen ahşap taşıma araçları ve kazma aletleri bulunmuştur. Benzer şekilde, Kütahya'nın Gümüşköy-Aktepe yöresindeki bulgular, M.Ö. 2400'lü yıllarda madenciliğin ilkel aydınlatma teknikleriyle, yani çıra ışığında sürdürüldüğünü göstermektedir. 1937 yılında Alacahöyük'te yapılan kazılar ise, %9 ila %17 oranında kalay içeren bronz eserlerin varlığına işaret ederek, bu dönemde alaşım bilgisi ve uygulamasının ileri bir düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Hititlerin hüküm sürdüğü M.Ö. 1750–1450 yılları arasındaki dönemde, bronz ve bakır üretiminin oldukça yaygın olduğu, ayrıca demir ticaretinin de bu dönemde başladığına dair tarihî belgeler bulunmaktadır. Ankara'nın Karaali köyü ile Tokat ve Amasya'nın Gümüşköy beldelerinde yapılan arkeolojik kazılarda, 70.000 ile 1.500.000 ton arasında değişen miktarlarda cüruf (maden atığı) hazneleri tespit edilmiştir. Bu atıklar üzerinde yapılan C14 karbon testleri, M.Ö. 1880 yılına ait yüksek kaliteli döküm faaliyetlerinin varlığını doğrulamaktadır. Urartular ise M.Ö. 900–600 yılları arasında, tunçtan dökülmüş eşyaları başta kuzey İtalya'daki Etrüskler olmak üzere Yunanistan ve çeşitli Akdeniz bölgelerine ihraç etmişlerdir. Bu durum, Urartuların metal işleme ve döküm teknolojisinde ne denli ileri olduklarını göstermektedir. M.Ö. 700–550 yılları arasında Anadolu'da hüküm süren Frigler dönemi ise, döküm tekniklerinin en gelişmiş olduğu dönemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu dönem, Anadolu metalurjisinin teknik ve sanatsal açıdan zirveye ulaştığı bir çağ olarak nitelendirilmektedir.[3]

1.1.3 Osmanlılarda Döküm ve Metallurji Teknolojisinin Evrimi

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, metallurjinin doğuş ve gelişim merkezi Anadolu olmuştur. Bu bağlamda, Türklerin metallurjiye ilgisi ve katkıları erken dönemlerden itibaren önemli bir yer tutar. Osmanlı döneminde ise, özellikle 15. yüzyılda döküm ve metalurji tekniklerinde kayda değer ilerlemeler yaşanmıştır. Bu ilerlemenin en somut örneği, 1450 yılında Fatih Sultan Mehmet döneminde İstanbul'un Tophane semtinde kurulan ilk büyük top dökümhanesidir. Bu tesisin kurulmasında, dönemin mühendislerinden Saruca Bey, mimar Muslihiddin Hoca ile Bizans'tan davet edilen Macar asıllı top dökümcüsü Orban'ın önemli katkıları olmuştur. Başlangıçta yalnızca top üretimi için planlanan bu dökümhane, zamanla

diğer askeri araçların yapımında da kullanılmaya başlanmıştır. Tophane, II. Beyazıt döneminde genişletilmiş ve kapasitesi artırılmıştır. Kanuni Sultan Süleyman ise bu tesisi yıkarak çok daha büyük ve gelişmiş bir dökümhanenin inşasını gerçekleştirmiştir. O döneme ait döküm yöntemleri ve üretim süreçlerine dair ayrıntılı bilgiler, Evliya Çelebi'nin 1640'lı yıllarda yazdığı Seyahatname eserinde kapsamlı şekilde yer almaktadır. 18. yüzyılda ise Fransız mühendis ve asker Baron de Tott'un İstanbul'a gelişiyle birlikte, Tophane'de modernizasyon çalışmaları başlatılmıştır. 1755 ve 1770 yıllarında İstanbul'a gelen de Tott, 1773'te Mühendishane-i Bahr-i Hümayun Topçu Okulu'nu kurarak, günümüzde İstanbul Teknik Üniversitesi olarak bilinen eğitim kurumunun temelini atmıştır. Tophane, Osmanlı'nın en büyük ve en kapsamlı döküm tesisi olarak birçok birimi bünyesinde barındırıyordu. Bahsi geçen birimler arasında resimhane, numunehane, muayene bölümü, tüfekhane, kundakhane, tavhane, demirhane, çarkhane, işleme atölyesi, nakkaşhane ve baskıhane gibi çeşitli bölümler bulunmaktaydı. 1862 yılında yayınlanan İngiliz elçisi raporlarında, Tophane'de yıllık yaklaşık 300 topun üretildiği belirtilmektedir. Ayrıca, 1835 yılında vefat eden Hoca İshak Efendi'nin 127 sayfalık metin ve 60 teknik çizimden oluşan eseri, yakın dönem Osmanlı top döküm teknolojisine ışık tutar. Hoca İshak Efendi, Mühendishane-i Berr-i Hümayun'da ders vermiş ve modern döküm teknikleri ile sanayi alanında eğitimler sunmuştur. Bu önemli eser günümüzde askeri müze koleksiyonlarında korunmaktadır. 1868 yılında kurulan Dökümcüler Şirketi sayesinde Osmanlı'daki döküm faaliyetleri daha sistematik ve denetimli bir şekilde yürütülmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler, Osmanlı metallurjisi ve döküm teknolojisinin modernleşme sürecinde önemli kilometre taşları olmuştur.[4]

1.1.4 Avrupa'da Döküm Tekniklerinin Gelişimi ve Osmanlı'ya Etkileri

İstanbul'un fethi ve 1492'de Endülüs Emevi Devleti'nin (Beni-Ahmer) sona ermesiyle birlikte, Granada'da bulunan birçok eser Avrupalıların eline geçmiş ve bu durum Avrupa'da Rönesans ile Reform hareketlerinin başlamasında tetikleyici rol oynamıştır. Yeniçağ'ın açılmasıyla bilim ve teknoloji alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiş, özellikle fizik, kimya ve mekanik bilimler hızla gelişerek toplumsal yaşama nüfuz etmiştir. 1300'lü yıllardan itibaren Avrupa'da demir metalürjisi, dövme yöntemiyle gelişmeye başlamış olsa da, çelik üretimi ve döküm tekniklerindeki asıl ilerlemeler 1600'lü yıllarda hız kazanmıştır. Örneğin, İngiliz

David Ramsey 1630'larda sert demirin yumuşatılmasına ilişkin bir patent almış; 1720 yılında ise Fransız metallürjist R.A.F. Reamür, dökme demirin öncüsü olarak kabul edilmiştir. Buhar makinesi ise ilk kez 1712'de Newcomen tarafından icat edilmiş ve 1770'de James Watt tarafından geliştirilen modeli, Sanayi Devrimi'nin itici gücü olmuştur. Sanayi devrimiyle birlikte Avrupa'da demir ve çelik üretimi, özellikle 1850'lerde Bessemer Thomas Konvertörleri ve Siemens-Martin elektrik ark fırınları sayesinde önemli bir atılım yapmış, bu sayede ham demir ve hurdadan doğrudan yüksek kaliteli çelik üretimi mümkün olmuştur. Bu teknolojik ilerlemeler yalnızca askeri alanda değil, ulaşım, enerji, yapı ve inşaat sektörlerinde de demir ve çeliğin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Avrupa'da hem haddeleme yoluyla üretilen malzemeler hem de karmaşık şekil ve geometrik formlarda döküm ürünleri büyük oranda artmıştır. Buna karşın Osmanlı İmparatorluğu'nda aynı dönemde döküm ve metallurji alanındaki gelişmeler daha sınırlı kalmıştır. Ergani bakır madenleri işletilmeye başlanmış ve demir üretimi yapılmıştır. Demir madenlerinde, ustalar o dönemin teknoloji düzeyine uygun olarak dövme demir ve sertleştirilmiş çelik üretmiştir. Bu faaliyetler devlet kontrolünde gerçekleşmiş; madenlerin işletilmesi ve üretim için özel bir nazır görevlendirilmiştir. Tophane'de büyük topların dökümü de nazır gözetiminde ve yerinde yapılmıştır. Örneğin, Kığı yöresinde üretilen demir güllelerin Trabzon üzerinden gemilerle sevk edildiğine dair resmi yazışmalar mevcuttur.

Avrupa'daki hızlı teknolojik gelişmelere yanıt olarak Osmanlı'da ıslahat hareketleri başlamış ve askeri teçhizat üretiminde modern teknolojilerin kullanılması için yeni tesislere ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda İstanbul Hasköy'de Güllehane (Humbarhane) kurulmuş, Zeytinburnu'nda baruthaneye yakın bölgelerde demir üretimine yönelik fabrikalar inşa edilmiştir. 1839 Tanzimat Fermanı'nın ardından, bu fabrikalar genişletilmiş ve 1848'den itibaren çelik gövdeli gemilerin yapımı mümkün hale gelmiştir. 20.yüzyıl başlarında, özellikle gemi yapımında yaşanan gelişmeler doğrultusunda Camialtı Tersanesi'nde demir ve döküm tesisleri kurulmuştur. Burada, iki adet 5 ton kapasiteli Siemens-Martin fırını ve bir döner fırın demir-çelik dökümü için kullanılmıştır. Ancak Mondros Mütarekesi sonrasında tersaneler ve askeri fabrikalar kapatılmış, bunun sonucunda Galata ile Hasköy arasında Kalafatçılar bölgesi ortaya çıkmış ve döküm sanayii çok daha ilkel koşullarda faaliyet göstermeye devam etmiştir.[5]

1.2 Döküm Sanayinin Gelişimi

1.2.1 Döküm Sanayisinin Dünyadaki Gelişimi

Toplumların ekonomik yapıları, döküm sektörünün üretim miktarını, ürün çeşitliliğini, kalite düzeyini ve ekonomik yapısını doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Günümüzde gelişmişlik göstergelerinden biri olarak kişi başına tüketilen elektrik enerjisi miktarının yanı sıra, kişi başına üretilen metal miktarı da önemli bir kriter olarak kabul edilmektedir. Özellikle gelişmekte olan ve sanayileşme sürecindeki ülkelerde, döküm ürünleri yoğun olarak konut, ulaşım, kent altyapıları ve tarım makineleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Endüstriyel açıdan ileri seviyedeki toplumlarda ise artan milli gelirle birlikte, bu ülkeler "refah toplumu" olarak tanımlanmaktadır. Sanayileşme ilerledikçe, döküm sektörü yalnızca altyapı ürünleri değil, aynı zamanda enerji, madencilik, kimya ve ana metal sanayisi gibi ara mal üretimi yapan sektörlerin yanı sıra, yatırım malları ve dayanıklı tüketim malları üreten sanayi kolları tarafından da yoğun talep görmektedir. 1950-1973 yılları arasında, dünya genelinde sanayi sektöründeki hızlı büyüme paralelinde döküm sanayisinde de daha büyük, daha hızlı ve daha kaliteli üretim hedefleri öne çıkmıştır. İleri teknoloji uygulamalarının artmasıyla dökümhaneler, başlangıçta el becerisine dayalı atölyelerken, artık sistematik üretim yapan fabrikalara dönüşmüş ve tesisler arasındaki farklılıklar belirginleşmiştir. Kullanılan teknolojik altyapı, döküm ürünlerinin niceliği, şekil ve boyut hassasiyeti ile üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmuştur. Bu gelişmeler, mühendislik hizmetlerinin önemini artırmıştır. Metalik malzemelerden döküm yoluyla üretilen ürünlerin dayanıklılığı, tokluğu, işlenebilirliği, kaynaklanabilirliği ve kaplanabilirliği gibi mühendislik özellikleri, mikro yapı ve metalografik yapıya bağlıdır. Belirli kimyasal bileşimlerdeki metal ve alaşımların döküm sonrası makro ve mikro yapılarındaki istenen özellikler, ergitme teknikleri, rafinasyon, gaz giderme, deoksidasyon, inokülasyon, döküm sıcaklığı ve katılaşma kinetiği gibi metalürjik parametrelerin hassas ve etkin kontrolünü gerektirir. Ayrıca, modelden kalıba, maça yapımından döküm temizliğine ve ısıl işlemlere kadar üretim süreçlerindeki değişimler de dikkatle izlenmeli ve yönetilmelidir. Ancak 1973-1979 yıllarında yaşanan petrol kriziyle birlikte dünya ekonomisinde beklenmedik bir duraklama dönemi başlamış, üretim ve tüketimde azalma görülmüştür. Bu süreçte sanayi yönetimi, yüksek verimlilik, enerji tasarrufu ve maliyet azaltımı

hedefleri üzerinde durulmuştur. 1950-1970 arasındaki hızlı gelişim sürecinde geliştirilen malzeme teknolojileri, elektronik, otomatik kontrol ve bilgisayar teknolojileri üzerine yapılan Ar-Ge çalışmaları, ileri sanayileşmiş ülkelerde hızla üretim süreçlerine entegre edilmiştir. Değişen çalışma koşulları, ücret artışları, sosyal güvenlik düzenlemeleri ve çevresel kaygılar yeni üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Özellikle 1970'lerde ileri teknolojiler kullanan ülkeler, yüksek verimlilik, enerji tasarrufu, maliyet optimizasyonu ve çevre koruma alanlarında önemli başarılar elde etmiştir. Bu gelişmelerin temelinde bilgisayar destekli planlama, üretim, kalite kontrol ve satış süreçlerinin bütünleşik yönetimi yer almaktadır. Yönetim felsefelerinde de önemli değişiklikler yaşanmış; yalın üretim ve esnek üretim gibi müşteri odaklı anlayışlar ön plana çıkmıştır. Döküm sektörü talepleri ise, ürünlerin daha dar toleranslarda, hassas bileşimlerle, yüksek yüzey kalitesi ve mükemmel iç yapıya sahip olarak üretilmesine yönelmiştir. Ayrıca, ürünlerin hafifletilmesi, yüksek dayanım sağlaması ve farklı sıcaklıklarda mukavemet göstermesi, esneklik, kaynaklanabilirlik ile aşınma ve korozyona dayanıklılık gibi metalürjik özellikler giderek daha fazla önem kazanmıştır. Bu ilerlemeler ile birlikte, döküm sektöründe entegrasyon, otomasyon, kalite güvencesi ve maliyet kontrolü konuları öncelikli hale gelmiş; kalite geliştirme çalışmaları kazanmıştır.

Örneğin, dökme demirlerde lamel grafitli ve temper döküm demirlerin yerini, 1950'lerden itibaren küresel grafitli dökme demirler almış; bu malzemelerde bileşim, modülasyon, inokülasyon ve ısıl işlemlerle ileri özellikler kazandırılmıştır. Çelik döküm sektöründe ise alaşımsız karbonlu çeliklerin yerine, ısıl işlem uygulanabilir, az alaşımlı ve üstün mühendislik özelliklerine sahip çelikler kullanılmaya başlanmıştır. Paslanmaz ve ısıya dayanıklı çelikler de bu dönemde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1970'lerden sonra, sade karbonlu ve az alaşımlı çelik döküm malzemelerinin yerini, daha kolay kaynaklanabilen, normalize edilmiş, yüksek akma dayanımlı ve düşük sıcaklıkta yüksek tokluğa sahip mikro alaşımlı çelikler almıştır. Sovyetler Birliği ve Doğu Bloku ülkelerindeki siyasi ve ekonomik düzensizlikler, demir-çelik döküm üretim miktarının azalmasına sebep olmuştur. Kalite kontrol anlayışı da önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Başlangıçta sadece üretim sonrası hatalı ürünlerin ayıklanması olarak algılanan kalite kontrol, süreç kontrolü ile bütünleşerek toplam

kalite yönetimi haline gelmiştir. Günümüzde “toplam kalite güvencesi” tüm ülkelerde sanayinin 21. yüzyıla taşınmasında vazgeçilmez bir felsefe olarak benimsenmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin döküm sektörüne entegrasyonu ile masaüstü dökümcülük uygulamaları gelişmiş, parça tasarımı bilgisayar ortamında yapılabilmekte, döküm sırasında oluşabilecek ısı değişimleri, gerilmeler ve çekilmeler simüle edilerek, parça kalitesi optimize edilmektedir. Bu yaklaşım, kaynak kullanımı, ürün çeşitliliği, üstün kalite, düşük maliyet ve çevre duyarlılığını bir arada sunarak, sanayinin sürdürülebilir gelişimini hedeflemektedir. Bu model, 21. yüzyıla hazırlanmanın temel adımlarından biridir.[6]

1.2.2 Dünyada Döküm Üretimi

2023 yılında dünya genelinde toplam döküm üretimi yaklaşık 110 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu miktar, 2022 yılına kıyasla hafif bir artış göstermesine rağmen, küresel enerji krizleri ve hammadde maliyetlerindeki yükseliş nedeniyle bazı bölgelerde üretimde yavaşlamalar yaşanmıştır. Küresel döküm üretiminin yaklaşık %70’i Asya kıtasında yoğunlaşmakta olup, özellikle Çin, Hindistan ve Japonya bu alanda öncü ülkeler olarak öne çıkmaktadır.

Ülkeler bazında bakıldığında, Çin, yaklaşık 45 milyon tonluk üretimiyle dünya döküm üretiminin %40'ını tek başına karşılayarak açık ara en büyük üretici konumundadır. Çin’i 12,1 milyon tonla Hindistan ve 8,3 milyon tonla ABD takip etmektedir. Japonya, Almanya, Rusya ve Brezilya gibi ülkeler de önemli döküm üreticileri arasında yer alırken, Türkiye 2,6 milyon tonluk üretimiyle dünya sıralamasında 8. sırada yer alarak sektördeki güçlü konumunu sürdürmüştür. Türkiye, özellikle Avrupa pazarına yönelik ihracatları ve sanayisine yaptığı katkılarla dikkat çekmektedir.[7]

Döküm üretiminde kullanılan malzemeler arasında en büyük payı dökme demir almaktadır. 2023 yılı verilerine göre, üretilen dökümün yaklaşık %70’i gri ve sfero dökme demirden oluşmaktadır. Çelik dökümler ise toplam üretimin %10’unu oluştururken, hafif malzemelerin tercih edilmesindeki artışla birlikte alüminyum ve diğer hafif metallerin payı %15’e yükselmiştir. Bakır, bronz ve diğer alaşımlar ise toplam üretimin %5’ini teşkil etmektedir. Alüminyum dökümler, özellikle otomotiv sektöründe hafif parça üretiminde artan bir şekilde benimsenmekte ve bu sayede sektörün sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlamasında önemli bir rol

oynamaktadır. Döküm sanayisinin en büyük müşterisi olan otomotiv sektörü, toplam döküm üretiminin yaklaşık %50'sini tüketmektedir. Motor blokları, şanzıman gövdeleri, süspansiyon sistemleri ve aks parçaları gibi kritik bileşenler döküm teknolojileri ile üretilmektedir. Makine ve ağır sanayi sektörü ise %20'lik bir paya sahip olup, tarım makineleri, iş makineleri ve sanayi ekipmanları için döküm parçalar sağlamaktadır. İnşaat ve altyapı sektörü, %15'lik pay ile başta demir dökümler olmak üzere bina yapıları ve altyapı projelerinde döküm ürünlerini kullanmaktadır. Enerji ve savunma sanayisi ise %10'luk oranla, özellikle rüzgar türbinleri, nükleer santraller ve askeri araç bileşenlerinde döküm parçaların tercih edildiği önemli bir alandır.

Son yıllarda döküm sanayisinde sürdürülebilirlik ve çevreci üretim teknikleri giderek daha fazla önem kazanmıştır. Karbon emisyonlarını azaltma çabalarının yoğunlaşmasıyla birlikte, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanım oranı da önemli ölçüde yükselmiştir. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde "yeşil dökümhane" konseptleri geliştirilmeye başlanmış ve elektrik ark ocakları daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Düşük emisyonlu döküm teknikleri, sektörün karbon ayak izini minimize etmek amacıyla yaygınlaşmaktadır. Dijitalleşme ve otomasyon da döküm sektörünü köklü şekilde dönüştürmektedir. 3D baskı ve dijital kalıplama teknolojileri, özellikle prototipleme ve özel üretimler için esnek ve hızlı çözümler sunmaktadır. Aynı zamanda robotik döküm sistemleri ve yapay zeka destekli kalite kontrol mekanizmaları, üretim süreçlerinin daha verimli ve hatasız işlemesini sağlamaktadır. Endüstri 4.0 çerçevesinde, birçok dökümhane büyük veri analizi, sensör tabanlı kalite izleme ve otomatik üretim sistemlerini entegre ederek süreç optimizasyonuna yönelmektedir.

Türkiye, 2023 itibarıyla 2,6 milyon tonluk üretimiyle dünya döküm sanayisinde önemli bir aktör olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin döküm sektörü, başta otomotiv, makine ve savunma sanayileri olmak üzere çeşitli alanlarda üretim yaparak önemli bir konuma sahiptir ve Avrupa pazarına yönelik ihracat odaklı bir büyüme stratejisi izlemektedir. İstanbul, Bursa, Kocaeli, Konya, İzmir ve Ankara gibi sanayi bölgeleri, Türkiye'nin döküm üretiminin büyük bir kısmını gerçekleştirmektedir. Türkiye'de alüminyum döküm üretimi son yıllarda hızla artmakta, hafif araç parçaları üretiminde kayda değer bir büyüme yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra, yerli savunma sanayi projelerinin ilerlemesiyle birlikte, savunma

sektöründe çelik ve demir dökümlerin kullanımı da önemli ölçüde artış göstermiştir. Türkiye'deki birçok dökümhane, çevreci üretim standartlarını benimseyerek karbon ayak izini azaltmaya yönelik adımlar atmakta, otomasyon sistemleri ile verimliliklerini artırmaktadır. Genel olarak döküm sanayisi küresel ölçekte büyümesini sürdürmekte; dijitalleşme, çevre dostu üretim teknikleri ve hafif malzeme kullanımı önümüzdeki yıllarda sektörün yönünü belirleyecek başlıca unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Türkiye ise bu dönüşüm sürecine uyum sağlayarak, döküm sanayisinde rekabet gücünü artırmaya devam etmektedir.[8]

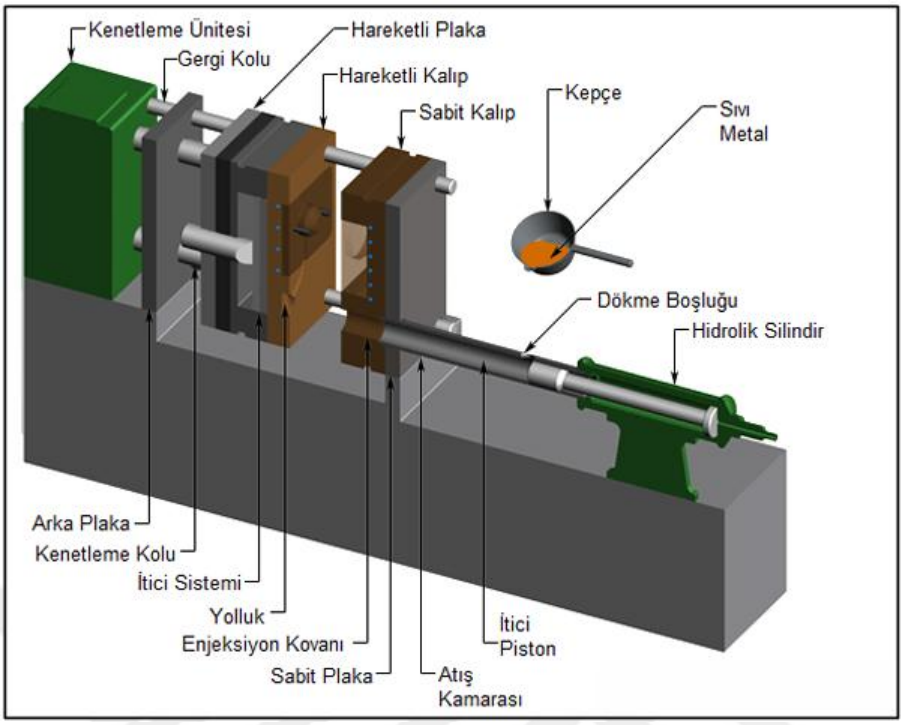
2
ALÜMİNYUM YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİ

2.1 Yüksek Basınçlı Döküm

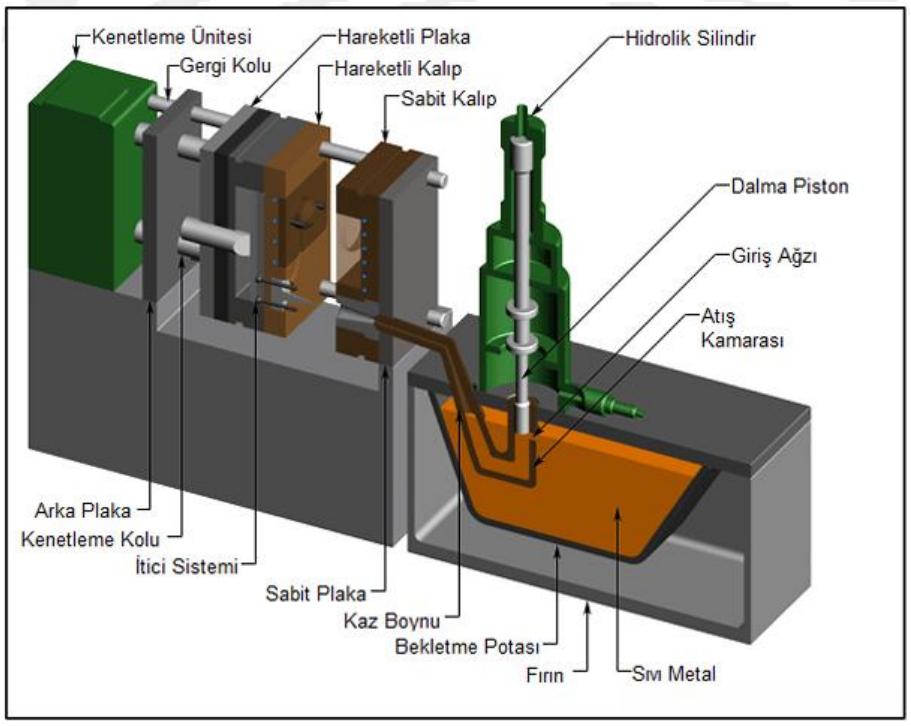
Yüksek basınçlı döküm, modern üretim süreçlerinde en çok tercih edilen tekniklerden biridir ve özellikle alüminyum dökümlerin imalatında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Alüminyum alaşımlarının yaklaşık olarak %70'i, hem düşük hem de yüksek basınç döküm yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntem, klasik uygulamaların yanı sıra; vakum destekli döküm, basınç altında şekil verme ve yarı katı halde döküm gibi ileri teknolojilerle de desteklenmektedir. [9]

Bu yöntemde sıvı metal, enjeksiyon makinesine aktarıldıktan sonra, piston aracılığıyla oldukça yüksek hızlarda (30 m/s – 100 m/s hız aralığında) ve 400 bar'dan başlayıp 1000 bar'a kadar çıkan yüksek basınç altında kalıba püskürtülür. Metalin, kalıba ulaşırken geçtiği karmaşık yolluk ve geçit sistemleri, türbülans oluşturarak döküm kalitesini doğrudan etkileyebilir. Bu komplike yapı sebebiyle, yüksek basınçlı döküm süreci bazı zamanlar "hata üretmeye yatkın" bir üretim yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Burada önemli bir parametre, makinenin kalıbı kapatma kuvvetinin ton cinsinden değeri olup, bu kuvvet üretilecek parçanın geometrisine göre belirlenir. Bu teknikle, oldukça hassas ölçülere sahip ve karmaşık formlu parçalar üretmek mümkündür.

Yüksek basınçlı döküm makineleri, ergitme haznesinin konumuna göre sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı sistemler olarak iki sınıfa ayrılır. Eğer dökümü yapılacak alaşımın ergime ve döküm sıcaklıkları düşükse (örneğin zamak veya magnezyum gibi) ve sıvı metal enjeksiyon bileşenleriyle kimyasal tepkimeye girmiyorsa, sıcak kamaralı sistemler tercih edilir. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda ergiyen ve enjeksiyon sistemiyle reaksiyona girme eğiliminde olan alaşımlar için ise soğuk kamaralı makineler kullanılır. Soğuk ve sıcak kamaralı metal enjeksiyon makineleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir. [9–12]



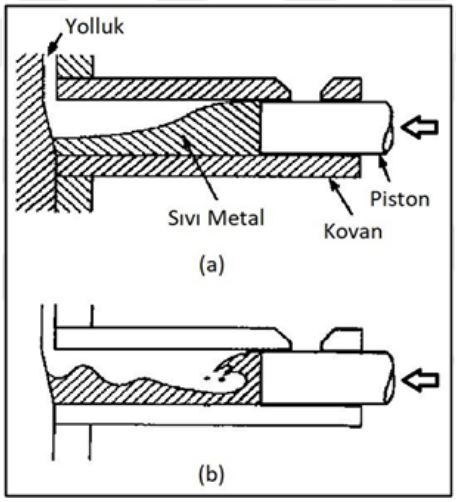
Şekil 2.1 Soğuk kamaralı metal enjeksiyon makinesi [13]



Şekil 2.2 Sıcak kamaralı metal enjeksiyon makinesi [13]

Yüksek basınçla kullanılan döküm tekniği, özellikle alüminyum, çinko (zamak), magnezyum ve bakır bazlı alaşımların şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde tercih edilen kalıplar, yüksek sıcaklık ve mekanik zorlamalara dirençli sıcak iş takım çeliklerinden imal edilmektedir. Aynı şekilde, döküm makineleri de çelik konstrüksiyonlu olup, prosesin gerektirdiği mekanik dayanımı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu özellikleri sayesinde, yüksek basınçlı döküm yöntemi, 1000 °C'ye kadar ulaşan döküm sıcaklıklarına sahip alaşımların üretiminde güvenle kullanılabilmektedir.

Enjeksiyon esasına dayalı bu döküm yöntemi, özellikle soğuk kamaralı makinelerde, sıvı metalin kalıp boşluğuna aktarılması için yatay düzlemde çalışan piston sistemlerinden faydalanır. Bu sistemler, enjeksiyonun kontrol seviyesine göre “kontrollü” ya da “kontrolsüz” biçimde çalışabilir. Soğuk kamaralı makinelerin genel çalışma prensibini gösteren şematik temsil Şekil 2.3’te sunulmuştur. [9-10-11-12-14]

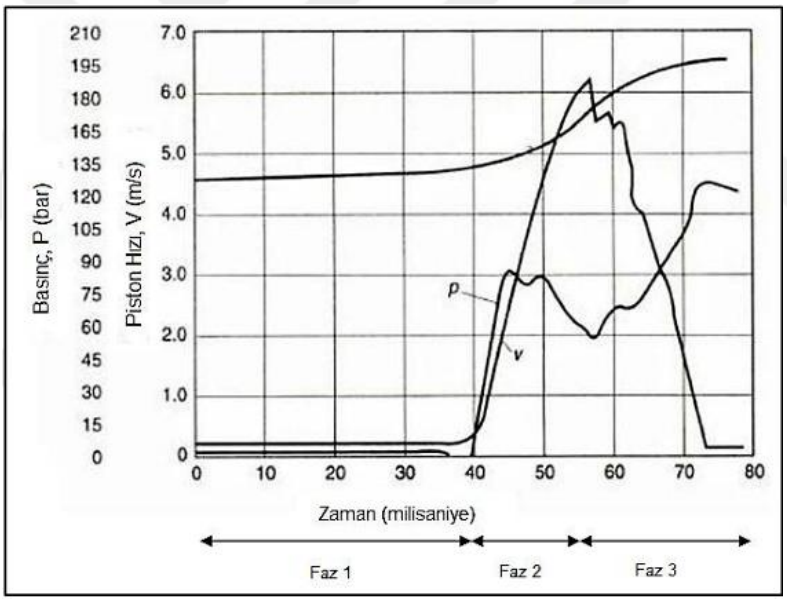


Şekil 2.3 Sıvı Metalin Kovan İçindeki Davranışı (Soğuk Kamaralı) [14]

Yüksek basınçlı döküm sürecinde, ergiyik metal kovana döküldüğünde, genellikle kovanın toplam hacminin %40 ila %70’i kadar bir kısmı doldurulur. Bu aşamada piston, sıvı metali ileri doğru iterek hareket ettirir. Pistonun hareket hızı, sıvı metalin kovan içerisindeki akış davranışını doğrudan etkiler. Piston ilerledikçe, sıvı metal kovanda yükselerek tüm kesiti doldurur; bu duruma "tam dolu" konumu adı verilir. Bu safhada piston, görece düşük bir hızla hareket eder ve bu aşama, döküm kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir.

Kovan tam olarak sıvı metalle dolduğunda, enjeksiyon sisteminde yüksek hızlı vuruş aşamasına geçilir. Bu ani hızlanma, kalıp boşluğunun hızlı ve homojen biçimde dolmasını sağlar ve genellikle nihai döküm kalitesini belirleyen en kritik etkenlerden biri olarak kabul edilir. Yüksek hızda yapılan enjeksiyonun ardından, piston üzerine hidrolik sistem aracılığıyla sabit bir basınç uygulanır. Piston hareketi durduğunda ise, bu basınç güçlendirici sistem tarafından artırılır ve döküm parçası üzerinde kalıcı bir etki bırakır.

Genel olarak, yüksek basınçlı döküm işlemi, enjeksiyon hızı ve uygulanan basınç dikkate alınarak üç temel aşamaya ayrılabilir. Bu aşamalar şu şekilde özetlenebilir; birinci aşama: Piston hareketiyle sıvı metalin kovanda tam doluluk seviyesine ulaştırılması, ikinci aşama: Sıvı metalin kalıp boşluğuna enjeksiyonu, üçüncü Aşama ise Kalıp dolduktan sonra uygulanan son basınç safhası. [9-14-15]



Şekil 2.4 Basınç altında gerçekleştirilen dökümde enjeksiyon adımları [15].

2.2 Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminin Sağladığı Üstünlükler

Yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçalar, genellikle sonrasında yoğun talaşlı işleme ihtiyaç duymaz; bu da üretim sürecinde önemli bir zaman ve maliyet avantajı sağlar. Bu yöntemin en dikkat çeken özelliklerinden biri, yüksek üretim hızına olanak tanımasıdır. Başlangıçta, özellikle kalıp tasarımı ve üretimi nedeniyle yatırım maliyetleri yüksek olsa da; kalıpların dayanıklılığı ve aşınmaya karşı

gösterdiği direnç sayesinde, uzun vadede parça başına düşen maliyet önemli ölçüde düşer. Bu da yüksek üretim adetlerinde ekonomik bir çözüm sunar. Yüksek basınçlı dökümle elde edilen ürünler, ölçüsel doğruluk açısından oldukça başarılıdır ve bu sayede hassas tolerans gerektiren uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. İnce kesitli parçaların üretimi bu yöntemle mümkün olurken, karmaşık geometrilere sahip bileşenler de sorunsuz bir şekilde şekillendirilebilir. Ayrıca, yolluk ve besleyici sistemlerinin daha kompakt tasarlanabilmesi sayesinde, malzeme kayıpları minimize edilir; bu durum, metal kullanım verimliliğini artırır. Bu döküm yöntemiyle üretilen parçalar, yüksek yüzey kalitesi ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere, özellikle de yorulma dayanımına sahiptir. Döküm boyutlarının daha küçük olması, stoklama ve taşıma kolaylığı sağlamaktadır. Bununla birlikte, üretim sürecinin kapalı ve kontrollü bir ortamda gerçekleşmesi sayesinde, dökümhane koşulları daha temiz ve çevre dostu hale gelmektedir. Nihai ürünlerin son işlemleri minimum düzeyde tutulabildiğinden, Depolama alanı ihtiyacı, diğer yöntemlere göre nispeten azdır. [9]

2.3 Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminin Olumsuz Yönleri

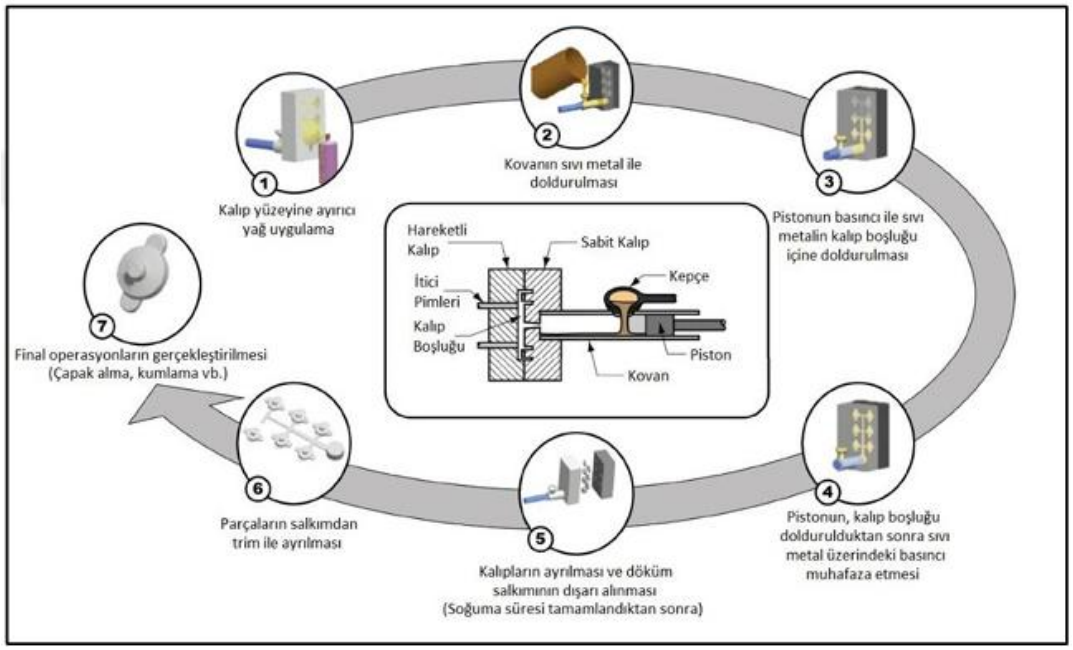
Yüksek basınçlı döküm yönteminin bazı sınırlayıcı yönleri bulunmaktadır. Bu yöntemle üretilebilecek parçaların boyutları belirli bir sınırla kısıtlıdır; çok büyük hacimli bileşenlerin bu yöntemle dökümü teknik olarak mümkün değildir. Ayrıca, vakum sistemiyle donatılmamış yüksek basınçlı döküm makinelerinde, kalıp boşluğundaki gazın tamamen tahliye edilememesi, döküm parçası içerisinde gaz boşluklarının (porozite) oluşmasına neden olur. Bu tür boşluklar, özellikle dökümün mekanik dayanımını olumsuz etkiler. Gaz içeren bölgeler yüzeye yakınsa, ısıl işlem sırasında bu bölgelerde kabarmalar (baloncuk oluşumu) gözlemlenebilir.

Bunun yanı sıra, kullanılan çelik kalıpların aşırı basınca ve yüksek sıcaklığa maruz kalmaları, kalıp aşınmasını hızlandırmakta ve bu durum bakım maliyetlerini artırmaktadır. Yüksek basınçlı döküm makineleri ile bu makinelerde kullanılan yardımcı sistemlerin ilk yatırım maliyetleri de oldukça yüksektir. Bunun yanı sıra, döküm esnasında oluşan yüksek porozite seviyesi, sonrasında gerçekleştirilen ısıl işlemler ve kaynak uygulamalarını güçleştirmekte; bazı durumlarda ise bu işlemlerin uygulanmasını tamamen engelleyebilmektedir. [9]

2.4 Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinin İşleyişi ve Kontrol Değişkenleri

Alüminyum alaşımlarının yüksek basınçlı dökümünde en çok kullanılan yöntem, soğuk kamaralı enjeksiyon makineleridir. Bu süreçte, sıvı metal önceden belirlenmiş döküm sıcaklığında bekletme (dozaj) fırınında muhafaza edilir ve her döküm döngüsünde kontrollü miktarda kovan içine aktarılır. Bu döngü, bir dizi işlemi kapsayan ve faz değişimlerinin yaşandığı kompleks bir süreci ifade eder. Süreç, kalıp yüzeylerine ayırıcı madde püskürtülmesiyle başlar; ardından sıvı metalin kovana doldurulması, kalıba itilmesi, katı faza geçme aşaması ve nihayetinde salkımın (parçanın) kalıptan çıkarılmasıyla tamamlanır. [16]

Yüksek basınçlı döküm, özellikle otomotiv, beyaz eşya ve elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılan, yüksek üretim adetlerine ve düşük birim maliyetlere olanak tanıyan verimli bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde alüminyum, magnezyum veya çinko gibi sıvı metaller, karmaşık yapıya sahip yolluk ve giriş sistemleri aracılığıyla, 30 ila 100 m/s hız aralığında ve yüksek basınç altında kalıp boşluğuna yönlendirilir. Süreç, kalıba ayırıcı yağ püskürtülmesinden kalıbın açılıp kapanmasına kadar çeşitli adımlardan oluşur. Bu işlemin genel döngüsü Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir.[17]



Şekil 2.5 Yüksek basınçlı döküm proses döngüsü [17]

Yüksek basınç ile döküm işlemi, sürecin başlangıcında sıvı fazdaki metalin çelikten imal edilmiş bir kovan içine doğru aktarılmasıyla start verir. Bu aşamadan sonra, pistonun hareketiyle sıvı metal kalıp boşluğuna doğru ilerletilir. Pistonun hız kazanmasıyla birlikte, sıvı metal 30 ila 60 m/s (yaklaşık 100–200 km/s) hız aralığına ulaşarak kalıba sevk edilir. Bu aşamayı takip eden ve yalnızca 50–100 milisaniye süren hızlı dolum süresi, metalin henüz katılaşmadan önce kalıp boşluğunu, özellikle ince kesitli ve karmaşık geometrilere sahip olanları eksiksiz biçimde doldurmasını sağlar. Ancak, katılaşma sürecinde meydana gelen faz dönüşümleri nedeniyle metal hacmen küçülür; bu da çekinti porozitesi adı verilen kusurların oluşmasına neden olabilir. Döküm makinesi, bu tür kusurların etkisini azaltmak amacıyla yaklaşık 120 MPa düzeyinde yüksek basınç uygulayarak metalin kalıpta daha etkin biçimde katılaşmasını hedefler. [16]

Yüksek basınçlı döküm prosesi, sahip olduğu çok değişkenli ve hızlı gerçekleşen yapısı nedeniyle diğer üretim yöntemlerinden ayrılır. Örneğin, talaşlı imalatta hurda oranı genellikle milyonda parça (ppm) birimiyle değerlendirilirken, yüksek basınçlı dökümde bu oran yüzde (%) bazında hesaplanır. Bu yöntemin özellikle endüstriyel ürün ve sektörlerde yaygın olarak tercih edilmesi, yüksek üretim hızına ve hafif alaşımlarla karmaşık parçaların üretilebilmesine bağlıdır. Günümüzde bu sektörde üretilen hafif metal alaşımlı parçaların yaklaşık %60'ı yüksek basınçlı döküm yöntemiyle elde edilmektedir.

Üretim sürecinde, bazı proses parametreleri ve deneysel değişkenler, gelişmiş sensör sistemleri ve ölçüm cihazlarıyla izlenebilmektedir. Ancak sürecin genel yapısal karmaşıklığı, tüm üretim döngüsünün tek ve entegre bir kontrol sistemiyle yönetilmesini zorlaştırmaktadır. Örneğin, döküm makinesi yalnızca kendi mekanik parametrelerini takip edebilirken, tutma (bekletme) fırınının sıcaklık kontrolü ayrı bir sistem üzerinden yapılır. Benzer şekilde, kalıp ayırıcı yağlama sistemi de yalnızca basınç ve zamanlama gibi sınırlı verileri izleyebilir. Parçanın nihai kalitesini doğrudan etkileyen kalıp içerisindeki hızlı katılaşma aşaması sırasında ise pek çok önemli proses değişkeni doğrudan ölçülememekte veya anlık olarak denetlenememektedir. [16]

3
YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜMDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR

3.1 Alüminyum Alaşımları

Saf alüminyum oldukça yumuşak ve düşük dayanıklılığa sahip bir metaldir. Ancak alüminyumun dayanıklılığının asıl kaynağı alaşım oluşturma işlemine dayanmaktadır. Saf alüminyum, yüksek dayanıklılığa sahip alaşımlar elde etmek amacıyla çeşitli elementlerle karıştırılır. Alüminyumun dayanıklılığını ve şekillendirme yeteneğini artırmak için yaygın olarak kullanılan alaşım malzemeleri arasında silisyum, magnezyum ve bakır bulunmaktadır. Alüminyum-çinko metaryeller, günümüzde en kuvvetli alaşımlar arasında yer almakta ve genellikle otomotiv ve havacılık sektörleri başta olmak üzere sanayinin her alanında tercih edilmektedir. Alüminyum metalinin güçlendirilmesine yönelik işlemler sayesinde üç başlıca döküm alaşımı türü olan Al-Si, Al-Mg ve Al-Cu oluşmuştur. [14-18]

Döküm ve külçe formundaki alüminyum alaşımlarını tanımlayan ve kimyasal sınırlarını belirleyen Alüminyum Birliği (AA), her alaşım için on özel alaşım elementini sıralamıştır. Bu sıralamada, diğer kategorisi kısmında yer alan elementler de bulunur. Ancak, listedeki tüm elementler her alaşımda ana alaşım elementleri olarak kabul edilmeyebilir. Şöyle açıklayacak olursak bir alaşım içerisinde bulunan bazı ana metaryeller, başka bir alaşımda yardımcı element olarak kabul edilebilir. Mikroyapı kontrolü ve mekanik özelliklere etkisi bulunan Sr gibi bazı elementler, Alüminyum Birliği'nin döküm alaşımları listesinde özel olarak tanımlanmadığından "diğer" başlığı altında değerlendirilir.

Alüminyum alaşımlarındaki elementlerin önemini kavramak için en iyi sınıflandırma şu şekilde yapılabilir: birincil (Si - Mg - Cu), ikincil (Ni - Sn), tane incelticiler (Ti - Br - Sr - P - Be - Mn - Cr) ve empüriteler (Fe - Cr - Zn). Ancak,

bazı alaşımlarda empürit elementlerinin birincil elementler olarak da kabul edilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. [19]

3.1.1 Alüminyum-Silisyum Tabanlı Döküm Alaşımları

Al-Si alaşımları, endüstrinin farklı uygulamalarında en sık tercih edilen mühendislik döküm alaşımlarının başında gelir. Silisyum, sıvı metalin akıcılığını iyileştirerek kalıbın tam olarak dolmasını kolaylaştırır ve döküm esnasında sıcak çatlak gibi kusurların oluşmasını engeller. Bu sayede alaşımlar iyi döküm özelliklerine sahip olur. Silisyum miktarı arttıkça, termal genleşme katsayısı da azalır, bu da sıcak yırtılma ve sıcak çatlama gibi problemlerin önlenmesine yardımcı olur. Buna ek olarak, silisyumun yüksek sertliğe sahip bir faz oluşturması, alaşımların aşınma dayanımını olumlu yönde etkilemektedir.

Bir alüminyum esaslı alaşımda yer alan silisyum yüzdesi %5 civarına geldiğinde, bu oran yeterli düzeyde izotermal katılaşma sağlar ve aynı zamanda akışkanlığı artırır, bu da sıcak yırtılma sorunlarını engellemeye yardımcı olur. Silisyumun yalnız başına mukavemet artırıcı etkisi sınırlıdır, Bununla birlikte, Cu, Ni ve Mg elementlerinin katkısıyla yaşlanma yoluyla mukavemeti artırılabilen alaşım türleri elde edilebilir. Her ne kadar farklı avantajlar sunsalar da, bu alaşımların çekme dayanımları 13,6 ile 15,4 kg/mm² gibi nispeten düşük bir seviyededir. Silisyumun magnezyum ile reaksiyona girmesi sonucunda Mg_2Si bileşiği oluşur ve bu yapı, alüminyum dökümlerde sertliğin artmasında önemli bir rol oynar. Mg_2Si, katı fazda yaklaşık %0,7 oranında magnezyum çözebilir ve bu özellik, alüminyum alaşımlarında ısıl işlemle sertleştirmenin temelini oluşturan çökelme sertleşmesi mekanizmasını destekler.

Yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilen Al-7Si-0.4Mg alaşımı, mekanik özelliklerini büyük ölçüde yapısal morfolojisine borçludur. Cu ilavesi sertliği artırsa da korozyon direncini azaltır. Silisyum fazlarının boyutu ve dağılımı, mukavemet ve süneklik üzerinde belirleyici etkendir. İğne formundaki silisyum fazları, alaşımın çekme dayanımını artırmakla birlikte, süneklik ile darbe ve yorulma direncinde azalmaya yol açar. Bununla beraber, silisyumun varlığı aşınmaya karşı direnci yükseltir. Bu nedenle Al-Si esaslı döküm alaşımları, sanayide gri dökme demire kıyasla önemli bir alternatif olarak öne çıkar.

Alüminyum alaşımlarında döküm özelliklerini geliştiren silisyum, aynı zamanda talaşlı imalat sırasında kullanılan araçların aşınma ömrünü de kısaltan bir etkiye sahiptir. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleriyle, bu alaşımlar daha iyi işlenebilir hale getirilebilir. [17-19-20]

3.1.2 Alüminyum-Magnezyum Tabanlı Döküm Alaşımları

Magnezyum (Mg) elementinin işlevi, silisyumdaki gibi alüminyum alaşımlarındaki döküm mukavemetini artırmak ve sertleştirmektir. Yaygın kullanılan Al-Mg 356 alaşım ailesinde, mukavemet artışı ve ısıl işlem temeli Mg_2Si ile sağlanır. Ayrıca magnezyum, düşük silisyum içeren yüksek magnezyumlu 5XX alaşımlarında da mukavemet artırıcı bir etki gösterir. 515-518 arasındaki Al-Mg alaşımları, özellikle basınçlı döküm işlemleri için geliştirilmiş olan özel alaşımlardır. Al-Mg alaşımlarının mukavemeti genellikle ısıl işlemle artırılamaz, ancak bu alaşımlar, doğal yaşlanma koşullarında döküm ve oda sıcaklığında yüksek mukavemet ve süneklik sergilerler.

Al-Mg alaşımlarının düşük silisyum içerikleri nedeniyle dökme özellikleri sınırlıdır ve sıcak yırtılma riski taşır. Ancak, Mg içeriği %10 seviyelerine çıkabilen Al-Mg serisi alaşımlar, mükemmel korozyona karşı dayanıklı olup, yiyecek sektöründe yaygın olarak tercih edilir. Bu alaşımlar aynı zamanda parlak beyaz bir eloksal kaplama alabilme özelliğine sahiptir ve yüksek mukavemet ve süneklik gösterir. Alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan magnezyum miktarı ağırlıkça yaklaşık %5–6'dır. Al-Si alaşımları, çok fazlı ve gevrek yapı özellikleri sergilerken; Mg alaşımları, tek fazlı katı çözelti oluşturarak daha yüksek süneklik kazandırır. [14-19]

3.1.3 Alüminyum-Bakır Tabanlı Döküm Alaşımları

Alüminyum alaşımlarında katkı elementi olarak kullanılan ilk metallerden biri bakırdır. Bakır (Cu), ısıl işlem uygulanmış ya da uygulanmamış tüm alüminyum döküm alaşımlarında, dayanıklılık ve sertlik üzerinde en belirgin etkiye sahip elementtir. Ayrıca bakırın, matrisin sertliğini artırarak alaşımların işlenebilirliğini iyileştirir ve bu sayede talaşın küçük olması ile ince işlenmiş yüzeylerin elde edilmesi daha kolay hale gelir. Bununla birlikte, bakır elementi alüminyum alaşımlarının korozyon direncini azaltma eğilimi gösterir. Alüminyumun endüstriyel uygulamalara girdiği ilk dönemlerde, %8 bakır içeren Al-Cu alaşımları döküm alaşımı olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. Ticari saf alüminyuma bakır ilavesiyle elde edilen bu alaşım, dökümde karşılaşılan zorluklara rağmen uzun yıllar boyunca kum kalıplarında şekillendirme amacıyla tercih edilmiştir. Zamanla bakır oranı %1,5 civarına düşürülüp silisyum eklenerek, döküm kolaylığı sağlayan, iyi akışkanlık gösteren, Sıcak yırtılmaya karşı dayanıklı ve ısıl işlemle sertleşme özelliği taşıyan alaşımlar geliştirilerek, geniş kapsamlı kullanımlara ulaşılmıştır.

Alüminyum alaşımlarında, bakır genellikle %3 ila %12 dolsylarında eklenir ve bu element, alaşıma sertlik kazandıran temel unsurlardan biridir. Isıl işleme tabi tutulmuş ya da tutulmamış alüminyum alaşımlarının kopma mukavemetini artırır. Ancak %5'ten fazla bakır içeriği, mekanik işleme zorluklarına yol açarken, aynı zamanda elektriksel iletkenliği ve korozyona karşı direncini azaltır. Alüminyum dökümünün ilk yıllarında %10’a kadar bakır içeren alaşımlar yaygın olmasına karşın, 206 alaşımı haricindeki bu tür alaşımlar, silisyum bazlı alaşımlar tarafından büyük ölçüde ikame edilmiştir. [19-20]

3.2 Alüminyum Döküm Alaşımının Sınıflandırmasının İncelenmesi

Alüminyum döküm alaşımları, içerdiği kimyasal bileşenler esas alınarak gruplandırılır ve isimlendirilir. Uluslararası düzeyde, alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması için U.S. Alüminum birliği tarafından benimsenen isimlendirme sistemi, döküm ve dövme alaşımları olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Alüminyum dökümleri için ise, ANSI (NADCA) numaralandırma sistemi kullanılmakta olup, ana alaşım elementleri ve bazı element bileşimleri, Tablo 2.1'de görüldüğü üzere belirli numara serileriyle tanımlanmaktadır. [19-20]

Tablo 3.1 Alüminyum döküm alaşımlarının endüstriyel sınıflandırması [19-21]

NUMARA YAPISI	ALAŞIM TÜRÜ
1XX.X	Minimum %99.0 Alüminyum (Alaşımlandırılmamış)
2XX.X	Al + Cu
3XX.X	Al + Si & Mg ya da Al + Si & Cu ya da Al + Si & Mg & Cu
4XX.X	Al + Si
5XX.X	Al + Mg
7XX.X	Al + Zn
8XX.X	Al + Sn
9XX.X	Al + Diğer elementler

Döküm alaşımlarının dört basamaktan oluşan gösteriminde her bir basamaktaki rakam belirli bir anlam taşımaktadır. İlk basamak, ana alaşım elementlerini temsil ederken, ikinci ve üçüncü basamaktaki rakamlar alaşımın detaylarını tanımlar. Numaralandırmadaki dördüncü basamak, alaşımın türünü tanımlar ve bu basamak; döküm için kullanılan alaşım (0), Standart külçe (1) ya da daha dar bir kimyasal bileşim toleransına sahip ingot (2) şeklinde sınıflandırılır. 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X ve 7XX.X serisi alaşımlar ısıl işleme uygundur. Sınıflandırmada 1XX.X serisine ait alaşımlarda, nokta işaretinin solundaki ilk iki sayı, alaşımda bulunması gereken asgari alüminyum oranını ifade eder. 2XX.X ile 9XX.X arasındaki serilerde ise, nokta işaretinin sol tarafında kalan iki rakam sadece farklı alaşımları belli etmek amacıyla kullanılır ve özel bir ifade içermez. Örnek vericek olursak, 190.X kodu, alaşımın en az %99,90 oranında saf alüminyum içerdiğini göstermektedir. [21]

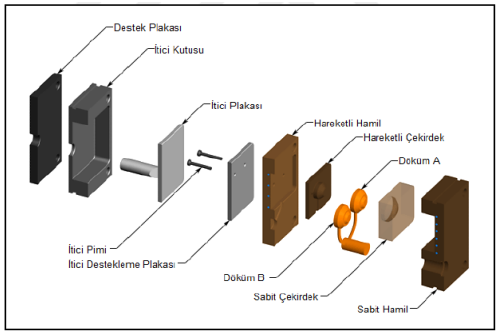
4
YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI

4.1 Yüksek Basınçlı Döküm Kalıplarının Tanımı ve İşlevi

Yüksek basınçlı döküm prosesinin en komplike ve maliyetli unsuru kalıptır; aynı zamanda döküm kalıplarının tasarım prensipleri ve üretim teknikleri, nihai ürünün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Kalıp malzemesi, 40 kN seviyelerine ulaşabilen yüksek kapama kuvvetlerine karşı dayanıklı olmalı ve yüksek sıcaklıklarda da yeterli mekanik performans sergilemelidir. Yüksek basınçlı dökümde, kalıp yüzeyi; yüksek basınç ve hızla hareket eden erimiş metalin neden olduğu erozyon ve yüzey hasarına karşı, gelişmiş malzeme özellikleriyle mukavemet gösterebilmelidir. Kalıplar, döküm parçasının ters şekilli boşluğunu oluşturmanın yanında, sıvı metalin yüksek ısısını yayar, enjeksiyon esnasında ortaya çıkan gerilmeleri azaltır, içerideki sıkışmış havanın tahliye edilmesini sağlar ve böylece dökümün kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır. Yüksek basınçlı döküm işlemlerinde, kalıp yüzeyinde meydana gelebilecek ani sıcaklık değişimlerinin neden olabileceği termal şokların etkisini azaltmak için, kalıp genellikle 180-350 °C arasında ön ısıtılır. Bu işlem, kalıp içerisinde dolaştırılan yağ ya da su esaslı ısıtıcı akışkanlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Kalıbın ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında meydana gelen boyutsal değişimlerin en aza indirilmesi, parça kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Boyutsal hassasiyetin korunması ve istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilebilmesi için, kalıp yüzeyinin aşınmaya karşı yüksek direnç göstermesi gereklidir. Alüminyum, bakır ve çinko alaşımlarının yüksek basınçlı döküm uygulamalarında ortaya çıkan zorlu çalışma koşullarına uyum sağlamak amacıyla, genellikle yüksek alaşımlı sıcak iş takım çelikleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda, özellikle H10, H11 ve H13 sınıfı çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik değerlerine sahip bu tür takım çeliklerinin işlenmesi, karmaşıklığı ve takım aşınması nedeniyle oldukça maliyetli bir süreçtir. Genellikle yaklaşık 30 HRC sertliğe sahip, önceden sertleştirilmiş çelik bloklar kullanılır ve bu bloklar ilk aşamada kaba talaşlı işleme süreçlerinden geçirilir.

Ardından, işleme sırasında ortaya çıkabilecek rezidüel gerilmelerin giderilmesi amacıyla, kalıplar gerilim giderme amaçlı bir ısıl işleme tabi tutulur. Gerilim giderme işleminin ardından son çalışmalar yapılır ve kalıplar, uzun servis ömrü sağlamak amacıyla 50-55 HRC sertliğine ulaşacak şekilde ısıl işlemlerle sonlandırılır. Kalıp çeliklerindeki son gelişmeler ile birlikte, yüksek basınçlı döküm işleminin yapısı gereği her döngüde meydana gelen ısınma ve soğumaya bağlı termal şoklar nedeniyle oluşan ısıl çatlaklardan önce, 1 kg ağırlığındaki bir alüminyum döküm parçasından 100.000 adete kadar kabul edilebilir kalitede üretim yapılabilmesi beklenmektedir. [14-15-22]

Yüksek basınçlı dökümde kullanılan kalıplar, dökülecek parçanın şekline uygun biçimde işlenmiş iki temel parçadan oluşur. Bu parçalardan biri, enjeksiyon sistemine bağlanan ve üretim süresince sabit kalan bileşendir; bu kısım genellikle "sabit kalıp" olarak adlandırılır. Diğer yarım ise hareketli bir yapıya sahiptir ve üzerinde parça çıkarma mekanizmalarını barındırır; bu nedenle "hareketli kalıp" ya da yaygın ifadesiyle "alt kalıp" olarak tanımlanır. Hareketli kalıp içerisinde, sıvı metalin yönlendirilmesini sağlayan yolluk ve hava kanalları yer alır. Ayrıca, kalıptan katılaşmış döküm ürününü ayırmaya yarayan itici pimler de bu yapı üzerinde konumlandırılmıştır. Ergitilmiş metal, sabit kalıpta yer alan yolluk girişinden içeri girerek kalıp boşluğunu tamamen doldurur. Sabit kalıp içerisinde; soğutma kanalları, merkezleme pimleri, maça kilidi gibi yardımcı elemanlar da bulunur. Bu kalıp sistemi ve bileşenlerinin detaylı görünümü Şekil 4.1'de sunulmuştur. İki kalıp yarımının birleştiği yüzey, döküm teknolojisinde "mala yüzeyi" olarak bilinir. Bu yüzeylerin tam olarak örtüşmesi ve arada hiçbir açıklık kalmaması büyük önem taşır. Zira, birleşim yüzeyinde oluşabilecek en ufak bir boşluk, sıvı metalin dışarı sızmasına yol açarak hem ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir hem de operatör güvenliğini tehdit edebilecek kazalara neden olabilir.



Şekil 4.1 Yüksek basınçlı döküm kalıbını oluşturan bileşenler [7]

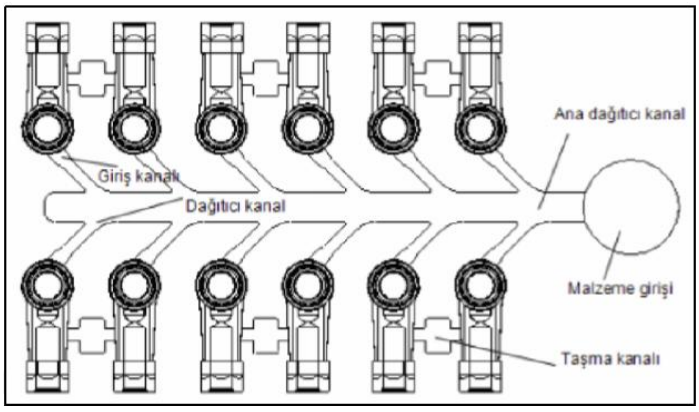
Yüksek basınçlı döküm için hazırlanan kalıplar, imal edilecek parçanın şekil ve ölçülerine bağlı olarak talaşlı imalat veya dalma erozyon teknikleri kullanılarak üretilir. Basınçlı dökümün başka imalat yöntemlerine göre sağladığı avantajlardan biri olan yüzeysel kalitenin elde edilmesi için, sabit kalıp ve hareket eden kalıp kısımlarının işlenmiş yüzeyleri olabildiğince düzgün olmalıdır. [15-20-23]

4.2 Kalıp Elemanları

4.2.1 Yolluk

Yolluk sistemi, sıvı alaşımın yolluk burcundan geçerek kalıp boşluğuna ulaşmasını sağlayan ve kalıbın düzgün biçimde dolmasını mümkün kılan özel kanal yapılarından meydana gelir (Şekil 4.2). Bu kanalların derinliği genellikle 4,5 ila 8 milimetre arasında değişir. Genişlikleri ise döküm parçasının ağırlığı ve şekline göre belirlenir. Yolluk kanallarının derinliği, döküm parçasının et kalınlığının 1,5 katı olarak hesaplanabilir. Sıvı metalin hızı, çinko alaşımlarında 15 m/s, alüminyum alaşımlarında 10 m/s ve magnezyum alaşımlarında ise 20 m/s'den daha düşük olmamalıdır.

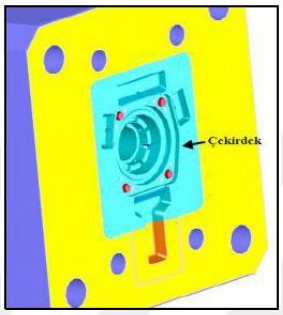
Genel olarak, yolluk kanalları olabildiğince kısa olmalıdır. Ancak kalıp boşluğunun belirli alanlarının ısıtılması gerekiyorsa (özellikle soğuk birleşme hatalarını önlemek amacıyla) kör yolluk kanalları kullanılarak bu ihtiyaç karşılanabilir. İnce girişlerle iyi yüzey kalitesi elde edilebilir, ancak bu durumda yoğun bir döküm yapılamaz. Büyük girişlerle daha yoğun ve kusursuz bir döküm yapılabilse de, artık kısımların kırılması ve yüzeyin düzeltilmesi daha zor olur. Girişlerin büyüklüğü ve şekli, sıvı alaşımın hareketinin buhar gibi püskürmeden düzgün bir akış sağlamasını temin etmelidir. [24-25]



Şekil 4.2 Yüksek basınçlı döküm kalıplarında yolluk ve dağıtıcı sistemleri [24]

4.2.2 Çekirdek

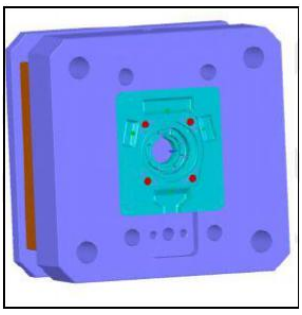
Parçanın şekline ters düşen negatif formu taşıyan ve kalıbın ayırma yüzeyi ya da hattı boyunca kesilen bölümleri kapsayan kalıp bileşenine "**çekirdek**" adı verilir. Çekirdekler, kalıbın hem sabit hem de hareketli yarımlarına monte edilebilir. Bu elemanlar, tek gözlü olabileceği gibi çoklu gözlere sahip yapılar halinde de tasarlanabilir ve farklı parçaların karmaşık geometrilerini oluşturmak için kullanılabilirler. Şekil 4.3'te, hareketli kalıp yarımına entegre edilmiş bir çekirdeğin örnek görseli sunulmaktadır. [23]



Şekil 4.3 Hareketli kalıp yüzeyine montelenmiş çekirdek bileşeni [23]

4.2.3 Kalıp Yarımları

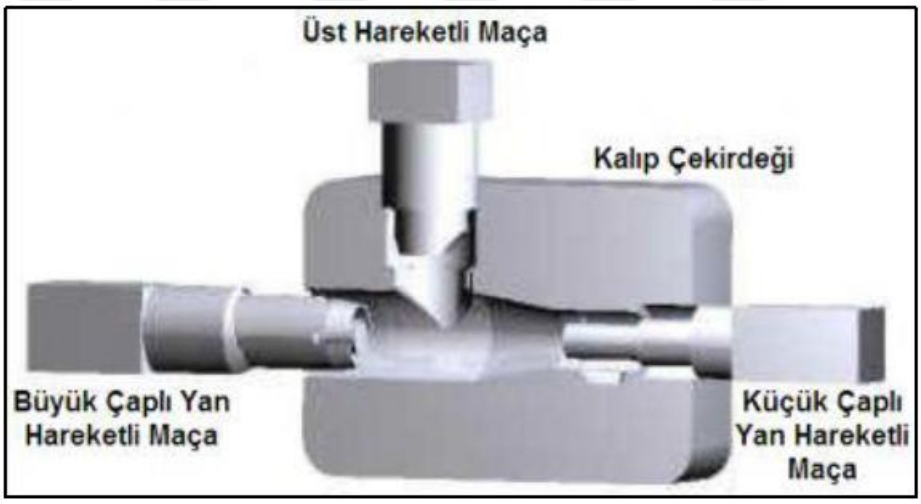
Kalıp yarımları ya da hamilleri, kalıp içindeki tüm elemanların montajını sağlayan ve yapısal bütünlüğü koruyan temel parçalardır (Şekil 4.4). Bu yarımlar, işlevlerine göre sabit yarım ve hareketli yarım olarak ikiye ayrılır ve kalıbın ayrıldığı yüzeyi oluştururlar. Sabit yarım, döküm makinesinin sabit kısmına, yani metalin enjeksiyon yaptığı bölgeye bağlanırken, hareketli yarım ise itici plakaya entegre edilerek makinenin hareket eden tarafına monte edilir. Sabit yarım üzerindeki kilitleme mekanizmaları, döküm sürecinde kalıp yarımlarının tam kapanmasını ve güvenli şekilde kilitlenmesini sağlar. [23]



Şekil 4.4 Kalıp hamillerinin kalıp seti içerisinde görünümü [23]

4.2.4 Maçalar

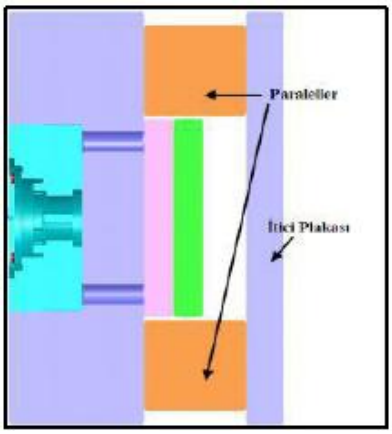
Basınçlı döküme uygun kalıplarda, ürün üzerinde bulunan delik, yol, boşluk gibi iç geometrik yapıların oluşturulması amacıyla maçalar kullanılır. Bu elemanlar, işlevlerine göre sabit ve hareketli olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, sabit maçalar kalıp içine genellikle belirlenmiş sabit noktalardan yerleştirilir. Bazı durumlarda maçalar, döküm parçasının et kalınlıklarını dengelemek ve malzeme kullanımını optimize etmek için de tercih edilmektedir. Hem sabit hem de hareketli maçalar, kalıp tasarımında yaygın şekilde uygulanır. Sabit maça konumlandırılırken, maçanın ekseninin kalıp açılma doğrultusuna paralel olması esastır. Hareketli maçalar ise çoğunlukla kalıp ayırılma yüzeyine paralel yerleştirilir; ancak belli özel şartlarda, bu yüzeye belirli bir açıyla konumlandırılmaları da mümkündür. [23-24]



Şekil 4.5 Kalıp sisteminde hareketli maçaların görünüşü [24]

4.2.5 İtici plakası, Paraleller ve İticiler

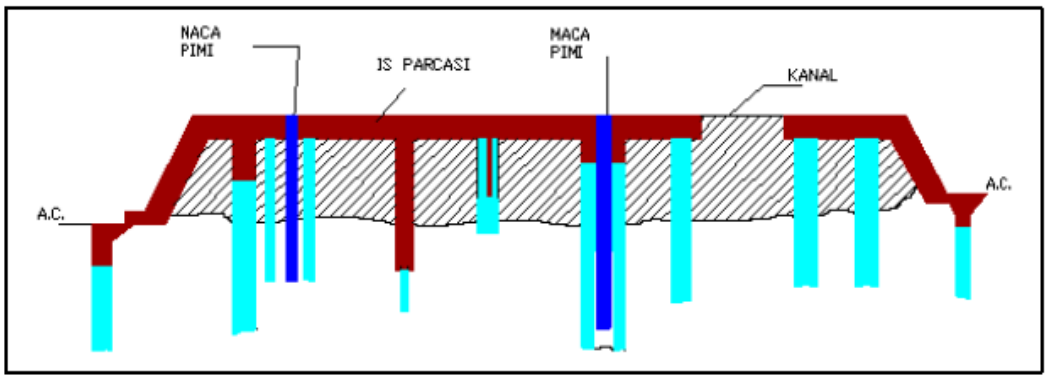
İtici plakası, kalıbın itici sistemindeki ejektörün kalıba bağlandığı kısımdır. Tasarımı, genellikle döküm parçasının tasarımına bağlıdır. İtici plakası, kalıbın hareketli tarafını kalıp kilitleme kuvvetine ve itici kuvvetlere karşı korur. Paralel yüzeylere sahip olan ve hareket eden kalıp yarımından makinenin hareketli bölümüne veya kilitleme plakasına bağlantı amacıyla kullanılan bu elemanlar, genellikle AISI 1020 gibi çelik malzemeden imal edilmektedir. Kalıbın tüm kilitleme kuvvetleri, paralel elemanlar tarafından karşılanır ve bu elemanlar, üzerine etki eden baskılara karşı yeterli sertlikte olmalıdır. Şekil 4.6'da itici plakanın kalıp sistemindeki yeri ve paraleller şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Kalıp düzeninde yer alan itici levha ve paralel çubuklar [23]

Yüksek basınç ile kullanılan kalıpların tasarımında kritik unsurlardan biri, döküm parçasının kalıp içerisinde şekil aldıktan sonra kolayca çıkarılabilmesini sağlayacak düzenin oluşturulmasıdır. Metalin katılaşırken yaşadığı hacim küçülmesi, parçanın iç boşluklarını tam olarak oluşturamamasına neden olarak kalıp elemanlarının sıkışmasına yol açabilir; bu durum ise parçanın kalıptan sökülmesini güçleştirir. Bu tür durumları engellemek için, parçaların basınçlı döküm kalıplarından çıkartılması amacıyla itici levhalar işlev alır (Şekil 4.7).

Kalıp itici sistemleri, tasarımlarındaki karmaşıklık ve işlevsellik açısından farklılık gösterebilir. İticilerin temel işlevi, kalıp açıldığında parçayı dışarı iterek serbest bırakmaktır. Parça, itici ile dışarı itildikten sonra ya yerçekimi etkisiyle makineden uzaklaşır, ya da operatör tarafından manuel olarak ya da robotla çıkarılır. İtici pimlerinin, parça üzerinde olabilecek izlerin minimumda olması ve parçanın deformasyona uğramaması için, kuvvet dağılımının en dengeli şekilde yapılması gerekir. Bu sebeple, bazı durumlarda köşe ve kiriş gibi kritik bölgelerde etkili olacak pimler gerekebilir. İtici dizaynı yapılırken, kalıba konulacak soğutma kanalları gibi diğer işlevsel elemanlar da göz önünde bulundurulmalıdır. İtici pimlerinin çapları genellikle 3 mm ile 25 mm arasında değişir ve en yaygın çaplar 6-8 mm ile 10 mm arasındadır. Ayrıca, itici pimlerinin yüzeylerinin aşınmaya karşı dayanıklı olması için nitrür kaplama yapılması gerekmektedir. [20-23-25]

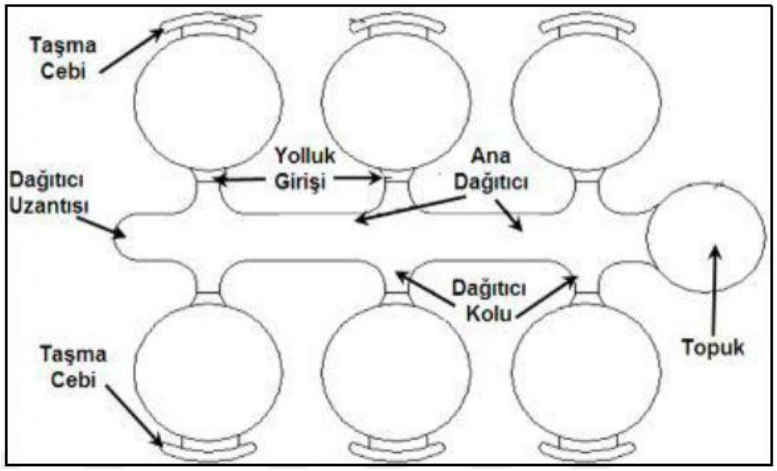


Şekil 4.7 İtici pimlerin şematik gösterimi [23]

4.2.6 Dağıtıcılar, Hava Tahliye Kanalları ve Taşma Cepleri

Dağıtıcılar, yolluk burcundan kalıba giren sıvı metal alaşımının, kalıp ayırma yüzeyinden dişi kalıba yönlendirilmesini sağlayan kanallardır. Genellikle kalıp iticisi bulunan kısımlarda yer alırlar. Dar kesitli yolluk girişleri, döküm yüzeyinde daha yüksek kalite elde edilmesini sağlarken, yolluğun parçadan ayrılması da daha zahmetsiz hale gelir. Ancak, sıkıştırma fazının etkisi kısa süreceği için yoğun bir döküm elde edilemez. Daha geniş yolluk girişleri ise, daha mükemmel bir döküm yapılmasına olanak tanır, fakat bu durumda artık kısımların kırılması ve yüzey düzeltme işlemi zorlaşır. Yolluk girişlerinin genişliği (kesit alanı) ve şekli, sıvı malzemenin bir püskürme olmadan düzgün bir akış sağlaması için kalıp erozyonuna karşı hızının belirli sınırlar içinde olmasına dikkat edilerek tasarlanmalıdır.

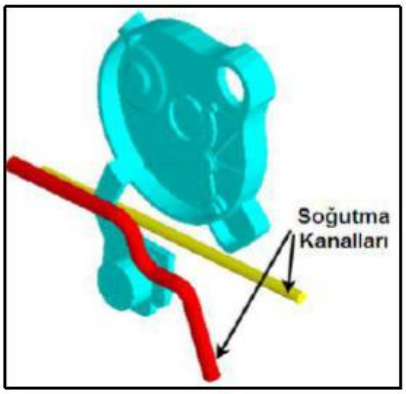
Hava boşaltım yolları, basınçlı döküm kalıplarında ayırma çizgisine konulan elemanlardır. Bu kanallar, çoğunlukla sıvı metalin havayı sıkıştırdığı alanlarda ya da yolluk girişinin doğrudan karşısında konumlandırılır. Bazı anlarda tahliye yolları, kızakların etrafına, hareket eden maçalar ve ayırıcılar üzerinde açılabilmektedir. Hava cepleri, basınçlı dökümde önemli bir görev alan diğer tahliye sistemidir. Bu cepler, dişi kalıplarda sıvı metal alaşımının akışını kolaylaştırarak doldurulması zor olan çukurlara yardımcı olur. Şekil 4.8'de, döküm kalıplarında yer alan dağıtıcılar, hava tahliye kanalları ve taşma ceplerinin düzeni gösterilmektedir. [23]



Şekil 4.8 Bir kalıpta yolluk giriş noktaları ve taşma odaları [23]

4.2.7 Soğutma Kanalları

Basınçlı döküm prosesi, üretim sürecinden önce belirli bir üretim hızına ve kalıp ısınmalarına göre programlansa da kalıpların bazı bölgeleri diğerlerine kıyasla daha fazla ısınma eğilimindedir. Bu aşırı ısınma, özellikle kalıp malzemesinin ilgili bölgesindeki mekanik özelliklerin zayıflamasına ve beklenmeyen boyutsal değişikliklere yol açabilir. Bu sorun, soğutma kanalları kullanılarak kontrol altına alınabilir ve istenilen sıcaklık seviyesinde tutulabilir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, soğutma ihtiyacı olan bölgelere su, kalıp içerisine açılan soğutma kanalları aracılığıyla iletilir. Bu yollar kalıp yüzeyine iki santimetreden yakın olmamaları önerilir. Ancak, uygun koşullar altında bu yollar, maça veya boşluk yüzeylerine 0,6 santimetreye kadar yakın olabilir. Soğutma işlemi üretim kolaylığı sağlamakla kalmaz, bunun yanı sıra çekirdeğin yüzey kalitesini artırarak kalıp ömrünü uzatmaya da destek olur. [23]



Şekil 4.9 Soğutma kanallarının şematik gösterimi [23]

4.3 Yüksek Basınçlı Dökümde Kalıp Dizaynı

Yüksek basınç ile kullanılan döküm kalıplarının dizaynı, parça kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Kalıp tasarımının özenle yapılması, kalıp ömrünü uzatmanın yanı sıra; kalıp, metaryal, imalat aşamaları gibi maliyetli süreçlerden geçmesi nedeniyle üretim maliyetleri üzerinde de önemli bir etkisi vardır. İyi bir kalıp tasarımı ile daha yoğun ve daha fazla ürün üretilerek üretim verimliliği artırılabilir.

Kalıp setinin tasarımı, birçok parametreye bağlı olarak şekillenir. Bu parametreler arasında parça adeti, parça şekli, yüksek basınçlı döküm prosesinin yeterliliği, maça gereksinimi, kalıp ayrılma yüzeyi ve itici çubuklarının yerleşimi yer alır. Kalıp tasarımında önemli bir rol oynayan çekirdek kısmı, tutucu bloklar, itici pimler, kovan ve öteki bileşenlerin malzeme seçimleri ise Tablo 4.1'de detaylı olarak verilmiştir. [15-23]

Tablo 4.1 Yüksek basınçlı döküm kalıp parçalarında kullanılan malzemeler [15]

PARÇA ADI	KULLANILAN MALZEME	SERTLİK DURUMU
Çekirdek	SAE 2344	45 HRC
Maça	SAE 2344	45 HRC
Tutucu Blok	SAE 4140	30 HRC
İtici Pimleri	SAE 1020	Yüzey Sertleştirilmiş
Klavuz Pimleri	SAE 1020	Yüzey Sertleştirilmiş
Kovan	SAE 2344	45 HRC

Bir kalıp tasarımı yapılırken dikkate alınması gereken pek çok parametre vardır. Tasarım aşamasında öncelikli dikkat edilmesi gereken unsurlardan biri, keskin kenarlardan ve sivri uçlardan kaçınmaktır. Parçalarda koniklik oranı ise en az 1° olmalıdır. [15-23]

Yüksek basınçlı döküm kalıpları iki parçalı yapıda olduğu için, tasarım sürecinde ilk olarak kalıp ayırma hattının konumunun belirlenmesi gerekir. Çoğunlukla düz

ve yassı yüzeyler bu hat için seçilir; bu tercih, hem üretim sürecini basitleştirir hem de işleme maliyetlerini azaltır. Öyle ki, günümüz şartlarında karmaşık parçaları, bu kadar basit bir ayırma bölgesi tasarımını mümkün kılmamaktadır. Kalıp ayırma bölgesinin saptanması, tasarımda önemli bir başka parametre olan yolluk bölgesinin de seçilmesinde kritik bir rol oynar. Yolluklar, kalıpların hareketli kısımlarında yer alır. Yolluklar, sıvı fazdaki metalin kalıp içerisine giriş hızını ve istikametini belirlediği için tasarımının, döküm parçasının modelinden aşağı kalır yanı yoktur. Yolluk sisteminin beklenen işlevleri arasında sıvı metalin düzenli bir biçimde, katılaşmadan ve yön değiştirmeden kalıp boşluğuna iletilmesi, kalıbın ısıl dengesini bozmadan dökümün gerçekleştirilmesi ve döküm sonrası parçanın iz bırakmadan kolayca ayrılması yer alır. İnce duvarlı parçalar için, yolluk kalınlığı kalıp cidar kalınlığından %50 oranında daha fazla olmalıdır. Yolluk kesitinin genişliği, derinliğinin 3 ila 5 katı arasında seçilirken, yolluk girişinin kalınlığı parça boyutlarına bağlı olarak 0,5 ile 1,5 mm arasında olmalıdır. Bu ölçüler, sadece özel durumlar veya ağır parçalar için artırılabilir. [15-20-23-26]

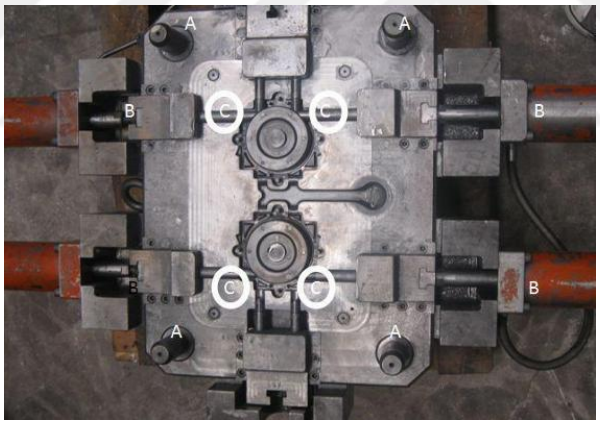
Bir döküm parçası tasarlanırken, kalıp ayırma alanına dik olan özellikler yalnızca maçalar kullanılarak dökülebilir. Bu maçalar, mekanik ya da hidrolik olarak hareketli olabilir. Ayrıca, maçaların yerleştirileceği boşluk, delik veya cep gibi alanlardaki koniklik, en az 1,5° olmalıdır. [15-20]

Yüksek basınçlı döküm kalıplarının tasarımında önemli bir diğer faktör ise, üretim hızının avantajından tam anlamıyla yararlanabilmek için göz sayısının doğru şekilde belirlenmesidir. Her döküm çevriminde yalnızca tek bir parçanın imalatı, yüksek basınçlı dökümün en üstün faydalarından biri olan yüksek üretim adetiniden etkin şekilde kullanılamamasına neden olur. Üretimde kaç göz (boşluk) bulunacağına karar verilirken; döküm prosesinin sıvı haldeki metal kapasitesi ve tekniksel yeterliliği, kalıbın boş kısmının dolum sürecinde gerekli akış hızını karşılayıp karşılamadığı, kalıp plakalarının yerleştirileceği kolonlar arasındaki açıklık, üretim stratejisi, parça geometrisi, istenen nihai parça özellikleri ve bu özelliklerin homojen dağılımı gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır.

Kalıp tasarımında göz sayısının belirlenmesinde ayrıca kalıbın büyüklüğü ve makinenin bağlanabileceği kolonlar arasındaki mesafe gibi boyutsal kısıtlamalar da dikkate alınmalıdır. Kolonlar arasındaki mesafe, kalıp boyutunu belirlerken, kalıp boyutu da içinde kaç göz yerleştirilebileceğini etkiler. Çok gözlü kalıplarla üretilen

her bir parça, kullanıldığı yerlerde aynı işlevi yerine getireceğinden, bu parçaların Çok gözlü kalıplarda üretilen parçaların yapısal özelliklerinin birbirine yakın olması beklenir. Ancak, her bir gözün enjeksiyon sisteminin topuk (bisküvi) bölgesine olan mesafesi farklılık gösterebilir. Bu mesafe farkı, dolum sırasında parçalar arasında basınç değişimlerine, dolum sürelerinin farklılaşmasına ve katılaşma esnasında sıkıştırma fazının her parça üzerindeki etkisinin değişmesine yol açabilir. Bu durum, parçalar arasında mikroyapı ve mekanik özellikler açısından farklılıkların oluşmasına neden olabilir.

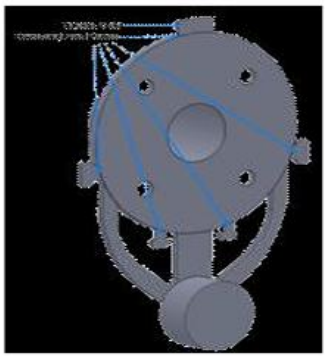
Sıkıştırma fazının etkisi, topuk bölgesine daha yakın olan parçalarda daha uzun sürede gerçekleşirken, uzak olanlarda daha kısa süreli olacaktır. Bu da parçalar arasındaki porozite oranlarının farklılık göstermesine yol açar. Sonuç olarak, aynı kalıp ile üretilen parçaların kalite düzeyleri birbirinden farklı olabilir. Bu durum, yolluk dizaynını da etkileyebileceğinden, yolluk dizaynı aşamasında da göz önünde bulundurulmalıdır. benzer döküm parçaları çok boşluklu kalıplar ile imal edilebilmektedir. İki gözlü bir kalıbın örneği, Şekil 4.10'da verilmiştir. [15-20-23]



Şekil 4.10 İki gözlü kalıpta A- Klavuz pimi B- Hidrolik pompası C- Maça [15]

Kalıbın içerisin de barınan hava ile sıvı metalin döküm sırasında meydana çıkardığı gazların, döküm parçasının içinde sıkışmasını engellemek için kalıp içerisinden atılması gerekmektedir. Bu hava, döküm parçasının iç kısmında veya yüzete yakın bölgelerinde birikerek, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Eğer kalıp boşluğu, birden fazla yolluk girişiyle doldurulursa, sıvı metal farklı açılardan gelip birbirleriyle ve kalıp duvarlarıyla çarpışarak türbülanslar yaratır. Bu türbülanslar sırasında sıvı metal, kalıp içerisindeki havayı çevreleyerek hapseder ve döküm sonunda gaz boşluklarına yol açar. Bu sebeple, kalıp boşluğundaki havanın uygun kanallar aracılığıyla tahliye edilmesi büyük önem taşır. Şekil 4.11'de,

havalandırma yolları ve hava yuvalarının (ceplerinin) temsili görünümü gösterilmektedir. Hava akış yollarının yerinin ve kesitinin doğru şekilde saptanması, kalıp dizaynının en kritik aşamalarını oluşturur.



Şekil 4.11 Hava tahliye yolları ve cepleri [23]

Hava tahliye kanalları ve cepleri, gazları uzaklaştırmak amacıyla birlikte çalışan bir sistem oluşturur. Taşma cepleri, havalandırma kanallarının devamı olarak kalıp açma yüzeyine yerleştirilir. Kalıp boşluğu dolarken sıvı haldeki metal ilk olarak bu kanalları doldurması önlenmelidir. Ayrıca, taşma ceplerinin kalıp boşluğundaki döküm parçasının boyutu tamamen dolmadan dolmaması sağlanmalıdır. Bu cepler, 3. Faz basıncının uygulandığı aşamaya denk gelmelidir. Havalandırma yollarının yerlerinin belirlenmesi, sıvı haldeki metalin dolumuna göre uygulanır. Kalıp içerisini doldurmak amacıyla dizayn edilen uygun yolluklar ve yolluk girişleri kullanılarak yapılan kalıp dolum sırasında, sıvı fazdaki metalin kalıp boşluğu içindeki gazı ne şeklide ve hangi kısımlara ittiği sümülasyonlar vasıtasıyla analiz edilmelidir. [23]

Dökümden sonra parçanın kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için tasarımda dikkate alınması gereken bir diğer önemli aşama ise, çıkış açısı ve itici pimlerin konumudur. Parçanın kalıp içerisinden çıkması için uygun yüzeylere çıkış (draft) açıları verilmelidir. Bu açıların genellikle 1-5° arasında olduğu ve ilgili yüzeylerin, parça geometrisi ve ayrılma yönüne paralel olarak belirlenmesi gerektiği söylenebilir. Katı faza geçiş aşamasında döküm alaşımlarının hacimlerinin azalması nedeniyle, iç yüzeylerin açıları, dış duvar yüzeylerinin açılarından iki kat daha büyük olmalıdır. Yüksek basınçlı döküm kalıp tasarımında bir diğer sınırlayıcı faktör, itici pimlerinin yerleştirilmesidir. İtici pimleri, döküm parçası üzerinde izler bırakabileceği için, görsel olarak önemli olan parçalarda bu pimlerin konumu özenle belirlenmelidir [15]

5
YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM HATALARI

5.1 Yüksek Basınçlı Döküm Hatalarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlı döküm parçalarında hata sınıflamasıyla ilgili literatürde üç temel düşünce öne sürülmüştür ve bu düşünce ve varsayımlar, günümüzde dökümhaneler tarafından benimsenmektedir. Bu yaklaşımlar arasında Derek Leonard Cocks'un sınıflaması, hata şekli ve konumuna odaklanırken; John Campbell'in yöntemi malzeme kaynaklı sebepleri temel alır ve Kuzey Amerika Döküm Derneği (NADCA) ise hatanın yapısal özelliklerini dikkate alır.

Derek Leonard Cocks tarafından önerilen ilk method, yüzeysel ve içsel hatalara yer vermektedir. (Tablo 5.1). Yüzeysel hatalar, görsel muayene ile tespit edilebilir ve bu tür hatalar parçanın estetik ve işlevsel özelliklerini etkileyebilir. İçsel hatalar ise yalnızca bileşenin kullanım sırasında problem yaratmasına yol açar.

Tablo 5.1 Derek Leonard Cocks göre döküm hatalarının kategorize edilmesi [12]

KATEGORİ	SINIF	TÜR
1- Yüzey hataları	1- Soğuk birleşme	1- Genel
		2- Sıçrama ve çekme
		3- Vorteks (Girdap)
		4- Laminasyon (Katman ayrılımı)
	2- Hafif düzensizlikler	1- Kabarcık (Baloncuk)
		2- Sink (Çukur)
		3- Gölcükler (Lakes)
	3- Pürüzlü yüzey	1- Çekme izleri
		2- Lehimleme

Tablo 5.1 Derek Leonard Cocks göre döküm hatalarının kategorize edilmesi [12] (devamı)

2- İç hatalar	1- Gaz porozitesi	1- Hidrojen
		2- Oksitleyici gazlar
	2- Çekinti porozitesi	1- Kümelenme
		2- Tanelerarası
		3- Çatlaklar - Sıcak yırtılmalar

John Campbell tarafından öne atılan ikinci sınıflandırma, hataları malzeme kaynaklı nedenlere göre (döküm şekli, alaşım türü, kalıp özellikleri, yağlama, proses özellikleri vb.) sınıflandırır (Tablo 5.2). Bu sınıflamanın temel önemi, ürün kalitesini artırmak amacıyla stratejiler geliştirme ve uygulama olanağı sunmasıdır. Ancak, hataların kökenleri ve nedenleri aynı anda hata tanımlamasıyla belirlenebilir ve aynı hata, birden fazla değişkene bağlı olarak meydana gelebilir. Ek olarak bu yaklaşım, önceki geometri ve konum temelli tekniklerden farklı olarak, dökümhanelerde uygulama açısından daha az etkilidir, çünkü belirli denetimlerin kullanılmasıyla farklı hata gruplarının ortaya konması daha zordur.

Tablo 5.2 Campbell göre döküm hatalarının kategorize edilmesi [12].

Gaz porozitesi	Çözünmüş gaz (hidrojen)
	Doldurma sırasında gaz sıkışması (hava)
	Bağlayıcıların parçalanması (maça gazları)
Çekinti porozitesi	Makro-porozite
	Micro-porozite
Sıcak yırtılma, çatlaklar	

Üçüncü düşünce biçimi ise, Kuzey Amerika Döküm Derneği (NADCA) tarafından önerilmiş olup, hata morfolojisi temel alınarak sınıflandırma yapılmaktadır (Tablo 5.3). Bu yaklaşımda, NADCA yedi ana hata kategorisi önermekte ve her kategori, kendi içinde farklı alt gruplara ayrılmaktadır. Bu kategoriler, her biri bir harf ile temsil edilen belirli gruplara bölünmüştür.

Tablo 5.3 NADCA'ya göre döküm hatalarının kategorize edilmesi [12]

KATEGORİ
A-Metalik çıkıntılar
B-Oyuklar
C-Süreksizlikler
D-Hatalı yüzey
E-Eksik döküm
F-Boyut ya da şekil hatası
G-İnklüzyon ya da yapısal kusurlar

EN 12258-1:2012 standardına göre, hata kavramını, bir parçanın beklenen görevi yerine getirmesini engelleyen kalite özelliği olarak tanımlar. Bu Avrupa standardı, alüminyum alaşımlı ürünlerle ilgili olarak temel terimlerden üretim süreçlerine, numune alma yöntemlerinden test prosedürlerine kadar birçok genel hususu içermektedir. Ancak bir üründe hata bulunması, onun mutlaka kullanılamaz olduğu anlamına gelmez. Döküm sırasında oluşan kusurlar, ürünün kullanım amacına uygunluğu değerlendirilirken, belli başlı teknik kriterler doğrultusunda ölçülüp yorumlanmalıdır. [12-27]

Yukarıda belirtilen üç farklı sınıflandırmanın yanı sıra, İtalyan Metalurji Derneği (AIM), yaklaşık 50 alüminyum döküm imalathanesinin katılımıyla gerçekleştirilen iki yıllık bir anket çalışmasının ardından, döküm hatalarını üç ayrı aşamaya göre gruplandıran yeni bir sınıflandırma sistemi önermiştir (Tablo 5.4, Tablo 5.5, Tablo 5.6).

Bu aşamalar şunlardır:

- **Aşama 1**: Yapısal hatalar ve konumu (iç, dış, şekil olarak);
- **Aşama 2**: Malzeme kökenli kusurlar (gaz boşluğu, kendini çekme vb.);
- **Aşama 3**: Metalurjik açıdan benzer özel kategorideki döküm hataları

Aşama 1, morfoloji veya hatanın yerini temel alır. Alt yüzeysel hatalar, yüzey hataları olarak betimlenirken, şekilsel hatalar ise döküm parçanın boyutu ve toleransları açısından şeklini ifade eder. **Aşama 2**, temel anlamda malzeme kökenine odaklanır ve hatalar, genel malzeme yapısı kökenlerine göre sınıflandırılır. **Aşama 3** ise özel hata türlerini betimlemek için kullanılır. Çoğunlukla, belirli bir kusuru betimlemek için kullanılan terimler, önceki aşamada saptanmış olan hatanın metalurjik temellerinin ayrıntılı şekilde tanımlanmasına yardımcı olur [12-28].

Tablo 5.4 İç hataların kategorize edilmesi [28].

1.AŞAMA	2.AŞAMA	3.AŞAMA
A İç hatalar	A1 Çekinti hataları	A1.1 Makro-çekinti
		A1.2 Dendritlerarası çekinti
		A1.3 Katman porozitesi
	A2 Gaz kaynaklı hatalar	A2.1 Gaz sıkışması porozitesi
		A2.2 Hidrojen porozitesi
		A2.3 Buhar sıkışması porozitesi
		A2.4 Yağlayıcı kaynaklı gaz porozitesi

Tablo 5.4 İç hataların kategorize edilmesi [28] (devamı)

	A3 Doldurma kaynaklı hatalar	A3.1 Soğuk birleşme
		A3.2 Laminasyon (Kabuklanma)
		A3.3 Soğuk birleşme porozitesi
	A4 İstenmeyen fazlar	A4.1 İnklüzyonlar
		A4.2 İstenmeyen mikroyapı
	A5 Termal büzülme hataları	A5.1 Soğuk çatlak
		A5.2 Sıcak yırtılma, sıcak çatlak

Yüksek basınçlı döküm işlemi, sıvı fazdaki metalin ve kalıbın çok zorlu koşullara maruz kaldığı bir süreçtir. Örneğin, sıvı metalin yolluk girişindeki hızı yaklaşık olarak 60 m/sn civarındadır, soğuma hızı ise yaklaşık 100 °C/s'dir. Katılaşma süreci boyunca, basınç 120 MPa'ya kadar çıkabilir. Ayrıca, kalıp sıvı metalle yaklaşık 600 °C sıcaklıkta temas eder ve ardından kısa bir süre içinde içinde kalıp ayırmaya yarayan spreyle sıcaklığı oda seviyelerine iner. Bu tür sabit işlem parametrelerinin sürdürülebilirliği oldukça zordur. Ayrıca, proses kontrol üniteleri arasında yeterli etkileşim bulunmaması, bu döküm yönteminin hatalı olmasına neden olmaktadır. Neticede, yüksek basınçlı döküm süreci %5 ila %10 oranında ıskarta üretse de, ortaya çıkan kusurların türü, büyüklüğü ve kritikliği oldukça farklılık göstermektedir. Yüksek basınçlı dökümdeki hata türleri, tahmin edilen sıklıklarıyla birlikte, Tablo 5.6'da gösterilen hata sınıflandırmasında yer almaktadır. Bu sınıflandırma, farklı hata alt gruplarını tanımlamaktadır. [16]

Tablo 5.5 Şekilsel hataların kategorize edilmesi [28]

1.AŞAMA	2.AŞAMA	3.AŞAMA
C Geometrik Hatalar	C1 Malzeme eksikliği	C1.1 Doldurmama
	C2 Fazla malzeme	C2.1 Çapak
	C3 Tolerans dışı olma	C3.1 Deformasyon

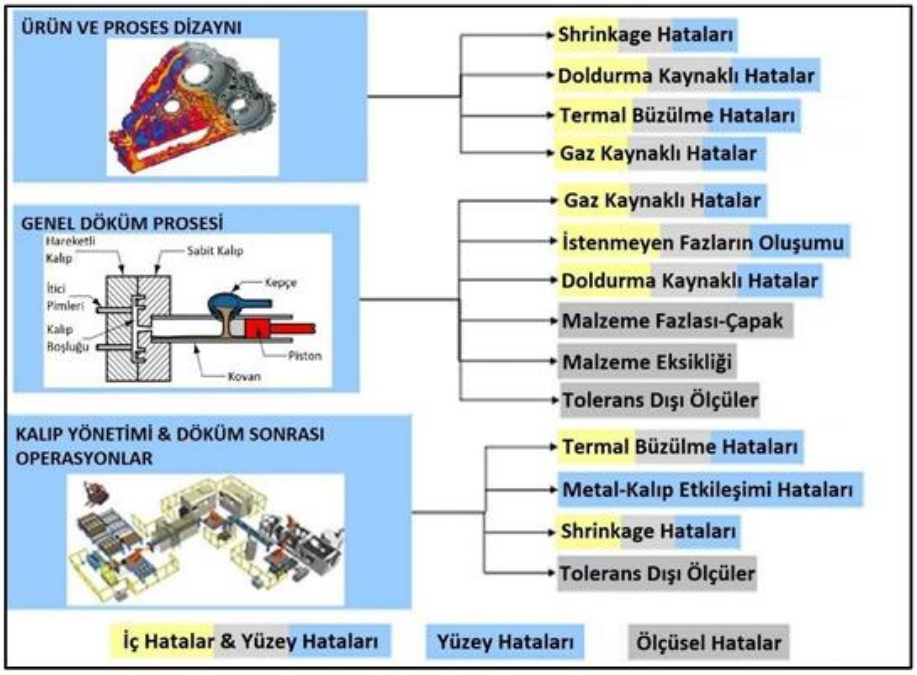
Yüksek basınçlı döküm prosesinin her adımı, daha önce belirtilen kategorizasyonun birinci düzeyinde yer alan üç temel hata kategorisinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu hata türleri; yalnızca yüzeyde görülen kusurlar, hem iç yapıda hem de yüzeyde oluşan bozulmalar ile biçimsel sapmalar olarak gruplandırılabilir (Tablo 5.5) [16]

Tablo 5.6 Yüksek basınçlı döküm prosesinde görülen hata türlerinin ortaya çıkma oranlarının yüzdeliği [16]

HATA SINIFI	OLUŞMA SIKLIĞI %	SİMÜLASYON İLE TESPİT EDİLEBİLİRLİK	DENEYSEL ONAYLAMA	İZLEME VERİLERİ
Shrinkage hataları	20	Kısmi olarak	X-Ray, Mikroskobi	Sıcaklık, basınç, Metal ön sensörleri
Gaz kaynaklı hatalar	15	Hayır	X-Ray, Mikroskobi, kabarcık testi	Hava basıncı, nem
Kalıbın dolumu sırasında oluşan kusurlar	35	Evet	Görsel Kontrol, kaçak testi	Hava basıncı, metal ön sensörleri, sıcaklık

Tablo 5.6 Yüksek basınçlı döküm prosesinde görülen hata türlerinin ortaya çıkma oranlarının yüzdeliği [16] (devamı)

İstenmeyen fazların oluşumu	5	Hayır	Mikroskobi	Atış kovanı izleme
Termal büzülme (çekme) hataları	5	Evet	Görsel Kontrol, Mikroskobi	Sıcaklık
Metal-Kalıp etkileşimi kaynaklı hatalar	5	Kısmi olarak	Mikroskobi	Sıcaklık, atış kuvveti
Belirlenen tolerans aralıklarını aşan ölçüler	5	Gelişmiş simülasyon ile	Görsel Kontrol, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler
Döküm sırasında oluşan malzeme yetersizliği	5	Evet	Görsel Kontrol, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler
Malzeme fazlası - Çapak	5	Gelişmiş simülasyon ile	Görsel Kontrol, Boyutsal ölçüm	Geometrik ölçümler



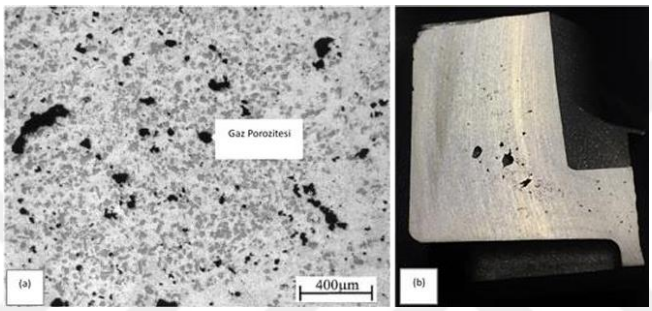
Şekil 5.1 Hataların kategorizasyonu ve nedenleri [16]

Yüksek basınçlı dökümde, kalıp boşluğunda bulunan gaz, çekinti porozitesi, alaşımdan çıkan gazlar ve sıvı metalde oluşan cüruf gibi unsurlar, parçayı kalite açısından olumsuz olarak etkileyebilir. Sıvı haldeki metalin kalıp boşluğunu doldurma süresi genellikle 0,1 saniye gibi çok kısa bir zaman diliminde gerçekleşir. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde, metal akışı sırasında meydana gelen türbülans etkisiyle, hava ya da gazların tamamen dışarı atılması her ne kadar önlemler alınsa da tam anlamıyla mümkün olmamaktadır. [26]

5.1.1 Gaz Porozitesi

Yüksek basınçlı dökümde en sık rastlanan hata türü gaz porozitesidir. Bu üretim sürecinde porozitesiz bir parça üretmek neredeyse mümkün değildir. Bununla birlikte, ASTM E505 gibi uluslararası standartlar ve müşteri gereksinimleri doğrultusunda, belirli ölçü ve oranlarda poroziteye izin verilmektedir. Gaz porozitesi; pistonun ilk hareket hızının uygun şekilde ayarlanmaması, kovan veya itici pistonun yapısal arızaları ya da hasarları, sıvı metale gaz giderme işleminin uygulanmaması ya da kullanılan gaz gidericilerin etkinliğini yitirmesi gibi nedenlerle, metal içerisinde çözünmüş gazların (örneğin alüminyum alaşımlarında hidrojen - H_2) ve kalıp boşluğundaki havanın kalıptan tam olarak dışarı çıkamaması sonucu ortaya çıkan bir kusurdur. Bu durum, parça yüzeyinde veya içinde kalan hava kabarcıklarının meydana gelmesine yol açar (Şekil 5.2 a – mikroskop görüntü,

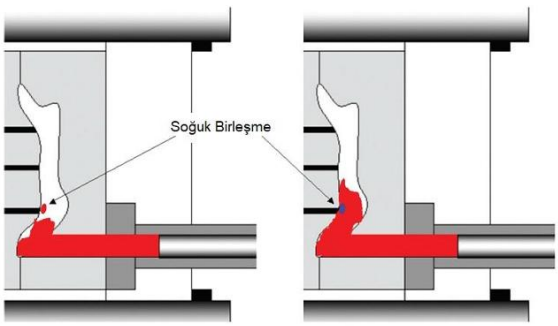
b – makroskop görüntü). Gaz porozitesinin başlıca sebebi, döküm sırasında sıvı haldeki metal içerisinde hidrojen gazının bulunmasıdır. Sıvı haldeki metaldeki hidrojen seviyesindeki artış, döküm içerisindeki porozite seviyesini artırır. Katılaşma sürecinde gaz porozitesinin başlıca nedeni, sıvı metalde bulunan hidrojen miktarıdır ve bu seviyenin kontrol altında tutulması gereklidir. Bu yapılmaz ise, döküm parçasının fiziksel özellikleri ve yüzeysel kalitesi büyük ölçüde zarar görür. Alüminyum, havada bulunan su buharı ile tepkimeye girerek hidrojen gazını açığa çıkarır. Porozite genellikle et kalınlığı fazla olan döküm parçalarında, az miktarda büyük boşluklar veya çok sayıda küçük gözenekli yapı şeklinde ve çoğunlukla parçanın yüzeyine yakın bölgelerde ortaya çıkar. [23-29]



Şekil 5.2 Alüminyum döküm parçasındaki gaz kaynaklı boşluklar (porozite) [23].

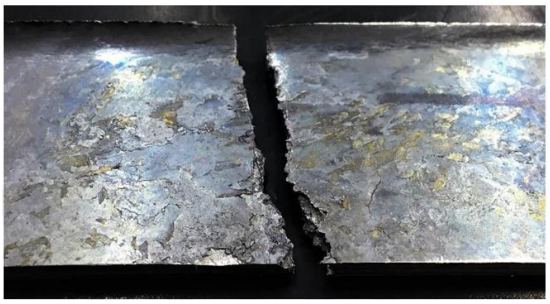
5.1.2 Soğuk Birleşme

Kalıp içinde soğuyan katı fazdaki bölgeler, sonrasında gelen yüksek sıcaklıktaki sıvı haldeki metalle karşılaştığında ve arada kalan oksit katman sebebiyle kaynama gerçek anlamıyla olmadığından bu tür hatalar oluşur (Şekil 5.3). Sıvı metalin farklı yönlerden gelerek karşılaştığı noktalarda, eğer bu bölgeler yeterince soğumuş ve birbirleri içinde ergimeyecek duruma gelmişse, kaynama gerçekleşmez ve bu durum söz konusu olur. [23]



Şekil 5.3 Yüksek basınçlı döküm sırasında soğuk birleşme kusurunun meydana gelme süreci [27]

Dökümde soğuk birleşme kusuru, genellikle düşük kuvvet altında kırılmalara yol açar. Şekil 5.4'de, düşük fiziksel yük etkisi altında soğuk birleşme oluşan alüminyum parçanın bir bölgesinden kopma örneği gösterilmektedir. [27]



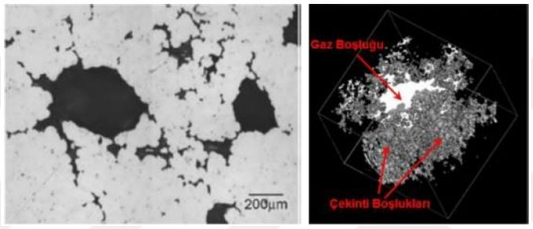
Şekil 5.4 Düşük mekanik kuvvet altında kırılmaya neden olan soğuk birleşme kusuru

Soğuk birleşme, sıvı metal kalıp yüzeyine temas ettiği anda ani soğuma sonucu meydana gelir. Hızlı katı faza geçiş, etrafındaki bölgenin ince oksit bir katmanla ayrılmasına ve bu bölgede incecik bir mikro yapının oluşmasına yol açar. Bazı durumlarda, kalıp boşluğuna akan sıvı haldeki metal, hızlı bir şekilde katılaşan bölgelerden bazılarının ayrılmasına sebep olabilir ve bunlar, sıvı hale tamamen geçmeden boşluğa sürüklenebilir. Bu nedenle, soğuk birleşme kusuru çoğunlukla parça yüzeyinde gözlemlense de, sıvı metalin akış yönünde iç kısımlarda da ortaya çıkabilir. Bu hatanın başlıca sebepleri arasında kalıbın doluşundaki kopukluklar, düşük akışkanlığa sahip sıvı metal, hatalı yolluk tasarımı nedeniyle yetersiz besleme, düşük döküm ve kalıp sıcaklıkları yer almaktadır. [12-23-30]

5.1.3 Çekinti (Shrinkage)

Yüksek basınçlı döküm parçalarda sıkça karşılaşılan hatalardan bir diğeride çekinti hatasıdır. Döküm işlemi sonrasında katılaşma aşamasında, sıvı ve katı fazlar içindeki hacim farkları nedeniyle çekme (büzülme) oluşur. Birçok alüminyum alaşımı için katı faza geçiş sırasında büzülme oranı hemen hemen %6 civarındadır. Dökülen metal katı hale geçtiğinde, sıvı hale oranla daha az hacim kaplar, yani metaller sıvı halden katı hale geçerken hacimsel küçülmeye uğrar. Bu küçülme, parça içindeki kalın kesitli ve geç katılaşan bölgelerin ince kesitli ve erken katılaşan bölgeleri beslemesiyle dengeye gelir. Kalın kesitler ise, basınçlı dökümde besleme uygulaması olmadığı için yolluk girişinden beslenmek zorundadır.

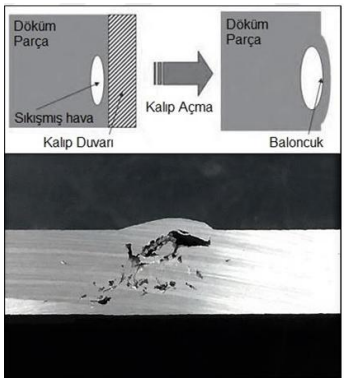
Katılaşma sürecinin sonunda, çevresinden yalıtılmış ince cidarlarda ya da yeterli metal akışı olmaksızın katılaşan kalın bölgelerde, metalin hacimce şekilsel büzülme sonucu çekinti boşlukları meydana gelir. Bu tür boşluklar, parçanın mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceğinden, oluşumları en aza indirilmelidir. Çekinti boşlukları genellikle düzenli olmayan ve pürüzlü bir yüzey yapısına sahipken, gaz boşlukları daha düzgün ve yuvarlak şekillerde görülür. Ancak bu iki kusur tamamen birbirinden bağımsız değildir; döküm yapısında gaz içeren boşluklar ile çekinti boşlukları birlikte barınabilir. Şekil 5.5'te, bu iki kusur türünün mikroyapı içindeki etkileşimi ve üç boyutlu görünümü gösterilmektedir. Çekinti kaynaklı hatalar, radyografik testlerde koyu alanlar şeklinde tespit edilebilen süreksizlikler olarak kendini gösterir. [23-29]



Şekil 5.5 Mikroyapı ve üç boyutlu analizde porozite ile çekinti boşluklarının dağılımı [23]

5.1.4 Baloncuk (Blister)

Baloncuk kusurları, genellikle gazların neden olduğu yüzeysel hatalar olarak tanımlanır. Bu hatalar, yüzey altındaki gaz boşluğunun iç basıncı nedeniyle, küçük metal yüzey tabakasının fiziksel olarak deformasyona uğrayıp patlaması veya patlamadan küçük yüzey alanları oluşturmasıyla meydana gelir. Bu tür hataların temel nedeni, sıvı metal içinde çözünmüş gazlardır. Şekil 5.6'da, baloncuk hatasının meydana geliş aşamaları ve bu kusurun alüminyum parçadaki makro görünümü gösterilmektedir. Baloncuk hatası, 100 mikrometre ile birkaç milimetre arasında değişebilecek ölçülerde olabilir. Bu hata, döküm parçası kalıptan çıkarıldığında ya da ısıl işlem uygulandıktan sonra ortaya çıkabilir. Aynı şekilde, kaplanmış döküm parçaların ısıl işlemleri sırasında, metal içinde sıkışmış gazlar sızarak kaplamanın patlamasına neden olabilir. Bu durum bazen gaz boşalması olarak tanımlanır ve baloncuk (blister) hatası şeklinde sınıflandırılır. Bu tür bir hata, Kalıp doldurma sırasında oluşan türbülansın etkisiyle oluşan içeride kalmış hava nedeniyle olur. Yüksek basınçlı döküm işlemi sırasında daha çok görülür. [12-30]



Şekil 5.6 Baloncuk hatasının meydana gelme süreci (üst kısım) ve makro düzeyde görünümü (alt kısım)

5.2 Yüksek Basınçlı Dökümde Kalite Kontrol Süreçleri

Yüksek basınçlı dökümde kalite kontrol süreci, oldukça kapsamlı ve sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç duyar. Döküm işleminin doğasında var olan çeşitli hata olasılıkları nedeniyle, kalite kontrol uygulamaları, üretilen parçanın özelliklerine ve kullanım amacına göre özel olarak yapılandırılmalıdır. Bu doğrultuda, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemi, potansiyel sorunların üretim sürecinde oluşmadan önce belirlenip önlenmesinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Yüksek basınçlı döküm prosesi, birçok farklı hata türünü barındırır ve bu türlerin her biri yakından izlenmelidir. Ancak hangi hata türlerinin kritik olduğu; parçanın tasarımı, fonksiyonu ve nihai kullanıcı ihtiyaçlarına göre değişkenlik gösterir.

Yüksek basınçlı dökümde karşılaşılan bazı hata türleri aşağıda sıralanmıştır. Bu hata modlarının her birinin belirlenmesi ve önlenmesi amacıyla çeşitli teknikler kullanılmaktadır:

- Talaşlı proses sonrası sızıntı kanalları meydana getiren porozite
- Kalıp içindeki hareket eden parçaların sürtünme, aşınma ya da yer değiştirmeleri sonucunda döküm parçalarında ortaya çıkan boyutsal sapmalar
- Döküm sırasında dolum sorunları veya kalıp kondisyonundaki bozulmalar nedeniyle oluşan görsel kusurlar.
- Trim işlemi sırasında yaşanan sorunlar nedeniyle üretilen parçada fazladan malzeme kalması

- Diğer hataların birleşimi nedeniyle meydana gelen sızdırmazlık problemleri
- Boya işlemi veya montaj gibi pas geçilmiş ya da uygun olmayan ikinci safha işlemler

Bu hata modlarının her biri, döküm kalitesini etkileyebileceğinden, her birinin önceden analiz edilmesi ve gereken önlemlerin alınması büyük önem taşır.

5.2.1 Porozite (X-Ray Kontrolleri)

Porozite, X-ışını yöntemleri ile rahatlıkla saptanabilir. Bu yöntem, çoğunlukla toplam porozite miktarlarını belirlemede önemli rol oynamakla birlikte, küçük büyüklükteki porozitelerin kesin olarak yerini belirlemek oldukça zor olabilir. Diğer bir yöntem ise talaşlı imalatın kullanılmasıdır; bu, poroziteyi incelemek için etkili bir araç olmakla birlikte, maliyetli yüksek olabilir. Poroziteyi engellemenin en iyi yollarından biri, oluşumunu engellemek için döküm süreci parametrelerinin dikkatlice kontrol altında tutulmasıdır.

5.2.2 Görsel Kusurlar

Görsel hataların tespitinde genellikle az güvenilir ve yüksek olasılıkla maliyeti en düşük olan göz ile kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Ancak görsel sistemlerin doğasındaki değişkenlik nedeniyle, bu yöntem henüz görsel kusurların tespitinde yaygın olarak kullanılamamaktadır. Diğer hata türlerinde olduğu gibi, sorunların müşteriye ulaşmasını önlemenin en etkili yolu, hataların baştan engellenmesidir. Bu hedefle, güvenilir bir prosesin sürdürülmesi için proses kontrolünün büyük önemi vardır. Bunun dışında, kalıpların periyodik bakımlarını karşılamak için en güvenilir yaklaşım, müşterilerle yapılan anlaşmalar doğrultusunda periyodik bakım programlarının oluşturulmasıdır.

5.2.3 Trim Kusurları

Trim problemleri, döküm parçalardaki fazlalıkları almak için kullanılan yöntem ve ekipmanlarla bağlantılı olara çeşitli nedenlere dayanabilir. Trim kalıplarında ortaya çıkan problemler, çoğunlukla sistemli bakım ve doğru tasarım sayesinde engellenebilir. Trim hatalarının tespiti çoğunlukla görsel muayene ile gerçekleştirilir, bu da zaman zaman güçlükler yaratabilir. Bununla birlikte, önemli sorunların önüne geçmek için mastar kontrolleri veya Poke-Yoke gibi hata önleyici

yöntemler uygulanabilir. Bu cihazlar, hata olasılıklarını minimize etmek ve süreçteki hataları önlemek için etkili araçlar sağlar.

5.2.4 Kaçak problemi (Leakage)

Döküm parçalarında sızdırma sorunu, çoğunlukla daha önce belirtilen hata türlerinden biri veya birkaçının birlikte ortaya çıkmasıyla oluşur. Parçalarda bulunan porozite ve yüzey kusurları, içten dışa doğru sızıntı yollarının oluşmasına neden olur. Bu kaçak hatalarının tespiti, çoğunlukla parçaya özel olarak dizayn edilen hava kaçak muayeneleri yapılır. [31]

5.3 Simülasyon Tabanlı Yöntemlerle Yüksek Basınçlı Döküm Analizi

Günümüzde üretim aşamalarında maksimum kaliteye ulaşmak adına yüksek kapasiteli bilgisayarlar ve gelişmiş simülasyon yazılımları yaygın biçimde kullanımı tercih edilmeketedir. Bu yazılımlar, sadece kalıp tasarımını kolaylaştırmakla kalmaz; aynı zamanda maliyeti azaltılmış ve yüksek hassasiyetle hazırlanmış tasarımlar geliştirilmesine olanak tanır. Deneme-yanılma yöntemine dayalı klasik üretim süreçlerine kıyasla daha düşük maliyetli bir başlangıç sunarak verimli ve başarılı bir üretim süreci sağlar. Bu araçlar sayesinde, sıvı metalin yolluk sisteminde ilerleyişi, kalıbın ne şekilde dolduğu ve üretim sonunda karşılaşılabilecek kusurlar önceden görselleştirilebilir. Ayrıca, kalıp tasarımındaki olası sorunlar da simülasyon yoluyla tespit edilebilir. Dökümün katılaşma süreci, metalin akış hızı, sıcaklık dağılımları, birleşme hataları, hava boşluklarının konumu ve porozite gibi birçok kritik unsur bu yazılımlar aracılığıyla analiz edilebilir. Böylece, potansiyel hatalar üretim öncesinde belirlenerek, ilk denemede kaliteli ürün elde edilmesi mümkün olur.

Yüksek basınçlı döküm kalıplarının hazırlanmasında bilgisayar tabanlı mühendislik araçlarının kullanılması artık sadece bir tercih değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel gerekliliklerin karşılanması açısından zorunlu hale gelmiştir. Bu yazılımların etkin kullanımı ise, tasarımcının doğru ve gerçekçi modeller oluşturma yeteneğine bağlıdır. Simülasyon sonuçlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi, hem kalıpta hem de nihai üründe meydana gelebilecek kusurların azaltılmasında kritik bir rol oynar.

Yüksek basınç kullanılan döküm sistemlerinde kalıpların karmaşık yapısı sabit ve hareketli parçalar, soğutma hatları, çekirdekler gibi bileşenler ile birlikte üretim sırasında kullanılan enjeksiyon sıcaklığı, pistonun hareket hızı ve çevrim süreleri gibi makine parametreleri, modelleme aşamasında dikkate alınması gereken önemli değişkenlerdir. Kalıpların detaylı geometrisi ve ince kesitli yapıları, döküm sırasında sıvı alüminyumun serbest yüzeylerde ani hareketler ve sıçramalar oluşturmasına neden olur. Bu durum, üç boyutlu sıvı akışlarının karmaşık hale gelmesine yol açar. Döküm sırasında kalıbın ne şekilde dolacağı, hava tahliye kanallarının doğru konumlandırılması ve yolluk sisteminin uygun şekilde tasarlanması, homojen yapılı ve hatasız parçalar elde etmek açısından belirleyicidir. Bu nedenle simülasyonlar, döküm sistemlerinin hem tasarım hem de üretim performansını artırmada kritik bir role sahiptir. Simülasyonlar sayesinde daha az deneme yapılarak daha yüksek kaliteye ulaşılabilir ve üretim maliyetleri önemli ölçüde düşürülebilir.

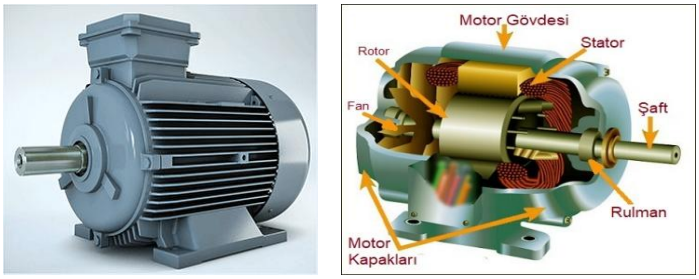
Aynı zamanda bu teknolojiler, farklı tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasına ve döküm sürecinde ısı yönetiminin daha etkili biçimde kontrol edilmesine imkan sağlar. Farklı kalıp geometrilerinin, yolluk ve havalandırma sistemlerinin verimliliği detaylı olarak değerlendirilebilir. Böylece iyi tasarlanmış bir yolluk ve gaz çıkışı sistemiyle kalıp homojen şekilde dolarak kaliteli dökümler elde edilebilir. Bu süreçte boşlukların dolma şekli, hava tahliyesi ve metalin akış davranışı görsel olarak analiz edilebilir.

Bu amaçla geliştirilen MAGMAsoft yazılımı, yüksek basınçlı döküm alanında sıkça kullanılan güçlü bir simülasyon aracıdır. Program, üç boyutlu döküm analizlerini gerçekleştirebilmek için sonlu hacim yöntemini kullanarak ısı ve kütle transferi hesaplamaları yapar. Gelişmiş veri tabanı ve detaylı analiz yetenekleri sayesinde, sıvı metalin kalıp boşluğunu nasıl doldurduğu, erken katılaşma süreçleri, gaz sıkışmaları, metalin giriş hızı ve yolluk sisteminin davranışı gibi birçok unsur hakkında kullanıcıya kapsamlı bilgiler sunar. Bu yönüyle MAGMAsoft, yüksek basınçlı döküm süreçlerinin optimize edilmesinde güvenilir ve etkili bir mühendislik aracıdır.

6
DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Elektrik Motorlarının Tanımı ve Çalışma Prensibi

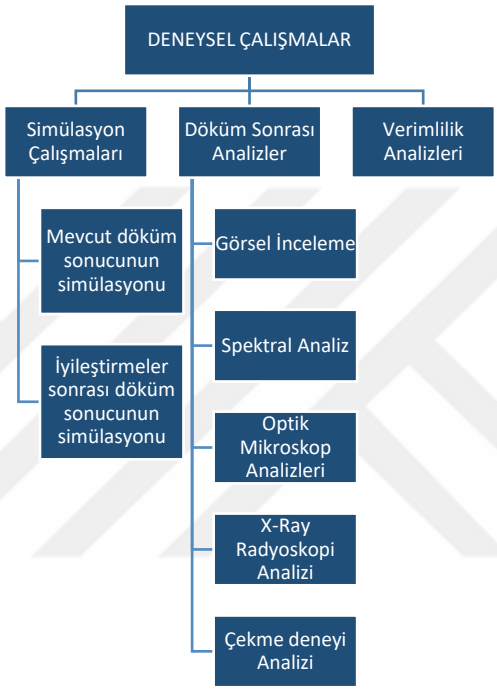
Asenkron motorlar, alternatif akım (AC) motorları arasında en yaygın kullanılan türlerden biridir ve genellikle "indüksiyon motorları" olarak da adlandırılır. Bu motorlar, rotor hızının stator tarafından üretilen manyetik alan hızından farklı olması nedeniyle "asenkron" adını alır. Temel çalışma prensibi, elektromanyetik indüksiyon ilkesine dayanır; statorda üretilen manyetik alan, rotor üzerinde elektrik akımı indükler ve rotorun dönmesini sağlar. Bu motorların ana yapısal elemanları, hareketsiz stator ile dönen rotor kısmından oluşur. Rotor, genellikle bakır veya alüminyum malzemelerden yapılır ve stator tarafından oluşturulan manyetik alandan etkilenerek dönme hareketi yapar. Asenkron motorlar, basit yapıları, düşük maliyetleri ve dayanıklılıklarıyla tercih edilir. Fırçalı motorlara kıyasla daha az bakım gerektiren bu motorlar, endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılır. Asenkron motorlar arasında en sık kullanılan 'sincap kafesli' motorlardır. Bu motorlar, sağlam yapıları ve uzun ömürlü performansları sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Diğer bir türü ise yüzüklü rotorlu motorlardır, bu motorlar ise hız kontrolü gereksinimlerinin bulunduğu uygulamalarda kullanılır. Asenkron motorlar, endüstriyel makinelerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle konveyörler, pompalar, fanlar ve kompresörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorların sağladığı verimlilik ve dayanıklılık, onları modern endüstriyel sistemlerin vazgeçilmez bir parçası yapmaktadır. [34-35-36]



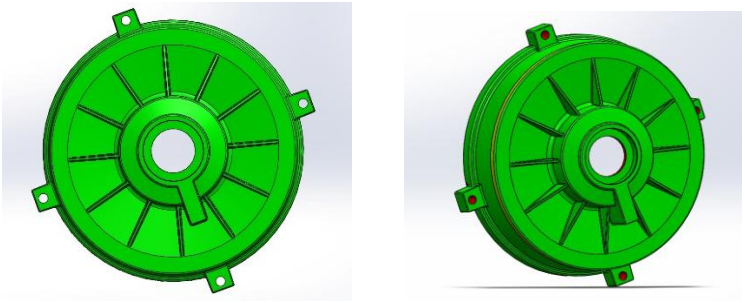
Şekil 6.1 Elektrik motoru görseli ve parçaları

6.2 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar kapsamında mil ve rotoru taşıyan aynı zamanda rulmanları destekleyen elektrik motoru kapaklarının üretildiği ve döküm hataları yaşanan bir kalıpta yolluk ve proses optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarımsal ve proses parametrelerine bağlı hatalar önceki tasarımda ve yeni tasarımda incelenmiş, Magmasoft döküm simülasyon programı kullanılarak deney gerçekleşitirilmiş ve uygulamalı (gerçek) döküm ile parçanın kalite kontrolleri sağlanmıştır.



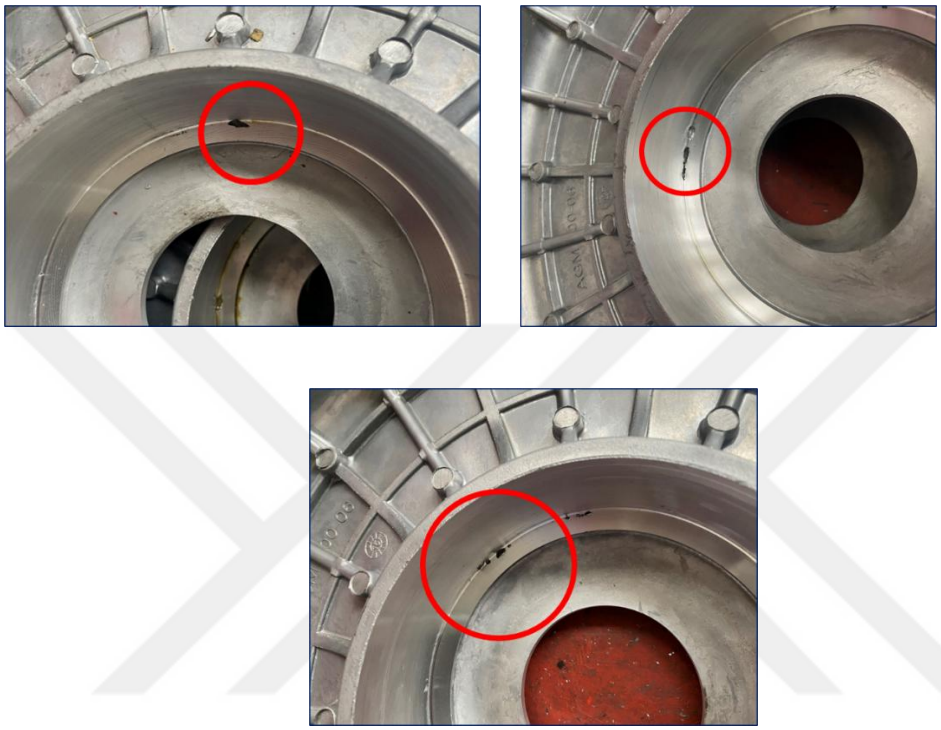
Şekil 6.2 Deneysel çalışma sistematiği



Malzeme	AlSi9Cu3
Ağırlık	2,8 kg
Yüzey Alanı	3535,75 cm^2
Hacim	947,67 cm^3

Şekil 6.3 Elektrik motoru kapağı ve özellikleri

Parçanın mevcut iki gözlü kalıbında gerçekleştirilen üretim sonrası şekil 6.4'de kırmızı dairelerin içerisinde gösterildiği gibi parçanın radyal ve eksenel yükler taşıyan rulmanın yerleştirildiği göbek kısmında çekinti porozitesi olduğu görülmüştür. Bu durum parçanın mekanik özelliğini zayıflatmakta ve kullanım ömrünü kısaltmaktadır.



Şekil 6.4 Parçada gözlemlenen döküm hataları

Mevcut kalıp 2011 yılında tasarlanmış olup, döneminde simülasyon programı mevcut olmadığından gerekli analizleri üretime dökülmeden tam olarak gerçekleştirilememiştir. Çoğu tasarımsal kriterleri çeşitli hesaplamalar ve tecrübeler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Tüm parametreler incelenmediğinden zamanla üretiminde problemler yaşanmıştır. İlgili çalışmada kalıbın tüm parametreleri incelenmiş gerekli simülasyon analizleri ve çalışmaları gerçekleştirilerek kalıpta ve üretim prosesinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. İyileştirme kapsamında eski kalıpta çeşitli işlemler gerçekleşmiştir. Yolluk kesit alanı, hava cepleri ve hava tahliye kanalları, topuz kısmının çap ölçüsü, parçanın tasarımsal problemleri ve havalandırma kanalları ile birlikte chilvent eklenmesi düşünülmüş ayrıca soğutma sisteminden kaynaklı olabilecek problemlerde incelenmiştir. Tüm revizyonlar sonrası uygulamalı döküm gerçekleştirilmiş ve kalite ve verimlilik sonuçları analiz edilmiştir.

6.2.1 Yolluk Hesaplaması

Yüksek basınçlı dökümde yolluk sistemine yönelik yapılan hesaplamalar, erimiş metalin kalıp boşluğuna dengeli ve homojen biçimde dolmasını sağlamak, üretim sürecinin etkinliğini artırmak ve elde edilen parçanın kalitesini yükseltmek açısından büyük önem taşır. Doğru yolluk tasarımı, metalin aşırı hızlı veya yavaş akmasını engeller, hava kabarcıkları ve deformasyonları önler, soğuma sürecini denetler ve döküm hatalarını minimize eder. Ayrıca, verimliliği artırarak maliyetleri düşürür ve daha sağlam, kaliteli parçaların üretilmesine yardımcı olur.

Yolluk kesit alanı ve aşağıda belirtilen diğer hesplamlarda kullanılacak parametreler ise tek parça ağırlığı 2782 gram, tek parça için taşma ceplerinin ağırlığı 546 gram, piston çapı 130 milimetre, hazne boyu 690 milimetre, parçanın ortalama et kalınlığı 3.7 milimetre, spesifik döküm basıncı 580 bar, sistemin hidrolik basıncı 303 bar, dökümün yapılacağı parça sayısı ise ikidir. Alümünyum için sıvı metal yoğunluğu 2,4 g / cm³, salkım hacmi 3907 cm³, hazne hacmi ise 9158,02 cm³'dir. Yolluk hızı 25 m/s ve yoluk giriş hızı ise 28 m/s'dir. Hava hızı 190 m/s kabul edilmiştir.

$$\text{Dolum ağırlığı} = (\text{Parça ağırlığı (g)} + \text{Taşma cepleri (g)}) \times \text{Parça Sayısı}$$

$$\text{Dolum ağırlığı} = (2782\ \text{g} + 546\ \text{g}) \times 2 = 6656{,}0\ \text{g} \tag{6.1}$$

$$\text{Dolum Hacmi} = \frac{\text{Dolum Ağırlığı(g)}}{\text{Erimiş Metalin Yoğunluğu}} = \frac{6656{,}0\ \text{g}}{2{,}4\ \text{g/cm}^3} = 2773{,}3\ \text{cm}^3 \tag{6.2}$$

$$\text{Debi(Q)} = \frac{\text{Dolum Hacmi (cm}^3\text{)}}{\text{Dolum Zamanı (ms)}} = \frac{2773.3\ \text{cm}^3}{60\ \text{ms}} = 46{,}22\ \text{l/s} \tag{6.3}$$

$$\text{Piston Hızı} = \frac{\text{Debi Q (l/s) x 10}}{\text{Piston Alanı(cm}^2\text{)}} = \frac{46{,}22\ \text{l/s} \times 10}{133\ \text{cm}^2} = 3{,}48\ \text{m/s} \tag{6.4}$$

$$\text{Yolluk kesit Alanı} = \frac{\text{Debi Q (l/s) x 1000}}{\text{Yolluk Hızı (m/s)}} = \frac{46{,}22\ \text{l/s} \times 1000}{25\ \text{m/s}} = 1848{,}9\ \text{mm}^2 \tag{6.5}$$

$$\text{Yolluk Giriş Kesit Alanı} = \frac{\text{Debi Q (l/s) x 1000}}{\text{Giriş Hızı (m/s)}} = \frac{46{,}22\ \text{l/s} \times 1000}{28\ \text{m/s}} = 1650{,}8\ \text{mm}^2 \qquad (6.6)$$

$$\text{N adet giriş kesiti} = \frac{\text{Yolluk giriş Kesit Alanı (mm}^2\text{)}}{\text{Parça Sayısı(n)}} = \frac{1650{,}8\ \text{mm}^2}{2} = 825{,}4\ \text{mm}^2 \qquad (6.7)$$

$$\text{Hazne Dolluk Oranı (Maks. \%66)} = \frac{\text{Salkım Hacmi (cm}^3\text{)}}{\text{Hazne Hacmi (cm}^3\text{)}} = \frac{3907\ \text{cm}^3}{9158{,}02\ \text{cm}^3} \approx \%43 \qquad (6.8)$$

$$\text{Havalandırma Kesiti} = \frac{\text{Debi Q (l/s) x 1000}}{\text{Hava Hızı VI}(100-300\frac{\text{m}}{\text{s}})} = \frac{46{,}22\ \text{l/s} \times 1000}{190\ \text{m/s}} = 243{,}27\ \text{mm}^2 \qquad (6.9)$$

Tüm bu hesaplamalar iki adet elektrik motoru kapağının dökümde yolluk giriş kesitini hesaplamak için yapılmıştır, her bir parça için 825,4 mm² (Denklem 6.7) kesit alanı yeterlidir. Her bir parça iki koldan beslendiği için tek bir kol 412,7 mm² olmalıdır. Tablo 6.1'de, AlSi9Cu3 alaşımı kullanılarak yapılan yüksek basınçlı döküm işlemlerinde, parça et kalınlığına göre tavsiye edilen dolum süreleri sunulmaktadır. Değerler, NADCA'nın yüksek kaliteli döküm üretimi için önerdiği hızlı dolum prensiplerine göre belirlenmiştir. Bu değerler yukarıdaki hesaplamada kullanılmıştır. Parça için ortalama et kalınlığı 3.7 milimetredir ve dolum süresi 60 milisaniyedir.

Tablo 6.1 Alüminyum dolum zamanı

Parça Et Kalınlığı (mm)	Dolum Süresi (ms)
1.0	25
1.5	30
2.0	35
2.5	42
3.0	50
3.5	58
4.0	65
4.5	73
5.0	80

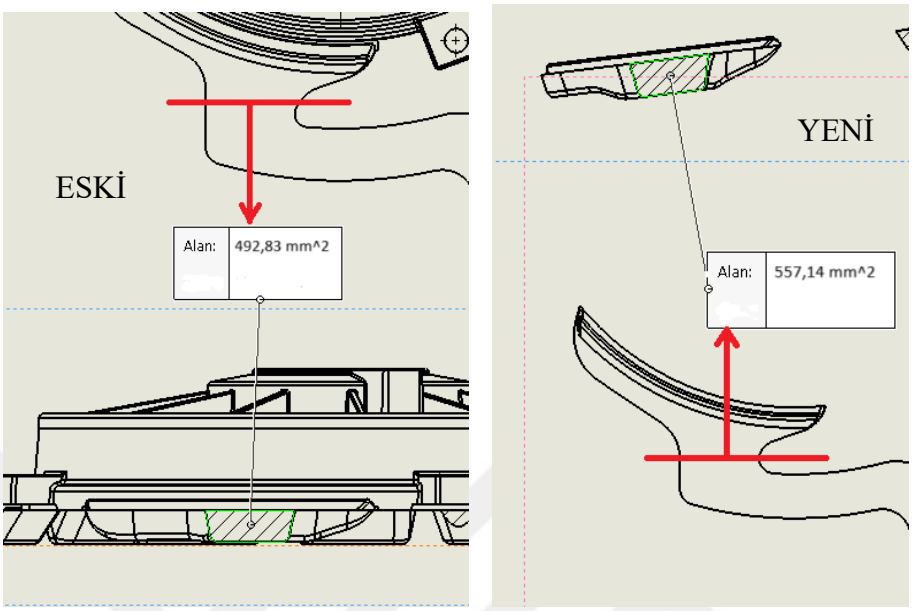


Şekil 6.5 Eski yolluk giriş kesit alanı

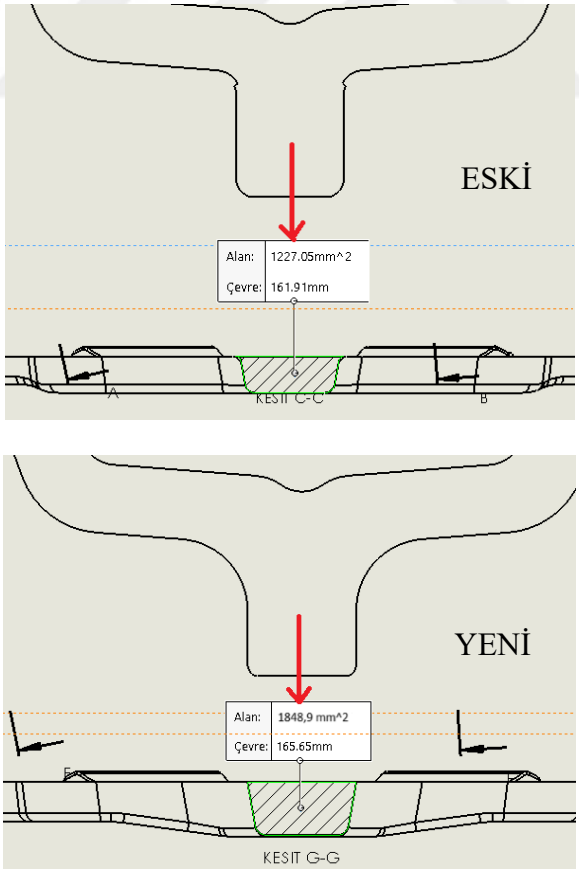


Şekil 6.6 Yeni yoluk giriş kesit alanı

Yolluk kolunun kesit alanı, parça ortalama et kalınlığına göre (3,7 mm) 1,35 katsayısı ile çarpılarak belirlenmektedir. Yani giriş kesitinin 1,35 katıdır. Bu değer de 557,14 milimetrekaredir. (Şekil 6.7)

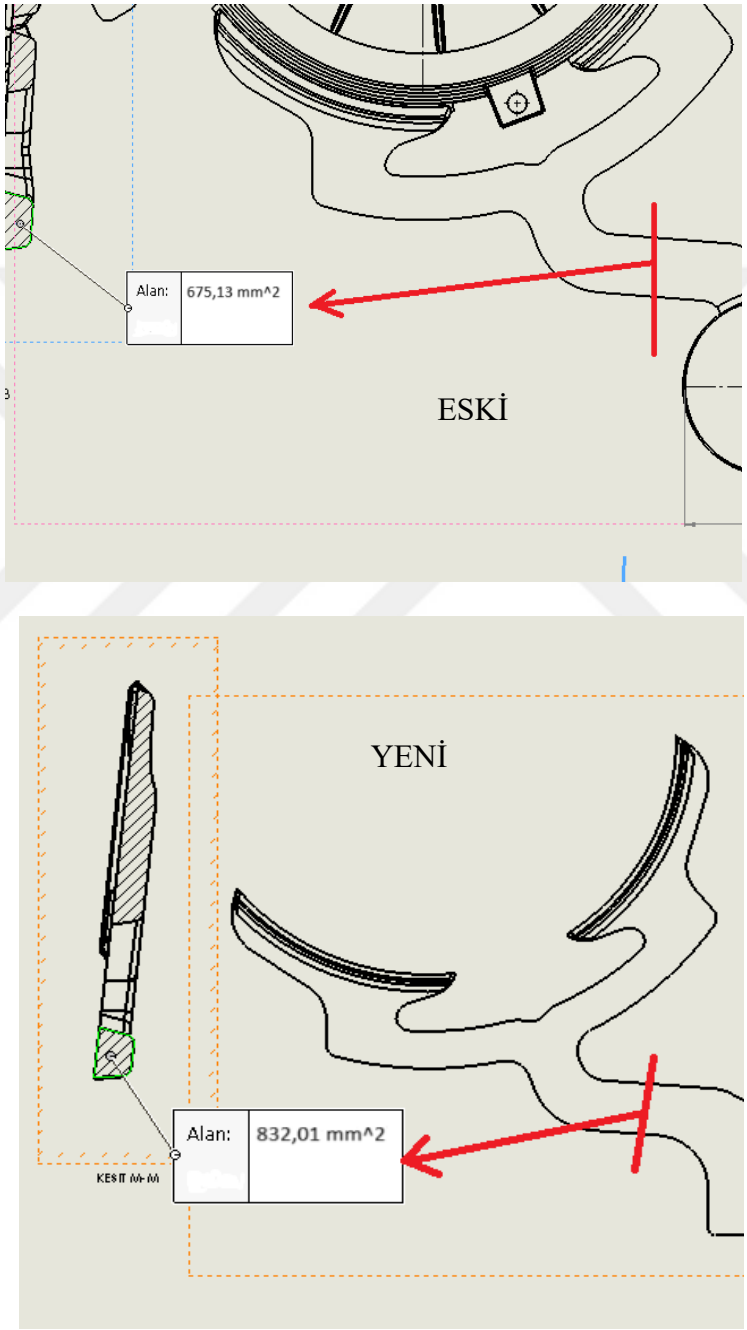


Şekil 6.7 Eski ve yeni yoluk kolu kesit alanı

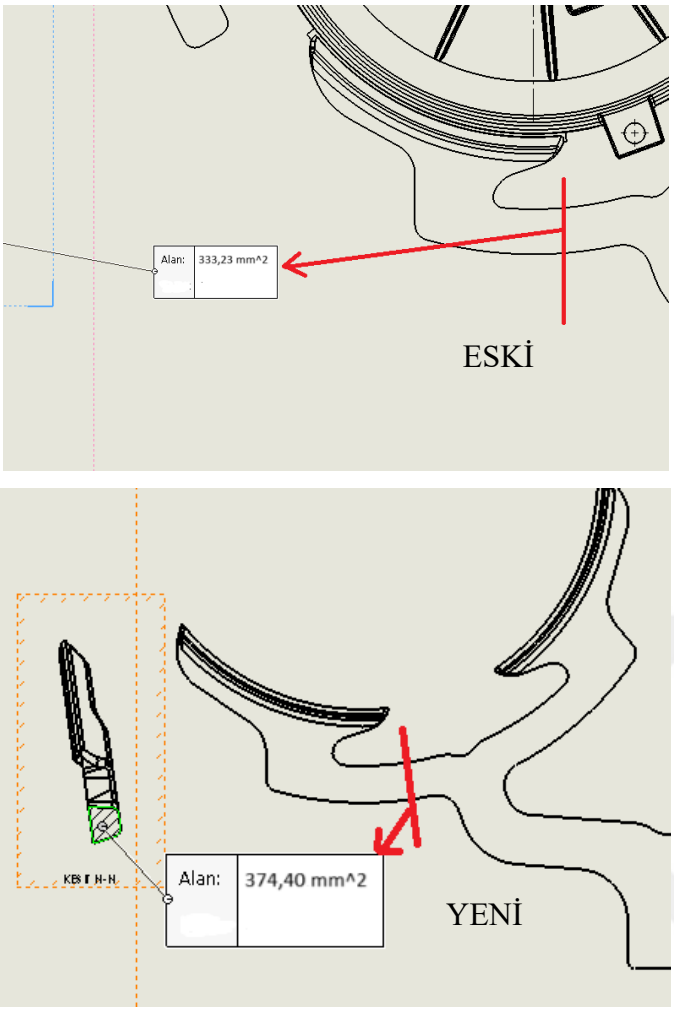


Şekil 6.8 Eski-yeni yoluk kesit alanları (topuz kısmından başlayan nokta)

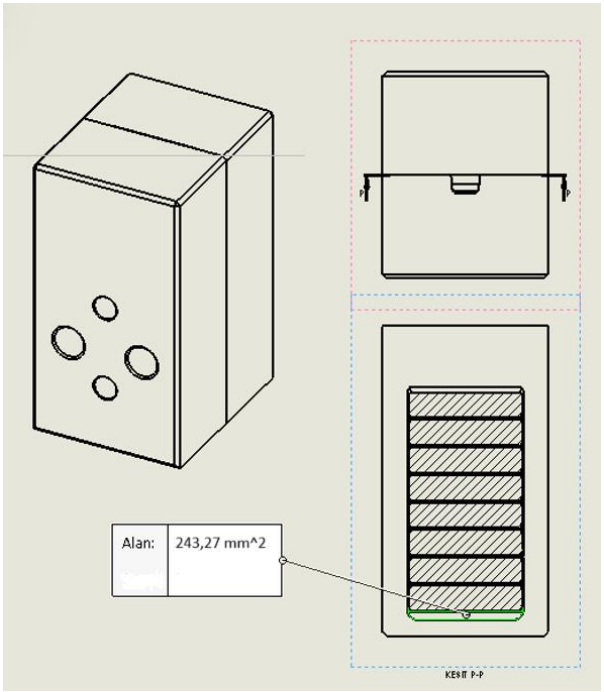
Şekil 6.9'da verilen yolluk kolu kesit alanı her dönüş ve yol ayrımında Şekil 6.8'deki kesit alanı ayrılan kol sayısına bölünüp basınç kaybı olmamaası için %10 daraltılarak tasarlanmıştır. Örneğin Şekil 6.8 da yeni yolukta kesit alanı 1848,9 mm²dir. Yolluk 2 parçaya ayrılmıştır. O halde 1848,9/2=924,45 mm² dir. %10 kesit daralması için ise 924,45×0,9 = 832,01 mm² dir. Bu yöntem her dönüş ve yol ayrımında uygulanmıştır. (Şekil 6.9 ve Şekil 6.10)



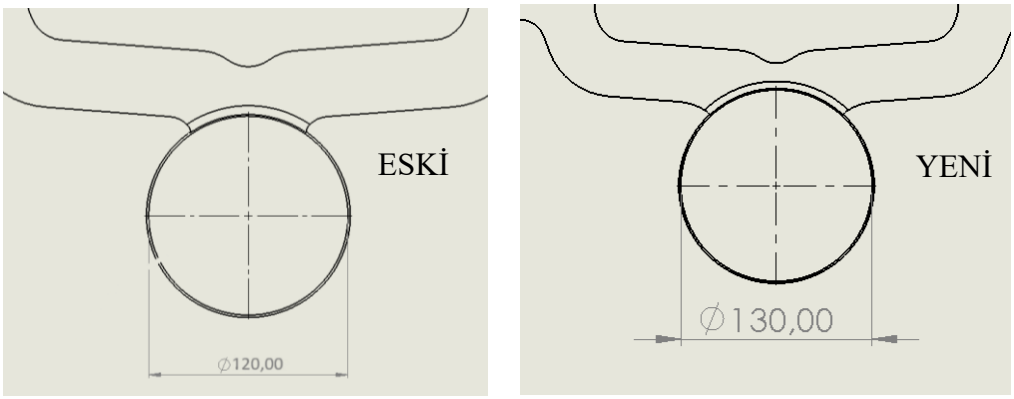
Şekil 6.9 Eski ve yeni yoluk dönüş kesit alanı 1



Şekil 6.10 Eski ve yeni yoluk dönüş kesit alanı 2



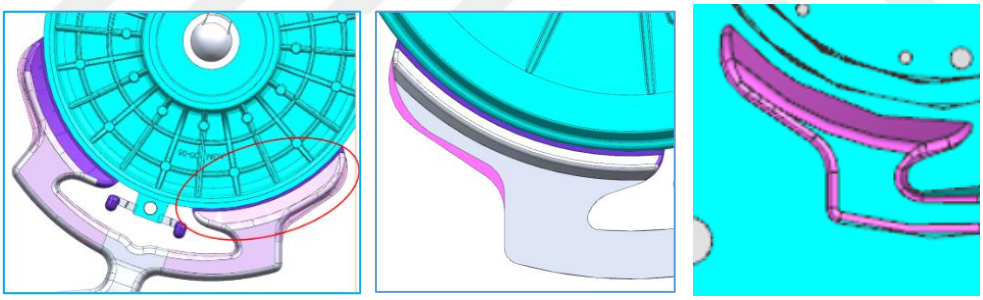
Şekil 6.11 Chillvent kesit alanları



Şekil 6.12 Topuz kısmı eski ve yeni ölçüler

6.2.2 Yolluk ve hava cepleri tasarımının İncelenmesi

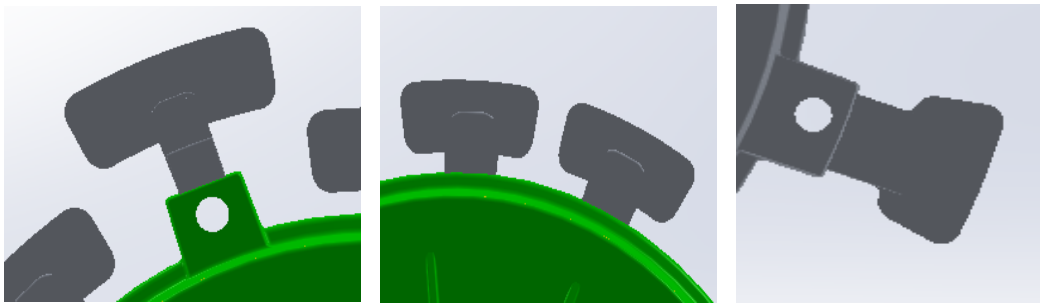
Ergitilmiş alüminyumun, kalıp girişinden başlayarak iş parçasının tüm kesitlerine ulaşmasını ve düzgün şekilde dağılmasını sağlayan; döküm kalitesini doğrudan etkileyen ve döküm tamamlandıktan sonra parçadan ayrılan kısım, yolluk olarak adlandırılır. İlk olarak yukarıdaki tasarımsal hesaplamalardan başka parça yolluk girişlerinde aşağıda belirtilen alanın keskin köşesinden kaçınmak ve akışı rahatlatmak için yarıçapı 5 mm olacak şekilde bir radyus verilmiştir. Tüm bu değerler döküm simülasyonunda deneysel olarak incelenecektir.



Şekil 6.13 Yollukta revizyonun gerçekleştirildiği bölge

Taşma cepleri kalıp yüzeyinde fazla alan kapladığı ve havalandırma kanalları ve chilvent için gerekli alan olmadığı için küçültülmesi düşünülmüş ve bu sayede hava kanalları ve chilvent eklenebileceği öngörülmüştür. Önceki tasarımda faklı boyutlarda hava cepleri kullanılırken yeni tasarımda ise tüm hava cepleri aynı ölçüde olacak şekilde küçültülmüştür. Hava cep giriş kesitleri 0.5 mm'den 1,5'mm ye çıkarılmıştır. Ayrıca tüm hava cepleri 4 mm derinliğinde ve 6 mm genişliğinde havalandırma kanalları ile chilvente bağlanmıştır, bu işlem dolum süresini az bir miktar uzatsada, hava tahliyesi arttırılarak optimum dolum sonucu sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca eksik görülen yerlere alana uygun olarak ekstra hava cepleri

eklenmiştir. Yapılan tüm bu değişiklikler, simülasyon ortamında analiz edilerek elde edilen döküm sonuçları detaylı biçimde değerlendirilecektir.



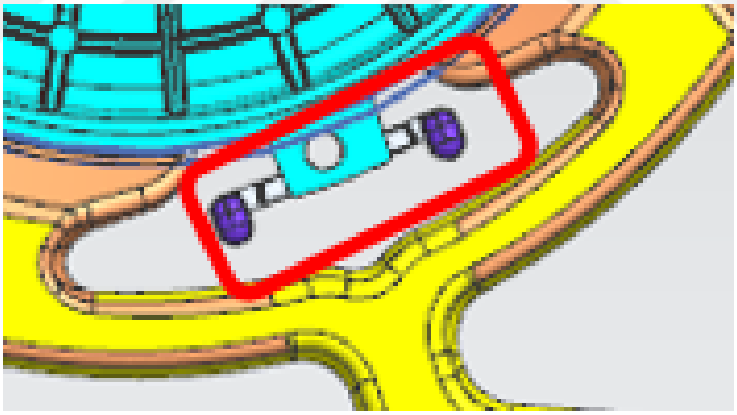
Eski Eski Yeni

Kütle = 32.17 gram
Hacim = 32166.80 milimetre küp
Yüzey alanı = 8680.05 milimetrekare

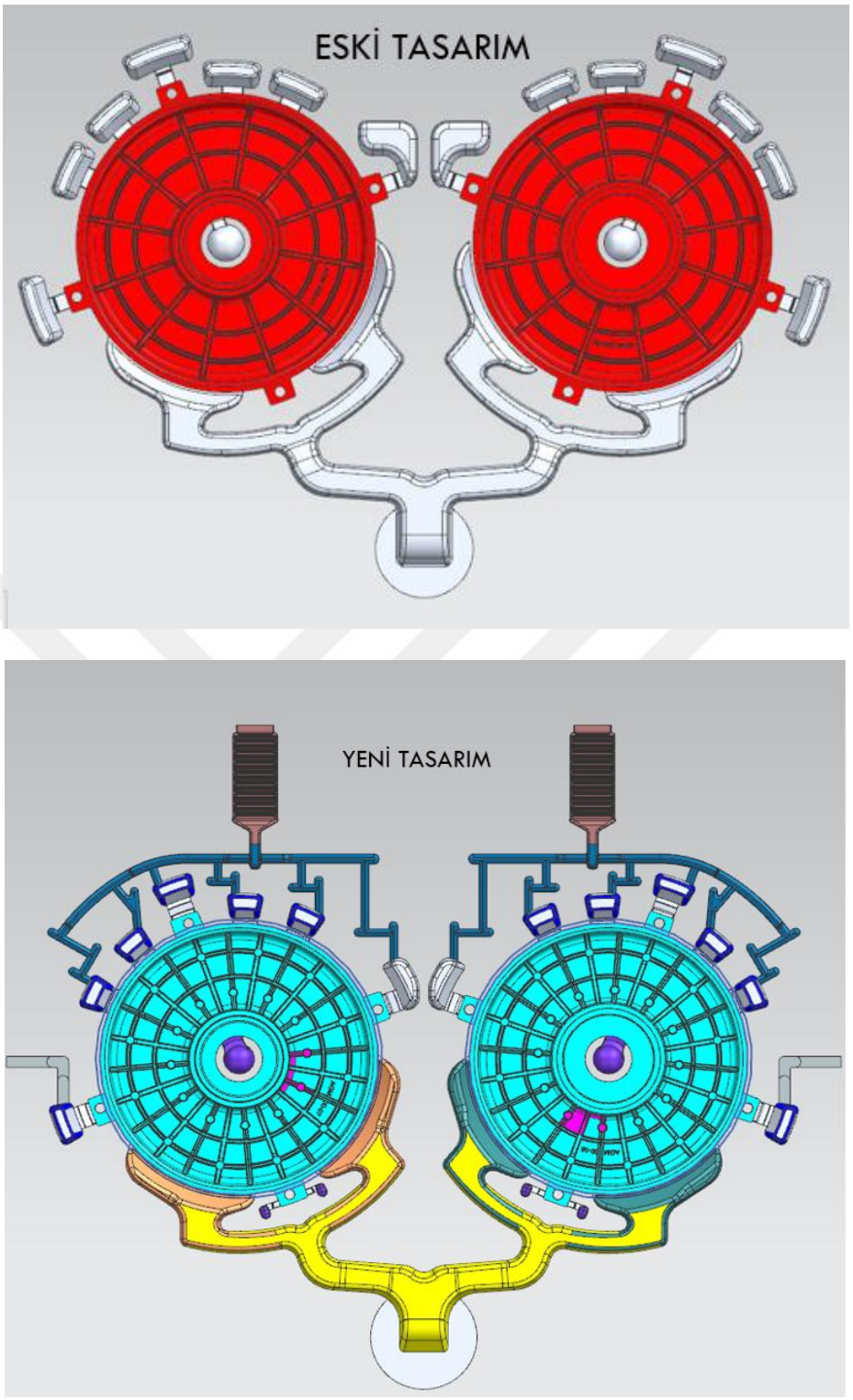
Kütle = 25.41 gram
Hacim = 25408.78 milimetre küp
Yüzey alanı = 6473.01 milimetrekare

Kütle = 20.57 gram
Hacim = 20572.29 milimetre küp
Yüzey alanı = 5713.12 milimetrekare

Şekil 6.14 Önceki ve yeni hava cepleri tasarımları



Şekil 6.15 Yeni eklenen hava cepleri



Şekil 6.16 Eski ve yeni tasarım salkım

6.2.3 Döküm Simülasyonlarının İncelenmesi

Tüm simülasyon çalışmaları Magmasoft yazılım program kullanılarak yapılmıştır. MagmaSoft, özellikle döküm ve metal işleme uygulamaları için geliştirilmiş bir simülasyon yazılımıdır. Bu yazılım, dökümhane ve metalurji sektörlerinde malzeme akışı, ısı transferi ve katılaşma gibi süreçlerin modellenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır. MagmaSoft programında deney süreci için önceki ve yeni proses verileri aşağıdaki Tablo 6.2'de verilmiştir.

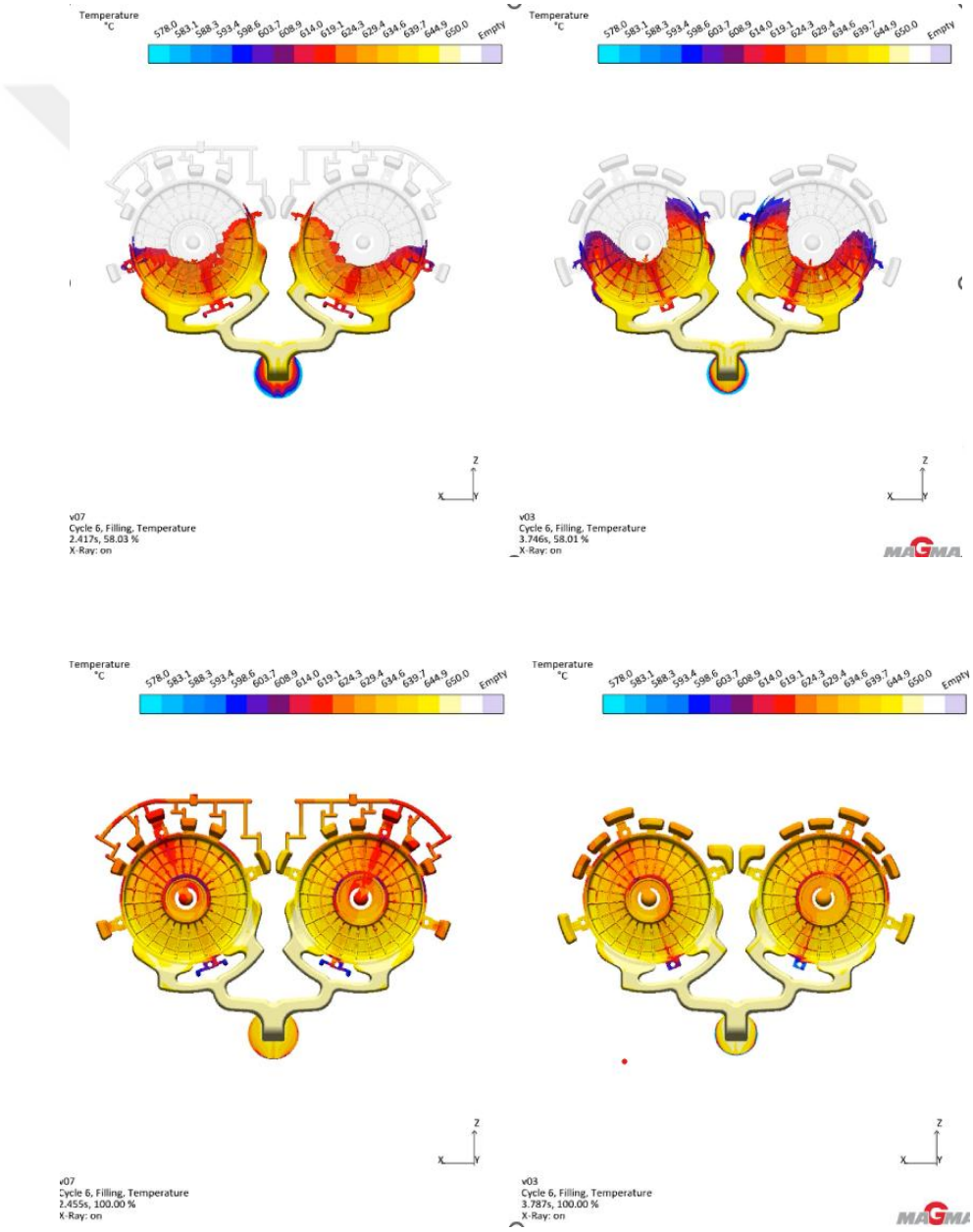
Tablo 6.2 Simülasyon parametre değerleri

PARAMETRELER	**ÖNCEKİ TASARIM**	**YENİ TASARIM**
Malzeme	AlSi9Cu3	AlSi9Cu3
Tezgah Basıncı	1200 Ton	1800 Ton
Tezgah Hidrolik Silindir Çapı	145 mm	180 mm
Piston Çapı	120 mm	130 mm
Ergitme Ocağı Malzeme Sıcaklığı	650 °C	650 °C
Topuktaki Maden Sıcaklığı	630 °C	630 °C
Kalıp Sıcaklığı	200 °C	200 °C
Salkım Hacmi	3461 cm^3	3907 cm^3
Parça Cidar Kalınlığı	3,5-4 mm	3,5-4 mm
Projeksiyon Alanı	2653 cm^2	2780 cm^2
Hazne Boyu	585 mm	690 mm
Hazne Doluluk Oranı	52%	43%
Yolluk Giriş Hızı	25 m/s	28 m/s
1.Faz Hızı	0,2 m/s	0,4 m/s
2.Faz Hızı	4 m/s	3,5 m/s
2.Faza Geçiş Mesafesi	410 mm	480 mm
Çevrim Süresi	50 ms	60 ms
Kilitleme Kuvveti	11760 kN	17789 kN
Kalıp İçi Basınç	475 bar	580 bar

Eski tasarım prosesinde tezgah kapama kuvveti yetersiz gelmekte ve kalıbı açmaya zorlamaktadır. Ayrıca çok fazla çapak oluşumuna neden olduğundan yeni bir proses parametrelerine ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca yeni kalıpta kalıp içi basıncın yanı sıra tezgahta manometrede okunan hidrolik basınç değeri ise 303 bar'dır. Bu değer 1800 tonluk tezgah için güvenli bir çalışma değeridir, bu tezgah için güvenli hidrolik basınç değeri 200-340 bar'dır. Tüm simülasyon boyunca Önceki ve sonraki tasarım süreçleri yanyana konularak kıyaslama yapılmıştır. Simülasyonda V03 Eski tasarımı V11/V07 yeni tasarımı temsil etmektedir.

6.2.3.1 Simülasyonda Sıcaklık Analizi

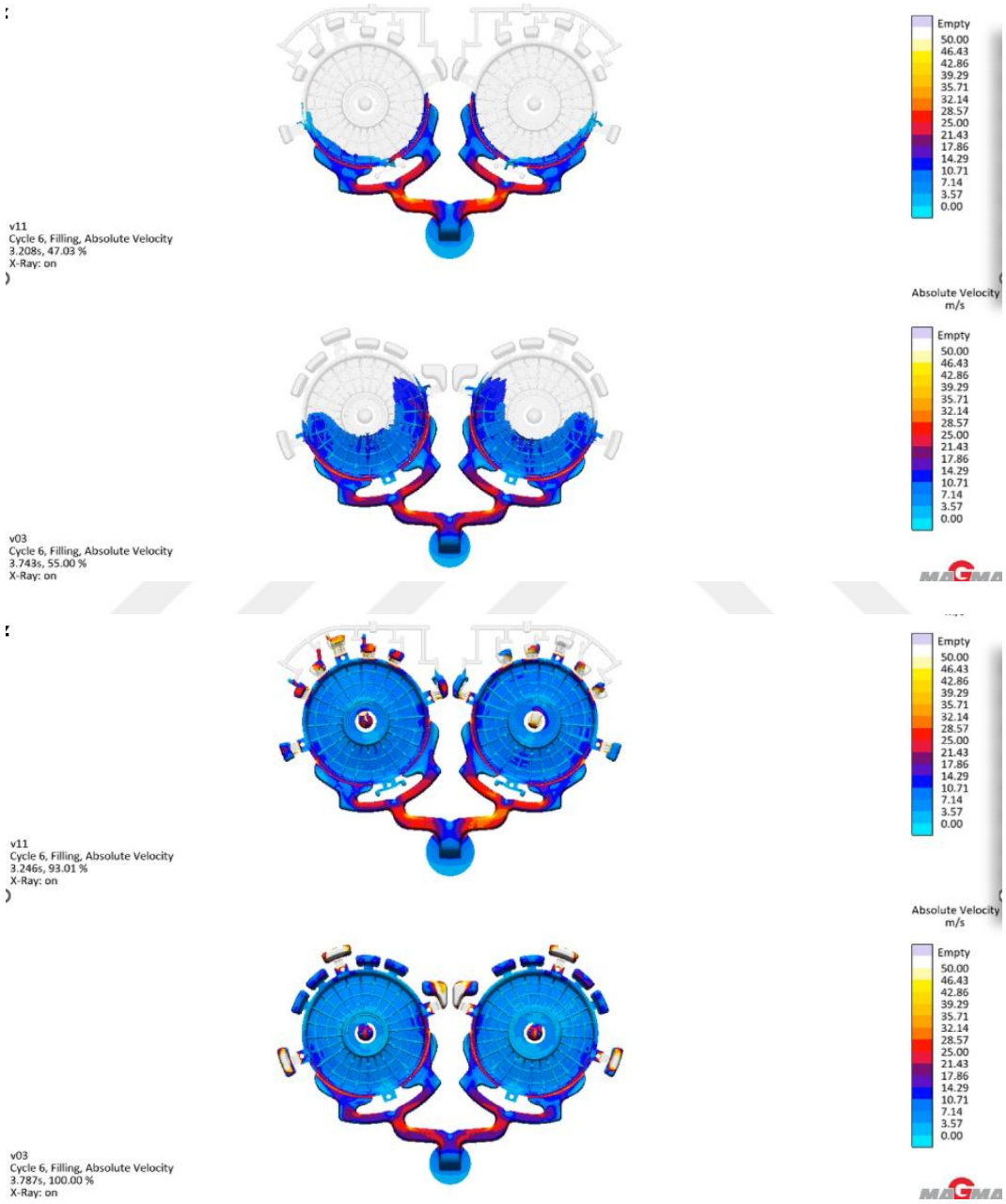
Aşağıda Yeni ve önceki tasarımın sonuçları Şekil 6.17'de görülmektedir. Sümülasyonun 5. saniyesindeki görüntü ve dökümün tamamlandığı görüntü aşağıda verilmiştir. 5.Saniyesinde eski kalıbın döküm tamamlanmadan maviye yani katılaşmaya başladığı görülmektedir. Bu durum istenmeyen bir durum olup döküm boşlukları, porozite oluşumu ve metalin ilerleyişini zorlaştırmak gibi problemlere neden olmaktadır. Yeni tasarımda ise durum gayet normaldir. Scala döküm sıcaklığı ile katılaşmanın başladığı sıcaklık olan liquidus sıcaklık arasına sabitlenmiştir.



Şekil 6.17 Simülasyonda sıcaklık analizi

6.2.3.2 Simülasyonda Hız Analizi

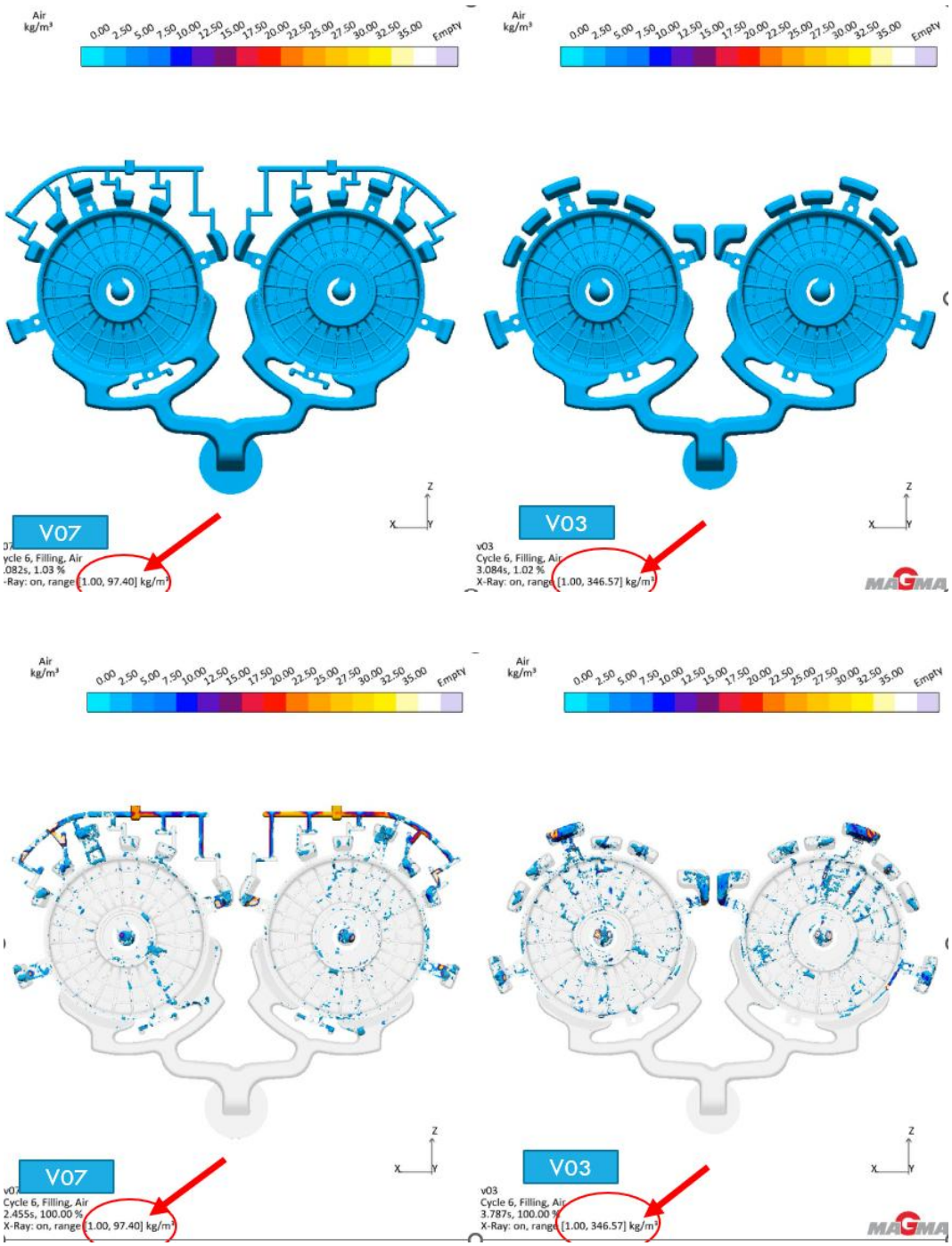
Switch (2. faza geçiş) mesafesi ayarlanarak değerlendirilmiş, bu parça için yolluk giriş hızı 28 m/s, yolluk hızı ise 25 m/s'dir. Yeni tasarımda türbülans oluşmadan düzgün bir hız dağılımı gözlemlenmiştir. Aşağıda Şekil 6.18'de belirli anlarda ve dolum sonunda simülasyon görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 6.18 Simülasyonda hız analizi

6.2.3.3 Simülasyonda Hava Tahliye Analizi

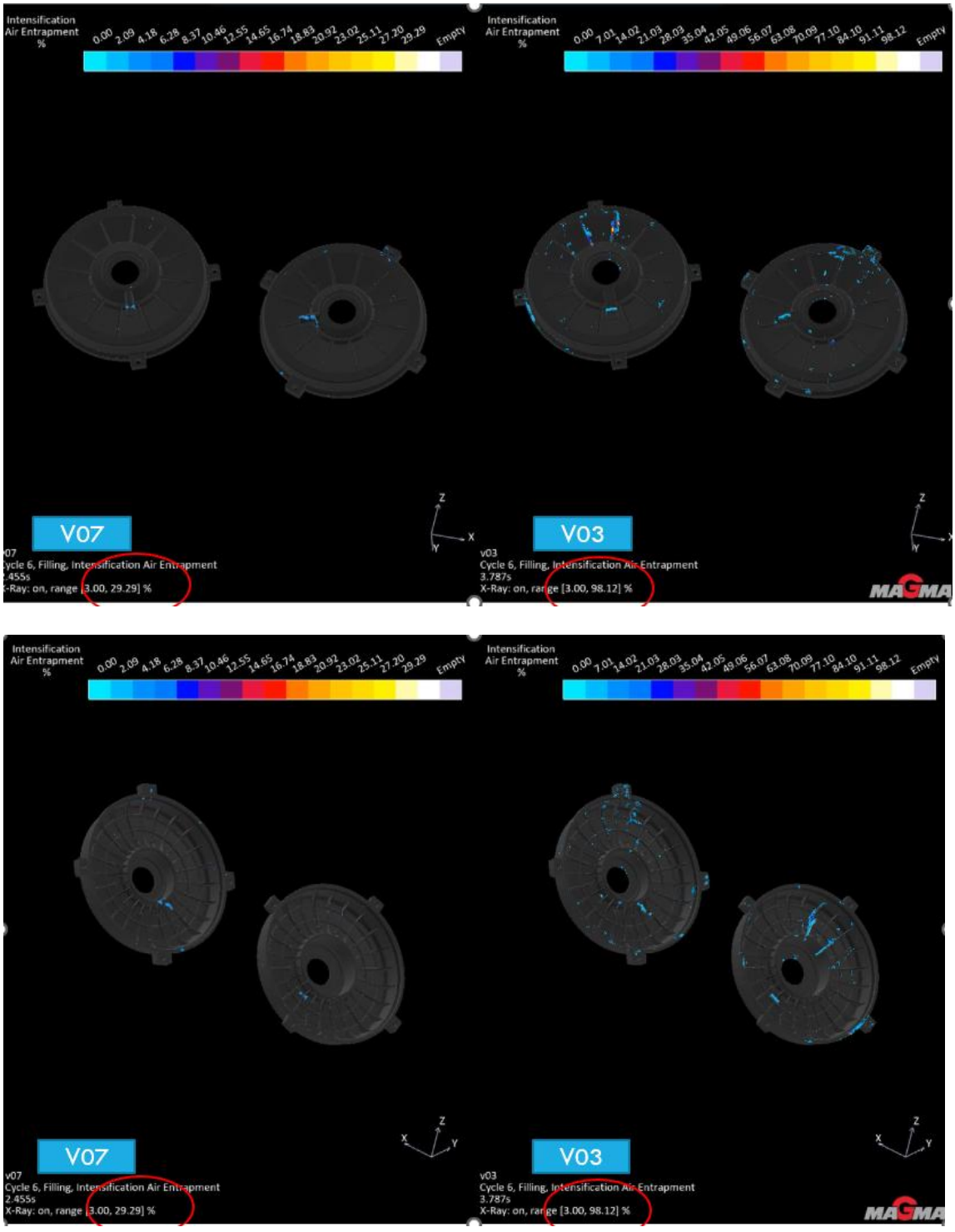
Aşağıda Şekil 6.19'da dolum sonunda parça içerisinde kalması muhtemel havanın kütlesel(kg/m³) olarak sonucu görülmektedir. Scalaya bakıldığı zaman sıkışan hava miktarinin maksimum seviyesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu yeni tasarımda hava tahliyesinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştiği anlamına gelmektedir.



Şekil 6.19 Simülasyonda hava tahliye analizi

6.2.3.4 Simülasyonda Oluşması Muhtemel Boşlukların Analizi

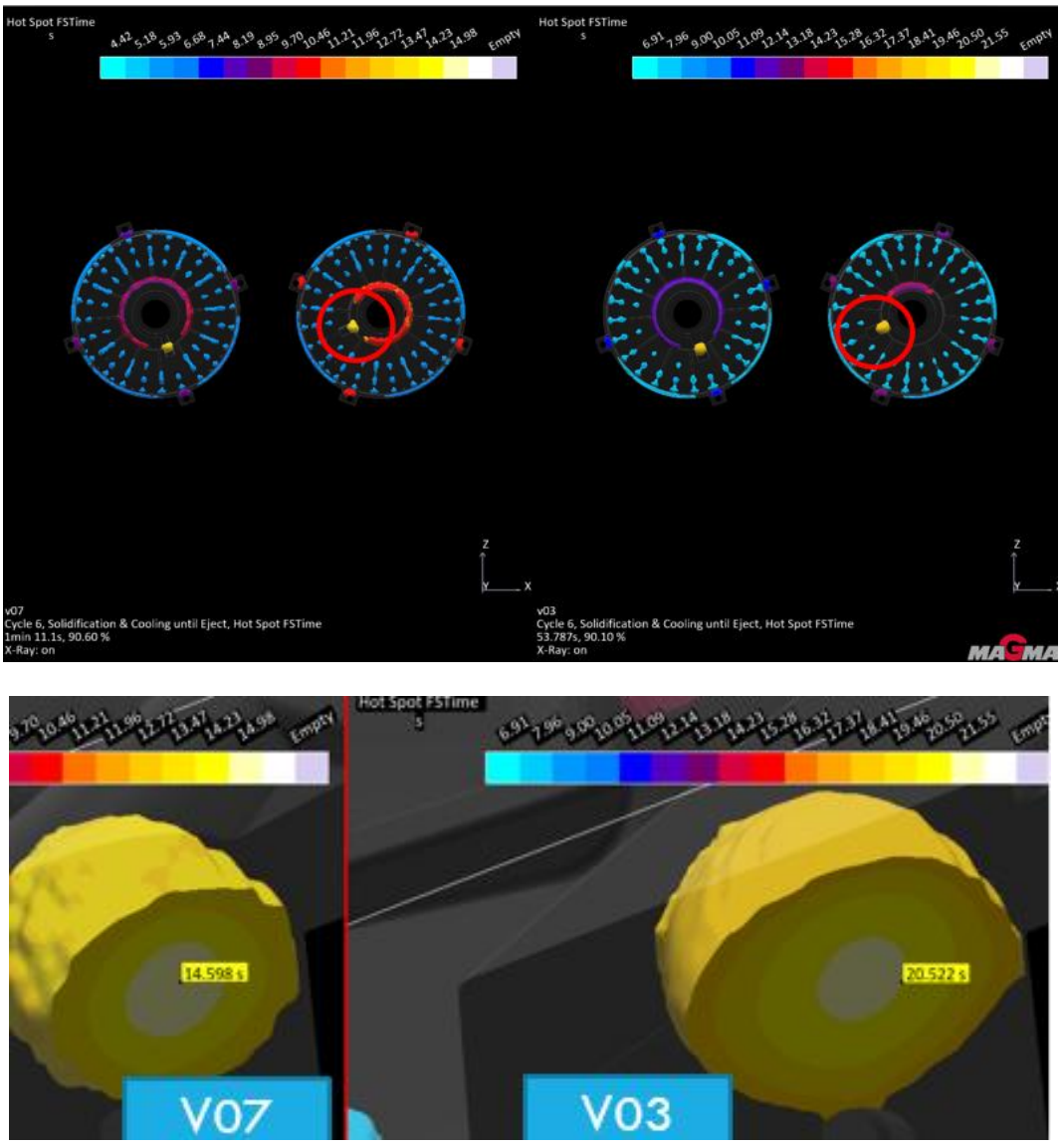
Havanın tahliye analizinden sonra farklı açılarda alınan görüntüler aşağıda Şekil 6.20'de paylaşılmıştır. 3.faz basıncından sonra (en alttaki görsel) özellikle göbek kısmına yakın kısımlarda gaz boşlukları (porozite) gözlemlenmiştir.



Şekil 6.20 Simülasyonda oluşması muhtemel boşlukların analizi

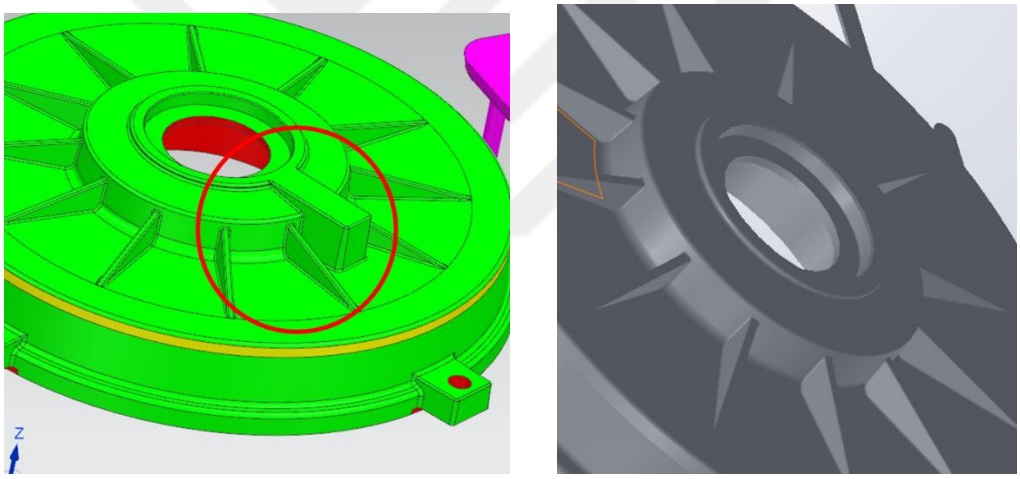
6.2.3.5 Simülasyonda Katılaşma Durumu

Dolumun tamamlamıp katılaşma başladığı esnada özellikle göbek bölgesinde parça içerisinde izole sıcak kalan noktalar (hot spot) tespit edilmiştir. Bu sıcak noktalar Parça içerinde sonradan katılaşırken çekinti porozitesi meydana getirmektedir. Önceki ve yeni tasarımda da gözlemlenen bu durum kalıbın yeterli soğutma sağlamadığını ortaya koyar niteliktedir. Soğutma sistemi tasarımları revize edilmiş özellikle göbek kısmına soğutma kanalı revize edilerek sorunun ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

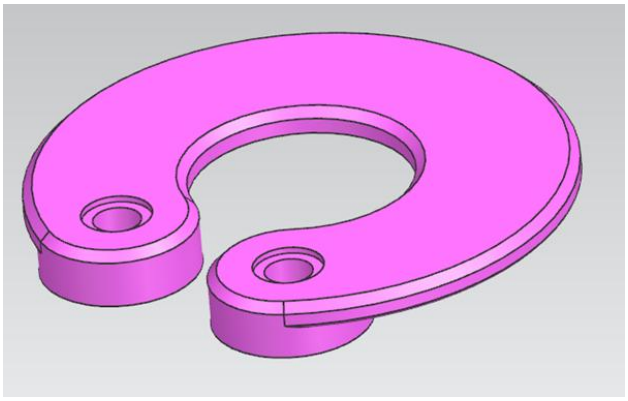


Şekil 6.21 Hot spot bölgeler (Sıcak bölgeler)

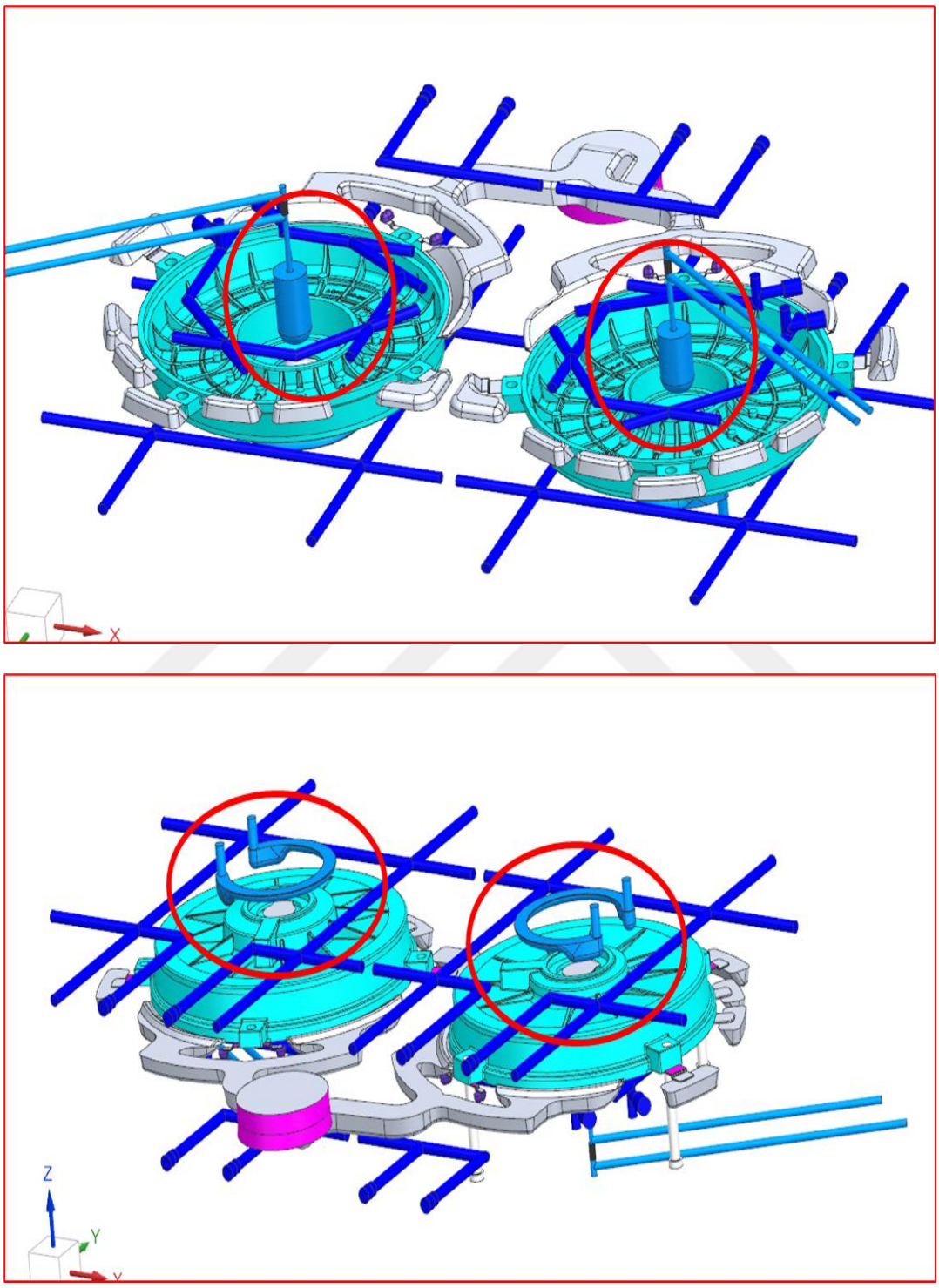
İzole sıcak kalan noktalar (Hot spot) bölgesi oluşmasının iki nedeni olduğu düşünülmektedir. İlk neden, parça göbeğinde yer alan ve PT100 olarak adlandırılan rulman sıcaklık sensörünün yerleştirileceği yuva olabilir. Bu sensör yuvası, ilgili bölgede cidar kalınlığını ve malzeme yoğunluğunu artırarak yapısal farklılıklara yol açmaktadır. İkinici neden ise soğutmanın yetersiz olmasından kaynaklı olabilir. Tüm bu nedenler doğrultusunda soğutma kanalı yeniden revize edilmiş, alüminyum kapaklarda PT100 bölgesi ise tasarımdan kaldırılarak homojen bir tasarım elde edilmiştir, müşteri PT100 talep ettiği takdirde ise pik döküm kapak üzerinden ilerlenilmesi kararlaştırılmıştır. Bu sayede daha homojen bir tasarım elde edilmiştir. Soğutma kanalında kullanılan sıvı metaryaller ve sıcaklıkları ise, yağ için 120 °C, su için ise 20 °C'dir. Yağ kalıbın çekirdek kısmında, su ise kovan ve lokmalarda kullanılmaktadır.



Şekil 6.22 Parçanın tasarımında yapılan iyileştirmeler

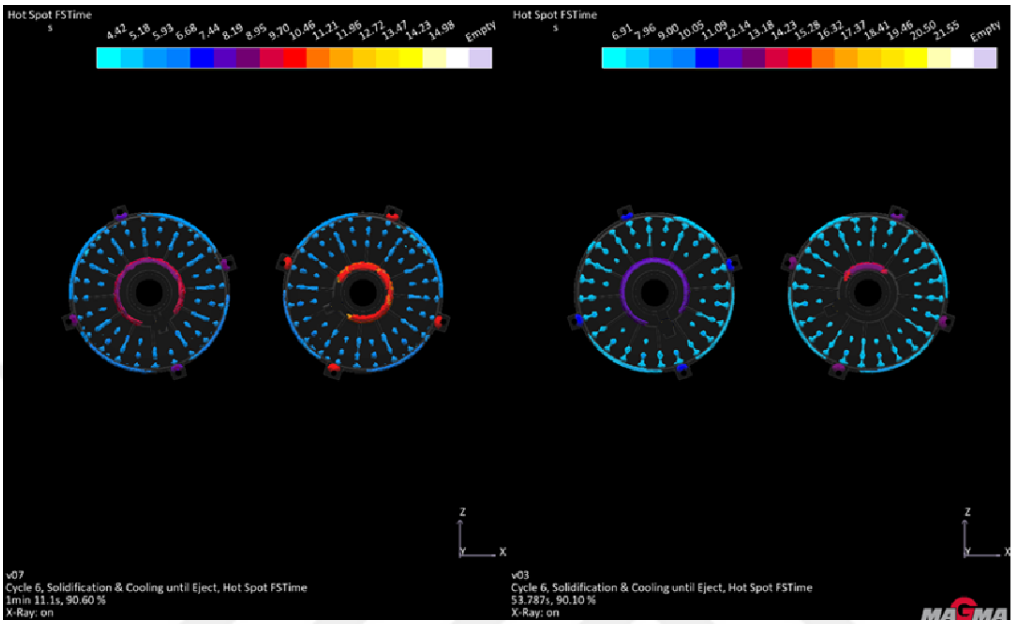


Şekil 6.23 Göbek bölgesi için tasarlanılan soğutma kanalı



Şekil 6.24 Hareketli ve Sabit Kalıp yarımları için tasarlanılan soğutma Kanalları

PT100 bölgesi ve soğutma kanalı revizyonundan sonrası hot spot bölgesi tekrar simülasyonda incelenmiş ve herhangi bir olumsuz durumla karşılaşılmamıştır. (Şekil 6.25)



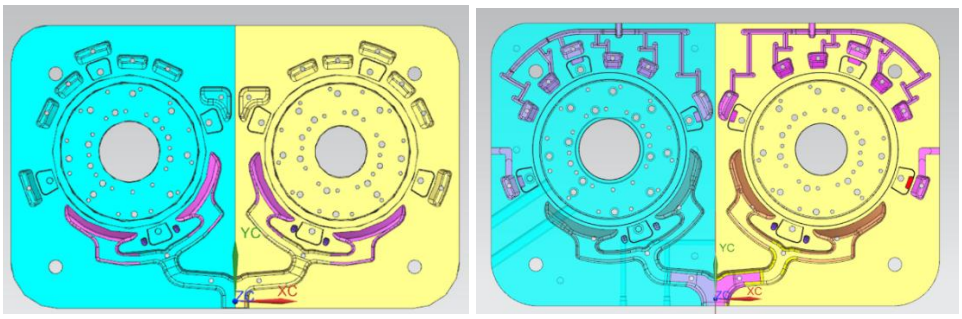
Şekil 6.25 İyileştirmeler sonrası hot spot (Sıcak bölgeler) analizi

6.2.4 Revizyonların Gerçekleştirilmesi ve Döküm

Sonuç olarak tüm iyileştirme ve yeni proses parametreleri sümülasyonda test edilmiş ve herhangi bir problem görülmemiştir. Tüm bu revizyonlar uygulamaya dökülerek gerçek döküm incelenecektir.

6.2.4.1 Hava Ceplerinin Küçültülmesi

Hava cepleri ve PT100 boşluğu uygun kaynak (TIG kaynağı), kalıp ve prosese uygun bir metal ile doldurulmuş, revize edilen cepler ve yeni hava kanalları CNC tezgahında tekrar açılmıştır.



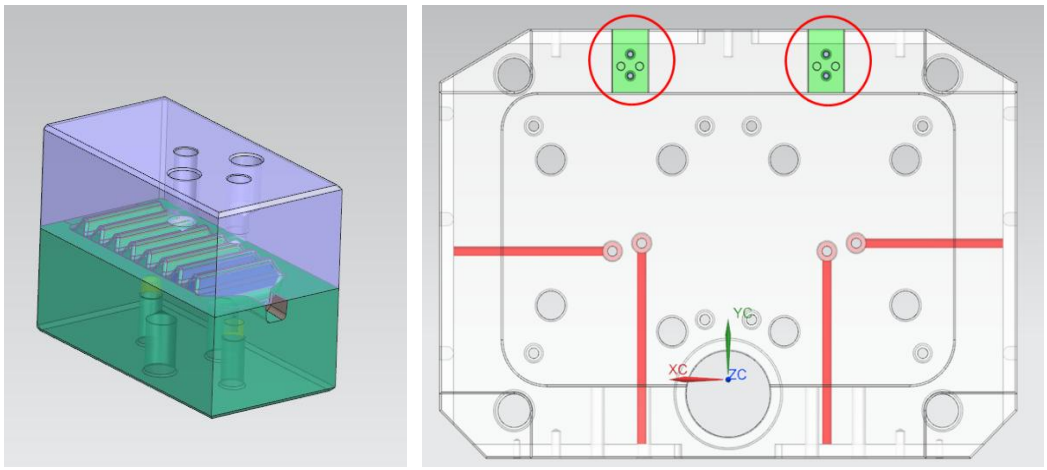
Şekil 6.26 Kalıpta gerçekleştirilen revizyon



Şekil 6.27 Yeni hava cebi ve tahliye kanalı

6.2.4.2 Chilvent Eklenmesi

Chilvent, genellikle dökümdeki metalin düzgün bir şekilde kalıba yerleşmesi ve hava kanallarının bağlanarak havanın tahliyesi için kullanılan bir yapıdır. Bu parça, metalin kalıp içinde düzgün bir şekilde yayılmasına ve boşlukların oluşmamasına yardımcı olduğu gibi, metalin akışının daha kontrollü olmasını sağlamak ve olası hava kabarcıklarını veya boşlukları (dökümdeki kusurları) önlemek amacıyla kullanılır. Kalıba uygun ölçülerde her bir parça için birer adet olmak üzere toplamda iki adet chilvent tasarlanmış, kalıbın sabit ve hareketli kısmında yuvaları açılmıştır.



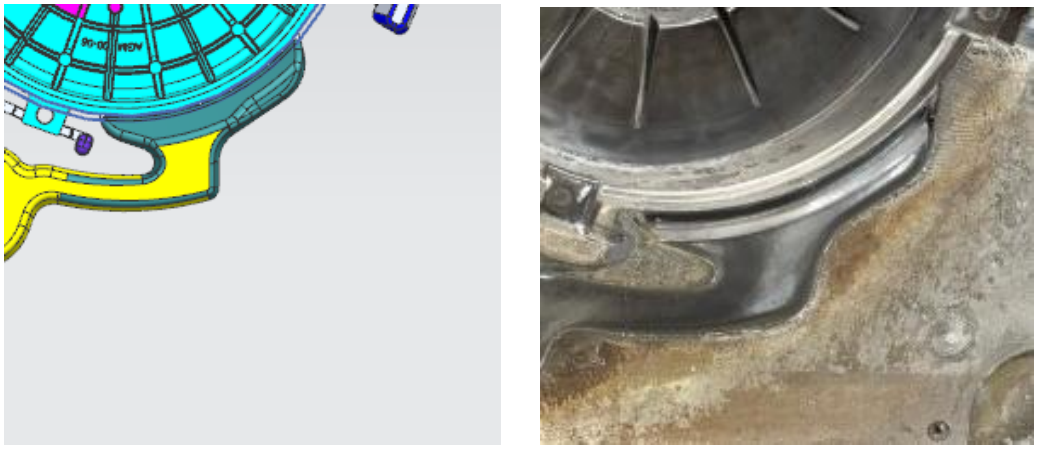
Şekil 6.28 Tasarlanılan chilvent ve yerleştirme bölgesi



Şekil 6.29 Eklenen chilventler

6.2.4.3 Yolluk revizyonu

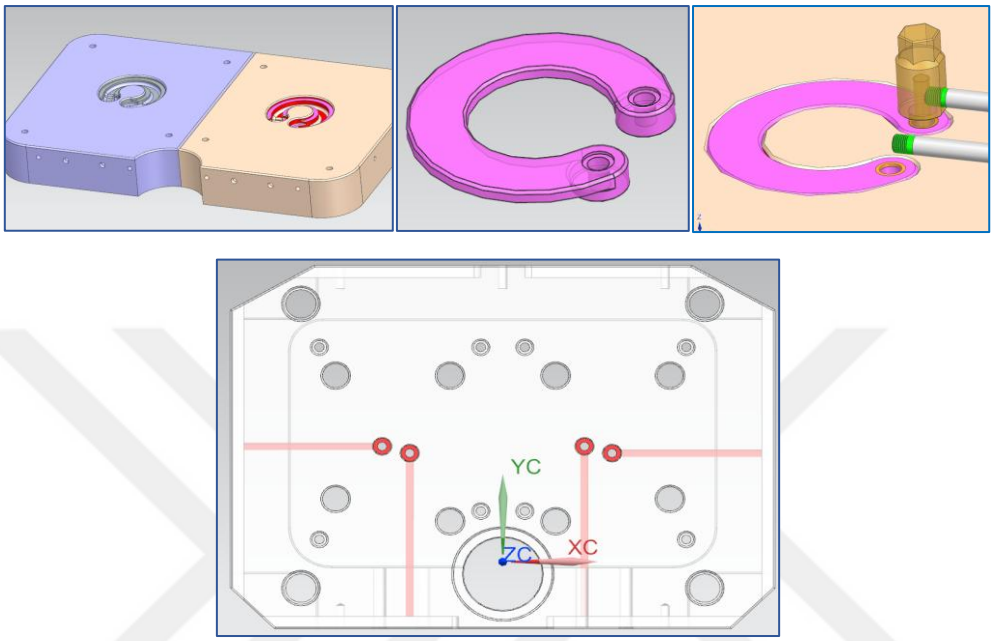
Metal akışının türbülansa uğramadan rahat bir şekilde gerçekleşmesi ve metalin kalıba uygun bir şekilde dolması için yolluk girişleri freze tezgahı ile hesaplamalara uygun bir şekilde genişletilmiş ve Keskin köşelere 5 mm yarı çaplı radyüsler eklenmiştir. Aşağıda teknik resim ve uygulamasının görselleri paylaşılmıştır.



Şekil 6.30 Yolluk girişleri

6.2.4.4 Soğutma Kanallarının Uygulanması

Göbek bölgesinde soğutma kanalları genişletilmiş uygulamaya alınmıştır. Boruların geçeceği alan kalıp üzerinde belirlenmiş ve revizyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.31 Göbek bölgesi soğutma kanalı

Sonuç olarak tüm çalışmaları uygulamaya dökülmüş ve tüm revizyonlar gerçekleştirilmiştir, kalıbın hareeketli ve sabit kısmının son hali aşaıdaki gibi olmuştur.



Şekil 6.32 Döküm kalıbı Son hali

6.3 Kalite Kontrol

Kalıba yönelik bütün optimizasyonlar gerçekleştirildikten sonra, ilgili kalıpta döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. İlgili döküm işlemine ait salkım görüntüsü aşağıda Şekil 6.33'deki gibidir.



Şekil 6.33 Yeni kalıp döküm işlemi salkımı

6.3.1 Görsel Kontroller

Yapılan döküm işleminde yolluk ve hava cepleri trimlendikten sonra ham haldeki kapak göbek bölgesi CNC torna tezgahlarında işlenmiştir. Yapılan kontrollerde özellikle göbek çevresinde sıklıkla karşılaşılan çekinti porozitesi gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.34 Talaşlı işlem öncesi ve sonrası kapağın göbek bölgesi

6.3.2 Spektral Analiz (Optik Emisyon Spektrometre)

Spektral analiz, malzemelerin kimyasal bileşimini ışık yoluyla belirlemeye yarayan bir yöntemdir. Analizlerde sıkça tercih edilen cihazlardan biri Optik Emisyon Spektrometresi (OES) olup, bu cihaz yüksek sıcaklıkta uyarılan numuneden yayılan ışık spektrumunu inceleyerek içindeki elementlerin türünü ve miktarını belirler. Bu yöntem, özellikle metalürji ve endüstriyel üretim alanlarında malzeme kalitesini kontrol etmek ve bileşimi analiz etmek amacıyla kullanılır. Çalışmada analiz edilen malzeme, AlSi9Cu3 alüminyum alaşımıdır ve gerekli kimyasal bileşim değerleri tablo halinde sunulmuştur. EN AB 46200, Avrupa standartlarına göre bir yüksek basınçlı dökümde yaygın olarak kullanılan alüminyum döküm alaşımıdır. İyi dökülebilirlik, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci sağlar. Isıl işleme uygun olmayan bu alaşım, karmaşık geometrili parçalarda yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet sunar. Tablo 6.3'de elemente bağlı kimyasal kompozisyon değerleri ve olması gereken ortalama aralık yüzde cinsinden verilmiştir. Örneğin Silisyum miktarı ortalama %7,5 ile %9,5 arasında olmalıdır.

Tablo 6.3 Kimyasal kompozisyon değerleri

EN AB-46200 AlSi9Cu3	**%Si**	**%Fe**	**%Cu**	**%Mn**	**%Mg**	**%Ni**	**%Zn**	**%Ti**	**%Pb**	**%Sn**	**Diğer**
	7,50	0,50	2,00	0,15	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	9,50	1,00	3,50	0,65	0,55	0,35	1,20	0,20	0,25	0,15	0,25



Şekil 6.35 Spektral analizde kullanılan numune



Şekil 6.36 Spektral analiz cihazı

Yapılan deneyde elde edilen sonuçlar cihaz tarafından bilgisayar ekranına yansıtılmaktadır. Yapılan incelemede numunenin Tablo 6.3'deki kimyasal kompozisyon değerleri arasında olduğu Tablo 6.4'de gözlemlenmiştir. Bu değerler hammadenin beklenen kalitesini doğrular niteliktedir.

Tablo 6.4 Spektral analiz sonuçları değerleri



Sample Analysis Report

Sample Identity: Al. Alaşımlı - Polat Metal **Analysed:** 2/6/2025 13:54 6624

Method: ALGLAL **Type Standard:** **Grade:**

Instrument: Thermo Scientific ARL OES Spectrometer

	Al% %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %
Yakma 1	87.00448	7.96811	0.69613	2.32681	0.19615	0.35920	0.02224	0.07370	1.25565
Yakma 2	86.84432	8.00751	0.78877	2.34362	0.21261	0.35202	0.02426	0.07420	1.26515
Yakma 3	86.48698	8.41635	0.76770	2.30275	0.21704	0.36133	0.02688	0.07135	1.26811
Yakma 4	87.09703	7.90247	0.70606	2.28590	0.22020	0.35439	0.02185	0.07006	1.25022
Yakma 5	87.14417	8.03661	0.65394	2.20982	0.19395	0.34395	0.02054	0.06708	1.24390
Minimum	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Ortalama	86.91539	8.06621	0.72252	2.29378	0.20799	0.35418	0.02315	0.07128	1.25661
Maximum	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	Ti %	As %	B %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %	Co %	Ga %
Yakma 1	0.04176	0.00000	0.00292	0.00007	0.00475	0.00040	0.00149	0.00307	0.01144
Yakma 2	0.04061	0.00000	0.00255	0.00007	0.00349	0.00024	0.00128	0.00302	0.01102
Yakma 3	0.03848	0.00000	0.00279	0.00008	0.00267	0.00010	0.00140	0.00313	0.01037
Yakma 4	0.04168	0.00000	0.00287	0.00007	0.00177	0.00002	0.00154	0.00290	0.01120
Yakma 5	0.04166	0.00000	0.00263	0.00007	0.00187	0.00005	0.00128	0.00291	0.01124
Minimum	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Ortalama	0.04084	0.00000	0.00275	0.00007	0.00291	0.00016	0.00140	0.00301	0.01105
Maximum	---	---	---	---	---	---	---	---	---

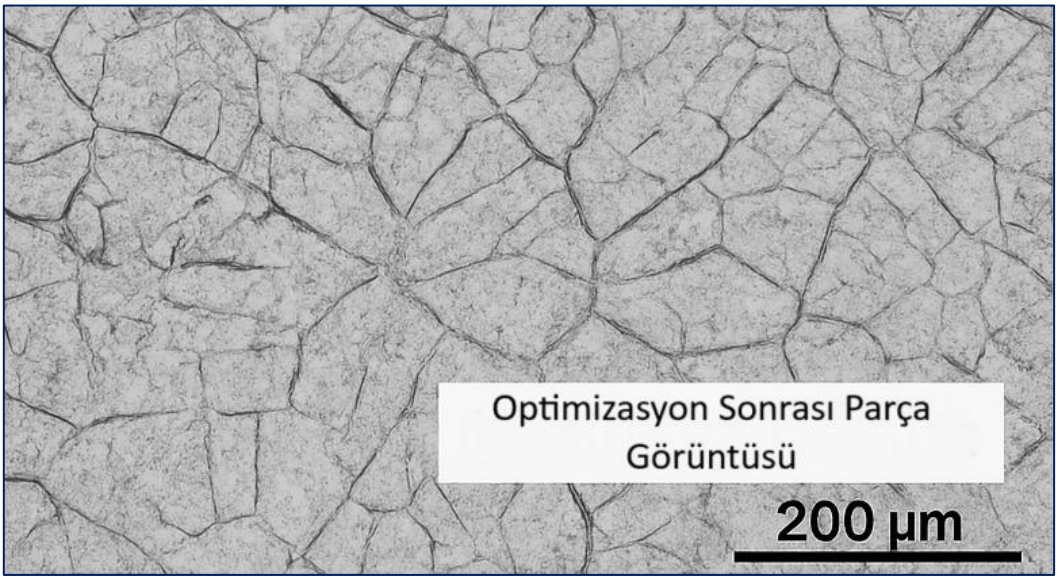
	Hg %	P %	Pb %	Sb %	Sn %	Sr %	V %	Zr %
Yakma 1	0.00437	0.00000	0.07277	0.00000	0.02040	0.00000	0.00969	0.00371
Yakma 2	0.00371	0.00000	0.06835	0.00000	0.01920	0.00000	0.00950	0.00355
Yakma 3	0.00445	0.00000	0.06968	0.00000	0.01995	0.00000	0.00953	0.00334
Yakma 4	0.00415	0.00000	0.07297	0.00000	0.02013	0.00000	0.00867	0.00317
Yakma 5	0.00423	0.00000	0.06817	0.00000	0.01982	0.00000	0.00840	0.00330
Minimum	---	---	---	---	---	---	---	---
Ortalama	0.00418	0.00000	0.07039	0.00000	0.01990	0.00000	0.00916	0.00341
Maximum	---	---	---	---	---	---	---	---

6.3.3 Optik Mikroskop Sonuçları

Revize edilen döküm parçası optik mikroskop altında incelenmeden önce kesilerek küçük numuneler alınmıştır. Mikroskobik incelemesi için numune, önce temizlenip yüzeydeki kirlerden arındırıldı. Parçalar epoksi ile kalıplandı ve vakum altında sertleştirildi. Epoksi, numuneyi sabitleyip düzgün zımparalama yapılabilmesini sağladı. Zımparalama işlemi, 240 grit ile başlayıp sırasıyla 1200 grit'e kadar devam etti. Ardından, numune parlatıldı ve mikroyapı incelemesi için Keller's reaktifi ile aşındırma yapıldı. Hazırlanan numune, ters mikroskop altında uygun objektif ve aydınlatma ile incelendi. Bu çalışmada aşağıda görselleri paylaşılan ters tip endüstrüyel mikroskop kullanıldı. Numunenin mikroskop altındaki görüntüleri aşağıdadır. Görseller 200 µm ölçekte görüntülenmiştir. Optimizasyon sonrası parçanın mikro yapısında herhangi bir yapısal bozukluk gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.37 Hazırlanan numune örneği ve ters tip endüstriyel optik mikroskop



Şekil 6.38 Mikroskop altında görüntüleri

6.3.4 Gaz giderme (Degazing) İşlemi

AlSi9Cu3 alaşımı, yüksek döküm kabiliyeti, iyi mekanik özellikleri ve işlenebilirliği sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu alaşım, ergitme esnasında hidrojen gazını absorbe etmeye yatkındır. Metal banyosunda çözünmüş halde bulunan hidrojen, katılaşma sırasında gaz haline geçerek mikrogözeneklerin oluşmasına ve bu sayede parçada porozite, sızdırmazlık sorunları ve mukavemet kayıplarına yol açmaktadır. Degazing işlemi genellikle inert gaz (argon veya azot) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada, argon gazı ve rotor çubuğu kullanılarak yapılan fiziksel degazing yöntemi tercih edilmiştir. İşlem sırasında ergimiş metal yaklaşık 720–750 °C sıcaklık aralığında tutulurken, inert gaz 5–15 litre/dakika debiyle sıvı metale verilir. Rotor çubuğu, gazın metal banyosuna homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla 300–600 devir/dakika hızla döndürülür ve metal yüzeyinin yaklaşık 50–100 mm altına daldırılır. Bu parametreler, gaz kabarcıklarının metal içerisindeki çözünmüş hidrojenle birleşip yüzeye çıkmasını ve dışarı atılmasını sağlar. Degazing süresi genellikle metal banyosunun hacmine bağlı olarak 8 ila 15 dakika arasında değişmektedir. AlSi9Cu3 alaşımı için uygulanan H-Index testi, ergimiş metaldeki hidrojen miktarını belirleyerek degazing işleminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Testlerde, döküm öncesi hidrojen miktarı 0.26 cc/100g Al olarak ölçülmüş, argon gazı ile 12 dakika süren degazing işlemi sonrasında bu değer 0.08 cc/100g Al seviyesine düşmüştür. Bu sonuç, hidrojen içeriğinde yaklaşık %69 oranında azalma sağlandığını ve degazing işleminin oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

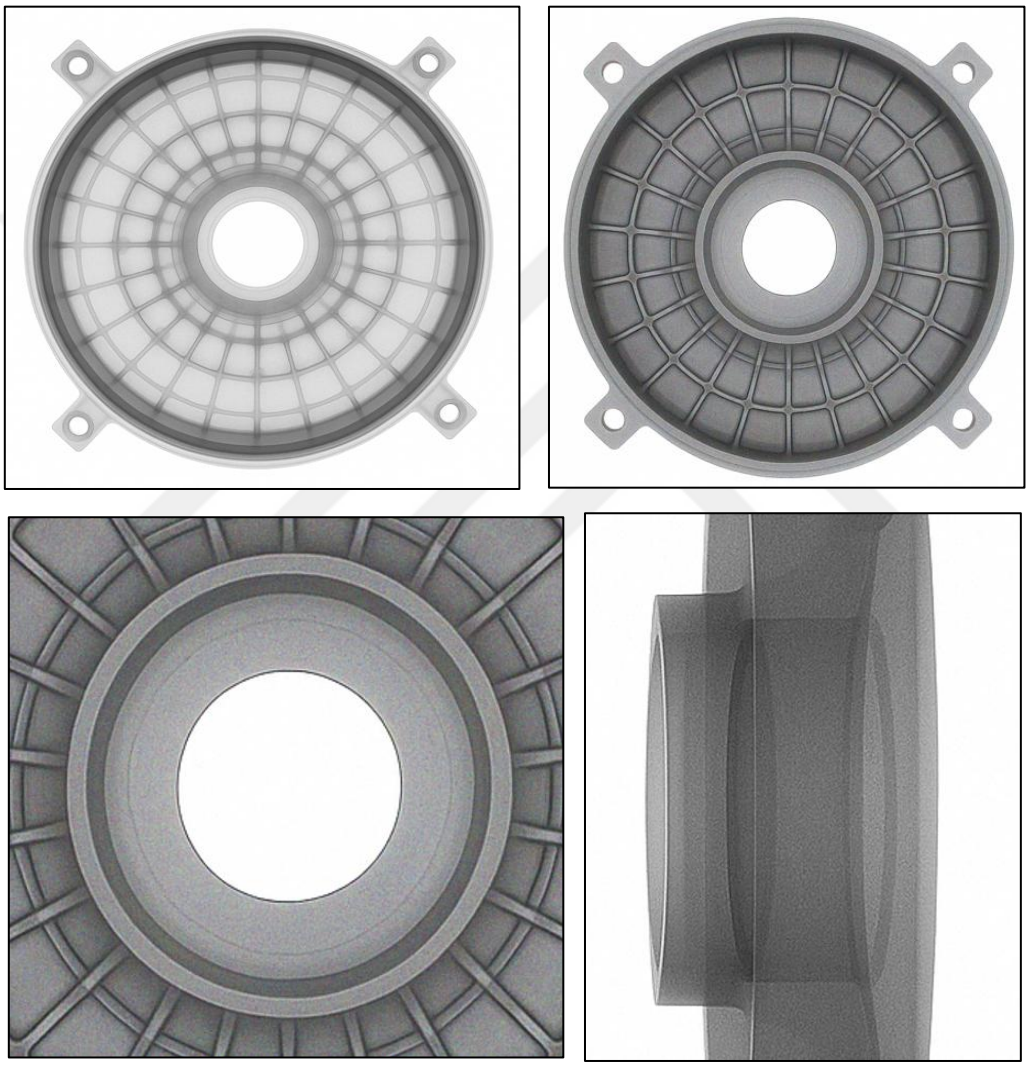
H-Index değerinin 0.10'un altına düşmesi, düşük porozite riski ve daha yüksek parça kalitesi anlamına gelmekte olup, bu durum döküm sonrası mekanik özelliklerin iyileşmesine doğrudan katkı sağlamaktadır.



Şekil 6.39 Gaz giderme (Degazing) işlemi

6.3.5 X-Ray Radyoskopi Analiz Sonuçları

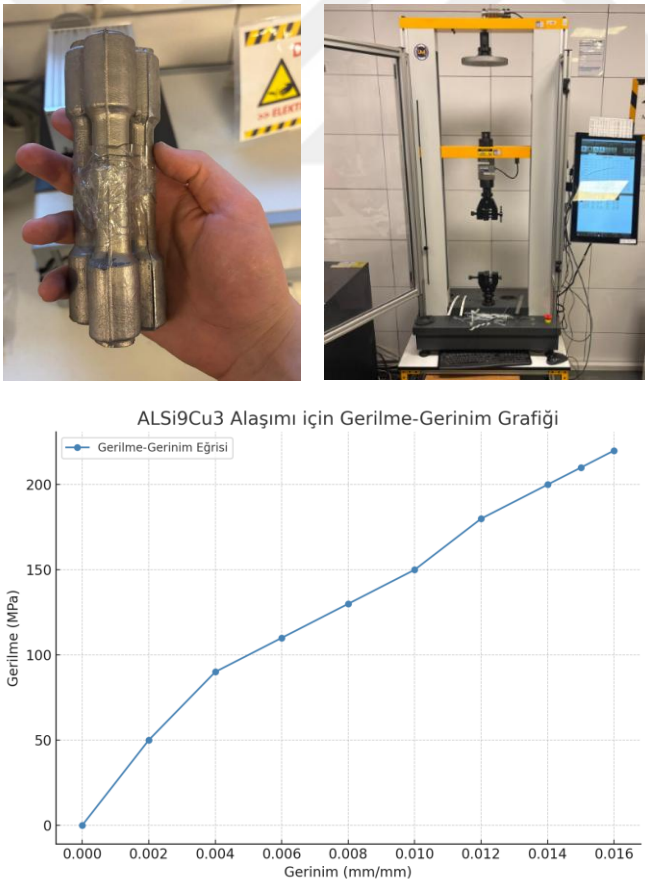
Yüksek basınçlı dökümde üretilen elektrik motoru kapağında yapılan optimizasyon ve iyileştirme çalışmaları sonrasında parçanın çeşitli bölgelerinde Şekil 6.40'da görüldüğü üzere X-ray radyoskopi görüntüleri incelenmiş ve herhangi bir poroziteye rastlanmamıştır. Bu da yapılan iyileştirmelerde döküm kalitesinin arttığı simülasyon verileri paralelinde kanıtlanmıştır.



Şekil 6.40 X-ray radyoskopi görüntüleri

6.3.6 Çekme Deneyi Sonuçları

Bu çalışmada, yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilen AlSi9Cu3 (EN AC-46000) alaşımının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testi yapılmıştır. Testler, ISO 6892-1 standardına uygun olarak, 23 ± 2 °C'de ve 5 mm/dak test hızıyla Universal Test Machine (UTM) cihazında gerçekleştirilmiş, her test üç numune ile tekrarlanmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre; akma dayanımı yaklaşık 110 MPa, çekme dayanımı 220 MPa, kopma uzaması %2 ve elastik modül 72 GPa olarak ölçülmüştür. Bu değerler, EN 1706 standardında yüksek basınçlı dökümle üretilmiş ve talaşlı işlem görmüş AlSi9Cu3 alaşımı için belirlenen minimum gereksinimlerin (akma dayanımı 90 MPa, çekme dayanımı 170 MPa, kopma uzaması %1) üzerindedir. Elde edilen mekanik özellikler, elektrik motoru kapağı gibi boyutsal hassasiyet, ısıl iletkenlik ve korozyon direnci gereken parçalarda kullanıma uygundur.



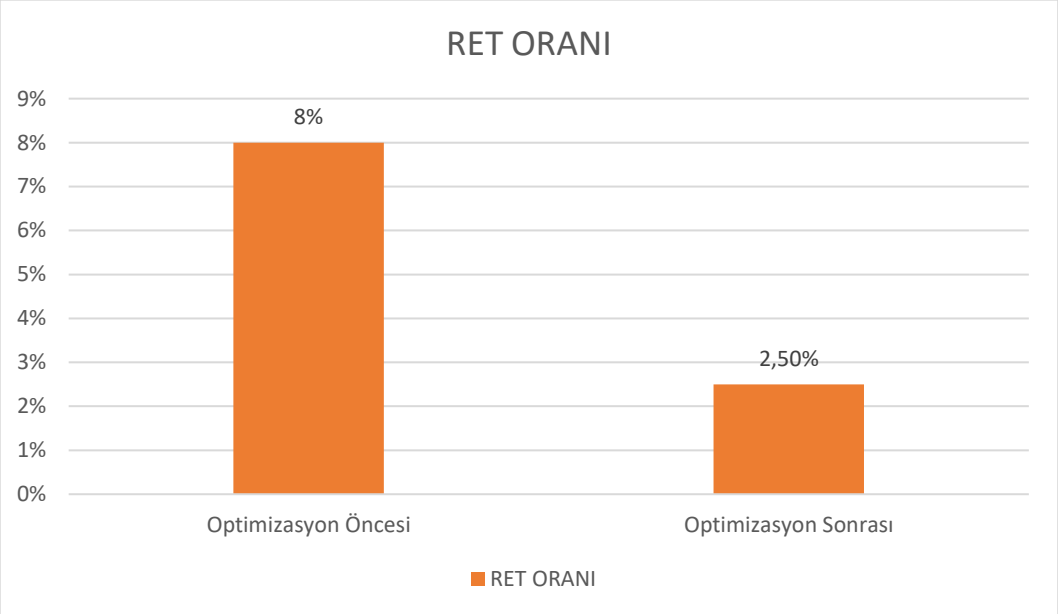
Şekil 6.41 Alüminyum alaşımın çekme deneyi ve sonuçları

6.4 Verimlilik Analizi

Gerçekleştirilen analizler doğrultusunda yapılan optimizasyon çalışmalarının üretim verimliliği ve ürün kalitesi üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Elektrik motoru kapağının üretimine yönelik yapılan tüm iyileştirmeler sonucunda, üretim sürecindeki red oranı %8'den %2,5 seviyelerine düşürülmüştür. Bu gelişme, yalnızca kalite performansında belirgin bir artışa değil, aynı zamanda ret oranlarının azaltılması yoluyla üretim sürecinin ekonomik verimliliğine ve sürdürülebilirliğine de katkı sağlamıştır.

Ayrıca, mevcut kalıp üzerinde yapılan optimizasyon uygulamalarının, yeni bir kalıp tasarımı ve üretimine kıyasla çok daha düşük maliyetle gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir. Yeni kalıp üretimiyle karşılaştırıldığında, optimizasyon süreci daha sınırlı bir bütçeyle tamamlanmış ve bu durum, yatırımın geri dönüş oranı (ROI) açısından dikkate değer bir avantaj yaratmıştır.

Elde edilen bulgular, yapılan tüm çalışmaların kalite standartlarını yükseltmekle kalmadığını, aynı zamanda üretim süreçlerinde kaynakların daha etkin kullanımını mümkün kılarak maliyetleri iyileştirdiği ve üretimde sürdürülebilir iyileştirmeler sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.42 Optimizasyon öncesi-sonrası ret oranı

7
SONUÇ

Bu çalışmada, yüksek basınçlı döküm ile üretilen elektrik motoru kapaklarının tasarımında yapılan iyileştirmeler ve optimizasyonlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Eski tasarımda karşılaşılan döküm hataları, özellikle göbek kısmında yer alan çekinti porozitesinin mekanik özellikleri zayıflatması ve kapağın kullanım ömrünü kısaltması nedeniyle önemli bir sorun teşkil etmekteydi. Bu hataların ortadan kaldırılması ve üretim kalitesinin artırılması amacıyla yapılan iyileştirmeler hem simülasyonlar hem de fiziksel testler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Öncelikle, döküm sürecinde kullanılan yolluk, hava cepleri ve soğutma sistemi gibi tasarım unsurları üzerinde iyileştirmeler yapılmış; yolluk giriş kesit alanı artırılarak akışkanın düzgün bir şekilde kalıba dağılımı sağlanmıştır. Ayrıca, hava ceplerinin küçültülmesi ve chilvent tasarımının eklenmesiyle hava tahliyesi optimize edilmiştir. Bu değişikliklerin, döküm kalitesine olan olumlu etkileri, MagmaSoft yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarla doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, eski tasarımdaki sıcaklık dağılımı ve dolum sürecinde karşılaşılan problemlerin, yeni tasarımla büyük ölçüde giderildiği gözlemlenmiştir. Eski tasarımda, boşlukların oluşması (porozite) gibi istenmeyen durumlar yaşanırken, yeni tasarımda bu tür sorunlar elimine edilmiştir. Ayrıca, hız dağılımındaki iyileşme ve hava tahliyesinin etkinliği, simülasyon sonuçlarıyla ortaya konmuştur. Tasarım iyileştirmelerinin bir diğer önemli unsuru, soğutma sisteminin optimize edilmesidir. Özellikle göbek kısmındaki sıcak noktaların (hot spot) engellenmesi için revize edilen soğutma kanalları, bu sorunları ortadan kaldırmış ve parça içindeki katılaşma sürecini iyileştirmiştir. Ayrıca, dökümdeki porozite sorunu da tamamen giderilmiştir. Sonuç olarak, yapılan tasarım iyileştirmeleri ve süreç optimizasyonları hem simülasyon hem de uygulama aşamalarında olumlu sonuçlar vermiştir. Gerçek döküm sonrası gerekli kalite testleri uygulanmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır, son olarak verimlilik analizleri gerçekleştirilmiş bu sayede elde edilen somut sonuçların katkısı incelenmiştir. Döküm kalitesi artmış, mekanik

özellikler iyileştirilmiş ve üretim sürecinin verimliliği arttırılmıştır. Bu çalışma, döküm süreçlerinin tasarım aşamasında yapılan detaylı analiz ve optimizasyonların, parça kalitesini ve üretim verimliliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Gelecekte benzer çalışmalar, farklı malzemeler ve döküm süreçleri için de uygulanarak, endüstriyel üretim süreçlerinin daha da iyileştirilmesine ve sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

[1] J. Campbell, Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, Butterworth-Heinemann, 2015.

[2] J. Bayley and S. Butcher, The British Museum: A History of the World in 100 Objects, British Museum Press, 2017.

[3] A. Çilingiroğlu and E. Çakır, "Çatalhöyük'te Metal İşçiliği," Anadolu Arkeoloji Dergisi, vol. 15, no. 2, pp. 112–129, 2011.

[4] B. Tülbentçi, Osmanlı Döneminde Tophane ve Top Döküm Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Yayınları, 2010.

[5] O. Kırbaşoğlu, "Sanayi Devrimi ve Osmanlı Teknoloji Transferi," Bilim ve Teknoloji Tarihi Dergisi, vol. 9, no. 1, pp. 33–49, 2016.

[6] M. İnci, "Türkiye'de Döküm Sektörünün Gelişimi ve Sanayileşme Sürecindeki Yeri," Sanayi ve Teknoloji Dergisi, vol. 24, no. 2, pp. 85–102, 2018.

[7] World Foundry Organization (WFO), Annual Report 2023, 2023.

[8] Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD), 2023 Raporu, 2023.

[9] N. Onat, Alüminyum Döküm Teknolojisi, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, Yayın No: 5, ISBN: 978-605-62246-0-7, 2011.

[10] P. W. Cleary, J. Ha, M. Prakash and T. Nguyen, "3D SPH flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components," Applied Mathematical Modelling, vol. 30, pp. 1406–1427, 2006.

[11] S. Aksoy, "Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi ile Etial-140 Alaşımından Üretilen Havalı Fren Kompresör Kapağında Aşınma Direncinin Geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2017.

[12] F. Bonollo et al., New Quality and Design Standards for Aluminum Alloys Cast Products Database on Defects, StaCast FP7-NMP-2012-CSA-6, Project No: 31918, 2013.

[13] A. Advekar, Y. Arunkumar and M. S. Srinath, "Simulation of High Pressure Die Casting Process for Identifying and Minimising Defects," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 4, 2015.

[14] J. Campbell, Complete Casting Handbook, Elsevier, UK, 2011.

[15] I. Y. Okçu, "Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of High Pressure Die Cast Magnesium Az91 Components," M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, 2011.

[16] F. Bonollo, N. Gramegna and G. Timelli, "High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges," The Minerals, Metals & Materials Society, vol. 5, pp. 1047–4838, 2015.

[17] C. Favi, M. Germani and M. Mandolini, "Analytical cost estimation model in High Pressure Die Casting," in Proc. 27th Int. Conf. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), vol. 11, pp. 526–535, 2017.

[18] Aluminum Association, "Strength of Aluminum," [Çevrimiçi]. Erişim: www.aluminum.org/strength-aluminum. Erişim Tarihi: 04.04.2019.

[19] D. Apelian, Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance, NADCA, USA, 2009.

[20] S. Şirin, "Kalın kesitli yüksek basınçlı dökümlerde döküm ve simülasyon parametrelerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2010.

[21] M. Ak, "AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2012.

[22] Z. Dadic, D. Zivkovic, N. Catipovic and J. Bilic, "High pressure die casting mould repair technologies," in Proc. Int. Conf. Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM), Split, 2017.

[23] S. Ö. Ertürk, "Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği ile İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2010.

[24] A. Gözen, "Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.

[25] O. B. Aslan, "Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.

[26] M. Koru and O. Serçe, "Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde, Farklı Yolluk Tipi ve Vakum Uygulamasının Simülasyonu," SDU International Technologic Science - Mechanical Technologies, vol. 6, no. 3, 2014.

[27] E. Fiorese, F. Bonollo and G. Timelli, "New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings," International Journal of Metalcasting, 2015.

[28] E. Gariboldi, F. Bonollo and P. Parona, Handbook of Defects in High Pressure Die Castings, Associazione Italiana Metallurgia, Italy, 2010.

[29] J. M. Patel, Y. R. Pandya and R. C. Patel, "Optimization for Shrinkage Porosity on Aluminium Alloy ADC-12 Material," Int. J. for Scientific Research & Development, vol. 5, no. 9, 2017.

[30] E. Gariboldi, F. Bonollo and M. Rosso, "Proposal of a Classification of Defects of High-Pressure Die Casting Products," La Metallurgia Italiana, June 2007.

[31] Basic Aluminum, "Die Casting Quality Control," [Çevrimiçi]. Erişim: basicaluminum.com/die-casting-quality-control/. Erişim Tarihi: 10.04.2019.

[32] A. Doğan, O. Kenar, B. Erdil and E. Altuncu, "Effect of Different Air Venting Designs on Porosity in High Pressure Aluminum Die Casting Process," in Proc. 19th Int. Metallurgy and Materials Congress, 2018.

[33] P. Vispute and D. Chaudhari, "Utilizing Flow Simulation in the Design Phase of a Casting Die to Optimize Design Parameters and Defect Analysis," Materials Today: Proceedings, vol. 4, pp. 9256–9263, 2016.

[34] J. Boyce, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, Elsevier, 2012.

[35] A. Hughes, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, Elsevier, 2013.

[36] T. Gonen, Electric Machines: Analysis and Design, CRC Press, 2014.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Sempozyum Bildirileri

1. Onur BALTA, Ali Serdar VANLI, "Alüminyum alaşımlı elektrik motor kapaklarının yüksek basınçlı döküm prosesinde kalıp optimizasyonun ürün kalitesi ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri," *Mühendislikte Sürdürülebilir Çözümler Sempozyumu-Grad symposium 25*, Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kongre ve Kültür Merkezi, İstanbul, Türkiye, 15 May 2025, Poster sunumu.